

Agradecimentos

Agradeço ao Professor Doutor Dawei por toda a dedicação e empenho.

Aos meus colegas de laboratório, Nídia Batista e Rui Pereira.

Aos meus amigos e colegas, David Faria, Josiana Prado e Adérito Santos, a união faz a força sem dúvida alguma.

À minha mãe que foi sem dúvida o propulsor de todos os meus estudos.

À minha família, que sempre me apoiou e continua apoiar.

Ao meu companheiro Bruno Cardoso, por toda a paciência e amor.

Sumário

São propostas novas cavidades de bombeamento para lasers solares do estado sólido de Nd: YAG com o objectivo de melhorar a potência laser de saída e eficiência de bombeamento.

São implementados quatro sistemas de guias de onda, um dos sistemas é simétrico e bombeado lateralmente, sendo os restantes três sistemas bombeados lateralmente e pela extremidade.

A influência da geometria dos guias de onda no desempenho do bombeamento, o perfil do feixe à saída dos guias e a absorção por parte do cristal de Nd:YAG são optimizados minuciosamente, sendo modelados através do software Zemax.

A cavidade de ressonância e as características do feixe são modelados em Lascad.

Construíram-se e testaram-se três guias de onda de secção, octogonal, cilíndrica e quadrada.

A potência laser multimodo para o sistema ótico bombeado por guia de onda cilíndrica de 20mm de diâmetro e concentrador cónico, foi de 21W, representando uma eficiência de colecção de 11.6W/m^2 , apresentando um erro de colecção para $\Delta X=1.3\text{mm}$ de 4.4%.

Simbologias e Notações

G_{sc}	Constante solar
E_f	Energia do fóton
h	Constante de Plank
ν	Frequência da Radiação
N_0	Número de átomos no estado fundamental
N_A	Número de átomos que, por unidade de tempo, absorvem radiação
N_{esp}	Número de átomos que sofrem emissão espontânea
N_{est}	Número de átomos que sofrem emissão estimulada
ρ_ν	Densidade de radiação
$p_{0,1}$	Probabilidade de um átomo absorver radiação
$(p_{1,0})_{est}$	Probabilidade para a emissão estimulada
$(p_{1,0})_{esp}$	Probabilidade para a emissão espontânea
A	Coeficiente de Einstein referente a probabilidade de ocorrer emissão espontânea
B	Coeficiente de Einstein referente a probabilidade de ocorrer emissão estimulada

T	Temperatura
K	Constante de Boltzman
C	Velocidade da luz no vazio
α	Atenuação do Sinal
η_{espelho}	Reflectividade

Índice de matérias

Agradecimentos	I
Sumário	II
Simbologia e Notações.....	III
Índice de Matérias.....	V
Índice de Figuras	VII
Índice de Tabelas.....	IX
Prefácio	X
1 Princípios e fundamentos de um laser.....	1
1.1 Pequena introdução histórica aos lasers	3
1.2 Importância da emissão estimulada	4
1.3 Inversão da População	7
1.4 Cavityde ressonante	9
1.4.1 Ganho Laser	9
1.4.2 Modos de ressonância	10
1.4.3 Laser contínuo e pulsado	11
1.5 Laser solar do estado sólido.....	13
1.5.1 Breve Introdução aos lasers do estado sólido.....	13
1.5.2- Etapas de produção de um laser solar de Nd: YAG	14
1.5.3- Análise não -sequencial de traçado de raios e análise por elementos finitos ...	16
1.5.4- Meio Activo – Nd:YAG	17
1.6 Referência.....	20
2 Sol como fonte de energia	23
2.1 Características gerais	23
2.2 Constante solar	24
2.3 Distribuição espectral da radiação solar	25
2.4 Vantagens e desvantagens da energia solar	27
2.5 Referências	20

3 Guias de onda de sílica fundida.....	30
3.1- Propriedades do guia de onda de sílica fundida	30
3.2-Concentrador solar.....	33
3.2.1-Concentrador parabólico	33
3.3- Sistema de guias de onda.....	36
3.3.1 Sistema de guias de onda com bombeamento simétrico	36
3.3.2 Guia de onda de secção quadrada	37
3.3.3 Sistema de guia de onda octogonal.....	40
3.3.4 Sistema de guia de onda cilíndrica	41
3.4- Protótipo dos guias de onda	42
3.4.1-Introdução	42
3.4.2- Construção	42
2.4.3- Montagem experimental.....	44
2.4.4- Resultados experimentais	47
3.5 Referências	48
4 Estudo de traçado não sequencial e análise de elementos finitos	49
4.1 Bombeamento simétrico “3 side- pumped” de lasers solares	53
4.2 Bombeamento “1-end-side-pumped” de lasers solares por guia de onda quadrangular	58
4.3 Bombeamento “1-end-side-pumped” de lasers solares por guia de onda octogonal	65
4.4 Bombeamento “1-end-side-pumped” de lasers solares por guia de onda cilíndrica	68
4.4.1 Bombeamento “1-end-side-pumped” de lasers solares por guia de onda cilíndrica de 15mm e 20 mm de diâmetro sem erro de colecção.....	70
4.4.2 Bombeamento “1-end-side-pumped” de lasers solares por guia de onda cilíndrica de 15mm e 20 mm de diâmetro sem erro de colecção.....	72
4.5 Referências	75
5 Conclusões e perspectivas futuras	76
5.1 Referências.....	80

Índice de figuras

Fig.1.1-Emissão espontânea (a) e estimulada (b) emissão de moléculas excitadas	5
Fig.1.2-Cavidade de ressonância	10
Fig.1.3-Modos de ressonância	11
Fig.1.4-Diagrama de um sistema laser do estado sólido	15
Fig.1.5-Níveis de energia do laser de Nd: YAG	17
Fig.1.6-Espectro de emissão solar e espectro de absorção do Nd:YAG	19
Fig.2.1- Espectro de emissão solar à superfície da Terra	24
Fig.2.2-Espectro de distribuição de intensidade solar	25
Fig.3.1-Espectro de transmissão da sílica fundida	31
Fig.3.2-Sistemas de guias de onda	32
Fig.3.4-Concentrador parabólico	34
Fig.3.7-Sistema de guias com bombeamento simétrico	36
Fig.3.8-Guia de secção quadrada	38
Fig.3.9-Potência de saída dependente do comprimento do guia de onda	39
Fig.3.10-Guia de onda octogonal	40
Fig.3.11-Sistema de guia de onda cilíndrica	41
Fig.3.12-Materiais utilizados no processo de limagem e polimento	43
Fig.3.13-Protótipo do guia de onda	43
Fig.3.14-Guia de onda cilíndrica e octogonal	44
Fig.3.15-Sistema de guia de onda e base de suporte	45
Fig.3.16-Concentrador parabólico e seus constituintes	45
Fig.3.17-Transporte de luz nos guias de onda	46
Fig.3.18-Medição da potência na saída do guia de onda	47
Fig.4.1-Concentrador parabólico e fonte solar no simulador	51
Fig.4.2-Configuração do sistema óptico simétrico	53
Fig.4.3-Configuração de bombeamento do sistema óptico simétrico	54
Fig.4.4-Vista pormenorizada da cavidade de bombeamento do Sistema óptico simétrico	54
Fig.4.5-Distribuição da radiação ao longo do cristal – Sistema simétrico	55
Fig.4.6- Potência de saída laser dependente da reflectividade do espelho para sistema simétrico	56
Fig.4.7- Potência absorvida por saída laser sistema simétrico	56
Fig.4.8-Distribuição térmica dentro do cristal	57

Fig.4.9- Desenho técnico da cavidade de bombeamento	59
Fig.4.10-Sistema de arrefecimento	60
Fig.4.11- Cavidade de ressonância	60
Fig.4.12- Imagem da cavidade de bombeamento construída.....	61
Fig.4.13-Reflectividade em função do comprimento de onda para diversos materiais	61
Fig.4.14- Distribuição de energia na saída do guia de onda de secção quadrada de lado 11mm	62
Fig.4.15- Distribuição de energia na saída do guia de onda de secção quadrada	62
Fig.4.16- Distribuição da radiação ao longo do cristal	63
Fig.4.17 - Potência de saída laser dependente da reflectividade do espelho para sistema de guia de onda de secção quadrada	64
Fig.4.18 - Potência absorvida por saída laser – Sistema óptico com guia de onda de secção quadrada e lado 11mm	64
Fig.4.19-Distribuição térmica no cristal – Sistema óptico com guia de secção quadrada	65
Fig.4.20- Distribuição de energia na saída do guia de onda de secção octogonal	66
Fig.4.21- Distribuição ao longo do cristal para a guia de onda octogonal	66
Fig.4.22 - Potência de saída laser dependente da reflectividade do espelho para sistema de guia de Secção octogonal	67
Fig.4.23- Potência absorvida por saída laser sistema octogonal	67
Fig.4.24-Distribuição térmica no cristal no sistema com guia de onda octogonal	68
Fig.4.25- Imagem da distribuição de energia na saída do guia de onda cilíndrico de 20mm de diâmetro.....	70
Fig.4.26 -Gráfico da potência de saída laser em função da reflectividade do espelho guia de 20mm diâmetro.....	71
Fig.4.27 - Potência absorvida por saída laser sistema guia cilíndrica de diâmetro 20mm sem erro de colecção.....	71
Fig.4.28 -Distribuição Térmica ao longo do cristal – sistema guia cilíndrica de 20mm diâmetro.....	72
Fig.4.29 - Potência de saída laser em função da reflectividade do espelho guia de 20mm diâmetro com erro de colecção	73
Fig.4.30 - Potência absorvida por saída laser sistema guia cilíndrica de diâmetro 20mm com erro de colecção.....	73
Fig.5.1- Potência absorvida pelo cristal em função do comprimento da secção de entrada dos guias de onda.....	78

Índice de Tabelas

Tab.1.1-Propriedades físicas e ópticas do Nd: YAG	18
Tab.3.1-Características do concentrador parabólico	35
Tab.3.2-Eficiência de transferência em potência de sistema guia de onda com bombeamento simétrico.....	37
Tab.3.3- Eficiência de transferência de potência para diferentes áreas de entrada de secção quadrada	38
Tab.3.4-Eficiência de transferência para diferentes comprimentos e secção quadrada de 15mm	39
Tab.3.5-Potência transmitida pelos guias de onda e respectiva eficiência na transmissão	47
Tab.4.1-Potência absorvida pelo Nd: YAG num sistema com guia de onda simétrica	55
Tab.4.2-Potência absorvida pelo Nd: YAG num sistema com guia de onda quadrada	62
Tab.4.3-Potência absorvida pelo Nd: YAG num sistema com guia de onda octogonal	65
Tab.4.4-Potência absorvida pelo Nd: YAG num sistema com guia de onda cilíndrica.....	69
Tab.4.5-Resumo das características do sistema com guia de onda de diâmetro 15mm e 20mm	74
Tab.5.1-Resultados da cavidade de ressonância para os diferentes sistemas de bombeamento	79

Prefácio

O trabalho presente nesta tese foi efectuado para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Física, realizado no Departamento de Física da Universidade Nova de Lisboa.

Este projecto decorreu sob orientação do Prof. Dawei Liang e decorreu entre os meses de Janeiro e Julho de 2009.

O trabalho apresenta uma grande componente experimental, acompanhado de modulação computacional.

A tese contém uma parte introdutória sobre lasers e o sol como fonte de energia. No capítulo seguinte é feito um estudo sobre guias de onda e construídos três protótipos.

No quarto capítulo são efectuadas as modelações dos sistemas ópticos e o estudo de absorção do cristal nos quatro sistemas de bombeamento. São ainda modeladas as características da cavidade de ressonância e analisados os parâmetros obtidos.

No último capítulo discutem-se as conclusões da investigação e apresentam-se perspectivas futuras.

Capítulo 1

Princípios e fundamentos de um laser

1	Princípios e fundamentos de um laser	1
1.1	Pequena introdução histórica aos lasers	3
1.2	Importância da emissão estimulada	4
1.3	Inversão da População	7
1.4	Cavidade ressonante	9
1.4.1	Ganho Laser	10
1.4.2	Modos de ressonância	11
1.4.3	Laser contínuo e pulsado	12
1.5	Laser solar do estado sólido	13
1.5.1	Breve Introdução aos lasers do estado sólido	13
1.5.2	Etapas de produção de um laser solar de Nd: YAG	14
1.5.3	Análise não -sequencial de traçado de raios e análise por elementos finitos	16
1.5.4	Meio Activo – Nd:YAG	17
1.6	Referência.....	20

1 Princípios e fundamentos de um Laser

1.1 - Pequena introdução histórica sobre os lasers

A palavra “laser” é um acrónimo vindo da língua inglesa para “Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation” que em português traduz-se para ampliação da Luz pela Emissão Estimulada da Radiação. O Laser não é apenas um amplificador, mas sim um gerador – cavidade óptica ressonante capaz de acoplar a luz emitida e o meio amplificador, usando uma fonte de energia [1].

A palavra Laser que em tempos poderia ser tabu para a maior parte das pessoas tornou-se parte do vocabulário de todos no século XXI.

A primeira experiência que utiliza a noção de emissão espontânea remonta a 1954 por Charles Townes com a criação de um MASER (Microwave Amplification By Stimulated Emission of Radiation) que é uma amplificação microondas por emissão estimulada de radiação, o maser foi assim, o precursor do laser. Embora o conceito de emissão estimulada já tivesse sido explicado por A. Einstein em 1917, sendo a base dos Lasers e dos Masers.

Em 1958, Charles Townes e Arthur Schawlow, perceberam que esses estudos poderiam ser estendidos à faixa espectral que vai dos microondas até a luz visível, mostraram teoricamente que é possível utilizar átomos para gerar um maser óptico, que foi denominado Laser, isto é, simplesmente um maser que produzisse radiação na região visível do espectro electromagnético, o que conhecemos por luz [2].

Posteriormente, em 1963 Kiss e Al. [3], publicaram a descrição de uma experiência que foi o ponto de partida do que hoje denominamos laser solar.

Em 1966, Young[4] obtém o primeiro laser solar de onda contínua com uma potência de saída de 1W.

Desde então as mais variadas experiências têm sido desenvolvidas.

A Faculdade de Ciências e tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, tem feito estudos nesta área e contribuído para o seu avanço e inovação [5], [6].

1.2 - Importância da emissão estimulada

Antes de se entender os conceitos associados a um laser, é necessário interiorizar a noção de emissão estimulada e os conceitos quânticos associados à absorção e emissão de luz.

Pela teoria Quântica, as moléculas possuem determinados níveis discretos de energia. Esta teoria prevê que apenas certas configurações das órbitas dos electrões são permitidas para cada átomo e que apenas certas frequências e amplitudes vibracionais, e certas taxas de rotação são permitidas para uma molécula particular. Cada combinação possível de órbitas dos electrões, vibração e rotação pode ser identificada com um nível particular de energia, que representa a soma dos três tipos de energia. Ou seja, a energia está quantizada. Uma molécula ou um átomo não podem ter valores arbitrários de energia, como tal, se a energia de um sistema está quantizada, as energias libertadas e absorvidas de um sistema também vão estar quantizadas. Esta noção tem consequências cruciais sobre a estrutura da matéria.

A luz pode ser considerada uma fonte que emite partículas de energia. Estas partículas denominam-se quanta de luz ou fotões. O processo de absorção ocorre quando um fotão incide numa molécula, e ela é promovida a um estado de energia superior, nesse instante, o fotão é aniquilado e a energia transferida para a molécula. Para este processo ocorrer, é necessário que a energia do fotão E_f ($E_f = h\nu$) incidente seja igual à diferença de energias entre o estado final e inicial da molécula. Como só existem níveis discretos, apenas certas frequências de luz podem ser absorvidas, este é o princípio principal da espectroscopia.

As moléculas excitadas, isto é, inicialmente no nível final, podem decair para o estado fundamental emitindo radiação durante este processo. Este decaimento espontâneo ocorre porque as moléculas no estado excitado tem um tempo de vida finito, pois tal estado não é energeticamente o mais estável. Se a energia da radiação absorvida é igual à energia emitida diz-se que há ressonância.

A liberação de energia pode se dar na forma de calor ou como emissão de radiação electromagnética.

O conceito de emissão estimulada foi desenvolvido por Albert Einstein em 1917. Para entender este processo imaginemos o caso anterior em que uma molécula foi excitada para um nível superior sob as condições referidas. Se incidir um fotão no sistema com energia igual à diferença de energias entre o nível inicial e final, o fotão libertado possui exactamente a mesma frequência e fase do fotão responsável pelo estímulo, o que significa que são coerentes e a sua soma amplifica a intensidade luz. Neste caso, os fotões não são absorvidos, originando-se um processo de amplificação. Os dois tipos de emissão são ilustrados na Fig.1.1.

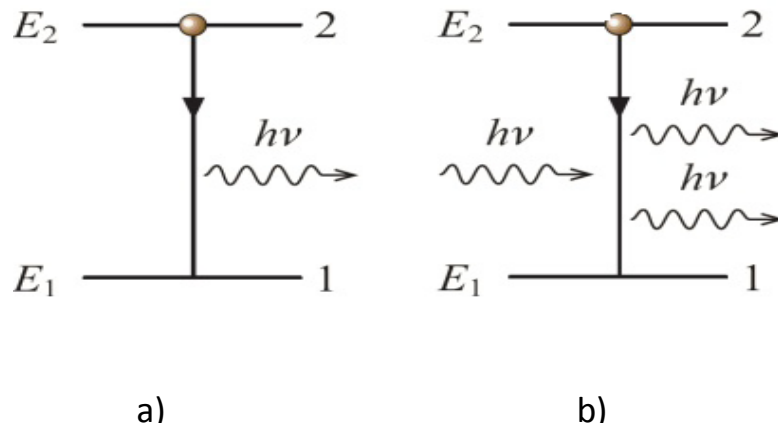


Fig.1.1 Emissão espontânea (a) e estimulada (b) de moléculas excitadas

Para um sistema em equilíbrio térmico, é constante o número de átomos em cada estado energético [7]. Estudemos o numero de átomos que absorvem radiação, emitem radiação espontaneamente e por estimulação.

Consideremos N_0 o número de átomos que se encontram no estado fundamental e N_A o número de átomos que, por unidade de tempo, absorvem radiação, tem-se [8]:

$$N_A = N_0 \rho_\nu(T) p_{0,1} \quad (1.1)$$

Em que $\rho_\nu(T)$ é a densidade de radiação e $p_{0,1}$ a probabilidade de um átomo absorver, por unidade de tempo, a radiação de energia igual à diferença de energia entre os níveis.

Considerando $(p_{1,0})$ a probabilidade de transição, por átomo, para a emissão espontânea, então, o número de átomos por unidade de tempo que sofrem emissão espontânea é [9]:

$$N_{esp} = N_1 (p_{1,0})_{esp} \quad (1.2)$$

Em que N_1 é o número de átomos no estado de energia E_1 .

Denote-se que o número de átomos que sofrem emissão espontânea não depende da radiação incidente.

O número de átomos, que transitam para o estado E_o por emissão estimulada, do nível E_1 para o nível E_o é [10]:

$$N_{est} = N_1(p_{1,0})_{est} \rho_v(T) \quad (1.3)$$

Em quem $(p_{1,0})$ é a probabilidade, por átomo, para a emissão estimulada, do nível E_1 para o nível E_o .

Consideremos um determinado número de átomos encerrados, em equilíbrio térmico N_1 , N_0 não variam no tempo. O número de átomos que absorvem a radiação é igual a:

$$N_A = N_{est} + N_{esp} \quad (1.4)$$

Substituindo a equação (1.1), (1.2) e (1.3) em (1.4) obtemos

$$N_0 \rho_v(T) p_{0,1} = N_1(p_{1,0})_{esp} + N_1(p_{1,0})_{est} \rho_v(T) \quad (1.5)$$

Da equação (1.5) obtém-se:

$$\rho_v(T) = \frac{\frac{(p_{1,0})_{esp}}{(p_{1,0})_{est}} \cdot \frac{1}{\frac{N_0}{N_1} - 1}}{\frac{(p_{0,1})}{(p_{1,0})_{est}}} \quad (1.6)$$

Pela Mecânica estatística, quando um grande número de partículas se encontra em equilíbrio térmico, à temperatura T ,a razão entre os dois níveis populacionais é dada pela razão de Boltzmann[11]

Sendo K a constante de Boltzman e N_2 e N_1 dois estados genéricos.

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{\frac{-(E_2-E_1)}{kT}} \quad (1.7)$$

Esta equação só é válida para sistemas atômicos onde não existam estados degenerados.

Substituindo a equação (1.7) em (1.6) obtemos

$$\rho_v(T) = \frac{A_{10}}{\frac{B_{10}}{\frac{B_{01}}{B_{10}}} \cdot \frac{1}{e^{\frac{q}{KT}} - 1}} \quad (1.8)$$

No equilíbrio térmico, P_v deve ser igual a densidade espectral do corpo negro dada pela relação de Planck:

$$\rho_v = \frac{8\pi h\nu^3 / c^3}{\exp(h\nu / k_B T) - 1} \quad (1.9)$$

Comparando as duas equações obtemos:

$$\frac{A_{10}}{B_{10}} = \frac{8\pi h}{\lambda^3} \quad (1.10)$$

e

$$\frac{B_{01}}{B_{10}} = 1 \quad (1.11)$$

Estes resultados foram obtidos pela primeira vez por Einstein em 1917 e são por isso conhecidos como coeficientes de Einstein.

1.3 Inversão da população

A radiação laser resulta do princípio da emissão estimulada, em que um electrão é estimulado por um fóton a libertar energia, transitando para um nível de energia inferior. O fenómeno da emissão estimulada é tanto mais eficiente quanto mais povoado estiver o nível de energia mais elevado.

Modelos atómicos e moleculares actuais, assentam os seus princípios na distribuição Boltzman em que estados de maior energia estão sempre menos povoados que os estados fundamentais, assim, numa população molecular, a maioria das moléculas encontram-se no estado fundamental, enquanto apenas uma pequena percentagem encontra-se em estados excitados.

A maior parte dos átomos encontram-se no estado fundamental, logo normalmente ocorre absorção. É necessário então, que tenhamos mais átomos excitados do que no estado fundamental e assim termos amplificação em vez de absorção.

Pela Mecânica estatística, quando um grande número de partículas se encontra em equilíbrio térmico, a razão entre os dois níveis populacionais é dada pela equação (1.9).

Então se:

$N_2 > N_1$ a emissão estimulada excede a absorção $\implies$ Amplificação

$N_1 > N_2$ a absorção excede a emissão estimulada $\implies$ Atenuação

No equilíbrio térmico tem-se sempre $\frac{N_2}{N_1} < 1$ logo não existe inversão da população.

Diz-se que existe inversão de população se o número de átomos no estado de energia E_2 fica muito maior do que o seu valor no equilíbrio térmico. Com a inversão de população, os processos de emissão ficam mais importantes do que os processos de absorção.

No entanto a inversão da população apesar de ser uma condição necessária para a acção laser, não é uma condição suficiente porque o limite mínimo ou valor do ganho deve ser grande o suficiente para superar as perdas e manter oscilações.

A probabilidade de ocorrência de emissão espontânea é inversamente proporcional ao tempo de vida do estado excitado, recorrendo ao coeficiente de Einstein da emissão espontânea entre dois estados, por exemplo 1,2 obtemos:

$$\tau_{12} = \frac{1}{A_{12}} \quad (1.12)$$

Nos casos em que o valor do tempo de vida de emissão espontânea seja elevado para determinados pares de estado electrónico, a probabilidade de emissão espontânea é muito baixa, estes estados são designados por estados metaestáveis. Então se nestes estados a probabilidade de ocorre emissão espontânea é menor, as condições de emissão estimulada são favorecidas.

Os fótons resultantes da emissão estimulada têm que estar confinados no sistema de forma a serem utilizados para desencadear mais processos de emissão estimulada, consegue-se colocando o meio activo dentro de uma cavidade ressonante óptica.

1.4 Cavityde ressonante

Um oscilador laser é constituído por três elementos: uma fonte de bombeamento, um material activo (meio de amplificação) e uma estrutura óptica ressonante composta por dois espelhos colocados perpendicularmente ao eixo de produção do feixe laser. Um dos espelhos apresenta uma reflectividade de 100% enquanto o outro é parcialmente reflector (95%-99%), permitindo que uma grande percentagem de fotões que ao incidirem neste espelho volte ao meio activo, permitindo também a saída do feixe laser.

Estes dois espelhos definem a cavityde ressonante e asseguram que exista uma continuidade da emissão, ao dirigirem os fotões no meio activo ao longo do eixo principal da cavityde. Os fotões que sofreram emissão espontânea com comprimentos de onda e ou direcção incorrecta são perdidos, os fotões estimulados deslocam-se continuamente ao longo da cavityde, criando mais fotões por emissão estimulada.

A cavityde de um laser permite amplificar apenas a intensidade de fotões com o mesmo comprimento de onda, direcção e polarização. Os átomos estão contidos numa cavityde que é fechado nas extremidades pelos dois espelhos que ajudam a confinar a luz emitida ao longo da cavityde. No processo, essa luz, ao atingir outros átomos, induzem – os também a emitir luz da mesma cor (que está associada ao comprimento de onda dessa luz), amplificando o processo.

A condição fundamental para o funcionamento de um laser é que o ganho seja maior que as perdas.

Esta condição depende do bombeio, da realimentação e da eficiência do meio de ganho laser.

A realimentação pode se modificada usando espelhos mais ou menos reflectores.

Num oscilador laser existem sempre perdas de energia, perdas por absorção, difracção, reflexão e espalhamento. Para um cristal de Nd: YAG $\alpha_{\text{absorção}} = 0.003 \text{ cm}^{-1}$.

$$\alpha_{\text{total}} = 2L\alpha_{\text{absorção}} + 0.006 \quad (1.13)$$

1.4.1 Ganho Laser

O início da oscilação laser é determinado pela condição de limiar de oscilação, que expressa o equilíbrio que se estabelece entre o ganho do ressonador activo e a totalidade de perdas do sistema. O estado estacionário da oscilação é alcançado quando a taxa de amplificação é equilibrada pela taxa de perda (lasers contínuos).

As perdas totais durante o processo são devidas a vários factores tais como a absorção, espalhamento, difracção e reflexão.

O laser só pode funcionar se a energia do feixe aumentar a cada passagem pelo meio activo.

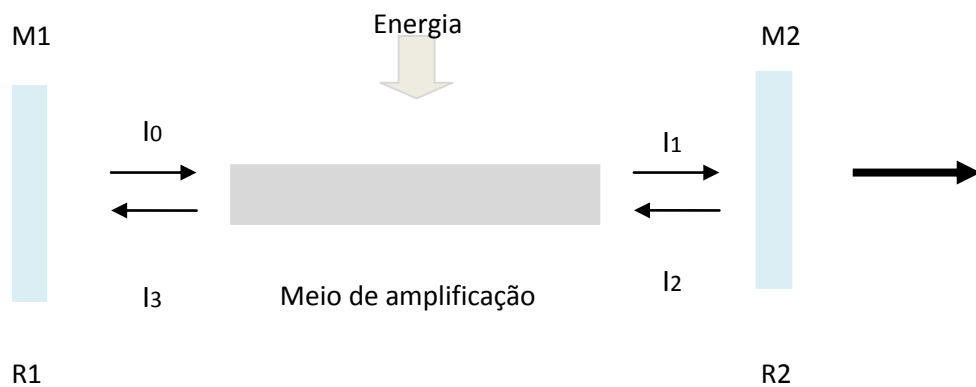


Fig.1.2- cavidade de ressonância

$$I_3 = GI_2 = G[RI_1] = G[R\{GI_0\}] = G^2 RI_0 \geq I \quad G^2 R \geq 1 \quad (1.14)$$

Então se G for superior à unidade, a frequência de ressonância do sistema laser vai sofrer uma amplificação, caso G seja inferior à unidade, as transições estimuladas provocam o despovoamento do nível superior diminuindo o valor de G .

Essa intensa radiação produzida dentro da cavidade laser pode ser extraída, por exemplo, através de um pequeno orifício central num dos espelhos que constituem a cavidade laser, originando o feixe unidireccional de luz.

1.4.2 - Modos de ressonância

A luz é composta por ondas electromagnéticas. A distribuição da luz laser dentro da cavidade ressonante é controlada por campos eléctricos e magnéticos ao longo das cavidades reflectoras.

As frequências discretas da radiação laser podem ser associadas com diferentes modos do ressonador. Cada modo é definido pela variação do campo electromagnético perpendicular ao eixo do ressonador. As distribuições permitidas do campo electromagnético através do maior eixo da cavidade ressonante são denominadas TEM_{mn} “*transverse electromagnetic waves*”.

Os índices m e n são inteiros que indicam, para qualquer secção transversa do feixe, o número de linhas nodais que intersectam os eixos x e y . Estes modos transversos influenciam o perfil espacial de irradiância do feixe laser.

O modo de mais baixa ordem é o TEM_{00} chamado de modo-único, ou modo fundamental. Este modo apresenta um perfil de intensidade gaussiano, com o seu máximo a ocorrer no centro do eixo do feixe. Para modos de mais alta ordem, o máximo de intensidade ocorre simetricamente fora do centro do eixo.

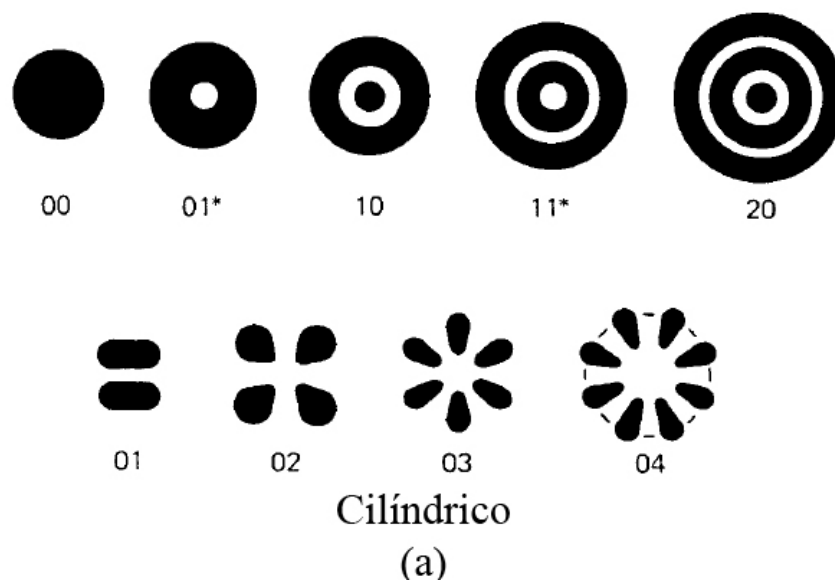


Fig.1.3 Modos de ressonância [12]

1.4.3 - Laser contínuo e pulsado

Os lasers do estado sólido podem funcionar de modo contínuo ou de modo pulsado. No modo pulsado, a saída tem uma duração pequena. Neste modo, o feixe de luz é transmitido de forma não contínua, produzindo uma sequência de “flashes” separados por curtos intervalos de tempo.

Quando o modo de operação do laser é contínuo, a saída é contínua, existindo apenas pequenas flutuações na potência de saída. Neste modo de operação a fonte de bombeamento também tem que ser contínua.

Um dos problemas reside no facto destas fontes de bombeamento contínua produzirem um sobreaquecimento do material, produzindo calor que não é necessário para bombear o laser. Como tal estes lasers requerem um sistema de refrigeração, para que o laser possa funcionar eficientemente sem a existência de estragos nos componentes do sistema óptico.

Os lasers solares deste projecto são de Nd: YAG e são do tipo contínuo.

1.5 Laser solar do estado sólido

1.5.1 Breve Introdução aos lasers do estado sólido

Os lasers, podem ser classificados quanto à intensidade e produção (Pulsada ou Contínua) do feixe, ao tipo de radiação (cor), desenho e tamanho da cavidade, podendo a cavidade ser de dimensões microscópicas ou atingir metros de comprimento.

Entre os vários meios activos para a produção de um laser solar, os materiais de estado sólido apresentam muitas vantagens comparadas com outros materiais, tais como, alta densidade de energia, simplicidade de construção e segurança. No entanto apresentam uma desvantagem, no que diz respeito à remoção de calor. Apresentam perdas de absorção devidas parcialmente às imperfeições do material do cristal laser e às impurezas do material puro que o cristal tem.

Os lasers do estado sólido apresentam geralmente como meio activo, matrizes de vidro ou materiais cristalinos, ao qual é adicionada um dopante. Estas matrizes devem ter boas propriedades ópticas, mecânicas e térmicas, para suportar as condições extremas de sistemas laser práticos. Propriedades requeridas são por exemplo a dureza, inércia química e facilidade de fabricação. Preferencialmente, os materiais devem permitir altas densidades de dopante e dimensões úteis finais adequadas para uso como meio de ganho.

O uso da matriz de vidro em comparação com sólidos cristalinos possui determinadas vantagens, a sua capacidade de atingir tamanhos grandes é uma dessas vantagens. Os meios laser de vidro apresentam menores valores de população invertida disponível para uma frequência única do que os meios cristalinos, considerando o mesmo nível de bombeamento.

1.5.2- Etapas de produção de um laser solar de Nd: YAG

A obtenção de um laser solar implica uma série de etapas, ao longo do qual a energia é transferida, em que o objectivo final é sempre obter o máximo de energia solar transferida no cristal, com o mínimo de perdas durante este processo.

No entanto, associado à transferência de energia estão associadas perdas. A evolução dos concentradores primários (tanto a nível dos instrumentos utilizados bem como as suas dimensões) e o desenvolvimento de novos esquemas dos elementos das ópticas secundárias utilizadas contribuíram de forma crucial para a melhoria do desempenho dos lasers solares e consequente diminuição das perdas.

Da radiação incidente no cristal, uma percentagem da radiação não é absorvida devido as características do meio activo de apenas absorver determinados comprimentos de onda. A nível atómico existem ainda 3 mecanismos responsáveis por perdas de energia, a fluorescência (luz emitida com um comprimento de onda diferente do laser), emissão espontânea (tem o mesmo comprimento de onda do laser mas não se dá ao longo do eixo óptico) e o aquecimento resultante das vibrações da rede.

Um laser bombeado com luz solar exige um colector de concentração solar no qual incide a radiação solar que será concentrada no foco. A distribuição de energia depende das características do concentrador primário, das condições climáticas e do alinhamento.

Concentrada a energia no foco, esta é colectada pela guia de onda, esta transmissão depende de vários factores, como: Geometria, dimensões, alinhamento com o foco, reflectividade. Seguidamente, a energia é direccionada para a cavidade laser, onde se pretende maximizar a potência na superfície do cristal. Muitas vezes são utilizados cavidades de bombeamento, de diversas geometrias, tais como CPC [6], concentradores cónicos, maximizando assim a densidade de potência na superfície do cristal.

A função fulcral no desenvolvimento de um sistema laser é a de determinar como o seu desempenho é afectado pelas características dos seus componentes: Fonte radiante (sol), guias de onda, cavidade de bombeamento, meio activo (Nd:YAG) e cavidade de ressonância.

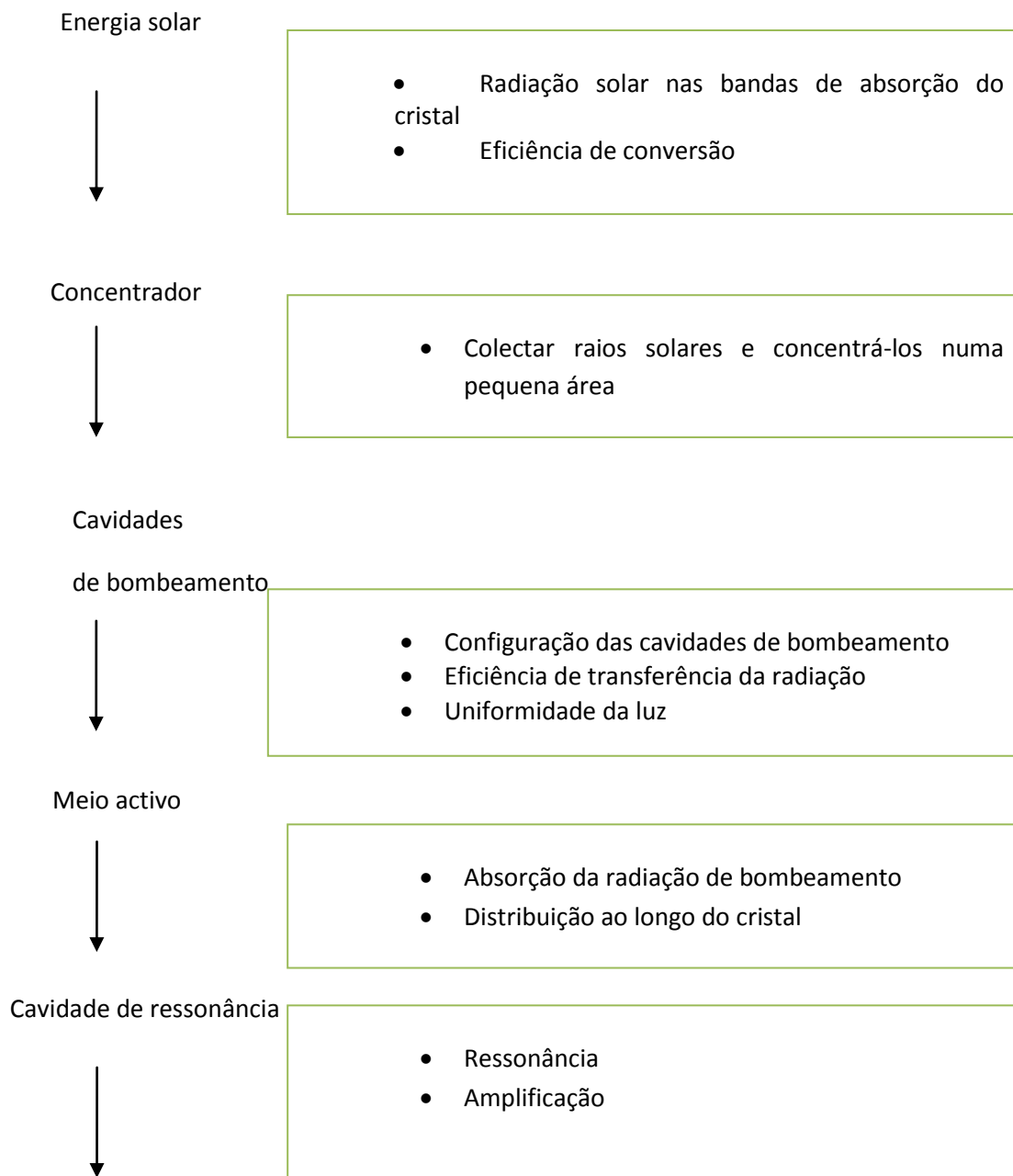


Figura 1.4 - Diagrama de um sistema laser do estado sólido

1.5.3- Análise não -sequencial de traçado de raios e análise por elementos finitos

Para desenhar, otimizar e analisar sistemas ópticos a 3D, recorreu-se ao software de simulação *Ze maxTM*. Este software permite estudar o percurso dos raios de luz à medida que estes interagem com os componentes dos sistemas ópticos. O traçado de raios é não sequencial e permite calcular a potência absorvida num determinado objecto. A potência absorvida dentro do objecto calcula-se somando a radiação absorvida fazendo uso do programa Excel. Para tal, coloca-se um detector volúmico com as mesmas dimensões que as do objecto e retiram-se os dados relativos ao objecto. No entanto, a análise não sequencial apenas fornece a mancha focal no detector e os valores da potência absorvida, não fornecendo qualquer valor nem características da saída laser.

Seguidamente, os dados referentes à absorção no cristal são analisados com o software de análise de cavidades laser *LASCADTM*, permitindo a modelação da cavidade e o estudo do feixe laser. É então possível obter a potência absorvida por saída laser multi-modo, distribuição térmica dentro do cristal, eficiência de transferência com erro de colecção, qualidade do feixe laser, que para os feixes laser multi-modo, calculam-se através dos parâmetros de qualidade do feixe M_x^2 e M_y^2 para as diferentes cavidades de ressonância e perdas ao longo do cristal "*Ressonator round-trip loss*".

O programa *LASCAD* permite a análise da cavidade de ressonância. O ressonador óptico é obtido quando colocamos entre o cristal dois espelhos. Um dos espelhos é totalmente reflector (TR) e outro parcialmente reflector (PR). Posteriormente, a potência de saída é optimizada variando a reflectividade do espelho parcialmente reflector, tendo em conta o diâmetro do cristal e o seu comprimento. No presente estudo foi utilizado um cristal de 5mm e comprimento $L=25\text{mm}$, para todos os sistemas dimensionados.

Com base nos parâmetros obtidos, é feito um estudo sobre os quatro tipos de lasers de alta potência implementados.

1.5.4- Meio Activo – Nd:YAG

Os cristais dopados com iões de Terras Raras são os materiais mais usados como meios activos em lasers de estado sólido, as suas propriedades ópticas e físicas permitem a construção de lasers de alta potência.

Em lasers de estado sólido bombeados com luz solar a dopagem do cristal é de extrema importância, pois permite absorver o espectro da luz solar de forma eficaz.

O neodímio, Nd^{3+} foi o primeiro dos iões trivalentes de Terras Raras a ser usado num laser e permanece largamente como o mais importante elemento nesse grupo, em que as suas principais transições são descritas por um sistema de quatro -níveis ideal.

Do grande número de materiais cristalinos dopados com neodímio, destaca-se o Nd: YAG, de estrutura cúbica, sendo o mais antigo e o mais usado, devido à sua boa qualidade óptica, alta condutividade térmica, dureza, e é o menos dispendioso.

Com o uso de apenas dois níveis é impossível produzir uma inversão de população (pelo menos estacionária). Assim, os esquemas laser usualmente utilizados são esquemas de três-níveis ou de *quatro-níveis*, que utilizam o número correspondente de níveis do conjunto de infinitos níveis de energia de um determinado sistema físico.

O laser de Nd: YAG é um sistema que funciona a quatro níveis, o diagrama dos níveis de energia para o ião neodímio no YAG é apresentado na figura 1.5.

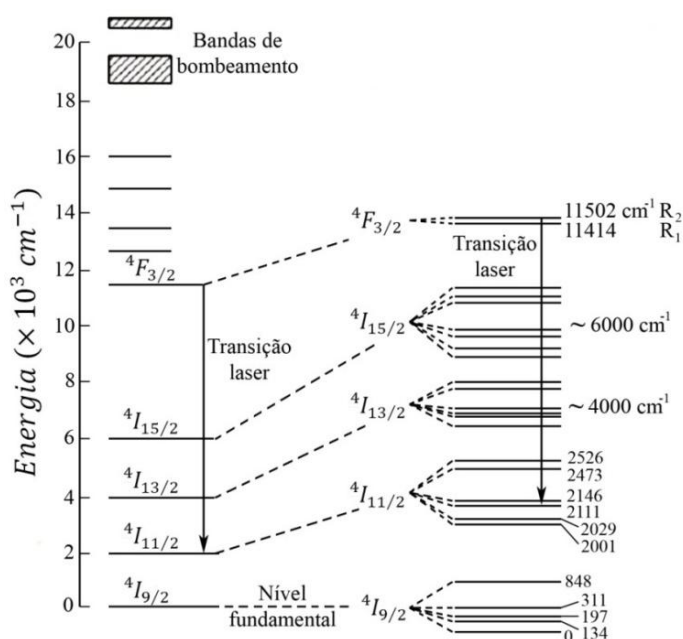


Figura 1.5 - Níveis de energia do laser de Nd: YAG [13]

O estado ${}^4I_{9/2}$ é o estado fundamental, é deste estado que os electrões são excitados para as bandas de bombeamento.

Posteriormente, os electrões decaem das bandas de bombeamento para o estado metaestável ${}^4F_{3/2}$, cujo tempo de relaxação é $230 \mu s$, efectuando de seguida transições para os estados ${}^4I_{19/2}$, ${}^4I_{11/2}$, ${}^4I_{13/2}$, ${}^4I_{15/2}$. A oscilação laser mais forte do Nd: YAG ocorre com comprimento de onda de $1064 nm$ (principal componente do espectro de transição do Nd:YAG), entre os níveis ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$, com uma probabilidade de 0.60.

Na tabela que se segue são apresentadas um quadro resumo com algumas propriedades físicas e ópticas importantes do Nd:YAG.

Tabela 1.1-Propriedades físicas e ópticas do Nd: YAG

<i>Propriedades</i>	<i>Valor</i>
Fórmula química	$Nd : Y_3Al_5O_{12}$
Estrutura do cristal	cúbica
Ponto de fusão(°C)	1970
Densidade (g / cm^3)	4.56
Tensão de ruptura (kg / cm^2)	$1.3 - 2.6 \times 10^3$
Módulo de elasticidade (kg / cm^2)	3×10^3
Tempo de vida de fluorescência espontânea	$230 \mu s$
Energia do fotão a $1.06 \mu m$	$h\nu = 1.86$
Índice de refração	1.82
Perda por dispersão	$\alpha = 0.002 cm^{-1}$

A eficiência de bombeamento do material laser depende da relação entre o espectro de absorção do material com o espectro de emissão da fonte usada, a correlação entre o espectro de absorção do cristal e o espectro de emissão do Sol à superfície da Terra u seja

A correlação entre o espectro de absorção do material Nd: YAG e o espectro de emissão solar à superfície da Terra é 14%, sendo esta a percentagem de absorção da radiação solar no Nd: YAG.

O espectro de absorção do material Nd: YAG (1%) foi incluído na análise de traçado de raios.

Na fig.1.6 encontra-se ilustrado o espectro de emissão solar e o espectro de absorção do Nd:YAG:

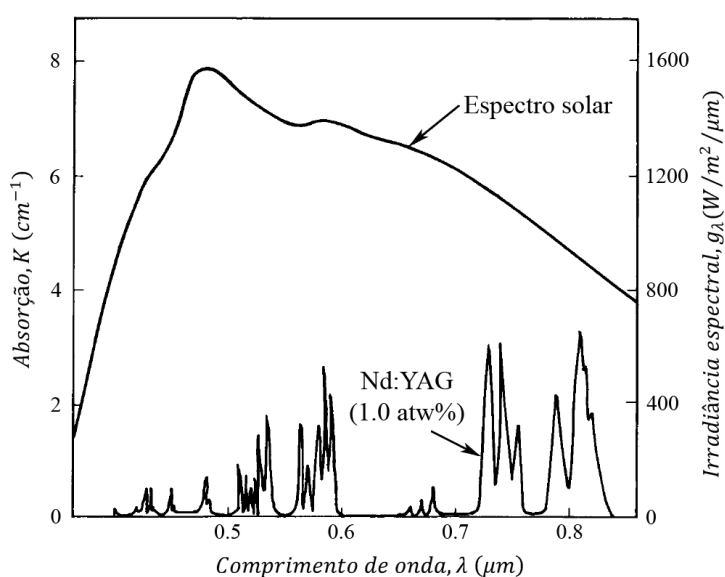


Figura 1.6-Espectro de emissão solar e espectro de absorção do Nd:YAG. [14]

Através da figura qq coisa pode-se observar que as regiões mais importantes do espectro de absorção do Nd: YAG situam-se nas regiões de 730-760nm e 790-820nm, porque além de apresentarem picos de absorção máximo, situam-se na zona dos infravermelhos, o que não causa um elevado aquecimento do cristal

1.6 Referências

- [1] Hélder Crespo, “*O Legado de Einstein*”, Colóquio do CFIF Instituto Superior Técnico, 10 Novembro 2005
- [2] Charles Townes e Arthur L. Shawlow. “Infrared and optical Masers”, Physical Review
- [3] Z.J. Kiss, H.R. Lewis and R.C. Duncan, JR., “Sunpumped continuous optical maser” Applied Physics Letters vol.2, no.5, pp.93-94, 1964
- [4] C.G. Young, “A sun-pumped CW one watt laser”, Applied Optics, vol.5, no.6, pp. 993-997, 1966.
- [5] Dawei Liang, L. Fraser Monteiro, M. Ribau Teixeira, M.L. Fraser Monteiro, M. Collares-Pereira, Fiber-optic solar energy transmission and concentration, Solar Energy Materials and Solar Cells 54 (1998) 323 -331.
- [6] João P. Geraldès, Dawei Liang, An alternative solar pumping approach by a light guide assembly elliptical-cylindrical cavity, Solar Energy Materials & Solar Cells 92 (2008) 836–843.
- [7], [8], [9], [10] Lidia Salgueiro, J. Gomes Ferreira, Introdução à Física Atómica e Nuclear Vol. I pág. 229
- [11] W. Koechner, Solid State Laser Engineering, 4^a ed. Berlin, Germany, Springer-Verlag, pág. 4.
- [12] W. Koechner, Solid State Laser Engineering, 4^a ed. Berlin, Germany, Springer-Verlag, pág. 173.
- [13] W. Koechner, Solid State Laser Engineering, 4^a ed. Berlin, Germany, Springer-Verlag, pág. 173.
- [14] M. Weksler and J. Schwartz, “Solar pumped solid-state lasers”, IEEE Journal of Quantum Electronics, vol 24, no. 6, pp. 122-1228, 1998.

Capítulo 2

Sol como fonte de energia

2 Sol como fonte de energia	23
2.1 Características gerais	23
2.2 Constante solar	24
2.3 Distribuição espectral da radiação solar	25
2.4 Vantagens e desvantagens da energia solar	27

2 O Sol como fonte de energia

2.1 - Características gerais

O sol é o maior astro do sistema solar, representa cerca de 99,7% da massa deste sistema. Têm um diâmetro de $1,39 \times 10^6$ km e uma distância média da Terra de 1.49×10^6 km ou 1 unidade astronómica (UA), como tal não pode ser considerada uma fonte radial pontual. Apresenta temperaturas na ordem de 5800k à superfície e no núcleo pode chegar a 15.000.000K.

A energia solar é a designação para qualquer tipo de captação de energia solar, e posterior transformação dessa energia em alguma forma utilizável pelo homem. Os métodos de captura da energia solar classificam-se em directos ou indirectos:

Directo, quando existe apenas uma transformação para fazer da energia solar um tipo de energia utilizável pelo homem, nesse caso são necessários grandes concentradores, para concentrar a energia solar num pequeno ponto. Indirecto, significa que precisará haver mais de uma transformação para que surja energia utilizável, geralmente necessitam de um auxílio de dispositivos eléctricos, mecânicos ou químicos para aumentar a quantidade de energia solar.

2.2 - Constante Solar

A constante solar é definida como sendo a taxa de energia solar total para todos os comprimentos de onda incidentes por unidade de área. A área considerada está num plano normal aos raios solares e à distância de uma unidade astronómica.

A importância do seu valor tem sido alvo de constantes estudos, apesar de existirem valores normalizados e aceite pela comunidade científica.

O valor fixo aceite pela NASA para a constante solar é de 1353 W/m^2 com um erro de $\pm 1.5\%$.

A WRC (World Radiation Center) efectuou uma série de medições, recomendando o uso de 1367 W/m^2 .

C.G. Abbot, nos seus estudos recomenda um valor da constante solar de 1322 W/m^2 , sendo revisto por Johnson e tendo o valor de 1395 W/m^2 [1].

Alguns registos científicos acerca de irradiâncias apontam indicam que em condições favoráveis (céu limpo) a irradiância pode atingir os 1000 W/m^2 .

2.3 - Distribuição espectral da Radiação solar

A distribuição espectral da radiação que atinge a superfície terrestre é muito importante em diversas aplicações, por exemplo, na selecção de materiais que vão ser expostas à radiação solar. Tais como, laser por bombeamento solar, células solares, desenho de sistemas térmicos de naves especiais.

A radiação solar é recebida na superfície da terra, após ter sido submetido a mecanismos de atenuação, reflexão e dispersão na atmosfera terrestre. Estes factores alteram a intensidade da radiação solar à medida que atravessa a atmosfera terrestre.

A radiação recebida sem mudança de direcção é chamada radiação directa, enquanto a radiação recebida após a sua direcção ter sido alterada pelo espalhamento e reflexão é chamada radiação difusa. A soma da radiação difusa e da radiação directa é referida como radiação total.

Vários modelos físicos têm sido propostos para determinar a radiação directa e total da radiação solar. O Solarmet é um modelo físico que simula os efeitos atmosféricos na radiação solar, fazendo uso de imagens obtidas por satélites [2].

O espectro de emissão solar à superfície terrestre encontra-se ilustrado na figura 2.1

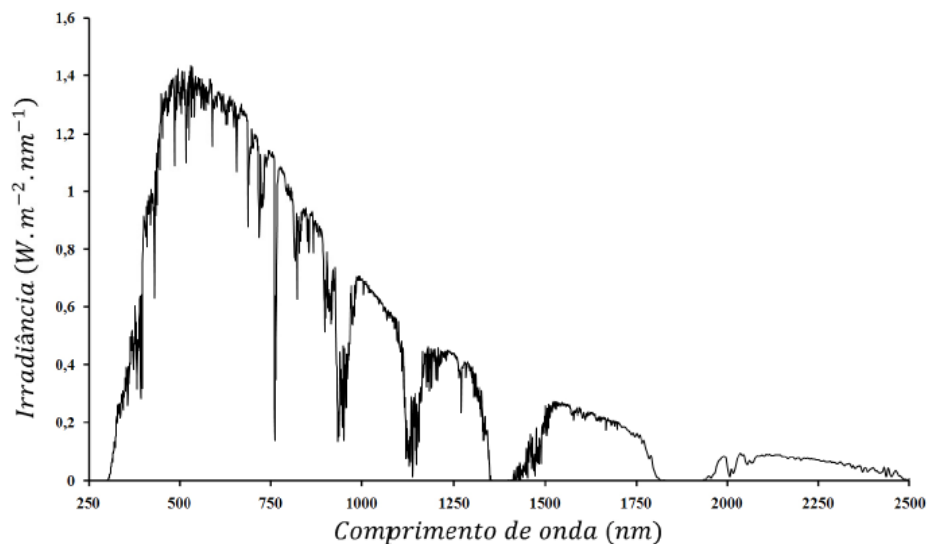


Fig.2.1- Espectro de emissão solar à superfície da Terra [3]

Considerando 920W/m^2 de irradiação solar à superfície da Terra, a concentração de radiação solar no foco do espelho irá atingir 1217W , como se verá no próximo capítulo. Mas, apenas 14% [4] da potência solar se encontra nas bandas de absorção do material Nd: YAG, consequentemente, 227W de potência são assumidos no software de análise de raios para simular a potência de bombeamento solar efectiva.

Foi introduzido no Zemax o espectro standard de distribuição de intensidade solar seguinte.

Wavelength Data					
Use	Wavelength (μm)	Weight	Use	Wavelength (μm)	Weight
☒ 1	0.52700000	65	☒ 13	0.79000000	57
☒ 2	0.53100000	70	☒ 14	0.79300000	66
☒ 3	0.56800000	82	☒ 15	0.80300000	65
☒ 4	0.57800000	87	☒ 16	0.80500000	64
☒ 5	0.58600000	88	☒ 17	0.80800000	63
☒ 6	0.59200000	88	☒ 18	0.81100000	62
☒ 7	0.73200000	81	☒ 19	0.81500000	61
☒ 8	0.73600000	80	☒ 20	0.82000000	60
☒ 9	0.74300000	80	☒ 21	0.86500000	49
☒ 10	0.74600000	78	☒ 22	0.88000000	46
☒ 11	0.75300000	77	☐ 23	0.55000000	1
☒ 12	0.75800000	76	☐ 24	0.55000000	1
Select ->		F, d, C (Visible)	Primary:		1
OK		Cancel	Sort		
Help		Save	Load		

Figura 2.2- Espectro de distribuição de intensidade solar [5]

2.4- Vantagens e desvantagens da energia solar

A energia solar como forma de energia solar alternativa apresenta vantagens e desvantagens. As vantagens relativamente a outras formas de energia são:

- É não poluente;
- Ao contrário das energias fósseis ou nuclear, a energia solar está disponível em quantidades ilimitadas e é gratuita;
- é gratuita, apesar dos custos iniciais para a sua utilização a longo prazo são compensatórios;
- Geopoliticamente, a energia solar, em conjunto com outras energias renováveis, reduz a dependência energética de possíveis zonas críticas e de conflitos internacionais.

No entanto, também apresenta algumas desvantagens:

- Os preços são muito elevados em relação aos outros meios de energia;
- A energia solar apenas pode ser utilizada em dias de céu limpo, pois a potência disponível depende das condições atmosféricas, o que obriga a que existam meios de armazenamento da energia produzida;
- As formas de armazenamento da energia solar são pouco eficientes quando comparadas por exemplo aos combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás), a energia hidroelétrica (água)
- A radiação solar não é regular devido a reflexão, espalhamento e absorção dos raios solares;
- Como o sol não é considerado uma fonte pontual, quando a luz solar incide no concentrador, apenas a componente directa pode ser submetida a um processo de concentração dos raios.

2.5 Referências

- [1] J. A. Duffie and W. A. Beckman, Solar Engineering of Thermal Process ,Chapter 7,edited by John Wiley & Sons, Inc. 1991.
- [2] E. Cogliani , P. Ricchiazzi , A. Maccari, Physical model SOLARMET for determinating total and direct solar radiation by meteosat satellite images, Solar Energy 791–798, 2007,81.
- [3] American Society for Testing and Materials (ASTM) (<http://www.astm.org/>)
- [4] Handbook of Optics Vol. II
- [5] M. Weksler and J. Shwartz, “Solar pumped solid-state lasers”, IEEE Journal of Quantum Electronics, vol 24, no. 6, pp. 122-1228,1998.

Capítulo 3

Guias de onda de sílica Fundida

3 Guias de onda de sílica fundida.....	30
3.1- Propriedades do guia de onda de sílica fundida	30
3.2-Concentrador solar.....	33
3.2.1-Concentrador parabólico	33
3.3- Sistema de guias de onda.....	36
3.3.1 Sistema de guias de onda com bombeamento simétrico	36
3.3.2 Guia de onda de secção quadrada	37
3.3.3 Sistema de guia de onda octogonal.....	40
3.3.4 Sistema de guia de onda cilíndrica	41
3.4- Protótipo dos guias de onda	42
3.4.1-Introdução	42
3.4.2- Construção	42
2.4.3- Montagem experimental.....	44
2.4.4- Resultados experimentais	47
3.5 Referências	48

3 Guias de onda de sílica fundida

3.1- Propriedades do guia de onda de sílica fundida

A guia de onda é um condutor de raios ópticos constituída por material dieléctrico transparente, tais como o vidro ou o plástico e transmite a radiação electromagnética sob a forma de luz numa direcção paralela ao seu eixo.

A forma como se propaga um sinal óptico através da guia de onda depende da sua estrutura. A guia de onda pode ter várias geometrias, dependendo da aplicação, tais como cilíndrica, paralelepípedica, cónica ou elíptica

Muitas vezes o termo fibra óptica é utilizado como sinónimo de guia de onda, efectivamente existem vários tipos de guias de onda, e de vários tipos de materiais. A guia de onda distingue-se da fibra óptica pela inexistência da camada protectora dieléctrica, a bainha, facto que possibilita a contaminação da superfície e também a abertura numérica. O guia de onda tem uma abertura numérica igual a 1, aceitando Ângulos até 90° , enquanto a fibra óptica costuma ter uma abertura numérica mais baixa, entre 0.22 e 0.4, devido à existência da casca.

Devido à existência de inúmeros tipos de vidros, leva a que, de acordo com a aplicação que se pretenda se use o material com as características que permitam um trabalho mais eficiente.

Características como o índice de refração, espectro de transmissão, características térmicas, mecânicas e eléctricas.

Para as investigações deste trabalho, utilizaram-se guias de onda de sílica fundida SiO_2 , cuja função é transmitir a energia que é concentrada no foco do espelho para o cristal. Permitindo a uniformidade da luz e evitar perdas devido a erros de colecção.

O espectro de absorção da sílica fundida foi introduzido nos materiais do software, já tendo em conta as perdas por absorção.

Na figura 3.1 apresenta-se o espectro de transmissão da sílica fundida.

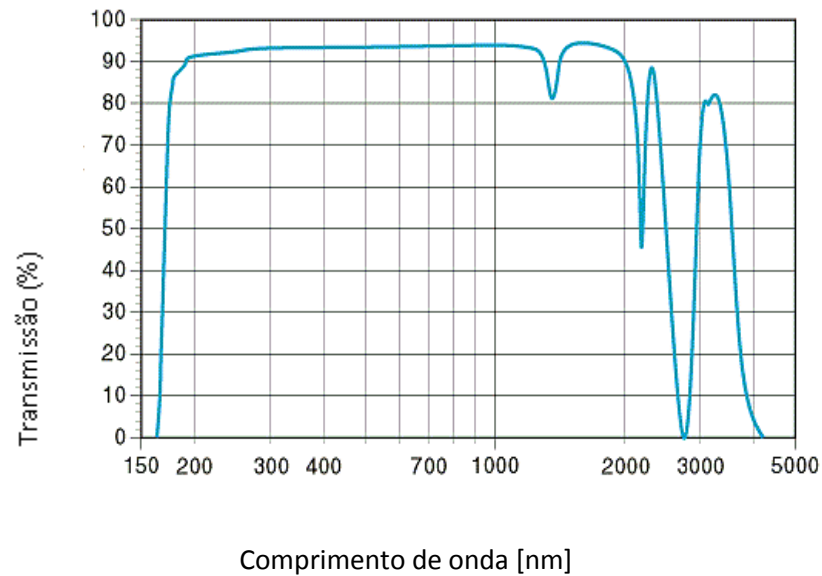


Fig.3.1- Espectro de transmissão da sílica fundida [1]

Um dos factores a ter em conta nos resultados no que diz respeito ao estudo de guias de onda é a atenuação, devido à absorção intrínseca pelos átomos que constituem o material e absorção extrínseca pelas impurezas no material dieléctrico, que é dada pela equação (3.1)

$$\alpha = \frac{10}{l} \text{Log} \left(\frac{P_{\text{entrada}}}{P_{\text{saída}}} \right) \quad (3.1)$$

A eficiência de transmissão da guia de onda é determinada através da equação 3.2

$$\eta = \frac{P_{\text{saída}}}{P_{\text{entrada}}} \times 100\% \quad (3.2)$$

Nos próximos subcapítulos é feito um estudo sobre a eficiência das guias de ondas que vão ser utilizadas no sistemas de bombeamento solar. Como concentrador, é utilizado o espelho parabólico com as características descritas na tabela 3.1 e considerada uma irradiância solar de 900w/m^2 .

Devido ao facto de o sol se encontrar a uma distância média de 1.49×10^6 km da Terra, a imagem do sol no foco não vai ser pontual, mas sim, uma mancha de aproximadamente 8mm.

Neste trabalho foram desenvolvidas várias configurações de sistemas de guias de onda. São vários os factores que se têm em conta ao introduzir novas configurações. O melhor sistema de bombeamento depende da eficiência de transmissão da guia de onda, uniformidade da luz, absorção do cristal, facilidade de construção e economia, laser produzido e distribuição térmica. De acordo com estes parâmetros foram testados 4 sistemas de bombeamento.

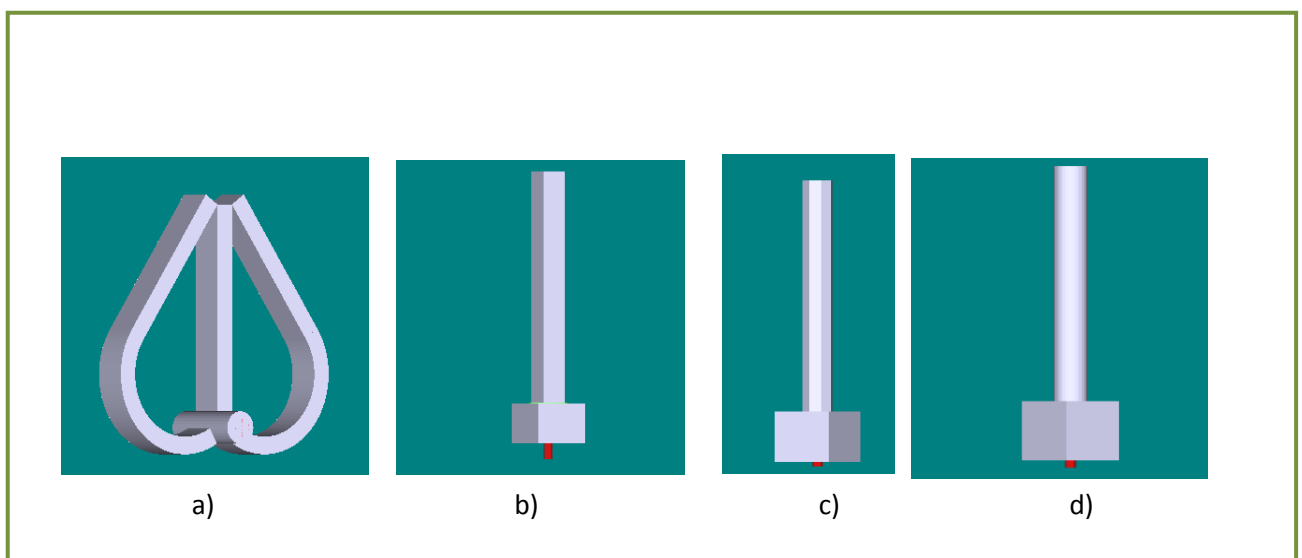


Fig.3.2- Sistemas de guias de onda

- a) 3 -side-pumped
- b) 1-end- side pumped
- c) 1-end-side pumped
- d) 1-end-side pumped

3.2-Concentrador solar

Desde a infância que a ideia de concentrar a luz está presente no nosso dia-a-dia, se não o fizemos, já vimos alguém fazer, sol, madeira e uma simples lupa.

Os concentradores solares podem ser reflectores ou refractores, cilíndrico ou superfícies de revolução e contínuo ou segmentado. Muitos modos de monitoramento são possíveis.

As razões de Concentração podem variar ao longo de várias ordens de grandeza. Com esta ampla gama de desenhos ou modelos, é difícil desenvolver análises gerais aplicáveis a todos os concentradores.

Existe uma variedade de *designs* de concentradores. Eles são no entanto, classificados em duas grandes categorias ópticas, concentrador óptico formador de imagem e concentrador óptico não formador de imagem.

Nos concentradores formadores de imagem existe uma importância associada à imagem formada pelo concentrador óptico no receptor, para que o receptor seja suficientemente pequeno de modo a atingir a homogeneidade na distribuição da imagem formada, assim, este tipos de concentrador têm a vantagem de possuir alto poder de concentração.

Por outro lado, nos concentradores não formadores de imagem não existe o interesse em formar uma imagem, e assim o receptor pode ser grande o suficiente, mas a sua concentração é menor que nos concentradores formadores de imagem.

3.2.1 Concentrador parabólico

O concentrador utilizado neste trabalho é o concentrador formador de imagem tridimensional, denotado espelho parabólico. Cuja função é a reflexão de raios paralelos ao seu eixo, provenientes da fonte solar, direccionando-os para o foco, aumentando o fluxo energético. O espelho utilizado é o representado na figura 3.3, as suas principais características estão sintetizadas na tabela 3.1.



Fig.3.3- Concentrador parabólico

Devido à estrutura não possuir um sistema de seguimento automático é necessário fazer ajustes manuais para se conseguir um melhor alinhamento.

O espelho parabólico obedece a equação

$$y = ax^2 \quad (3.3)$$

Onde a constante a define a natureza da abertura da parábola em causa, para o nosso espelho $a=0.38$

$$y = 0.38x^2 \quad (3.4)$$

A distância focal, f, indica a posição do foco, e é dada pela expressão [2]

$$f = \frac{1}{4.a} = \frac{1}{4.0.38} = 0.66mm \quad (3.5)$$

O foco encontra-se na posição (0;0.66).

O ângulo de aceitação, que representa o ângulo de incidência máximo com que um raio é colectável no foco [3]

$$\phi_{\max} = \arctan\left(\frac{x_{\max}}{f - y_{\max}}\right) \quad (3.6)$$

Este parâmetro diz-nos que se colocarmos uma guia de onda no foco, o ângulo máximo de incidência de um raio solar é de 60° .

A potência total colectada pelo espelho, vai depender da sua reflectividade η (razão entre a radiação total reflectida concentrada no foco e a radiação incidente na superfície do espelho), da área plana A e da irradiância solar I_0 em que $\eta_{\text{espelho}} = 85\%$. Esta grandeza pode ser calculada pela expressão:

$$P = \eta_{\text{espelho}} I_0 A \quad (3.7)$$

O intervalo de potência determina-se considerando a Irradiância entre $800W / m^2$ e $1000W / m^2$

Tab.3.1 Características do concentrador parabólico

Característica	Valor
Diâmetro	1.52 m
Distância focal	0.66m
Tamanho do foco	R=8.23mm
Área de colecção	$1.82 m^2$
Ângulo de aceitação	60°
Potência	1237,1547 W

3.3 Sistemas de guias de onda

3.3.1) Sistemas de guias de onda com bombeamento simétrico

O primeiro sistema de guias de onda é simétrico, onde foram utilizadas três guias de onda para formar o sistema óptico. Foram testadas vários comprimentos e regiões de entrada dos guias de onda, apresentando sempre uma face rectangular mas de diferentes aberturas. As regiões de saída também são rectangulares, apresentando a mesma área que a área de entrada.

Na tabela 3.2 apresentam-se apenas as alterações mais importantes e de compreensão superior no estudo de guias de onda com bombeamento simétrico.

Áreas de entrada maiores colectam mais energia solar no foco e como consequência maior será a potência na saída dos guias de onda, no entanto a nível de absorção do cristal este aumento implica cristais maiores e como tal maiores perdas por ressonância na cavidade laser.

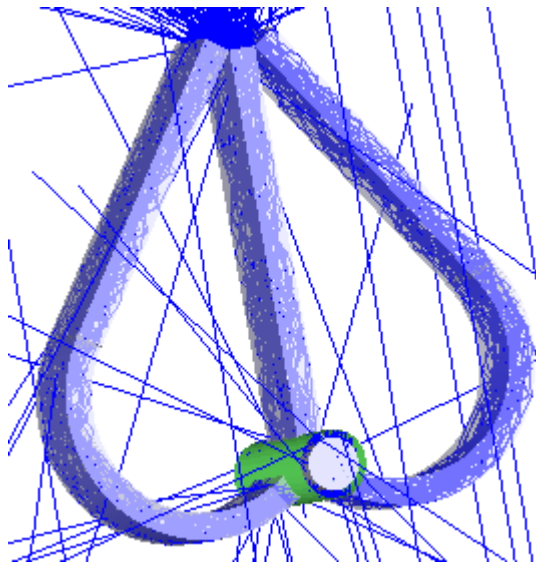


Fig.3.7- Sistema de guias com bombeamento simétrico

Tabela 3.2-Eficiência de transferência em potência de sistema guia de onda com bombeamento simétrico

Área [mm ²]	Potência à saída do guia de onda[w]	Potência à saída do sistema[w]	Eficiência[%]
5x16	155	652	83
5x16	340		
5x16	157		
6x16	166	696	83
6x16	368		
6x16	165		
5x16	144	696	83
8x16	410		
5x16	142		
8x16	159	659	82
5x16	338		
8x16	158		
5x20	180	720	83
5x20	360		
5x20	181		
5x30	193	760	83
5x30	380		
5x30	193		
5x35	198	808	83
5x35	412		
5x35	198		

3.3.2) Guia de onda de secção quadrada

Este subcapítulo dedica-se ao estudo de guias de onda de secção quadrada, foram realizados várias simulações com diferentes áreas de entrada e igual comprimento, de modo a maximizar a eficiência total dos sistemas implementados. Numa segunda fase será feito um estudo da eficiência de transmissão para diferentes comprimentos de guia de onda. Na tabela 3.3 encontram-se os valores de eficiência de transmissão para as diferentes secções de entrada.

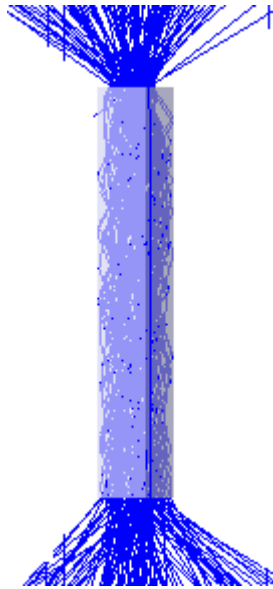


Fig.3.8-Guia de onda de secção quadrada

Tabela 3.3- Eficiência de transferência de potência para diferentes áreas de entrada de secção quadrada

Área [mm ²]	10x10	14x14	15x15	16x16
Eficiência entrada guia %	57	68	70	71
Eficiência saída guia %	87	88	88	88
Potencia a saída do guia [w]	623	754	770	783

O aumento da secção da guia de onda aumenta a potência colectada e consequentemente a eficiência na entrada do guia de onda e a potência à saída.

No entanto, existem sempre perdas devido a reflexões no seu interior, daí a eficiência na saída ser inferior quando comparada com a eficiência na entrada.

O aumento de energia colectada quando se aumenta a secção de entrada não terá como consequência um melhor bombeamento do cristal, depende da geometria e dimensões da secção de entrada do guia de onda, da forma como a energia é distribuída no cristal e do tipo de bombeamento. Daí, o estudo de todos os componentes que vão produzir o laser solar necessitarem de um estudo adequado e minucioso.

Verifica-se uma eficiência de transmissão ao longo do guia de onda de secção quadrada de 88%.

Mantendo a secção de entrada e de saída do cristal em 15mm, fez-se variar o comprimento da guia de onda e obtiveram-se a potência à saída da guia e respectiva eficiência, cujos resultados estão sumariados na tabela 3.4.

Tabela 3.4 Eficiência de transferência para diferentes comprimentos e secção quadrada de 15mm

Comprimento [mm]	120	110	100	80	60	40
Potência saída da Guia [w]	780	770	759	750	730	711.8

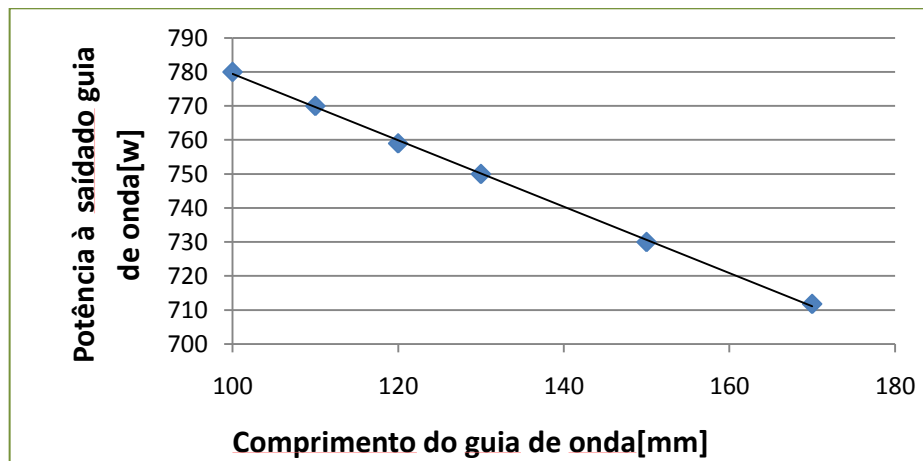


Fig.3.9 - Potência de saída dependente do comprimento para guias de onda com 15mm de lado

A partir da figura 3.9 pode-se obter uma relação entre as perdas por transmissão e os comprimentos dos guias de onda. Estas perdas mostram ter uma relação linear com o comprimento, que podem ser explicadas através da existência de reflexões imperfeitas que aumentam com o comprimento do guia de onda.

3.3.3) Sistema de guias de onda octogonal

O estudo da eficiência da transmissão de luz por guia de onda octogonal foi realizado com a construção de um guia de onda octogonal através do programa de desenho Solidworks.

Todas as alterações referentes a sistemas de bombeamento com guia de onda octogonal foram realizadas no programa Solidworks e importados para o Zemax.

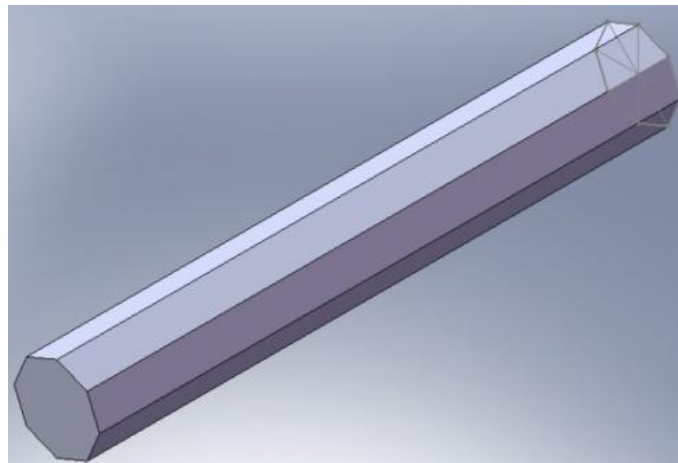


Fig.3.10 - Guia de onda octogonal

Uma série de testes foram realizados com diversas dimensões de altura e secção de entrada e saída para garantir um máximo de transferência de energia do foco para a saída das guias de onda.

As conclusões a nível de eficiência versus altura da guia de onda e secção são similares às conclusões para uma guia de onda de secção quadrada. Como tal, apenas é apresentado um valor de eficiência para posteriores comparações e conclusões.

Com uma guia de onda octogonal regular de 110mm e secção 15mm, obtém-se uma eficiência na entrada do guia de onda de 70%, e uma eficiência de 84% na transmissão de luz ao longo da guia de onda.

3.3.4) Sistema de guias de onda cilíndrica

Para finalizar o estudo das guias de onda, foi desenvolvido um sistema de uma guia de onda cilíndrica. Foram testados vários comprimentos da guia de onda e secções de entrada, para o mesmo comprimento de 110mm.

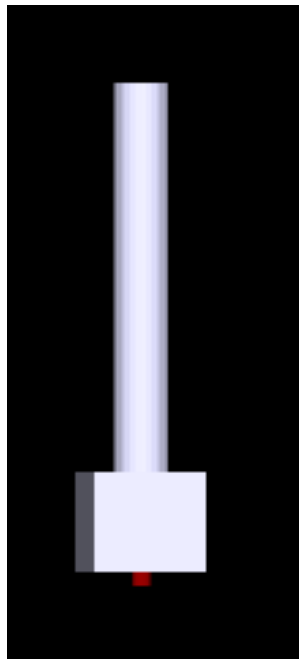


Fig.3.11 - Sistema de guia de onda cilíndrica

Para uma guia de onda cilíndrica de 110 mm de comprimento e 15mm de diâmetro, obteve-se uma eficiência na entrada do guia de onda de 70%, e uma eficiência de transmissão ao longo do guia de onda de 86%.

3.4-Protótipo dos guias de onda

3.4.1 – Introdução

Foi construído um protótipo do conjunto de guias de onda com o objectivo de verificar a capacidade de transferência da luz, estudar experimentalmente a potência à saída da guia de onda e eficiência. Posteriormente, estes valores serão comparados com os valores simulados.

Outro factor de extrema importância durante a recolha de dados experimentais é as dificuldades que vão surgindo durante este processo, nomeadamente no que diz respeito à facilidade de localização do foco e consequente alinhamento.

3.4.2- Construção

Foram testadas guias de onda de sílica fundida de secção cilíndrica, quadrada e octogonal. No laboratório de trabalho apenas existiam guias de onda de secção quadrada de 15mm de secção e guias de onda cilíndrica de 15 mm diâmetro e 290 de comprimento. Foi necessário construir uma guia de onda octogonal de lado 5.7 e comprimento igual a $L=110\text{mm}$ para posteriormente se testarem os três tipos de guia de onda.

Na construção da guia de onda octogonal começou-se por diminuir o comprimento da guia de onda quadrada, para tal utilizou-se uma máquina de corte. Posteriormente deu-se início ao processo de transformar uma guia de onda de secção quadrada numa guia de onda de secção octogonal.

Fazendo uso de limas de diamante, limou-se os quatros cantos da guia de onda quadrada., tendo o cuidado que este processo tem que ser feito sempre com um pouco de água, para não danificar a guia de onda e evitar o aquecimento da mesma. Quando os lados da guia tinham aproximadamente $l=5.9\text{mm}$, com uma margem necessária para que, após o polimento das faces o resultado final seja o de uma secção octogonal de lados 5.7mm, passou-se à segunda fase da construção da guia de onda. Durante o processo de formação de uma guia de onda quadrada numa guia de onda octogonal, a guia de onda ficou com inúmeros riscos, o que afecta muito a eficiência da mesma. Passou-se então à fase de polimento. Este processo é realizado com lixas circulares colocadas na superfície plana de uma máquina rotativa em que a velocidade de rotação pode ser controlada. De inicio teve-se o cuidado de utilizar uma velocidade de rotação não muito alta, pois o grão utilizado é muito grande e poderia ultrapassar os limites pretendido.

Durante o processo foram usadas lixas de água com diferentes tipos de grão (600 - 4000). Inicialmente, foi usada a lixa com grão 600 para eliminar os riscos mais profundos. Este processo revelou-se moroso e de grande sensibilidade pois o aumento da temperatura devido ao atrito entre a guia e a lixa afecta as suas características intrínsecas e consequentemente o seu empenho.

As lixas foram substituídas e com um aumento do grão de modo a poder-se proceder a um minucioso e lento processo de polimento. Ao longo de todo este processo a guia de onda ficava cada vez mais transparente.

Findo este processo passou-se à terceira fase da construção da guia de onda octogonal, que consistiu em polir o guia de onda com líquido de suspensão, tornando-o mais brilhante. Os materiais descritos anteriormente encontram-se ilustrados na figura 3.12 e as guias finais nas figuras 3.13 e 3.14.



Fig. 3.12 - Materiais utilizados no processo de limagem e polimento



Fig. 3.13 - Guia de onda octogonal

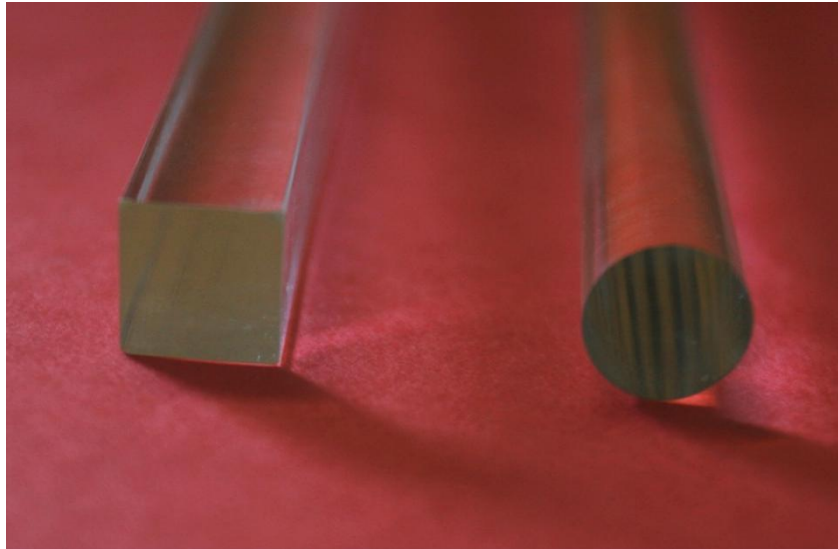


Fig. 3.14 - Guia de onda cilíndrica e octogonal

3.4.3- Montagem experimental

Foram realizados testes para medir a eficiência das várias guias de onda, utilizando como concentrador o espelho parabólico.

Usando teflón, construíram-se bases de suporte para as guias de onda. O teflón apresenta boa resistência ao calor, sofrendo pouca dilatação apesar das altas temperaturas atingidas.

Efectuou-se um furo circular central com um diâmetro um pouco inferior ao da guia (pois existe sempre um pouco de dilatação do material), lixou-se o furo, e a guia estava pronta para iniciar as medidas experimentais. O mesmo processo efectuou-se em relação à guia de onda quadrada e octogonal, denotando que o furo central para a guia de onda octogonal e quadrada, depois de efectuado o furo central, teve q ser feito manualmente com o auxílio de pequenas limas.

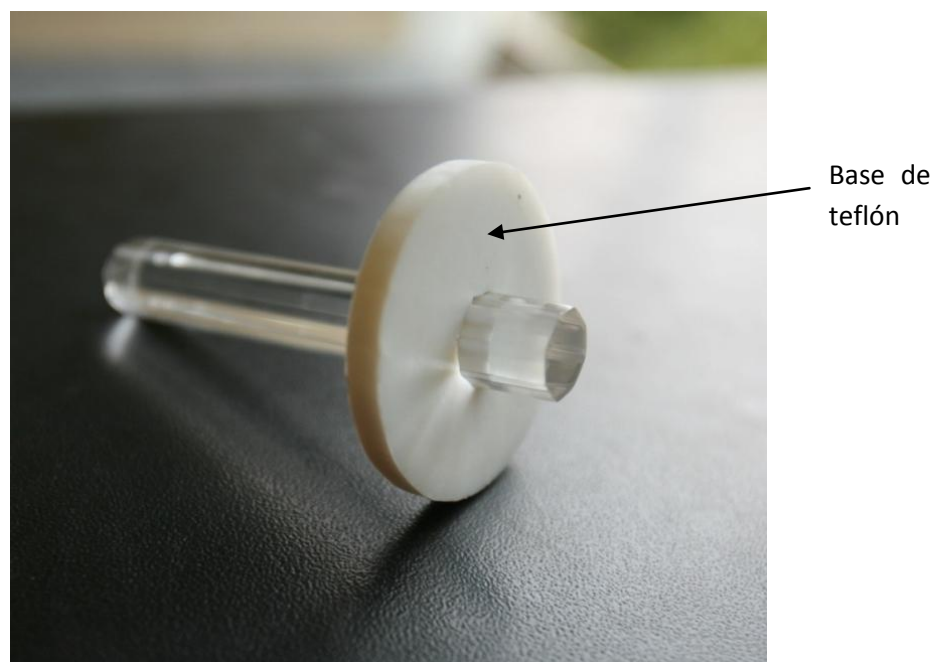


Fig. 3.15 – Sistema de guia de onda e base de suporte

Como o concentrador parabólico não possui sistema de seguimento solar automático é necessário fazer ajustes manuais para se conseguir o melhor alinhamento. Para se conseguir o melhor alinhamento é necessário efectuar duas fases.

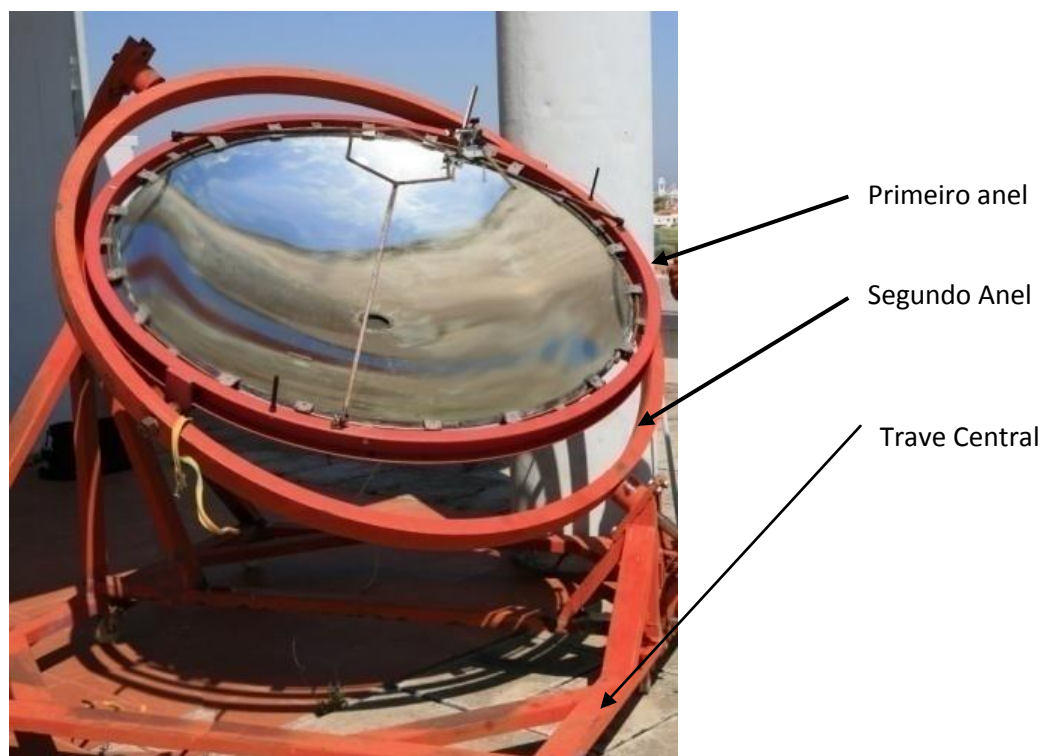


Fig.3.16 - Concentrador parabólico

Na primeira fase é necessário alinhar a trave central com a direcção Norte-Sul, porque o espelho roda em torno do eixo cuja protecção encontra-se sobre a trave central.

Numa segunda fase, ajusta-se o primeiro e segundo anel da estrutura que suporta o espelho de modo que o indicador (barra metálica perpendicular ao primeiro anel) não possua sombra.

Findo estas duas fases, o espelho encontra-se alinhado com o sol, passando a deslocar-se apenas o segundo anel, mantendo o indicador sem sombra, para se ter o espelho sempre alinhado.

Este procedimento é necessário repetir sempre que se fazem medições em dias distintos.

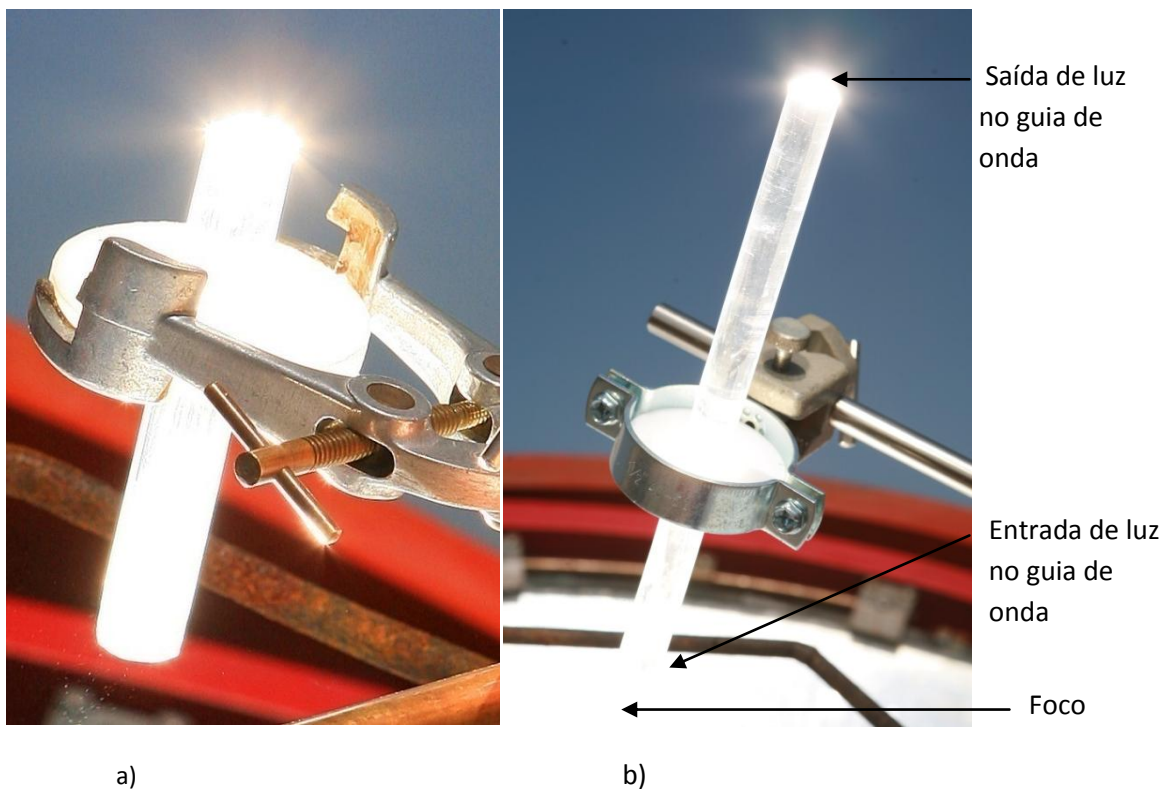


Fig.3.17 - Transporte de luz nos guias de onda a)Octogonal b)Cilíndrica

Usando um medidor de potência do tipo “Power Max 5000”, retirou-se os valores da potência à saída dos guias de onda. Verificou-se ainda o tamanho do foco e a sua geometria.

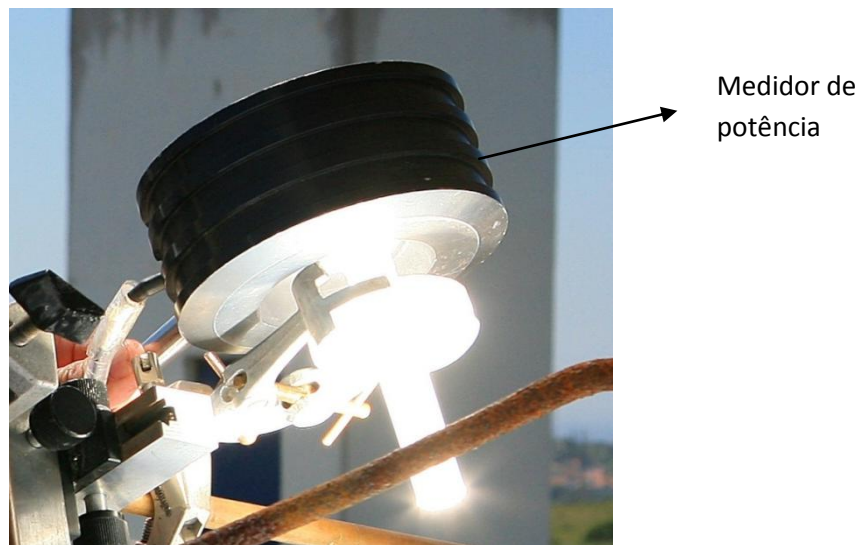


Fig.3.18- Medição da potência na saída do guia de onda

3.4.4- Resultados experimentais

Na tabela 3.6 são apresentados os melhores resultados obtidos, estes resultados foram obtidos em vários dias, sob diferentes condições atmosféricas.

Tabela 3.6 - Potência absorvida à saída pelos guias de onda

	Potência prática [w]	Potência simulada [w]
Guia de onda quadrada L=110mm Secção 15mm	710	770
Guia de onda octogonal L=110mm Secção 15mm	598	755
Guia de onda cilíndrica L=290 Diâmetro 15mm	680	716

3.5 Referências

[1] www.glassdynamicsllc.com

[2], [3] Transmissão de energia solar de 280w por um cabo de 19 fibras ópticas, Daniel de silva ferreira 2000

Capitulo 4

Estudo de traçado não sequencial e análise de elementos finitos

4 Estudo de traçado não sequencial e análise de elementos finitos	49
4.1 Bombeamento simétrico “3 side- pumped” de lasers solares	53
4.2 Bombeamento “1-end-side-pumped” de lasers solares por guia de onda quadrangular	57
4.3 Bombeamento “1-end-side-pumped” de lasers solares por guia de onda octogonal	65
4.4 Bombeamento “1-end-side-pumped” de lasers solares por guia de onda cilíndrica	68
4.4.1 Bombeamento “1-end-side-pumped” de lasers solares por guia de onda cilíndrica de 15mm e 20 mm de diâmetro sem erro de colecção.....	70
4.4.2 Bombeamento “1-end-side-pumped” de lasers solares por guia de onda cilíndrica de 15mm e 20 mm de diâmetro sem erro de colecção.....	72
4.5 Referências	75

4 Estudo de traçado não sequencial e análise de elementos finitos

Neste capítulo é feito um estudo sobre a absorção do cristal de Nd: YAG com 5mm de diâmetro e comprimento igual 36mm no sistema simétrico, e 25mm nos restantes sistemas.

O percurso dos raios de luz é determinado dentro do meio activo, com o auxílio de um detector volúmico com um diâmetro e comprimento igual ao do cristal. Através dos coeficientes de absorção do Nd: YAG, a potência absorvida é então determinada, somando-se a radiação absorvida em todas as zonas do detector.

Os componentes introduzidos são os seguintes:

⇒ **Concentrador parabólico**

Em todas as simulações efectuadas a função e os parâmetros introduzidos do concentrador parabólico são iguais, cuja função é colectar os raios solares e concentrá-los numa pequena área. O espelho parabólico utilizado tem um diâmetro de 1.52m, área de colecção de 1.82 m^2 , distância focal de 0.66m, ângulo de aceitação de 60° . A fonte solar apresenta uma potência de 227W, porque apenas 14% da radiação solar incidente é absorvida pelo cristal. O foco possui uma distribuição gaussiana e um diâmetro de 8mm.

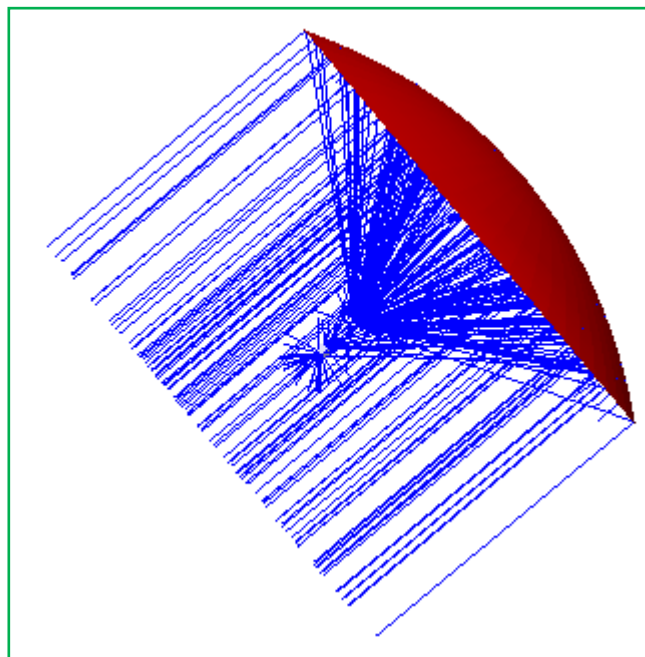


Fig.4.1- Concentrador parabólico e fonte solar no simulador

⇒ Sistema de guias de onda

São desenvolvidas quatro sistemas de guias de onda, baseados na facilidade de construção, eficiência na absorção no cristal, potência laser e distribuição térmica no cristal. O primeiro dos sistemas de guias de onda bombeia o cristal lateralmente (*Side-pumped*) e os restantes bombeiam o cristal por uma das extremidades do cristal (*End-pumped*), mas como nestes sistemas é utilizado um concentrador cónico o cristal passará a ser bombeado pela extremidade e lateralmente (*End-Side-pumped*).

⇒ Cavity de bombeamento

As cavidades de bombeamento são utilizadas para melhorar a eficiência de transferência e a distribuição de luz dentro do cristal laser [1].

No sistema de guias de onda simétrico bombeado lateralmente é utilizado uma cavidade de bombeamento cilíndrica, nos sistemas bombeados lateralmente e pela extremidade é utilizado um concentrador cónico. Serão explicadas detalhadamente em cada um dos sistemas e os seus parâmetros otimizados.

⇒ Sistema de arrefecimento

Devido às elevadas temperaturas existentes na cavidade de ressonância devido ao bombeamento, que leva ao aquecimento do cristal, é necessário introduzir um sistema de arrefecimento com água.

A água é uma boa escolha para o arrefecimento pois apresenta baixa viscosidade, o que leva a pequeno atrito nas paredes dos tubos de arrefecimento.

Todos os sistemas ópticos implementados têm em conta as distâncias necessárias para a implementação prática do sistema de arrefecimento.

4.1 Bombeamento simétrico *lateral* de lasers solares

O primeiro de sistema a ser implementado, é um sistema simétrico. É bombeado lateralmente por três guias de onda rectangulares “3-side-pumped”, em que as guias de onda laterais apresentam curvatura.

Neste subcapítulo é feito um estudo sobre a absorção do cristal para as várias dimensões. Posteriormente, ao melhor sistema implementado é feito um estudo da cavidade de ressonância e as características laser.

A cavidade de bombeamento é constituída por um espelho com 6.3 mm de diâmetro e comprimento de 36mm, que garante que a radiação que não incide directamente no cristal seja redireccionada. Posteriormente, é colocado um tubo cilíndrico de sílica, o “Flow-tub”, com um diâmetro de 4.8mm e comprimento igual a 36mm, que permite a passagem de água.

Na figura 4.3 é ilustrado o cristal de Nd: YAG de 5mm de diâmetro e 36 mm de comprimento e na figura 4.4 encontra-se uma vista pormenorizada da cavidade de bombeamento.

Implementou-se um sistema com três guias de onda de secção rectangular, com diversas áreas de entrada e altura. Na tabela 4.1 encontra-se resumido os resultados mais importantes efectuados no sistema.

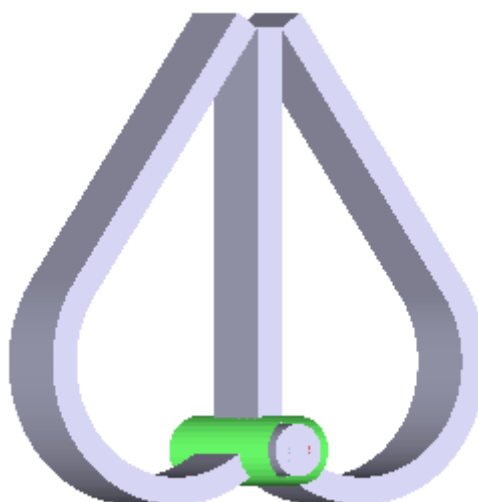


Fig.4.2- Configuração do sistema óptico simétrico

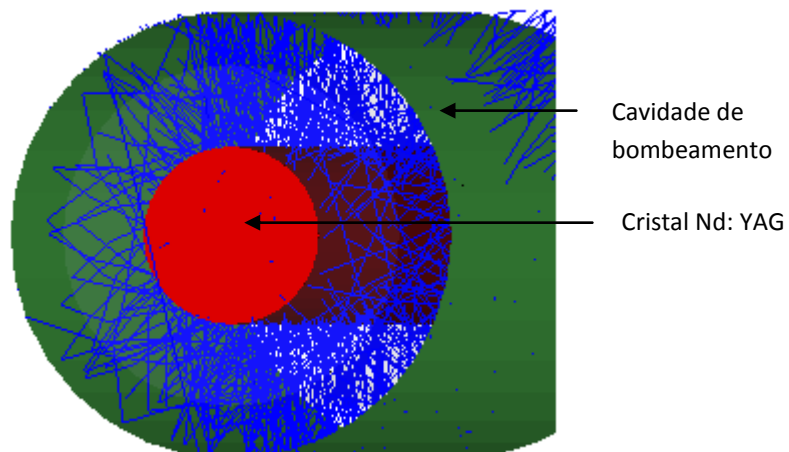


Fig.4.3- Configuração de bombeamento do sistema óptico simétrico

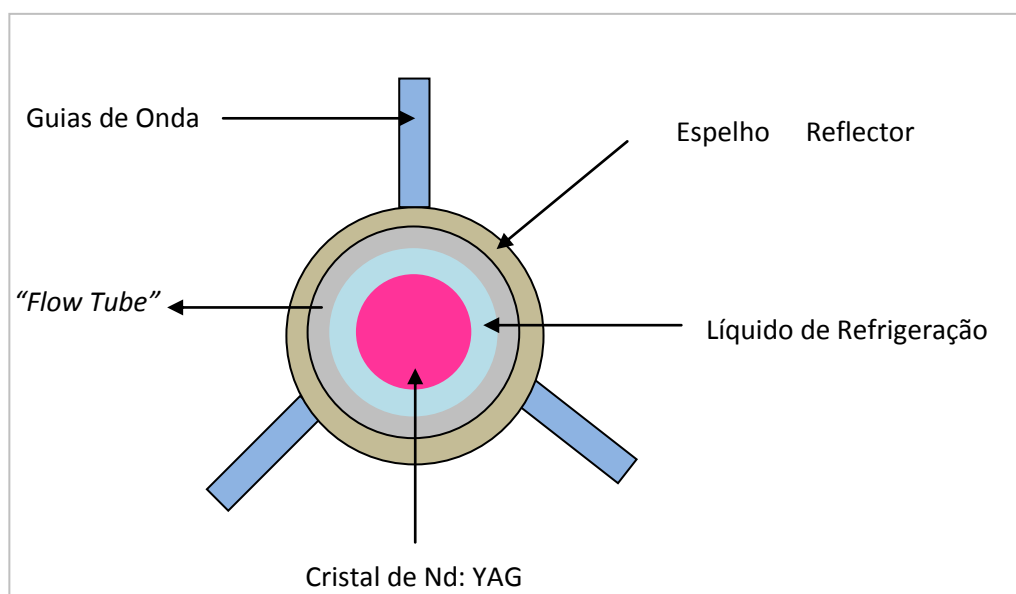


Fig.4.4 - Vista pormenorizada da cavidade de bombeamento do sistema óptico simétrico

Tab.4.1- Eficiência na absorção do cristal com bombeamento pela extremidade
para várias secções rectangulares

Potência absorvida pelo cristal [w]			
Guia central		Guias laterais	
X=5mm	Y=8mm	X=5mm	Y=8mm
82.5 W			
Guia Central		Guias laterais	
X=4mm	Y=18mm	X=4mm	Y=18mm
80.3 W			
Guia Central		Guias laterais	
X=6mm	Y=18mm	X=6mm	Y=18mm
79.3 W			
Guia Central		Guias laterais	
X=5mm	Y= 20mm	X=5mm	Y=20mm
84 W			

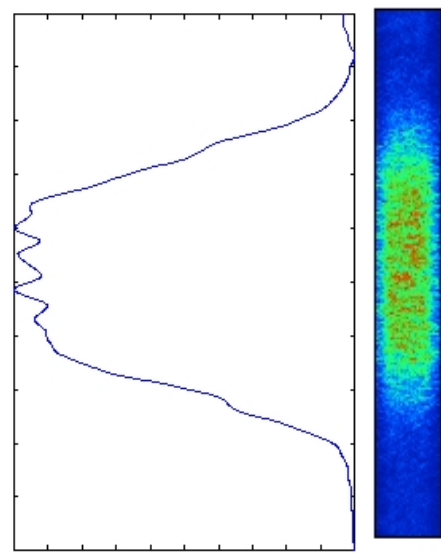


Fig.4.5- Distribuição da radiação ao longo do cristal

Para se efectuarem simulações no LascadTM é necessário importar do ZemaxTM o sistema óptico.

O traçado de raios providos do ZemaxTM (através de detectores de volume) é analisado com o software de análise de cavidades de ressonância LascadTM, permitindo a modelação da cavidade de ressonância e o estudo das características do feixe laser.

O ressonador óptico é formado quando colocamos o cristal entre dois espelhos, um com alta reflectividade e outro parcialmente reflector.

Na figura 4.6 é apresentado o gráfico da reflectividade do espelho parcialmente reflector e a potência de saída laser e na figura 4.7 é apresentado o gráfico da potência laser em função da potência absorvida pelo cristal. Obtendo-se uma potência laser máxima de 12.7W, com um espelho parcialmente reflector de 96.5%.

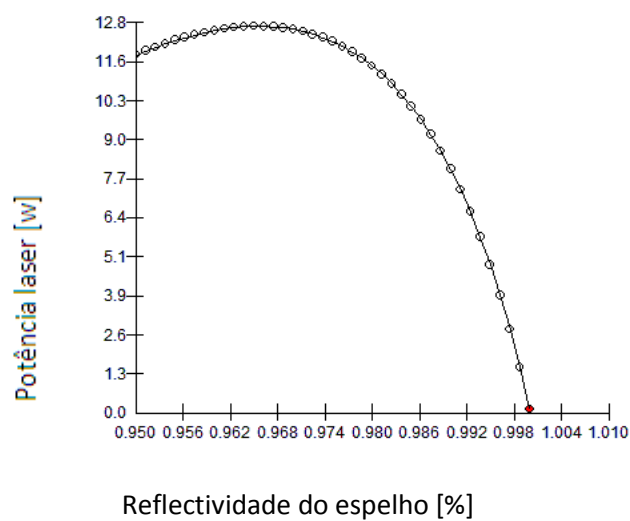


Fig.4.6- Potência de saída laser dependente da reflectividade do espelho para sistema simétrico

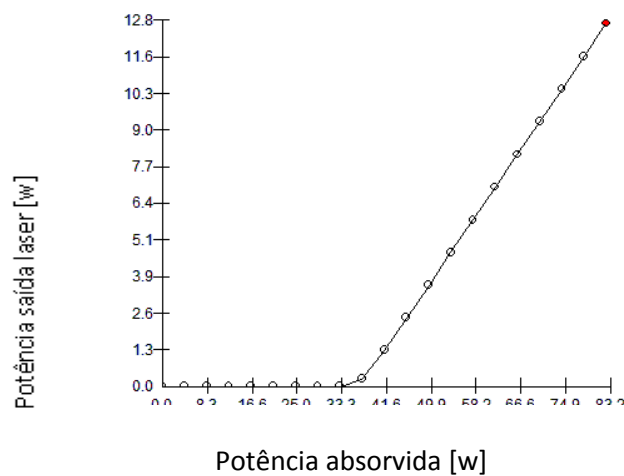


Fig.4.7- Potência absorvida por saída laser sistema simétrico

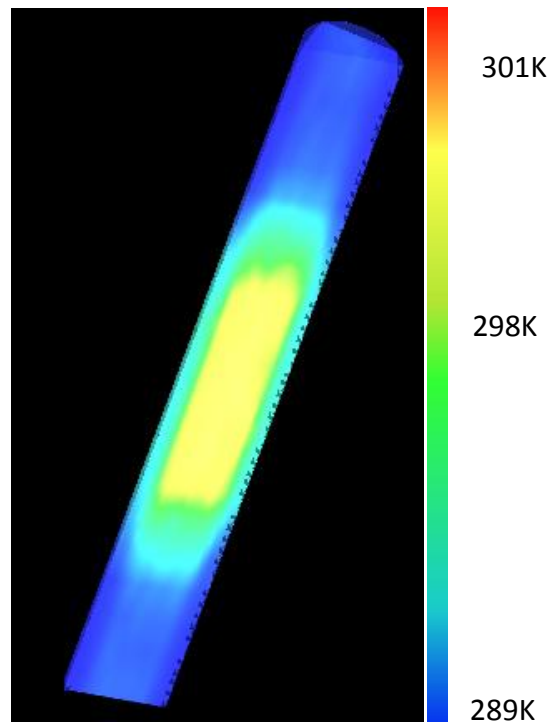


Fig.4.8- Distribuição térmica dentro do cristal

Através da distribuição térmica do cristal, é possível visualizar que existe uma forte absorção na região central, no entanto as temperaturas atingidas não são muito elevadas. Como se pode inferir nas zonas centrais a cor amarela.

4.2 Bombeamento pela extremidade e lateralmente “1-end-side pumped” de lasers solares por guia de onda quadrangular

No sistema foi utilizado o espelho parabólico para colectar a energia solar, os parâmetros implementados encontram-se enunciados na secção 4.1.1.

Posteriormente a energia é transmitida para o foco através de uma guia de onda de secção quadrada.

Nos três sistemas de bombeamento “1-end-side-pumped” para reflectir os raios emergentes do guia de onda que não incidem directamente no cristal, foi utilizado um concentrador cónico.

Esta cavidade permite que os raios dispersos que incidem no cristal provenientes do guia de onda, sejam aproveitados para o bombeamento do cristal, passando o bombeamento pela extremidade em bombeamento pela extremidade e lateralmente, que se torna mais eficiente.

Após diversos estudos, com vários diâmetros de entrada e saída de cavidade cónica, levaram à implementação de um concentrador cónico com um diâmetro de entrada igual a 20mm, saída 8mm e altura de 19.5mm.

Um menor diâmetro à saída resulta numa maior absorção por parte do cristal, no entanto esta medida não pode ser inferior a 8 mm, é necessário deixar pelo menos 2 mm de cada lado para a passagem de água.

Para a construção do desenho técnico da cavidade de bombeamento utilizou-se o programa de desenho Solidworks.

Todas as medidas das secções da cavidade de bombeamento e as suas vistas, encontram-se em anexo.

Posteriormente, o cristal de Nd: YAG é colocado dentro da cavidade de bombeamento e preso através de o-ring e uma peça cilíndrica de rosca.

É utilizada uma base cilíndrica de 3mm de altura, que serve de suporte à cavidade de bombeamento (presa por três parafusos) e funciona igualmente como isolante. Na cavidade existem dois furos cilíndricos, um de entrada de água e outro de saída, a água circula pela cavidade cónica, arrefecendo o cristal que se encontra no seu interior. Na figura 4.10 é possível visualizar este percurso.

A cavidade de ressonância obtém-se colocando o cristal entre dois espelhos.

Nos sistemas bombeados pela extremidade é necessário utilizar uma das faces do cristal como espelho totalmente reflector, sendo o outro espelho parcialmente reflector.

Através do software Lascad é possível determinar qual a reflectância do espelho que permite obter a máxima potência laser.

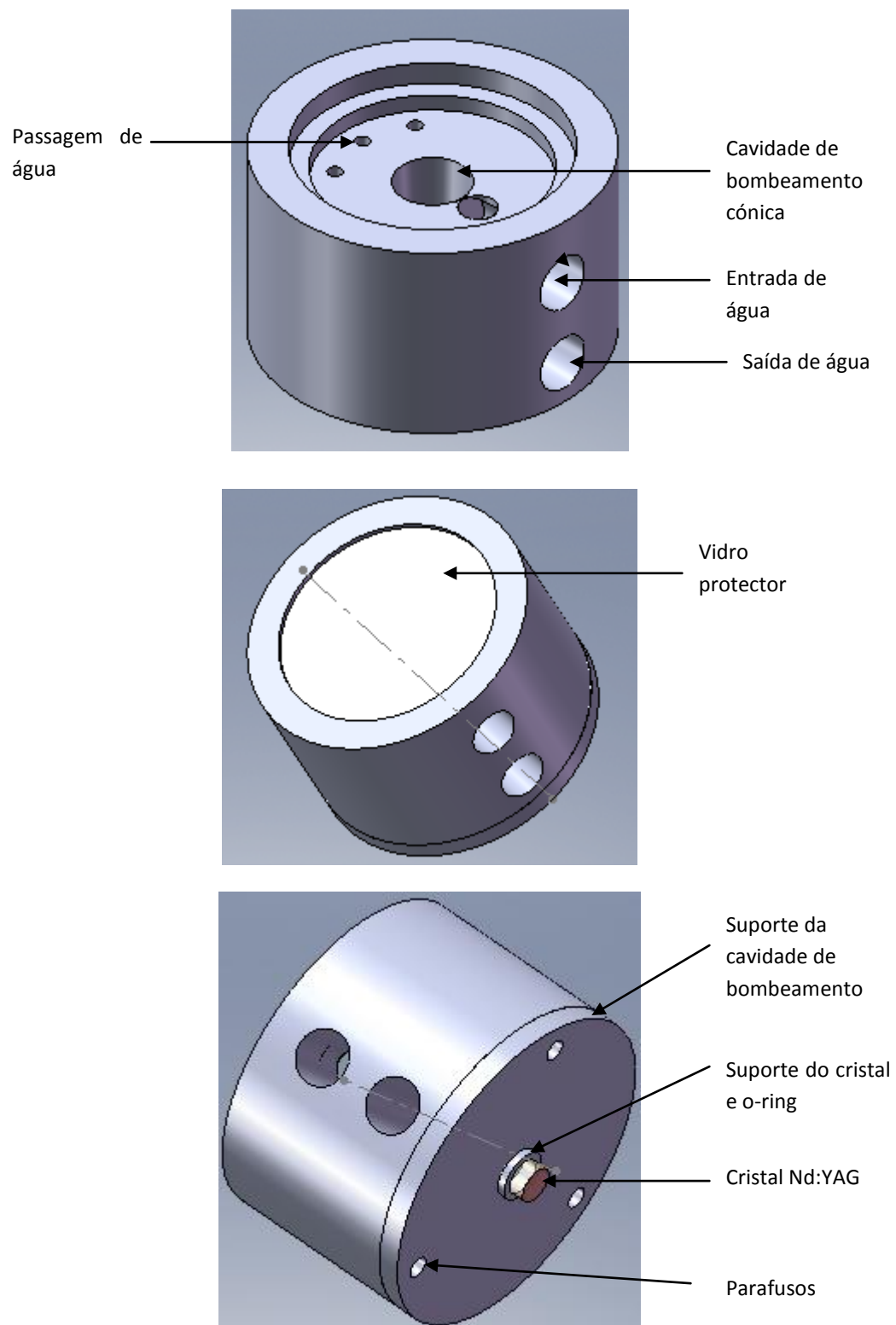


Fig.4.9 – Desenho técnico da cavidade de Bombeamento

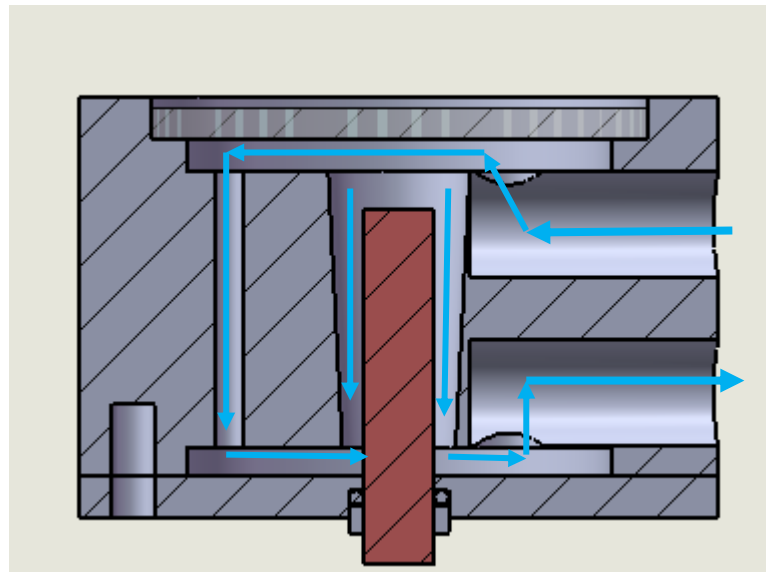


Fig.4.10 – Sistema de arrefecimento

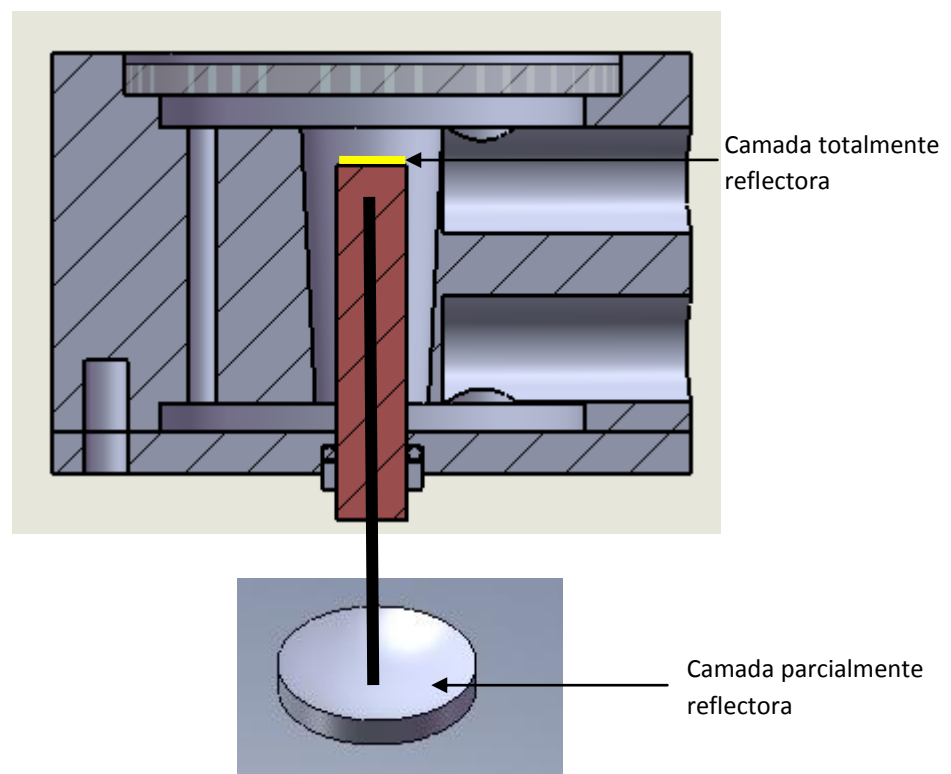


Fig.4.11 – Cavidade de ressonância



Fig.4.12 – Imagem da cavidade de bombeamento construída

Geralmente as cavidades são construídas em aço inox, banhadas com material reflector, tais como a prata, alumínio e ouro. O melhor resultado obtém-se utilizando como material reflector dos raios emergentes do guia de onda para o cristal, o ouro, porque apresenta um bom comportamento nas bandas entre os 0.7 e os 0.9 μm , que são de grande interesse para o bombeamento do cristal de Nd: YAG.

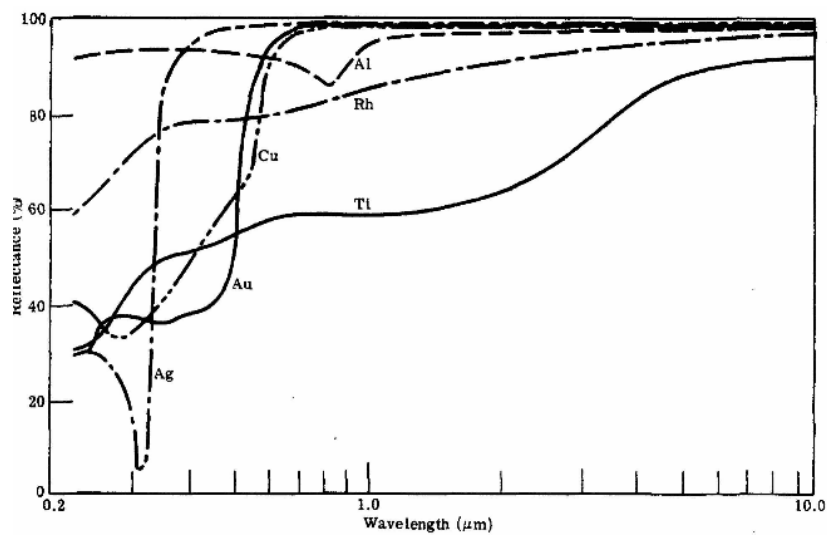


Fig.4.13 - Reflectividade em função do comprimento de onda para diversos materiais [2]

Apesar de a prata apresentar uma melhor reflectividade na zona de bombeamento do cristal de Nd: YAG, esta vantagem é limitada temporariamente, uma vez que a prata reage com a água oxidando-se, o que não acontece com o ouro.

O ouro além de ter uma elevada reflectividade e não reagir com a água, não reflecte na zona do ultravioleta.

Através do estudo de traçado não sequencial, foram efectuados vários estudos alterando a secção de entrada do guia de onda octogonal, obtendo-se os resultados sumariados na tabela 4.2

Tab.4.2- Potência absorvida pelo Nd: YAG num sistema com guia de onda quadrada

<i>Área de entrada e saída [mm^2]</i>	<i>Potência absorvida pelo cristal [w]</i>
$18 \times 18 \text{mm}^2$	62.6
$17 \times 17 \text{mm}^2$	66
$15 \times 15 \text{mm}^2$	70.1
$12 \times 12 \text{mm}^2$	75.3
$11 \times 11 \text{mm}^2$	76.2
$10 \times 10 \text{mm}^2$	74.7
$8 \times 8 \text{mm}^2$	66.6

A figura 4.14 mostra a distribuição de energia à saída do guia de onda de secção quadrada de lado 11mm.

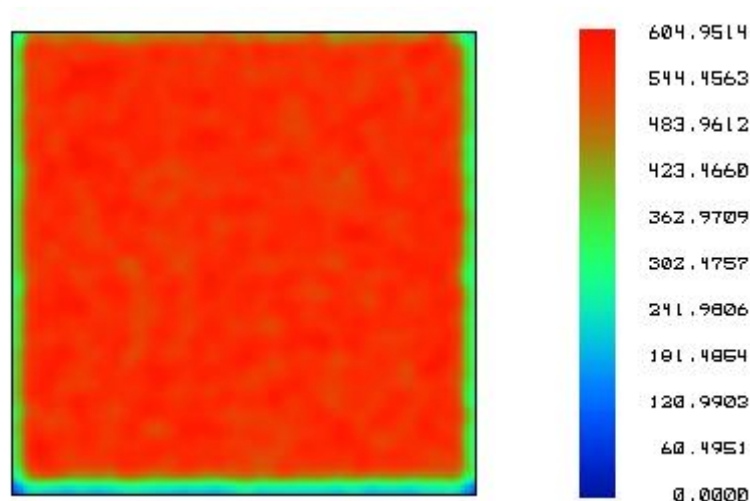


Fig.4.14 – Distribuição de energia na saída do guia de onda de secção quadrada, de lado 11mm

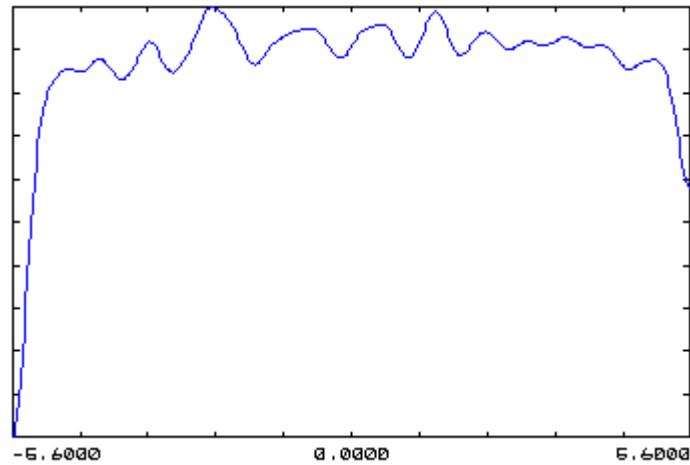


Fig.4.15 – Distribuição de energia na saída do guia de onda de secção quadrada, de lado 11mm

O sistema óptico otimizado é importado para o LascadTM para se realizarem as análises a nível de potência de saída laser, qualidade do feixe, distribuição térmica e perdas ao longo do cristal.

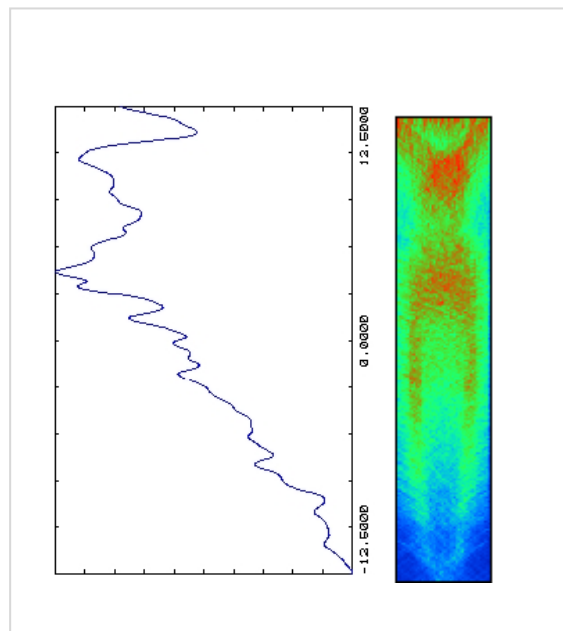


Fig.4.16 – Distribuição da radiação ao longo do cristal

Na figura 4.17 é apresentado o gráfico da reflectividade do espelho parcialmente reflector e a potência de saída laser. Tendo-se obtido uma potência laser máxima de 13.02W, com um espelho parcialmente reflector de 97%. Na figura 4.18 é apresentado o gráfico da potência laser em função da potência absorvida pelo cristal e a distribuição térmica na figura 4.19.

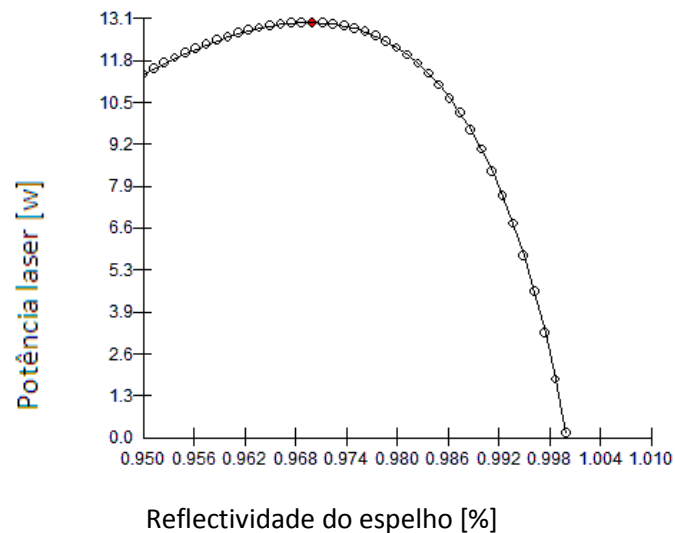


Fig.4.17 - Potência de saída laser dependente da reflectividade do espelho para sistema de guias de secção quadrada

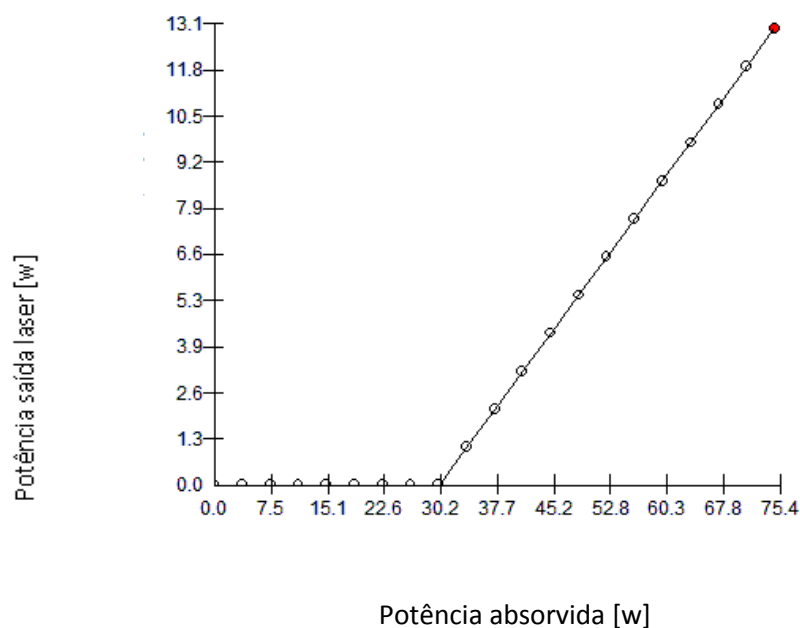


Fig.4.18 - Potência absorvida por saída laser – Sistema óptico com guia de onda de secção quadrada e lado 11mm

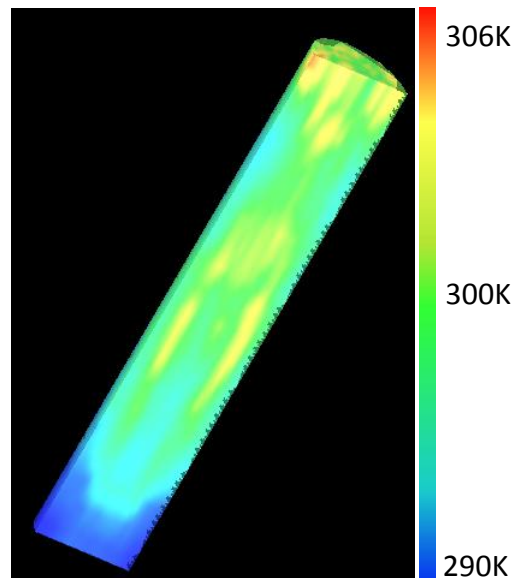


Fig.4.19 – Distribuição térmica no cristal

4.3 Bombeamento “1-end-side-pumped” de lasers solares de alta potência por guia de onda octogonal

Na implementação do laser solar bombeado por guia de onda octogonal a luz é concentrada pelo concentrador parabólico e é transmitida para a cavidade óptica através de uma guia de onda octogonal. Na cavidade óptica está colocado um concentrador cônico, cujas dimensões foram otimizadas tendo em conta a secção do guia de onda. O concentrador cônico apresenta as mesmas características que os apresentados na secção 4.2.

Foram efectuadas diversas alterações na secção de entrada do guia de onda encontrando-se os resultados resumidos na tabela 4.3.

Tab.4.3- Potência absorvida pelo Nd: YAG num sistema com guia de onda octogonal

<i>Secção de entrada [mm]</i>	<i>Potência absorvida pelo cristal [w]</i>
18mm	76
17mm	77.6
15mm	82.6
14mm	83.7
13mm	84.4
12mm	83.6
11mm	81.8
10mm	79.1
8mm	66.2
6mm	48.1

Na figura 4.20 apresenta-se a imagem de distribuição de energia na saída do guia de onda, para o sistema com guia de onda octogonal de 13 mm.

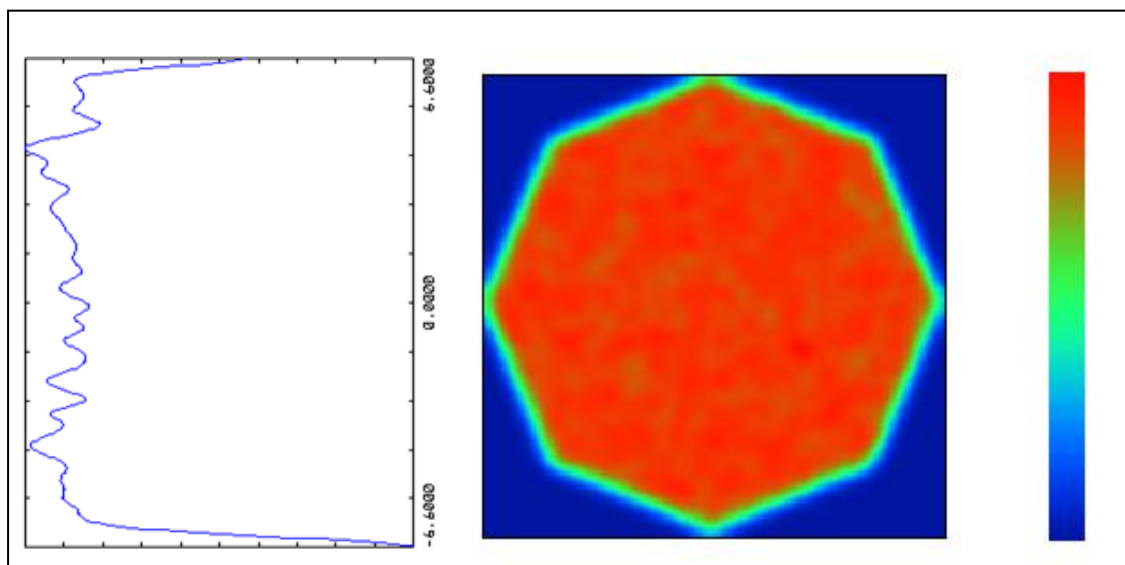


Fig.4.20 – Distribuição de energia na saída do guia de onda de secção octogonal

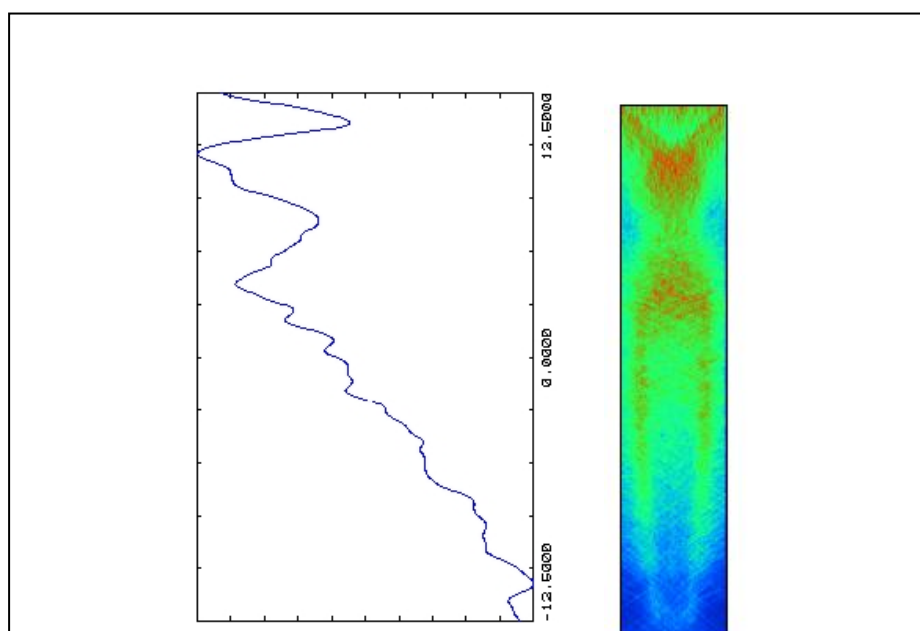


Fig.4.21 - Distribuição ao longo do cristal para a guia de onda octogonal

Na figura 4.22 é apresentado o gráfico da reflectividade do espelho parcialmente reflector e a potência de saída laser. Tendo-se obtido uma potência laser máxima de 15.43W, com um espelho parcialmente reflector de 96.6%

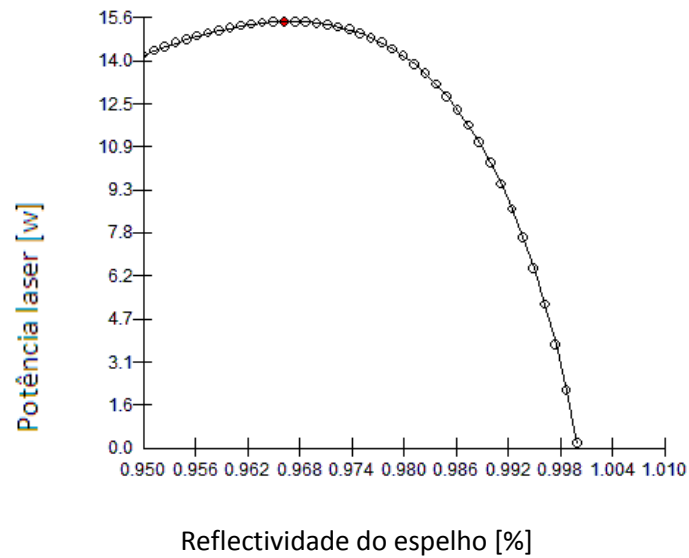


Fig.4.22- Potência de saída laser dependente da reflectividade do espelho para sistema de guias de secção octogonal

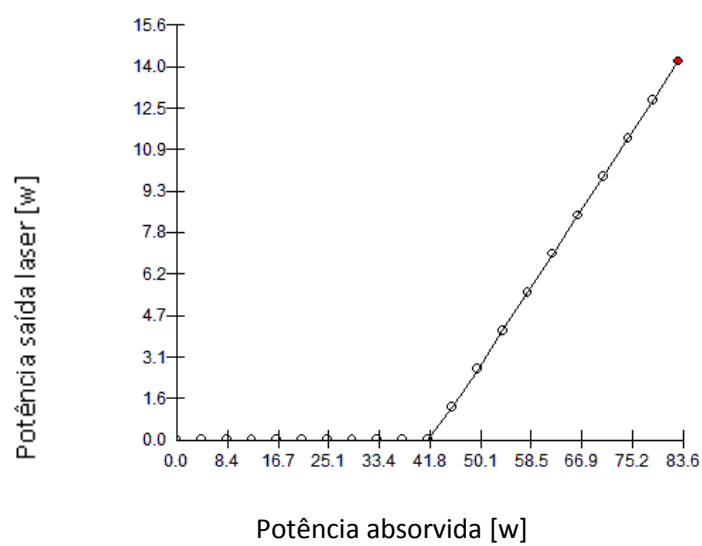


Fig.4.23 - Potência absorvida por saída laser sistema octogonal

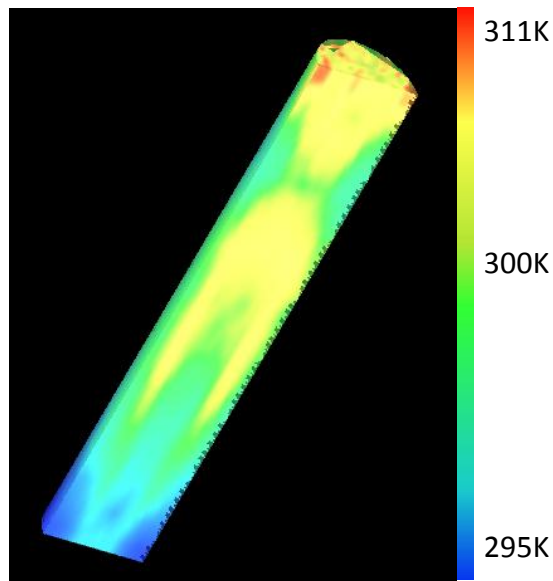


Fig.4.24 – Distribuição térmica no cristal no sistema com guia de onda octogonal

4.4 Bombeamento lateral e extremidade “1-end-side-pumped” de lasers solares por guia de onda cilíndrica

O último sistema óptico implementado é um laser bombeado com guia de onda cilíndrica de 110 mm e diâmetro variável. Para se chegar ao valor otimizado foram testados vários diâmetros de entrada do guia de onda e também do concentrador cônico. Os resultados encontram-se resumidos na tabela 4.4.

Como cavidade de bombeamento encontra-se igualmente um concentrador cônico. Testaram-se vários comprimentos e diâmetros de entrada e do concentrador, encontrando-se os resultados de maior relevância na tabela 4.4.

Tab.4.4- Potência absorvida pelo Nd: YAG num sistema com guia de onda cilíndrica

<i>Diâmetro do guia de onda [mm]</i>	<i>Potência absorvida pelo cristal [w]</i>	<i>Diâmetro de entrada concentrador cónico[mm]</i>
22mm	94.8	20
21mm	99.4	20
20mm	104	20
19mm	103.6	20
18mm	103	20
16mm	101	20
15mm	100	20
14mm	99.6	20
13mm	96.7	20
12mm	94.2	20
11mm	89.9	20
10mm	85.4	20
8mm	71.2	18
6mm	52.1	16

Como se conclui pela análise da tabela 4.4, o sistema óptico implementado com guia de onda cilíndrica apresenta uma máxima absorção pelo cristal quando o guia de onda apresenta um diâmetro de entrada de 20 mm. Este resultado mostrou-se uma das grandes revelações deste projecto.

Seguidamente, é feito uma análise comparativa entre o sistema implementado com uma guia de onda cilíndrica de diâmetro 15mm e o sistema com guia de onda cilíndrica de 20mm de diâmetro, para posteriores conclusões de grande importância.

4.4.1 Bombeamento “1-end-side-pumped” de lasers solares de alta potência por guia de onda cilíndrica de 15mm e 20 mm de diâmetro sem erro de colecção

Na figura 4.25 é apresentada a imagem da distribuição de energia na saída do guia de onda cilíndrico de 20mm de diâmetro

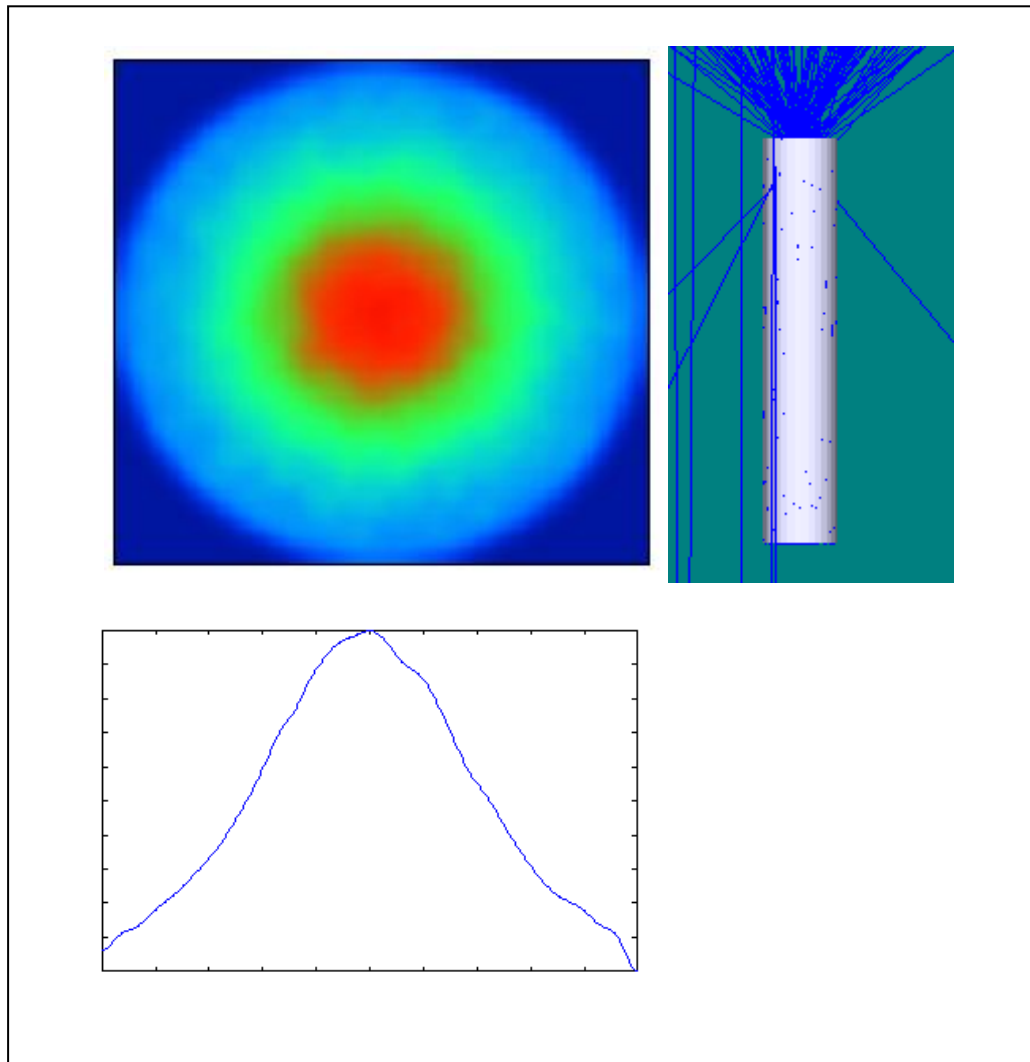


Fig.4.25 - Imagem da distribuição de energia na saída do guia de onda cilíndrico de 20mm diâmetro

Como se conclui pela figura acima, a radiação à saída do guia de onda cilíndrica encontra-se na região central, o que faz com que a radiação introduzida pelos guias de onda dentro da cavidade seja concentrada na região central do cristal.

Na figura 4.26 e 4.27 é apresentado o gráfico da reflectividade do espelho parcialmente reflector e a potência de saída laser para os dois casos. Obtendo-se para a guia de onda cilíndrica de diâmetro 15mm, uma potência laser máxima de 20.06W, com um espelho parcialmente reflector de 96% e uma potência laser máxima de 21.6W, com um espelho parcialmente reflector de 96% para a guia de onda cilíndrica de diâmetro 15 mm.



Fig.4.26 Gráfico da potência de saída laser em função da reflectividade do espelho guia de 20mm diâmetro

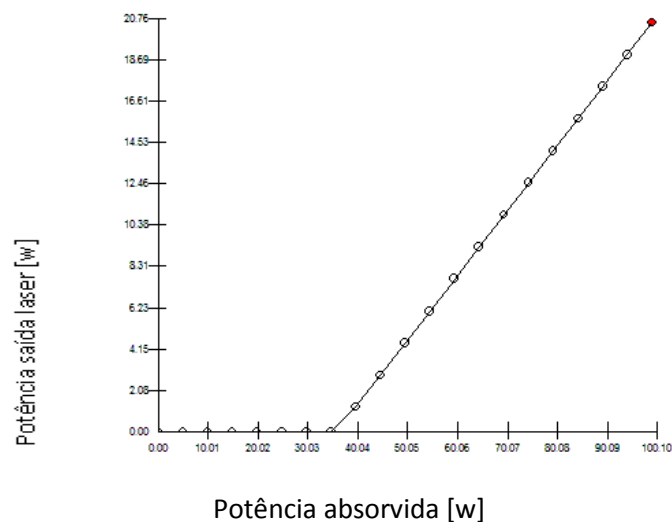


Fig.4.27 - Potência absorvida por saída laser sistema guia cilíndrica diâmetro 20mm

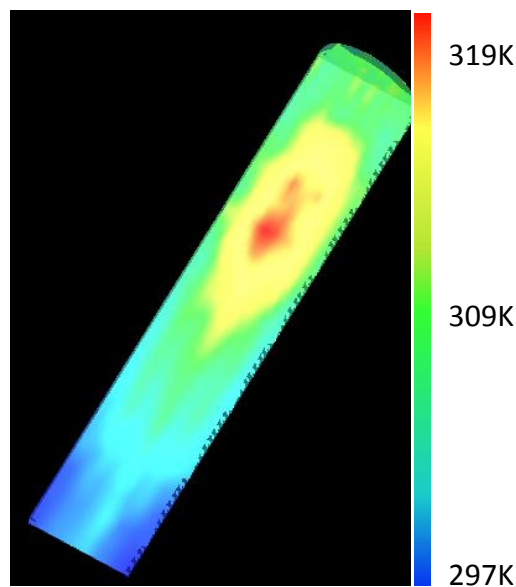


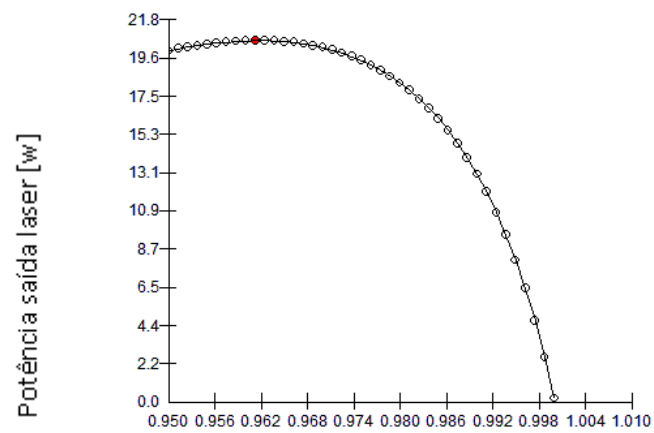
Fig.4.28-Distribuição Térmica ao longo do cristal – sistema guia cilíndrica de 20mm diâmetro

4.4.2 Bombeamento lateral e pela extremidade “1-end-side-pumped” de lasers solares por guia de onda cilíndrica de 15mm e 20 mm de diâmetro com erro de colecção

Todos os resultados obtidos até ao momento foram obtidos sem erro de colecção, ou seja, com um alinhamento óptico entre a fonte solar e o concentrador parabólico. Mas a estabilidade da cavidade de ressonância depende da qualidade de captação da radiação solar e consequentemente do alinhamento entre os componentes. O erro de colecção desloca a mancha focal da sua posição central óptima no centro de entrada das guias de onda.

Neste subcapítulo é feita uma análise à potência absorvida, potência laser e qualidade do feixe laser com erro de colecção $\Delta X=1.3\text{mm}$. Novamente, apenas é apresentado os gráficos referentes ao sistema de guia de onda cilíndrica de 20mm e os resultados para o guia de onda cilíndrica de diâmetro 15m.

Na tabela 4.5 encontra-se resumido as características da cavidade de ressonância dos dois sistemas ópticos implementados.



Reflectividade espelho [%] – guia cilíndrica 20mm diâmetro

Fig.4.29 - Potência de saída laser em função da reflectividade do espelho guia de 20mm diâmetro com erro de colecção

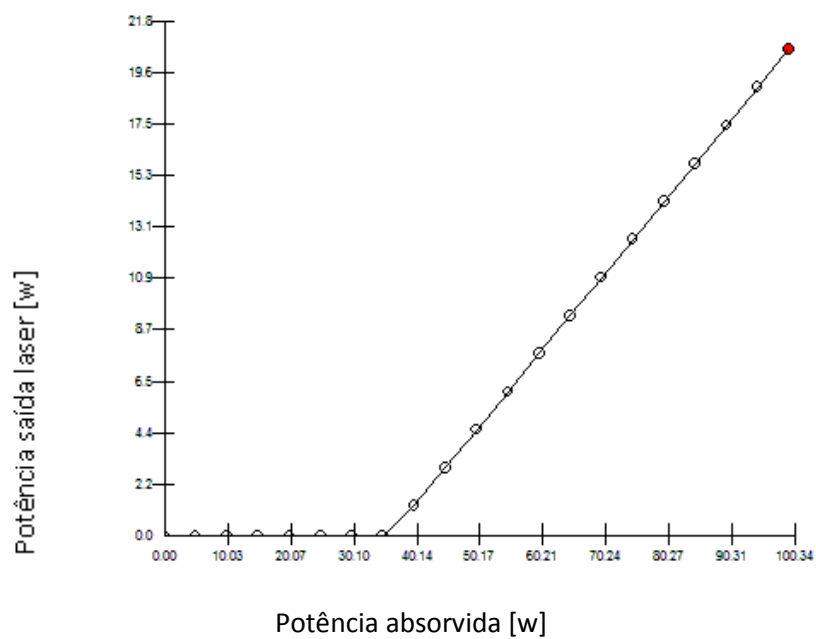


Fig.4.30 - Potência absorvida por saída laser sistema guia cilíndrica de diâmetro 20mm com erro de colecção

Tabela 4.5-Resumo dos dados da cavidade de ressonância com guia de onda cilíndrica de diâmetro 15mm e 20mm

	Guia 15mm sem erro	Guia 15mm com erro 1,3	Guia 20mm sem erro	Guia de 20mm com erro
Potência absorvida [w]	99.10	98.8	102.4	101.68
Reflectância do espelho	96%	96%	96%	96.1%
Potência laser [w]	20.6	19.48	21.6	20.64
M_x^2	54	54	54.4	54.6
M_y^2	54	54	54.4	54.6
Erro [%]	—	5.4	—	4.4

4.5-Referências

- [1] W. Koechner, Solid State Laser Engineering, 4^a ed. Berlin, Germany, Springer- Verlag
- [2] <http://www.tvu.com/PNextGenTFWeb.htm>

Capitulo 5

Conclusões e perspectivas futuras

5 Conclusões e perspectivas futuras

Ao longo das últimas décadas o laboratório de optoelectrónica da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa tem desenvolvido sistemas de guias de onda de sílica fundida para bombeamento de lasers solares. Este projecto vem acrescentar mais um estudo minucioso nesta área.

Nesta tese foram propostas novas cavidades de bombeamento com guias de onda de sílica fundida para lasers do estado sólido de Nd: YAG. Os desempenhos destas guias foram simulados através da análise por traçados de raios não sequenciais.

Começou-se por estudar a eficiência de quatro sistemas de guias de onda, um sistema simétrico de três guias de onda e três sistemas com apenas um guia de onda, tendo este secção quadrada, octogonal e cilíndrica.

No sistema de guias de onda simétrica obteve-se uma eficiência de transmissão de 83%.

Relativamente à absorção do cristal neste tipo de bombeamento conclui-se que apesar de apresentar uma absorção maior que o sistema do guia de onda de secção quadrada, o laser produzido é inferior. Relativamente aos três sistemas de apenas um guia de onda, o guia de onda de secção quadrada (para o mesmo comprimento de guia e igual secção de entrada e saída) é o que apresentam uma maior eficiência no transporte de energia, apresentando uma eficiência dos guias de onda de a 88%. Dos três sistemas de guia de onda o de secção quadrada é o que apresenta uma área superior, logo colecta mais energia e consequentemente a potência à saída da guia de onda é superior.

Construíram-se três guias de onda, octogonal, cilíndrica e quadrada, testaram-se as eficiências e obtiveram-se resultados satisfatórios. As discrepâncias que ocorrem, deve-se ao facto da variação do fluxo solar variar durante cada ensaio, e contribuir para o erro do cálculo simulado e valor experimental. Na simulação foi utilizado um fluxo solar de $I=900\text{W/m}^2$.

Nos meses em que se realizaram as medições experimentais (Maio, Junho e Julho) as condições climatéricas não são tão propícias a um dia de Sol limpo como em Agosto, por exemplo.

Relativamente à absorção por parte do cristal de Nd: YAG conclui-se que o aumento de eficiência ao se aumentar a área de secção de entrada do guia de onda não se traduz numa maior absorção por parte do cristal. A absorção do cristal, depende da geometria dos guias de onda (forma e área), da forma como a energia é distribuída ao longo do cristal e do tipo de bombeamento.

Na figura 5.1 são apresentados os resultados referentes aos três sistemas bombeados pela extremidade e lateralmente, com um guia de onda de secção quadrada, octogonal e cilíndrica.

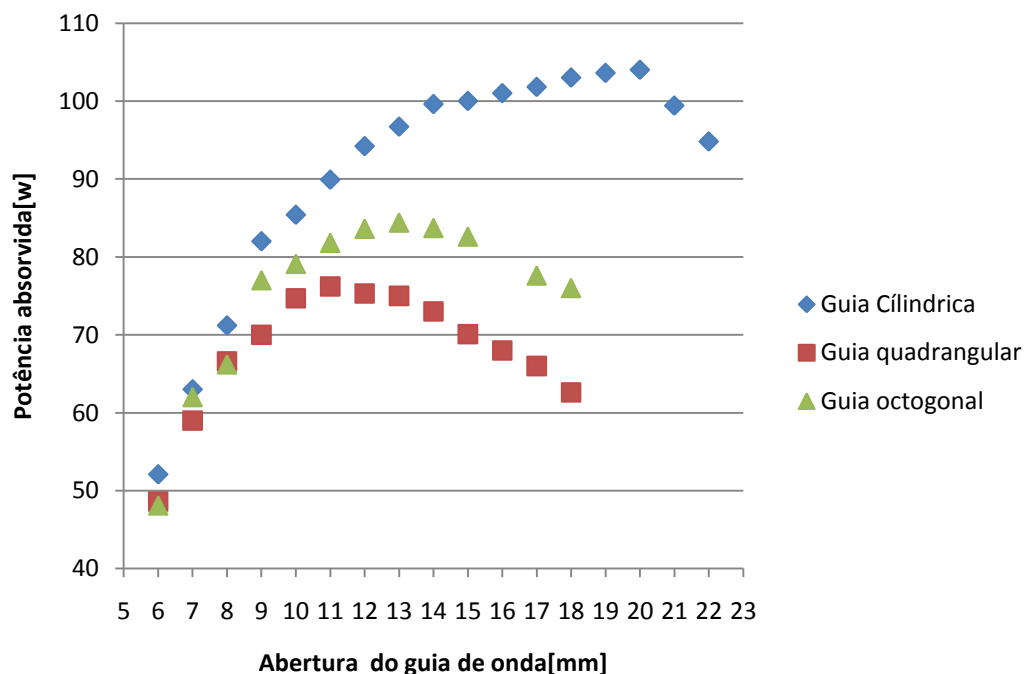


Fig.5.1- Potência absorvida pelo cristal em função do comprimento da secção de entrada dos guias de onda

Para o mesmo comprimento de secção de entrada do cristal, o sistema com guia de onda cilíndrica é o que apresenta uma maior absorção no cristal. A radiação à saída de o guia de onda cilíndrico encontra-se na região central que faz com que a radiação introduzida pelos guias de onda dentro da cavidade seja concentrada na região central do cristal. A distribuição apresenta um pico central, de energia elevada, superior ao dos outros guias.

Nos outros dois sistemas de guias de onda a distribuição à saída do guia de onda é uniforme, e a intensidade da radiação inferior.

O facto da radiação no guia de onda cilíndrico encontrar-se na região central revelou-se uma descoberta de extrema importância, pois torna possível o uso de guias de onda de secção maior, o que leva a uma maior colecção de radiação solar e a menores erros de colecção.

Devido a estes factos, o sistema óptico implementado com guia de onda cilíndrica apresenta uma potência laser de 21W, representando uma eficiência de colecção de 11.6W/m² e apresentando um erro de colecção para $\Delta X=1.3\text{mm}$ de 4.4%.

Comparando estes valores com dois valores anteriores em que se obteve uma potência laser de 10.75W/m^2 apresentando um erro de colecção entre 5.7% e 9.25% [1], e uma potência laser de 6.7W/m^2 [2] os resultados finais foram muito satisfatórios.

Na tabela 5.1 são apresentados os resultados finais da absorção no cristal, potência laser saída e qualidade do feixe, para os 4 sistemas ópticos implementados.

Tab.5.1- Resultados da cavidade de ressonância para os diferentes sistemas de bombeamento

	Guia de onda Simétrica $5 \times 18\text{mm}^2$	Guia de onda de secção quadrada 11mm	Guia de onda de secção octogonal 13mm	Guia de onda de secção circular 20mm
Potência Absorvida [w]	83.3	74.6	82.74	102.39
Potência Laser [w]	12.7	13.02	15.43	21
M_x^2	52.83	52.1	52.6	54.7
M_y^2	52.8	52.1	52.6	54.7

Conclui-se que nos sistemas bombeados lateralmente, maiores áreas de colecção apresentam maior absorção no cristal, porque o cristal é bombeado lateralmente, como tal maior é a área bombeada. Este facto não se verifica sempre nos sistemas bombeados pela extremidade, pois se a área de colecção for muito elevada e a distribuição ao longo do guia de onda não for central, grande parte da radiação é perdida.

O trabalho presente mostrou-se bastante promissor, principalmente no sistema óptico com guias de onda cilíndrica de 20mm de diâmetro.

O uso de dopagem com neodímio e crómio no meio activo poderia levar a melhores resultados no desempenho do sistema laser.

Foram adquiridos elevados conhecimentos de lasers solares, tanto a nível teórico, como experimental, sempre acompanhado de modulações através de software.

Referências

- [1] João P. Geraldès, Dawei Liang, An alternative solar pumping approach by a light guide assembly elliptical-cylindrical cavity, *Solar Energy Materials & Solar Cells* 92 (2008) 836–843.
- [2] M. Lando, J. Kagan, B. Linyekin, V. Dobrsuin, “A solar pumped Nd: YAG laser in high collection efficiency regime”, *Opt. Commun.*, No.22, pp. 371, 2003.