U.PORTO

FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

Projeto e desenvolvimento de um sistema laser de estado sólido para uso em Velocimetria de Partículas

Hugo Tiago Melo Moreira

Orientador:
Prof. João Manuel R.S. Tavares

Co-orientador:
Engº. Jorge Manuel de Matos Reis

Dissertação realizada no âmbito do
Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Porto, 2017

Página intencionalmente deixada em branco

Dedicado ao meu pai,
António.

Página intencionalmente deixada em branco

Resumo

Dada a típica necessidade de re-enchimento periódico com gás Árgon do reservatório de um laser a gás, geralmente utilizado para processos de Velocimetria de Partículas, que se encontra inativo no Laboratório de Fluídos da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, este projeto surge como uma oportunidade de desenvolver um novo sistema laser (estado sólido) para o mesmo fim, visando não só uma redução de custos do equipamento, mas também a resolução, ou minimização, de alguns dos problemas associados aos lasers a gás, destacando-se aqui aumento da vida útil do laser.

O trabalho desenvolvimento centra-se na adaptação de um laser do tipo DPSS (*Diode Pumped Solid State*) de forma a que se consiga uma regulação de potência de forma adequada. A compensação e estabilização térmicas serão asseguradas por um sistema de controlo de temperatura recorrendo a componentes baseados no efeito Peltier, capazes de assegurar de forma estável a temperatura do laser com a precisão requerida, promovendo uma menor influência da temperatura na qualidade do feixe, que tipicamente altera substancialmente. Ao longo do projeto, foi ainda desenvolvida uma estrutura cuja função assenta na fixação dos componentes já referidos e na adaptação de fixação entre os dois sistemas, o existente e o atual desenvolvido. Para além disso, foi ainda desenvolvida, montada e testada a eletrónica de controlo de potência, temperatura e segurança do sistema e ainda projetada uma caixa de controlo amovível para alimentação e controlo completo de todas as funcionalidades do sistema gerador de *lasing*.

Concluída a construção, montagem e calibração de todo o sistema, foram executados testes num sistema LDV existente na FEUP.

Palavras-chave: Velocimetria de Partículas; Laser a gás; LDV; Laser estado sólido; Laser DPSS; Refrigeração termoelétrica.

Página intencionalmente deixada em branco

Abstract

At the moment, the gas laser that is placed in the Fluidics Laboratory of Engineering Faculty is inactive due to the typical periodical refilling need of the gas laser reservoir with Argon gas. Therefore, this project arises as an opportunity to develop a new laser system (a solid state one) for the same purpose, aiming not only to achieve a significant equipment costs reduction, but also the resolution, or minimization, of some problems associated with gas lasers, being particularly relevant the life cycle increase of the laser.

The work in development is focused on adapting a DPSS (Diode Pumped Solid State) laser in a way that a continuously adjustable increase of power can be achieved. Thermal compensation and stabilization will be ensured by a temperature control system, resorting to components based on Peltier effect, capable of assuring and stabilizing the laser temperature with the required precision, thereby fostering a weaker influence of the temperature on beam quality, which is substential. Along the project development, a structure whose function relies on the fixation of the already referred components, was also designed and built. Moreover, the same structure was also a crucial player for the adaptability of the components to the existing holders on the laser being substituted. Besides, the eletronics for the system's power, temperature and security control was also developed, assembled and tested. Also, a detachable monitoring box was designed for the complete control and supply of all the functionalities of the laser system.

Once the system construction, installation and calibration phases were concluded, some tests were executed using a LDV system existing in FEUP.

Key-words: Particle Velocimetry; Gas laser; LDV; Solid State Laser; DPSS Laser; Thermoelectric refrigeration.

Página intencionalmente deixada em branco

Agradecimentos

Em primeiro lugar aos meus orientadores, Prof. João Tavares e Engº. Jorge Reis, pela interessante e ousada proposta que apresentaram. Em particular ao Engº. Jorge Reis por todos os conhecimentos, ensinamentos e material fornecido e ao Prof. João Tavares pela minuciosa revisão literária que executou ao longo do semestre.

Ao Sr. Joaquim um agradecimento muito especial pela ajuda que me prestou, pelo espaço de trabalho que me possibilitou e pela boa disposição diária que me proporcionou.

Ao Sr.Ramalho pelo material de eletrónica que me disponibilizou.

Ao Dr. Mário Guindeira pela ajuda nos teste na execução dos teste LDV que sem a sua experiência e conhecimento não teria sido possível.

À Joana Loureiro pela paciência tida na exaustiva e difícil tarefa que é a revisão literária de algo escrito por mim e especialmente pelo apoio constante.

A todos os meus amigos e família, que desde já peço desculpa por não os enumerar mas a lista seria sem fim. Para facilitar, se estiverem a ler isto sem qualquer interesse no resto do trabalho é porque estão presentes nesta lista.

Ao meu Pai e Avô pela inspiração que têm sido na minha vida.

Página intencionalmente deixada em branco

Conteúdo

Resumo v

Abstract vii

Agradecimentos ix

Notações xvi

Lista de Figuras xx

Lista de Tabelas xxi

1 Introdução **1**

1.1 Enquadramento 1

1.2 Objetivos 3

1.3 Estrutura da Dissertação 4

2 Fundamentos e Estado da Arte **5**

2.1 Lasers 5

2.1.1 Base Teórica 6

2.1.2 Componentes 8

2.1.3 Principio de Lasing 9

2.1.4 Propriedades e Aplicações 10

2.1.5 Estabilidade de feixe 14

2.1.6 Threshold 15

2.1.7 Tipos de feixe 15

2.1.8 Modos de ressonância 16

2.2 Velocimetria de partículas 16

2.2.1 LDV . . . 17
2.2.2 Iluminação do meio . . . 19
2.3 Estado da Arte . . . 19
2.3.1 Laser a gás . . . 20
2.3.2 Laser semicondutor ou díodo laser . . . 21
2.3.3 Laser estado sólido . . . 23

3 Projeto do sistema **27**
3.1 Seleção do Laser . . . 28
3.2 Refrigeração . . . 30
3.3 Estrutura . . . 31
3.4 Painel de Controlo . . . 32
3.5 Sequência de Projeto . . . 34

4 Desenvolvimento do Sistema Laser **35**
4.1 Estrutura . . . 35
4.1.1 Laser . . . 36
4.1.2 Placa de efeito Peltier . . . 40
4.1.3 Modulo Laser . . . 41
4.1.4 Módulo Completo . . . 47
4.1.5 Base . . . 48
4.1.6 Caixa . . . 50
4.2 Montagem da estrutura . . . 53
4.2.1 Módulo laser . . . 54
4.2.2 Montagem do laser . . . 57
4.2.3 Fixação de elementos da estrutura . . . 58
4.2.4 Estrutura do sistema . . . 59
4.3 Electrónica . . . 60
4.3.1 Circuito de controlo laser . . . 61
4.3.2 Controlo Térmico . . . 64

4.3.3 Temporizador de contagem decrescente 65
4.3.4 Fotosensor 67
4.3.5 Shutter e Mode Lock 67
4.3.6 Circuito de realimentação elétrica e ótica 67
4.3.7 Alimentação do sistema 68
4.3.8 Corte de energia e alimentação do sistema 69
4.4 Painel de Controlo 70
4.4.1 Interface 71

5 Testes e Resultados Experimentais **75**
5.1 Testes térmicos com laser 75
5.1.1 Ensaios e análise de resultados 75
5.2 Teste laser no Sistema LDV 78
5.2.1 Procedimento 78
5.2.2 Ensaios e análise de resultados 80

6 Conclusões e Trabalhos Futuros **83**

Bibliografia **89**

Apêndices **91**
Apêndice A - Argon Model 5500A - Ficha técnica 93
Apêndice B - Medição de correntes de alimentação correspondentes as potências óticas de trabalho 97
Apêndice C - Componentes Bosch 99
Apêndice D - Esquema elétrico completo 105

Página intencionalmente deixada em branco

Notações

Acrónimos, siglas e abreviaturas

AR	*Alta refleção*
AT	*Alta transparência*
CW	*Continuous wave*
DPSS	*Diode Pumped Solid State*
GaAs	*Gallium arsenide*
GaN	*Gallium nitride*
ILIDS	*Interferometric Laser Imaging Droplet Sizer*
InP	*Indium phosphide*
IR	*Infrared*
KTP	*Potassium titanyl phosphate* ($KTiOPO_4$)
LD	*Laser Diode*
LDV	*Laser Doppler velocimetry*
LIDAR	*Light Detection And Ranging*
Nd:YAG	*Neodymium-doped Yttrium Aluminium Garnet* ($Nd:Y_3Al_5O_{12}$)
Nd:VYO_4	*Neodymium-doped Yttrium Orthovanadate* ($Nd:YVO_4$)
NTC	*Negative Temperature Coefficient*
OEM	*Original Equipment Manufacturer*
PDPA	*Phase Doppler Particle Analyzers*
PID	*Proportional–Integral–Derivative*
PIV	*Particle image velocimetry*
SPECT	*Spectrometer*
TEM	*Transverse electromagnetic modes*
UPIN	*Universidade do Porto Inovação*

Unidades

A	Ampere
Hz	Hertz
J	Joule
m	Metro
rad	Radiano
V	Volt
W	Watt
^oC	Grau Celsius

Variáveis (unidades)

c	Velocidade da luz (m/s)
D	Diâmetro de abertura (m)
dF	Distância entre linhas interferométricas (m)
E_1	Energia correspondente ao nível de repouso quântico de um átomo genérico (J)
E_2	Energia correspondente ao segundo nível de energia quântico de um átomo genérico (J)
E_3	Energia correspondente ao terceiro nível de energia quântico de um átomo genérico (J)
f	Frequência (Hz)
h	Constante de $Planck$ $(J.s)$
I	Corrente elétrica (A)
I_{max}	Corrente máxima (A)
I_{th}	Corrente *threshold* (A)
L	Distância entre feixe laser do sistema a construir ao suporte existente no laboratórios de fluido da FEUP (m)
M^2	Qualidade de feixe
n	Nível quântico
P_{out}	Potência ótica (W)
T_J	Temperatura de junta (^oC)
t_p	Largura de pulso (s)
v	Velocidade (m/s)
ΔE	Variação de energia entre dois níveis quânticos (J)
η	Rendimento (%)
θ	Ângulo de divergência (rad)
λ	Comprimento de onda (m)
τ	Tempo médio de desexitação (s)

Lista de Figuras

1.1 Laser de Árgon existente nos Laboratórios de Fluidos da FEUP. 2

1.2 Número de transistores produzidos por ano e preço de transistor em função do tempo 3

2.1 Vista de corte e representação dos componentes do primeiro laser de rubi construido por Theodore Maiman 5

2.2 Átomo de Bohr e processos de absorção, emissão espontânea e emissão estimulada de um átomo 7

2.3 Sistema atómico de três níveis de energia 8

2.4 Modelo genérico de um laser 9

2.5 Pricipío de *lasing* 10

2.6 Comparação entre o comprimento de onda emitido por um laser e por uma lâmpada convencional 11

2.7 Coerência temporal 12

2.8 Coerência espacial 12

2.9 Ângulo de divergência de um feixe 13

2.10 Focos de feixe 13

2.11 Largura de pulso 14

2.12 Evolução do ganho *versus* perdas de um laser e lineariadade entre a pontência e a corrente de um díodo laser 15

2.13 Modos de ressonância de baixa ordem Hermite-Gaussian 16

2.14 Esquema do procedimento de análise de partículas num sitema 17

2.15 Esquema representativo de um sistema LDV 18

2.16 Esquema de corte de um laser árgon 20

2.17 Exemplo de funcionamento e estrutura de um díodo laser 22

2.18 Esquemas de alimentação de um laser de estado sólido 24

2.19 Sequência de funcionamento de um laser DPSS 25

3.1 Sistema laser a substituir 28

3.2 Esquema do sistema laser a desenvolver + LDV a desenvolver. 28

3.3 Influência da temperatura na potência de feixe e alimentação de um díodo laser 30

3.4 Funcionamento de um placa de efeito Peltier 31

3.5 Sistema LDV existente no laboratório de Fluidos da FEUP. 31

4.1 Esquema solução estrutural a Desenvolver. 35

4.2 Laser DPSS conseguido 36

4.3 Relação gráfica entre os valores de potência ótica e corrente de alimentação do laser a utilizar a aproximadamente 28 ^{o}C. 38

4.4 Esquema de funcionamento do laser utilizado. 38

4.5 Dissecação de um laser semelhante ao utilizado. 39

4.6 Placa de efeito Peltier utilizada. 40

4.7 Controlador de temperatura digital utilizado. 41

4.8 Encapsulamento do laser 42

4.9 Módulo de fixação 42

4.10 Representação em corte do módulo de refrigeração desenvolvido em Solidworks. 44

4.11 Secção de corte parcial, B-B, referido na figura 4.10. 46

4.12 Modulo Laser em corte desenvolvido em Solidworks. 47

4.13 Fixação entre o modulo de fixação e refrigeração. 48

4.14 Módulo de laser desenvolvido. 48

4.15 Base desenvolvida em Solidworks. 49

4.16 Placas de alumínio de adaptação ao suporte. 49

4.17 Base LDV existente desenhada em Soliworks. 50

4.18 Sistema de Calibração. 50

4.19 Base Construída. 50

4.20 Representação da caixa desenvolvida em Solidworks. 51
4.21 Representação do mecanismo *Shutter*. 52
4.22 Ventoinhas e grelha. 52
4.23 Caixa laser em desenvolvimento. 53
4.24 Representação em vista explodida e sequencial da montagem do módulo laser. 54
4.25 Montagem módulo laser 55
4.26 Verificação do posicionamento e funcionamento da placa de efeito Peltier. . 56
4.27 Testes térmicos sem laser 56
4.28 Laser modificado e devidamente encapsulado 57
4.29 Montagem do laser no módulo de fixação. 57
4.30 Fixação entre a módulo laser e base. 58
4.31 Fixação entre a módulo laser e base + sistema de calibração. 59
4.32 Fixação entre a módulo laser e base. 59
4.33 Estrutura sistema laser. 60
4.34 Esquema simplificado de desenvolvimento da eletrónica do sistema. 60
4.35 Circuito de regulação e estabilização de potência idealizado. 61
4.36 Montagem circuito de regulação e estabilização de potencia idealizado. . . . 61
4.37 Esquema circuito de controlo de corrente e tensão do laser. 62
4.38 Módulo LM2596 utilizado. 62
4.39 Circuito da placa do módulo LM2596. 63
4.40 Circuito de regulação de corrente. 63
4.41 Circuito de estabilizador de alimentação laser. 64
4.42 Circuito de controlo térmico, palca de efeito Peltier e ventoinhas. 65
4.43 circuito de corte térmico. 65
4.44 Circuito de temporização de contagem decrescente. 66
4.45 Circuito de temporização de contagem decrescente montado e testado. . . . 66
4.46 Circuito fotosensor. 67
4.47 Circuito vuímetro. 68
4.48 Circuito vuímetro montado. 68

4.49 Fonte de alimentação provisória. 69
4.50 Circuito de corte de energia. 69
4.51 Circuito simplificado de corte de energia montado e testado. 70
4.52 Estrutura do painel de controlo projetada em Solidworks. 70
4.53 Interface do painel de controlo idealizada. 72

5.1 Fontes de alimentação utilizadas no ensaio. 76
5.2 Equipamento utilizado no ensaio e respetiva representação térmica 76
5.3 Medições de temperatura do laser 77
5.4 Procedimento de testes no sistema LDV 79
5.5 Ajuste do fotosensor para o primeiro ensaio. 80
5.6 Primeiro ensaio de medição no sistema LDV 81
5.7 Segundo ensaio de medição no sistema LDV 81

Lista de Tabelas

2.1 Exemplos de lasers a gás e respectivas caracterizações e aplicações 21

2.2 Exemplos de díodo laser e respectivas caracterizações e aplicações 22

2.3 Exemplos de lasers de estado sólido e respectivas caracterizações e aplicações (excluindo díodos laser) 24

3.1 Principais especificações laser Árgon ITL 5500A 29

4.1 Especificações laser medidas. 36

4.2 Valores referente à variação da corrente de *threshold* face a variação de temperatura. 37

4.3 Valores referente ás correntes correspondentes ás diferentes potências de trabalho. 37

4.4 Especificações da placa de efeito Peltier utilizada com alimentação de 12 Volt medidos experimentalmente. 40

4.5 Especificações do controlador de temperatura digital utilizado. 41

Página intencionalmente deixada em branco

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento

Apesar da incerteza do seu propósito aquando da descoberta inicial da tecnologia laser, a sua importância nos tempos atuais é inegável. Embora tenha sido considerada "uma solução sem um problema", nenhuma outra tecnologia se demonstrou tão útil e com tanta aplicabilidade durante o século XX, estando presente em áreas tão diversas como a comunicação, a medicina, o processamento de materiais, a investigação científica, o ambiente, a indústria e até em contexto militar, aumentando diariamente as áreas da sua aplicabilidade [1].

Apresentando propriedades únicas, diversos meios de produção de um feixe de laser têm sido desenvolvidos [2]. Um dos mais utilizados e com maior reconhecimento são os lasers a gás, dado que desde a sua descoberta têm demonstrado ser um dos equipamentos mais fiáveis e versáteis do mercado. Sendo estáveis, estes laser tem a particularidade de conseguir vingar em praticamente todas as aplicações possíveis, desde aplicações de corte a leituras por códigos de barras. Apesar de todas as suas potencialidades, o problema deste tipo de laser reside na sua manutenção, necessária para que se consiga um feixe capaz de responder às exigências que lhe são impostas sem comprometer a sua funcionalidade [3]. Os principais problemas de manutenção podem ser referentes a:

- **Fuga de gás** - devido à impossibilidade de estancamento total, o gás responsável pela produção de feixe, que se encontra sob pressão numa câmara vítrea, vai eventualmente escapando através da porosidade contida na mesma (ou sob baixa pressão misturando-se com ar que entrar pela porosidade vitrea). Tais escapes levam a que seja necessária uma periódica reciclagem e reposição correta das proporções e pressões do gás [3].

- **Problemas na fonte de alimentação** - o facto de serem utilizadas potências muito elevadas e configurações muito específicas leva, por norma, a um elevado custo aquando da aquisição e reparação das fontes de alimentação na sequência de um baixo rendimento dos sistemas laser em termos energéticos/óticos [3].

- **Temperaturas extremas dentro da câmara** - a temperatura no interior da câmara vítrea pode atingir cerca de 2000^oC, podendo ser próxima da temperatura de fusão da própria câmara. Temperaturas elevadas causam também a dilatação térmica dos elementos óticos do laser, o que a longo prazo implicará uma diminuição

da qualidade do laser, levando potencialmente à necessidade de substituição dos mesmos [4].

- **Produção de resíduos tóxicos** - os resíduos resultantes da produção do feixe de laser têm de ser removidos por pessoal qualificado e recorrendo a segurança apertada [4].

Embora apresentando estas desvantagens, este tipo de lasers continuam a ser largamente utilizados uma vez que, na maioria dos casos, os propósitos da sua utilização compensam os possíveis prejuízos associados ao seu uso. O mesmo não se verifica aquando da necessidade de os manter para exigências e utilizações pontuais. O tempo de vida de um laser a gás é altamente condicionado pelas condições do gás nele inserido. Isto é, devido ao problema de estancamento já referido, o tempo de vida útil de um laser a gás torna-se independente da sua utilização. Assim sendo, mesmo que o laser não seja muito utilizado, a qualidade do laser irá ser afetada, acabando por, a longo prazo, se inutilizar até que uma nova recarga de gás seja inserida [2]. O propósito do presente trabalho centra-se num caso semelhante que se está a verificar atualmente nas oficinas de Fluídos do Departamento de Engenharia Mecânica da FEUP com um laser de Árgon utilizado em processos de Velocimetria de Partículas. Sendo um processo de medição instantânea de campos de velocidade e propriedades de partículas em fluídos, muito utilizado em áreas de investigação relacionadas com a engenharia aeroespacial, automóvel e de combustão, tornou-se importante estudar formas inovadoras e mais vantajosas para aplicação ao mesmo processo [5].

Figura 1.1: Laser de Árgon existente nos Laboratórios de Fluidos da FEUP.

O laser em questão (Figura 1.1), trata-se de um laser de Árgon destinado a ser esporadicamente utilizado em trabalhos de investigação e demonstrações didáticas e interativas em processos LDV. Para além de se encontrar com a fonte de alimentação danificada, o laser tem, de acordo com os responsáveis do laboratório, uma duração média de trabalho de duas horas por recarga. Sendo que, para o caso em questão, o preço de cada recarga ronda os cinco mil euros, esta tem sido a principal razão para a inatividade atual do laser. Dada a idade atual do equipamento, instalado em Junho de 1993, e todas as condicionantes já referidas, a necessidade de substituição do laser por um que permita condições de trabalho semelhantes e apresente simultaneamente um tempo de vida útil superior com custos e manutenção reduzidos, é incontestável.

De modo a possibilitar esta considerável redução dos custos de manutenção e, particularmente, para permitir o alargamento do tempo de vida útil do laser, é mais lógico a utilização de um sistema de estado sólido capaz de manter as suas propriedades ao longo do tempo mesmo que não seja utilizado.

Graças aos avanços significativos na Nanotecnologia, tal como os transístores (Figura 1.2) a evolução dos díodos laser ou semicondutores, tem sido notória. Diariamente, os preços e os tamanhos destes lasers diminuem inversamente ao valor das suas potências e diversidades, tornando este tipo de solução laser interessante para aplicações de exigências mais elevadas [6].

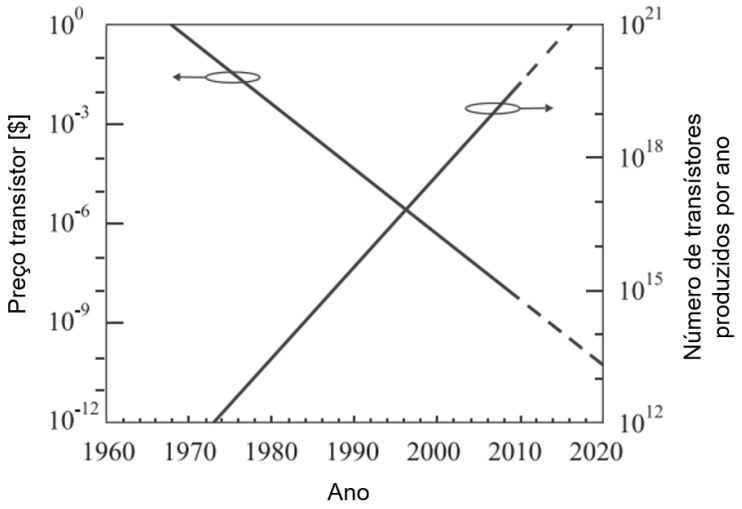


Figura 1.2: Número de transistores produzidos por ano e preço de transistor em função do tempo (adaptado de [6]).

1.2 Objetivos

O presente trabalho visa o projeto e desenvolvimento de raiz de um equipamento laser que possa ser utilizado para trabalhar como opção válida e fiável para substituição de lasers a gás a ser usados em sistemas profissionais de determinação de Velocimetria de Partículas. Neste caso concreto, pretende-se a substituição de um laser de Árgon utilizado nos Laboratórios de Fluídos da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Pretende-se com isto aumentar o tempo de vida útil dos lasers utilizados para esse fim, a redução de custos de equipamento e de manutenção dos mesmos, mantendo a fiabilidade, estabilidade e a qualidade do feixe laser.

O equipamento deverá permitir um controlo de potência ótica continua e estável, mantendo a temperatura ideal de funcionamento de forma eletrónica e facilmente controlada, de forma a que possa também ser eletronicamente ajustada de acordo com os propósitos a que se destina, tendo em conta as variáveis de elevada exigência de desempenho neste equipamento profissional.

Pretende-se uma prova de conceito funcional de um equipamento de cariz industrial que permita uma produção em massa, a custo reduzido e cuja aplicabilidade seja multifacetada,

facilitando a sua aplicação a qualquer tipo equipamento semelhante já existente e que necessite de substituição por um preço mais reduzido.

No final desta dissertação, o equipamento projetado e desenhado em Solidworks, como eventual protótipo, deve permitir uma comparação e demonstração de conceito de capacidades e aplicabilidades universais por incorporação e eventual teste num sistema de Velocimetria de Partículas profissional já existente e a funcionar para esse fim.

Como último objetivo, pondera-se proceder a um eventual patenteamento do sistema junto da UPIN (Universidade do Porto Inovação) .

1.3 Estrutura da Dissertação

Este documento estará organizado por capítulos e incluirá também um conjunto de anexos e referências bibliográficas no final do mesmo.

Capítulo 2 - Serão introduzidos alguns conceitos básicos acerca de lasers. Primeiramente é apresentado um breve conteúdo histórico assim como os conceitos básicos, princípio de funcionamento, componentes essenciais para a produção de um feixe lasers assim como suas propriedades e conceito de estabilidade do mesmo. De seguida, serão apresentadas os vários tipos de laser existentes sendo posteriormente desenvolvidos apenas os que irão ter mais destaque neste trabalho. Este capítulo também inclui uma introdução referente a processos de velocimetria assim como a especificação do método a utilizar.

Capítulo 3 - Será uma introdução ao sistema a desenvolver, realçando os aspetos a ter em conta relativamente ao sistema LDV já existente, assim como uma seleção prévia dos equipamentos que devem ser considerados antes do desenvolvimento efetivo de todo o sistema.

Capítulo 4 - Será dedicado a todo o processo de desenvolvimento do sistema, desde a apresentação dos componentes chave já referidos e respetivas especificações, laser e placa de efeito Peltier, até ao processo de desenvolvimento estrutural, elétrico e interface de controlo do sistema. Também serão retratados todos os testes e procedimentos de montagem merecedores de maior destaque.

Capítulo 5 - Este capítulo será dedicado aos testes executados ao sistema laser, como prova de conceito do projeto. Nesse sentido, dois tipos de testes distintos foram executados. O primeiro teve como objetivo testar a variação da temperatura do laser através do módulo laser, estando o laser à potência máxima, de forma a se verificar qual o controlo possível da temperatura nessas condições. O segundo teste centrou-se na prova de conceito, tendo sido colocado o laser no sistema LDV. Este procedimento foi realizado na presença de um especialista na área, o Dr. Mário Guindeira, responsável pelo Laboratório de Fluídos do Departamento de Engenharia Mecânica, com o objetivo de se verificar se o mesmo tinha o comportamento necessário e desejado para a aplicação pretendida.

Capítulo 6 - Este capítulo centra-se na análise do trabalho executado até ao momento da entrega do documento assim como um diagnóstico em relação aos trabalhos de conclusão do projeto. Neste capítulo também são enumeradas algumas vertentes que, na minha opinião, poderiam ser aprofundadas com base neste projeto.

Capítulo 2

Fundamentos e Estado da Arte

Neste capítulo serão introduzidos alguns conceitos básicos acerca de lasers. Primeiramente é apresentado um breve conteúdo histórico assim como os conceitos básicos, princípio de funcionamento, componentes essenciais para a produção de um feixe laser assim como suas propriedades e conceito de estabilidade do mesmo. De seguida, serão apresentadas os vários tipos de laser existentes sendo posteriormente desenvolvidos apenas os que irão ter mais destaque neste trabalho. Este capítulo também inclui uma introdução referente a processos de velocimetria assim como a especificação do método a utilizar.

2.1 Lasers

O laser, acrónimo de "*light amplification by stimulated emission of radiation*", surge como algo inovador devido ás propriedades únicas que apresenta. Não se trata apenas de um simples emissor difuso de radiação, como uma lâmpada, mas sim de uma fonte de radiação monocromática, coerente, colimada e de grande intensidade - algo que nunca antes havia sido testemunhado [7]. Estas propriedades não só permitiram a criação de novos equipamentos como também possibilitaram o melhoramento de alguns já existentes e direccionados às mais diversas áreas de aplicação [1].

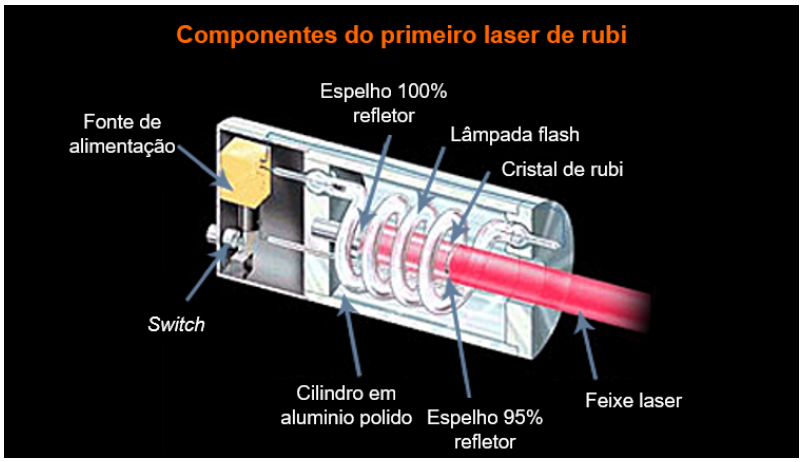


Figura 2.1: Vista de corte e representação dos componentes do primeiro laser de rubi construido por Theodore Maiman em 1960 (adaptado de [8]).

O princípio de funcionamento de um laser assenta na teoria de emissão estimulada

pensada por Albert Einstein em 1917 [7]. Tal teoria foi colocada em prática pela primeira vez por Charles Townes que, utilizando vapor de amoníaco como elemento de ganho, conseguiu produzir um dispositivo capaz de produzir um feixe de radiação micro-ondas altamente coerente, que foi designado de maser, acrónimo de "*microwave amplification by stimulated emission of radiation*". Não satisfeito, em 1958, Charles Townes, juntamente com Nicolay Basov e Aleksandr Prokhorov, publicou uma teoria que alargava o conceito de "*maser*"para obtenção de feixes com comprimentos de onda visíveis, criando assim as teorias base para a obtenção daquilo que foi inicialmente designado como "*optical maser*" e que consistia naquilo a que hoje chamamos laser [9]. No entanto, este conceito foi apenas demonstrado em 1960 por Theodore Maiman. Tendo como base a publicação de Townes, Basov e Prokhorov, Maiman produziu o primeiro feixe de laser recorrendo a um cristal de rubi como meio de ganho, uma câmara de ressonância ótica entre as extremidades do cristal e uma lâmpada de flash, criando assim o primeiro laser de estado sólido (Figura 2.1). Esta demonstração não só valeu a Maiman vários prémios internacionais, como valeu um prémio Nobel da Física a Townes, Basov e Prokhorov pelos seus contributos teóricos [9].

2.1.1 Base Teórica

De modo a explicar o funcionamento base de um laser, em primeiro lugar irão ser apresentados os conceitos teóricos básicos nos quais Townes, Basov e Prokhorov se apoiaram quando publicaram o primeiro conceito para a obtenção de um laser.

- **Fotões e Energia**

  Foram necessários vários anos até que se chegasse a um conceito capaz de definir o modo de propagação de radiação. Era difícil de criar uma definição concreta dado que esta apresentava tanto propriedades de onda eletromagnética como de partícula. De modo a arranjar uma solução, determinou-se que a radiação se propaga através de partículas de energia intrínseca que se propagam em forma de onda eletromagnética, aos quais se chamou "fotões" [10].

  A energia de um fotão (E) está associada à constante de Planck (h), comprimento de onda (λ) e velocidade da luz (c), sendo determinada com base em:

$$E = \frac{hc}{\lambda} \tag{2.1}$$

- **Átomo de Bohr e Quantum**

  A libertação de fotões, ou seja, a radiação, pode ser explicada através do modelo atómico de Niels Bohr.

  Ao observar o espectro de emissão do Hidrogénio, Bohr estabeleceu uma ligação entre linhas discretas de radiação espectral emitidas e o movimento de eletrões num átomo. Determinou também que cada átomo tem níveis de energia discretos em que um eletrão pode habitar, ao qual chamou "quantum" (Figura 2.2a). Um eletrão pode ser excitado do seu nível de repouso para um nível de energia superior, e vice-versa, mas não pode permanecer em níveis intermédios de energia. Como consequência, a energia necessária para se excitar um eletrão de um nível de repouso para um nível de energia superior é exatamente a mesma que o átomo irá libertar quando o eletrão regressar desse nível de excitação para o nível de repouso. Assim sendo, para se excitar um eletrão para um nível quântico superior é necessário que a energia

fornecida ao átomo seja superior à diferença de energia entre os dois níveis quânticos considerados (ΔE) [10]:

$$E_2 - E_1 = \Delta E = hf \tag{2.2}$$

- **Absorção, emissão espontânea e emissão estimulada**

  Um átomo, seja ele qual for, pode receber ou fornecer quantidades de energia através de processos de absorção e emissão respetivamente.

  Um átomo, quando excitado, tem tendência a regressão ao seu nível de repouso, após o tempo médio de desexcitação, τ. Ao chegar ao estado de repouso, o eletrão liberta um fotão de energia igual à energia que o excitou durante este processo. Para além do processo de emissão espontânea, existe ainda o processo de emissão estimulada, idealizado por Albert Einstein. A emissão estimulada ocorre quando um átomo excitado é atingido por um fotão com a mesma energia de desexcitação, estimulando-o a libertar um fotão em sincronia com o que o estimulou. Os dois fotões apresentam a mesma fase e o mesmo comprimento (Figura 2.2b) [10].

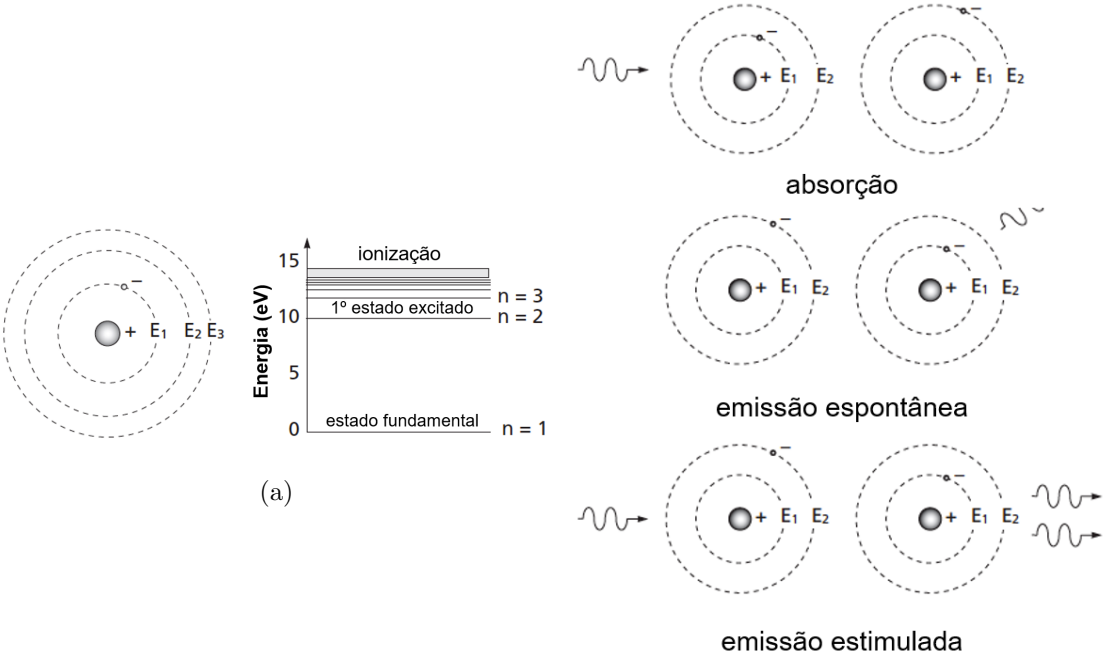


Figura 2.2: a) Átomo de Bohr e respectivos níveis de energia; b) Esquema representativo de processos de absorção, emissão espontânea e emissão estimulada de um átomo (adaptado de [10]).

- **Inversão de População**

  Em sistemas de emissão de radiação, como os lasers, é necessário garantir a existência de inversão de população. Esta necessidade advém da tendência que uma população de átomos tem de se manter em repouso, ou seja, de ter mais átomos em repouso do que num estado excitado [7]. Como a facilidade de um átomo absorver radiação é a mesma com que este pode emitir radiação de forma espontânea, para se conseguir obter uma fonte emissora é necessário garantir uma predominância da radiação

emitida face à absorvida na população atómica do emissor. Para que tal seja assegurado, recorre-se à inversão de população dos átomos ou moléculas existentes no meio, garantindo-se que existem mais átomos excitados no meio do que em repouso. No caso representado na figura 2.2a, a inversão de população iria garantir que existe um maior número de eletrões em $E2$ do que em $E1$ [10].

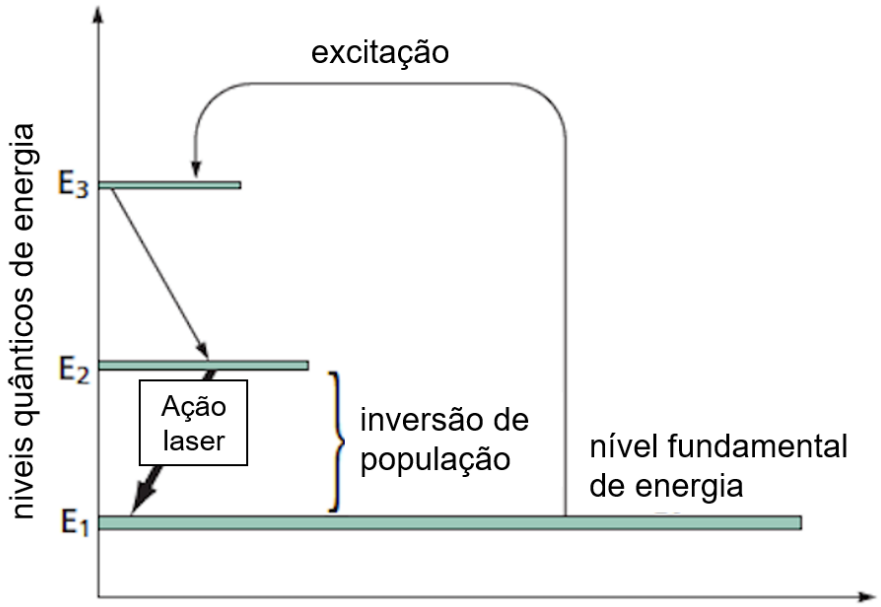


Figura 2.3: Exemplo de sistema atómico de três níveis de energia (adaptado de [10]).

No entanto, é impossível obter inversão de população com apenas dois níveis de energia, dado que o melhor rácio entre eletrões em $E1$ e $E2$ é de 50%. Deste modo, recorre-se a meio de ganho com três ou quatro níveis de excitação [11]. Recorrendo ao exemplo da figura 2.3, um meio de ganho com três níveis de energia discretos, a inversão de população neste sistema pode ser conseguida sabendo que o tempo de queda do eletrão do nível $E3$ para $E2$ é menor do que o tempo de queda de um eletrão do nível $E2$ para $E1$. Assim, é assegurado uma inversão de população entre os níveis $E2$ e $E1$, o pretendido para a emissão continua [8] [10]. Nestes casos, níveis como $E3$ representam um nível metastável de energia, o que significa que a queda de $E3$ para $E2$ não produz radiação eletromagnética, produzindo apenas energia cinética [12].

2.1.2 Componentes

A obtenção de um feixe laser necessita de três componentes essenciais (Figura 2.4):

- **"Gain Medium"ou Meio de Ganho**- Constituído por um material em que os níveis de energia que apresenta podem ser populados de forma específica, com a finalidade de possibilitar e garantir a inversão de população já mencionada. O meio de ganho pode ser gasoso, líquido, sólido ou semicondutor e normalmente é composto por átomos com três ou quatro níveis de energia, consoante as propriedades e tipos de feixe a obter [7] [13].
- **"Pump Source"ou Excitador**- Este componente pode ser uma lâmpada flash, uma reação química, descargas elétricas ou até mesmo outro laser e tem como finali-

dade ser a fonte de energia responsável pelo bombardeamento de energia no sistema de forma a criar uma inversão de população entre os níveis energéticos do material no meio de ganho [7] [13].

- **Cavidade de ressonância** - Esta cavidade trata-se, na generalidade dos casos, de uma cavidade Fabry-Perot e é constituída por um par de espelhos refletores entre as extremidades do laser, obrigando a passagens sucessivas dos fotões estimulados no meio de ganho, criando a amplificação do feixe de laser. Os espelhos podem ser paralelos, côncavos ou com outras configurações específicas, permitindo modos de ressonância diferentes. Normalmente, a cavidade é constituída por um espelho totalmente refletor e um segundo parcialmente refletor, que permitem a passagem de um feixe num determinado comprimento de onda [10] [14].

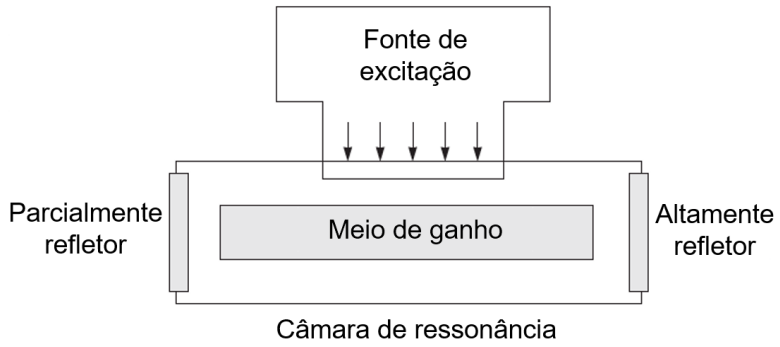


Figura 2.4: Modelo genérico de um laser (adaptado de [10]).

2.1.3 Principio de Lasing

Ao contrário do que foi anteriormente referido como situação ideal e de forma a facilitar a explicação do princípio de *lasing*, irá ser considerado que o meio de ganho apresenta apenas dois níveis de energia envolvidos [8].

A primeira fase do processo de *lasing* passa pelo bombardeamento de energia. Este bombardeamento tem como objetivo promover uma inversão da população dos átomos do material no meio de ganho, excitando-os do nível de energia $E1$ para $E2$ (Figura 2.5a). Com a população do sistema invertida, os átomos excitados têm tendência a voltar ao nível de repouso por emissão espontânea. Após τ, os átomos excitados começam então a emitir espontaneamente libertando um fotão com energia exatamente igual à diferença dos níveis de energia $E1$ e $E2$, mas de fase e direção aleatórias (Figura 2.5b), libertando a energia calculada [7] [12]:

$$E = E2 - E1 \tag{2.3}$$

Como a emissão espontânea dos átomos excitados é aleatória, muito poucos fotões contribuem para o feixe de saída, e os que contribuem não conseguem estimular átomos suficientes de modo a garantir o ganho necessário para a obtenção de um feixe intenso e muito coerente. Para tal, utiliza-se uma câmara de ressonância que não só garante a direcionalidade dos fotões, refeltindo os fotões indesejáveis para fora do sistema, como

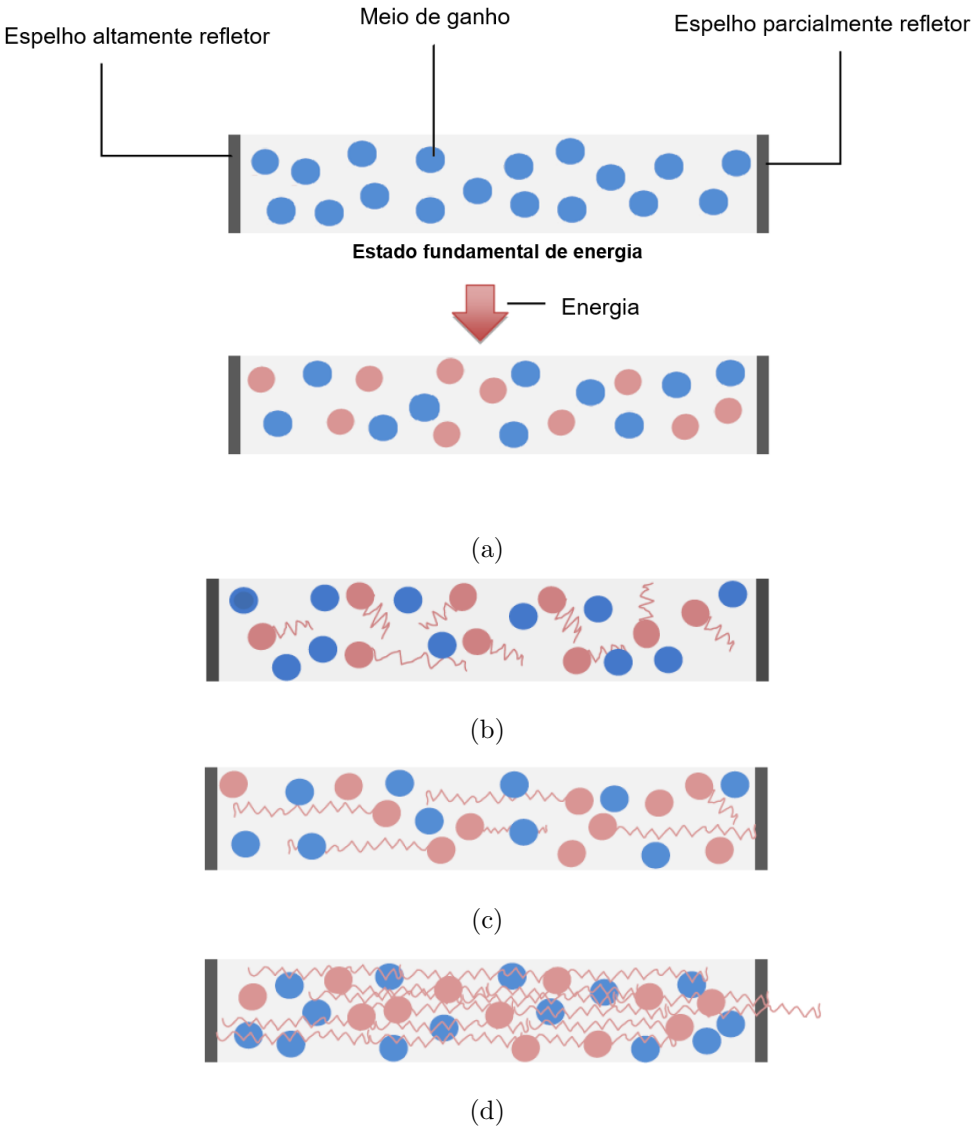


Figura 2.5: a) Inversão de população por bombardeamento de energia; b) Emissão espontânea dos átomos excitados; c) Aumento de emissão estimulada; d) Predominância de emissão estimulada face a emissão espontânea (adaptado de [7]).

aumenta o ganho do sistema, refletindo os fotões desejáveis sucessivamente entre o meio de ganho (Figura 2.5c) [7].

A inversão de população contínua presente no meio de ganho leva a reflexões sucessivas dos fotões estimulados, que se apoderam do meio e predominam em relação aos fotões emitidos espontaneamente, obtendo-se assim um feixe laser. Este é, posteriormente, libertado através de pequenas quantidades de fotões pelo espelho parcialmente refletor presente num dos extremos da cavidade de ressonância (Figura 2.5d) [7].

2.1.4 Propriedades e Aplicações

Como já referido, um feixe laser apresenta propriedades que não são observadas em emissores de luz convencionais.

- **Monocromatismo**

  Uma fonte monocromática consiste num emissor de radiação de cor única, ou seja, uma fonte capaz de emitir uma radiação que apresente um comprimento de onda único.

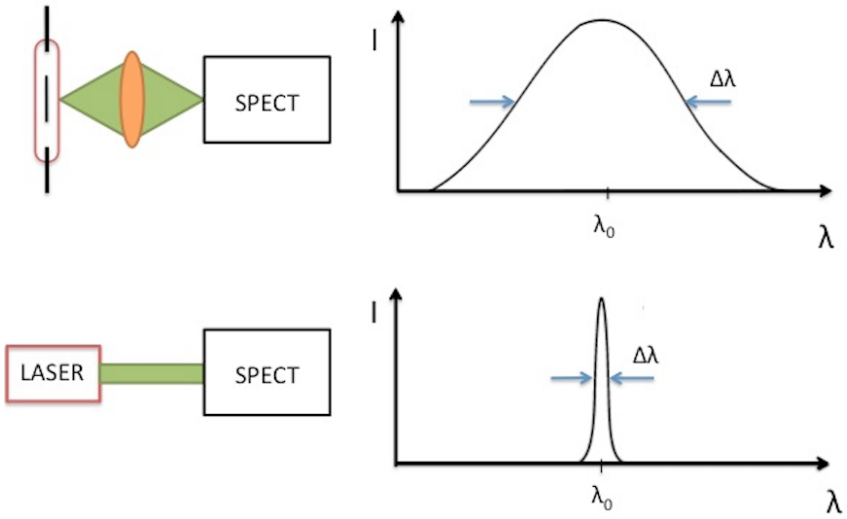


Figura 2.6: Comparação entre o comprimento de onda emitido por um laser e por uma lâmpada convencional (adaptado de [15]).

Embora seja praticamente impossível obter monocromatismo perfeito, em comparação com emissores de radiação convencionais e devido aos pequenos desvios de largura de banda espectral que um laser apresenta, pode ser considerado uma fonte monocromática ideal (Figura 2.6) [15] [12].

Aplicações:

- Comunicações;
- Espectroscopia;
- Interferometria;
- Holografia;
- Sensores.

- **Coerência**

A coerência de um feixe é obtida quando os fotões estimulados se apresentam em fase com os fotões que os estimularam, criando um feixe que está temporalmente e espacialmente em sincronia. No entanto, existem dois tipos diferentes de coerência.

Coerência temporal - Consiste na capacidade de um feixe se manter numa única frequência, monocromático, durante um longo período de tempo. Ao exibir um sólida oscilação sinusoidal durante longos períodos de tempo é possível prever a fase da onda numa determinada posição do feixe (Figura 2.7) [15] [12].

Coerência espacial - Consiste na capacidade dos campos elétricos associados a cada fotão se manterem em fase entre eles em qualquer posição de um secção transversal de um feixe, independentemente do tempo (Figura 2.8). Ou seja, uma onda

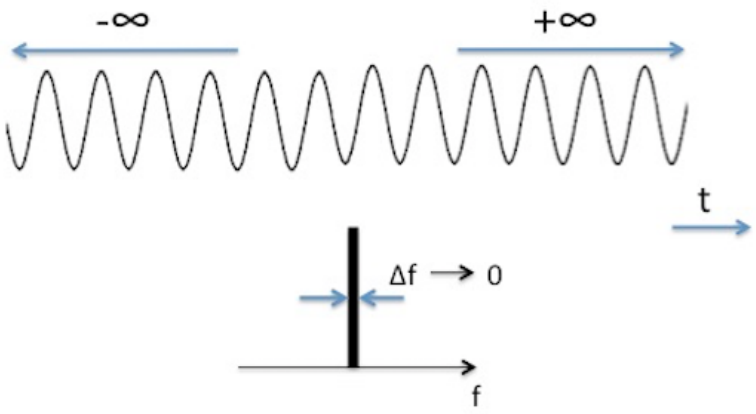


Figura 2.7: Coerência temporal (adaptado de [15]).

espacialmente coesa que permite a obtenção da fase e amplitude de um feixe em qualquer posição num período de tempo [15] [12].

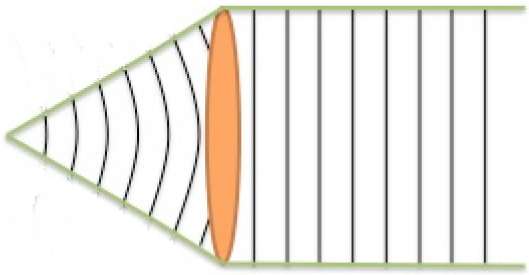


Figura 2.8: Coerência espacial (adaptado de [15]).

Aplicações:

- Interferometria;
- Holografia;
- Sensores.

- **Colimação**

A colimação de um feixe de laser tem como objetivo o alinhamento dos fotões emitidos pelo laser. Esta capacidade de produção de um feixe de radiação em que a trajectórias dos dos fotões se apresenta com um elevado grau de paralelismo, ou seja, uma divergência (θ) muito reduzida desde o ponto de origem ou emissão do feixe, resultando assim num feixe altamente direcional (Figura 2.9) [15].

Esta propriedade não depende da fonte emissora mas do diâmetro de abertura (D) que está associado aos modos de ressonância e comprimento de onda da radiação a emitir (λ), relacionando-se pela equação:

$$\theta \approx \frac{\lambda}{D} \tag{2.4}$$

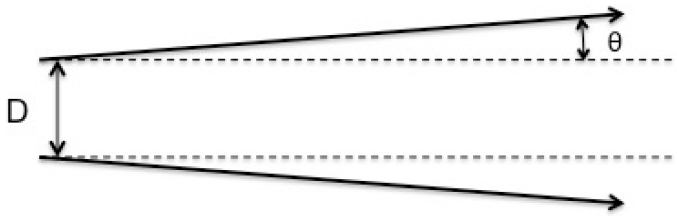


Figura 2.9: Ângulo de divergência (adaptado de [15]).

Aplicações:

- Comunicação;
- Leitores de código de Barras;
- Radar;
- Discos rígidos;
- Impressoras laser;
- Processamento de Materiais;
- Cirurgia Médica.

- **Intensidade**

Devido à colimação que um feixe de laser apresenta, é possível que mesmo um laser de baixa potência (1 mW) consiga ser facilmente muito mais brilhante que o sol. A intensidade é a propriedade que torna o laser uma fonte de emissão óptica com potência altamente perigosa, libertando enormes quantidades de energia quando focado sobre superfícies muito reduzidas (Figura 2.10) [15] [12].

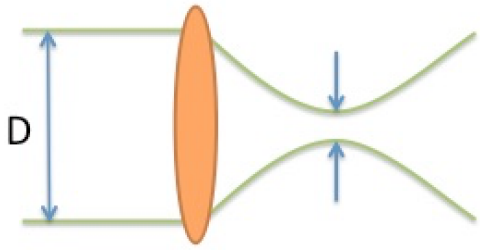


Figura 2.10: Focos de feixe (adaptado de [15]).

Aplicações:

- Processamento e materiais;
- Equipamento militar;
- Cirurgia médica.

- **Largura de Pulsos**

Existem sistemas Laser com capacidade de emissão de um pulso de largura reduzida, figura (2.11). No caso de um feixe laser as larguras de pulso podem chegar a serem

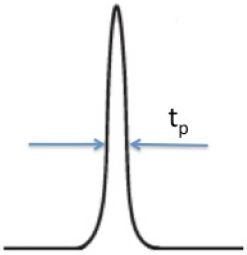


Figura 2.11: Largura de pulso (adaptado de [15]).

tão curtos quanto o nanosegundo ou até femtosegundo, algo que não se consegue obter através da eletrotécnica [15].

Aplicações:

- Computação ótica;
- Radar de alta precisão;
- Imagem.

2.1.5 Estabilidade de feixe

A estabilidade de um feixe laser é um dos parâmetros mais importantes a considerar no sistema laser, dado que se torna irrelevante ter um conjunto de propriedades excecionais se não for possível mantê-las, temporalmente, constantes e sem flutuações de feixe. A instabilidade de um sistema tanto pode resultar do meio externo como do interior do próprio sistema laser. As principais flutuações de feixe podem ter origem em [16]:

- **Vibrações mecânicas** - O alinhamento mecânico dos componentes num módulo laser é extremamente minucioso e delicado. Vibrações provenientes do suporte do módulo ou mesmo por variação térmica (expansão/contração) podem causar desalinhamentos nos espelhos da câmara de ressonância e respetivos conjuntos de lentes.

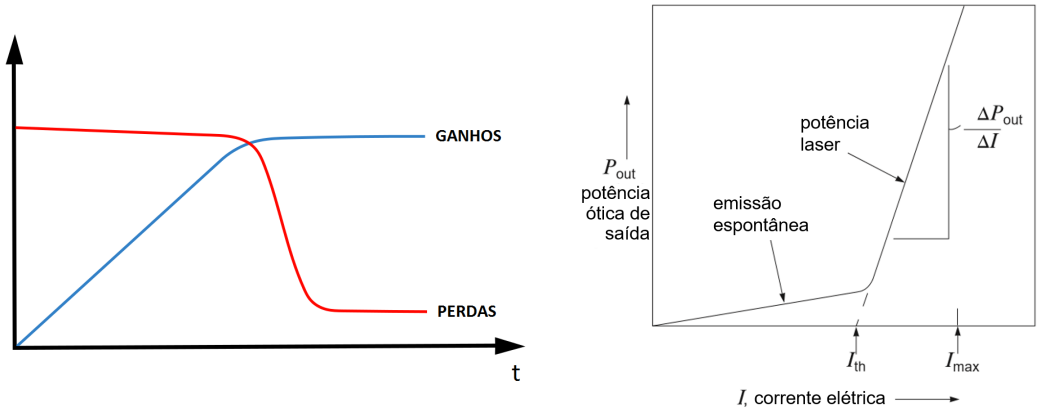
- **Modos de Ressonância** - Os lasers, por si só, podem apresentar diferentes graus de estabilidade, associados aos modos de ressonância. Esses modos de ressonância estão associados ao tipo de laser em questão e à precisão que se espera obter do mesmo.

- **Temperatura** - O aquecimento é provavelmente o elemento de instabilidade que merece mais atenção. Durante a produção de um feixe, as temperaturas no interior das câmaras podem tornar-se excessivamente altas. Se o arrefecimento de um sistema laser não for suficiente, tanto o material no meio de ganho como restantes elementos constituintes, podem sofrer deformações mecânicas, alterando drasticamente a direcionalidade e a coerência do feixe e podendo até levar à deflexão do feixe. Se o aquecimento do laser não for controlado, não só a qualidade do feixe é comprometida como a integridade e longevidade dos componentes do sistema será também afetada.

2.1.6 Threshold

O *threshold* de um laser é o equivalente ao ponto morto de um automóvel. É o momento a partir do qual a potência introduzida no sistema permite que o ganho obtido na câmara de ressonância iguale as suas perdas, isto é, o *threshold* é atingido quando o número de fotões emitidos espontaneamente iguala o número de fotões estimulados, ou seja, entra em modo *lasing* (Figura 2.12a) [8] [17].

Particularmente em sistemas laser alimentados diretamente por corrente elétrica, logo a seguir potência de *threshold*, a potência de saída varia linearmente com a corrente, o que torna este parâmetro extremamente importante para o devido controlo do laser (Figura 2.12b). No entanto, qualquer potência abaixo da potência de *threshold* resulta numa potência de saída muito baixa, práticamente negligenciável (Figura 2.12b) [8] [17].



(a) (b)

Figura 2.12: a) Evolução do ganho *versus* as perdas de um laser (adaptado de [8]); b) Exemplo da lineariadade entre a pontência e a corrente de um díodo laser (adaptado de [10]).

2.1.7 Tipos de feixe

Existem varias forma de se gerar um feixe. Dependendo das condições em que ele é obtido e aplicações a que destina seu funcionamento poderá apresentar-se como:

- **Contínuo** - Modo Operação a potência de saída constante [18];
- **Pulsado** - Modo de operação complementar ao modo continou que consiste na produção de pulsos de largura de banda muito reduzida mas com grande intensidade em que no intervalo dos mesmos a energia produzida é nula ou muito reduzida [19];
- **Quasi-Contínuo** - Apesar de ser um modo de operação pulsado, esta definição surge como forma de definir os modo de operação de alta frequência. Um feixe quasi-continuo apresenta um elevada repetitibilidade de pulsos que, a olho nu, se torna impossivel de se diferenciar de um feixe continuo [18].

2.1.8 Modos de ressonância

Os modos de ressonância de um laser representam a distribuição espacial de um feixe à medida que os este completa uma "ida e volta"no interior de uma câmara de ressonância [20].

Em casos simples, as câmaras de ressonância são constituídas apenas por espelhos parabólicos e meios de ganho oticamente homogéneos originando modos de ressonância definidos em função de distribuições Hermite-Gaussian (Figura 2.13). Assim sendo é possível determinar a evolução do ângulo de divergência e de curvatura da frente de onda de feixe a partir das características de uma determinada câmara de ressonância. Quanto menor a ordem do modo de ressonância de feixe menor será o diâmetro de feixe, ângulo de divergência e melhor a qualidade de feixe (M^2) [10] [20].

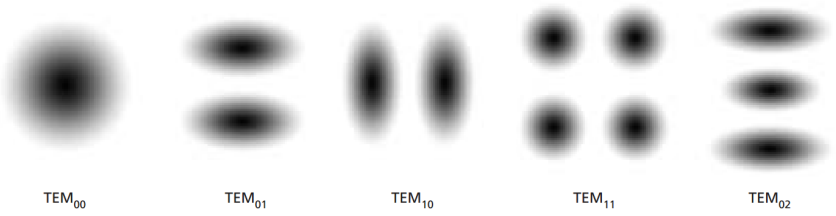


Figura 2.13: Modos de ressonância de baixa ordem Hermite-Gaussian [10].

O modo TEM_{00} é um dos modo fundamentais que satisfazem as condições acima referidas, no entanto destaca-se pela sua simples distribuição espacial e por ser o modo de ressonância de ordem mais baixa. Com uma baixa divergência de feixe e capacidade de foco num só ponto este é por norma o modo mais desejado de operação. No entanto, é comum a utilização de modos de ressonância de ordens mais alta sendo muitas vezes preferido ao TEM_{00} de modo a que se consiga extrair mais potencia do laser sendo depois o feixe convertido no modo pretendido de ordem mais baixa [10] [20].

2.2 Velocimetria de partículas

Velocimetria de partículas é um método ótico não intrusivo que permite detecção e consequente análise de movimentos de partículas em fluídos. Este método ótico é atualmente muito utilizado, dado que possibilita a obtenção instantânea e precisa de um campo de velocidades de um escoamento, sem que seja necessária a introdução de equipamento diretamente no fluído e consequentemente perturbação dos movimentos naturais do fluido [21]. Existem vários processos de velocimetrica sendo alguns dos mais conhecidos [22].

- PIV;
- LDV;
- PDPA;
- PLIF.

O processos no qual o laser a ser projetado e desenvolvido foi testado é o processo LDV disponível na faculdade, por esse motivo que será o único dos processos acima enumerados ser devidamente desenvolvido.

2.2.1 LDV

O funcionamento desta técnica de velocimetria baseia-se no efeito de Doppler e, à semelhança do que acontece com sinais sonoros, a frequência de um feixe luminoso quando incide sobre uma partícula em movimento é modificada em função da velocidade do objeto. Seguindo esta lógica, ao fazer incidir um feixe de frequência conhecida, em partículas num ambiente controlado, é possível obter a velocidade das mesmas por análise das alterações na frequência refletida. Isto é conseguido através da interceção de dois feixes laser monocromáticos, com um desfasamento conhecido, num ponto de escoamento, criando um padrão interferométrico, como o representado na figura 2.14 [23] [24].

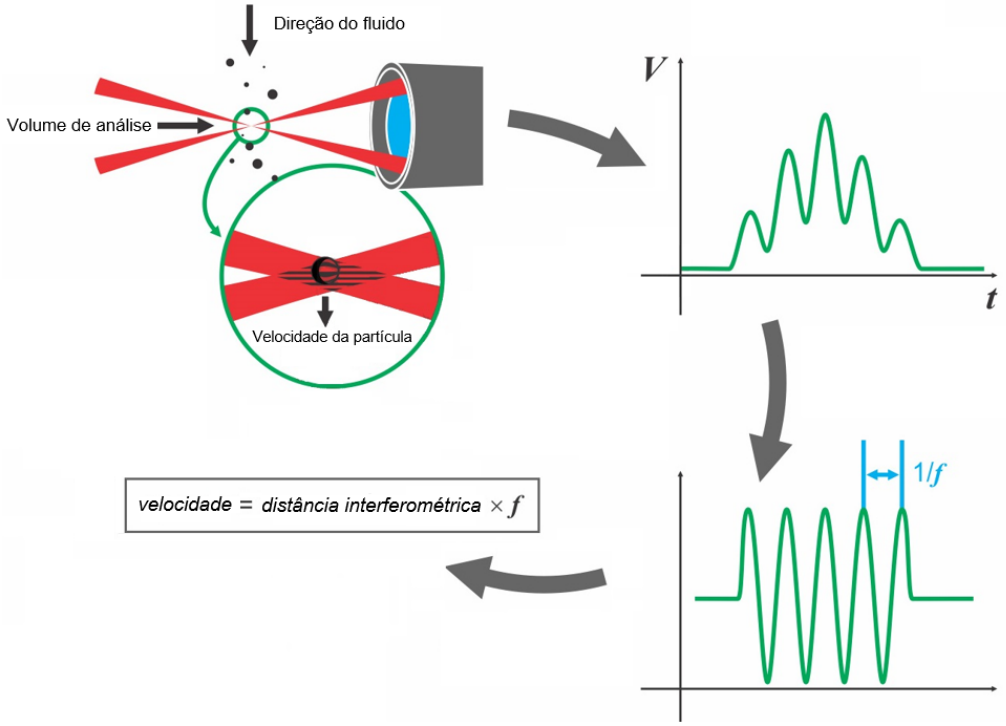


Figura 2.14: Esquema do procedimento de análise de partículas num sitema LDV (adaptado de [25]).

A passagem das partículas pelo volume criado pela interceção dos feixes reflete um feixe resultante que incide sobre um fotosensor estrategicamente posicionado. O feixe é recebido pelo fotosensor em forma de onda sinusoidal criado pelas linhas interferométricas igualmente espaçadas e de espessuras iguais, o sincronismo que é alterado à passagem da partícula. O sinal será então tratado e filtrado por um computador por forma a obter a frequência de passagem da partícula. Sabendo então a frequência da onda obtida (f) e o espaço das linhas interferométricas (dF) é assim possível calcular a velocidade da partícula, usando [25]:

$$v = dF.f \tag{2.5}$$

A figura 2.15 representa a sequência de um sistema LDV, assim como os componentes intervenientes.

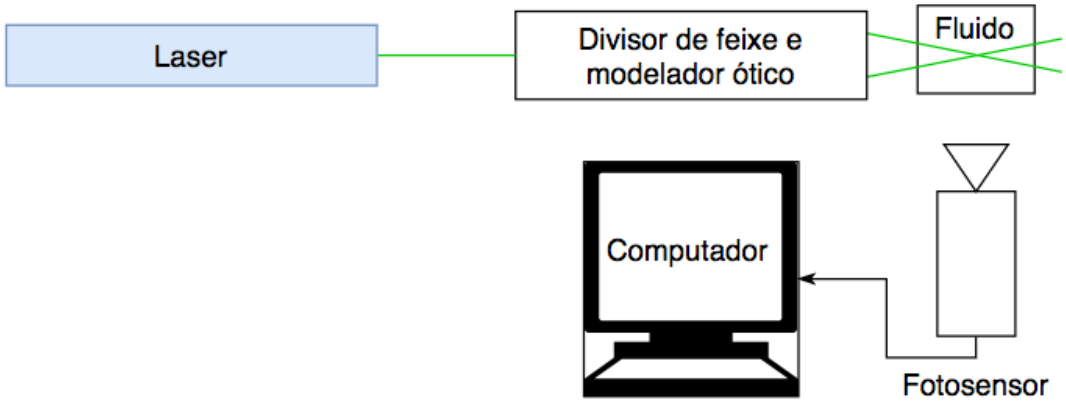


Figura 2.15: Esquema representativo de um sistema LDV (adapatado de [22]).

- **Fluído com partículas** - Qualquer tipo de fluído, de laminar a turbulento, deve apresentar um grau de transparência que permita a passagem do feixe até ao elemento fotosensor. Quanto às partículas a utilizar, estas devem apresentar tamanho suficiente para serem detetadas pelo sistema, sendo preferencial que tenham tamanho superior à distância entre as linhas interferométricas para garantir a alteração da sequência claro/escuro interferométrico.
- **Divisor de feixe e modelador ótico** - Normalmente conseguido recorrendo a 2 elementos acústico- óticos a frequências de funcionamento elevadas e bem conhecidas perto da centena de MHz, ligeiramente diferentes, na ordem de centenas de KHz. Este elemento tem como principais funções garantir a divisão do feixe e assegurar o desfasamento do mesmo. Este também será responsável pela orientação do feixe, de modo a que estes se intersetem no ponto desejado.
- **Iluminação** - Como já mencionado, o sistema de iluminação será obrigatoriamente um feixe laser, pelas propriedades específicas e únicas que apresenta, essenciais para o trabalho em questão.
- **Fotosensor** - Dada a sua função, o fotosensor terá de apresentar obrigatoriamente a capacidade de captação do comprimento de onda produzido pelo laser assim como possuir uma velocidade de resposta igual á modulada nos acústico-óticos de modo a que os resultados sejam devidamente obtidos.
- **Processamento e visualização de dados (computador)** - O computador é o elemento final da sequência e é responsável pelo tratamento e apresentação dos dados tratados previamente obtidos pelo fotosensor, tendo o devido conhecimento de todos os outros parâmetros do sistema.

Para que todo este método seja preciso e confiável, é necessário assegurar que todos estes subsistemas trabalham de forma integra e sincronizada. Este processo tem como vantagens ser um sistema não intrusivo, assim como o facto de apresentar uma elevada frequência de resposta que lhe permite medir todo o tipo de escoamentos, sendo estes laminares, transientes ou turbulentos. No entanto, é necessário que a transparência seja

garantida na secção do escoamento a analisar, assim como o alinhamento (delicado e temporalmente constante), a estabilidade e a coerência espacial do feixe. Por outro lado, a maior desvantagem deste processo é o custo elevado de todo o equipamento, em particular do laser. No entanto, com o passar dos anos, a tendência tem sido de diminuição, tornando-se economicamente cada vez mais acessiveis [23] [22].

2.2.2 Iluminação do meio

A iluminação é um dos elementos principais do processo LDV, sobre o qual se irá debruçar todo este trabalho. Este processo recorre à tecnologia laser como fonte de iluminação, devido ao elevado grau de monocromatismo, coerência e intensidade por unidade de superfície que estas fontes de radiação apresentam, sendo estas propriedades essenciais para a alta precisão que o sistema a desenvolver exige. Para além disso, é requerido que o feixe laser apresente uma elevada repetibilidade e estabilidade de frente de onda, por forma a evitar incoerências que podem levar a erros de análise, comprometendo a fiabilidade do procedimento. As potências exigidas para este processo de velocimetria dependem muito do grau de precisão que se pretende obter e dos fluídos que estão a ser utilizados. Tipicamente são utilizados lasers de onda contínua (CW), de modo de ressonância singular TEM_{00} de Hélio-Néon e Árgon, com potências na ordem das centenas de mW [23] [24].

2.3 Estado da Arte

Com o primeiro laser a funcionar, inúmeras formas de se conseguir obter um feixe laser foram testadas e demonstradas, produzindo feixes com os mais variados comprimentos de onda e potências. Contudo, poucos foram os que se justificaram rentáveis para aplicações práticas [2] [12]. Por norma, os lasers são classificados pelo material presente no meio de ganho, sendo os mais utilizados os seguintes [12] [9]:

- Lasers a gás;
  - Dióxido de carbono (CO_2);
  - Hélio-Néon (He-Ne);
  - Hélio-Cádmio (He-Cd);
  - Árgon (Ar);
  - Outros gases nobres.
- Lasers de estado de sólido;
  - Lasers semicondutores ou díodo Laser;
  - Rubi;
  - Nd:YAG;
  - Nd:YVO_4.
- Lasers de eletrões livres;
- Lasers de corante orgânico (líquido);
- Lasers raio-X.

Dos vários tipos de laser referidos, os que irão ser explorados em maior detalhe, são os que terão influência direta no trabalho, nomeadamente os lasers a gás e os lasers de estado sólido.

2.3.1 Laser a gás

Sendo possível obter potências que vão desde μW até centenas de KW e comprimentos de onda desde a região de infravermelho até ultravioleta, os lasers a gás apresentam-se como uma solução laser muito versátil [2]. Devido ao meio de ganho gasoso, este pode-se apresentar como atómico, iónico ou molecular, sendo passível de produzir com facilidade feixes contínuos e feixes pulsados [2].

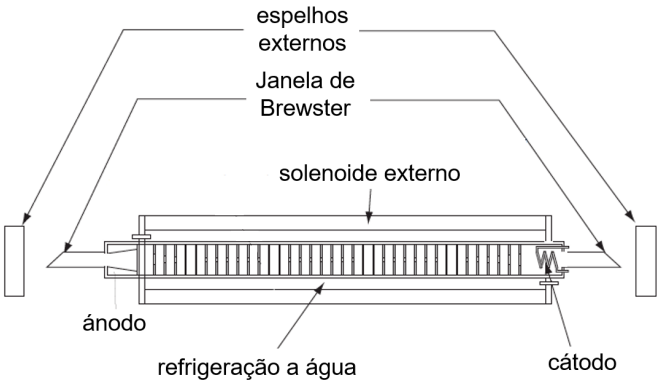


Figura 2.16: Esquema de corte de um laser árgon (adaptado de [10]).

O funcionamento dos lasers a gás é muito semelhante ao utilizado nos lasers de rubi, com a alteração de utilizar, em substituição do rubi, um gás sob pressão ou baixa pressão entre um par de espelhos refletores (Figura 2.16). Normalmente bombeado por descargas elétricas, sem arco, entre um cátodo e um ânodo, é possível inverter a população do meio e amplificar o feixe através de reflexões sucessivas de eletrões estimulados entre o par de espelhos da câmara de ressonância. Exemplos de lasers a gás e respetivos parâmetros e aplicações estão especificados na tabela 2.1 [10] [26].

Por norma estes lasers apresentam uma elevada qualidade de feixe, exercendo funções de elevada precisão, conforme se pode comprovar pela tabela 2.1, permitindo a maioria deles operar em modo TEM_{00} e em regime contínuo. Daí a sua utilização em processos de LDV. Em relação a custos, estes podem variar consideravelmente, dependendo do tipo de laser, potência e comprimento de onda, podendo custar desde a dezenas de euros até dezenas ou centenas de milhares de euros [2].

Vantagens:

- É possível excitar um grande volume de material do meio de ganho;
- É praticamente impossível a destruição do material do meio de ganho pelas extremas temperaturas de trabalho e é relativamente simples o seu arrefecimento, o que justifica a facilidade de trabalho em regime contínuo.

Limitações:

- Adicionando as limitações enumeradas na secção de contextualização estes lasers apresentam uma baixa eficiência (0,01 % no caso de um laser Árgon) [4].

Tabela 2.1: Exemplos de lasers a gás e respectivas caracterizações e aplicações [7] [9].

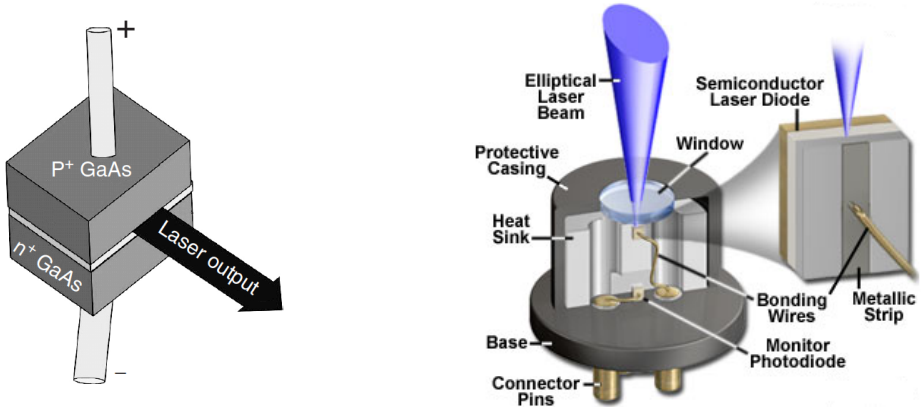
Meio de Ganho	**Comprimento de onda Frequentes (nm)**	**Fonte de Energia**	**Aplicações**
He-Ne	632,8.	Descarga Elétrica.	Interferometria, Leitura de Código de Barras, Espectrografia, Demonstrações óticas, Holografia.
He-Cd	442, 325.	Descarga Elétrica.	Espectroscopia, Testes não destrutivos, Esterolitografia.
Ar	454,6, 488, 514,5.	Descarga Elétrica.	Fototerapia, Litografia, Excitação ótica, Fototerapia ócular, Esterolitografia.
CO_2	1060.	Descarga Elétrica.	Processamento de Materiais, Cirurgia, Soldadura.
Outros gases nobres	XeF(353), XeCl(308), KrF(248), ArF(193).	Descargas elétricas.	Excitação ótica,Processamento de Materiais, Aplicações médicas, Fotolitografia.

Os lasers de Hélio-Néon não só são consideravelmente mais baratos do que os lasers de Árgon, como também apresentam um tempo de vida útil bastante superior. A desvantagem destes lasers reside na limitação de potências que produzem, até 250 mW. Quanto a lasers de Hélio-Cádio, o investimento inicial requerido acaba por não compensar para este tipo de aplicação, face a outros tipos de lasers existentes e disponíveis [2].

2.3.2 Laser semicondutor ou díodo laser

Apesar de anteriormente referido como sendo um laser de estado sólido, esta gama de lasers irá ser caracterizada de forma individual devido às particularidades que apresenta no que diz respeito a tamanhos, modos e princípios de funcionamento. Conhecidos como lasers semicondutores ou díodos laser, este tipo de lasers surgem como a gama de lasers de tamanho mais reduzido (com junções na ordem dos milímetros cúbicos) e muito mais eficientes (podendo atingir os 70%). Para além disso, são os lasers mais baratos do mercado e são bastante comuns, estando geralmente associados a aplicações de baixa potência e comprimentos de onda elevados. A existência de lasers semicondutores de potências elevadas e comprimentos de onda reduzidos é real, mas a relação entre o preço e a qualidade do feixe pode não justificar o seu uso [27] [10].

O princípio de funcionamento de um laser semicondutor (Figura 2.17a) é o mesmo de um LED, com a adição dos conceitos básicos de um laser. Uma junção de camadas de semicondutores P-N espaçadas por cristais que serve de cavidade de ressonância [12]. A passagem de corrente elétrica pela junção P-N força a migração de eletrões para *holes* existentes no estrato N. Como a energia de ocupação dos *holes* é inferior à energia que o eletrão carrega, este liberta o excesso de energia sob forma de fotão. Este processo contínuo permite desencadear uma emissão estimulada que irá então dar origem ao feixe laser. Devido à divergência à saída do chip semicondutor este é colimado através de uma lente [27].



(a) (b)

Figura 2.17: a) Funcionamento de um díodo laser (adaptado de [12]); b) Representação em corte de um díodo laser com encapsulamento e respetivos componentes (adapatado de [28]).

A estrutura de tamanho reduzido destes lasers aliada às potências que produzem leva, por norma, à necessidade de garantir dissipações de calor constantes por forma a não danificar o laser assim comos os componentes envolventes. Para tal, é comum estes chips laser estarem encapsulados (Figura 2.17b). Tal encapsulamento não só tem como função dissipar calor, como também tem o objetivo de alinhar e manter o alinhamento das lentes associadas [10]. Alguns exemplos de lasers semicondutores, e respetiva caracterização e aplicações, estão especificados na tabela 2.2.

Tabela 2.2: Exemplos de díodo laser e respectivas caracterizações e aplicações [27] [10].

Meio de Ganho	**Comprimento de onda Frequentes** (nm)	**Fonte de Energia**	**Aplicações**
GaN	375, 405, 440, 473.	Corrente Elétrica.	Fluorescência Biomédica, Substituição de lasers HeCd .
GaAs	635, 650, 670, 780, 785, 808.	Corrente Elétrica.	Substituição de lasers HeNe, Alinhamentos, Leitores de DVD, Ponteiros, Excitação ótica de lasers Nd:YAG, Impressão térmica.
InP	940, 980, 1310, 1455, 1550.	Corrente Elétrica.	Excitação ótica de lasers, Input de telecomunicações de baixo comprimento de onda.

Associados aos avanços em áreas como nanotecnologia, estes lasers têm se destacado em áreas de maior exigência. Apesar de ainda limitados por uma coerência espacial não ideal, comparado com alguns lasers a gás, o facto de produzirem um feixe contínuo de modo TEM_{00} permite que se destaquem como substitutos para alguns laser a gás, como se pode observar pela tabela 2.2 [27]. Apesar da sua pouca utilização em áreas de alta precisão, estes lasers já provaram ser bastante eficientes em aplicações de espectroscopia, tornando-os extremamente relevante para o trabalho em questão [29].

Vantagens:

- Convertem diretamente eletricidade em feixe ótico;
- Eficiência elevada;
- Custo reduzido e elevada compactação;
- Atingindo a potência de *threshold*, a potência de saída é proporcional à corrente introduzida no sistema, permitindo um bom controlo analógico ou digital;
- Tempo de vida útil muito mais elevado, tipicamente de 2000h a 15000h [10] [27].

Limitações:

- Altamente sensíveis a variações tensão mínimas e de oscilações da corrente de alimentação e temperatura;
- Coerência espacial limitada;
- Driver de controlo de potência rigoroso visto termos de estabilizar de tensões baixa e de corrente elevada [30] [31].

2.3.3 Laser estado sólido

Os lasers de estado sólido produzem um feixe laser recorrendo a um meio de ganho sólido, sendo estes geralmente cristais naturais (rubi) ou cristais sintéticos (principalmente cristais de neodímio dopados com impurezas - Nd:YAG, Nd:YVO_4 e semicondutores). Tendo em conta que os lasers semicondutores são um tipo peculiar, pertencente à gama de lasers de estado sólido e dado que já foram detalhados na secção anterior, serão deixados de parte nesta secção [27] [32].

Apesar de existirem inúmeros materiais para utilização como meio de ganho, a maior parte está contida entre a região de infravermelhos e a região vermelha do visível. Aquando da necessidade de se obter feixes na gama do visível, é necessário executar alterações nos comprimentos de onda do feixe recorrendo para isso a cristais não lineares, conhecidos como lasers de frequência dupla [32] [10]. No entanto, à semelhança dos lasers a gás, estes também podem produzir potências desde os mW até centenas de kW, com uma variação de preço exponencial em relação à potência. As fontes de excitação mais comuns são lâmpadas flash (normalmente Xénon) e díodos laser IR. Alguns exemplos de lasers semicondutores (Tabela 2.3) [2].

Para além dos já referidos lasers semicondutores, os lasers de estado sólido podem dividir-se em dois grupos (Figura 2.18). O primeiro são os lasers de estado sólido originais, bombeados por lâmpadas flash, laser rubi ou YAG, e o segundo grupo são os revolucionários lasers DPSS, bombeados por meio ótico - díodos de junção - que têm vindo a revolucionar o mercado [10]. Dada a maior relevância dos lasers DPSS para a aplicação em causa, o seu funcionamento e características serão detalhadas na secção seguinte.

Lasers bombeados por lâmpadas flash são o cerne dos lasers de estado sólido. Apesar de estarem a ser ultrapassados, ainda se encontram em bastante vantagem face aos DPSS no que diz respeito a aplicações que envolvem potências elevadas, uma vez que o preço

Tabela 2.3: Exemplos de lasers de estado sólido e respectivas caracterizações e aplicações (excluindo díodos laser) [7] [9].

Meio de Ganho	**Comprimento de onda Frequentes (nm)**	**Fonte de Energia**	**Aplicações**
Rubi	694,3.	Lampada flash.	Holografia.
Nd:YAG	1064.	Lâmpada Flash, Díodo Laser.	Fonte de excitação para lasers, Cirurgia, Investigação, Processamento de Materiais, Substituição de lasers Árgon.
Nd:YVO_4	1064.	Lâmpada Flash, Díodo Laser.	Esterolitografia, Fabrico de placas de circuitos impressos, Aplicações OEM a 532 nm.

por $Watt$ de uma lâmpada flash compensa bastante comparativamente ao preço por $Watt$ de um díodo laser [10] [33]. Dependendo das características do laser, esta gama é, por norma, inapropriada para trabalhos em regime contínuo. Temperaturas elevadas, como também já previamente mencionado, poderão deformar o meio de ganho e também as lentes e componentes óticos associados, tendo como consequência a alteração não desejada do feixe laser. Isto faz com que seja mais adequado trabalhar em regime pulsado ou quasi-pulsado. Este tipo de laser está também associado a fontes de alimentação robustas e eficiência baixa (cerca de 1%) [32].

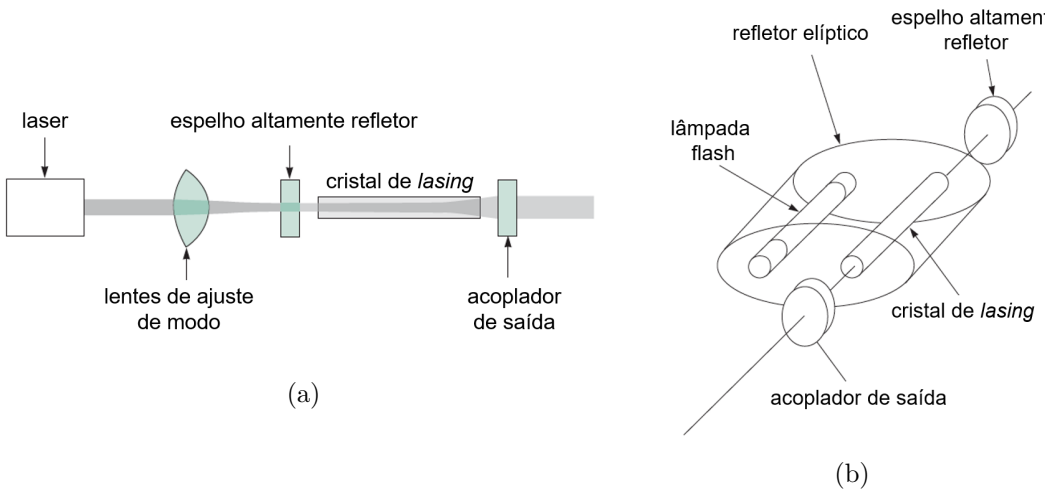


Figura 2.18: a) Esquema de laser alimentado óticamente b) Esquema de funcionamento de laser alimentado por lâmpadas flash (adaptado de [10]).

DPSS laser (*Diode Pumped Solid State Laser*)

Os lasers DPSS surgem como forma de ultrapassar a qualidade de feixe de um díodo laser - que não é ótima - e o mau rendimento e agressividade da utilização de lâmpadas flash em lasers de estado sólido. Através deste procedimento é possível a obtenção de um feixe com uma qualidade independente da qualidade do feixe fornecido pelo díodo laser e

com uma eficiência energética bastante superior a outros tipos de laser. Lasers desta gama, para baixas potências, funcionam perfeitamente em regime constante, mas para utilização com altas potências, os regimes pulsado ou quasi-contínuo são os mais aceitáveis. Por vezes, de forma a se obter determinados comprimentos de onda é comum a utilização de lasers DPSS de frequência dupla. Utilizando, por norma, um cristal não linear presente na cavidade de ressonância (Figura 2.19) [10].

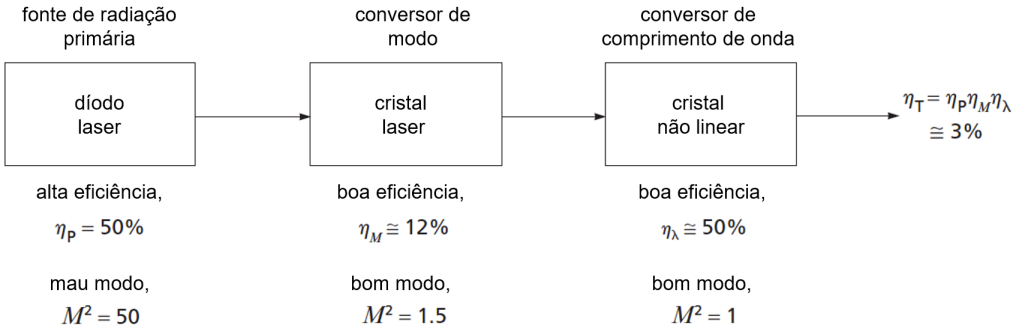


Figura 2.19: Sequência de funcionamento de um laser DPSS (adaptado de [10]).

Apesar da perda de eficiência, causada pela dupla frequência, estes lasers continuam a ser mais eficientes do que a maioria dos tipos de lasers, à excepção dos díodos laser. Tal como os díodos laser, os laser DPSS têm sido bafejados com avanços tecnológicos, levando a uma diminuição dos preços e dos tamanhos e a um aumento das potências óticas debitáveis. Para além destas vantagens, o facto de permitirem trabalhar em contínuo faz com que estes lasers, possuindo feixe e modo estáveis, se tornem na principal ameaça aos lasers a gás, especialmente os lasers de Árgon [32].

Vantagens:

- Longo tempo de vida útil comparado com lasers excitados por lâmpadas flash - cerca de 10000 horas [33];
- Permite a construção de lasers de baixa potência com elevada eficiência alimentados por fontes de alimentação elétrica de baixas potências - importante para dispositivos alimentados por baterias [33];
- Lasers de tamanho muito reduzido, devido à compacta fonte de excitação, fonte de alimentação e sistema de refrigeração [33];
- Devido ao reduzido tamanho que podem apresentar, por vezes estes lasers podem ser hermeticamente encapsulados, protegendo os cristais e os seus alinhamentos face ao meio ambiente de trabalho [10].

Limitações:

- O custo por *Watt* de um díodo laser é significativamente mais caro do que o de uma lâmpada flash, o que se torna numa desvantagem para aplicações de elevada potência [33];
- Os díodos laser são muito mais sensíveis do que lâmpadas flash. A má regulação da corrente pode reduzir drasticamente o tempo de vida útil do laser. Para além disso, picos e descargas electroestáticas arruinam instantaneamente o díodo laser de forma irrecuperável [30].

Página intencionalmente deixada em branco

Capítulo 3

Projeto do sistema

Este capítulo será uma introdução ao sistema a desenvolver, realçando os aspetos a ter em conta relativamente ao sistema LDV já existente, assim como uma seleção prévia dos equipamentos que devem ser considerados antes do desenvolvimento efetivo de todo o sistema.

A substituição do sistema de laser obriga a que o laser a conceber responda a determinadas expectativas, das quais a principal é a sua aplicação ao sistema LDV. Contudo, seria do interesse deste projeto que o laser a produzir fosse versátil o suficiente para outro tipo de aplicações cujos requisitos sejam semelhantes. O ideal seria:

- Compatibilidade com o sistema LDV já existente, principalmente fotosensor das câmaras óticas e equipamento acústico-ótico de modulação do feixe;
- Baixo Custo;
- Facilidade de Operação;
- Controlo de potência e temperatura rigoroso, intuitivo e contínuo;
- Qualidade dos parâmetros do feixe laser igual ou semelhante ao laser a gás a substituir;
- Elevado tempo útil de trabalho;
- Realimentação ótica e de potência;
- Visibilidade do funcionamento do sistema;
- Estruturalmente mais leve e manuseável.

O sistema a substituir (Figura 3.1) é constituído por um módulo laser Árgon, uma fonte de alimentação robusta e um painel de controlo. De forma a inovar, seria interessante encurtar todo o sistema, tentando compacta-lo o máximo possível. Seguindo esta ideia, de maneira a pelo menos encurtar o número de equipamentos que deverão compôr o sistema por um elemento único estrutural e um painel de controlo no qual estaria inserida a fonte de alimentação de todo o sistema. Posto isto, o desenvolvimento do projeto deverá seguir o esquema representado na figura 3.2. Antes de se definir quaisquer parâmetros, será feita a seleção do tipo laser a utilizar.

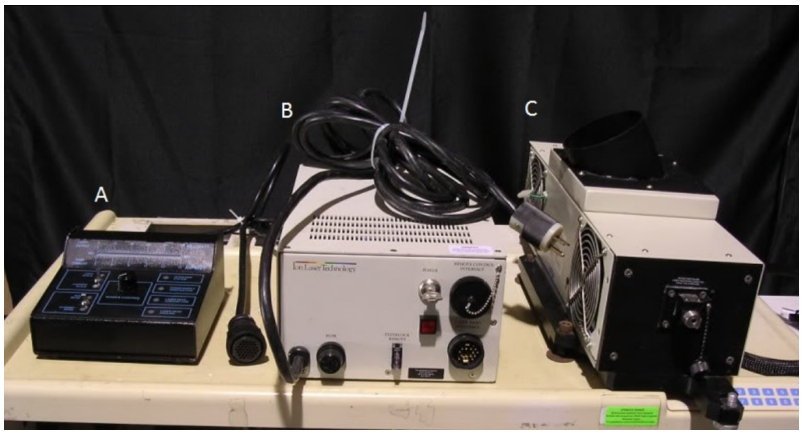


Figura 3.1: Sistema laser a subtituir - A) Painel de Controlo; B) Fonte de alimentação; C) Laser Árgon [34].

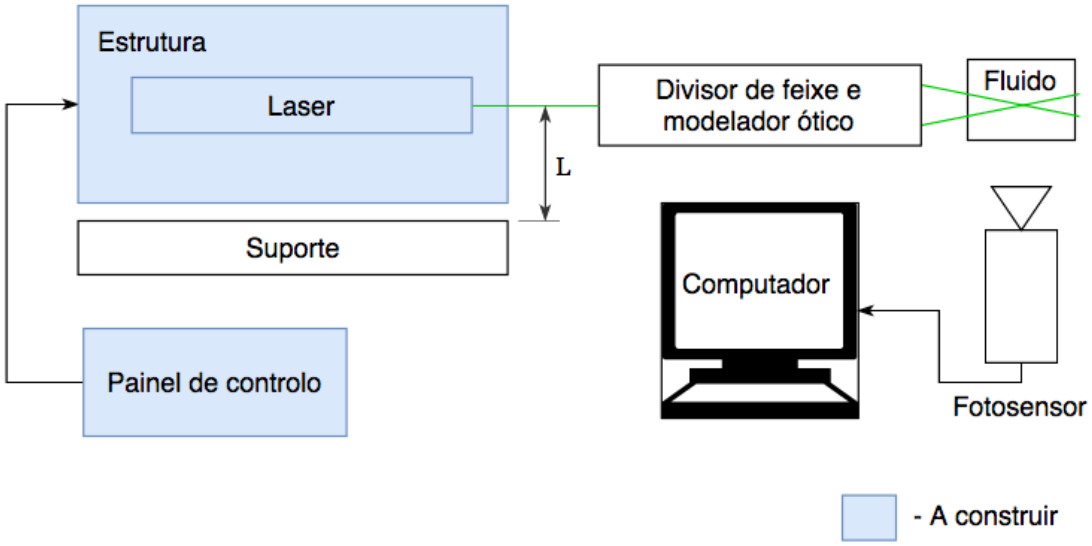


Figura 3.2: Esquema do sistema laser a desenvolver + LDV a desenvolver.

3.1 Seleção do Laser

Sabendo da utilização de acordo com o que foi já referido neste trabalho, os lasers DPSS são uma excelente aposta para a substituição do laser em questão. Não só são relativamente baratos, como apresentam ótimas relações de tamanho e potência e uma qualidade de feixe que, quando controlada, pretende-se que seja comparada à de um laser a gás para a aplicação em questão. Daí que será a opção mais desejável para o problema a resolver. Contudo, antes da escolha definitiva, é necessário perceber as exigências que o sistema LDV requer, isto é, as especificações do laser de Árgon (Tabela 3.1). Especificações mais detalhadas podem ser consultadas no apêndice A.

Seleção de Potência

A potência do laser a escolher deve ser equivalente à potência necessária para a aplicação LDV. Se o laser a substituir apresentava uma potência suficiente para a aplicação

Tabela 3.1: Principais especificações laser Árgon ITL 5500A

Marca	ITL
Modelo	5500A
Classe	III-b [35]
Potência de feixe máxima	300 mW
Comprimento de onda	457 a 514 nm
Modo espacial	TEM_{00}
Diâmetro de feixe	0.82 mm
Divergência de feixe	0.78 $mrad$
Polarização	$>100:1$
Alimentação	220 VAC

em causa, é de todo lógico concluir que o laser a escolher tem de ter no mínimo a potência máxima do laser a substituir - 300 mW.

Seleção de comprimento de onda

Apesar de comprimento de onda do laser a substituir ser azul poder ser ajustado entre 457 nm e 514 nm este é maioritariamente utilizado em 488 nm devido á potência que se consegue extrair do mesmo (Apêndice A). No entanto, existem enumeras vantagem na utilização de um laser com comprimento de onde da verde, 532 nm.

- É o mais comum dos lasers de DPSS deste tipo, tornando-o mais barato;
- O olho humano tem grande sensibilidade ao verde facilitando o alinhamento do laser;
- Compatibilidade total com o fotosensor da câmara ótica, dado que esta também é consistida por material semicondutor, igual ao do laser semicondutor presente num DPSS laser de comprimento de onda (GaAs - 808 nm). Esta compatibilidade pode ser uma mais valia para o sistema laser, pois garante que todo o feixe é absorvido pela câmara ótica, incluindo os comprimentos de onda que se possam apresentar não duplicados no feixe laser. Por consequência, o rendimento de um laser verde é maior do que o de um feixe de comprimento de onda azul, como o presente no laser a gás.

Aspetos a considerar

Conhecendo a sensibilidade destes lasers a variações de temperatura, é sabido que variações de temperatura levam a uma alteração dos parâmetros de alimentação (corrente). Este fenómeno consequentemente origina uma variação da potência ótica que acaba por resultar num feixe mais instável e incoerente (Figura 3.3). Alterações muito bruscas, por sua vez, reduzem significativamente o tempo de vida do laser, sendo que em situações excessivas podem mesmo ser fatais para o laser. Dado que estes lasers são alimentados de forma contínua, o aquecimento está totalmente presente. Assim sendo, mesmo com um controlo de temperatura e o encapsulamento do dissipador original do laser, existe sempre um sobreaquecimento em relação à temperatura de trabalho estipulada [30].

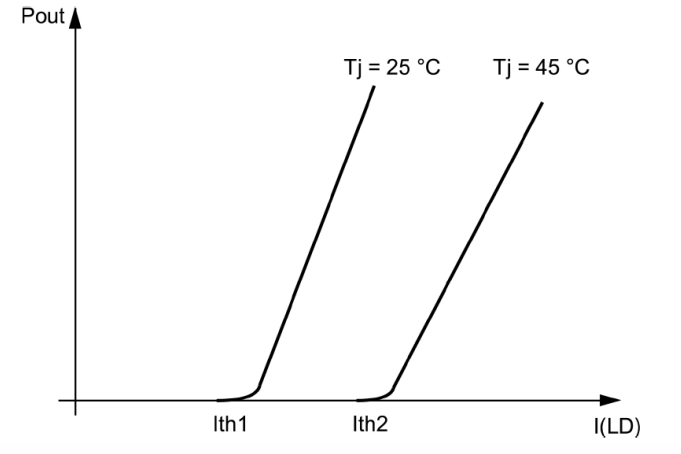


Figura 3.3: Influência da temperatura na potência de feixe e alimentação de um díodo laser [30].

A ideia da utilização do laser DPSS seria manter a temperatura do laser sempre igual, próxima da sua temperatura ideal de funcionamento, de modo a que se obtenha um relação o mais linear possível entre a potência ótica e a corrente de alimentação por forma a se obter um feixe o mais estável possível e consequentemente também a aumentar substancialmente a duração da vida do laser não o sobrecarregando.

3.2 Refrigeração

Conforme já mencionado, um sistema de refrigeração é essencial num sistema laser de potência considerável, principalemente em regime continou por forma se manter o feixe produzido o mais estável possivel. Os tipos de refrigeração mais utilizados baseiam-se em sistemas de dissipação por convecção forçada, através da utilização intensa de ventoinhas ou por dissipação através de contacto utilizando fortes dissipadores aliados a ventoinhas ou sistemas líquidos de refrigeração [32]. Sendo o laser a instalar de reduzidas dimensões - comparativamente aos lasers utilizados para este fim - e de modo a manter o sistema o mais compacto, é uma vantagem a utilização de placas termoelétricas, também conhecidas por placas de efeito Peltier, de modo a inovar ainda mais o sistema.

As placas de efeito Peltier são placas de refrigeração/aquecimento contínua, muito compactas e de potência considerável, capazes de extrair o calor/frio de forma contínua e controlada em circuito fechado. O funcionamento destas placas consiste na utilização de uma ou mais combinações de elementos semicondutores P-N conectados em série, que quando alimentados produzem um determinado gradiente entre duas cerâmicas nas suas extremidades (Figura 3.4) [36].

Apesar de serem pouco utilizadas para este tipo de aplicação, estas placas apresentam-se como sendo uma mais valia, não só pelo seu reduzido tamanho e pela potência associada, como pela alimentação que requerem. Sendo constituídas por semicondutores, tal como o laser, estas placas requerem uma alimentação com níveis de tensão semelhantes à dos lasers DPSS, garantindo que a fonte de alimentação utilizada para o laser responderá também aos requisitos de alimentação impostos pela placa. A desvantagem deste tipo de placas reside numa das suas maiores qualidades: as reduzidas dimensões. Ao apresentarem uma

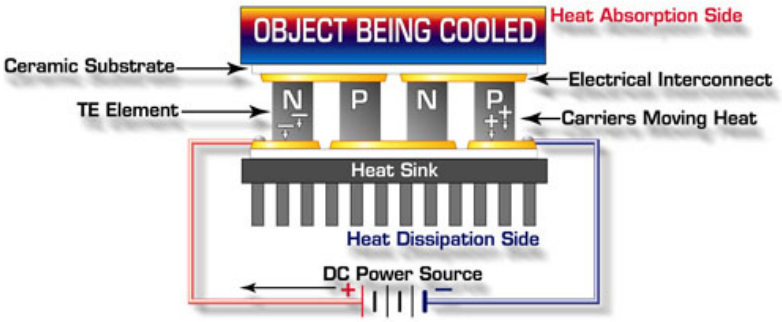


Figura 3.4: Funcionamento de um placa Peltier [36].

reduzida área de dissipação, torna-se difícil a extração de grandes quantidades de calor a partir da sua superfície, daí ser desde já ponderado a utilização de um dissipador de forma a maximizar a dissipação de calor que se pretende.

3.3 Estrutura

A estrutura principal do sistema, conforme já referido anteriormente, irá ser construída com base num sistema LDV existente no laboratório de Fluídos da FEUP, como representado na figura 3.5. Esta deverá garantir:

- Fixação e refrigeração do laser;
- Segurança dos utilizadores;
- Adaptação ao sistema LDV existente;
- Fácil acesso a todos os componentes do sistema;
- Transparência da estrutura para a possível visualização de todo o funcionamento para fins didáticos.

Figura 3.5: Sistema LDV existente no laboratório de Fluidos da FEUP.

No que diz respeito à estrutura LDV existente, é imperativo a não modificação da mesma. Assim sendo, uma das particularidades da estrutura a desenvolver será a necessidade de uma distância de L representada no esquema da figura 3.2, que diz respeito à altura desde o apoio para o laser até à saída do feixe laser.

Segurança

Tratando-se de um laser de classe III-b, é fundamental a existência de medidas de segurança face à utilização do equipamento, estritamente obrigatória (consultar norma a IEC 60825-1 [35]). Lasers das classes referidas podem provocar lesões nos olhos forma instantânea, fazendo com que medidas de segurança mal projetadas possam acarretar repercussões críticas para os utilizadores ou pessoal presente [35]. Deste modo, é necessário:

- Garantir a paragem ou o não funcionamento imediato de todo o sistema caso o laser não se encontre devidamente isolado;
- Garantir que não há reflexão nem difração do feixe pela estrutura que envolve o laser;
- Assegurar que o aquecimento e a estabilização do laser podem ocorrer de forma segura sem a necessidade de projeção de um feixe;
- Utilização de óculos de proteção ao comprimento de onda e níveis de potência apropriados pelo pessoal presente.

3.4 Painel de Controlo

O painel de controlo, assim como a estrutura, deverá ser o mais compacto possível e de utilização acessível para qualquer utilizador. Este painel deverá também conter uma interface informativa e de controlo de informações adicionais, de maneira a possibilitar a deteção, e posterior reparo, de qualquer irregularidade com o sistema e respetivas condições de operação. Para além disso, deverá ainda promover a segurança dos equipamentos que controla, assim como manter o controlo em situações de corte de energia, situações de emergência ou situações anormais de funcionamento [35].

- Sendo um laser de classe III-b ou superior, por razões de segurança o sistema necessitará de ser ativado por meio de uma chave;
- Display da temperatura, com particular importância dado o laser em questão;
- Vuímetro duplo - responsável pela indicação continua da potência ótica e elétrica do laser;
- Informação relativa ao estado do laser e da placa de efeito Peltier - ON ou OFF;
- Mecanismo de regulação de potência.

Controlo

O controlo tem como objetivo não só regular a potência do laser, como também garantir a sua integridade. O sistema deverá apresentar um controlo de potência e temperatura, essenciais para o comprimento dos objetivos propostos para o trabalho.

Controlo de potência necessita:

- Controlo de corrente e tensão na entrada. Sendo o laser muito sensível à potência excessiva, esta particularidade é indispensável;
- Regulador de potência manual, de modo a ajustar a potência pretendida para a aplicação em questão;
- Circuito de ganho/feedback que face a variações no sistema garanta sempre uma potência estável, essencial para a qualidade de feixe pretendida.

Controlo de temperatura necessita:

- Corte de circuito de potência com eventual temperatura excessiva, de modo a não danificar o laser;
- Controlo automático do elemento de refrigeração (ON/OFF), com o objetivo de manter o laser à sua temperatura de funcionamento, evitando grandes oscilações de temperatura.

Realimentação

A realimentação é das funções mais importantes do sistema, uma vez que para além de permitir obter informação acerca do estado do sistema, permite também adaptar-se a estas. O sistema em questão deverá apresentar uma realimentação de temperatura, potência elétrica e potência ótica do laser.

Apesar da realimentação de potência ótica e elétrica do laser serem coincidentes, esta redundância permite resolver algumas incertezas do sistema:

- Determinar se a potência introduzida no laser está de acordo com a potência que o feixe está a emitir;
- Facilitar a identificação do problema a partir de incoerências entre as duas medidas de potência, dado que os circuitos são independentes.

Fonte de alimentação

A fonte de alimentação não deverá ser muito dispendiosa nem demasiado complexa, de modo a possibilitar a sua substituição com relativa facilidade. Em princípio, sendo um laser DPSS, não necessitará de um fornecimento de energia muito elevado. No entanto,

todo o sistema laser pode necessitar de um fornecimento de potência considerável. O ideal seria uma fonte de alimentação versátil, compacta e de fácil substituição. A principal desvantagem da utilização deste tipo de fontes diz respeito às flutuações de corrente e tensão que se podem sentir, podendo ser fatais para o laser tendo em conta a sua sensibilidade.

No entanto, a fonte será o último componente e ser escolhido pois só próximo do final do desenvolvimento de todo o sistema é que se conseguirá exercer um levantamento energético aceitável.

3.5 Sequência de Projeto

- Levantamento de equipamentos necessários a utilizar assim como parâmetros de funcionamento dos mesmo, nomeadamente laser DPSS e placa de efeito Peltier;
- Desenvolvimento de uma solução estrutural viável em Solidworks, tendo em conta os materiais e os componentes já existentes;
- Construção da estrutura principal do laser, acoplamento do laser e respetiva refrigeração;
- Testes de refrigeração na estrutura principal do laser, com o laser e sem o laser;
- Construção da base/suporte do laser;
- Construção caixa protetora do laser;
- Construção de circuito elétrico de controlo do laser;
- Calibração do circuito elétrico;
- Construção e montagem de uma caixa para painel de controlo;
- Montagem de todo o sistema laser;
- Calibração com o sistema LDV existente;
- Testes.

Capítulo 4

Desenvolvimento do Sistema Laser

Este capitulo será dedicado a todo o processo de desenvolvimento do sistema, desde apresentação dos componentes chave já falados e respetivas especificações, laser e placa de efeito Peltier, assim como todo o processo de desenvolvimento estrutural, elétrico e interface de controlo do sistema. Também serão retratados todos os testes e procedimentos de montagem que merecedores de maior destaque. Contrariamente à ordem de sequência de trabalhos apresentada no capitulo, devido a atrasos, imprevistos e volume extenso de trabalho, apesar de todo o sistema laser se encontrar projetado não foi exequível a sua total finalização.

4.1 Estrutura

Dos aspetos descritos no capítulo anterior, as aquisições essenciais para o projeto seriam o Laser DPSS e a placa de efeito Peltier, o que faz com que todo o projeto tenha sido desenvolvido com base na adaptação a estes componentes. Tudo o resto foi concebido a partir de materiais reutilizados disponíveis nas oficinas da FEUP. Dado o conhecimento de algum material a usar, o projeto foi previamente executado em SolidWorks, de modo a tentar prever imprevistos e a possibilitar uma melhor perspetiva do trabalho à medida que foi desenvolvido.

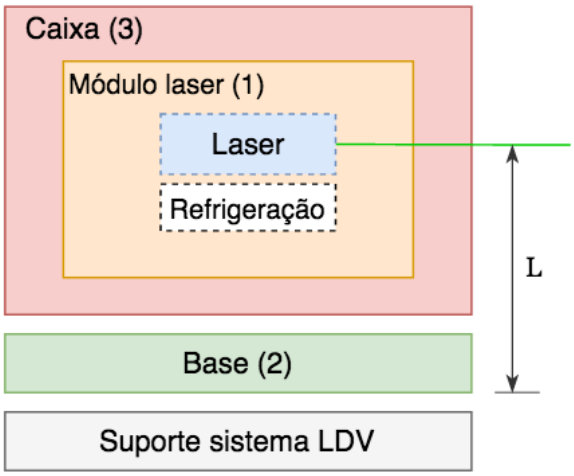


Figura 4.1: Esquema solução estrutural a Desenvolver.

De modo a explicar detalhadamente a solução desenvolvida, esta secção será dividida nas três secções enumeradas e representadas no esquema da figura 4.1 - Módulo laser, base e caixa. Primeiramente serão ainda apresentados o laser e a placa de efeito Peltier, assim como as suas características, de modo a se justificar determinadas abordagens adotadas ao longo do projeto.

Este capítulo fará referência ao estritamente necessario para a sua compreensão evitando assim um alongamento desnecessário do documento.

4.1.1 Laser

O laser a utilizar, como já mencionado, foi um laser DPSS (Figura 4.2). Trata-se de um microship laser de frequência dupla retirado de um laser de classe III-b que poderá ser destinado a aplicações OEM. Obtido por intermédio do Engº. Jorge Reis, este laser não possui qualquer ficha indicativa acerca das suas especificações, obrigando a que as suas especificações fossem obtidas através de modo experimental utilizando equipamento específico e devidamente calibrado. A pedido do Engº. Jorge Reis o custo do equipamento não será revelado. No entanto o custo do equipamento montado obtido ronda as centenas de euros face ao equipamento a gás a substituir que tipicamente custa milhares de euros.

As especificações do laser, a utilizar, obtidas pelas medições experimentais executadas pelo Engº. Jorge Reis são as apresentadas na tabela 4.1.

Tabela 4.1: Especificações laser medidas.

Potência Máxima (Sem lentes de ajuste)	441 mW (620 mW)
Tensão de Alimentação (com driver)	5 V
Comprimento de onda	532 nm
Temperatura de Funcionamento (Ideal)	22 a 32 ^{o}C (28 ^{o}C)
Classe	III - b

Apesar de estar referenciado pelo fabricante como um laser III-b este laser ultrapassou os 500 mW, que segundo a norma IEC 60825-1, o laser passa a ser de classe IV. No entanto como o feixe apresentava um ângulo de divergência não adequado para a aplicação em questão foram lhe acoplados uma lentes corretoras de feixe para ajuste de divergência específicas para este laser, fazendo com que a perda de potência de feixe provocado pelas mesmas colocasse o laser de volta à classe III-b com $441mW$, sendo esta considerada a potência máxima do laser. Apesar de pertencer à classe III-b medidas de segurança de trabalho apertadas não podem ser desprezadas.

(a) (b)

Figura 4.2: a) Laser obtido, Classe III-b; b) Microship DPSS retirado.

Tendo conhecimento das potência debitadas pelo laser estipulou-se um intervalo de potências de trabalho entre 200 mW e 400 mW, superior aos 300 mW produzidos pelo

laser a substituir, de modo a que seja possível um ajuste de potência de acordo com a transparência do fluido a analisar. De notar que limitando o laser a uma potência de trabalho de 400 mW contribui também para um aumento de vida útil no laser.

Threshold de lasing e Potências de trabalho

Como já mencionado anteriormente, o conhecimento comportamental da linearidade de corrente de alimentação face à potência ótica após o limiar de *threshold* (a temperatura constante) é um parâmetro indispensável para que se consiga exercer o devido controlo sobre um laser, assim como o conhecimento das respetivas correntes de alimentação associadas ao intervalo de trabalho. Como tal foram executadas medições para determinar os parâmetros, utilizando um equipamento medidor de potência ótica devidamente calibrado fabricado pela Coherent e uma câmara térmica FLIR, com sensibilidade na ordem dos 15 mK. As medições executadas são as ilustradas nas tabelas 4.3 e 4.2.

Pela tabela 4.2 é percetível a influência da temperatura no comportamento elétrico do laser, o que reforça a importância da refrigeração do mesmo, no sentido de garantir que as oscilações térmicas do laser, em torno da sua temperatura de funcionamento, sejam o mais reduzidas possível. De notar ainda que a variação da corrente de *threshold* varia de acordo com o enunciado na secção anterior (Figura 3.3). As medições de temperatura foram retiradas utilizando a câmara térmica, já referida, na área sinalizada a vermelho na figura 5.2a. As medições apresentadas na tabela foram executadas utilizando um laser semelhante ao utilizado no protótipo final, sendo o aqui utilizado laser dissecado na figura 4.5.

Tabela 4.2: Valores referente à variação da corrente de *threshold* face a variação de temperatura.

Temperatura (^oC)	**Corrente *Threshold*** (mA)
18	180
28	210
30	260

Por forma a se obter os valores de corrente correspondentes as potências óticas de trabalho, do laser a utilizar, foram executados uma sequência de medições. Sendo que os circuitos de controlo de temperatura não se encontravam operacionais, estas medições foram executadas colocando o laser à temperatura de funcionamento ideal (28^oC) alterando os valores de corrente em torno dos valores de potência ótica, próximos dos estipulado para trabalho, medindo-os em simultâneo. As medições obtidas estão representadas na tabela 4.3 e no apêndice B, um leque de figuras que ilustram os resultados das medições práticas executadas.

Tabela 4.3: Valores referente ás correntes correspondentes ás diferentes potências de trabalho.

Potência ótica (mW)	**Corrente** (mA)
162	189,03
221	234,82
323	281,48
409	333,47

Não sendo possível obter uma medição precisa da corrente correspondentes aos valores de potência ótica numericamente inteiros, 200 mW e 400 mW, utilizou-se um método teórico baseados nos resultados práticos aproximados. Sabendo da linearidade entre a potência ótica e corrente de alimentação de um díodo laser após o limiar da corrente de *threshold* foi executada uma regressão linear aos valores obtidos por forma a se obter valores idênticos aos valores reais (Figura 4.3). Utilizando a equação obtida pela regressão linear obteve-se um valor de 214,89 mA para 200 mW óticos e de 328,69 mA para 400 mW óticos, sendo que estes valores de corrente de alimentação serão os considerados para o desenvolvimento do sistema de controlo do laser.

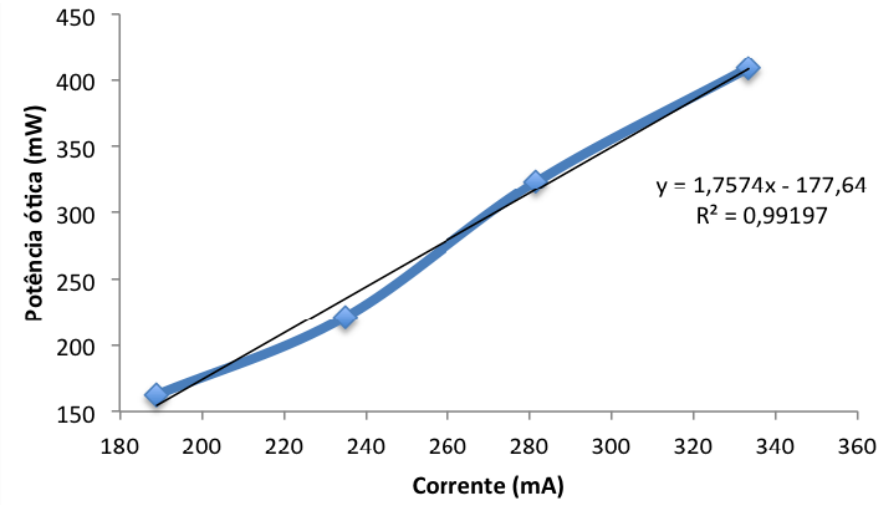


Figura 4.3: Relação gráfica entre os valores de potência ótica e corrente de alimentação do laser a utilizar a aproximadamente 28 ^{o}C.

Funcionamento e Componentes

A sequência representada pela figura 4.4 ilustra o funcionamento e os componentes de um laser idêntico ao utilizado.

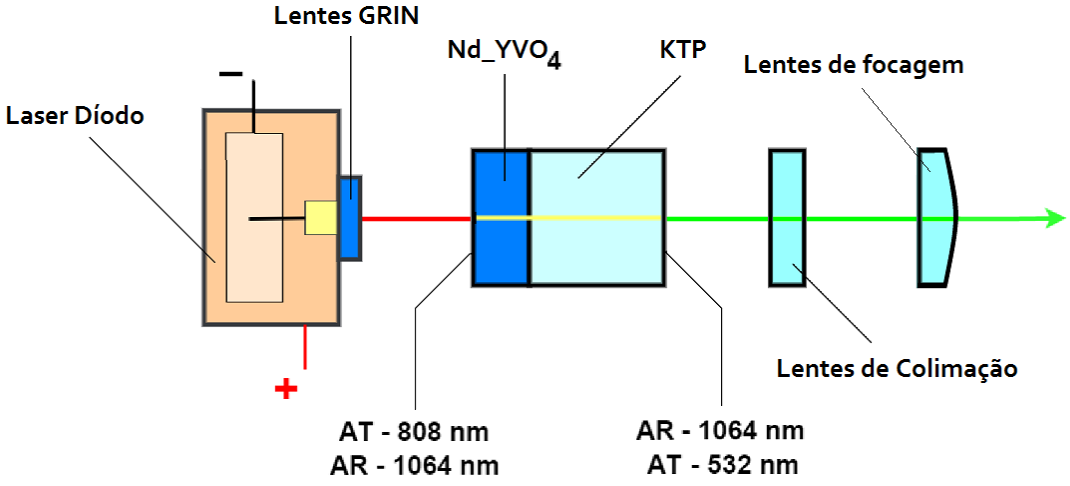


Figura 4.4: Esquema de funcionamento do laser utilizado.

Componentes

- **Díodo laser** - Fonte de excitação de elevada eficiência e que emite um feixe laser com um comprimento de onda de 808 nm;
- **Lentes GRIN** - ajustam o modo de ressonância e focagem do feixe melhorando a sua eficácia na câmara de ressonância;
- **Cristal Nd:YV**O_4 - cristal utilizado como meio de ganho com um "*coating*" altamente transparente à frequência de 808 nm e altamente refletor para frequências de 1064 nm;
- **KTP**- Cristal de "*Potassium Titanyl Phosphate*"responsável pela dobragem de frequência do feixe. Também apresente um "*coating*" altamente refletor de radiações 1064 nm e altamente transparente a radiações 532 nm;
- **Filtro IR** - lente absorsora de radiação infravermelha;
- **Lentes de colimação** - lente responsável pela colimação final do feixe e ajuste da sua divergência divergência;
- **Lentes de focagem**- Lente, atuada manualmente, responsável pela focagem do feixe de acordo com as necessidades.

Na figura 4.5 está representado a dissecação de um laser, de potência mais reduzida mas de todo semelhante ao utilizado. Á exceção das lentes de ajuste de foco (A) e colimação (D) todos outros componentes acima referidos encontram-se contidos no encapsulamento (C) representado na figura 4.2b. Os restantes componentes (B) fazem parte de um encapsulamento mecânico exterior que não só assegura os alinhamentos como os posicionamentos devidos dos restantes componentes enunciados.

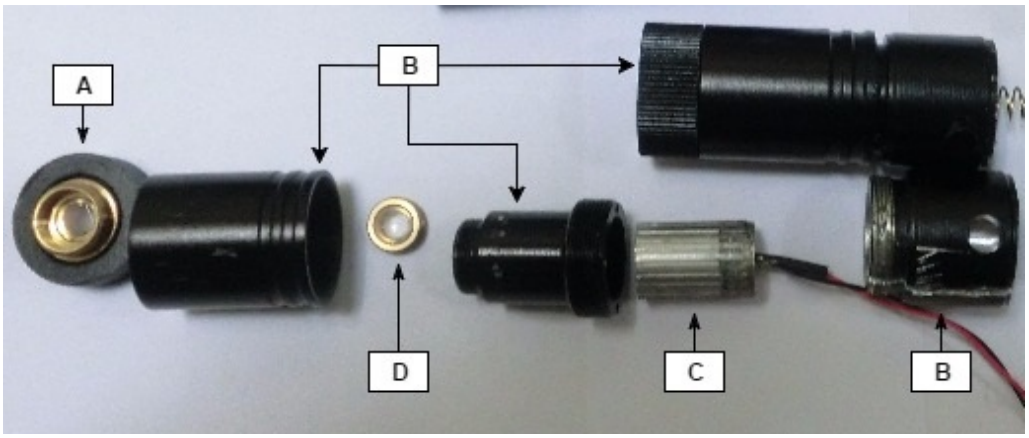


Figura 4.5: Dissecação de um laser semelhante ao utilizado.

Funcionamento

Como representado no esquema sequencial da figura 4.4, o funcionamento consiste na alimentação de díodo laser de alta potência, obrigando-o a emitir um feixe de fraca qualidade com um comprimento de onda de 808 nm, sendo essa qualidade melhorada pelas lentes GRIN colocadas à saída do díodo. Ultrapassando as lentes GRIN, o feixe

irá incidir no cristal Nd:YVO_4 que, devido ao "*coating*" que possui, servirá tanto de câmara de ressonância como de material de ganho. A excitação provocada pela absorção da radiação do díodo força o cristal Nd:YVO_4 a emitir radiação com um comprimento de onda de 1064 nm, que irá ser refletido sucessivamente na cavidade do cristal, provocando um feixe estimulado. Ao atingir uma certa densidade, um feixe laser de 1064 nm escapa passando por um KTP que dobra a frequência do mesmo resultando num feixe com um comprimento de onda de 532 nm. Por fim, o feixe passa por um filtro infravermelho e uma lente de colimação que lhe irá garantir um ângulo de divergência reduzido, podendo ser ainda ajustado pelas lentes de focagem.

4.1.2 Placa de efeito Peltier

A placa de efeito Peltier será utilizada como o elemento principal de refrigeração do sistema, devido às suas vantagens face a outras soluções existentes, já referidas anteriormente (Figura 4.6). Na tabela 4.4 estão listadas as especificações da placa escolhida, tendo sido todos os valores medidos experimentalmente, pelo Engº Jorge Reis para a alimentação elétrica em questão, (12 Volt).

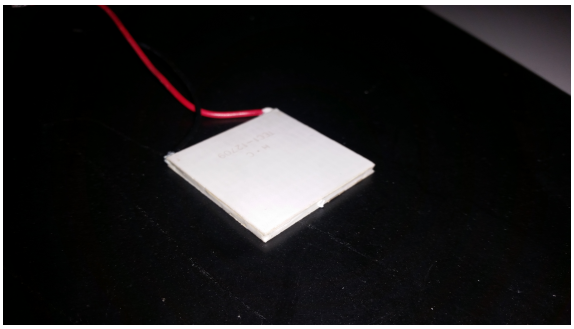


Figura 4.6: Placa de efeito Peltier utilizada.

Tabela 4.4: Especificações da placa de efeito Peltier utilizada com alimentação de 12 Volt medidos experimentalmente.

Modelo	TEC:12709
Potência	89,2 W
Tensão	12 V
Corrente máxima	9 A
Variação temperatura (entre placas)	67 ^oC
Variação de resistência	1,3 - 1,5 (Ω)
Dimensões	40x40x3,4 mm

Controlo de refrigeração

A necessidade de controlo da placa consoante as temperatura no laser representa um condição crítica perante a sensibilidade deste face a grandes variações de temperatura. Para tal, foi adquirido um controlador de temperatura digital, figura 4.7, por forma a que a se conseguir um controlo de temperatura continuo em anel fechado. Este equipamento vem ainda equipado por um sensor NTC, com um diâmetro de 5 mm e um display. As especificações do controlador encontram-se detalhadas no tabela 4.5. O controlador

referido tem como particularidade de ser ajustado de acordo com a temperatura que se pretende.

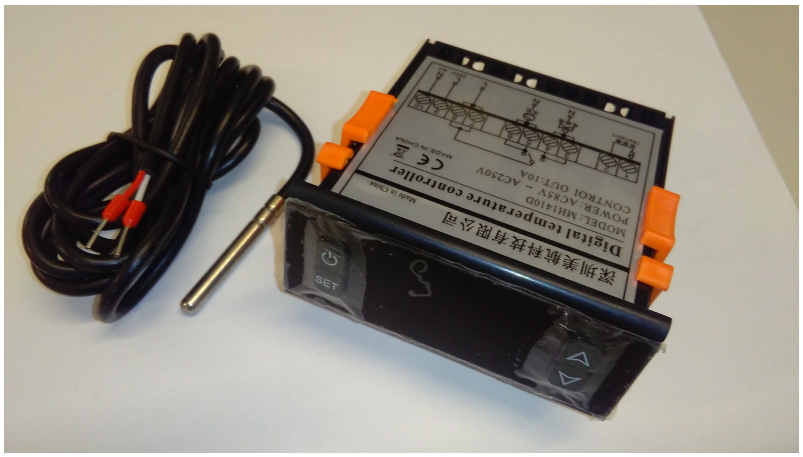


Figura 4.7: Controlador de temperatura digital utilizado.

Tabela 4.5: Especificações do controlador de temperatura digital utilizado.

Marca	Shenzhen Meihang
Modelo	MH1410D
Alimentação	220 VAC
Resolução	0,1 ^oC
Corrente Máxima	10 A
Intervalo de leitura	-50 até 120 (^oC)

4.1.3 Modulo Laser

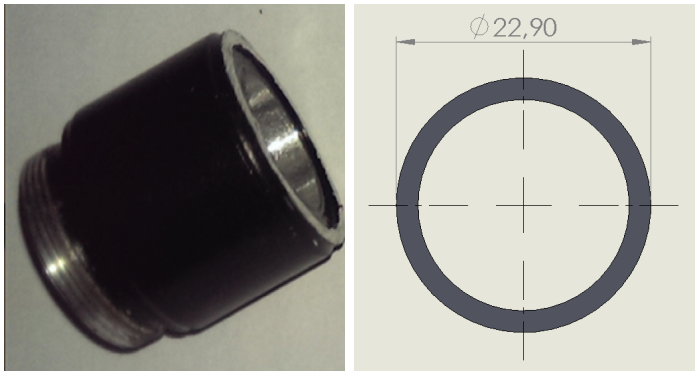
O módulo laser é o componente mais complexo e importante de toda a estrutura, uma vez que é o responsável pela fixação e simultaneamente refrigeração do laser. Como tal, este foi o primeiro componente da estrutura a ser desenvolvido. Todo este módulo será pensado e desenvolvido tendo o conhecimento dos materiais disponíveis e tendo em conta as propriedades e dimensões do laser e da placa de efeito Peltier, os únicos elementos previamente definidos.

Sendo que a placa de efeito Peltier atua por contacto direto, é necessário que, por questões de rendimento térmico, a mesma e o laser se encontrem o mais próximos possível. Daí a necessidade de se desenvolver este módulo estrutura. Apesar de se tratar de uma só peça, a fixação e refrigeração do laser foram pensadas separadamente.

Módulo de Fixação

O módulo de fixação terá como função a imobilização do laser, mantendo-o horizontalmente posicionado face ao sistema, e terá também de proporcionar uma boa condução térmica. Posto isto, optou-se por uma fixação do laser através de uma abraçadeira metálica em alumínio, por este ser um material com boa rigidez e boa condução térmica, tendo elasticidade suficiente para pequenos ajustes - na ordem das décimas de milímetro - no diâmetro do bloco de forma a garantir a fixação do laser sem folgas.

Atendendo à figura 4.8, a cápsula do laser apresenta um diâmetro de 22,9 *mm*. Contando ainda que a cápsula será envolvida com pasta térmica de forma a melhorar a sua eficiência na transferência de calor, o diâmetro da braçadeira a dimensionar será de 23 *mm*.

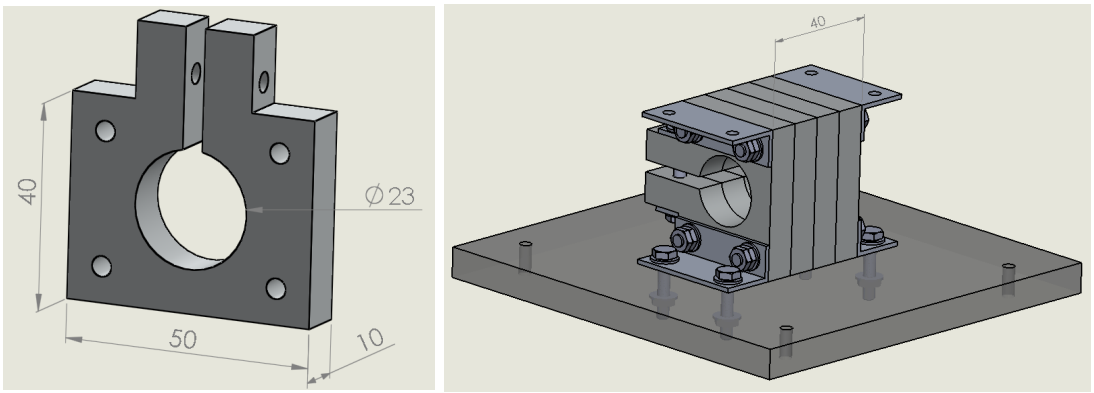


(a) (b)

Figura 4.8: a) Cápsula laser; b) Representação em Solidworks da cápsula do laser em vista frontal.

Como não existia grande abundância de materiais passíveis de ser usados para este projeto, não existiu a possibilidade de obtenção de um bloco de alumínio maciço, sendo necessário improvisar. A solução obtida passa pela utilização de quatro peças em alumínio (Figura 4.9a). Estes quatro blocos serão devidamente fixados através de parafusos passantes, criando assim um bloco único com uma área de contacto superficial idêntica à da placa de efeito Peltier (Figura 4.9b). Este bloco ainda passa a alojar um sensor NTC, para realimentação de temperatura.

Este bloco terá ainda quatro cantoneiras em alumínio de modo a facilitar as ligações aos componentes adjacentes. Um desses componentes é uma base isoladora em acrílico, cuja função é impedir a passagem de corrente elétrica entre a base e o módulo (Figura 4.9b).



(a) (b)

Figura 4.9: a) Bloco individual; b) Módulo de fixação em perspetiva.

Vantagens:

- Possibilidade de fácil substituição do laser;
- Possibilidade de alojar outros tipos de lasers, desde que eles possuam um encapsulamento de dimensões semelhante.

Desvantagens:

- A utilização de módulos de individuais da abraçadeira pode comprometer a horizontalidade de feixe;
- O laser DPSS tem como pólo elétrico positivo o seu encapsulamento, fazendo com que toda a estrutura de fixação seja também um pólo positivo. Dada a fragilidade e sensibilidade do laser, irá existir a necessidade de isolar este elemento dos outros componentes adjacentes.

Módulo de refrigeração

O módulo de refrigeração terá como objetivo a extração de calor do módulo de fixação, jogando com o gradiente de temperatura entre as superfícies da placa de efeito Peltier. Sabendo que o laser deverá idealmente funcionar a 28ºC, temperaturas fora desta gama poderão não permitir obtenção do feixe desejado. Variações de temperatura constantes, na ordem dos 4ºC, não só podem danificar o laser como podem também alterar continuamente a qualidade do feixe, o que no caso do LDV pode resultar em funcionamento incoerente.

Atendendo as especificações da placa de efeito Peltier, esta consegue criar uma diferença de temperatura de 67 ^oC entre as suas placas, dissipando cerca de 89,2 W. Assim sendo, se a superfície fria da placa de efeito Peltier estiver a 28 ^oC, então a superfície complementar deverá estar a $28 + 67^oC$. Logicamente, o contrário também acontece. O arrefecimento da superfície quente da placa de efeito Peltier irá, por consequência, arrefecer a superfície fria. À primeira vista, um gradiente de 67 ^oC parece exagerado, assim como a utilização de um dissipador de 89,2 W para um laser que debita cerca de 0,4 W. No entanto, este gradiente corresponde à potência máxima da placa, medida nas circunstâncias de alimentação da mesma, podendo ser ajustada de acordo com as necessidades.

Apesar da grande potência de dissipação de calor da placa de efeito Peltier, a placa apresenta uma superfície de dissipação muito reduzida, sendo este uma desvantagem considerável, dado que a atuação da placa se processa por contacto direto. Uma forma para contornar este problema passa pela inevitável utilização de um dissipador, aumentando a área de dissipação. A utilização de uma ventoinha para a extração de calor será também uma opção com o objetivo de aumentar a eficácia e velocidade do processo de refrigeração.

Um outro problema deste módulo assenta na necessidade de isolamento térmico. Dado que a fixação entre módulos é exercida por parafusos, é necessário ter em consideração as transferências de calor através dos mesmos. Quanto ao isolamento elétrico dos módulos, este irá ser considerado caso necessário.

No entanto, a maior dificuldade no desenvolvimento deste módulo, deve-se à limitação de material. Tendo conhecimento da escassez de material, foi realizada uma recolha de

material a utilizar antes do desenvolvimento do projeto em Solidworks. Após o conhecimento dos materiais disponíveis e das exigências impostas pelo próprio projeto, a solução foi então desenvolvida.

Na figura 4.10 está representada a solução desenvolvida em Solidworks para o módulo de refrigeração. De maneira a responder a todas as exigências descritas previamente, uma estrutura em sanduíche foi a solução que se apresentou como mais adequada face aos requisitos impostos.

Devido à sua complexidade, este irá ser explicado de seguida, com base na solução já representada na figura 4.10, com as peças respetivamente numeradas.

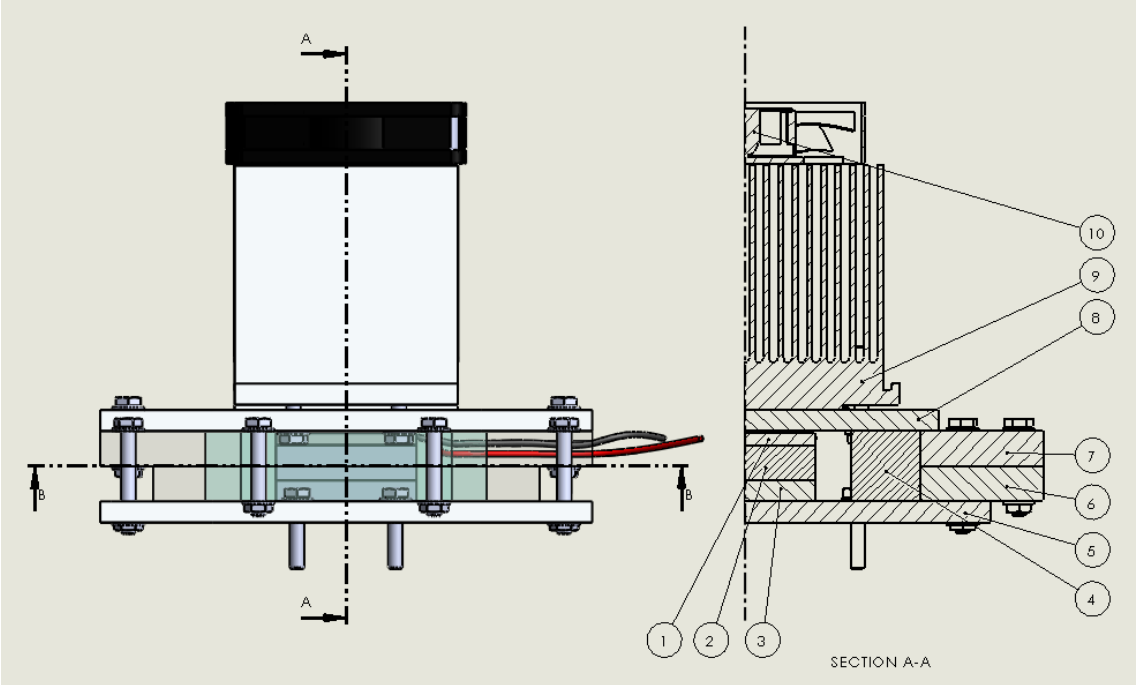


Figura 4.10: Representação em corte do módulo de refrigeração desenvolvido em Solidworks.

Elementos Chave e Explicação

Os elementos destacados em seguida representam as ideias-chave da solução proposta.

- **Um elo de ligação** entre os módulos de refrigeração e de fixação (peça 5), cuja função é garantir a fixação e estabilidade dos dois módulos, assim como as trocas de calor.

  Atendendo à figura, relativa ao módulo de fixação, a área superficial de contacto é muito semelhante à área de ação da placa de efeito Peltier, o que dificulta a fixação entre os dois módulos. Assim sendo, a placa 5 serve como elo de ligação entre eles. A hipótese de utilização de uma placa de acrílico foi também equacionada de modo a resolver problemas de isolamento térmico, elétrico e de ligação. No entanto, esta solução implicaria que o acrílico utilizado estivesse muito próximo da coluna central, aguentando variações de temperatura constantes, comprometendo a planeza superficial da coluna e, consequentemente, a estabilidade estrutural do módulo. Por

esta razão, optou-se pela utilização de alumínio para a placa 5, dado que apresenta uma boa condutibilidade térmica e confere uma melhor estabilidade estrutural a todo o módulo de refrigeração.

- **Um isolamento térmico** Um isolamento térmico conseguido através dos acrílicos representados pelos balões 6 e 7 na figura, de forma a evitar transferência direta de calor pelos parafusos .

  Ao contrário do pensamento utilizado para a escolha do elo de ligação, a utilização de acrílico para garantir este isolamento é crucial. Como se pode observar na figura 4.10 foram utilizadas duas placas de acrílico, sendo a sequência de fixação a seguinte:

  1. Placa 5 fixa ao Acrílico 6;
  2. Acrílico 6 fixa ao acrílico 7;
  3. Acrílico 7 fixa à Placa 8.

  Deste modo é possível garantir que entre a placa 5 e a placa 8 não existe trocas de calor resultantes da fixação, mantendo um fluxo térmico coerente ao logo de todo o módulo. A fixação foi pensada de forma a que todos os furos sejam passantes, evitando roscar o acrílico. Uma melhor perspetiva da sequência de fixação já referida estará especificada na figura 4.24. Os acrílicos deverão ainda apresentar um interior "oco" de forma a posicionar e conectar componentes dentro do módulo.

  Uma outra particularidade da utilização de acrílicos assenta na planeza superficial. A utilização de acrílicos entre as duas placas de alumínio garante um bom paralelismo às mesmas, crucial para criar o máximo de contacto superficial entre as superfícies responsáveis pelo fluxo de calor.

  Embora não seja crítico, uma vez que este módulo não estará em contacto com superfícies eletricamente neutras - a não ser em casos de mau isolamento elétrico de equipamentos - esta solução garante também um muito importante isolamento elétrico e eletrostático entre o módulo de fixação do laser e a parte superior do módulo de fixação do dissipador térmico. Sendo as superfícies da placa de efeito Peltier cerâmicas, estas bloqueiam a passagem de corrente elétrica, podendo evitar eventuais descargas estáticas para o laser.

  A técnica de fixação utilizada para o isolamento térmico poderia ser conseguida com apenas um acrílico. No entanto, isso iria acarretar um alargamento excessivo da área do acrílico, o que resultaria num aumento significativo das dimensões do módulo, indo contra o objetivo estipulado.

- **Um bloco central**, constituído pelas placas 2, 3 e placa Peltier (peça 1). Este bloco é responsável pelo contacto entre a plataforma de dissipação e a placa 5, criando uma coluna de fluxo de calor.

  Os acrílicos conseguidos têm 10 mm de espessura, o que perfaz uma diferença de altura entre as placas 5 e 8 de 20 mm. Como sabido, a espessura da placa de efeito Peltier é de 3,4 mm. A maneira utilizada para conectar a placa de efeito Peltier ás placas 5 e 8 foi recorrendo a uma extensão através dos blocos de alumínio 2 e 3. Estes blocos têm uma superfície de contacto igual à da placa de efeito Peltier, de modo a se perder o mínimo de calor possível durante o processo, criando-se assim o bloco central já referido. A utilização de dois blocos em alumínio deve-se à impossibilidade de arranjar um só com uma espessura de 16,6 mm.

  A posição da placa de efeito Peltier no bloco é essencial. O gradiente de temperatura observado entre as placas cerâmicas da Peltier é de 67 ^{o}C. Isto é, sendo a temperatura

da placa de fixação de 28 ^oC, a outra parte da placa terá uma temperatura de $28 + 67^oC = 95^oC$, o que não convém, dado que uma temperatura de 95 ^oC numa caixa de ar iria aquecer todos os outros componentes envolventes e, consequentemente, o sistema na sua totalidade. Por outro lado, se a placa de efeito Peltier fica encostada à placa 8, que se encontra em contacto com o dissipador, este conseguiria dissipar muito mais rapidamente os 95 ^oC para fora do sistema, permitindo manter de forma mais eficiente e simples uma temperatura mais baixa no módulo.

- **Caixa de ar**, conseguida através do esferovite (peça 4), cuja função é a criação de um isolamento do bloco central e a proteção dos materiais envolventes.

  Obviamente, após a adição das placas de acrílico, a distância entre a placa de efeito Peltier e o módulo de fixação começa a opor-se à ideia inicial de que a placa de efeito Peltier deveria estar o mais próxima possível deste módulo. Para tentar minimizar este problema, e aproveitando a área não ocupada pelo bloco central, resolveu-se criar uma caixa de ar para promover uma maior eficácia na transferência de calor entre o bloco central. Esta caixa foi criada de forma simétrica de modo a anular a convecção horizontal (Figura 4.11).

  No entanto, a principal função desta caixa de ar é a utilização do esferovite como um segundo revestimento. Atuando como proteção do acrílico face às dilatações resultantes de variações térmicas do módulo, o esferovite impede que este se deforme e que seu paralelismo e robustez mecânica sejam arruinadas. Tentou-se promover o máximo de paralelismo possível, novamente para maximizar o contacto superficial.

- **Dissipação de calor**, conseguido através da plataforma constituída pelas pelas 8, 9 e 10. Dado que a superfície de contacto do dissipador não têm dimensão superficial suficiente para se conseguir fixar aos acrílicos, este estará apoiado na placa 8. A peça 10 trata-se de uma ventoinha de extração de calor, alimentada a 12 Volt e 0.7 Ampere, que tem como função acelerar o processo de dissipação, essencial para compensar a inercia térmica do bloco e aumentar a eficácia do módulo.

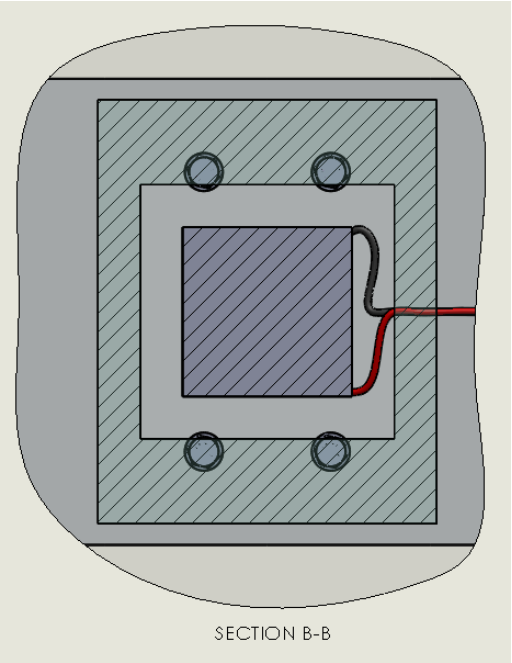


Figura 4.11: Secção de corte parcial, B-B, referido na figura 4.10.

Vantagens:

- Conceito de refrigeração original, passível de ser eventualmente aplicado a outras áreas;
- Módulo individual, estável e muito compacto face ao material disponível.

Desvantagens:

- A placa de efeito Peltier encontra-se distante do módulo de fixação (22.6 mm);
- Perdas de calor consideráveis ao longo de todo o módulo (não medido);
- Inércia térmica.

4.1.4 Módulo Completo

Na figura 4.12 encontra-se então representado o módulo laser completo. O desenvolvimento deste módulo centrou-se em criar uma estrutura que fosse o mais compacta possível tendo em conta o material disponível e as exigências impostas pelo problema existente.

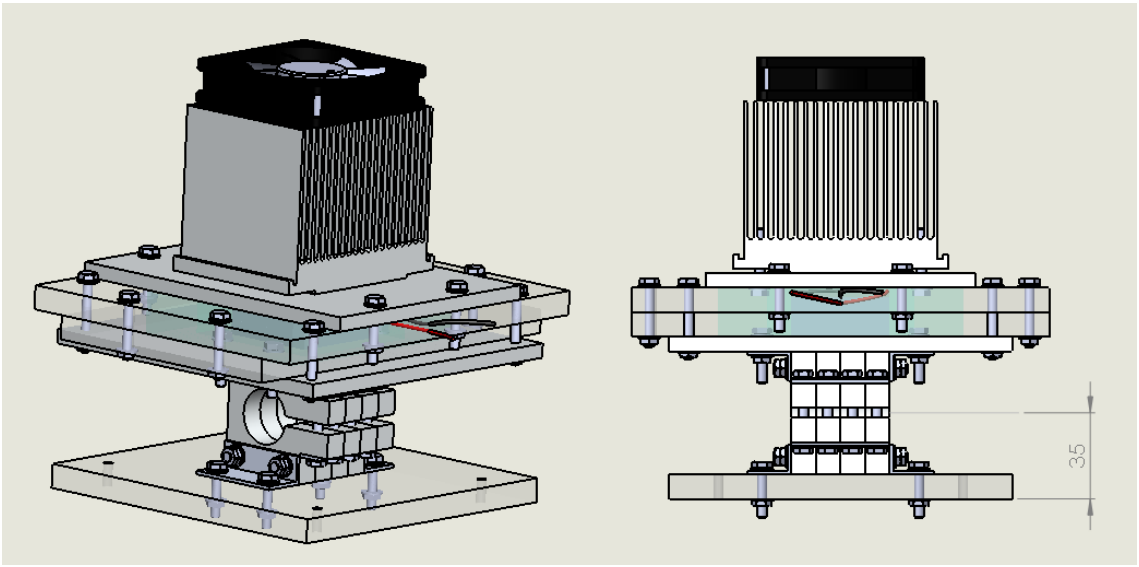


Figura 4.12: Modulo Laser em corte desenvolvido em Solidworks.

A fixação dos dois módulos (Figura 4.13) é assegurada por parafusos M4 entre a placa 5 (Figura 4.10) e as cantoneiras representadas na figura 4.9b. O módulo será fixo à base pela placa de acrílico.

Devido às adaptações necessárias para se desenvolver este módulo da forma mais compacta possível, aspetos referentes a dimensões de adaptação ao sistema LDV já existente serão posteriormente tidos em consideração aquando da construção da base para o sistema. No entanto a distancia desde a base do módulo laser até a altura do feixe é de 35 mm (Figura 4.12). Outro aspeto a considerar será a inércia térmica do módulo. Na figura 4.14, esta representado o módulo obtido apresentando as seguintes dimensões $140x170x180$ mm.

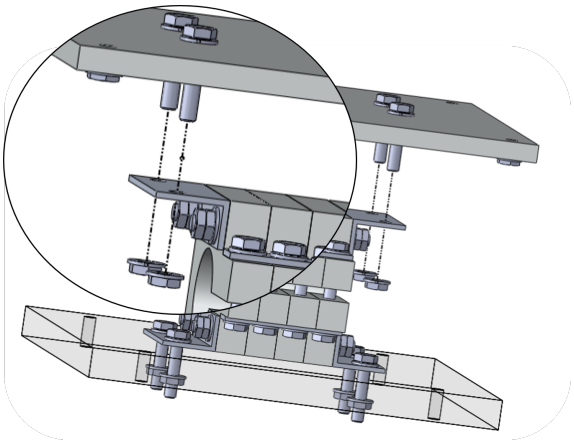


Figura 4.13: Fixação entre o modulo de fixação e refrigeração.

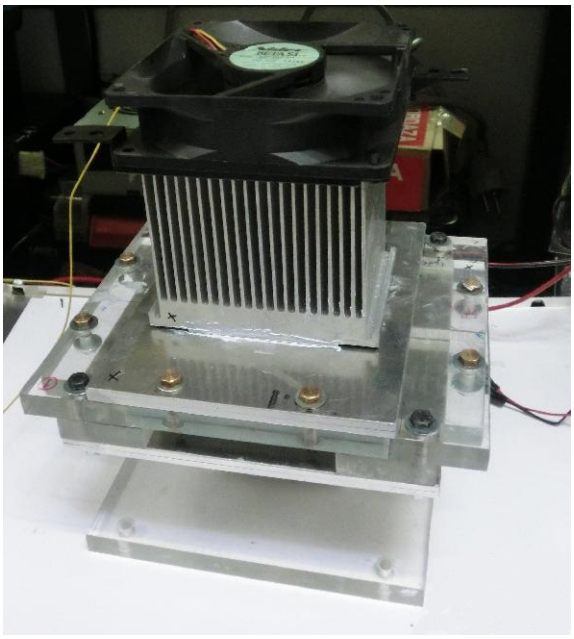


Figura 4.14: Módulo de laser desenvolvido.

4.1.5 Base

A base é o elemento da estrutura primariamente responsável pela adaptação ao sistema LDV já existente. Para além de servir de suporte a outros elementos da estrutura - módulo laser e caixa - este elemento tem também a responsabilidade de manter a integridade mecânica do sistema o mais estável possível.

A rigidez necessária para a base foi conseguida utilizando perfil RS 45x45 e 45x90 disponível. Tal perfil não só representa uma vantagem devido à elevada rigidez mecânica que apresenta, como à versatilidade que permite na execução de ligações entre perfis. A ficha técnica dos perfis pode ser consultada no apêndice C.

A figura 4.15 ilustra a base desenvolvida, tendo novamente em conta os materiais disponíveis. Foram utilizados quatro perfis Bosch, e duas placas de alumínio (Figura 4.16) de modo a facilitar a adaptação/encaixe no suporte já existente, representado na

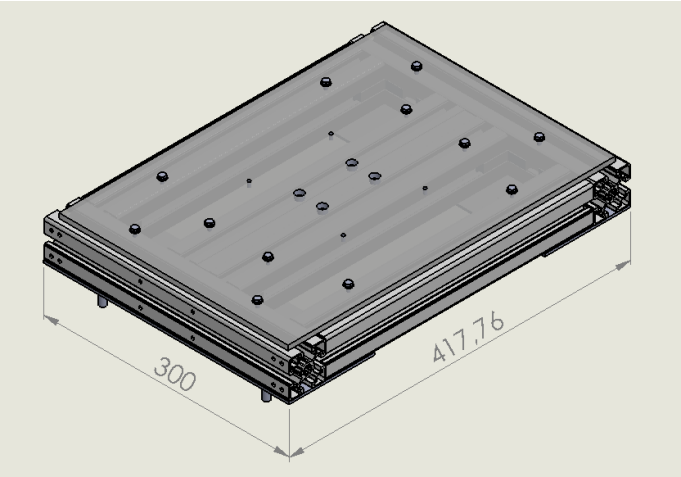


Figura 4.15: Base desenvolvida em Solidworks.

figura 4.17. Os perfis são conectados através de cantoneiras tipo L, também desenvolvidas pela Bosch e encontram-se fixos na placa de adaptação, através de parafusos T também desenvolvidos pela mesma marca (informações adicionais acerca de perfis e ligações Bosch estão disponíveis no apêndice C marcadas a amarelo amarelo).

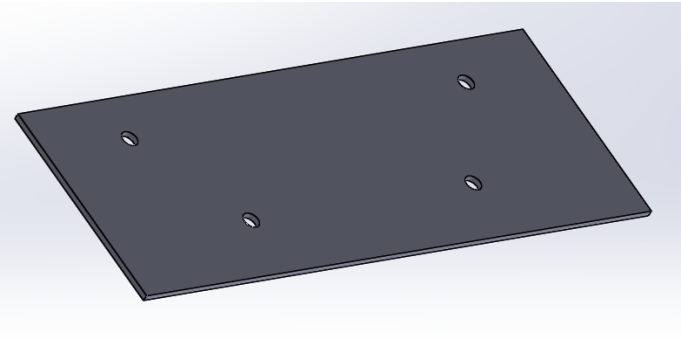


Figura 4.16: Placas de alumínio de adaptação ao suporte.

De maneira a permitir a centragem do módulo laser na base e tendo em conta a estrutura criada pelos perfis $45x45$, o vazio do interior do mesmo foi preenchido por uma placa em acrílico que serviu de elo de ligação. O duplo perfil central tem como objetivo assegurar que o acrílico não encurva na secção central, onde será fixado o módulo laser, promovendo assim um importante acréscimo de rigidez mecânica.

No entanto é necessário garantir que a distância da base mais ajuste seja igual à altura L (cerca de 100 mm podendo ser ligeiramente ajustável) (Figura 3.2) por forma a que o feixe se encontre coincidente com a entrada do sistema contendo os acústicos-óticos. Sendo a altura dos perfis 45 mm, altura do feixe no módulo laser 35 mm e a espessura da placa de alumínio 3 mm a altura total da estrutura desenvolvida é 83 mm. Apesar de ser próximo da altura pretendida, é necessário referir que o diâmetro de entrada de feixe no divisor de feixe é de 1,5 mm, o que limita consideravelmente a margem de erro quanto à altura a conseguir. A diferença de altura foi ajustada com a recurso a parafusos M6, utilizados para a fixação ao suporte LDV, e molas de compressão. A técnica a utilizada centra-se na fixação de um dos quatro parafusos à altura, adicionando os 17 mm através de um manga em alumínio circular (10 mm diâmetro), a que o feixe laser se deva encontrar, sendo que os outros três serão responsáveis pelo ajuste de ângulos de inclinação da base (Figura 4.18).

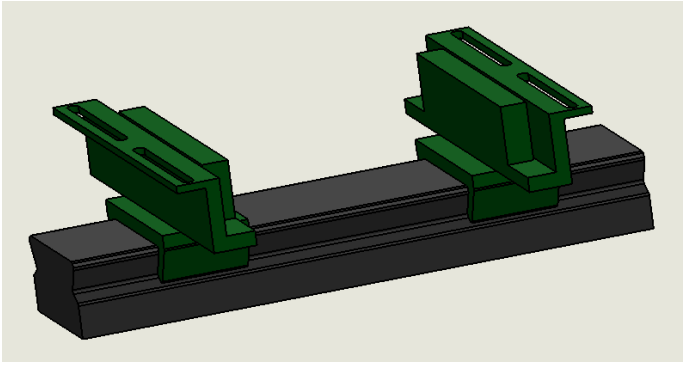


Figura 4.17: Base LDV existente desenhada em Soliworks.

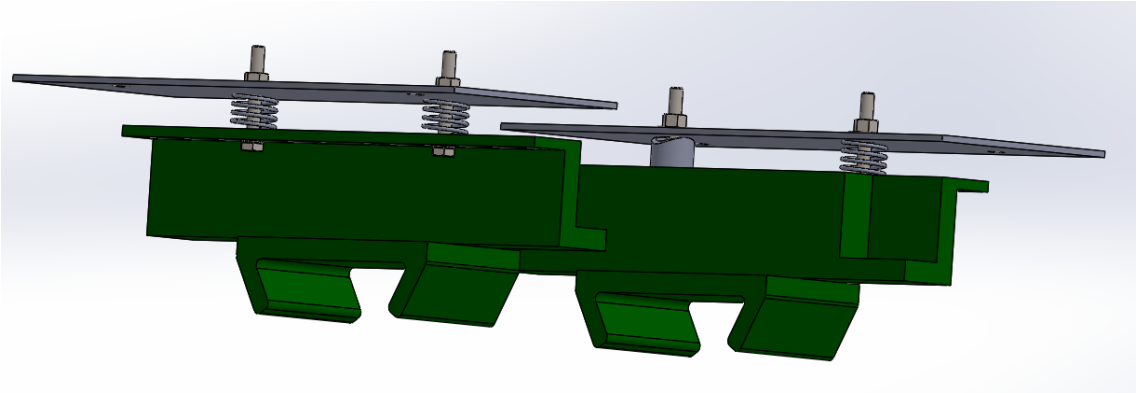


Figura 4.18: Sistema de Calibração.

O ajuste será feito utilizando uma chave de roquete através de aberturas feitas na parte superior do no acrílico de modo a facilitar o processo de ajuste (Figura 4.19).

O resultado final é o representado na figura 4.19.

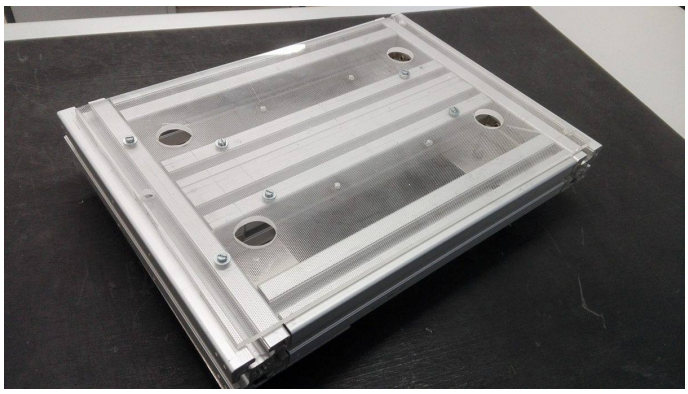


Figura 4.19: Base Construída.

4.1.6 Caixa

Após a totalidade da sua construção, o laser irá permanecer na faculdade, para que seja usado quer para situações profissionais quer como meio didático. Assim sendo, a caixa

deverá ser o mais transparente possível, de modo a que, caso seja necessário, se possa visualizar todo o conjunto laser. Contudo, de modo a manter o seu design consideravelmente simples e sendo que a base possui dimensões consideráveis, a caixa será executada como um paralelepípedo complementar da base. Tratando-se de um laser de classe III-b, as questões de segurança são extremamente rigorosas e serão maioritariamente asseguradas pela caixa desenvolvida. A mesma deve garantir:

- Controlo manual do feixe laser, para que possa ser facilmente interrompido quando necessário;
- Proteção contra feixes refletidos ou refratados dentro da caixa;
- Controlo de utilização do laser, através de um sensor *Mode Lock* , caso a caixa não esteja devidamente posicionada.

Na figura 4.20 está ilustrada a solução da caixa desenvolvida em solidworks.

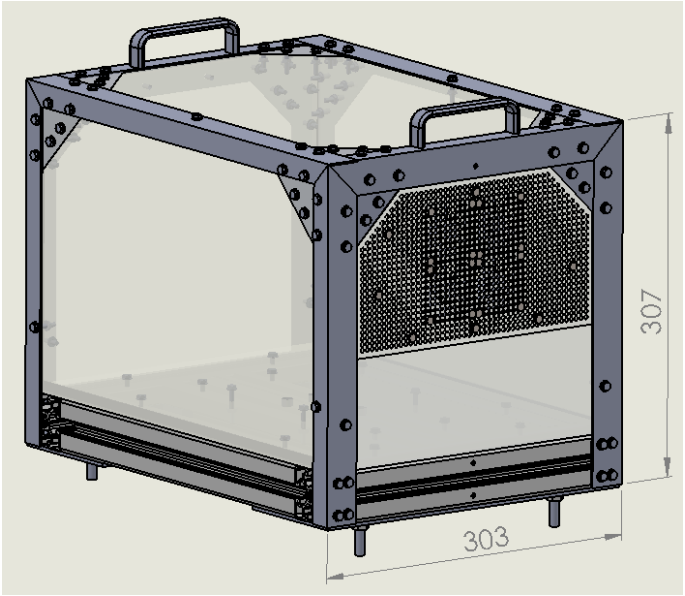


Figura 4.20: Representação da caixa desenvolvida em Solidworks.

Um dos elementos mais importantes da caixa é o *Shutter*, que funciona como elemento mecânico, por defeito e em repouso, de interrupção do feixe laser. Este encontra-se posicionado no acrílico da parede frontal da caixa envolvente do sistema, centrado com a saída do feixe laser, e é constituído por um atuador eletromecânico, que pode ser e é acionado por um atuador manual, tal como demonstrado na figura 4.21. Por questões de segurança este atuador monoestável só permite a passagem do feixe aquando da sua atuação, caso contrario, este deverá sempre interromper o feixe de modo a garantir que eventuais falhas elétricas do componente não comprometam a segurança do sistema. O *Mode Lock*, outra característica muito importante, será assegurado através de um contacto tipo *Reed switch* magnético colocado entre a caixa e a base desenvolvidas.

Um conjunto sequencial de películas foi adicionado nas faces da caixa, de forma a proteger os utilizadores ou pessoal que se encontrem próximos do laser sem as devidas proteções oculares, para casos em que o feixe seja refletido ou refratado novamente para o interior da caixa na sequência de manobras menos adequadas de pessoas ou passagem

Figura 4.21: Representação do mecanismo *Shutter*.

inadvertidas de materiais refletores à frente do feixe já fora da sua caixa. Foi decidido que seriam adicionadas quatro películas:

- 1ª serve para bloquear IR;
- 2ª serve para Atenuar os 532 nm;
- 3ª serve para Bloquear UV;
- 4ª serve para atenuar espectro visível total.

No entanto, a adição das camadas retira parte da transparência pensada inicialmente para a caixa. Com o objetivo de contornar essa limitação, para que seja possível utilizar este sistema para fins didáticos como inicialmente pensado, existirá um conjunto de LEDs no interior da caixa, manualmente acionados, que permitirão uma boa iluminação de todo o sistema.

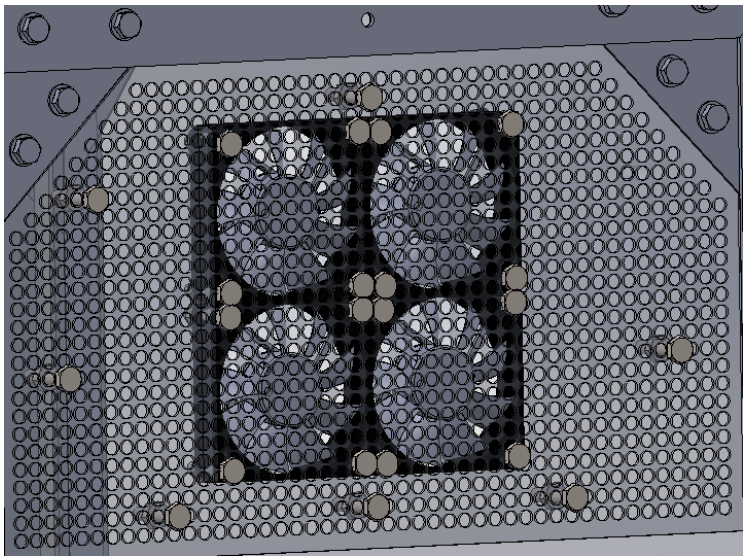


Figura 4.22: Ventoinhas e grelha.

Quatro ventoinhas adicionais, alimentadas a 12 Volt e 0.12 Ampere, servirão como uma forma de extrair o ar quente de dentro da caixa, contribuindo para manter a temperatura o mais fresca possível no interior da caixa, de forma a ajudar na refrigeração do laser. A colocação lateral das ventoinhas, estrategicamente pensada, impede a entrada de pós e partículas que poderiam comprometer o sistema. Para proteger as ventoinhas e pessoas uma grelha protetora será utilizada (Figura 4.22).

Apesar do que foi projetado não foi possível a conclusão de todos os trabalhos, no entanto o resultado atual é o representado na figura 4.23. O facto de não se encontrar totalmente coerente com o desenho deve ao facto de este ter resultado sobredimensonado aquando do desenvolvimento do seu projeto em Solidworks, levando à necessidade de proceder a alguns ajustes no momento da montagem.

Figura 4.23: Caixa laser em desenvolvimento.

4.2 Montagem da estrutura

Esta secção será dedicada à sequência de montagem de todo o sistema laser, assim como a particularidades na construção e desenvolvimento do sistema. Sendo o elemento principal e mais inovador da estrutura, o módulo laser será o foco deste subcapítulo. Como a base e a caixa representam elementos desenvolvimentos com intento na adaptação, vão ser apenas detalhadas as particularidades associadas à sua construção.

Todas as peças, à exceção dos acrílicos e esferovite, foram maquinadas nas oficinas da FEUP, seguindo os desenhos obtidos em Solidworks. Os toleranciamentos foram os predefinidos e habitualmente usados nas oficinas. Os acrílicos e esferovite foram cortados utilizando uma serra de fita à parte. A explicação que se segue não corresponde à sequencia cronológica de montagem do sistema.

4.2.1 Módulo laser

A sequência que se segue é conseguida a através de parafusos M4, respetivas porcas e anilhas, esquematicamente representada na figura 4.24. A numeração das peças na sequência que segue é referente à figura 4.10.

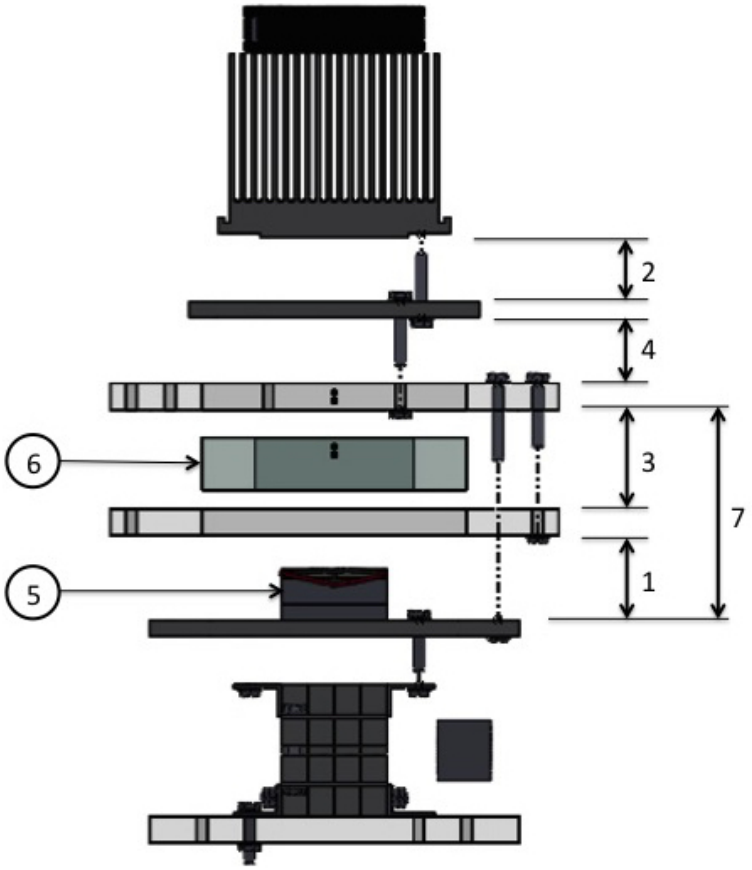


Figura 4.24: Representação em vista explodida e sequencial da montagem do módulo laser.

1. Montagem do módulo de fixação e fixação da placa 5 ao mesmo (Figura 4.25a);

2. Fixação do dissipador à placa 8;

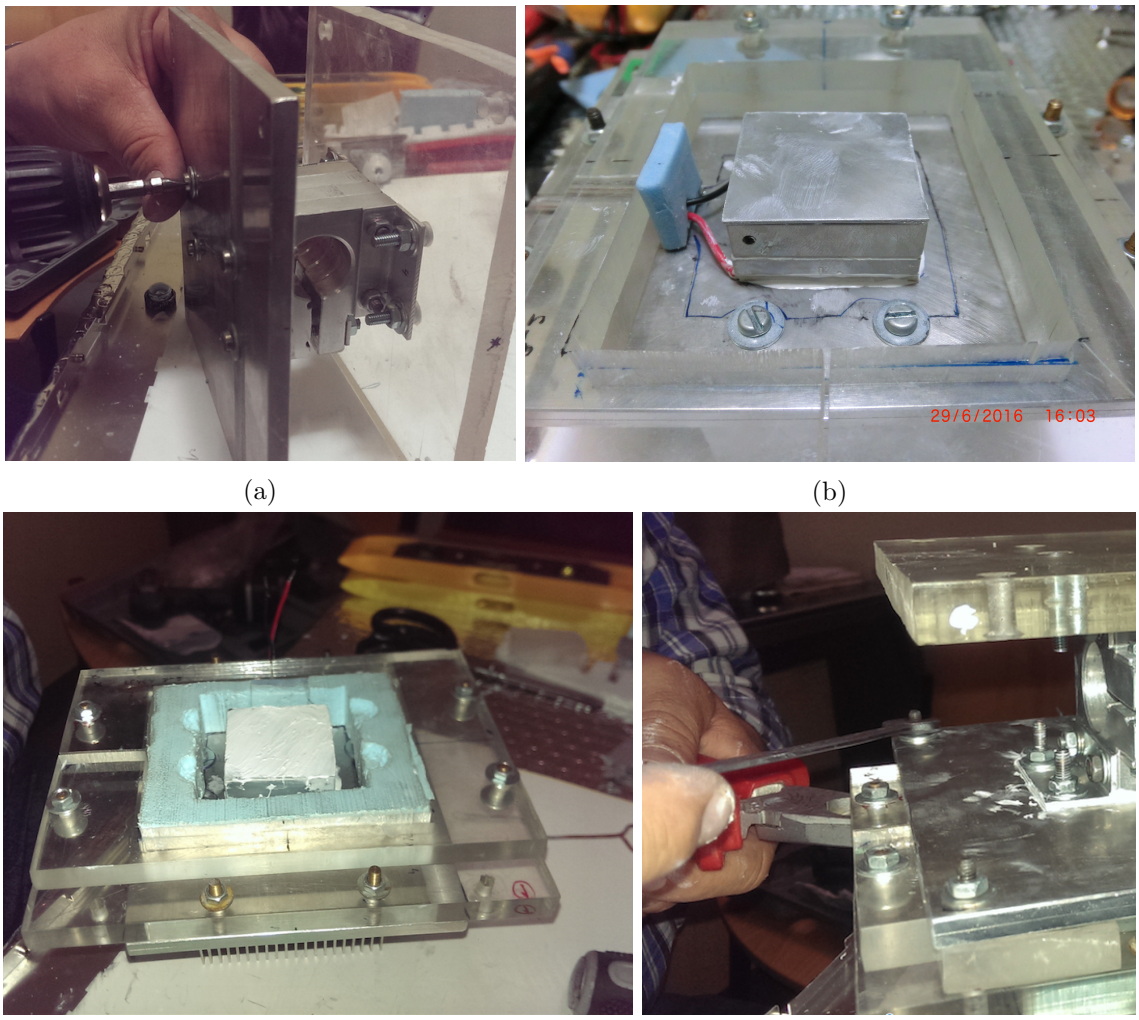
3. Fixação dos acrílicos 6 e 7;

4. Fixação dos acrílicos à placa 8 através do acrílico 7;

5. Centragem e colocação da sequência do bloco central, placa de efeito Peliter e placas 2 e 3 na placa 8 (Figura 4.25b);

6. Colocação do esferovite (Figura 4.25c);

7. Fixação da placa 5 e respetivo módulo de fixação ao acrílico 7, completando a sequência (Figura 4.25d).



(a) (b)

(c) (d)

Figura 4.25: a) Fixação da placa 5 (Figura 4.10) ao módulo de fixação; b) Posicionamento e centragem do bloco central; c) Colocação do esferovite; d) Fixação da peça 5 (Figura 4.10) e o acrílico (peça 7, figura 4.10) finalizando a montagens do módulo.

Particularidades de montagem

- Todas as superfícies metálicas de contacto foram lixadas com lixa de água e foram posteriormente revestidas com a massa térmica, com o objetivo de promover um melhor fluxo térmico.
- Aumento da espessura do esferovite de modo a ser colocado sobre pressão entre as placas 5 e 8 (Figura 4.10), assegurando uma caixa de ar o mais hermética possível;
- Adição de apoios em acrílico de modo a combater a curvatura provocada pelos parafusos nas placas 5 e 8 (Figura 4.10);

Verificação de posicionamento dos componentes

Após a montagem do módulo laser, alguns testes foram executados com o objetivo de verificar o seu funcionamento no que diz respeito ao processo de refrigeração de modo a

garantir que todos os componentes se encontravam bem posicionados. Estes testes foram executados sem o laser inserido.

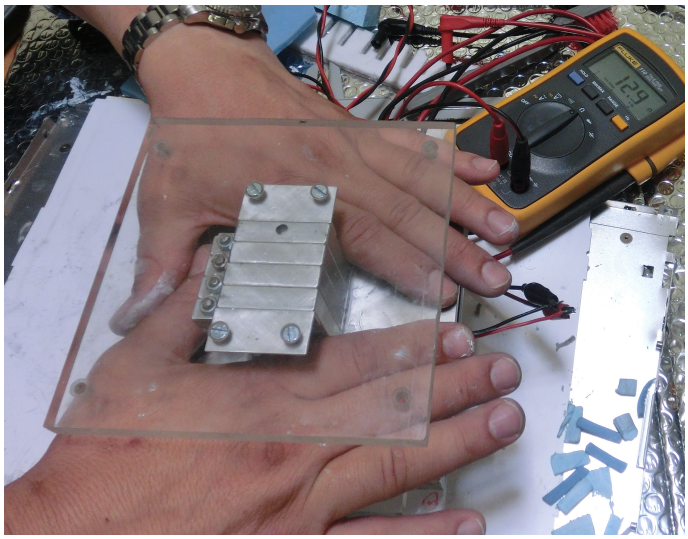
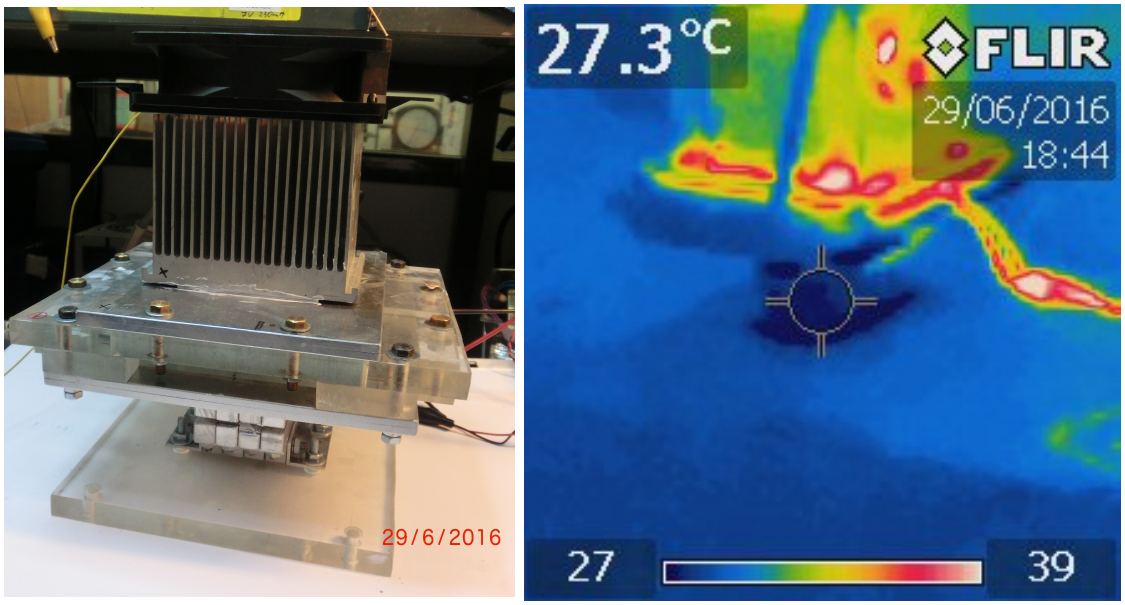


Figura 4.26: Verificação do posicionamento e funcionamento da placa de efeito Peltier.



(a) (b)

Figura 4.27: a) Módulo laser durante o teste térmico; b) Resultados obtidos pelo câmara térmica.

O primeiro teste sem laser teve como base o princípio lógico de funcionamento da placa de efeito Peltier. Se esta consegue criar um gradiente de temperatura entre as suas superfícies por aplicação de tensão, esta também consegue produzir tensão quando existe uma diferença de temperatura entre as superfícies superior e inferior. Assim sendo, ligando os terminais da placa a um multímetro e aquecendo uma das faces da placa de efeito Peltier, foi possível detetar uma variação de no valor de resistência entre o pólo positivo e negativo da placa, tal como representado na figura 4.26, confirmando assim que todos os 127 elementos da placa de efeito Peltier se encontravam intactos, consequentemente a existência de corrente no circuito confirmando um bom posicionamento dos componentes.

O segundo teste, ainda sem laser, teve como objetivo perceber como está a decorrer o

fluxo de calor ao longo do módulo, utilizando-se para tal fim uma câmara térmica FLIR, com erro na ordem dos 15 mK (Figura 4.27a). As figuras 4.27 foram obtidas tendo a placa de efeito Peltier a trabalhar na sua potência máxima. Os resultados térmicos (Figura 4.27b) mostraram claramente que todo o processo de transferência de calor estava a fluir conforme o esperado e pretendido.

4.2.2 Montagem do laser

Antes de ser acoplado no módulo, o laser foi totalmente modificado e alterado por forma a ser possível adicionar dissipadores e adicionar pasta térmica, de modo a promover um maior arrefecimento no interior da cápsula onde o chip está inserido (Figura 4.28). Com o laser preparado seguiu-se então a montagem.

(a) (b)

Figura 4.28: a) Vista do interior do encapsulamento do laser; b) Laser modificado e devidamente encapsulado em perfil.

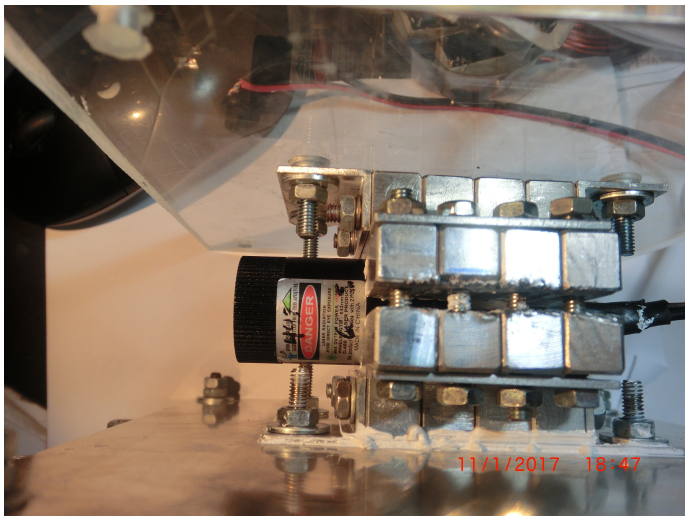


Figura 4.29: Montagem do laser no módulo de fixação.

Como o diâmetro do módulo do difere apenas em 0,1 mm do diâmetro da cápsula do laser, os problemas de concentricidade entre os quatro blocos do módulo de fixação foram solucionados devido ao formato em abraçadeira que apresenta, sendo assim possível

ajustar o posicionamento do laser de acordo com o pretendido, centrando a zona central do modulo com a zona central do chip inserido na cápsula (Figura 4.29).

4.2.3 Fixação de elementos da estrutura

Após a montagem de todos os elementos estruturais (módulo laser, base e caixa) foram acoplados de modo a que a que toda a estrutura trabalhe de acordo com o que foi planeado. As ligações a tratar são:

1. Módulo laser - Base;
2. Base - Suporte LDV;
3. Caixa - Base.

Fixação Módulo laser/Base

O modulo laser é fixado á base através de parafuso M4x25 (e respetivas porca e anilha) entre a placa de acrílico do módulo de fixação e à placa acrílico da base de modo a isolar o pólo positivo do laser (Figura 4.30). Foi ainda feito um desbaste na placa de acrílico do módulo laser de modo a alojar a cabeça dos parafusos de ligação ao módulo de fixação de modo a que não perturbem a horizontalidade do modulo e da base, visível na figura 4.26.

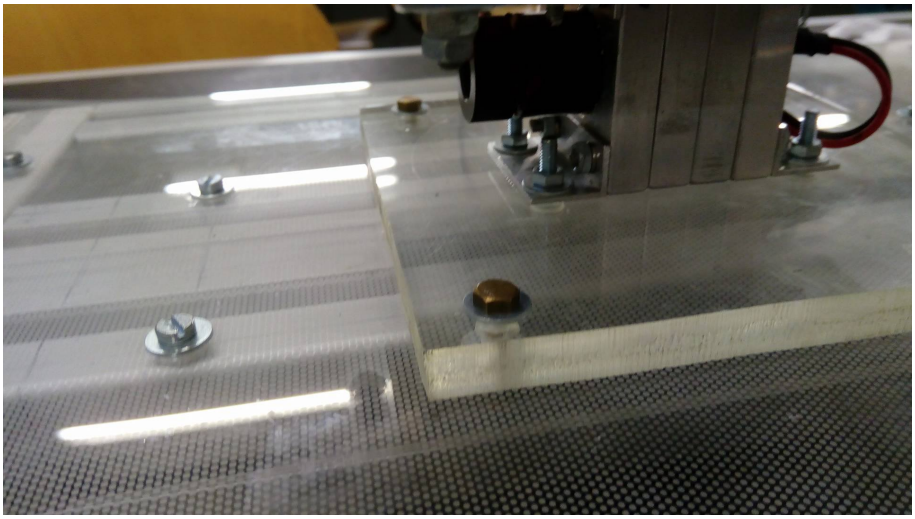


Figura 4.30: Fixação entre a módulo laser e base.

Fixação Base/Suporte LDV + Sistema de calibração

Como já mencionado, foi construido um suporte de adaptação em alumínio para melhorar a ligação entre a base e o suporte. Tendo isto em conta, a base fixa ao suporte em alumínio através de parafusos em T M8x25 (Bosch), sendo que este liga ao suporte LDV através de parafusos M6 e respetivas porca, anilha de pressão e mola de compressão (Figura 4.31).

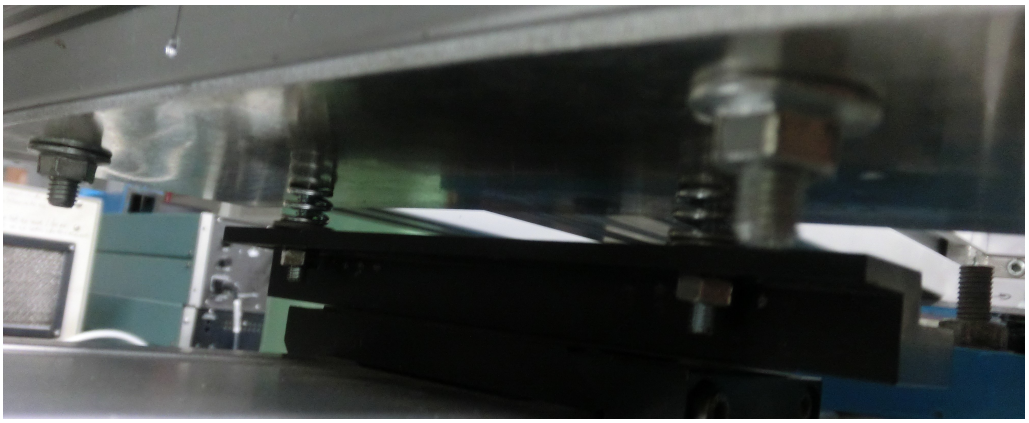


Figura 4.31: Fixação entre a módulo laser e base + sistema de calibração.

Fixação Caixa/Base

A caixa foi fixa á base através de 16 parafusos M4x20 (4 por cada canto)(Figura 4.32). Apesar de não se tratar da solução mais prática foi a adotada de modo a reduzir o peso de toda a estrutura e manter a resistência entre todo o sistema estrutural por forma a que este possa ser transportado através de pegas existentes no caixa.

Figura 4.32: Fixação entre a módulo laser e base.

4.2.4 Estrutura do sistema

A estrutura projetada para o sistema ainda não se encontra ainda completa sendo o resultado desenvolvido até ao momento o ilustrado na figura 4.33. De realçar que a aparência rudimentar deriva do material utilizado. Todo o material utilizado à exceção da placa de efeito Peltier e do laser é proveniente de desperdícios e sucata dos laboratórios.

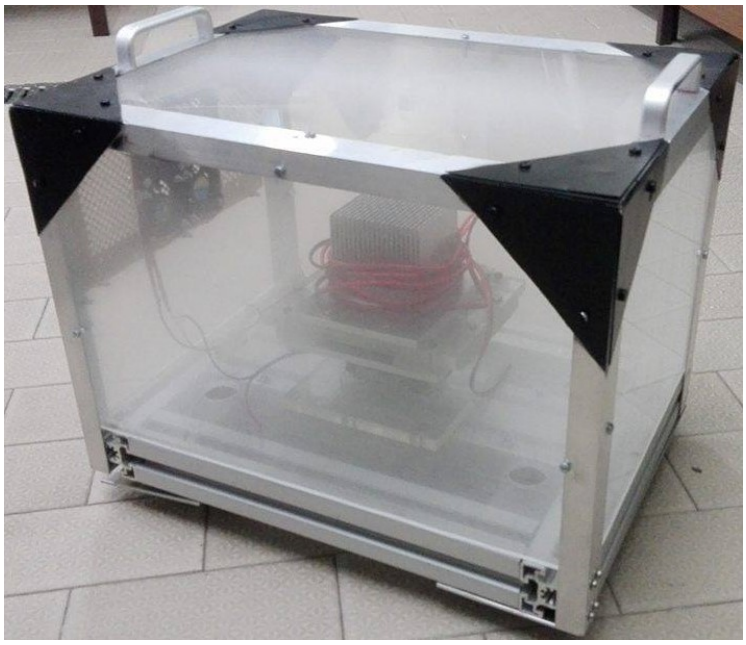


Figura 4.33: Estrutura sistema laser.

4.3 Electrónica

Como descrito nas especificações, este subcapítulo tem como objetivo apresentar e detalhar toda a eletrónica pensada para o controlo total do sistema laser. Assim sendo, à semelhança do subcapítulo destinado à estrutura, este será também dividido em secções, por forma a que os circuitos possam ser individualmente explicados. A figura 4.34 representa um esquema simplificado da eletrónica desenvolvida, estando um esquema mais completo no apêndice D. Devido a falta de tempo não foi possível concluir os trabalho previsto, no entanto todos os circuitos foram pensados e esquematizados. Os circuitos que se seguem foram desenhados utilizando o programa EAGLE da empresa Cadsoft.

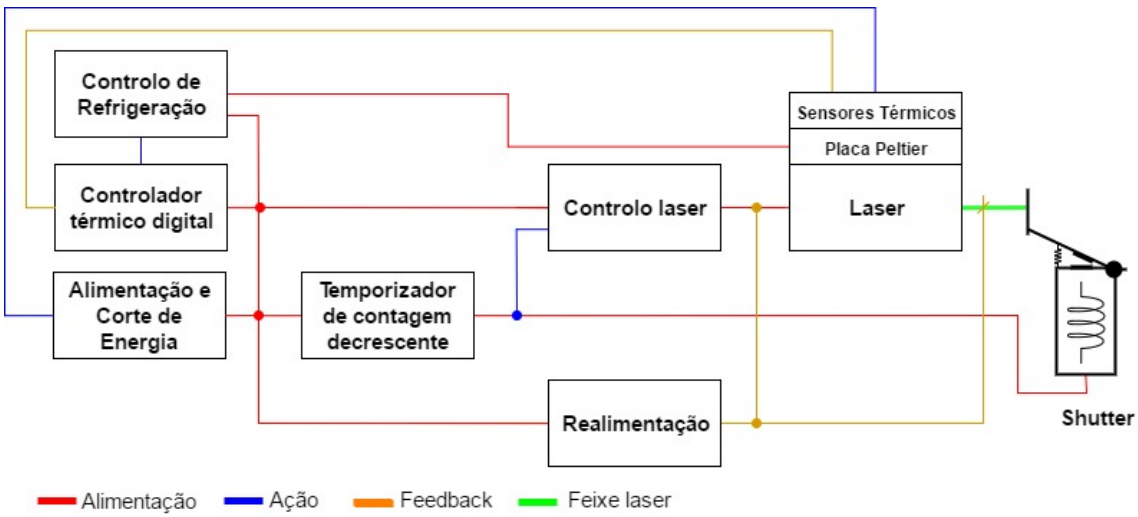


Figura 4.34: Esquema simplificado de desenvolvimento da eletrónica do sistema.

4.3.1 Circuito de controlo laser

Apesar da potência que consegue debitar o laser continua a ser muito sensível no que toca a picos de corrente e tensão. A pensar nisto, o circuito de controlo de potência foi desenvolvido de modo a prever eventuais picos e variações bruscas de potência elétrica que possam ser originados da alimentação.

Conforme já mencionado anteriormente neste documento, o laser só funciona entre a potência de *threshold* e a sua potência máxima. No entanto, como já referido, o circuito foi projetado para operar entre uma potência ótica de 200 mW e 400 mW reguláveis o que equivale a uma corrente de alimentação de 214,9 mA a 328,69 mA. Como o laser adquirido inclui já inclui um pequeno circuito estabilizador de alimentação que foi reajustado a estas necessidades específicas, este foi tido em conta de forma a facilitar o desenvolvimento de um circuito único ideal para o laser em questão (Figura 4.35) que engloba um controlo de corrente de alimentação em função da temperatura do laser, obrigando o posicionamento do circuito o mais perto do laser ou seja dentro do encapsulamento de fixação. Este circuito constitui um reaproveitamento do circuito de estabilização de tensão próprio do laser, recorrendo a dois *trimmers*: um de posição de potência fixa para ajuste da corrente mínima de trabalho e um para regulação da corrente a debitar desde a corrente de trabalho mínima à corrente de trabalho máxima.

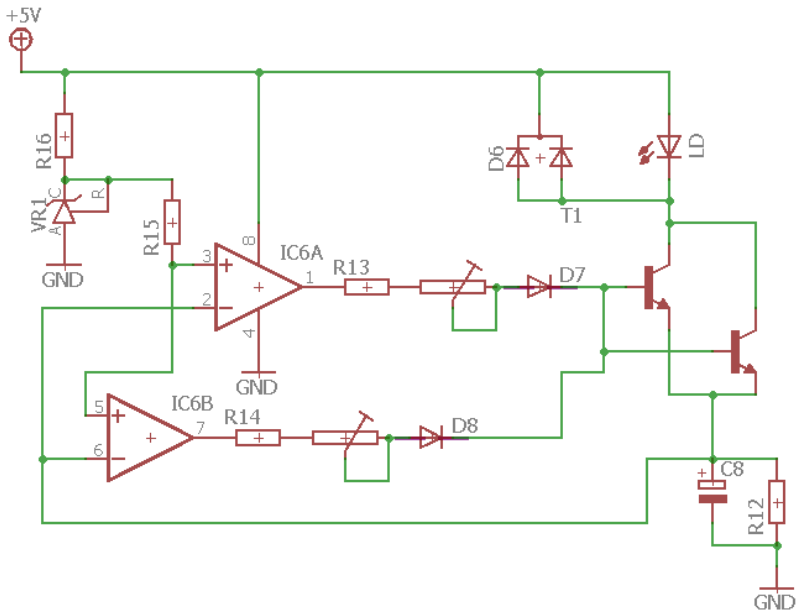


Figura 4.35: Circuito de regulação e estabilização de potência idealizado.

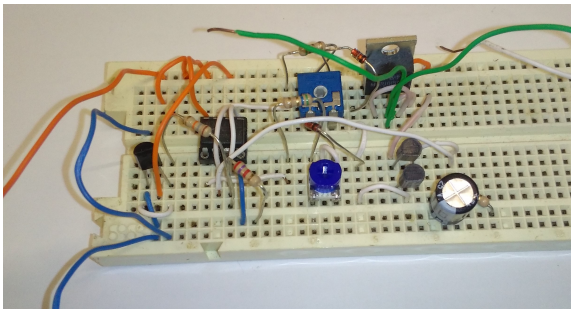


Figura 4.36: Montagem circuito de regulação e estabilização de potencia idealizado.

Apesar de montado (figura 4.36) este circuito não foi utilizado devido a problemas de tempo (calibrações) e dificuldade na impressão de uma placa com as dimensões necessárias para introdução no encapsulamento laser, obrigando à adoção de outro método. Um circuito de controlo mais simples e versátil por forma a que se conseguir os resultados necessários. O circuito utilizado encontra-se dividido em três secções: Circuito de regulação de corrente, limitador de corrente e estabilizador de alimentação (Figura 4.37). Este circuito ainda terá um fusível de atuação rápida de modo a prevenir eventuais danos originários da corrente de alimentação mantendo deste modo a integridade do laser.

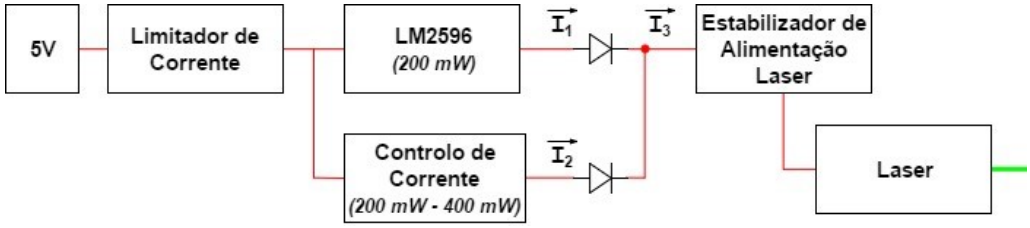


Figura 4.37: Esquema circuito de controlo de corrente e tensão do laser.

Circuito de regulação de corrente

O circuito construído é composto por duas secções. A primeira secção corresponde à corrente mínima de trabalho do laser, que será ajustada e fixada através de um *trimmer* existente no módulo $LM2596$ (DC-DC converter) que, aquando da utilização do laser, deverá permanecer previamente ajustado de forma definitiva e inacessível (Figuras 4.38 e 4.39). Este componente vem acompanhado por um duplo display, indicador de corrente e tensão, podendo ser útil para informações adicionais ao utilizador. A segunda secção, por sua vez, diz respeito à adição de corrente àquela que foi já fornecida pela primeira secção do circuito, permitindo assim uma regulação desde a corrente mínima de trabalho até á corrente máxima de trabalho estabelecida para o laser - neste caso concreto podendo então variar de 214,9 mA até 328,7 mA (Figura 4.40). Esta regulação de corrente é controlada recorrendo a um LM317 montado em modo de regulação de corrente e montado em paralelo com um transístor BD 140 e um potenciómetro a que o utilizador terá acesso através do painel de controlo de todo o sistema.

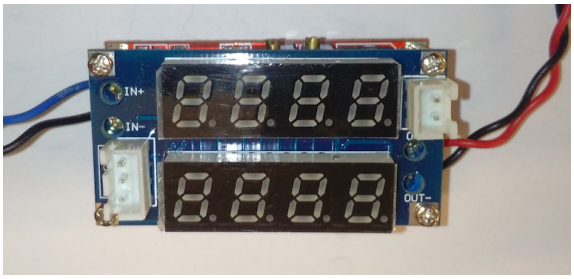


Figura 4.38: Módulo LM2596 utilizado.

A regulação de potência ótica é um dos principais requisitos implícitos do trabalho. No entanto, sendo o laser alimentado em corrente, uma estabilização da mesma será também necessária. Esta necessidade surge do aquecimento das resistências do sistema através do efeito de *Joule*. O aquecimento de uma resistência leva a uma alteração dos valores da mesma, resultando em modificações na passagem da corrente. Consequentemente, surgem

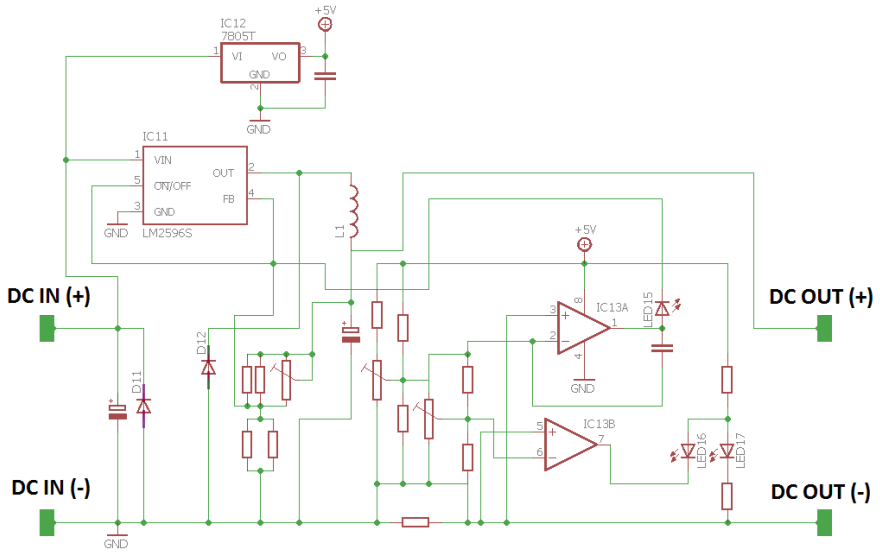


Figura 4.39: Circuito da placa do módulo LM2596.

alterações de potência de entrada no laser, que se refletem em variações de feixe. Por esse motivo, foram utilizados LM317 como controladores de corrente, conectados à base de transístores - BD 140 - de maneira a evitar que a corrente que alimenta o laser tenha de fluir através de resistências, eliminando consideravelmente o efeito de *Joule* no circuito.

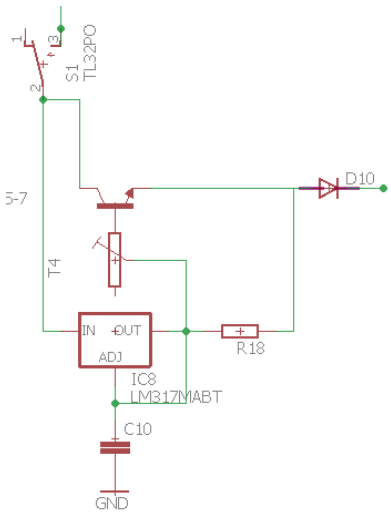


Figura 4.40: Circuito de regulação de corrente.

Limitador de corrente

À semelhança do circuito anteriormente falado, este dedica-se também à proteção do laser, focando-se neste caso, à limitação de corrente à entrada do laser. O princípio de funcionamento é o mesmo, mas a corrente será ajustada para um valor fixo, 328,7 mA correspondente à corrente máxima de trabalho do laser por forma a evitar passagem de corrente não desejada para o resto do circuito de alimentação do laser. Circuito igual ao representado na figura 4.40 utilizando, em vez de um *trimmer*, uma resistência fixa.

Circuito estabilizador de alimentação laser

O circuito que se segue, representado na figura 4.41, retrata o circuito utilizado na regulação de tensão. Este circuito tem como objetivo garantir que as flutuações de tensão provenientes da fonte não prejudicam a integridade do laser por realimentação de emissor. Como já mencionado, o circuito utilizado foi reaproveitado do laser adquirido, não só pelo tamanho mas também devido ao autoajuste de potência causado pelas variações de tensão resultantes pelas variações de temperatura que o laser sofre quando em funcionamento. Para além disso, o reaproveitamento do circuito já existente foi uma mais valia em termos de tempo de montagem e calibração do circuito.

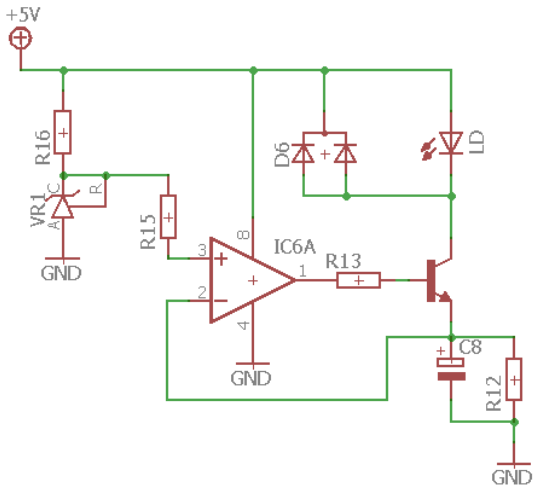


Figura 4.41: Circuito de estabilizador de alimentação laser.

4.3.2 Controlo Térmico

O circuito de controlo térmico irá ser dividido em duas secções. Uma referente ao controlo da placa de efeito Peltier e ventoinha, assegurado através de um controlador de temperatura digital, previamente apresentado, por uso de um sensor NTC sendo capaz de executar um controlo de temperatura com uma precisão de 0,1 ^{o}C e outra referente ao controlo de sobreaquecimento do laser através de um termopar a inserir no interior do encapsulamento, com o objetivo de cortar a energia fornecida ao laser quando este ultrapassar a temperatura de segurança vital do díodo estipulada, neste caso 32^{o}C.

O circuito de controlo da placa de efeito Peltier irá ser baseado num sistema de refrigeração ON/OFF. Sendo ON aquando do funcionamento dos elemento de refrigeração, peltier e ventoinha, presentes no módulo de refrigeração e OFF o processo complementar. Assim sendo o controlar de temperatura digital está programado para reagir de forma booleana a intervalos intervalo de temperatura de acima de 28 ^{o}C (ON) e a baixo de 28 ^{o}C (OFF) conseguido através da comutação de um relé para a temperatura pretendida (Figura 4.42). Este circuito ainda terá um fusível de atuação rápida de modo a prevenir picos de corrente mantendo assim a integridade da placa de efeito Peltier.

O circuito de sobreaquecimento atua através da comutação de um relé cortando a alimentação do laser. Este circuito será constituído por um termopar de junção J (Constantan e Ferro) controlado por um integrado AD595 que atua como amplificador e com-

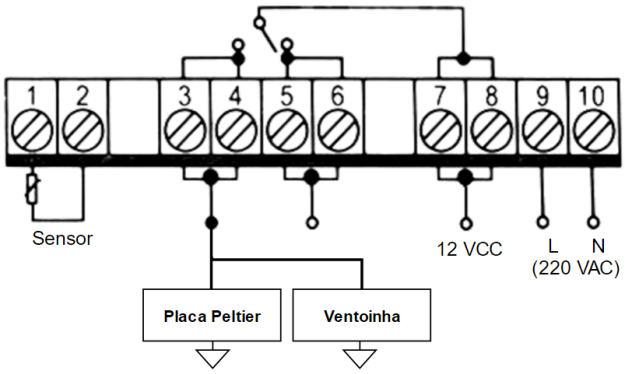


Figura 4.42: Circuito de controlo térmico, palca de efeito Peltier e ventoinhas.

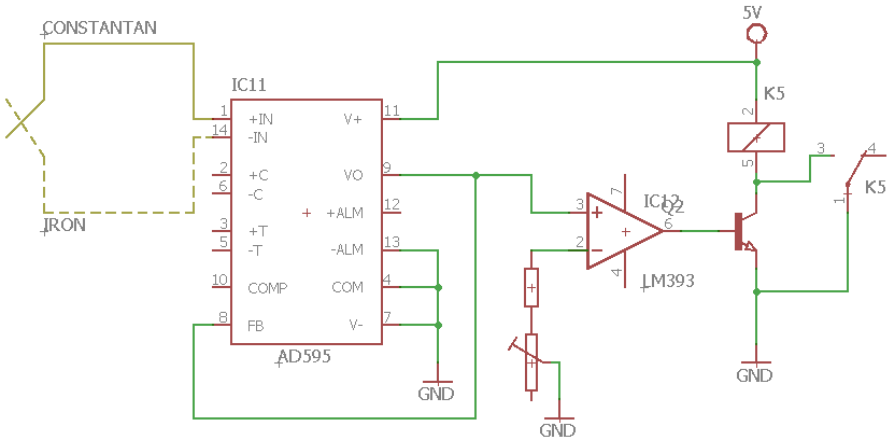


Figura 4.43: circuito de corte térmico.

pensador de junta fria criando uma tensão de saída proporcional a temperatura. À medida que a temperatura sobe a tensão de saída do AD595 é compara através de um comparador LM393 ajustado previamente recorrendo a um *trimmer* para a temperatura estipulada. Ao atingir a temperatura igual à ajustada o LM393 permite a passagem de corrente acionando o relé através de um transístor. Sendo o relé auto alimentado o laser só poderá ser ligado após um reset ao relé, ou seja, um reset geral do sistema interface homem máquina.

4.3.3 Temporizador de contagem decrescente

O circuito de Temporização de contagem decrescente é um circuito adicional que irá trabalhar de maneira a melhorar a qualidade com que o laser irá trabalhar (Figura 4.44). Dada a inércia térmica de todo o módulo laser, este sistema tem como objetivo, aquando da ativação do laser, de lançar uma contagem temporal numericamente decrescente (ainda a definir) que permita um pré aquecimento devido do laser, assim como a estabilização adequada da temperatura no bloco, de acordo com os testes térmicos a executar com o laser e com o módulo.

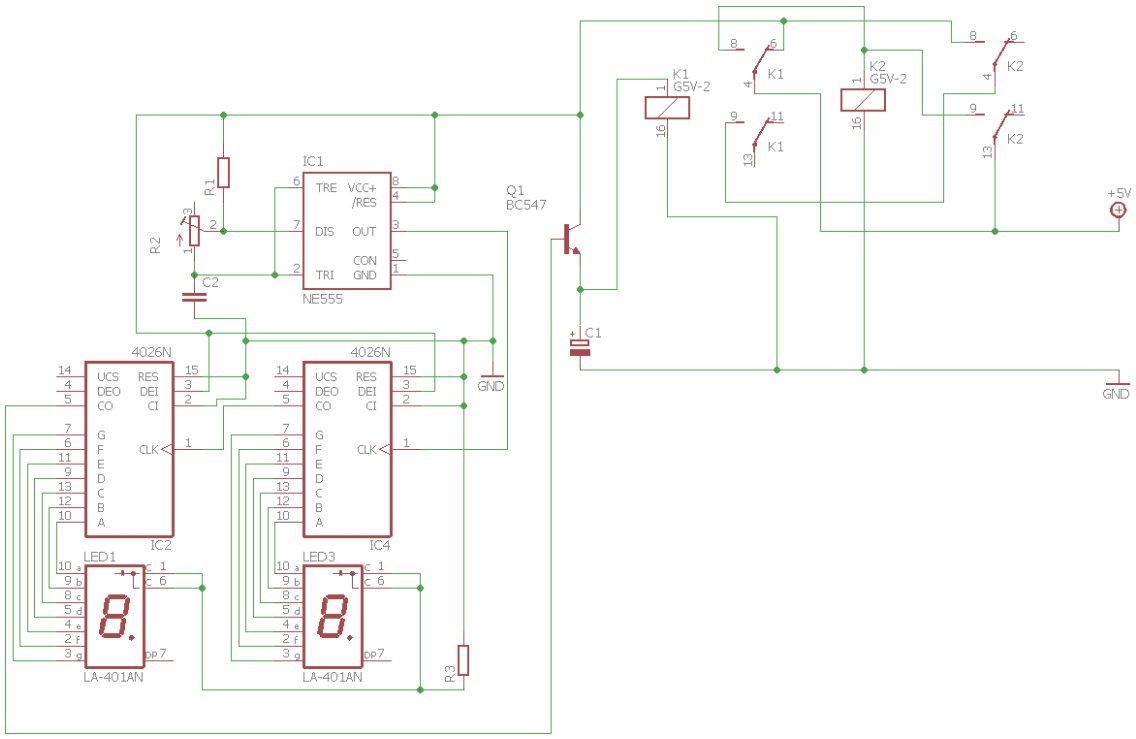


Figura 4.44: Circuito de temporização de contagem decrescente.

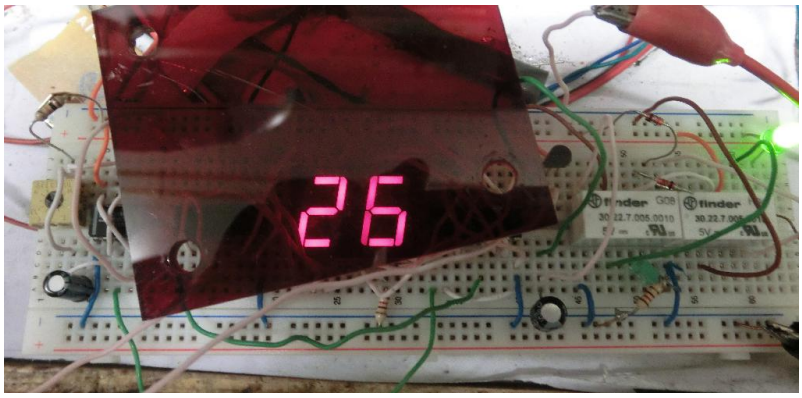


Figura 4.45: Circuito de temporização de contagem decrescente montado e testado.

O circuito Temporização de contagem decrescente será ativado aquando da ativação do interruptor de acionamento do laser e deverá manter o mesmo em modo potência de trabalho mínima até que o contador atinja o valor pretendido. Quando esse valor é atingido, a regulação de potência do laser é possibilitada, através da comutação de um relé. Este circuito funcionará através do controlo de dois displays de 7 de segmentos, controlados por um CD4026, que irá jogar com aberturas de dois relés, de forma a que se consiga obter o efeito desejado. O circuito foi montado e testado (Figura 4.45).

4.3.4 Fotosensor

O fotosensor será colocado dentro da caixa de comando, juntamente com a restante eletrónica. Este será iluminada recorrendo a um acoplamento ótico por fibra ótica que vai desde o painel de controlo até à caixa caixa captando a saída do feixe laser por forma a que apanhe alguma difração do feixe sem o obstruir. Apesar de não ter sido possível a sua montagem, o circuito pensado é o representado na figura 4.46.

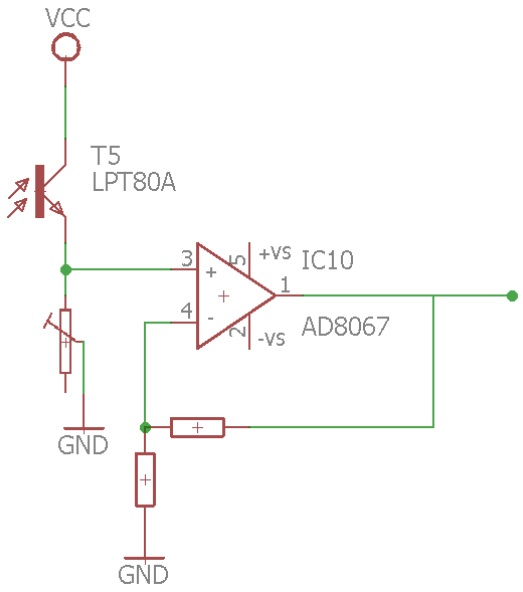


Figura 4.46: Circuito fotosensor.

Este circuito é constituído por um fototransistor (recetor luminoso), um amplificador operacional (que possibilita amplificar o sinal a ponto de ser lido pelo vuímetro), um potenciómetro (de modo a possa ser possível o ajuste de acordo com a escala de potência necessária) e ainda duas resistências (garantindo o ajuste do ganho necessário no amplificador).

4.3.5 Shutter e Mode Lock

Sendo que o *Shutter* consiste num atuador eletromecânico cujo circuito deste será somente um atuador manual bi-estável normalmente em oclusão de feixe. O mesmo se passa com o *Mode Lock* no entanto este é constitui apenas por um contacto com uma alavanca mecânica em série com um *Reed switch* magnético, feito aquando o posicionamento correto da caixa.

4.3.6 Circuito de realimentação elétrica e ótica

A realimentação elétrica e ótica será garantido por um circuito de vuímetro duplo. Este circuito, apresentado na figura 4.47, será idêntico para ambos mas será acionado por circuitos diferentes e totalmente independentes. A realimentação elétrica é acionada a partir da tensão de entrada no laser através do circuito de regulação e estabilização. Por sua vez, a realimentação ótica é acionada pelo circuito do fotosensor acoplado a fibra ótica.

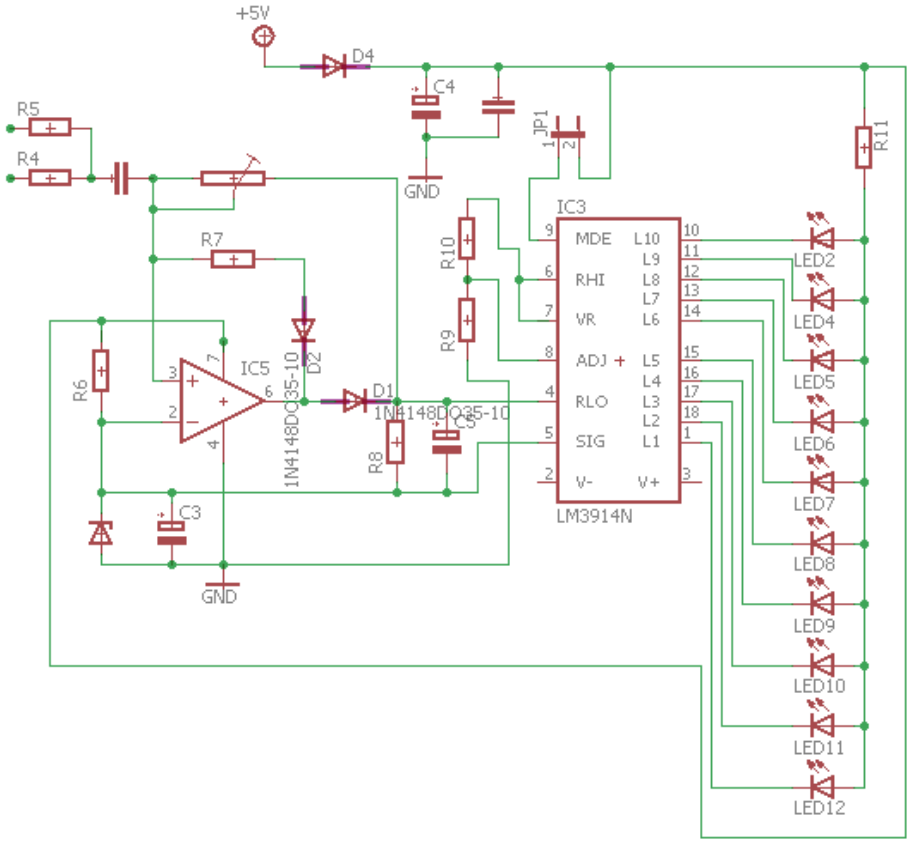


Figura 4.47: Circuito vuímetro.

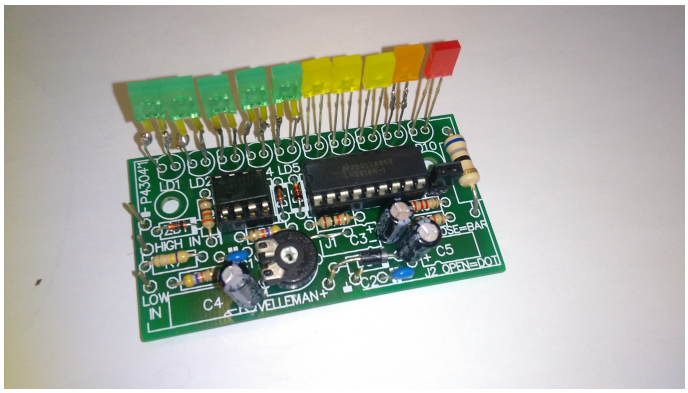


Figura 4.48: Circuito vuímetro montado.

4.3.7 Alimentação do sistema

Como não foi possível concluir toda a parte eletrónica, não foi efetuado um levantamento elétrico de modo definir ao certo as potencias necessárias. Deste modo a solução mais viável acabava por ser a utilização de uma fonte de alimentação de computador fixo, visto que se trata de uma fonte versátil no que diz respeito a tensões de saída, 5 e 12 volts. Para além disso, é ainda capaz de debitar uma corrente considerável. Apesar de não ser compacta como o desejado, é um componente de fácil substituição, o que é uma grande vantagem. A fonte representada na figura 4.49 representa um fonte obtida provisoriamente para testes da marca ATX (LPE2) capaz de debitar 400 Watts e uma corrente máxima

de 17 Ampere a 12 Volt.

Figura 4.49: Fonte de alimentação provisória.

4.3.8 Corte de energia e alimentação do sistema

O circuito de corte de energia, figura 4.50, tem como objetivo interromper o funcionamento de todos os componentes em funcionamento através da atuação de um botão de emergência (S2), ativação de um réle pelo termopar (S1) ou pela mal colocação da caixa (*Reed Switch*). O acionamento deste circuito impossibilita o funcionamento de todo sistema laser a menos que a alimentação de $220V$ seja reiniciada.

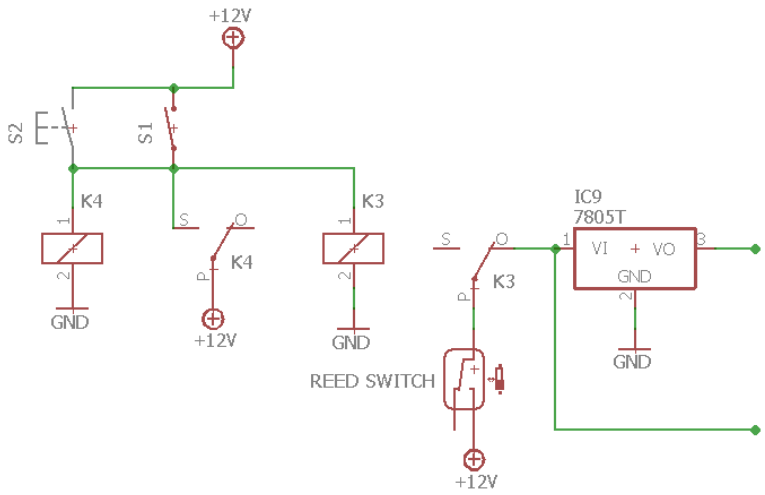


Figura 4.50: Circuito de corte de energia.

O funcionamento do circuito baseia-se numa comutação simples entre dois relés através da utilização de uma botoneira normalmente aberta. A utilização deste circuito só deverá acontecer em situações de emergência iminente ou anormal funcionamento do sistema. Na figura 4.51 a montagem onde o circuito foi testado.

Sendo que em principio será utilizada uma fonte de alimentação de computador a alimentação será conseguida unicamente a partir dos 12 Volt da fonte sendo conseguidos os 5 Volt necessários através de um LM7805, como representado no circuito da figura 4.50.

Deste modo é possível cortar as alimentações de 5 e 12 Volt utilizando o mesmo circuito.

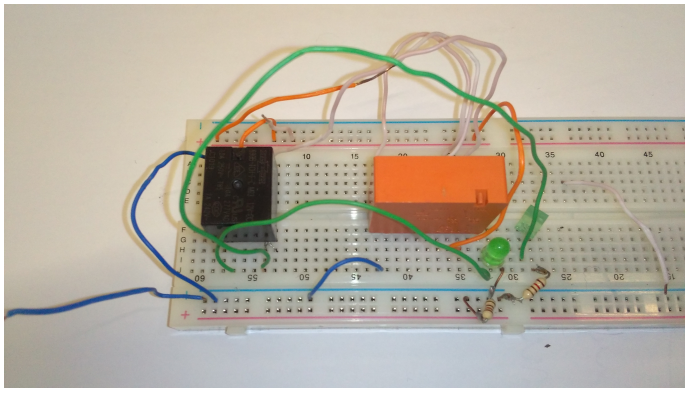


Figura 4.51: Circuito simplificado de corte de energia montado e testado.

4.4 Painel de Controlo

O desenvolvimento do painel de controlo foi pensado de forma a ser o mais compacto e intuitivo possível, sendo o componente responsável por todo o controlo do sistema laser e pela monitorização do mesmo. O painel foi exclusivamente desenvolvido em Solidworks.

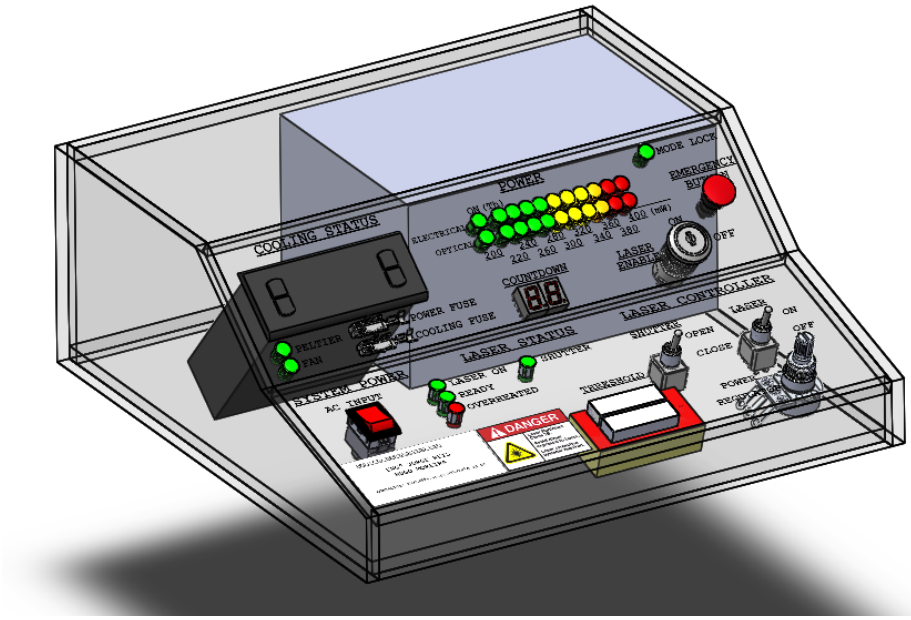


Figura 4.52: Estrutura do painel de controlo projetada em Solidworks.

A estrutura do painel teve em consideração todos os componentes mecânicos referidos na eletrónica, com particular relevância dada à fonte de alimentação, que apesar de não escolhida, uma vez que esta será sem dúvida o componente mais volumoso da caixa, condicionando fortemente uma estrutura mais leve. Para efeitos de projeto utilizada a fonte representada na figura 4.49 que, dado a sua estrutura genérica, em caso de troca levará a pequenas alterações na estrutura projetada. O ajuste estrutural da caixa foi

efetuado de maneira a que todos os parâmetros e exigências fossem respeitados, mantendo ao mesmo tempo uma aparência profissional e ergonómica para o utilizador. O resultado final em SolidWorks está apresentado na figura 4.52.

A eletrónica utilizada no painel de controlo é a desenvolvida e descrita no capítulo anterior, com a adição de LEDs e alguns parâmetros de segurança, que irão ser enumerados de seguida.

4.4.1 Interface

Como já mencionado, a interface do painel de controlo deve ser de simples interpretação e manuseamento, de forma a permitir que qualquer pessoa a consiga controlar de forma intuitiva. A interface projetada está representada na figura 4.53.

A interface está dividida em quatro secções principais.

REFRIGERAÇÃO

- **Um controlador de temperatura digital**, responsável pela indicação, programação de temperaturas consoante o necessário e controlo dos elementos de refrigeração (Placa de efeito Peltier e ventoinha);
- **Dois LEDs** indicadores do estado de funcionamento da placa de efeito Peltier e ventoinhas;
- **Um fusível** de modo a garantir a integridade dos elemento de refrigeração;

LASER

- **Quatro LEDs** indicadores do estado do laser e *shutter*;
- **Vuímetro indicador de potência** constituído por 22 LEDs (11 de indicação de potência elétrica e 11 para a potência ótica) com um incremento de 20 mW. A primeira coluna LED diz respeito à potência de trabalho mínima;
- **Um potenciómetro** regulador de potência desde potência de trabalho mínima (200 mW) e máxima (400 mW);
- **Dois interruptores** responsáveis pela abertura do *shutter* e circuito de potência do *laser*;
- **Um módulo LM2596** responsável pela alimentação da corrente de trabalho mínima com duplo display de 7 segmentos. Este componente encontra-se na zona frontal da caixa de modo a facilitar a sua regulação quando necessário;
- **Dois displays LED** de sete segmentos indicadores do *countdown* de aquecimento do laser;
- **Um fusível** de modo a garantir a integridade dos componentes contidos no circuito de potência do laser.

SEGURANÇA E MANUTENÇÃO

- **Um interruptor por chave** para permitir a desbloqueamento do circuito de potência do laser, limitando a sua utilização a pessoal autorizado a tal;
- **Um botão de emergência**, caso algo de anormal/acidente seja imediatamente pressionado;

– **Um LED** indicador referente ao *Mode Lock* (posicionamento da caixa);
– **Um autocolante** informativo acercar da classe e perigos associados ao laser;
– **Uma chapa metálica** contendo o nome e contactos dos responsáveis pelo desenvolvimento do sistema.

ALIMENTAÇÃO DO SISTEMA

– **Um interruptor** ON/OFF responsável pela alimentação da fonte de alimentação.

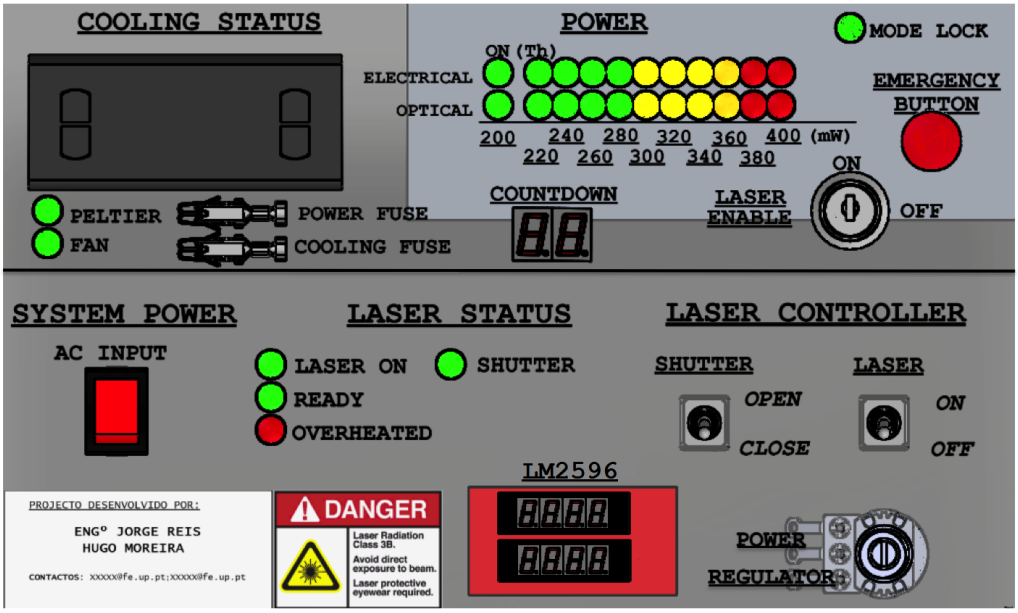


Figura 4.53: Interface do painel de controlo idealizada.

Instruções Painel de controlo

Esta subsecção é direcionada aos responsáveis e aos operados do sistema laser em questão e tem como objetivos principais a prevenção de eventuais danos ao equipamento e a garantia de segurança do operador.

Segurança

Sendo um laser de classe III-b, a segurança é crucial aquando da sua utilização, uma vez que distrações ou falhas cometidas podem levar a danos irreversíveis e irreparáveis tanto de equipamento como de pessoas [35]. Por esse motivo, algumas medidas de segurança devem ser tidas em consideração e estritamente cumpridas:

- Óculos de proteção, que cortam os comprimentos de onda emitidos pelo laser e que deverão estar disponíveis perto do equipamento;
- Autocolante informativo "Laser Classe III-b";
- *Mode Lock*, já explicado anteriormente, com o objetivo de prevenir o funcionamento do sistema sem a correta colocação da caixa;

- Contactos - nome e contacto telefónico - dos responsáveis pelo desenvolvimento do sistema, caso algum problema anormal seja detetado e haja necessidade de o reportar.

A segurança do laser é também maioritariamente assegurada e monitorizada pelo painel de controlo, através do qual é possível controlar:

- o sobreaquecimento, de forma a que o utilizador seja avisado sobre o aquecimento excessivo do laser e possa garantir a paragem imediata do mesmo. O sobreaquecimento é anunciado pelo LED "Overheated";
- um vuímetro de potência ótica, cuja função é garantir que a potência ótica emitida pelo feixe corresponde à potência elétrica que alimenta o laser. Esta particularidade permite que, em caso de deteção de incoerências entre estes dois valores, seja possível prevenir ou detetar avarias no laser;

Utilização

Por forma a que o laser funcione de acordo com o expectável o sistema de ser ligado da seguinte forma:

1. Ligar o interruptor "*AC Input*"($220V$);
2. Verificar se o controlador de temperatura digtal (*"Cooling Status"*) se encontra operacional;
3. Ligar o laser através do interruptor "*Laser*"e verificar se o LED "*Laser ON*"é acionado;
4. Esperar que a temperatura do laser esteja de acordo com a temperatura de funcionamento, sinalizada pelo LED "Ready";
5. Neste ponto, é já possível ajustar a potência do laser através do potenciómetro multivolta "*Power Regulator*". A regulação deverá ser executada e controlada através do vuímetro já referido. Após regulação é aconselhável que se espere até que a temperatura do laser estabilize numa temperatura adequada ao funcionamento, de modo a que seja possível obter o feixe desejável;
6. Estando a potência e a temperatura do laser ajustadas, o laser encontra-se operacional;
7. Ligar o *Shutter*, interruptor "*Shutter*", para permitir a saída do feixe. O processo inverso irá bloquear a saída do feixe, voltando ao estado de *standby*;
8. Caso seja necessário um ajuste da potência é aconselhável o fecho do *Shutter* e proceder a um ajuste da potência do laser através consultando o vuímetros na interface do painel.

Após utilização, o processo de finalização de trabalhos deverá seguir a seguinte ordem:

1. Desligar o *Shutter*;

2. Regular a potência do laser para a potência de trabalho mínima;
3. Desligar o laser, colocando o interruptor "Laser"em OFF;
4. Desligar AC power.

Possíveis problemas

Aquando da ocorrência de qualquer uma das situações abaixo enunciadas, o sistema deve ser completamente desligado, pressionando o botão de emergência "*Emergency Button*"ou desligando o *switch* de alimentação de $220V$ diretamente. Seguidamente, um dos responsáveis pelo desenvolvimento do equipamento deverá ser contactado.

- Vuímetro de potência elétrica não coincide com o vuímetro de potência ótica do feixe na secção "*Power*".
- LED de sobreaquecimento "Overheated"acende e o laser continua em funcionamento.
- O laser encontra-se em funcionamento mas a refrigeração encontra-se desligada.
- Temperatura no display do controlador digital não corresponde à estipulada.

Capítulo 5

Testes e Resultados Experimentais

Este capítulo será dedicado aos testes executados ao sistema laser, como prova de conceito do projeto. Nesse sentido, dois tipos de testes distintos foram executados. O primeiro teve como objetivo testar a variação da temperatura do laser através do módulo laser, estando o laser à potência máxima, de forma a se verificar qual o controlo possível da temperatura nessas condições. O segundo teste centrou-se na prova de conceito, tendo sido colocado o laser no sistema LDV. Este procedimento foi realizado na presença de um especialista na área, o Dr. Mário Guindeira, responsável pelo Laboratório de Fluídos do Departamento de Engenharia Mecânica, com o objetivo de se verificar se o mesmo tinha o comportamento necessário e desejado para a aplicação pretendida.

Uma vez que este projeto implicou primeiramente o desenvolvimento de uma componente estrutural, o presente capítulo encontra-se limitado por falta de tempo. Assim sendo, foram apenas executados e descritos, os testes necessários para comprovar a funcionalidade do sistema, de acordo com o que foi inicialmente planeado. Posteriormente, serão executados mais testes, no sentido de complementar os dados já adquiridos e de forma a que o projeto seja concluído.

5.1 Testes térmicos com laser

A execução de testes no sistema laser é de elevada importância, não só pela necessidade de conhecimento da influência da temperatura no comportamento do laser, como também para definir parâmetros elétricos (já referidos anteriormente) que permitam calibrar o sistema de forma correta, levando a que o seu desempenho seja o melhor possível. No entanto, os testes que se encontram descritos de seguida tiveram como único propósito a verificação da possibilidade de variação de temperatura entre os valores de funcionamento do laser, menor ou igual a $28^{o}C$, estando este à potência máxima. Tais testes tiveram como objetivo principal provar que a temperatura pode ser controlada através do módulo desenvolvido.

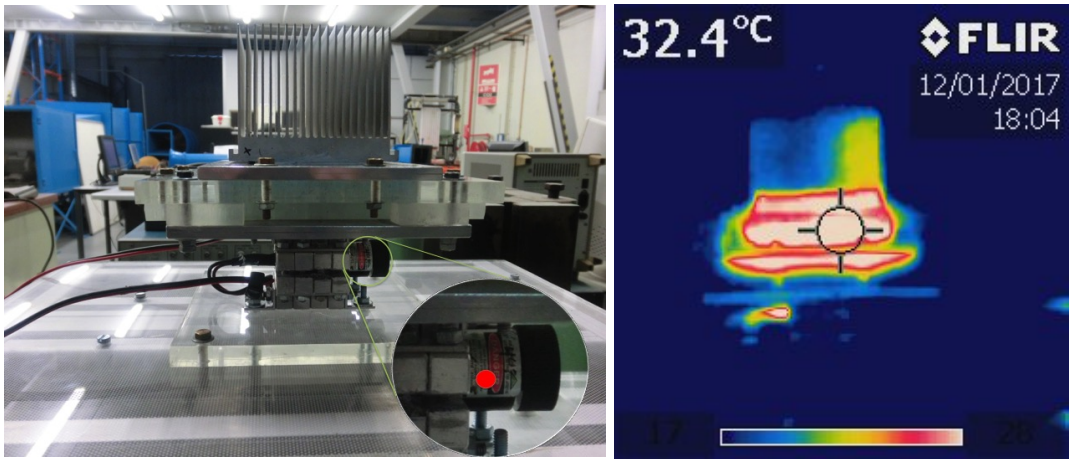
5.1.1 Ensaios e análise de resultados

Os ensaios foram executados nas seguintes condições:

- Foram utilizadas fontes de alimentação de laboratório (Figura 5.1), dado que o circuito de controlo se encontrava incompleto e, portanto, impróprio para utilização;
- Sem ventoinha acoplada no dissipador;
- A uma temperatura ambiente entre 14 e 16 ºC (Inverno);
- Utilização de câmara térmica - a referida anteriormente - dado que o controlador de temperatura digital adquirido se encontrava com problemas de display, condicionando a leitura da temperatura;
- A placa de efeito Peltier não foi utilizada à potência máxima, de modo a que fosse permitida uma maior perceção das variações térmicas, dado que se estava a medir a temperatura através de uma câmara térmica. A placa foi alimentada a 5 Volt e 2.35 Ampere, valores que se encontram longe da potência máxima a utilizar (12 Volt e 9 Ampere).

Figura 5.1: Fontes de alimentação utilizadas no ensaio.

O procedimento baseou-se unicamente num controlo ON/OFF da placa de efeito Peltier. As leituras de temperatura foram executadas sensivelmente na mesma área, assinalada a vermelho na figura 5.2a, de modo a ser possível uma comparação válida entre as variações de temperatura. O local indicado foi escolhido dado a impossibilidade de focar a câmara no interior do bloco e sendo a zona que indicaria o resultado mais próximo do valor que se procurava.

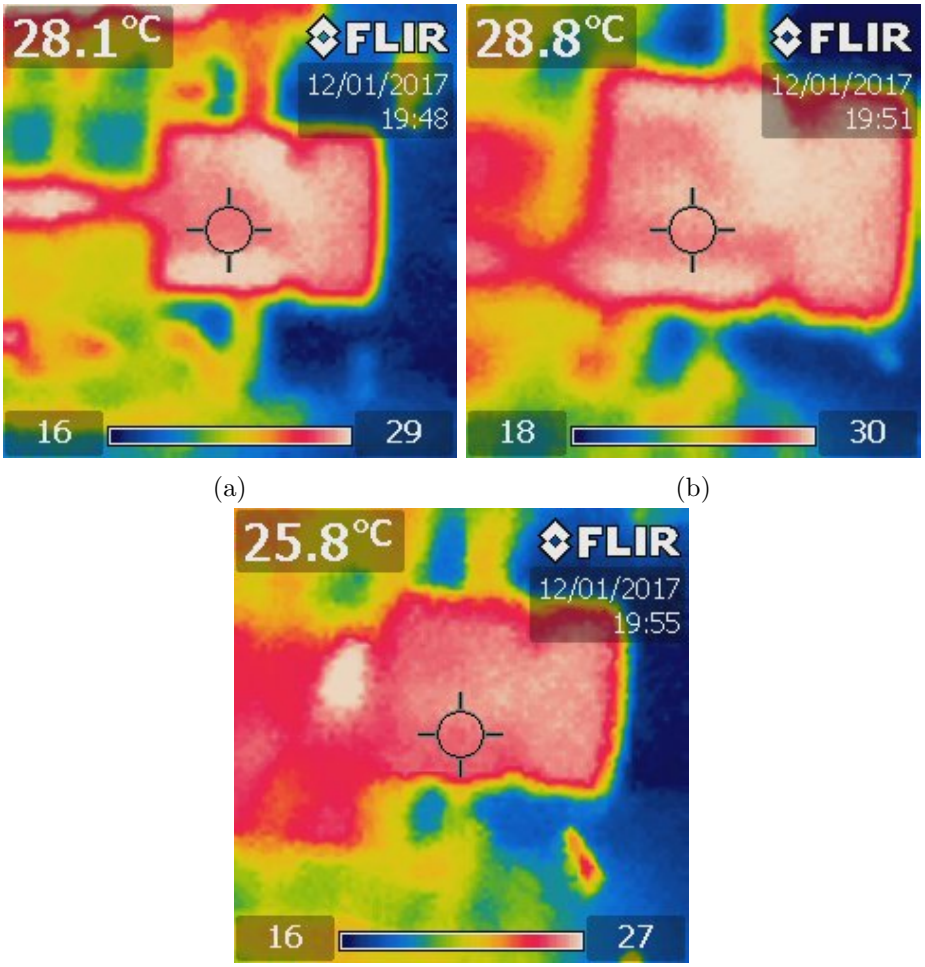


(a) (b)

Figura 5.2: a) Módulo laser durante o ensaio; b) Representação térmica térmico no módulo após a alimentação da placa de efeito Peltier.

A figura 5.2b foi adquirida após a placa de efeito Peltier ser ligada, o que mais uma vez comprova que o fluxo de calor fluí de acordo com o planeado. Neste caso em particular, o laser estava em *threshold*.

Posto isto, ajustou-se o laser à potência máxima e desligou-se a placa de efeito Peltier, atingindo-se uma temperatura de 28.1°C (Figura 5.3a) na zona marcada na figura 5.2a. Mantendo a placa de efeito Peltier desligada, em 3 minutos foi registada no mesmo local uma temperatura de 28.8°C (Figura 5.3b) com tendência de aumento. Neste ponto, a placa de efeito Peltier foi ligada e, em 4 minutos, atingiu-se uma temperatura de 25.8°C (Figura 5.3c), já suficiente para provar que é possível arrefecer o laser utilizado este método.



(a) (b)

(c)

Figura 5.3: a) Medições de temperatura do laser a 28 °C (temperatura de funcionamento); b) Medição de temperatura do laser 3 minutos após se ter atingido os 28 °C, mantendo a placa de efeito Peltier desligada; c) Medição de temperatura do laser 5 minutos após se registar uma temperatura de 28,8 °C e se ter ativado a placa de efeito Peltier.

Os resultados apresentados nas imagens 5.2b e 5.3 mostram que o sistema está a funcionar de acordo com o projetado, sendo possível controlar a temperatura de acordo com o pretendido. Os valores temporais enunciados na secção anterior são referentes a um já mencionado funcionamento limitado da placa de efeito Peltier, sendo que estes deverão corresponder a intervalos de tempo mais curtos aquando de um aumento de potência da mesma e utilização de uma ventoinha acoplada ao dissipador.

5.2 Teste laser no Sistema LDV

Este teste teve como único propósito a prova de conceito, isto é, a substituição de um laser a gás por um de estado sólido funcionando com o equipamento original (equipamento projetado para um laser a gás).

A execução deste teste foi um processo um pouco difícil, uma vez que todo o equipamento disponível já não estava em uso há quase uma década, o que significava que não era de todo claro se o sistema iria funcionar de acordo com o previsto. Para além disso, essas limitações do equipamento, tornaram necessária a presença de uma pessoa com considerável experiência na área, de forma a que o sistema fosse devidamente calibrado. Como o tempo disponível para a execução destes testes era limitado, estes foram executados sem controlo de temperatura e sendo a fonte de alimentação uma pilha de 4.2 Volt e 3.8 Ampere.

5.2.1 Procedimento

1. **Calibração da estrutura laser**

   A calibração foi executada através do mecanismo já explicado anteriormente, ajustado através de três porcas e utilizando como referência um nónio para garantir o alinhamento do feixe à medida que este percorre o interior do divisor de feixe (Figuras 5.4a e 5.4b).

2. **Calibração do divisor de feixe e modelador de feixe**

   O divisor de feixe foi calibrado de acordo com o alinhamento obtido através do feixe já estabelecido, utilizado um sistema de ajuste de posição presente no mesmo, através de parafusos. A boa calibração do feixe foi determinada pela saída de dois feixes de direção e sentido cruzado na secção a efetuar a medição (Figura 5.4c).

3. **Colocação de um fluido no sistema**

   Como se tratava apenas de um teste para a comprovação do funcionamento do sistema, foi utilizada água como o fluído a analisar(Figura 5.4e).

4. **Ajuste da interceção dos feixes**

   Conforme já explicado anteriormente, para a leitura do fotosensor funcionar, é necessária a interceção dos feixes produzidos. De modo a posicionar o feixe, recorreu-se a um sistema de ajuste de posicionamento onde assentou todo o sistema (Figura 5.4d.

5. **Verificação de funcionamento dos componentes de análise**

   Sendo um sistema antigo e, como já referido, com muito pouca atividade, o funcionamento apropriado de todos os componentes de tratamento e análise de imagem era uma incógnita. No entanto, foi possível ligar todos os componentes (Figura 5.4f).

6. **Ajuste fotosensor**

   Com todo o sistema a funcionar, o último ajuste a ser feito foi o do fotosensor, essencial para a captação de informação. Para tal, foi necessário que este estivesse alinhado com a interceção dos feixes, de modo a garantir os resultados pretendidos. O ajuste foi feito através de uma cavidade ocular presente no fotosensor (Figuras 5.4g e 5.4h).

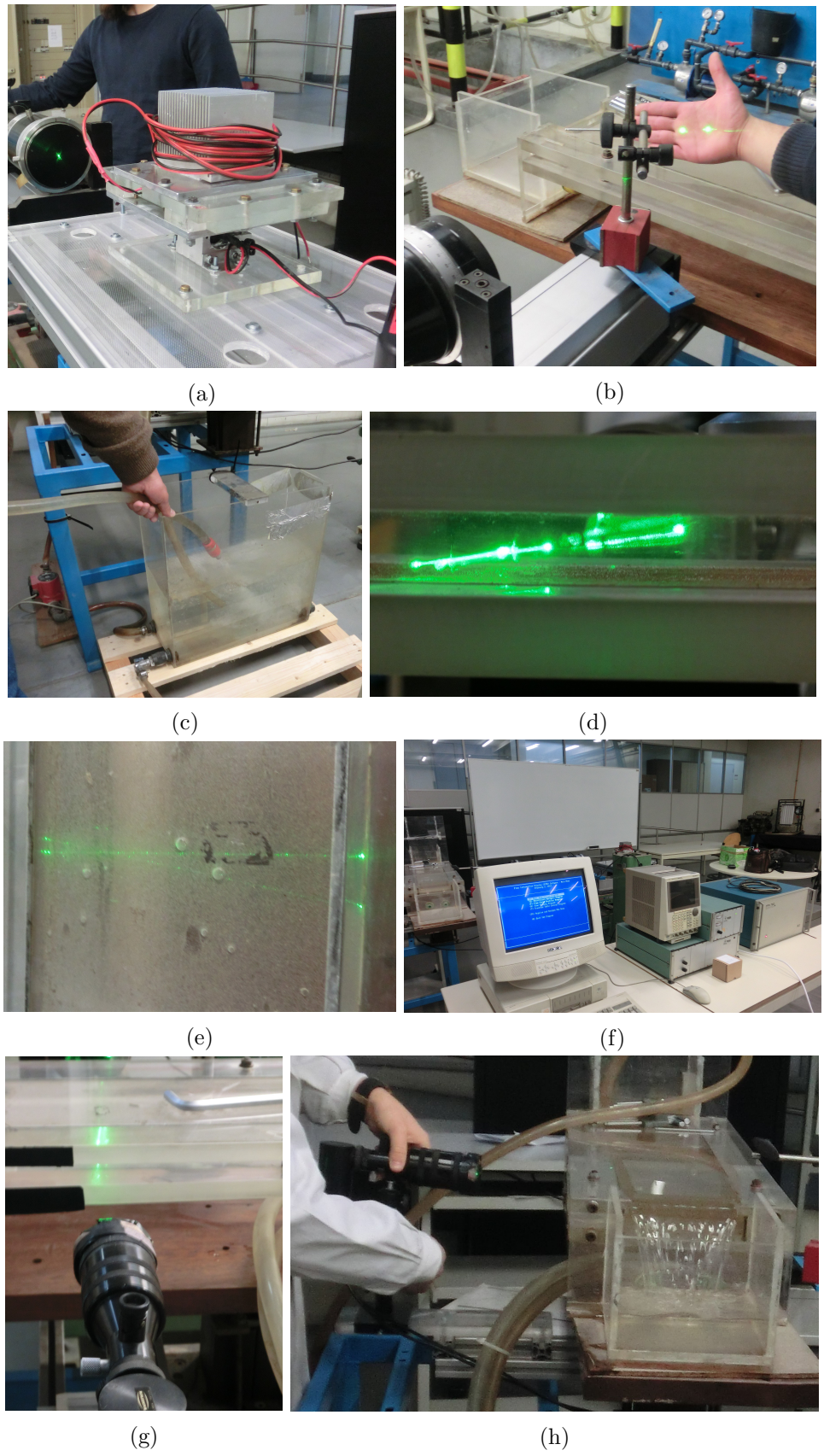


Figura 5.4: a) Calibração do Laser; b) Calibração do divisor de de feixe; c) Introdução de água no sistema; d) Posicionamento do feixe através do fluxo de água; e) Posicionamento da interceção do feixe; f) Verificação de funcionamento dos equipamentos de análise e *software* a utilizar; g) Alinhamento do fotosensor com a interceção dos feixes; h) Ajuste de posicionamento do fotosensor.

Equipamento LDV utilzado:

- Software - Flow information display (FIND);
- Digital burst correlator - IFA-750;
- Divisor de feixe e modelador de feixe:
  - DANTEC freq. shifter code: 9055N0112 847;
  - DANTEC code: 9055N0214 1226;
- Fotosensor - DANTEC code: 9055x4721.

5.2.2 Ensaios e análise de resultados

As figuras 5.5 e 5.7a que se seguem ilustram o padrão ótico de ajuste na cavidade ocular do fotosensor para cada um dos ensaios. O centro do padrão, secção mais esbelta das figuras, representa a interceção dos dois feixes.

Os gráficos apresentados nas figuras 5.6a e 5.7a dizem respeito aos gráficos obtidos nos ensaios. O referencial X indica a percentagem de turbulência das partículas e o referencial Y representa a velocidade da partícula detetada. O gráfico ainda apresenta um valor de "*DATA RATE*" referente ao número de partículas detetadas por segundo. A evolução do gráfico ocorre à medida que as partículas são detetadas no fluído. Cada partícula detetada equivale a um ponto no gráfico com uma determinada percentagem de turbulência e velocidade.

Tendo o sistema ligado e a funcionar, a primeira calibração do fotosensor (Figura 5.5) originou de forma imediata o gráfico da figura 5.6a e, numa questão de segundos, o gráfico representado na figura 5.6b.

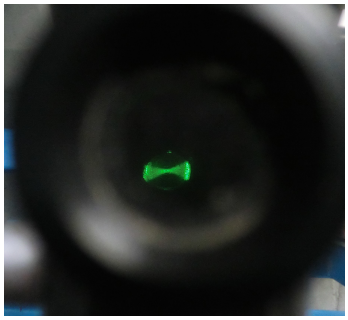
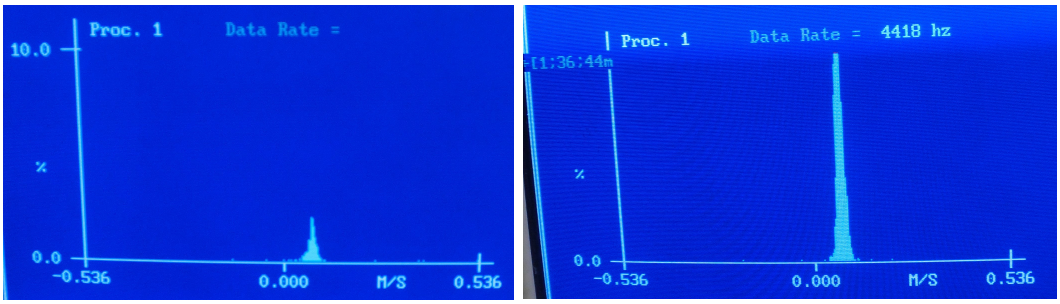


Figura 5.5: Ajuste do fotosensor para o primeiro ensaio.

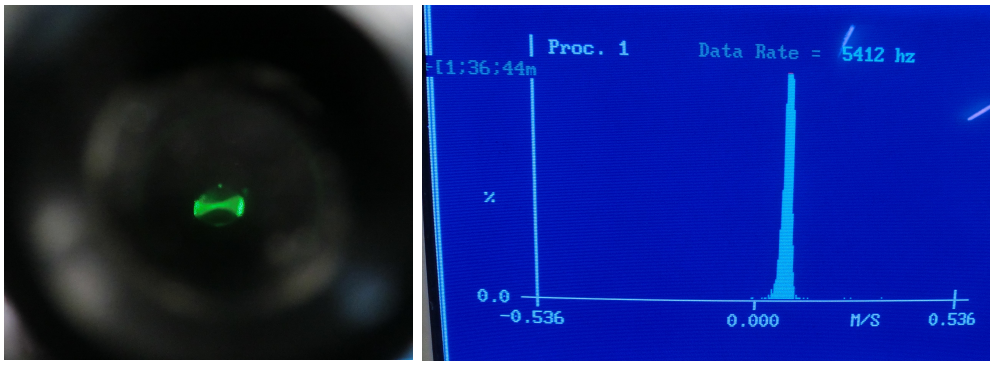


(a) (b)

Figura 5.6: a) Gráfico obtido no inicio do primeiro ensaio; b) Gráfico obtido após a conclusão do primeiro ensaio.

Observado os gráficos, é visível que ocorreu deteção e análise de partículas, tendo sido esta medição validada pelo Dr. Mário Guindeira, que considerou os resultados obtidos como uma validação do conceito deste projeto.

De modo a consolidar e fortalecer os resultados obtidos com este primeiro ensaio, foi realizado um segundo, com um novo ajuste do fotosensor (Figura 5.7a), sendo o resultado final semelhante ao obtido no primeiro ensaio, sendo este também considerado válido (Figura 5.7).



(a) (b)

Figura 5.7: a) Ajuste do fotosensor para o segundo ensaio; b) Gráfico obtido após a conclusão do segundo ensaio.

Apesar da validação dos ensaios feitos, não foi possível, devido a limitações de tempo, a execução de testes com controlo de temperatura, não sendo possível tirar conclusões relativamente às influências de oscilações térmicas nos resultados obtidos. Para além disso, não foi também possível realizar medições com o laser Árgon substituído, uma vez que se encontra danificado assim como a sua fonte de alimentação, não sendo possível fazer uma comparação com as medições obtidas para o sistema testado.

Os resultados obtidos foram conseguidos através de duas tentativas, separadas por aproximadamente 3 minutos. A potência de feixe dos dois ensaios foi de 414 mW (medido por um equipamento devidamente calibrado da Coherent), valor diferente dos 441 mW de potência máxima e superior aos 400 mW de potência máxima a que irá trabalhar, sendo estas diferenças justificadas pela diferença de alimentação utilizada, conforme já referido anteriormente.

Página intencionalmente deixada em branco

Capítulo 6

Conclusões e Trabalhos Futuros

Este trabalho iniciou-se com a ambição de desenvolver um sistema de laser em estado sólido completo, para aplicação em processos de velocimetria de partículas. No entanto, devido ao volume de trabalho que um projeto destes acarreta, somado a imprevistos, escassez de material, demora na obtenção e conceção de alguns componentes necessários para o sistema e ainda limitações temporais, foi de todo impossível a conclusão dos trabalhos propostos inicialmente. Contudo, foi realizado um projeto integral de todo o sistema a desenvolver e um conjunto de trabalhos práticos centrados na conceção e montagem dos componentes essenciais para a realização dos testes necessários para a validação dos conceitos em que este projeto assenta. Este projeto inicializou-se com a escolha do laser a utilizar, seguindo-se um desenvolvimento estrutural, projeto da eletrónica de controlo e de um painel de controlo (interface utilizador-máquina), culminando na realização de testes finais de validação prática num sistema LDV.

Apesar de ser uma decisão crucial para o projeto, a escolha de um laser DPSS foi a única solução viável, quer em termos económicos quer no que diz respeito à facilidade de aquisição. Dadas as circunstâncias, não falando em termos de custo material do equipamento, o laser utilizado tem como vantagens importantes os seus reduzidos custos de manutenção e o facto de ter um consideravelmente maior tempo de vida útil face ao laser Árgon substituído. No entanto, apresenta desvantagens no que diz respeito à sua sensibilidade. Dado o seu reduzido tamanho e a sua reduzida tolerância a instabilidades elétricas e térmicas, danos irreversíveis podem ser provocados, levando à necessária substituição do laser em questão.

O desenvolvimento da estrutura foi dividido em três componentes: o módulo laser, a base e a caixa. O módulo laser desenvolvido apresenta um conceito inovador no que toca à refrigeração do laser, conceito que explorado apresenta potencial para utilização noutros tipos de aplicações. Este módulo apresenta também versatilidade suficiente para permitir uma troca de laser, em caso de avaria ou caso se pretenda utilizar outro tipo de laser que apresente um encapsulamento semelhante. O módulo em questão também se mostrou funcional através dos testes executados, comprovando a possibilidade de controlo de temperatura a partir do mesmo.

A base para o sistema foi totalmente desenvolvida, comprovando-se uma boa adaptação para o suporte do sistema LDV, apresentado não só rigidez estrutural como um sistema de calibração em três pontos, à altura das exigências necessárias ao sistema. Para além disso, a base serve também como suporte à caixa desenvolvida. Esta, por sua vez, tem como principal objetivo assegurar a segurança necessária a todas as pessoas presentes aquando

do funcionamento do sistema e ainda permitir visualização de todo o equipamento em funcionamento. Apesar de não totalmente completa, a caixa já se encontra construída e deverá ser concluída futuramente.

A eletrónica de controlo foi uma secção que, apesar do destaque ao longo do desenvolvimento do trabalho, acabou por ficar bastante incompleta, porque apesar de idealizada e projetada, não foi possível a total montagem e o teste da maior parte dos circuitos, devido à obrigatoriedade, imposta pelo tempo, de estabelecer prioridades. No entanto, como foi referido e detalhado ao longo do trabalho, esta secção foi projetada integralmente e todos os circuitos idealizados só deverão ser alterados em caso de imprevisto ou caso se revelem inadequados para o fim para o qual serão utilizados.

O painel de controlo foi projetado de acordo com as regras de segurança e com todos os componentes necessários ao total controlo do sistema laser por parte do operador. Como referido, o painel projetado é apenas um projeto inicial, mas que está, apesar disso, completo a nível eletrónico. A estrutura do painel foi baseado numa fonte de alimentação (Figura 4.49), de formato genérico, de modo a permitir que, em caso de alteração da fonte, aquando da execução de um levantamento energético, as alterações a executar face à estrutura do painel sejam mínimas.

Por fim, o sistema laser foi testado no sistema LDV presente no Laboratório de Fluídos, no qual foram executadas medições utilizando os equipamentos presentes. Os resultados comprovaram que o sistema laser estava, de facto, a produzir um feixe com qualidade suficiente para a aplicação em questão, sendo provado através de dois ensaios validados pelo Dr. Mário Guindeira. No entanto, não foi possível a execução de testes utilizando um controlo térmico, medições estas que serão feitas futuramente, de modo a detetar a influência térmica nas medições.

Por fim o sistema laser foi testado no sistema LDV presente no Laboratório de Fluídos no qual foram executadas medição utilizando os equipamentos presentes. Os resultados comprovaram que o sistema laser estava de facto a produzir um feixe com qualidade suficiente para aplicação em questão sendo provado através de dois ensaios que foram validados pelo Dr. Mario Guindeira. No entanto não foi possível a execução de testes utilizando um controlo térmico, medições serão feitas futuramente, de modo a detetar a influência térmica nas medições, assim como uma comparação com uma medição executada pelo laser substituído. Apesar das circunstâncias, é de notar que o sistema desenvolvido se mostrou digno em termos de performance para substituição de um laser a Árgon muito mais oneroso e de manutenção mais exigente.

Como referido ao longo deste capítulo, ainda há bastantes etapas a cumprir até que o projeto esteja completo na sua totalidade, principalmente no que diz respeito à eletrónica. No entanto, é ainda assim possível afirmar que foram provados os fundamentos base do projeto, validando o conceito do mesmo.

Fora a conclusão dos trabalhos deste projeto em particular, referidas neste capítulo, a meu ver existem cinco vertentes a respeito deste trabalho que podem e devem ser aprofundadas:

- **Dimensões** - não obstante ao reduzido tamanho do laser, seria ainda possível obter um sistema laser mais compacto. Através de uma investigação mais aprofundada e da colocação de uma maior quantidade de placas de efeito Peltier, seria possível reduzir as dimensões totais e ainda otimizar a refrigeração do laser.

Aliada à ideia de redução de tamanho, a incorporação de um painel de controlo embutido na caixa exterior, aliado a uma fonte de alimentação de 220V, adicionaria ao sistema uma portabilidade e universalidade fora do comum.

- **Teste noutros sistemas de velocimetria de partículas** - Apesar de ter sido comprado o seu funcionamento, para LDV, é de notar que existem muitos outros processo de velocimetria ao qual este sistema laser só será considerado válido para utilização após comprovação experimental.

- **Novas potências e comprimentos de onda** - é sabido que os lasers abrangem um enorme leque de aplicações e que, para cada uma delas, as especificações dos lasers variam. Como tal, investir em testes de novas potências e comprimentos de onda seria uma mais valia, com o objetivo final de expandir o conceito aqui provado para outras áreas de interesse.

- **Laser pulsado para corte**- com o objetivo de atingir áreas ainda mais exigentes, como é o caso do corte a laser, a execução de um laser pulsado a partir do conceito laser apresentado, poderia ser uma mais valia para analisar as possíveis vantagens existentes nesse sentido.

- **LIDAR (da sigla inglesa Light Detection And Ranging)** - lasers como o que foi desenvolvido ao longo deste projeto já se adequam a uma grande parte das aplicações designadas como aplicações LIDAR. No entanto, alguns melhoramentos no que diz respeito à coerência espacial do laser em questão, poderiam possibilitar a sua utilização em aplicações LIDAR mais exigentes, como é o caso de mapeamentos atmosféricos.

Página intencionalmente deixada em branco

Bibliografia

[1] "Laser facts." http://www.nobelprize.org/educational/physics/laser/facts/applications.html. Accessed: 01-06-2016.

[2] S. M. Goldwasser, "What is a Laser and How Does It Work?." http://www.repairfaq.org/sam/laserfaq.htm#faqwil. Accessed: 19-09-2016.

[3] S. M. Goldwasser, "Ar/Kr Ion Laser Testing, Maintenance, Repair." https://www.repairfaq.org/sam/laseratr.htm. Accessed: 19-09-2016.

[4] S. M. Goldwasser, "Argon/Krypton Ion Lasers." https://www.repairfaq.org/sam/laserarg.htm#argiak1. Accessed: 19-09-2016.

[5] "Particle Image Velocimetry (PIV)." https://www.oxfordlasers.com/imaging/particle-image-velocimetry-piv/. Accessed: 02-06-2016.

[6] L. Łukasiak and A. Jakubowski, "History of semiconductors," *Journal of Telecommunications and Information Technology*, January 2010.

[7] E. Simpson, "The basic principles of laser technology, uses and safety measures in anesthesia," *Anesthesia Tutorial of the Week*, March 2012.

[8] F. Kärtner, "Fundamentals of photonics: Quantum electronics." Massachusetts Institute of Technology: MIT OpenCourseWare, 2006. ch. 7.

[9] W. Silfvast, *Laser Fundamentals*. Cambridge University Press, 2008. pp. 1-6/539-592.

[10] "Introduction to Lasers Technology." CVI Melles Griot Technical Guide, 2009. ch. 10.

[11] R. Paschotta, "Population Inversion." https://www.rp-photonics.com/population_inversion.html?s=ak. Accessed: 30-06-2016.

[12] S. C. Singh, H. Zeng, C. Guo, and W. Cai, *Lasers: Fundamentals, Types, and Operations*, pp. 1–34. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2012.

[13] O. Grandstrand, "Lasers," in *Fundamentals of Photonics* (L. S. Arthur Guenther and C. Roychoudhuri, eds.), ch. 5, 2008.

[14] R. Paschotta, "Optical Resonators." https://www.rp-photonics.com/optical_resonators.html. Accessed: 20-06-2016.

[15] S. Ezekiel, "Understanding Lasers and Fiberoptics." Massachusetts Institute of Technology: MIT OpenCourseWare, 2008.

[16] R. Paschotta, "Beam Pointing Fluctuations." https://www.rp-photonics.com/beam_pointing_fluctuations.html. Accessed: 02-07-2016.

[17] R. Paschotta, "Laser Threshold." https://www.rp-photonics.com/laser_threshold.html. Accessed: 13-06-2016.

[18] S. M. Goldwasser, "Items of Interest." http://www.repairfaq.org/sam/laserioi.htm#ioitoc. Accessed: 15-06-2016.

[19] R. Paschotta, "Pulsed Lasers." https://www.rp-photonics.com/pulsed_lasers.html?s=ak. Accessed: 15-06-2016.

[20] R. Paschotta, "Resonator Modes." https://www.rp-photonics.com/resonator_modes.html?s=ak. Accessed: 19-09-2016.

[21] C. Kalkert and J. Kayser, "Laser doppler velocimetry," *PHYS173 Biophysics Laboratory*, 2006.

[22] "LDV - Laser Doppler Velocimetry." http://velocimetry.net/ldv_principles.htm. Accessed: 01-07-2016.

[23] "Laser Doppler Velocimeter Introduction." http://www.efunda.com/designstandards/sensors/laser_doppler/laser_doppler_intro.cfm. Accessed: 01-07-2016.

[24] P. Petersson and M. Aldén, "Laser-Based Velocity Measurement Techniques (LDV and PIV)." http://measurementsci.com/how-an-ldv-lda-works/. Accessed: 05-07-2016.

[25] "How an LDV/LDA works." http://measurementsci.com/how-an-ldv-lda-works/. Accessed: 05-07-2016.

[26] R. Paschotta, "Gas Lasers." https://www.rp-photonics.com/gas_lasers.html. Accessed: 09-07-2016.

[27] R. Paschotta, "Laser Diodes." https://www.rp-photonics.com/laser_diodes.html. Accessed: 11-07-2016.

[28] "Diode Lasers." http://olympus.magnet.fsu.edu/primer/java/lasers/diodelasers/index.html. Accessed: 15-07-2016.

[29] K. Creath, "Interferometric investigation of a diode laser source," *Optical Society of America*, May 1985.

[30] U. M. Malzahn, "Controle de díodos laser, (salomão. w, trans)," *iC-BR Microelectronics*, February 2011.

[31] S. M. Goldwasser, "Diode Laser." https://www.repairfaq.org/sam/laserdio.htm#dioldl. Accessed: 11-07-2016.

[32] S. M. Goldwasser, "Solid State Lasers." https://www.repairfaq.org/sam/laserssl.htm#ssleff. Accessed: 14-07-2016.

[33] R. Paschotta, "Diode-pumped lasers." https://www.rp-photonics.com/diode_pumped_lasers.html. Accessed: 14-07-2016.

[34] "Ion Laser Technology 5500 Series Argon W/ Control Unit." http://www.ebay.com/itm/Ion-Laser-Technology-5500-Series-Argon-W-Control-Unit-/321462198421?hash=item4ad8a3e095:g:mLgAAOxytQxSHKvW. Accessed: 05-01-2017.

[35] IEC, "Safety of laser products - Part 1: Equipment classification, requirements and user's guide," Standard 1993+A1:1997+A2:2001, International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, 2008.

[36] "Thermoelectric Module Basics." `https://thermal.ferrotec.com/technology/`. Accessed: 03-12-2016.

Página intencionalmente deixada em branco

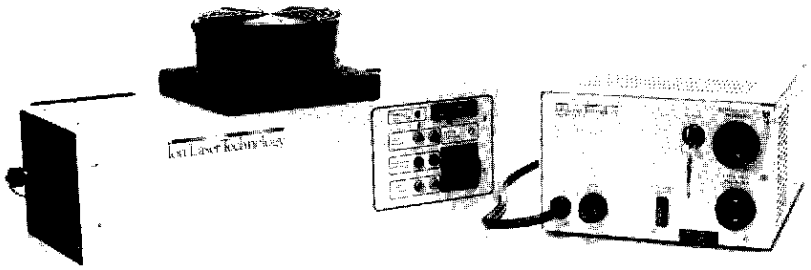
Apêndices

Página intencionalmente deixada em branco

Apêndice A - Argon Model 5500A - Ficha técnica

Página intencionalmente deixada em branco

ILT Model 5500A
Air-Cooled Argon Ion Laser



STANDARD FEATURES

- 300mW Multiline Output
- TEMoo/Polarized Beam
- Rugged Metal/Ceramic Plasma Tube
- Enlarged Gas Reservoir for Extended Tube Life
- Thermostat Controlled Air Cooling
- Hands Off Operation
- Excellent Power and Pointing Stability
- CDRH Certified
- 4 Invar Rod Resonator
- Switching Power Supply
- Light Feedback Regulation
- Remote Interface - Control Via Host System

OPTIONAL FEATURES

- Tuneable/Singleline - Littrow Prism 457nm to 514nm
- Remote Control-RPC-50
- Remote Air Cooling
- WC Compatable

SYSTEM

The 5500A contains a field proven off the shelf ILT plasma tube designed to operate in TEMoo mode, and provide a polarized output beam. This model has standard 300mW multiline output with light control feedback regulation or may be equipped with ILT's optional littrow prism. This option will allow the end user to tune the laser from 457nm to 514nm and will guarantee 100% spectral purity.

PLASMA TUBE

The ILT plasma tube is constructed of BeO ceramic with enlarged metal end shrouds. This provides high thermal conductivity and large gas volume for extended tube lifetime. This tube is designed with brewster windows sealed on each end and external mirrors, providing high polarization and high spectral purity when used with our littrow prism option. This design also gives the end user a simple and less expensive, typically half the cost, tube to refurbish when the time comes.

RESONATOR

The plasma tube is housed in a lightweight aluminum resonator structure which utilizes a four invar rod design. This design provides excellent mechanical and beam pointing stability. The mirror mounts are held in place with a one piece, solid spring steel adjustment gimble. This unique combination provides field proven, hands free operation. The resonator also incorporates a molecular sieve dryer system attached to teflon tube to mirror seals which provides guaranteed maintenance free operation, even in humid environments.

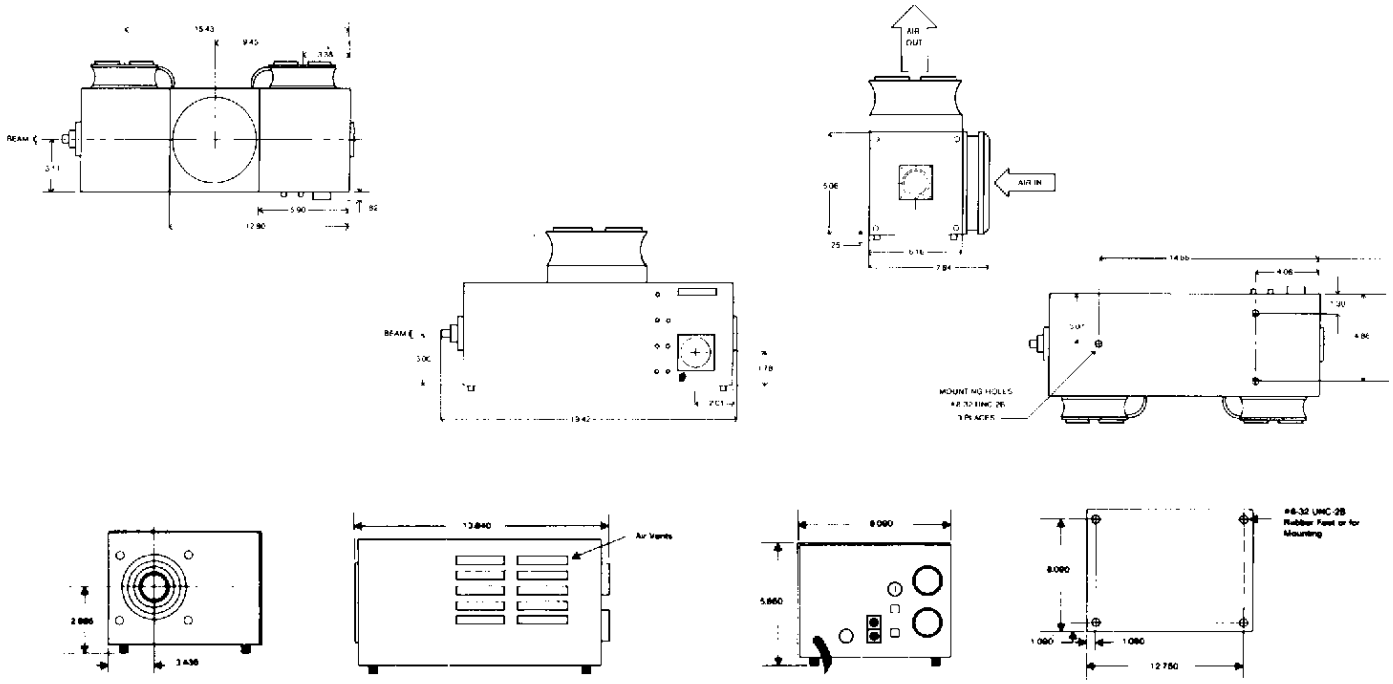
Laser head cooling is accomplished by using three high volume fans. Two side mounted fans located at each end of the resonator, and one top mounted fan located in the center of the resonator. Air moves across the anode and cathode shrouds and exits through a fully brazed pure copper heat sink.

A fan thermostat controls cooling fans and monitors tube temperature. Fans turn on when tube is up to operating temperature and turn off only after tube is completely cooled down. As a result, the tube can warm up and cool down faster.

POWER SUPPLY

The laser head is powered by the Model 5405, high efficiency, switching power supply. This power supply incorporates a mos-fet switching regulator and light feedback regulation which gives the user excellent amplitude and long term power stability. The 5405 is supplied with interlock remote connection, key switch, and remote control interface. The system can be controlled manually via power control on laser head or remotely by a host system or the Model RPC-50 remote control. The RPC-50 has a 4 inch high resolution LED bar graph display. This display reads out laser power and tube current. The RPC-50 also has run/standby switch, and display of system interlocks that provide diagnostic information in the event of system failure.

Ion Laser Technology has united high technological ingenuity with no nonsense design to provide our customers with the most reliable laser systems available today. This commitment combined with quick turnaround by ILT service technicians, demonstrates Ion Laser Technology's standard of performance plus support.



OUTPUT SPECIFICATIONS

Multiline 300mw (all lines)

SingleLine	457.9nm	465.8nm	476nm	488nm	496.5nm	501nm	514nm
Tuneable	15mw	10mw	30mw	100mw	25mw	15mw	100mw

PERFORMANCE SPECIFICATIONS

Beam Diameter $1/e^2$	.82mm
Beam Divergence	.78mrad
Full angle	
Polarization	>100:1
E-Vector Vertical	
A.R. Spot	<.25%
Transverse Mode	TEM_{00}
(Higher order modes available on multiline models with output powers up to 600mw)	
Warm-up time (cold start)	
Multiline models	<5 mins.
Littrow Prism models	<15 mins.
From standby	Immediate
Beam Pointing Stability	
After warm-up	<30 microradians
Periodic	10 microradians
Beam Amplitude Noise	
DC to 2MHZ	<1% RMS
Long Term Power Stability	
2 hours at constant ambient conditions	1%

ELECTRICAL SPECIFICATIONS

Voltage	220VAC ± 10%
Current	20 Amp
Frequency	60 hz
Optional	47 to 63 Hz
Phase	Single
Power Supply	30 KHz
Switching Frequency	

SHIPPING SPECIFICATIONS

Power Supply Weight	20 lbs.
Shipping Weight	23 lbs.
Laser Head Weight	20 lbs.
Shipping Weight	31 lbs.

**Specifications subject to change without notice*

Apêndice B - Medição de correntes de alimentação correspondentes as potências óticas de trabalho

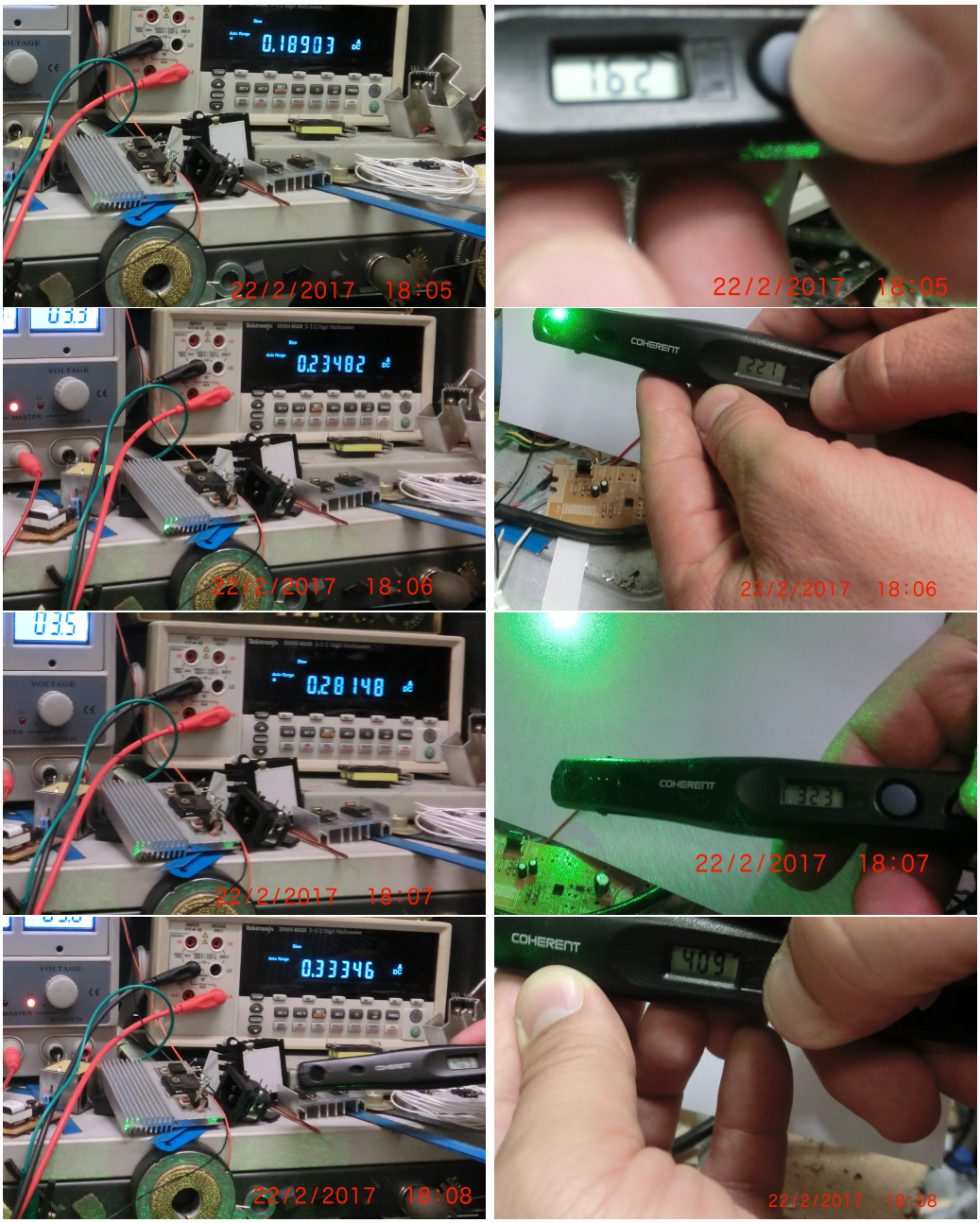


Figura 1: Conjunto de fotografias captadas durante a medição das correntes de alimentação correspondentes as potências óticas. Este conjunto de oito figuras é constituído por uma matriz 4x2 sendo que, em cada linha, a primeira coluna corresponde à medição de corrente e a segunda coluna à medição de potência ótica em simultâneo como se pode observar pela data e hora das figuras.

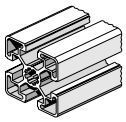
Página intencionalmente deixada em branco

Apêndice C - Componentes Bosch

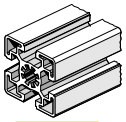
Página intencionalmente deixada em branco

Section 2: Profiles

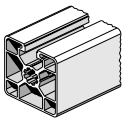
45-Series Profiles



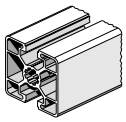
45x45
2-27



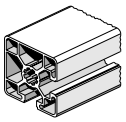
45x45H
2-28



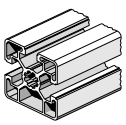
45x45 1S
2-28



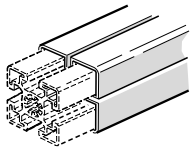
45x45 2S
2-29



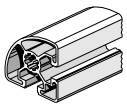
45x45 2SA
2-29



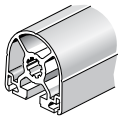
45x45 3S
2-30



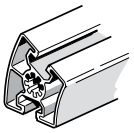
50x50T
2-30



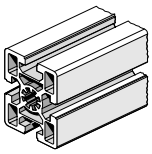
45x45R
2-31



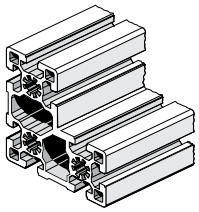
45x45HR
2-31



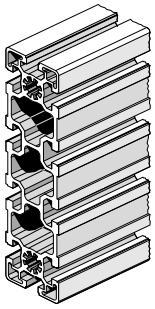
45x30°R, 45x45°R, 45x60°R
2-32



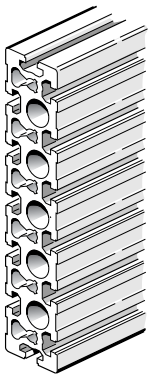
45x60H
2-33



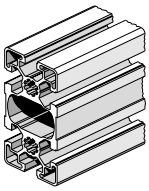
45x90x90
2-38



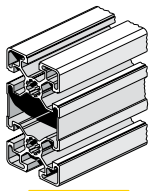
45x180H
2-37



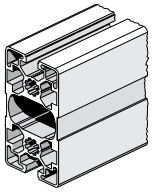
45x270H
2-38



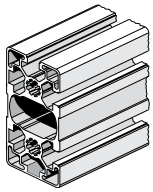
45x90
2-34



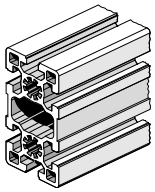
45x90 SL
2-35



45x90 2S
2-35

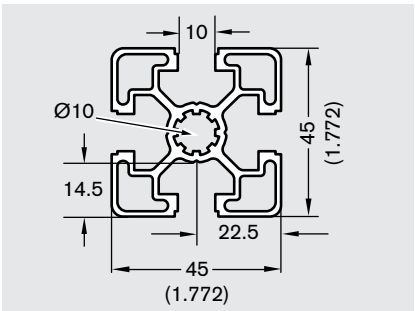


45x90 3SA
2-36



45x90H
2-37

45x45 [10]



Features:

- General purpose, medium-duty profile for a wide variety of applications
- Has four 10mm T-slots

Non-Machined End Finish Options	Part Number
Profile 45x45, pkg. of 20, 6000mm long	**8 981 004 744** GoTo
Profile 45x45, single, 6000mm long	**8 981 004 773** GoTo

Machined Options	End Finish	Part Number
Profile 45x45, –/–, specify length ≥30mm≤6000mm		**8 981 992 026/__mm**
Profile 45x45, M12/–, specify length ≥55mm≤6000mm		**8 981 992 027/__mm**
Profile 45x45, M12-D9.8-D9.8VS/–, specify length ≥55mm≤6000mm		**8 981 992 030/__mm**
Profile 45x45, M12/M12, specify length ≥110mm≤6000mm		**8 981 992 028/__mm**
Profile 45x45, M12-D9.8-D9.8VS/M12-D9.8-D9.8VS, specify length ≥110mm≤6000mm		**8 981 992 032/__mm**
Profile 45x45, D9.8/D9.8, specify length ≥80mm≤6000mm		**3 842 992 967/__mm**

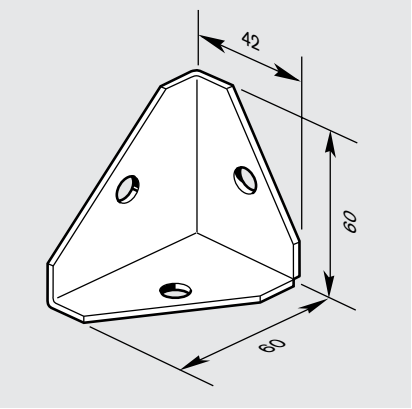
Please contact your distributor for other machining options.

GoTo boschrexroth-us.com/framing to get these in stock items **FAST** from your local distributor

Section 3: Profile Connectors

Other 90° Right-Angle Connectors

Sheet Metal Gusset–42x60 10

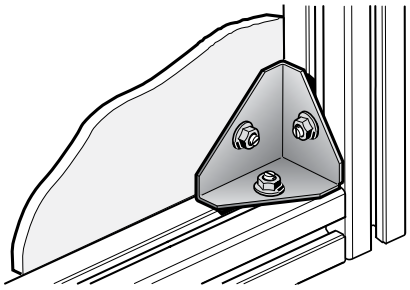


Features:

- Used with 45-series profile to create a right-angle connection
- Hole in side can be used for attaching panels, tabletops, etc.

Material:

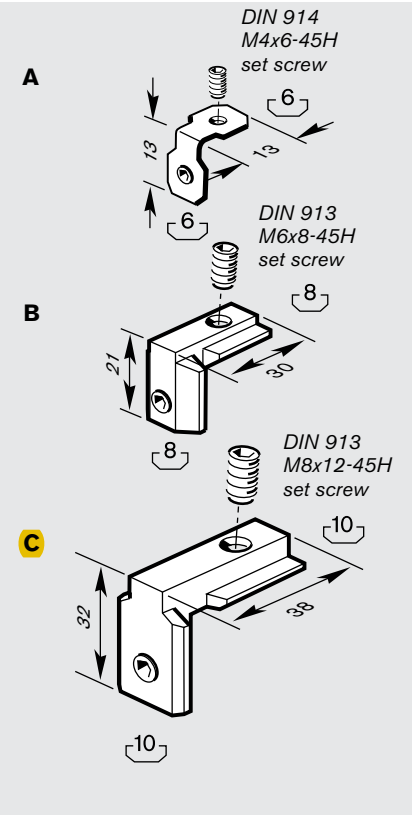
- Zinc-plated sheet steel



Description	Lot Size	Part Number
42x60 sheet metal gusset	1	**3 842 146 813**

6mm, 8mm, & 10mm Inside-to-Outside Gussets

6 8 10 Clean Room GoTo



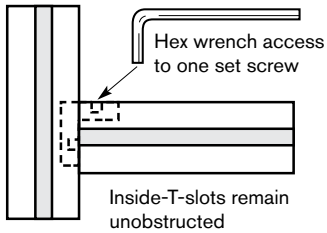
Features:

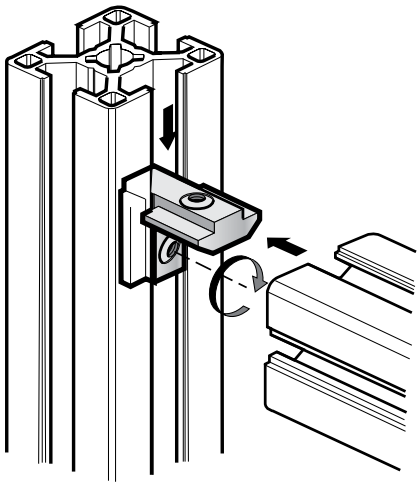
- Clean appearance
- Easy set screw installation
- Does not obstruct T-slot
- Includes set screws

Material:

- Zinc-plated steel

Assembly Note





Description		Lot Size*	Part Number
A	6mm inside-to-outside gusset and set screws 6→6	10	**3 842 535 574**
B	8mm inside-to-outside gusset and set screws 8→8	10	**3 842 535 578** GoTo
C	10mm inside-to-outside gusset and set screws 10→10	10	**3 842 535 572** GoTo

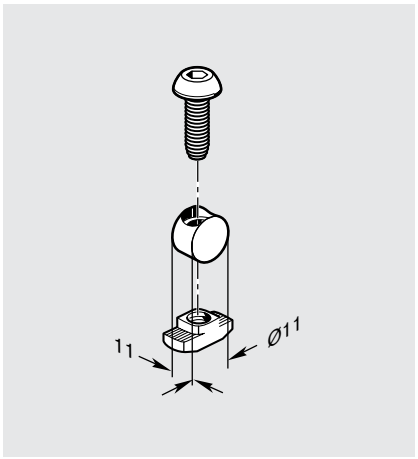
* *For smaller quantities, please contact your local distributor.*

GoTo boschrexroth-us.com/framing to get these in stock items **FAST** from your local distributor

Section 3: Profile Connectors

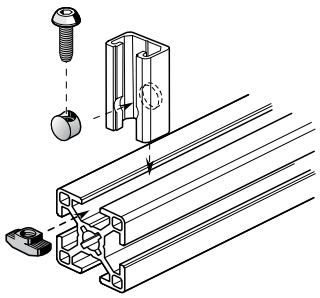
Other 90° Right-Angle Connectors

11x30mm Bolt Connector Kits [8] [10]



Features:
- Provides strong right-angle connection
- Versions available for attaching 11x30 profile to profiles with 8mm or 10mm T-slots

Material:
- Bolt connector, screw, and T-nut: zinc-plated steel

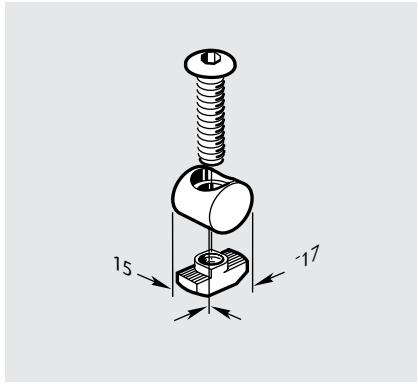


Machining Required:
- 11mm hole through 11x30 profile

Description	Lot Size*	Part Number
11x30mm bolt connector kit [8→10]	10	**3 842 535 617**

* *For smaller quantities, please contact your local distributor.*

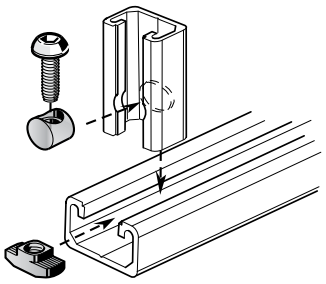
15x22.5mm Bolt Connector Kit [10]



Features:
- Provides strong right-angle connection for 15x22.5 profile

Material:
- Bolt connector, screw, and T-nut: zinc-plated steel

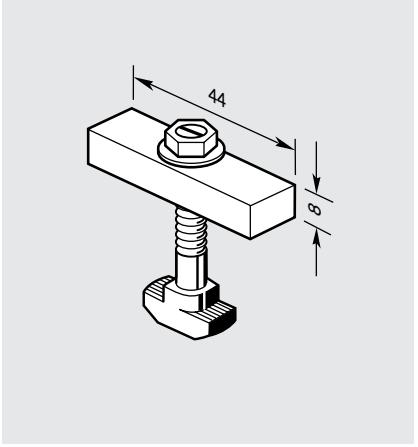
Machining Required:
- 17mm through-hole (see drawing)



Description	Lot Size*	Part Number
15x22.5mm bolt connector kit	10	**3 842 535 619**

* *For smaller quantities, please contact your local distributor.*

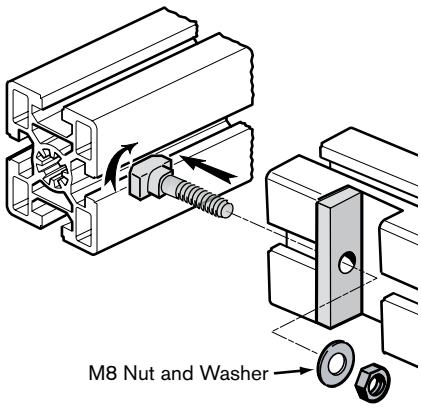
Cross Connector Kit [10]



Features:
- Provides strong, torque-resistant connection to support heavy loads
- Commonly used in conveyor leg sets and machine frames
- Works with 45- and 90-series profiles, as well as 60x90H

Material:
- Zinc-plated steel

Machining Required:
- 30mm wide milled slot

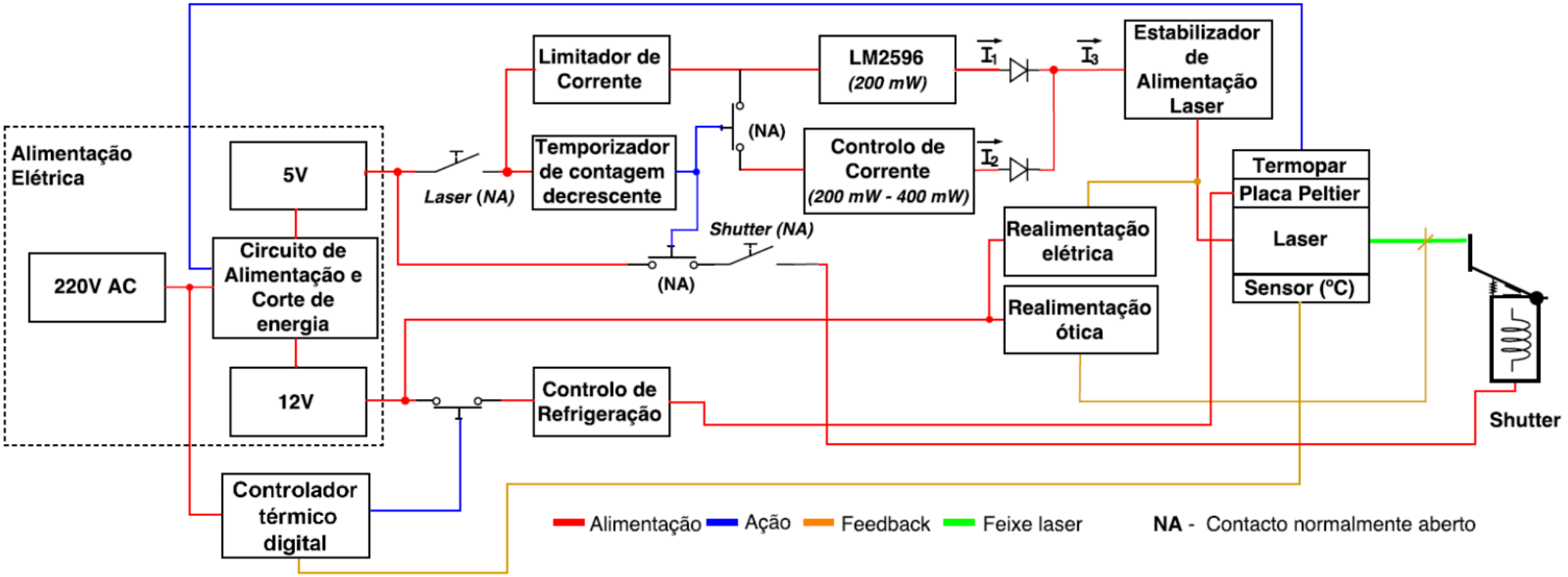


Description	Lot Size	Part Number
Cross connector kit	1	**3 842 146 972**

Página intencionalmente deixada em branco

Apêndice D - Esquema eletrico completo

Página intencionalmente deixada em branco


Alimentação Elétrica
220V AC
5V
12V
Circuito de Alimentação e Corte de energia
Controlador térmico digital
Laser (NA)
Limitador de Corrente
Temporizador de contagem decrescente
(NA)
Shutter (NA)
(NA)
LM2596 (200 mW)
Controlo de Corrente (200 mW - 400 mW)
Controlo de Refrigeração
Estabilizador de Alimentação Laser
Realimentação elétrica
Realimentação ótica
Termopar
Placa Peltier
Laser
Sensor (ºC)
Shutter
Alimentação
Ação
Feedback
Feixe laser
NA - Contacto normalmente aberto