

Desenvolvimento de um Equipamento de Interrogação de Gratings de Período Longo com Recurso a um Laser Multimodo

PROJETO DE MESTRADO

Luís Henrique Marques Rodrigues Silva

MESTRADO EM ENGENHARIA ELETROTÉCNICA - TELECOMUNICAÇÕES



UNIVERSIDADE da MADEIRA

A Nossa Universidade

www.uma.pt

setembro | 2020

Desenvolvimento de um Equipamento de Interrogação de Gratings de Período Longo com Recurso a um Laser Multimodo

PROJETO DE MESTRADO

Luís Henrique Marques Rodrigues Silva

MESTRADO EM ENGENHARIA ELETROTÉCNICA - TELECOMUNICAÇÕES

ORIENTAÇÃO

José Manuel Rocha Teixeira Baptista

Resumo

Os sensores baseados em fibra ótica apresentam algumas vantagens interessantes que podem justificar a sua implementação, em substituição ou em complemento dos tradicionais sensores que atuam no domínio elétrico.

Neste trabalho é apresentado o desenvolvimento de um equipamento de interrogação de sensores em fibra ótica, baseados em *gratings* (redes) de período longo e de Bragg. Este tipo de sensores comporta-se como um filtro rejeita banda, atenuando algumas regiões bem definidas do espectro.

O equipamento recorre a um laser multimodo e respetiva resposta em temperatura, realizando um varrimento espectral ao longo de uma das bandas de rejeição do sensor, criando um espectro discreto do mesmo. Utilizando uma técnica de ajuste, o espectro original do *grating* é recriado.

Foi desenvolvido o circuito elétrico desde a alimentação do laser, controlo de temperatura e aquisição de dados. Foi dada particular atenção à proteção do laser, pois é o elemento mais caro e sensível do equipamento.

Posteriormente, foi desenvolvido o *software* responsável por comandar o circuito e leitura de valores de tensão para obtenção de dados, por meio de um microcontrolador.

Foi criada uma interface gráfica que permite a interação homem-máquina, na qual é possível o comando do equipamento e apresentação dos dados recolhidos.

Por fim, é analisado o desempenho do equipamento. A análise de resultados centrou-se na capacidade do equipamento em interrogar *gratings* de período longo.

O equipamento desenvolvido apresentou uma região espectral de interrogação entre os 1298 e os 1308 nm, com erros máximos observados de 2,8 nm e 5,1 dB, apresentando ainda uma consistência nos resultados ao longo de sucessivas interrogações. O custo final do equipamento, inferior a €400, encontra-se muito abaixo comparativamente às soluções com analisadores de espectro, existentes no mercado.

Palavras chave: interrogação, laser, LPG, multimodo, sensor.

Abstract

Optical fiber sensors show some interesting advantages that may justify their choice over the traditional sensors operating on the electrical domain.

On this thesis, the development of an equipment capable of interrogating optical fiber sensors, based on long period gratings and Bragg gratings, is presented. These types of sensors behave as band rejection filters which attenuate some well defined spectral regions.

The equipment makes use of a multimode laser diode and its temperature response, doing a spectral sweep on one of the rejection bands of the sensor and creating a discrete spectrum of said band. Using a curve fitting technique it is possible to restore the original spectrum.

The electrical circuit was developed from the laser powering to its temperature control and data acquisition. Particular attention was given to ensure the laser protection since this is the most expensive and sensitive element of the whole system.

Afterwards, the software part was developed which is in charge of controlling the whole circuit and also of doing some voltage readings in order to acquire data, making use of a microcontroller.

A graphical user interface was also created to allow the human – machine interaction, making it possible to control the circuit and show the data acquired.

Finally, the performance of the equipment is tested. The performance evaluation of the equipment focused on its capability to interrogate long period gratings.

The presented interrogation unit showed an interrogation spectral region ranging from 1298 to 1308 nm, with maximum errors of 2,8 nm and 5,1 dB while also presenting consistency between successive interrogations. The total cost of the built equipment, below €400, sits well under the cost of typical interrogation units using optical spectrum analyzers.

Keywords: interrogation, laser, LPG, multimode, sensor.

Agradecimentos

Na presente secção gostaria de expressar os meus mais sinceros agradecimentos a todos os intervenientes que, de uma forma ou de outra, deram o seu contributo para o culminar do meu percurso académico e, especialmente, àqueles que contribuíram diretamente neste projeto.

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao professor Dr. José Manuel Baptista, orientador deste projeto, por todo o apoio incondicional, disponibilidade demonstrada, acompanhamento constante e pelo conhecimento transmitido. Estes são valores que, certamente, não passaram despercebidos e senti-me verdadeiramente acompanhado ao longo desta última etapa.

Ao Centro de Fotónica Aplicada do Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores, Tecnologia e Ciência (INESC TEC), mais concretamente ao professor Dr. Pedro Jorge, Dr. Luís Coelho e ao Eng. Paulo dos Santos pela simpatia, disponibilidade e constante *feedback*, bem como pelo material disponibilizado, o qual foi fundamental à realização deste trabalho.

Gostaria também de apresentar os meus sinceros agradecimentos a todos os professores da Universidade da Madeira com quem tive oportunidade de contactar, os quais, todos sem exceção, sempre demonstraram uma enorme capacidade de motivação, disponibilidade para apoiar e vontade de ensinar.

Tenho também de agradecer ao Eng. Filipe Santos, responsável pelo laboratório de *hardware* da Universidade da Madeira, pela disponibilidade, conselhos e por toda a ajuda prestada ao longo do meu percurso na Universidade da Madeira, incluindo o presente trabalho.

Por fim, mas não menos importantes, gostaria de agradecer aos meus familiares, amigos e namorada, por todo o apoio, amizade e paciência demonstrada.

Lista de Abreviaturas

ADC	<i>Analog to Digital Converter</i>
APC	<i>Angled Physical Contact</i>
ASE	<i>Amplified Spontaneous Emission</i>
AWG	<i>Arrayed Waveguide Grating</i>
BJT	<i>Bipolar Junction Transistor</i>
DCF	<i>Double-Clad Fiber</i>
DFB	<i>Distributed Feedback</i>
DPDT	<i>Double Pole Double Through</i>
FBG	<i>Fiber Bragg Grating</i>
FC	<i>Ferrule Connector</i>
FET	<i>Field-Effect Transistor</i>
FWHM	<i>Full Width Half Maximum</i>
GPIO	<i>General Purpose Interface Bus</i>
GPIO	<i>General Purpose Input/Output</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
Laser	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
LP	<i>Linearmente Polarizado</i>
LPG	<i>Long Period Grating</i>
Mosfet	<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i>
NTC	<i>Negative Temperature Coefficient</i>
OSA	<i>Optical Spectrum Analyzer</i>
PC	<i>Physical Contact</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
RIU	<i>Refractive Index Unit</i>
RS-232	<i>Recommended Standard 232</i>
SMD	<i>Surface-Mount Device</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver-Transmitter</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>

Lista de Símbolos

a	Amplitude da curva de Gauss
A_v	Ganho do sensor de corrente
b	Valor do centro da curva de Gauss
c	Desvio padrão da curva de Gauss
C	Capacitância
D	Fator de ciclo do sinal PWM
f	Frequência
I	Corrente
k	Coeficiente de acoplamento
L	Comprimento do <i>grating</i>
L_c	Comprimento da cavidade de Fabry-Pérot
m	Ordem do modo difratado pela máscara de fase
n	Índice de refração
$n_{\text{eff}, n}$	Índice de refração efetivo de um dado modo n
n_{ext}	Índice de refração do meio externo
n_{01}^{co}	Índice de refração efetivo do modo fundamental do núcleo
n_m^{cl}	Índice de refração efetivo de um dado modo m de bainha
o	<i>Offset</i> da curva de Gauss
q	Índice de um modo ressonante numa cavidade de Fabry-Pérot
R	Resistência
R_0	Resistência do termistor à temperatura de referência T_0
R_{sense}	Resistência de medição do sensor de corrente
Ref	Refletividade de um FBG
t	Tempo
T	Temperatura
T_0	Temperatura de referência do termistor
T_k	Temperatura em graus Kelvin
T'	Período do sinal PWM
$\text{Valor}_{\text{ADC}}$	Valor de 12 bits medido pelo ADC do microcontrolador
V_{cc}	Tensão de alimentação
V_{ref}	Tensão de referência
β	Constante do termistor
β_n	Constante de propagação de um dado modo n
β_{01}^{co}	Constante de propagação do modo fundamental do núcleo da fibra
β_m^{cl}	Constante de propagação do modo m de bainha
ε	Estiramento
Λ	Período do <i>grating</i>
Λ_{pm}	Período da máscara de fase
λ	Comprimento de onda
λ_{res}	Comprimento de onda ressonante

Índice

Resumo	i
Abstract.....	iii
Agradecimentos.....	v
Lista de Abreviaturas	vii
Lista de Símbolos	ix
1 Introdução	1
1.1 Objetivos	1
1.2 Organização da tese	2
2 Sensores em Fibra Ótica	5
2.1 Introdução	5
2.2 Sensores baseados em <i>Gratings</i> em Fibra Ótica.....	7
2.2.1 Princípio de Operação.....	8
2.3 <i>Gratings</i> de Período Longo	9
2.4 <i>Gratings de Bragg</i>	12
2.5 Técnicas de Fabrico	13
2.5.1 Luz ultravioleta	13
2.5.2 Laser de femtossegundos	14
2.5.3 Laser de CO ₂	16
2.5.4 Deformação mecânica.....	17
2.5.5 Implantação iónica.....	18
2.5.6 Arco elétrico	19
2.6 Mecanismos de sensibilidade dos <i>Gratings</i> em Fibra Ótica	20
2.6.1 Sensores baseados em LPG.....	21
2.6.1.1 Sensor de Temperatura	22
2.6.1.2 Sensor de Índice de Refração Externo	23
2.6.1.3 Sensor de Estiramento	24
2.6.2 Sensores baseados em FBG	26
2.6.2.1 Sensor de Temperatura	26
2.6.2.2 Sensor de Estiramento	27
2.7 Técnicas de Interrogação de <i>Gratings</i> em Fibra Ótica	27
3 Analisadores de Espetros Óticos.....	33
3.1 Funcionamento e tipos de Analisadores de Espetros Óticos	33

3.1.1	Analísadores de Espectros Óticos baseados em Interferómetros de Fabry-Pérot	34
3.1.2	Analísadores de Espectros Óticos baseados em Interferómetros de Michelson	35
3.1.3	Analísadores de Espectros Óticos baseados em Redes de Difração.....	36
3.2	Soluções de Mercado.....	37
4	Desenvolvimento do equipamento de interrogação	41
4.1	Introdução	41
4.2	Alimentação do Laser.....	43
4.2.1	Circuito do <i>Driver</i> do Laser.....	44
4.2.2	Circuito de Modulação de Corrente.....	47
4.2.3	Comutação entre fontes	50
4.2.4	Circuito de proteção e leitura de corrente do laser	52
4.3	Controlo de temperatura do laser.....	56
4.3.1	Medição de temperatura.....	61
4.4	Circuito do Fotodetector.....	63
4.5	Microcontrolador.....	64
4.6	Custo total do equipamento.....	65
5	Trabalho desenvolvido em <i>Software</i>	67
5.1	Código implementado no microcontrolador	67
5.1.1	Comando dos dispositivos de comutação e controlo de temperatura... ..	67
5.1.2	Aquisição de dados	68
5.1.3	Comunicação com a interface de utilizador	69
5.2	Interface de Utilizador.....	70
6	Caracterização do Laser e Fotodetector.....	77
6.1	Caracterização do Laser	77
6.2	Caracterização do Fotodetector	83
7	Resultados.....	87
8	Conclusões e trabalhos futuros.....	93
9	Referências.....	97
	Anexo A	103
	Anexo B.....	106

Anexo C	108
Anexo D	109
Anexo E	113

Índice de Figuras

Figura 2.1 - Configuração típica de um sistema sensor em fibra ótica [1].	6
Figura 2.2 - Esquema representativo de um <i>grating</i> de período longo.	9
Figura 2.3 – Distribuição radial da energia do modo LP ₀₇ num <i>grating</i> de período longo.	10
Figura 2.4 - Exemplo do comportamento espectral de um <i>grating</i> de período longo.	11
Figura 2.5 - Esquema representativo de um <i>grating</i> de Bragg.	12
Figura 2.6 – Criação de um <i>grating</i> de período longo por meio de máscara de fase, segundo a incidência normal de luz ultravioleta [18].	13
Figura 2.7 - Esquema de montagem para a utilização de um laser de femtossegundos para a criação de um LPG sob uma técnica ponto por ponto [23].	15
Figura 2.8 - Esquema de montagem para execução de um <i>grating</i> com um laser de CO ₂ .	16
Figura 2.9 - Deformação mecânica de uma fibra por meio de uma placa ranhurada para a criação de um <i>grating</i> [31].	17
Figura 2.10 - Exemplo de um esquema de montagem para fabricação de <i>gratings</i> pela técnica do arco elétrico [37].	19
Figura 2.11 - Configuração típica para interrogação de <i>gratings</i> de Bragg com recurso a um circulador e a um analisador de espectros ótico.	28
Figura 2.12 - Configuração para interrogação de <i>gratings</i> de Bragg com recurso a um filtro Fabry-Pérot sintonizável e um fotodetector.	29
Figura 2.13 - Exemplo de interrogação de um LPG com recurso a um AWG [51].	30
Figura 3.1 - Diagrama de blocos básico de um analisador de espectros óticos [53].	33
Figura 3.2 - Princípio de funcionamento de um analisador de espectros óticos baseado em interferometria de Fabry-Pérot [53].	34
Figura 3.3 - Princípio de funcionamento de um analisador de espectros óticos baseado em interferometria de Michelson [53].	36
Figura 3.4 - Princípio de funcionamento de um analisador de espectros óticos baseado em redes de difração [53].	37
Figura 3.5 - Analisador de espectros óticos Yokogawa AQ6370 [54].	38
Figura 3.6 - Analisador de espectros óticos compacto, Ocean Insight STS-NIR [55].	39
Figura 4.1 - Princípio de funcionamento do equipamento de interrogação desenvolvido.	41
Figura 4.2 - Diagrama de blocos do sistema projetado. A sigla VCC representa a alimentação dos vários blocos.	42
Figura 4.3 - Circuito completo do equipamento desenvolvido.	43
Figura 4.4 - Circuito integrado MAX3668.	44
Figura 4.5 - Circuito implementado para integração do <i>driver</i> .	45
Figura 4.6 - Placa <i>breakout</i> para o circuito integrado do <i>driver</i> MAX3668.	47

Figura 4.7 - Circuito Fonte de Corrente.....	48
Figura 4.8 - Gerador do sinal triangular de referência.....	49
Figura 4.9 - Formas de onda da tensão de referência e tensão na carga.....	50
Figura 4.10 – Exemplo do ruído gerado pela comutação do relé nos terminais do laser. A risca amarela representa a tensão no ânodo e a risca verde representa a tensão no cátodo do laser.	51
Figura 4.11 - Arquitetura interna do interruptor analógico MAX4678 [57].	52
Figura 4.12 - Circuito lógico de uma <i>latch</i> do tipo SR.	52
Figura 4.13 - Circuito de ligação do laser, proteção e monitorização da corrente.	54
Figura 4.14 - Esquema de montagem utilizado para calibração do sensor de corrente MAX9929.	55
Figura 4.15 - Reta de calibração do sensor de corrente MAX9929.....	56
Figura 4.16 - Bloco de alumínio projetado para acomodar o laser e termístores para efeitos de trocas de calor com os <i>peltiers</i>	57
Figura 4.17 - Constituição física de um módulo de <i>peltier</i>	57
Figura 4.18 - Representação da técnica PWM.....	58
Figura 4.19 - Circuito de alimentação e troca de polaridade dos módulos de <i>peltier</i>	59
Figura 4.20 - Circuito de comando do arrefecimento ativo.....	60
Figura 4.21 - Encapsulamento desenvolvido na impressora 3D para acomodar o bloco de alumínio e conter possíveis condensações.	61
Figura 4.22 - Montagem do encapsulamento, bloco de alumínio e ventoinha..	61
Figura 4.23 - Circuito implementado para leitura da temperatura fornecida pelos termístores.	62
Figura 4.24 - Circuito do amplificador de transimpedância implementado.	63
Figura 5.1 - Varrimento em temperatura entre os 10°C e os 49°C.....	68
Figura 5.2 - Esquema de ligação utilizado para a comunicação entre o microcontrolador e a interface de utilizador.....	70
Figura 5.3 - Painel da temperatura na interface de utilizador durante um varrimento em temperatura.	72
Figura 5.4 - Painel dos pontos de atenuação do LPG medidos pelo equipamento e controlo da alimentação do laser.....	74
Figura 5.5 - Painel de ajuste dos pontos medidos pelo varrimento em temperatura do laser.....	75
Figura 6.1 - Espectro do laser QFLD-1310-5SAX a 23°C e 25 mA.....	78
Figura 6.2 - Configuração utilizada para realização de controlo de potência com recurso a um fotodetector externo.	79
Figura 6.3 - Espectro do laser para uma corrente de 25 mA e temperaturas de 12°C, 25°C e 48°C, respetivamente.	80
Figura 6.4 - Comprimento de onda central do laser em função da temperatura.	81
Figura 6.5 - Tipos de espectros passíveis de serem apresentados pelo laser em função da temperatura.	82

Figura 6.6 - Potência do laser em função da temperatura para uma corrente de 25 mA.....	83
Figura 6.7 - Relação entre a potência ótica incidente e a tensão à saída do amplificador de transimpedância.....	84
Figura 6.8 - Variação do declive do conjunto fotodetector + amplificador de transimpedância em função do comprimento de onda.....	85
Figura 7.1 - Espectro original do LPG utilizado.....	87
Figura 7.2 - Esquema de montagem utilizado para as interrogações efetuadas ao LPG.....	87
Figura 7.3 - LPG com pico de atenuação centrado nos 1295,6 nm.....	88
Figura 7.4 - LPG com pico de atenuação centrado nos 1298,8 nm.....	88
Figura 7.5 - LPG com pico de atenuação centrado nos 1306,4 nm.....	89
Figura 7.6 - LPG com pico de atenuação centrado nos 1310 nm.....	89
Figura A. 1 - Esquema do circuito elétrico desenhado no Kicad.....	103
Figura A. 2 - Vista superior da placa de circuito impresso.....	104
Figura A. 3 - Vista inferior da placa de circuito impresso.....	105
Figura B. 1 - Desenho técnico da parte inferior do bloco de alumínio.....	106
Figura B. 2 - Desenho técnico da parte superior do bloco de alumínio.....	107
Figura C. 1 - Desenho técnico do encapsulamento criado para o bloco de alumínio.....	108
Figura D. 1 - Fluxograma do algoritmo de controlo de temperatura implementado.....	109
Figura D. 2 - Fluxograma do algoritmo de varrimento em temperatura.....	110
Figura D. 3 - Fluxograma do algoritmo dos ADC do microcontrolador.....	111
Figura D. 4 - Fluxograma do algoritmo de receção de comandos provenientes do LabVIEW.....	112
Figura E. 1 - Interface gráfica de utilizador desenvolvida em LabVIEW.....	113

Índice de Tabelas

Tabela 4.1 - Funcionalidades dos pinos do circuito integrado MAX3668.	45
Tabela 4.2 - Tabela de verdade de uma porta lógica NAND.	52
Tabela 4.3 - Tabela de verdade de uma <i>latch</i> SR.	53
Tabela 4.4 - Funções dos pinos de ligação ao microcontrolador da figura 4.13.	54
Tabela 4.5 - Lista de preços do equipamento.	65
Tabela 5.1 - Mapeamento dos pinos do ADC do microcontrolador utilizados. .	69
Tabela 6.1 - Características principais do laser QFLD-1310-5SAX.....	77

1 Introdução

Num mundo cada vez mais industrializado e automatizado a necessidade de mecanismos que permitam o controlo e monitorização dos sistemas é de extrema importância. Parte fundamental destes mecanismos são os equipamentos sensores, que permitem quantificar uma determinada grandeza seja ela a temperatura, a distância, a pressão, entre muitas outras. Estas medições permitirão garantir o correto funcionamento dos sistemas, e ainda servir de realimentação em malhas de controlo.

Muitas são as soluções atualmente disponíveis no mercado no que toca aos sensores sendo, na sua grande maioria, sensores que operam no domínio elétrico. Estes últimos, apesar de bastante difundidos, apresentam algumas limitações práticas que podem impossibilitar a sua instalação como sendo a sensibilidade a interferência eletromagnética, necessidade de alimentação elétrica e dimensões que, por vezes, poderão não ser adequadas ao local de instalação.

A tecnologia das fibras óticas surge como uma alternativa aos sensores de domínio elétrico e permite colmatar, entre outros, os problemas enunciados no parágrafo anterior. Em particular, os sensores baseados em *gratings* de fibra ótica excelem na resolução desses mesmos problemas, visto que o sensor não requer proximidade com a estação de interrogação, podendo ficar afastado por grandes distâncias.

Uma outra característica deste tipo de sensores centra-se nos elevados valores de sensibilidade, demonstrando alto potencial para implementação em sistemas de medição de elevada precisão e resolução.

Um dos desafios desta tecnologia centra-se nos sistemas de interrogação, onde tipicamente são utilizados sistemas robustos e caros.

Esta é uma área cuja investigação perdura há cerca de meio século e o presente trabalho surge como uma contribuição, na medida em que apresenta o desenvolvimento de um equipamento, de baixo custo, capaz de interrogar sensores baseados em *gratings* de fibra ótica.

1.1 Objetivos

O desenvolvimento do presente trabalho teve como principais objetivos os seguintes tópicos:

- Estudo e diferenciação dos sensores em fibra ótica, dando particular atenção aos sensores baseados em *gratings*, sendo eles os *gratings* de período longo (LPG – *Long Period Grating*) e os *gratings* de Bragg (FBG – *Fiber Bragg Grating*);

- Análise das várias soluções existentes para interrogação de sensores em fibra baseados em *gratings*;
- Desenvolvimento em *hardware*, e *software*, de um circuito capaz de realizar interrogações a ambos os tipos de *gratings*, com recurso a um laser multimodo;
- Desenvolvimento de uma interface gráfica de utilizador que permita a interação desta com o circuito desenvolvido;
- Análise do desempenho do equipamento criado por meio de comparação com um equipamento comercial.

1.2 Organização da tese

O presente documento encontra-se repartido ao longo de oito capítulos. O primeiro e atual capítulo apresenta a introdução, na qual são apresentadas as motivações e objetivos propostos para a realização do trabalho.

No segundo capítulo é feita uma análise e diferenciação dos vários tipos de sensores em fibra ótica, categorizando-os também consoante a sua natureza. Sendo o principal foco deste projeto a interrogação espectral de sensores baseados em *gratings* de fibra ótica, foram estudados em detalhe dois sensores deste tipo: período longo e de Bragg. Para cada um foram estudadas as técnicas de fabrico mais comuns e os principais parâmetros aos quais estes sensores são sensíveis. Por fim, são ainda apresentadas diferentes técnicas de interrogação deste tipo de sensores.

No terceiro capítulo é feita uma análise aos diferentes analisadores de espectros existentes no mercado, descrevendo com maior pormenor os três tipos de analisadores de espectro mais comuns.

No quarto capítulo é explicado em detalhe o circuito desenvolvido para a criação de um equipamento de baixo custo para a realização de interrogações a sensores FBG ou LPG. Inicialmente é apresentada a lógica de funcionamento e, posteriormente, é feita uma descrição dos vários circuitos que compõem o equipamento. No final do capítulo é ainda realizada uma análise do custo do equipamento.

No quinto capítulo é descrito o trabalho realizado a nível de *software*. Este capítulo subdivide-se em duas partes, com a primeira a apresentar o trabalho efetuado a nível de programação do microcontrolador que controla o circuito, e a segunda a apresentar a interface gráfica de utilizador desenvolvida, que permite o controlo e leitura de valores provenientes do microcontrolador.

O sexto capítulo é constituído pelas caracterizações efetuadas tanto ao laser como ao fotodetector, por forma a estudar o seu comportamento sob diferentes condições de funcionamento.

No capítulo sete são apresentados os resultados obtidos, provenientes de interrogações efetuadas com o equipamento desenvolvido a *gratings* do tipo LPG. Estes resultados serão ainda comparados com um equipamento comercial, permitindo avaliar o desempenho do equipamento construído.

O oitavo e último capítulo apresenta as conclusões gerais e trabalhos futuros propostos, que permitam dar continuidade e implementação de melhorias ao equipamento desenvolvido.

2 Sensores em Fibra Ótica

2.1 Introdução

A indústria dos sensores em fibra ótica encontra-se em desenvolvimento há cerca de 50 anos e possui, atualmente, uma ampla área de atuação desde sensores de temperatura, monitorização da estabilidade de estruturas e implementação nas áreas da indústria química, médica e de telecomunicações.

As vantagens desta tecnologia centram-se na capacidade de apresentar grande sensibilidade a diversos parâmetros físicos, na natureza flexível da fibra, que permite a criação de sensores em diversas geometrias e, sendo a fibra constituída por um material dielétrico, pode ainda ser instalada em locais com elevada presença de interferência eletromagnética [1].

Para além destas, surgem também as seguintes vantagens face a outras tecnologias de sensores [1], [2]:

- Apresentam pequenas dimensões e baixo peso, facilitando a instalação em locais de volume reduzido;
- Resistência a condições ambientais;
- Não apresentam risco de contaminar o ambiente ou amostra de medição uma vez que são, geralmente, constituídos por material inerte;
- Para além da elevada sensibilidade, apresentam boa resolução e gama dinâmica;
- Podem ser combinados com sistemas de comunicação para transmissão dos dados.
- Permitem monitorização remota e distribuída;
- Capacidade de multiplexagem através da implementação de sensores em cascata para monitorização multi parâmetro;

Por outro lado, requerem equipamento específico e, em alguns casos, mão de obra especializada, elevando os custos associados à utilização desta tecnologia.

Um sensor em fibra é composto, normalmente, por quatro componentes principais sendo eles uma fonte ótica, tipicamente díodos laser ou LEDs (*Light Emitting Diode* ou Díodo Emissor de Luz), uma fibra ótica para propagação do sinal luminoso, um transdutor (que pode ser a própria fibra) que consiste no sensor propriamente dito, e que irá alterar as características da luz propagada na fibra em função do parâmetro mensurado, e um fotodetector que irá realizar a leitura da radiação luminosa na extremidade final da fibra.

A seguinte figura ilustra de forma clara esta configuração.

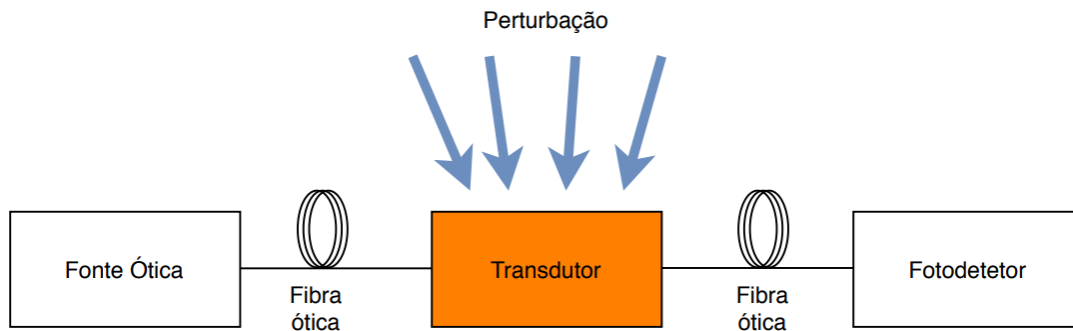


Figura 2.1 - Configuração típica de um sistema sensor em fibra ótica [1].

De acordo com a forma como a fibra é empregue num sensor de fibra ótica, estes podem ser divididos em duas grandes categorias: sensores intrínsecos e sensores extrínsecos [1].

Os sensores intrínsecos são aqueles em que a propagação da luz não sai da fibra ótica, atuando esta como o elemento transdutor. Para a utilização deste tipo de sensores é necessário que o parâmetro mensurado seja capaz de alterar uma, ou mais, características físicas da fibra, por forma a que a luz que por ela viaja sofra alguma alteração detetável pelo sistema de interrogação. É nesta categoria que se inserem os sensores abordados neste trabalho.

Nos sensores extrínsecos, a fibra ótica é somente utilizada para condução do feixe luminoso, desde a fonte ótica até ao transdutor e deste até ao fotodetetor. O transdutor surge então, nesta situação, como um elemento externo que modula as características da luz em função de variações do parâmetro mensurado de interesse.

Os sensores em fibra ótica assentam na base da modulação de uma ou mais características do feixe luminoso, proveniente da fonte ótica e que se propaga pela fibra, consoante a variação do parâmetro a medir. Assim, os sensores podem ser divididos em quatro categorias conforme a característica modulada no feixe. As categorias são as seguintes [3]:

- Modulação de intensidade;
- Modulação de fase;
- Modulação de polarização;
- Modulação de comprimento de onda.

Os sensores por modulação de intensidade foram dos primeiros a ser desenvolvidos, sendo também os mais simples tanto em termos de fabricação como de interrogação. Neste tipo de sensores, a luz viaja pela fibra e, ao chegar ao transdutor, a sua intensidade é modulada consoante o mensurado. Na extremidade oposta da fibra esta modulação é detetada, permitindo quantificar a variação do mensurado. Estes sensores necessitam de um mecanismo de referência para que as perdas a medir sejam exclusivamente devidas ao parâmetro de interesse, e não a outros fatores indesejáveis, tais como a variação da potência ótica na fonte, presença de conetores ou outros. Devido à

simplicidade de fabricação este tipo de sensores apresenta, tipicamente, um preço reduzido.

Nos sensores por modulação de fase, a medição é realizada por meio da variação de fase da luz que se propaga na fibra. A medição do desfasamento é realizada através da comparação da luz que se propaga por dois percursos distintos, sendo um deles afetado pelo mensurado.

Nos sensores baseados na modulação de polarização, como o próprio nome indica, são detetadas alterações na polarização do feixe. Nas fibras convencionais dá-se, de forma natural, uma variação de polarização devido à presença de heterogeneidades no material. A variação de fatores externos, como por exemplo a temperatura e estiramento, provocam uma influência adicional. Também neste tipo de sensores, é necessário arranjar um mecanismo que distinga a variação da polarização devido ao mensurando de outros fatores indesejáveis. As variações de polarização podem, também, ser medidas através de sensores óticos que as traduzem para variações de intensidade.

Por fim, os sensores por modulação de comprimento de onda exibem mudanças de comportamento espetrais quando sujeitos a variações do mensurado. Estas variações podem ser detetadas, por exemplo, através de analisadores de espetro.

É nesta última categoria que se inserem os sensores abordados neste trabalho. Este tipo de sensores, cujo funcionamento será aprofundado de seguida, podem ser baseados na aplicação de variações periódicas do índice de refração numa fibra ótica, denominados de *gratings*. Este procedimento torna estas fibras em filtros rejeita banda, cujas frequências / comprimentos de onda rejeitados variam consoante variações do mensurado.

2.2 Sensores baseados em *Gratings* em Fibra Ótica

Tal como foi referido no capítulo anterior, o tipo de sensores utilizados ao longo deste trabalho consiste em sensores intrínsecos baseados em modulação de comprimento de onda. Este tipo de sensores resulta da imposição de deformações, que alteram de forma periódica o índice de refração da fibra (criando uma rede ou *grating*), promovendo o acoplamento entre modos que nela se propagam.

Espetralmente, este comportamento irá originar picos de atenuação nos comprimentos de onda que respeitem uma condição de ressonância, correspondendo ao acoplamento entre modos da fibra. Estes picos de atenuação irão apresentar variações em termos de amplitude e do comprimento de onda em função de fatores externos, tais como temperatura, estiramento, curvatura, índice de refração, entre outros. Estas fibras podem, então, ser vistas como filtros rejeita banda, cujos comprimentos de onda (ou frequências) rejeitados serão

aqueles que verifiquem a condição. Desta forma, a fibra comportar-se-á como um sensor sendo capaz de medir variações daqueles domínios [4].

Dada esta característica de rejeitar certas bandas espectrais, a tecnologia dos *gratings* de fibra tem também utilidade na área das telecomunicações óticas. Aqui, apresentam funções de filtragem, alisamento de ganho, acoplamento entre fibras e compensação de dispersão [5].

Para além disso, o comportamento destes dispositivos poderá ser controlado, visto que são sensíveis aos parâmetros anteriormente mencionados. Como tal, um filtro baseado nesta tecnologia poderá ter as suas bandas de rejeição alteradas por meio de um controlo da temperatura do ambiente em que está inserido, tornando-se sintonizável.

A criação de um *grating* numa fibra ótica foi primeiramente demonstrada por Hill *et al.* [6] em 1978, caracterizando-se por ser um *grating* do tipo Bragg (FBG – *Fiber Bragg Grating*). Só em 1996, Vengsarkar [7] realizou o primeiro *grating* de período longo (LPG – *Long Period Grating*) numa fibra ótica.

Podem então ser distinguidos dois tipos de *gratings* que irão apresentar diferenças no seu período, ou seja, na distância entre duas modulações consecutivas do índice de refração, e nos modos que serão acoplados. Estes dois tipos são denominados de *gratings* de Bragg e de período longo.

O primeiro caracteriza-se por ser fabricado com períodos inferiores a 1 μm , ou seja, da ordem de grandeza da luz propagada. O acoplamento dos modos resulta em modos que se propagam em sentido contrário à luz original. Por outras palavras, irá ocorrer uma reflexão do modo do núcleo ao interagir com o *grating*, propagando-se em sentido contrário [8].

Os *gratings* de período longo, e tal como o nome sugere, apresentam períodos de *grating* longos, na ordem dos 100 μm a 1 mm. Neste tipo de *grating* o acoplamento dá-se entre o modo fundamental do núcleo e os modos de bainha que se propagam na mesma direção. A atenuação provocada pelo acoplamento dos modos é resultado de fenómenos de absorção e espalhamento na interface bainha – exterior [9].

2.2.1 Princípio de Operação

Tal como foi referido anteriormente, para que se promova o acoplamento entre os modos de propagação na fibra, é necessário que seja verificada a condição de ressonância, também denominada de *phase matching condition* [7].

Esta condição é dada pela seguinte expressão genérica [10]:

$$\beta_1 - \beta_2 = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (2.1)$$

Sendo Λ o período do *grating* e β_n a constante de propagação do modo n , que pode ser calculada por [11]:

$$\beta_n = \frac{2\pi n_{eff,n}}{\lambda_{res}} \quad (2.2)$$

Aqui $n_{eff, n}$ representa o índice de refração efetivo do modo n , e λ_{res} o comprimento de onda.

Combinando ambas as expressões é possível representar a condição de ressonância em termos do comprimento de onda ressonante [8]:

$$\lambda_{res} = (n_{eff,1} - n_{eff,2})\Lambda \quad (2.3)$$

A presença destas perturbações periódicas dará origem a reflexões e refrações de Fresnel na interface dos *gratings* que, para um dado período de *grating* e comprimento de onda, dará origem a interferências construtivas e, conseqüentemente, ao acoplamento dos modos.

2.3 Gratings de Período Longo

Nos *gratings* de período longo, o acoplamento entre modos é realizado entre o modo fundamental do núcleo, LP_{01} , e os modos de bainha, LP_{0m} , a propagarem-se na mesma direção, sendo m a ordem do modo de bainha. A seguinte figura ilustra a situação [9].

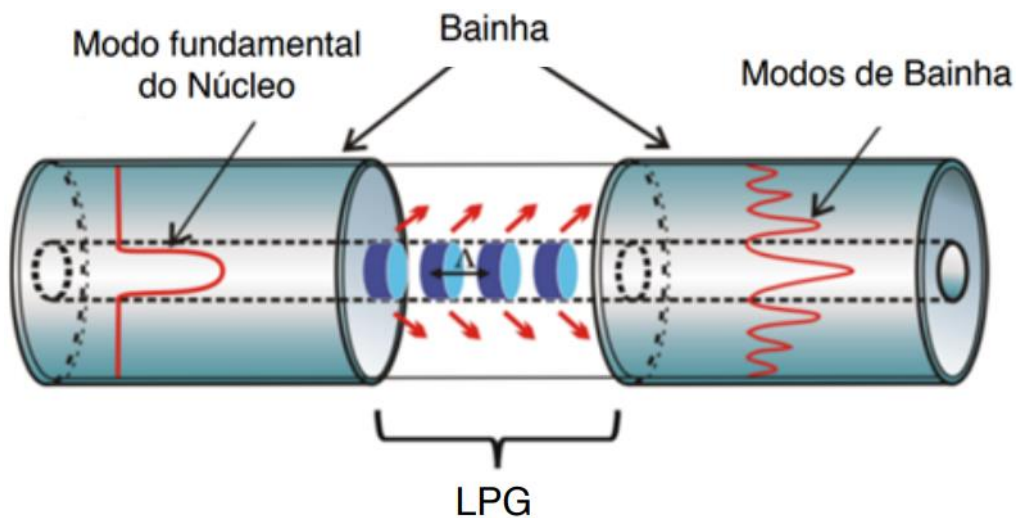


Figura 2.2 - Esquema representativo de um *grating* de período longo.

Efetuada um corte transversal numa fibra após o LPG, o comportamento observado da distribuição dos modos assemelha-se ao seguinte [4].

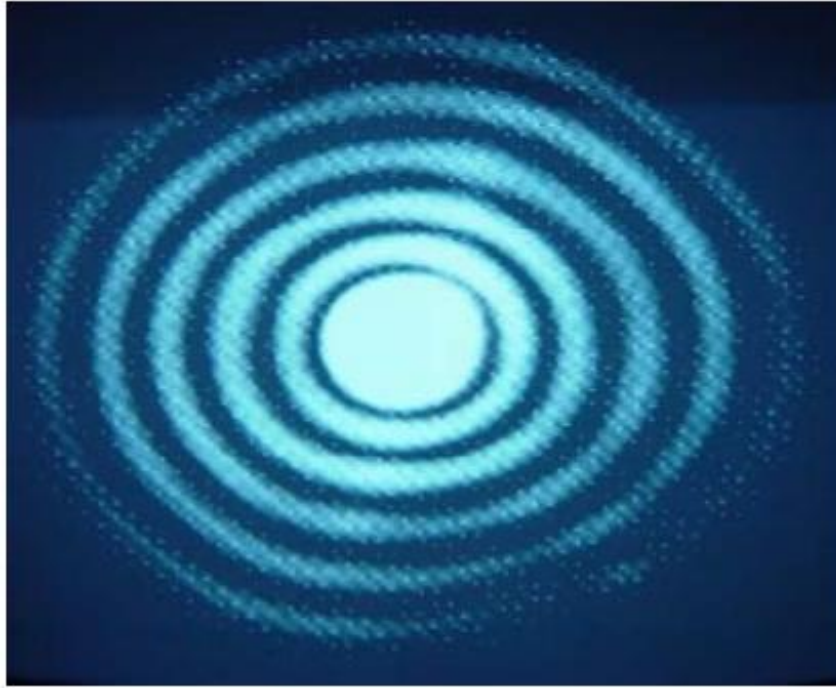


Figura 2.3 – Distribuição radial da energia do modo LP_{07} num *grating* de período longo.

Recorrendo à equação genérica (2.1) e aplicando-a aos LPG resulta [7]:

$$\beta_{01}^{co} - \beta_m^{cl} = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (2.4)$$

Onde os subscritos “co” e “cl” significam *core* (núcleo) e *cladding* (bainha). Da mesma forma, é também possível adaptar a expressão (2.3) para esta situação [9]:

$$\lambda_{res} = (n_{01}^{co} - n_m^{cl})\Lambda \quad (2.5)$$

Uma característica interessante dos LPG é que, para um *grating* apresentando um determinado período, a equação anterior pode ser satisfeita para diferentes comprimentos de onda.

Esta situação deve-se ao facto de existirem múltiplos modos de bainha possíveis, fazendo com que, por exemplo, um *grating* acople um comprimento de onda λ_1 a um modo LP_{0m} e, ao mesmo tempo, satisfaça a condição para acoplar um outro comprimento de onda λ_2 a um outro modo LP_{0n} .

Este comportamento traduz-se, espectralmente, por uma série de atenuações quase discretas em comprimentos de onda bem definidos. Na figura abaixo é apresentado um exemplo do espectro de um *grating* [7].

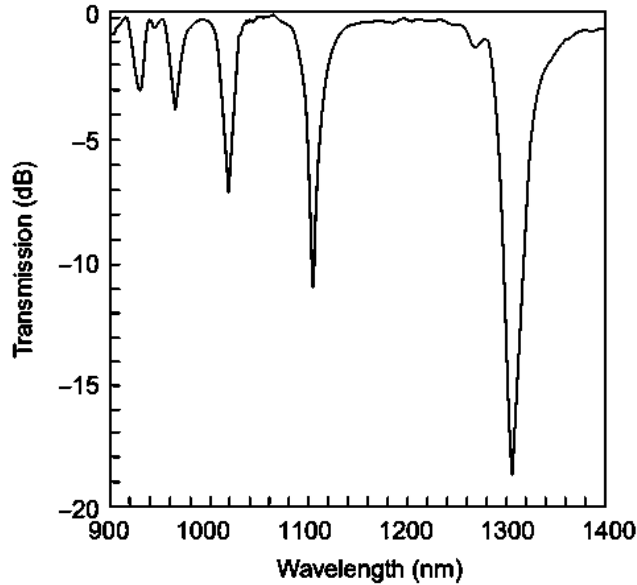


Figura 2.4 - Exemplo do comportamento espectral de um grating de período longo.

Uma vez que o acoplamento se dá entre modos que se propagam na mesma direção, a parcela da diferença presente na equação (2.5) será pequena comparativamente à situação dos *gratings de Bragg* (apresentados no subcapítulo seguinte). Como tal, a satisfação da equação requer, para uma mesma fibra e comprimento de onda, períodos de *grating* superiores comparativamente aos *gratings* de Bragg. Devido a este último fator são também mais simples de fabricar, o que ao mesmo tempo representa menores custos [12].

O comprimento do *grating* terá influência na potência acoplada a um dado modo de bainha de ordem m . A seguinte expressão permite representar este comportamento [7]:

$$\frac{P_m^{cl}(L)}{P_{01}^{co}(0)} = \frac{\sin^2 \left[kL \sqrt{1 + \left(\frac{\delta}{k} \right)^2} \right]}{1 + \left(\frac{\delta}{k} \right)^2} \quad (2.6)$$

Sendo P a potência, L o comprimento do *grating* e δ o parâmetro de “*detuning*” dado por:

$$\delta = \frac{1}{2} \left(\beta_{01}^{co} - \beta_m^{cl} - \frac{2\pi}{\Lambda} \right) \quad (2.7)$$

A variável k denomina-se de coeficiente de acoplamento e, tipicamente, este valor é maximizado para promover o melhor acoplamento possível. Esta variável é diretamente proporcional à variação do índice de refração provocado na fibra.

Desta forma, a potência acoplada a um dado modo de bainha irá apresentar um comportamento oscilatório em função do comprimento do *grating*.

2.4 Gratings de Bragg

Neste tipo de *gratings*, e no caso de uma fibra monomodo, o acoplamento dá-se entre o modo núcleo LP₀₁ a propagar-se no sentido direto, isto é, a afastar-se da fonte, e o modo LP₀₁ a propagar-se em sentido contrário [10].

A seguinte figura ilustra este comportamento [13].

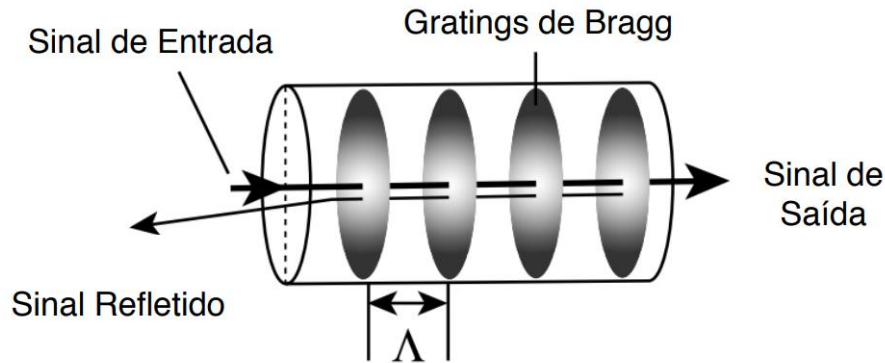


Figura 2.5 - Esquema representativo de um *grating* de Bragg.

Para satisfazer a condição de ressonância, nestas circunstâncias temos que [10]:

$$\beta_2 = -\beta_1 \quad (2.8)$$

As constantes de propagação terão o mesmo valor absoluto, visto o índice de refração efetivo ser o mesmo. No entanto, devido ao facto da direção de propagação ser oposta, resultante da reflexão provocada, há uma inversão da polaridade da constante de propagação.

Com base nesta afirmação, para os *gratings* de Bragg a condição de ressonância (2.3) pode ser reescrita da seguinte forma [14]:

$$\lambda_{res} = 2n_{01}^{co}\Lambda \quad (2.9)$$

Sendo n_{01}^{co} o índice de refração efetivo do núcleo. Uma vez que as constantes de propagação são simétricas e, para satisfazer a condição (2.8), é necessário a utilização de períodos bastante reduzidos. Por este motivo, o processo de fabrico deste tipo de sensores requer uma estabilidade bastante rigorosa, exigindo equipamento mais caro [10].

O comprimento do *grating* terá influência na sua refletividade, cuja expressão é dada por [14]:

$$Ref = \tanh^2(kL) \quad (2.10)$$

Sendo L o comprimento do *grating* e k o coeficiente de acoplamento. Pela equação verifica-se que quanto maior o comprimento do *grating*, maior será a refletividade do mesmo e, por conseguinte, maior será a atenuação nesse comprimento de onda.

Uma característica desta tecnologia como sensor é a menor sensibilidade a variações de temperatura e ações mecânicas, quando comparada com a tecnologia dos *gratings* de período longo [10].

2.5 Técnicas de Fabrico

Ao longo do tempo várias foram as técnicas desenvolvidas para a criação de *gratings* em fibra, naturalmente apresentando cada uma as suas características em termos de facilidade de fabrico, custo e natureza.

De seguida apresentam-se as técnicas mais utilizadas.

2.5.1 Luz ultravioleta

Este método de fabrico baseia-se num processo de fotolitografia por meio da exposição da fibra ótica a uma luz ultravioleta, através de uma máscara de fase. Esta máscara de fase apresenta ranhuras periódicas, cuja distância entre si permite a modulação periódica do índice de refração da fibra [15]. Esta técnica de fabrico pode ser utilizada tanto para a fabricação de *gratings* de período longo como de Bragg [16].

Os comprimentos de onda utilizados neste método estão, tipicamente, entre os 228 – 253 nm. A criação dos *gratings* por este método dá-se por meio de reações fotoquímicas no núcleo do material da fibra, provocando variações no seu índice de refração [17].

A seguinte figura ilustra o funcionamento da máscara de fase.

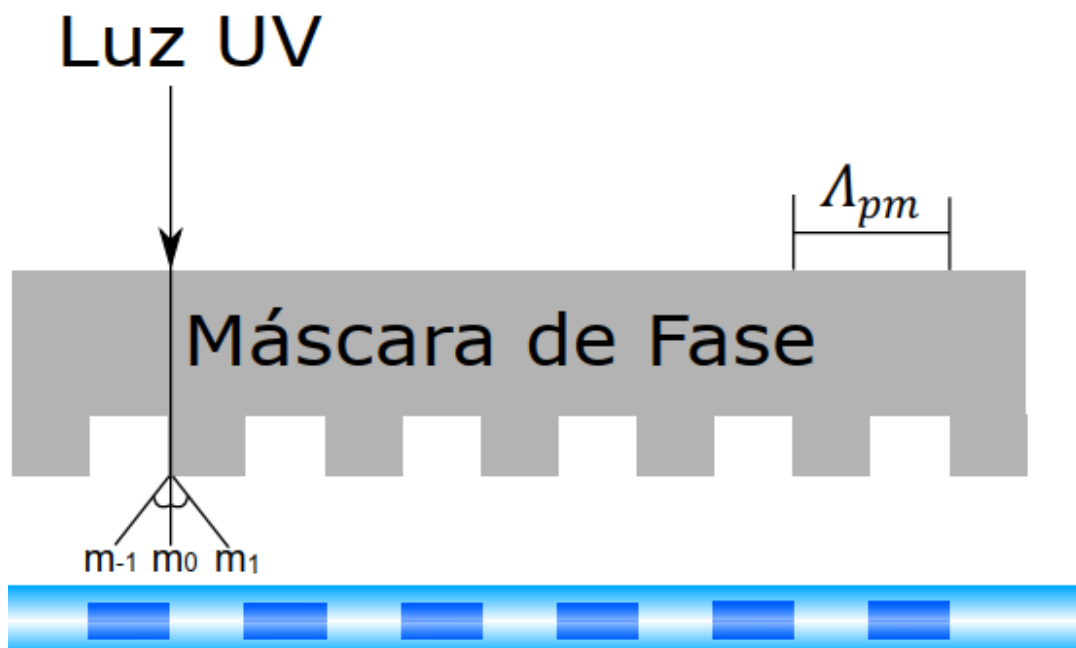


Figura 2.6 – Criação de um *grating* de período longo por meio de máscara de fase, segundo a incidência normal de luz ultravioleta [18].

A incidência normal de luz ultravioleta sobre a máscara de fase dá origem a um fenômeno de difração, da qual surgem três raios difratados dados pela ordem $m = \{-1, 0, 1\}$. A geometria da máscara é realizada por forma a reduzir a intensidade do raio de ordem 0, fazendo com que os *gratings* na fibra sejam criados pela interferência dos raios difratados de ordem -1 e 1 adjacentes. A fibra é colocada quase em contacto com a máscara, o que permite minimizar a influência de possíveis perturbações mecânicas externas [18].

A equação que caracteriza o período de *grating* com o período da máscara é dada por [18]:

$$\Lambda = \frac{\Lambda_{pm}}{2} \quad (2.11)$$

Sendo Λ o período de *grating* e Λ_{pm} o período da máscara de fase.

Para a implementação desta técnica é necessário que o núcleo da fibra seja fotossensível, caso contrário não se irão observar as modulações periódicas do índice de refração. Este fator torna o método por luz ultravioleta mais adequado para fibras, por exemplo, dopadas com elevadas concentrações de germânio, o que lhes concede elevada fotossensibilidade [15].

Para fibras que não apresentem esta característica é possível submetê-las a um processo de exposição a gás de hidrogénio, a baixas temperaturas e altas pressões [19], [20]. Esta técnica deverá ser acompanhada de um posterior tratamento da fibra a elevadas temperaturas, para promover uma difusão mais rápida das moléculas de hidrogénio que não reagiram durante o processo. Caso contrário, dar-se-á uma difusão mais lenta, que poderá demorar várias semanas, observando-se uma variação gradual dos picos de ressonância do *grating* [21].

As maiores vantagens desta técnica consistem na elevada reprodutibilidade, não exige um alinhamento tão rigoroso e o processo não apresenta grande sensibilidade em termos de vibrações externas. Para além disso, é possível a criação de múltiplos *gratings*, colocando várias fibras em paralelo sob a mesma máscara [16], [18].

2.5.2 Laser de fentossegundos

Esta técnica permite a criação de *gratings* (de período longo ou de Bragg [22]) nas fibras fazendo uso de um laser que atua na região do infravermelho ou ultravioleta (neste caso necessitando de uma fibra fotossensível).

No caso do laser infravermelho, ao contrário do laser UV com máscara de fase, pode ser diretamente utilizado sobre uma fibra que não apresente fotossensibilidade, sendo esta uma das suas vantagens [23].

Um esquema de montagem típico para esta implementação passa pela focagem e orientação do feixe do laser na fibra, através de lentes e espelhos refletores. A seguinte figura ilustra um exemplo de implementação.

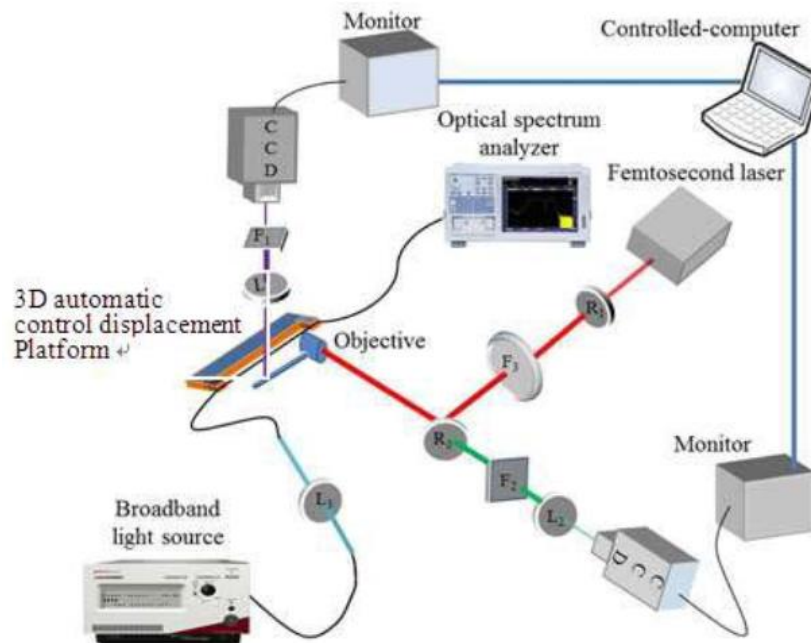


Figura 2.7 - Esquema de montagem para a utilização de um laser de femtossegundos para a criação de um LPG sob uma técnica ponto por ponto [23].

Poderão também ser utilizados filtros de densidade neutra para controlar a intensidade do feixe que atinge a fibra.

Como o próprio nome sugere, os *gratings* são criados por meio de impulsos cuja duração varia entre algumas dezenas de femtossegundos a algumas centenas, e cuja energia se encontra na ordem dos μJ . Esta quantidade de energia, quando focada no núcleo da fibra, funde-o. No entanto, uma vez que esta energia é limitada, o núcleo volta a solidificar quase instantaneamente. Este procedimento altera a estrutura do material no ponto de focagem, aumentando o seu índice de refração [24].

Na configuração apresentada são ainda utilizadas duas câmaras para auxiliar o alinhamento entre a fibra e o raio laser, sendo o procedimento controlado por computador.

Para além disto, é utilizada uma fonte de espectro largo e um analisador de espectros ótico que mede, constantemente, a resposta espectral da fibra consoante o comprimento do *grating*.

A criação dos *gratings* sucessivos é feita por meio da translação da fibra, que se encontra numa superfície móvel, segundo um eixo normal à direção do raio incidente. A distância de translação será igual ao período pretendido para o *grating*.

Uma vez que as alterações periódicas são criadas individualmente, esta técnica classifica-se como sendo do tipo ponto por ponto.

A grande dificuldade deste método centra-se no alinhamento da fibra, que terá grande influência na resposta espectral resultante [25].

Para a situação em que são utilizados lasers UV, as fibras que forem tratadas por meio de exposição a gás de H₂ deverão passar por um processo de cura para garantir estabilidade [26], [27].

2.5.3 Laser de CO₂

Este método assemelha-se ao anterior, sendo que partilha das mesmas vantagens no que refere ao facto de não ser necessária a utilização de fibras fotossensíveis, nem a utilização de máscaras de fase. A fibra é colocada sobre uma plataforma móvel que a irá mover segundo um eixo normal ao feixe de um laser de CO₂, consistindo numa técnica de fabrico de *grating* ponto por ponto. Para além disso, esta técnica pode também ser utilizada tanto para a fabricação de *gratings* de período longo como de Bragg.

É, novamente, utilizada uma fonte de espectro largo numa das extremidades da fibra e um analisador de espectros ótico na extremidade oposta, por forma a ser possível a monitorização da resposta espectral resultante, à medida que se forma o *grating*.

O seguinte esquema foi utilizado por Chen *et al.* [28] numa fibra de sílica dopada com Nb/Al, no qual é utilizado um peso de 10 g para evitar a presença de curvaturas na fibra durante o processo de criação do *grating*.

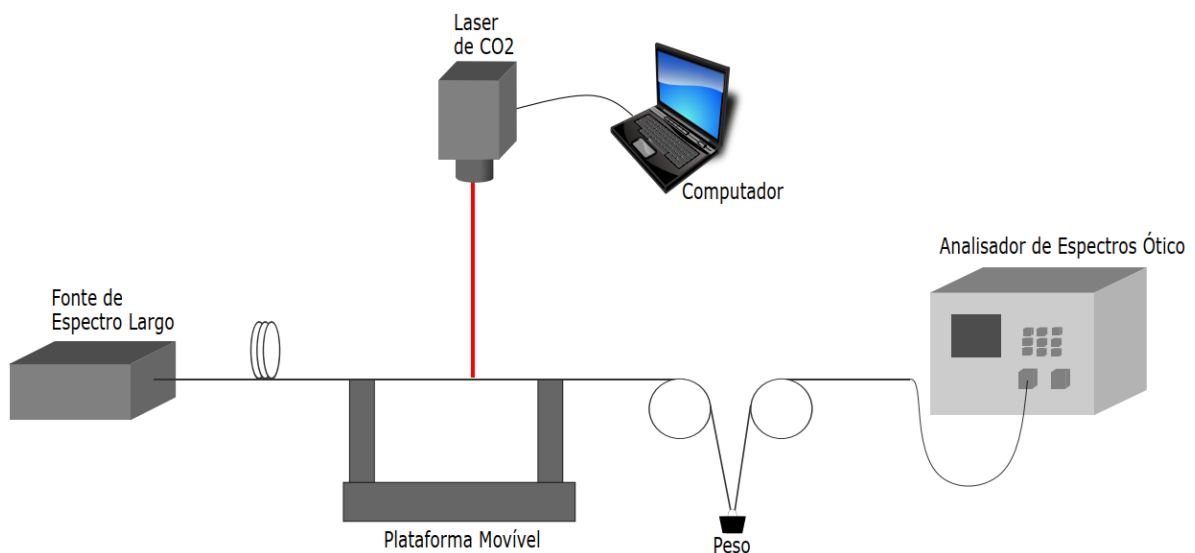


Figura 2.8 - Esquema de montagem para execução de um *grating* com um laser de CO₂.

O mecanismo de formação de *gratings* presente nesta técnica baseia-se no efeito térmico, provocando um aumento da densidade da sílica e redução de *stresses* intrínsecos do material, o que por sua vez provoca um aumento do

índice de refração nas zonas atingidas pelo laser [29]. Dependendo da intensidade do laser e do tempo de exposição é possível alterar as características do *grating*.

Geralmente, nesta técnica, ocorre uma modulação assimétrica do índice de refração, pois o lado da fibra mais próximo do laser estará mais sujeito à radiação. Em [30] é apresentada uma solução que consiste numa plataforma que permite a rotação da fibra durante a exposição à radiação, permitindo uma modulação simétrica do índice de refração.

2.5.4 Deformação mecânica

O método de deformação mecânica consiste em promover uma modulação do índice de refração da fibra por meio de ação mecânica, graças à existência de um fator elasto ótico. Este fator caracteriza o comportamento da fibra em termos de variação do índice de refração, quando esta está sujeita a forças mecânicas externas [31].

Para a criação de *gratings* segundo esta técnica poderá ser utilizada uma configuração semelhante à seguinte.

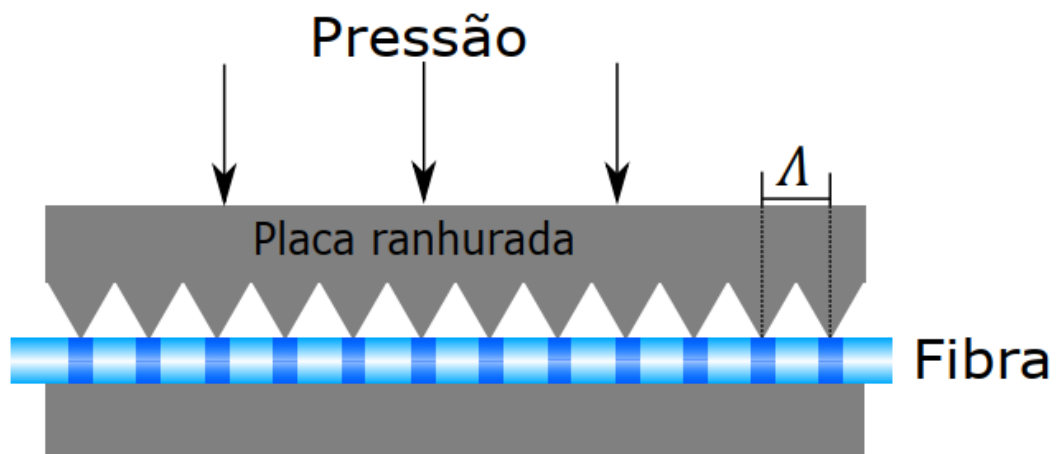


Figura 2.9 - Deformação mecânica de uma fibra por meio de uma placa ranhurada para a criação de um *grating* [31].

Nesta configuração a fibra é colocada entre uma placa ranhurada, cuja distância entre ranhuras representa o período de *grating*, e uma placa lisa. Ao ser aplicada pressão na placa superior, será induzida uma deformação mecânica sobre a fibra que, por meio do efeito elasto ótico, dará origem a uma modulação do índice de refração.

Uma característica particular deste método é que o aumento da pressão sobre a fibra permite o ajuste do acoplamento entre modos, aumentando ou reduzindo as atenuações espectrais nas regiões de ressonância [31]–[33].

Enquanto que nos métodos apresentados anteriormente a modulação do índice de refração da fibra dava-se de forma permanente, na técnica por

deformação mecânica o *grating* apenas existe enquanto está a ser aplicada pressão sobre a placa ranhurada. Esta característica pode representar uma vantagem comparativamente aos métodos anteriores, visto que a fibra poderá ser reutilizada e um *grating* mal executado não obriga ao descarte desta.

Uma outra grande vantagem deste método é que o período de *grating* poderá ser ajustado através de uma variação angular da fibra em relação a um eixo normal à superfície das placas [31].

2.5.5 Implantação iónica

Nesta técnica, a modulação periódica do índice de refração da fibra é realizada por meio da implantação de iões de hélio (He^{2+}) no núcleo da fibra.

O processo passa por colocar a fibra no interior de uma câmara de vácuo, sendo bombardeada com os iões que atravessam uma máscara de fase metálica e penetram na fibra. Desta forma, a máscara deverá possuir ranhuras periódicas, tal como na técnica com ultravioleta, para permitir que os iões apenas se depositem nos locais pretendidos [34].

Se for utilizada uma máscara de fase com ranhuras de período suficientemente pequeno, esta técnica poderá também ser utilizada para criação de *gratings* de Bragg [34].

Uma outra técnica baseia-se na utilização de um raio iónico, focado sobre a fibra na qual os *gratings* são inscritos um a um, seguindo uma metodologia ponto por ponto. Aqui, a fibra é colocada sobre uma superfície de translação, sendo deslocada de uma distância igual ao período de *grating*, à medida que é bombardeada com os iões [35].

Em ambas as técnicas, a modulação do índice de refração ocorre devido a reações que ocorrem entre o material da fibra e os iões de He, o que provoca uma compactação do material no local onde ficam depositados. Portanto, para que os iões se depositem no núcleo da fibra e não na bainha, poderá ser necessário recorrer a um processo de *etching*, reduzindo a dimensão da bainha e permitindo que os iões cheguem ao núcleo e nele se depositem.

A deposição dos iões na bainha é indesejada, visto que poderá dar origem a perdas significativas na propagação da luz na fibra [34].

Este método apresenta a vantagem de não necessitar de fibras fotossensíveis, podendo ser aplicado a uma elevada variedade de fibras. Outra grande vantagem deve-se à relação linear entre a amplitude de modulação do índice de refração e a quantidade de iões injetados, permitindo um elevado controlo nesse aspeto.

2.5.6 Arco elétrico

A técnica com recurso a um arco elétrico é das técnicas mais utilizadas pois pode ser aplicada a qualquer fibra, apresenta elevada flexibilidade, uma vez que cria os *gratings* sob a técnica ponto por ponto, e possui um custo baixo quando comparado com técnicas como luz UV, laser de femtossegundos e CO₂.

Neste método a fibra é colocada numa máquina de *splice* e de forma equidistante entre os dois elétrodos da máquina. Por sua vez, é submetida à passagem de um arco elétrico cuja corrente se situa, tipicamente, entre os 7 e os 15 mA e durante 200 ms a 2 s, por cada ponto. Posteriormente, a fibra ou os elétrodos são deslocados de uma distância igual ao período de *grating*. Este processo repete-se tantas vezes quantas as necessárias para atingir o comprimento de *grating* pretendido [36].

A figura que se segue ilustra o processo no qual são movidos os elétrodos, ficando a fibra fixa na mesma posição.

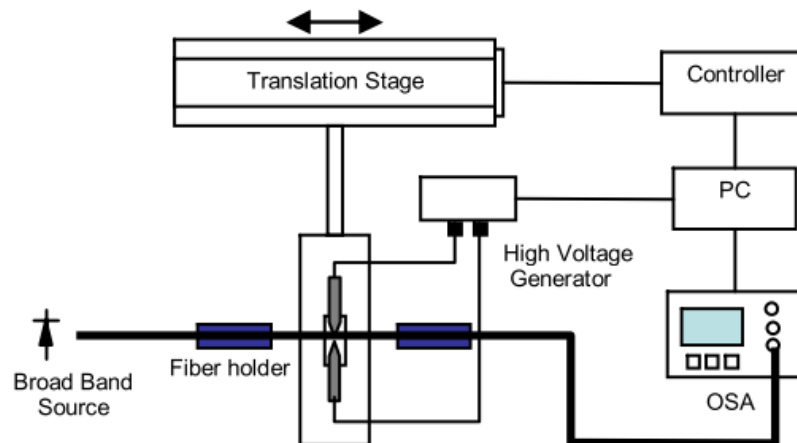


Figura 2.10 - Exemplo de um esquema de montagem para fabricação de *gratings* pela técnica do arco elétrico [37].

Numa das extremidades da fibra pode ainda ser colocado um peso, cuja massa anda em torno de algumas gramas, criando uma ligeira tensão evitando possíveis microcurvaturas que poderão interferir no processo. A presença desta massa irá simultaneamente formar uma estrutura tipo *taper* na fibra, reduzindo o seu diâmetro. Maior será a redução quanto maior for a corrente e massa aplicada à fibra.

Na alternativa em que a fibra é movimentada, esta é sobreposta numa carruagem micrométrica e tensionada pelo peso. A carruagem move-se, sucessivamente, com distâncias equivalentes ao período de *grating*. A cada movimento é aplicada uma descarga elétrica, criando o *grating*.

Em [38] foi estimado que, durante este processo, a fibra é capaz de atingir cerca de 1350°C em menos de 1 s. Tais valores de temperatura irão provocar gradientes na fibra que, por sua vez, poderão criar uma sobreposição de *gratings*, sendo esta uma situação indesejável.

Este motivo exige que a escolha do valor de corrente e tempo de exposição a aplicar sobre a fibra seja extremamente criteriosa, por forma a criar *gratings* de boa qualidade.

Ainda por este motivo, a técnica por arco elétrico limita a criação de *gratings* com períodos pequenos. Em [39] foi possível atingir valores considerados bastante baixos para esta técnica, sendo de 148 μm e 197 μm para uma fibra da Fibercore (PS 1250/1550) codopada com B/Ge e uma fibra da Corning (SMF28), respetivamente. Este resultado foi atingido por meio do desenvolvimento de uma fonte de alimentação de alta tensão, cuja corrente fornecida apresentava elevada estabilidade.

Neste método de fabrico, para além dos modos simétricos LP_{0m} acoplados à bainha, poderá haver também acoplamento de modos assimétricos, nomeadamente modos LP_{1n} . A teoria mais aceite, que tenta explicar o processo por detrás desta situação, é dada pelo facto de o arco elétrico não ser constante ao longo da sua propagação entre ambos os elétrodos, dando origem a alterações assimétricas na viscosidade no material. Isto, por sua vez, provoca deformações assimétricas no material [40].

Relativamente aos mecanismos de formação dos *gratings*, são também várias as teorias que os tentam explicar. Os mecanismos propostos na literatura ao longo dos anos são os seguintes [4]:

- Difusão de dopantes do núcleo;
- Reestruturação do material da fibra provocada pela variação de temperatura;
- Relaxamento de stresses intrínsecos do material;
- Deformação geométrica pelo surgimento de microcurvaturas e de estruturas tipo *taper*.

Uma das desvantagens desta técnica deve-se à limitação em termos de período mínimo de *grating*, impedindo o acoplamento de modos de ordem superior que são, geralmente, mais sensíveis. Outra desvantagem é a reprodutibilidade pois, fatores externos como a humidade e a degradação dos elétrodos por meio de oxidação têm influência sobre o arco elétrico formado.

2.6 Mecanismos de sensibilidade dos *Gratings* em Fibra Ótica

Os sensores baseados na tecnologia dos *gratings*, inscritos em fibra ótica, têm ganho grande interesse devido às baixas atenuações, dimensão reduzida e imunidade a interferência eletromagnética. Dada a sua pequena dimensão, têm grande utilidade também na análise de pequenos volumes.

Para além disso, podem ser sensíveis, entre outros, ao estiramento e índice de refração, e, naturalmente, também à temperatura.

Devido às suas vantagens, este tipo de sensores tem vindo a ganhar alguma maturidade, ao longo dos anos, através de várias implementações em larga escala.

Na área da construção civil surgem em aplicações de monitorização, durante e após a construção, sendo utilizados com funções de monitorização da estrutura. Uma das primeiras implementações efetuadas neste âmbito foi na ponte Beddington Trail, em Alberta, no Canadá.

Nesta instalação foram utilizados 16 sensores baseados em *gratings* de Bragg, instalados em pontos críticos da ponte. Estes 16 sensores permitem a monitorização remota da sua integridade estrutural [41].

Também na indústria da aviação esta tecnologia é atrativa, sobretudo devido ao seu baixo peso, capacidade de instalação de centenas de sensores numa única fibra e não serem potencialmente geradores de incêndio, no caso de uma quebra da fibra ótica.

Betz [42] demonstrou o potencial desta tecnologia na área da aviação ao instalar 8 sensores de estiramento e 6 de temperatura na fuselagem de um Airbus A340-600. Para validação dos resultados, os valores obtidos dos sensores foram comparados com a instrumentação adequada e os resultados apresentaram elevada consistência.

Entre outras inúmeras aplicações é possível, por exemplo, a deteção da presença de microrganismos, determinação da concentração e pH de soluções [43].

2.6.1 Sensores baseados em LPG

A seguinte expressão genérica permite caracterizar o comportamento de um LPG, em termos da variação do seu comprimento de onda ressonante, perante a variação dos parâmetros atrás mencionados, temperatura, estiramento e índice de refração [1]:

$$\Delta\lambda_{res} = \left(\frac{d\lambda_{res}}{dT}\right)\Delta T + \left(\frac{d\lambda_{res}}{d\varepsilon}\right)\Delta\varepsilon + \left(\frac{d\lambda_{res}}{dn_{ext}}\right)\Delta n_{ext} \quad (2.12)$$

Sendo $d\lambda_{res}/dT$, $d\lambda_{res}/d\varepsilon$ e $d\lambda_{res}/dn_{ext}$ a sensibilidade do LPG em termos de temperatura, estiramento e variações do índice de refração externo, respetivamente.

Estas características tornam estes dispositivos adequados para implementação de sensores multi parâmetros ou de medição de parâmetros individuais.

Comparando a tecnologia dos LPG com os FBG, o primeiro apresenta, tipicamente, maior sensibilidade a variações de temperatura, ações mecânicas

externas e índice de refração externo. Para além disso, a sua fabricação é mais acessível dado que os períodos de *grating* são maiores, não necessitando de elevada exatidão nem de equipamento mais complexo.

Apresenta-se, de seguida, uma análise teórica dos mecanismos responsáveis pela variação da resposta espectral dos LPG, provocada pela alteração das condições ambientais externas.

2.6.1.1 Sensor de Temperatura

Com base na expressão (2.5), a variação do comprimento de onda de ressonância de um LPG, em função da variação da temperatura, pode ser representada por [44]:

$$\frac{d\lambda_{res}}{dT} = \frac{d\lambda_{res}}{d(n_{01}^{co} - n_m^{cl})} \frac{d(n_{01}^{co} - n_m^{cl})}{dT} + \frac{d\lambda_{res}}{d\Lambda} \frac{d\Lambda}{dT} \quad (2.13)$$

Uma vez que o segundo termo da expressão é influenciado pela dilatação ou compressão da fibra, dependendo do sentido da variação da temperatura, é possível reescrevê-lo em função da variação comprimento do grating, L . Sendo $dL/L = d\Lambda/\Lambda$, expressão final resultante fica:

$$\frac{d\lambda_{res}}{dT} = \frac{d\lambda_{res}}{d(n_{01}^{co} - n_m^{cl})} \frac{d(n_{01}^{co} - n_m^{cl})}{dT} + \Lambda \frac{d\lambda_{res}}{d\Lambda} \frac{1}{L} \left(\frac{dL}{dT} \right) \quad (2.14)$$

Desta expressão podemos observar que existem dois mecanismos responsáveis pela variação do comprimento de onda em função da temperatura. O primeiro, apresentado no primeiro termo do lado direito da equação, refere-se à variação dos índices de refração efetivos do núcleo e dos modos de bainha em função da temperatura, sendo chamado de contribuição do material. Esta variação é causada pelo fenómeno termo ótico e depende ainda do modo de bainha considerado.

O segundo termo consiste no chamado efeito de guia de onda, e baseia-se na alteração do período de *grating* com a temperatura. O termo “ $1/L (dL / dT)$ ” é o coeficiente de expansão térmico normalizado da fibra. Um aumento ou redução do período de *grating* irá, naturalmente, dar origem a um desvio dos comprimentos de onda ressonantes. Esta variação é causada pelo fenómeno termo elástico.

Nas fibras de sílica, a contribuição do material (variação dos índices de refração efetivos) é, tipicamente, dominante uma vez que o efeito de guia de onda (variação do período de *grating*) é comparativamente pequeno, resultado do baixo coeficiente de expansão térmico. Como tal, nesta situação, a sua sensibilidade a variações de temperatura estará fortemente dependente dos seus coeficientes termo óticos [29].

C. Du *et al.* [45] apresentaram um sensor de temperatura num LPG escrito numa fibra de sílica. O *grating* foi criado através do método de arco elétrico e com um período de 400 μm , por forma a evitar a sobreposição de *gratings*. Posteriormente, foi observada a sensibilidade do sensor na gama de temperatura dos 30 – 80 $^{\circ}\text{C}$, para a qual foi obtida uma sensibilidade de 69,6 $\text{pm}/^{\circ}\text{C}$.

No entanto, nem sempre é desejável que o LPG seja sensível a variações de temperatura. Isto acontece em situações nas quais se pretende reduzir as sensibilidades cruzadas, ou para aplicações para as quais o sistema não deve alterar o seu comportamento com a variação da temperatura.

Uma possível técnica para tornar um LPG insensível à variação de temperatura é o seu cobrimento com um polímero que contrarie a contribuição do material. Isto implica que o polímero apresente um coeficiente termo ótico que torne verdadeira, ou aproxime, a condição $dn_{co}/dt = dn_{cl}^m/dt$. Esta técnica foi utilizada por Jang *et al.* [46] onde foi aplicado um polímero sobre a bainha, tendo sido obtido um LPG com uma sensibilidade de 0,7 $\text{pm}/^{\circ}\text{C}$. A dificuldade desta técnica centra-se na sintetização do polímero adequado.

Outra solução é apresentada em [47], na qual é feita a dopagem do núcleo da fibra com B_2O_3 , reduzindo o coeficiente termo ótico do núcleo aproximando-o do da bainha, reduzindo a sensibilidade à temperatura em uma ordem de magnitude.

A utilização destas técnicas tem como objetivo anular o primeiro termo do lado direito da equação (2.14), continuando a haver uma ligeira sensibilidade resultante da expansão térmica do material que, para algumas situações, poderá não ser aceitável.

2.6.1.2 Sensor de Índice de Refração Externo

A sensibilidade dos LPG a variações do índice de refração externo advém do facto do índice de refração efetivo da bainha, n_m^{cl} , estar dependente do índice de refração do meio externo em que a fibra se encontra.

Isto significa que, na expressão (2.5), todos os termos manter-se-ão constantes exceto o índice de refração efetivo da bainha, resultando numa variação do comprimento de onda ressonante.

Assumindo que o índice de refração do meio é inferior ao índice de refração da bainha (para a situação inversa esta análise aumenta de complexidade e a condição apresentada em (2.5) torna-se inválida), a sensibilidade do LPG a variações do índice de refração externo é dada por [44]:

$$\frac{d\lambda_{res}}{dn_{ext}} = \frac{d\lambda_{res}}{dn_m^{cl}} \frac{dn_m^{cl}}{dn_{ext}} \quad (2.15)$$

Sendo n_{ext} o índice de refração do meio externo em que a fibra se encontra inserida.

Uma vez que cada modo “observa” um índice de refração efetivo diferente, haverão também diferentes comportamentos em função da variação do índice de refração externo. Ainda, o termo dn_m^{cl}/dn_{ext} é não linear, apresentando maior variação para quando ambos os índices de refração, da bainha e do meio externo, são próximos. Por este motivo, a sensibilidade tende a aumentar quando o índice de refração externo se aproxima do índice de refração efetivo do modo de bainha em questão.

Por outro lado, modos de ordem superior apresentam maior sensibilidade pois viajam em zonas mais externas da bainha, interagindo melhor com o meio externo, sendo que o seu índice de refração efetivo também se aproxima do índice de refração do externo.

Isto motiva o facto de uma das técnicas para aumentar a sensibilidade do LPG ao índice de refração externo, seja a realização de um *etching* da bainha, reduzindo o seu diâmetro e provocando uma maior interação entre os modos de bainha e o meio externo.

Esta técnica foi utilizada por C.Du *et al.* [45] onde foi possível aumentar, para mais do dobro, a sensibilidade de um LPG, passando de 1306 nm/RIU para 2731 nm/RIU para índices externos perto de 1.4555, num LPG produzido pela técnica do arco elétrico.

A insensibilidade ao índice de refração externo é possível através da escolha adequada do tipo de fibra. Em [48] é utilizada uma fibra DCF (*double-clad fiber*) na qual o *grating* criado é insensível ao índice externo, sendo que este tipo de fibras caracteriza-se por apresentar duas bainhas.

A insensibilidade é atingida uma vez que os modos ficam confinados à primeira bainha, sendo que a segunda atua como um escudo, evitando que o índice de refração efetivo da primeira bainha varie, mantendo constantes as condições da equação de ressonância.

2.6.1.3 Sensor de Estiramento

Quando sujeito a uma força de estiramento externa, o LPG irá sofrer deformações mecânicas que alteram as características do próprio material e do *grating* em si. Estas alterações irão provocar variações nos parâmetros da condição de ressonância que, por sua vez, irão induzir variações nos comprimentos de onda ressonantes.

A equação que define o comportamento do LPG quando sujeito a uma força de estiramento é a seguinte [44]:

$$\frac{d\lambda_{res}}{d\varepsilon} = \frac{d\lambda_{res}}{d(n_{01}^{co} - n_m^{cl})} \left(\frac{dn_{01}^{co}}{d\varepsilon} - \frac{dn_m^{cl}}{d\varepsilon} \right) + \frac{d\lambda_{res}}{d\Lambda} \frac{d\Lambda}{d\varepsilon} \quad (2.16)$$

Considerando que $\Delta\varepsilon = dL/L = d\Lambda/\Lambda$, a equação pode ser reescrita da seguinte maneira:

$$\frac{d\lambda_{res}}{d\varepsilon} = \frac{d\lambda_{res}}{d(n_{01}^{co} - n_m^{cl})} \left(\frac{dn_{01}^{co}}{d\varepsilon} - \frac{dn_m^{cl}}{d\varepsilon} \right) + \Lambda \frac{d\lambda_{res}}{d\Lambda} \quad (2.17)$$

Esta equação, à semelhança da equação para a temperatura, apresenta duas contribuições para a variação do comprimento de onda em função do estiramento. Essas contribuições são, novamente, a contribuição do material, primeiro termo do lado direito da equação, e a contribuição da guia de onda, segundo termo do lado direito.

A contribuição do material é provocada pela variação dos índices de refração efetivos do núcleo e da bainha devido à força externa, e é influenciada por dois fenômenos distintos. Um deles é caracterizado pelo fenômeno elasto óptico do material (núcleo e bainha), cujo índice de refração se altera como resultado de ações mecânicas externas. O outro consiste na redução do raio da fibra como resultado da força de estiramento, alterando os valores dos índices de refração efetivos do material.

Este termo apresenta uma magnitude negativa, uma vez que o fenômeno elasto óptico e a redução do raio promovem uma redução da parcela da diferença dos índices de refração efetivos.

O efeito de guia de onda resulta da variação do período de *grating*, resultante da força de estiramento aplicada, e apresenta um comportamento diferente para cada modo de bainha. Consoante o período de *grating* e o modo de bainha considerado, este fator poderá ter uma influência positiva ou negativa.

Uma vez que o efeito de guia de onda apresenta uma mudança de polaridade consoante o modo e período de *grating*, é possível a criação de um LPG nos quais ambas as contribuições se anulam, tornando-o insensível ao estiramento.

Este método foi demonstrado por Chen *et al.* [49], onde se verificou uma redução de cem vezes a sensibilidade ao estiramento comparado com os valores típicos dessa sensibilidade.

2.6.2 Sensores baseados em FBG

Os *gratings* de Bragg apresentam a sua dependência em função da temperatura e do estiramento, sendo estas as suas principais implementações como sensores. Como tal surge a seguinte expressão:

$$\Delta\lambda_{res} = \left(\frac{d\lambda_{res}}{dT}\right)\Delta T + \left(\frac{d\lambda_{res}}{d\varepsilon}\right)\Delta\varepsilon \quad (2.18)$$

2.6.2.1 Sensor de Temperatura

Tal como foi feito para o caso dos sensores baseados em *gratings* de período longo, a dedução das expressões da sensibilidade dos *gratings* de Bragg é feita a partir da sua condição de ressonância.

Assim surge [44]:

$$\frac{d\lambda_{res}}{dT} = \frac{d\lambda_{res}}{dn_{01}^{co}} \frac{dn_{01}^{co}}{dT} + \frac{d\lambda_{res}}{d\Lambda} \frac{d\Lambda}{dT} = 2\Lambda \left(\frac{dn_{01}^{co}}{dT} + n_{01}^{co} \frac{1}{\Lambda} \frac{d\Lambda}{dT} \right) \quad (2.19)$$

Uma vez que $d\Lambda/\Lambda dT = dL/LdT$ resulta:

$$\frac{d\lambda_{res}}{dT} = \lambda_{res} \left(\frac{1}{n_{01}^{co}} \frac{dn_{01}^{co}}{dT} + \frac{1}{L} \frac{dL}{dT} \right) \quad (2.20)$$

Novamente, surge uma equação com dois termos, tal como foi observado para os *gratings* de período longo.

O primeiro, contribuição do material, deve-se ao efeito termo ótico e, nas fibras tradicionais, é o efeito dominante nos *gratings* de Bragg.

O segundo termo, contribuição da guia de onda, é influenciado pela expansão térmica do material devido à característica termo elástica.

Nem sempre a sensibilidade à temperatura é desejável, como é o caso em que se pretende medir estiramento.

Uma técnica eficaz, e de simples implementação, é a utilização de dois FBG em série na mesma fibra e devidamente caracterizados, em termos de sensibilidade a temperatura e estiramento [50].

Num dos *gratings* é colocada uma manga rígida, impedindo-o de sofrer alterações mecânicas. Este sensor fica, então, apenas sujeito a variações de temperatura.

Já o segundo *grating* fica sujeito às variações de ambos os parâmetros.

Através da medição de ambas as variações dos comprimentos de onda ressonantes dos *gratings*, é possível utilizar o primeiro para fazer a compensação da temperatura sobre o segundo.

Desta forma, torna-se efetivamente possível a medição de estiramento de forma independente da temperatura.

2.6.2.2 Sensor de Estiramento

Adaptando a expressão (2.20) para a situação do estiramento resulta [44]:

$$\frac{d\lambda_{res}}{d\varepsilon} = \lambda_{res} \left(\frac{1}{n_{01}^{co}} \frac{dn_{01}^{co}}{d\varepsilon} + \frac{1}{L} \frac{dL}{d\varepsilon} \right) \quad (2.21)$$

O primeiro termo dos parêntesis representa, novamente, a contribuição do material, sendo causada pelo efeito elasto ótico e redução do diâmetro da fibra, e apresenta uma polaridade negativa.

O segundo termo, efeito de guia de onda, é causado pelo aumento do período de *grating* à medida que a força aumenta. Este termo apresenta uma polaridade positiva.

Para as fibras tradicionais, a contribuição do material é menor que o efeito de guia de onda, logo estas fibras apresentam um declive positivo na relação da variação do comprimento de onda em função do estiramento.

Tal como foi referido anteriormente, a forma mais simples e frequentemente utilizada para evitar a sensibilidade ao estiramento é a utilização de mangas rígidas que protegem a fibra contra ações mecânicas.

2.7 Técnicas de Interrogação de *Gratings* em Fibra Ótica

Nos subcapítulos anteriores foram apresentadas as formas como os LPG e FBG se comportam, em função da variação dos parâmetros aos quais são mais sensíveis.

Uma questão fundamental à utilização destes equipamentos como sensores, é na forma como se detetam as variações do comprimento de onda ressonante, à medida que o mensurado vai variando. A leitura dos sensores é denominada de interrogação.

Uma forma simples de interrogação dos FBG consiste na utilização de uma fonte de espectro largo a iluminar o *grating* por meio de um circulador, e este conectado um analisador de espectros. A figura abaixo apresenta esta configuração [50].

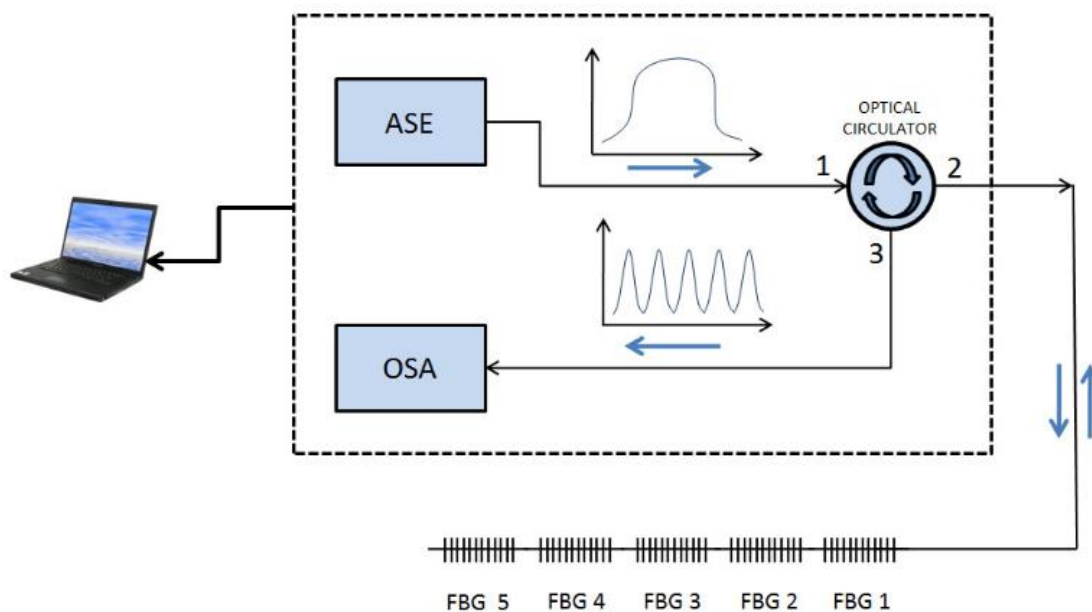


Figura 2.11 - Configuração típica para interrogação de *gratings* de Bragg com recurso a um circulator e a um analisador de espectros ótico.

Apesar da sua simplicidade, esta configuração apresenta duas grandes desvantagens que se centram no preço extremamente elevado dos analisadores de espectros óticos, bem como nas suas dimensões. Estas questões inviabilizam a sua aplicação em muitos contextos, onde o orçamento ou espaço disponível para instalação do sensor são reduzidos.

Em alternativa ao circulator, o OSA poderá ser colocado diretamente na saída dos FBG, medindo a atenuação em vez da reflexão.

Uma outra solução de interrogação, baseada em interferometria, mais compacta e que remove a necessidade de utilização do analisador de espectros, é a sua substituição por uma cavidade de *Fabry-Pérot*, atuando como um filtro ótico, e à saída deste um fotodetetor. O esquema de ligação é o seguinte [50].

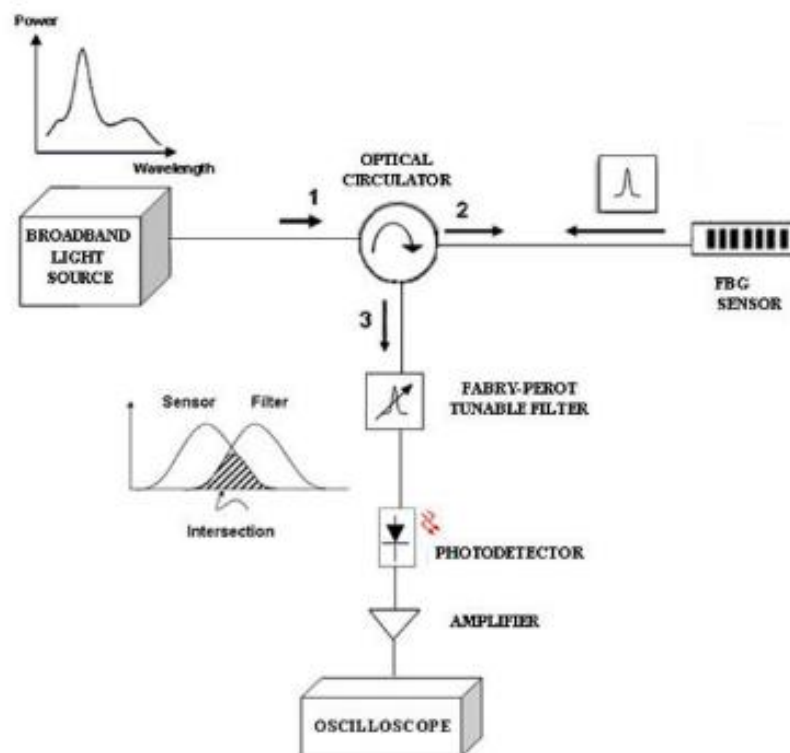


Figura 2.12 - Configuração para interrogação de *gratings* de Bragg com recurso a um filtro Fabry-Pérot sintonizável e um fotodetetador.

A saída do filtro irá resultar da convolução do espectro refletido com o do filtro, originando variações de potência ótica. No fotodetetador, estas variações de potência ótica serão traduzidas em variações da corrente induzida, e facilmente se convertem em variações de tensão passíveis de leitura por um ADC.

Este método de deteção, com recurso a um fotodetetador, reduz de forma significativa os custos comparativamente à metodologia anterior.

No caso dos LPG, a utilização do OSA e da fonte de espectro largo é também bastante utilizada por ser a mais simples, no entanto sofre dos problemas atrás mencionados.

Em [44] é proposta uma técnica de interrogação que converte variações espectrais do *grating* em variações de intensidade. Esta técnica, à semelhança da apresentada para os FBG, consiste na colocação de um filtro ótico passa banda em série com o LPG. O filtro deverá estar sintonizado na zona de maior declive do pico de atenuação por forma a permitir a maior sensibilidade possível.

O filtro poderá ser, por exemplo, um FBG seguindo uma configuração semelhante à da Figura 2.12. Esta solução torna o conjunto ainda mais compacto, mas requer que o FBG esteja protegido de possíveis condições ambientais que o possam fazer variar.

A utilização de *arrayed waveguide gratings* (AWG) também foi proposta, apresentando bons resultados. Em [51], a saída de um LPG é acoplada a um AWG, com cada saída deste a alimentar um fotodetetador. Esta técnica permite

criar um espectro por meio das leituras discretas obtidas em cada fotodetector. Posteriormente, através de uma curva de ajuste dos pontos obtidos, o perfil espectral é reconstruído. A seguinte figura apresenta um exemplo.

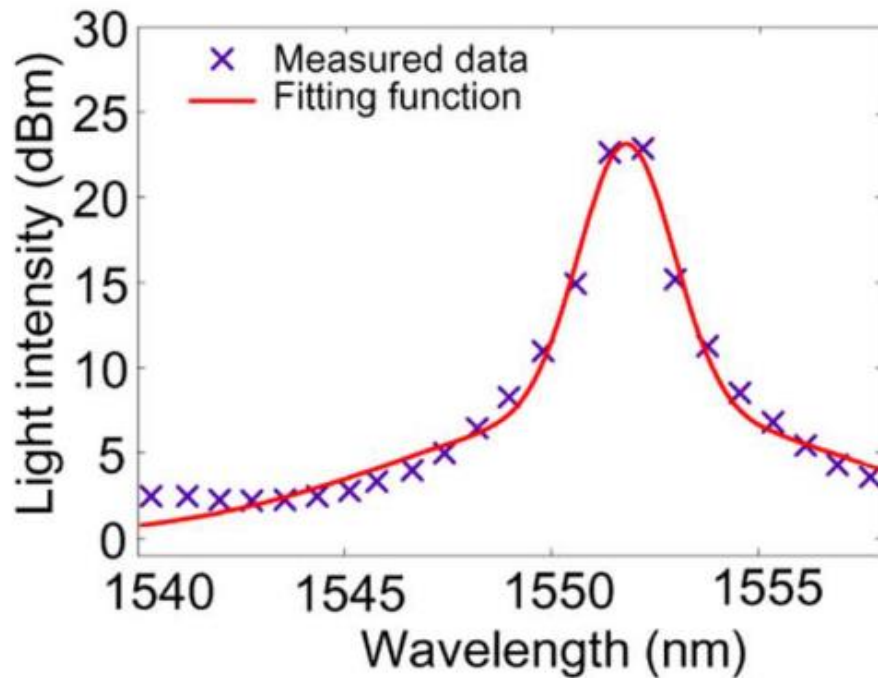


Figura 2.13 - Exemplo de interrogação de um LPG com recurso a um AWG [51].

Na figura anterior, a azul, encontram-se os valores de potência registados pelos vários fotodetectores, e a vermelho surge a curva de ajuste criada.

Uma desvantagem deste método é a necessidade de múltiplos fotodetectores para as várias saídas do AWG, fixando ainda o número de pontos possíveis de medir.

Em [52] é apresentada uma solução que recorre ao uso de três lasers DFB monomodo, cujos comprimentos de onda de emissão encontravam-se distribuídos entre os 1530 nm e os 1570 nm. Através da modulação em temperatura destes lasers, os seus comprimentos de onda de emissão eram também modulados, permitindo serem deslocados cerca de 4 nm.

Ligando um LPG a estes lasers, por meio de acopladores, era possível calcular a atenuação do LPG através da comparação da potência de saída de cada laser com a potência na extremidade de saída do LPG, seguindo uma lógica semelhante à técnica anterior.

Registando os valores de atenuação ao longo dos 4 nm (para cada laser) era criada uma distribuição espectral discreta da atenuação provocada pelo LPG. Posteriormente, era traçada uma curva de ajuste a estes pontos e reconstruído o espectro original do LPG.

Apesar das diversas soluções de interrogação que têm surgido, os analisadores de espectro continuam a ser a tecnologia que fornece melhores

resultados em termos de resolução, capacidade de reconstrução do espectro e rápida leitura. São ainda os equipamentos de referência no que toca à caracterização espectral dos *gratings*.

Para além disso, possuem uma interação com o utilizador bastante intuitiva.

No capítulo que se segue serão abordados este tipo de equipamentos, os quais serão diferenciados consoante o tipo de funcionamento, e serão apresentadas algumas soluções presentes no mercado.

3 Analisadores de Espectros Óticos

3.1 Funcionamento e tipos de Analisadores de Espectros Óticos

A função principal dos dispositivos analisadores de espectros óticos é a de medir a intensidade luminosa de uma fonte, em função do comprimento de onda. Esta funcionalidade é de extrema importância no estudo da luz visível, uma vez que é a distribuição dessas intensidades que determina a sua cor.

Os analisadores existentes atualmente podem ser divididos em três categorias distintas consoante o seu tipo de funcionamento: uma delas baseada na utilização de redes de difração e duas baseadas em técnicas de interferometria [53].

Dentro da categoria dos analisadores baseados em interferometria distinguem-se dois tipos, conforme o interferómetro utilizado, são eles o Fabry-Pérot e Michelson.

Independentemente da existência de diferentes tipos de analisadores de espectros, o princípio de funcionamento segue sempre a mesma lógica. O seguinte diagrama de blocos ilustra os componentes principais de um destes equipamentos.

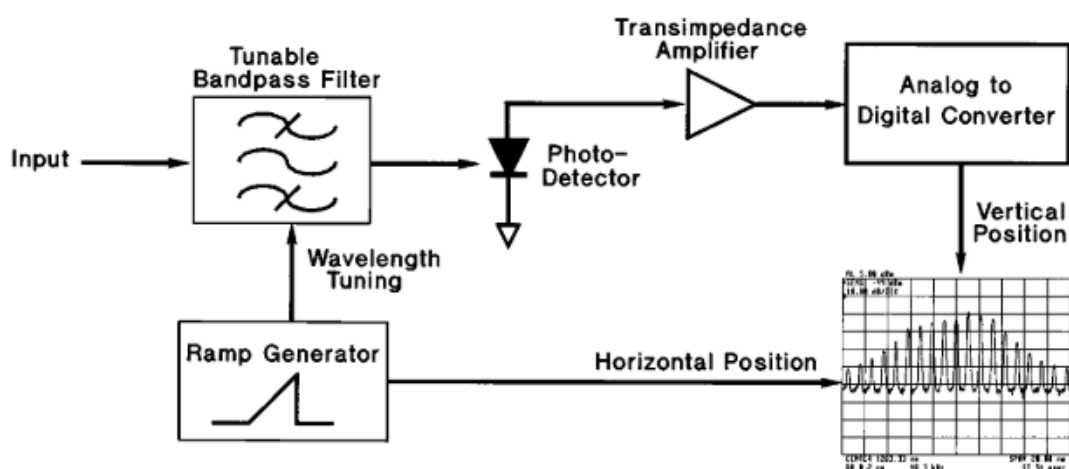


Figura 3.1 - Diagrama de blocos básico de um analisador de espectros óticos [53].

Na entrada do equipamento é colocada a fonte luminosa cujo espectro é de interesse. Esta é, então, filtrada por um sistema que atua como um filtro passa banda.

O filtro, tipicamente, apresenta duas funcionalidades fundamentais. A primeira caracteriza-se pelo facto de ser sintonizável, o que permite definir o seu comprimento de onda central. Esta sintonização é representada pelo gerador em rampa da figura.

A segunda funcionalidade é dada pela capacidade de escolha da sua largura de banda. Quanto menor for a largura de banda, menor será a largura

espectral que por ele atravessa. Esta característica permite a manipulação da resolução do equipamento.

À saída do filtro surge um fotodetector que irá gerar uma corrente proporcional à potência ótica sobre ele incidente. Uma vez que a medição direta da corrente não é conveniente, este valor é convertido para uma tensão, possibilitando a sua medição através de um conversor analógico para digital. Este último passo é realizado por meio de um amplificador de transimpedância.

Posteriormente, e a nível de *software*, é realizado algum processamento de sinal e os resultados são então apresentados ao utilizador através de um ecrã instalado no próprio equipamento.

De seguida são apresentados os tipos de analisadores de espectros óticos consoante o seu método de funcionamento.

3.1.1 Analisadores de Espectros Óticos baseados em Interferómetros de Fabry-Pérot

No caso do interferómetro de Fabry-Pérot é utilizada uma cavidade, composta por dois espelhos refletivos instalados em paralelo, que recebe a luz proveniente da fonte. Esta configuração dá origem a um fenómeno de ressonância, no qual apenas se poderão propagar determinados comprimentos de onda específicos. A seguinte figura ilustra o princípio de funcionamento de um analisador de espectros óticos deste tipo.

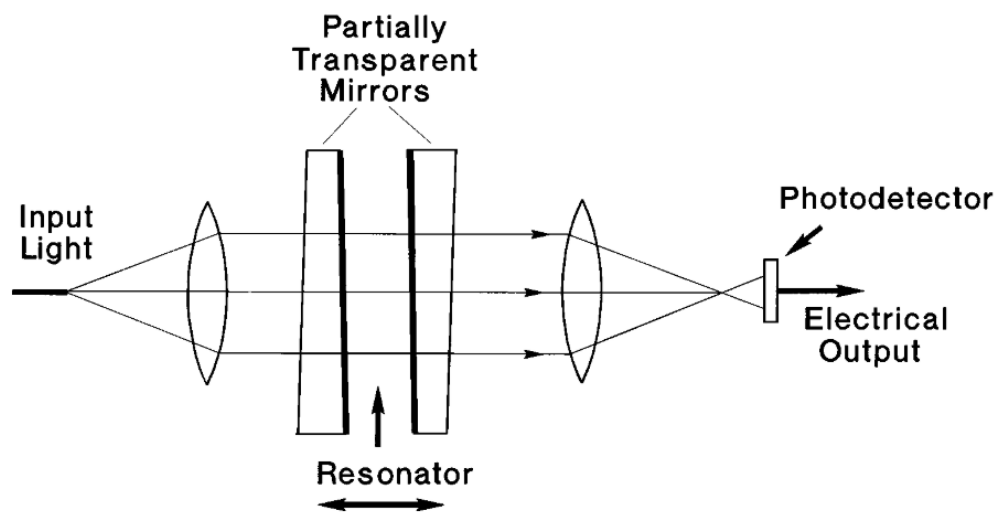


Figura 3.2 - Princípio de funcionamento de um analisador de espectros óticos baseado em interferometria de Fabry-Pérot [53].

Os comprimentos de onda ressonantes de uma cavidade de Fabry-Pérot podem ser calculados através da seguinte expressão [13]:

$$\lambda q = 2nL_c \leftrightarrow \lambda = \frac{2nL_c}{q} \quad (3.1)$$

Nas expressões anteriores, λ representa um comprimento de onda ressonante, n o índice de refração do meio, L_c o comprimento da cavidade, e q um número inteiro que representa os vários comprimentos de onda que se podem propagar na cavidade.

Pela expressão (3.1) pode concluir-se que é possível a variação dos comprimentos de onda ressonantes através da variação do comprimento da cavidade. Esta é a técnica utilizada nestes equipamentos para efetuar o varrimento do espectro. Já a resolução é, tipicamente, fixa.

Uma grande vantagem desta tecnologia deve-se às altas resoluções possíveis de atingir. Isto permite a realização de leituras de regiões bastante finas do espectro, e com grande detalhe.

Por outro lado, e tal como se pode deduzir da expressão (3.1), a equação é satisfeita para diferentes comprimentos de onda, ditados pela variável q . Ora esta situação é indesejável pois, no fotodetector, para além de chegar o comprimento de onda de interesse, irão também chegar outros comprimentos de onda que satisfaçam a equação.

Uma forma de contornar o problema é a utilização de um monocromador após a cavidade Fabry-Pérot.

3.1.2 Analisadores de Espectros Óticos baseados em Interferómetros de Michelson

Nos analisadores de espectros óticos baseados em interferómetros de Michelson, o princípio de funcionamento consiste em comparar dois impulsos de luz da mesma fonte, mas com atrasos diferentes.

Este atraso é obtido dividindo o impulso luminoso e forçando-o a percorrer percursos distintos que, posteriormente, irão atingir o mesmo ponto em tempos diferentes. Apresenta-se abaixo um exemplo.

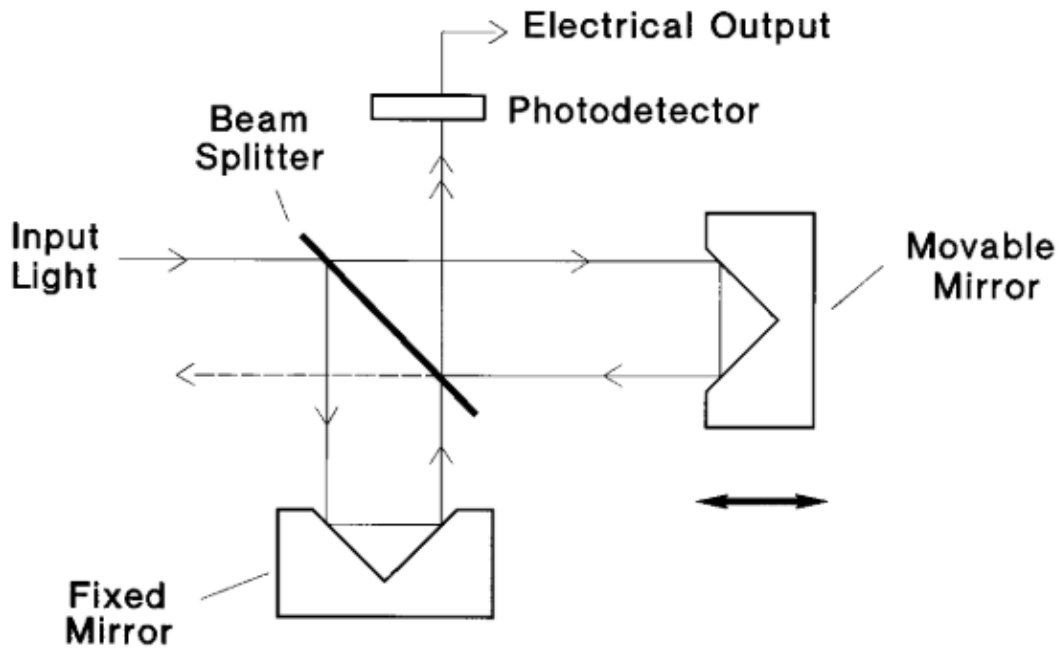


Figura 3.3 - Princípio de funcionamento de um analisador de espectros óticos baseado em interferometria de Michelson [53].

Afastando ou aproximando um dos espelhos do centro é possível aumentar ou diminuir, respetivamente, o atraso entre ambos os percursos. Da interferência entre os dois percursos resulta uma função de autocorrelação que, posteriormente, atinge o fotodetector.

O espectro da fonte luminosa é então reconstruído, por meio de aplicação da Transformada de Fourier à função de autocorrelação, e apresentado ao utilizador.

3.1.3 Analisadores de Espectros Óticos baseados em Redes de Difração

Neste tipo de analisadores de espectros é provocada uma dispersão da luz inserida no equipamento, provocando uma separação espacial dos diferentes comprimentos de onda que a compõem.

Este fenómeno é criado com recurso a uma rede de difração, que consiste num material cuja superfície apresenta uma estrutura rugosa periódica a qual, quando exposta à luz, a reflete em diferentes direções consoante o comprimento de onda. De seguida, surge um exemplo deste princípio de funcionamento.

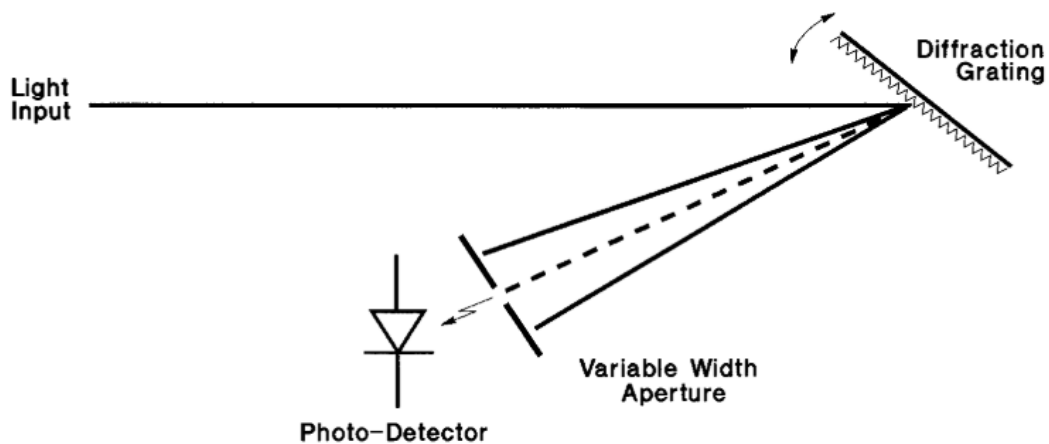


Figura 3.4 - Princípio de funcionamento de um analisador de espectros óticos baseado em redes de difração [53].

A rede de difração, ao ser atingida pela luz, irá provocar uma dispersão dos vários comprimentos de onda, ao mesmo tempo que os reflete em direção ao fotodetector. Entre o fotodetector e a rede é colocado um obstáculo com uma ranhura, e só por esta pode passar a luz. A abertura é controlada para permitir uma maior ou menor resolução.

Através da variação do ângulo de ataque da rede é realizado o varrimento ao longo do espectro.

3.2 Soluções de Mercado

Devido às suas especificidades, a construção de equipamentos dedicados ao estudo das características da luz requer um rigoroso nível de minúcia e, ao mesmo tempo, componentes de custo elevado.

Este último fator torna-se, por vezes, insuportável e injustificável quando se pretende construir um sensor em fibra de baixo custo.

Existem atualmente várias soluções de analisadores de espectros óticos disponíveis no mercado, cujos preços apresentam uma grande gama de variação. Para contexto laboratorial surgem os analisadores de espectros óticos robustos, cujas funcionalidades vão muito além da medição do conteúdo espectral de uma fonte luminosa. Abaixo apresenta-se um exemplo de um equipamento deste tipo.

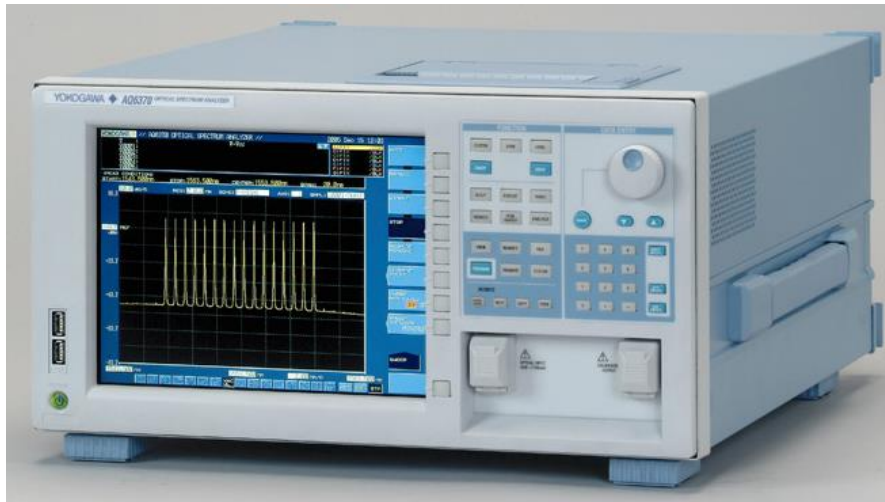


Figura 3.5 - Analisador de espectros óticos Yokogawa AQ6370 [54].

O modelo apresentado na figura anterior, e utilizado na realização deste trabalho para efeitos de comparação, apresenta as seguintes características principais:

- Largura de banda espectral: 600 – 1700 nm;
- Resolução máxima: 0,02 nm;
- Múltiplas configurações e modos de análise;
- Interface homem – máquina incorporada;
- Interfaces de comunicação e transferência de dados: GP-IB, RS-232, Ethernet (TCP-IP), USB;
- Dimensões: 426 (Largura) x 221 (Altura) x 459 (Profundidade) mm;
- Peso: 27 kg.

Os valores praticados para este tipo de equipamentos atingem facilmente a dezena de milhares de euros. Estes valores, aliados às grandes dimensões, não justificam a sua utilização no âmbito de interrogação de sensores em contexto real.

No extremo oposto da oferta surgem soluções consideravelmente mais baratas e compactas, no entanto poderão apresentar menor resolução, funcionalidades e largura de banda. Por outro lado, requerem equipamento adicional para funcionamento, nomeadamente, um computador capaz de executar o *software* do equipamento. De seguida surge um exemplo.



Figura 3.6 - Analisador de espectros óticos compacto, Ocean Insight STS-NIR [55].

Este tipo de analisador de espectros possui um método de funcionamento baseado numa rede de difração. Nos OSA deste tipo, a luz incide sobre a rede de difração sendo posteriormente refletida, com os vários comprimentos de onda separados espacialmente, para um painel de fotodetetores com uma área suficientemente grande para abranger todos os comprimentos de onda refletidos. Cada zona do painel fica afeta um determinado comprimento de onda e, desta forma, é possível analisar a intensidade ótica de cada um destes.

Os valores praticados para esta categoria de equipamentos, a rondar entre um e dois mil euros para a gama mais baixa, tornam-nos muito mais atrativos e justificáveis para algumas aplicações. Ainda assim, e no contexto dos sensores, seriam necessários outros equipamentos para a criação de um sistema completo, o que iria encarecê-lo significativamente.

Em contraste com o equipamento anterior, surgem as seguintes características:

- Largura de banda espectral: 650 – 1100 nm;
- Resolução máxima: 1 nm;
- Análise simples e com menos configurações disponíveis;
- Requer utilização de computador com *software* proprietário;
- Interfaces de comunicação e transferência de dados: RS-232, USB;
- Dimensões: 40 (Largura) x 24 (Altura) x 42 (Profundidade) mm;
- Peso: 68 g.

Apesar dos valores se apresentarem muito mais baixos comparativamente aos analisadores de espectros laboratoriais, a criação de um sistema sensor cujos valores possam ascender, no mínimo, aos dois mil euros, inviabilizam a sua implementação em algumas situações. No capítulo que se segue é apresentada a construção de um equipamento de baixo custo, que se comporta como um analisador de espectros, cujo objetivo é a interrogação de *gratings* de Bragg e de período longo.

4 Desenvolvimento do equipamento de interrogação

4.1 Introdução

Uma característica particular dos díodos laser é a variação do seu comportamento espectral, em função da sua temperatura e corrente de funcionamento.

Este comportamento encontra-se explicado em detalhe em [56], onde se verificou que tanto o aumento de temperatura como de corrente, provocam uma variação positiva dos comprimentos de onda dos lasers de *Fabry-Pérot*.

Para além do fenómeno espectral, para uma corrente constante, um aumento de temperatura tende a provocar uma diminuição da potência ótica emitida pelo laser.

É com base no comportamento espectral do laser, em função da temperatura e corrente de funcionamento, que este equipamento de interrogação se baseia.

Para a interrogação dos LPG, a lógica que será aplicada consistirá numa modulação de temperatura do laser, que irá permitir a realização de um varrimento espectral. Serão efetuadas várias leituras de potência em vários pontos do espetro criando, tal como em [51] e [52], um espetro discreto. Posteriormente, através de uma curva de ajuste (*fitting*), será obtida a melhor aproximação aos pontos registados, permitindo a recriação do espetro do *grating*.

A seguinte figura ilustra este princípio de funcionamento.

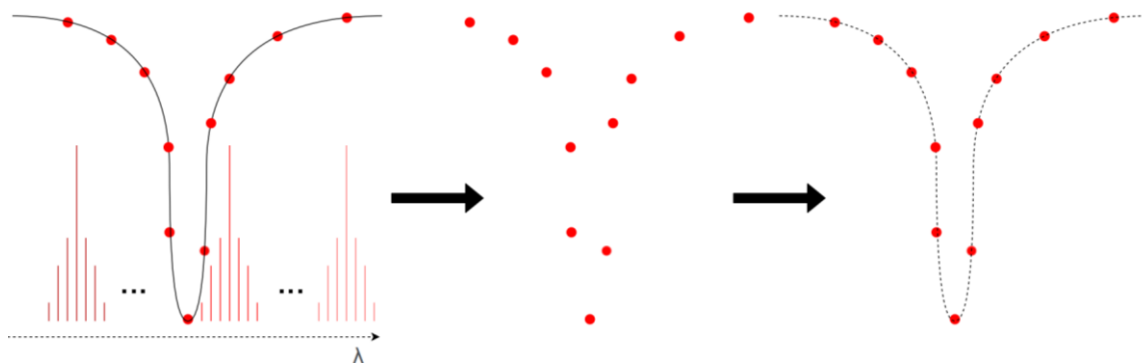


Figura 4.1 - Princípio de funcionamento do equipamento de interrogação desenvolvido.

Do lado esquerdo da figura 4.1 é exemplificado o varrimento em comprimento de onda (λ) do laser, através da alteração da sua temperatura. Para cada temperatura / comprimento de onda é comparada a potência de saída do laser com a potência à saída do LPG, o que resulta no valor de atenuação por este provocado. Ao centro da figura encontram-se os pontos registados no final do varrimento em temperatura do laser. Estes pontos constituem a informação extraída do espetro. Por fim, do lado direito da figura, encontra-se a ponteado a

curva de ajuste, calculada por meio de um algoritmo iterativo e que permite a recuperação do espectro original do LPG.

Será também implementado um sistema que possibilite a modulação em corrente do laser para o seguimento de um FBG em tempo real pois, sendo estes menos sensíveis e com uma largura espectral menor que os LPG, requerem um ajuste mais fino do laser em termos espectrais, algo que é possível através da modulação de corrente.

Todo o circuito será alimentado por um transformador comutado AC/DC de 7,5 V e capaz de fornecer até 2,93 A.

O diagrama de blocos do circuito apresenta-se de seguida.

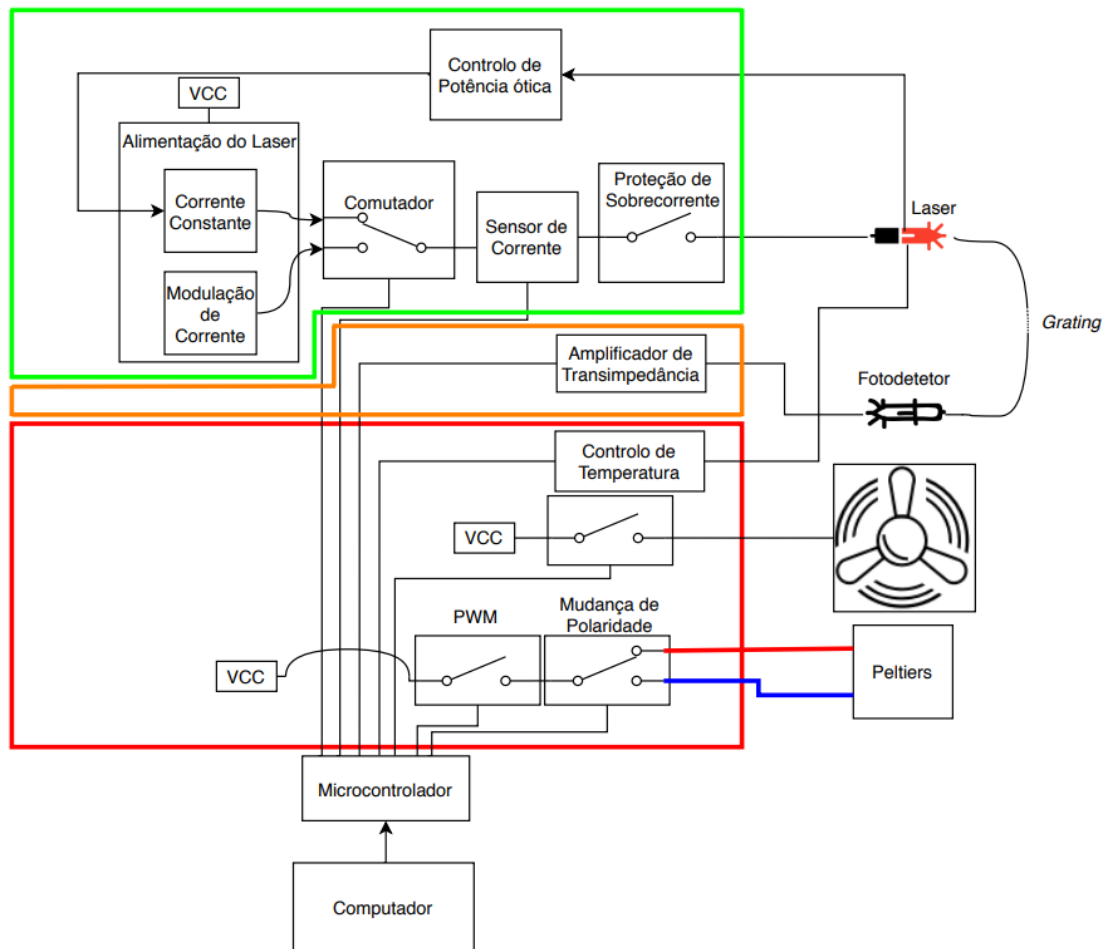


Figura 4.2 - Diagrama de blocos do sistema projetado. A sigla VCC representa a alimentação dos vários blocos.

O circuito desenvolvido pode ser repartido em três partes principais: controlo e proteção da alimentação do laser (área a verde), leitura da potência ótica (área a laranja) e controlo de temperatura do laser (área a vermelho). Todo o circuito será controlado por meio de um microcontrolador que irá comunicar com um computador, enviando e recebendo dados e comandos. Esta integração será feita com recurso à ferramenta LabVIEW, que será apresentada no capítulo 5.

Uma figura da montagem completa do circuito, criado em *perfbboard*, pode ser vista abaixo.

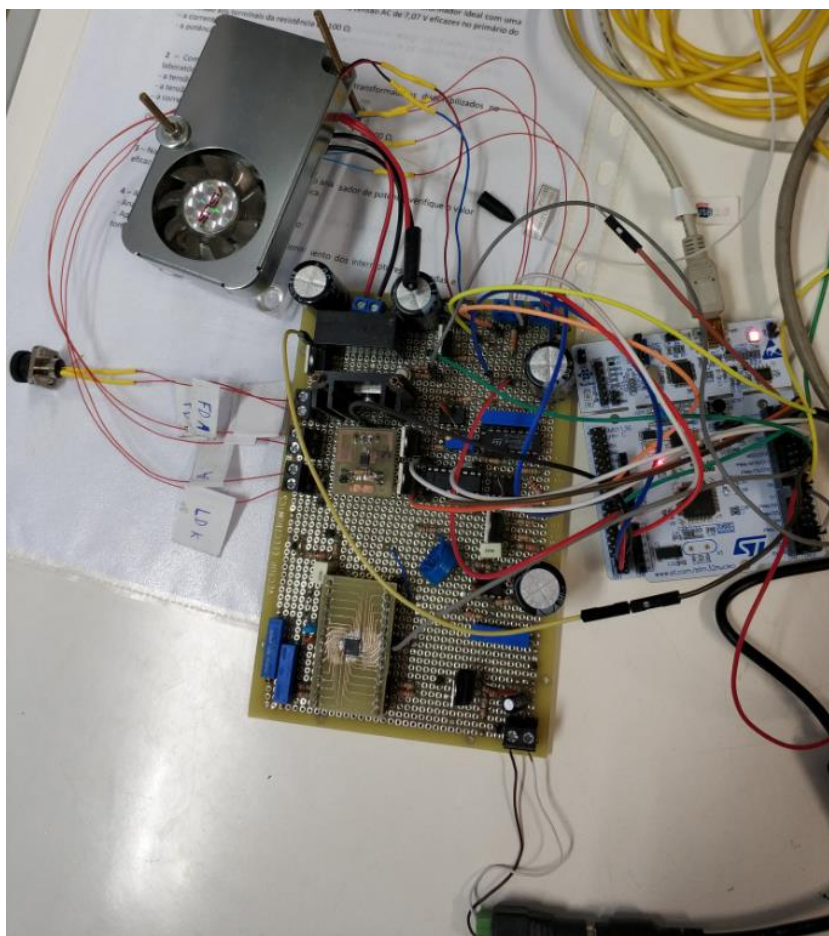


Figura 4.3 - Circuito completo do equipamento desenvolvido.

Todos os circuitos associados às três partes constituintes serão apresentados em detalhe nos subcapítulos que se seguem. No Anexo A é apresentada uma proposta de projeto de uma placa de circuito impresso para este equipamento.

4.2 Alimentação do Laser

O circuito desenvolvido tem incorporadas duas fontes de alimentação distintas para o laser que serão utilizadas separadamente, consoante se pretenda a interrogação de um LPG ou FBG.

Uma das fontes faz uso de um circuito integrado (*driver*) apropriado para o controlo da alimentação de lasers que possui, entre outras propriedades relevantes, a capacidade de realimentação para efetuar o controlo da potência ótica do laser. Esta característica é bastante interessante, pois apresenta potencial para contornar a variação de potência ótica do laser em função da temperatura. Será esta a fonte de alimentação predefinida para a medição dos LPG.

A segunda fonte foi desenvolvida para se comportar como uma fonte de corrente controlada por tensão. O circuito implementado permite a variação da corrente, sob a forma triangular, fornecida ao laser com uma determinada frequência. Esta técnica é também denominada de *dithering*.

O objetivo deste último circuito é dotar o equipamento da capacidade de seguir um FBG em tempo real.

4.2.1 Circuito do *Driver* do Laser

Tal como foi anteriormente referido, uma das características intrínsecas dos díodos laser é a variação da sua potência ótica transmitida em função da temperatura. Esta é uma situação que pode prejudicar a interrogação de um *grating* se não for devidamente considerada pois, durante o varrimento de temperatura, é de esperar que esta característica se manifeste e se verifique um decréscimo da potência ótica transmitida, à medida que a temperatura do laser vai aumentando. Esta característica deve, naturalmente, ser corrigida através do controlo de potência ou através de uma caracterização do laser.

Para garantir uma alimentação adequada ao laser optou-se por utilizar um dispositivo do tipo circuito integrado, capaz de regular a corrente fornecida ao laser, permitindo operá-lo dentro dos limites indicados pelo fabricante. Apresenta ainda a funcionalidade opcional de permitir um controlo de potência ótica, através de uma malha de realimentação utilizando um fotodetetor. Este fotodetetor converte a potência ótica captada do laser numa corrente elétrica, que é diretamente fornecida ao *driver*, permitindo que este atue no sentido de manter a potência ótica transmitida constante.

Neste sentido foi adquirido o modelo MAX3668 do fabricante Maxim, cuja imagem se apresenta abaixo. Este dispositivo consiste num *driver* para laser destinado à área das telecomunicações, mais concretamente para redes de transmissão de dados SONET/SDH, mas demonstrou-se adequado a este tipo de implementação. A seguinte figura apresenta o aspeto do *driver*.

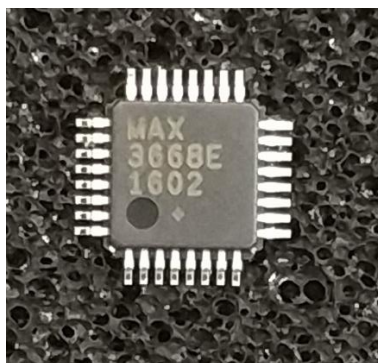


Figura 4.4 - Circuito integrado MAX3668.

Na folha de características do fabricante é já fornecido o circuito eletrónico necessário ao correto funcionamento do *driver* e do laser. O circuito

implementado, ao qual foram feitas algumas modificações, apresenta-se na figura abaixo.

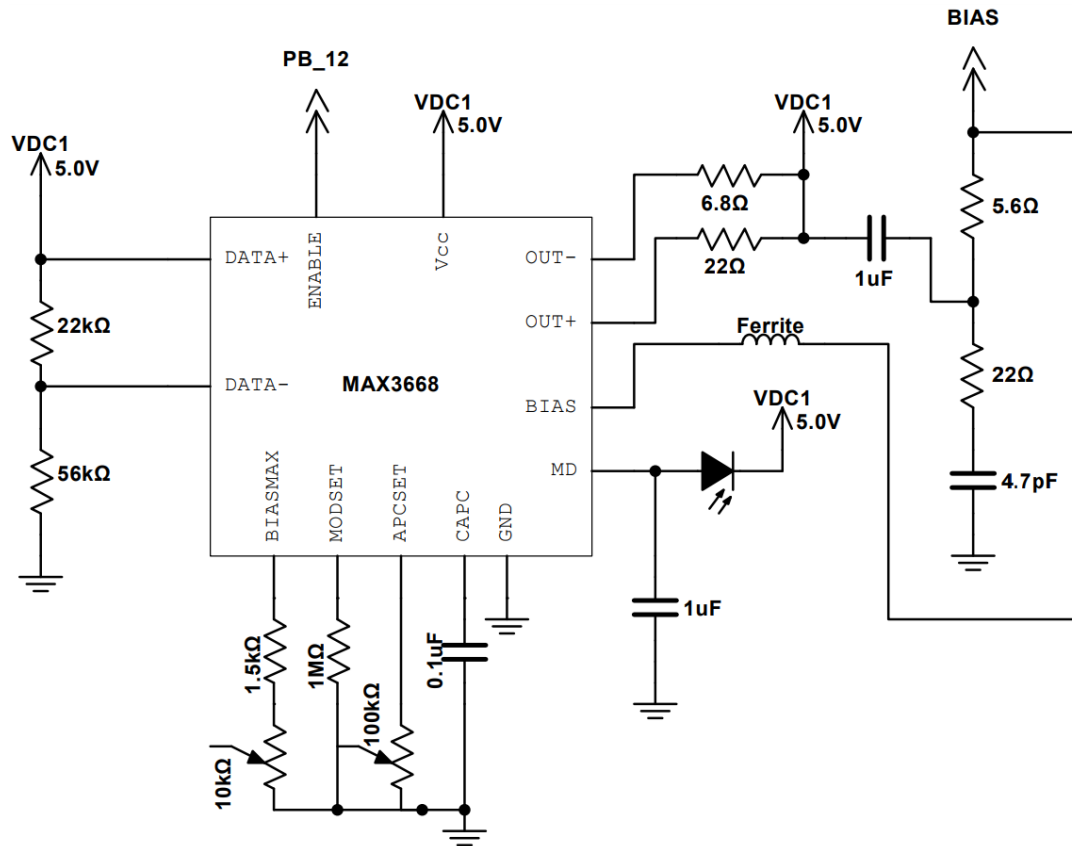


Figura 4.5 - Circuito implementado para integração do driver.

É de salientar que foi feita uma simplificação dos pinos do circuito integrado, a fim de simplificar a representação e análise desta porção do circuito.

Na figura 4.5, a nomenclatura PB_12 significa que aquele pino do driver foi conectado ao porto B pino 12 do microcontrolador. Esta nomenclatura será utilizada nos vários esquemas de circuitos apresentados ao longo deste capítulo.

Abaixo segue-se uma tabela resumo dos pinos utilizados do circuito integrado, com a respetiva descrição da sua funcionalidade.

Tabela 4.1 - Funcionalidades dos pinos do circuito integrado MAX3668.

Pino	Descrição
Vcc	Alimentação do circuito integrado a 5V.
GND	Massa do circuito.
DATA+	Pino dedicado à receção de informação no formato digital.
DATA-	Pino dedicado à receção de informação no formato digital.
BIASMAX	Pino de configuração da corrente máxima do laser.
MODSET	Pino de configuração da corrente de modulação do laser.
APCSET	Pino de configuração da potência ótica do laser.
CAPC	Condensador para compensação do sistema de Controlo Automático de Potência ótica.
OUT-	Pino de receção da corrente de modulação.

OUT+	Pino de recepção da corrente de modulação.
BIAS	Pino de recepção da corrente de <i>biasing</i> .
MD	Pino de monitorização da corrente do fotodíodo.
ENABLE	Ativa ou desativa o funcionamento do <i>driver</i> .

Uma vez que este circuito integrado foi desenvolvido para a área das telecomunicações, na qual a informação é enviada sob o formato binário, foi necessária a utilização de um divisor resistivo nas entradas DATA+ e DATA-, simulando o “1” lógico constante, garantindo desta forma uma corrente e, conseqüentemente, potência ótica constante para o laser.

Seguindo esta ordem de ideias, foi também utilizada uma resistência de valor elevado, cerca de 1 MΩ, no pino MODSET. Este pino é responsável pela configuração da diferença de corrente que distingue os “0” e “1” lógicos da informação no formato digital. A utilização de uma resistência elevada neste pino permite anular esta componente.

Ficando anulada a componente da corrente de modulação do laser, a configuração deste fica sujeita apenas aos valores das resistências colocados nos pinos BIASMAX e APCSET.

Quando o circuito funciona no modo de malha fechada, isto é, com realimentação proveniente de um fotodetector, o pino BIASMAX permite a configuração da corrente máxima de funcionamento do laser. Isto garante que os limites impostos pelo fabricante não são ultrapassados, não havendo o risco de danificar o próprio laser. Quando funciona em malha aberta, sem realimentação, o pino BIASMAX define a corrente de funcionamento do laser e mantém-na constante e, neste caso, o fotodetector é removido ficando o pino MD em aberto.

O pino APCSET é responsável pela configuração da potência ótica desejada de funcionamento do laser, no caso de ser utilizada a realimentação.

Por forma a permitir uma configuração adequada do *driver*, bem como possibilitar a troca do laser por um outro de especificações diferentes, em ambos os pinos foram utilizados potenciômetros de ajuste fino.

Os restantes componentes instalados seguiram valores aproximados aos indicados pelo fabricante.

A escolha deste circuito integrado baseou-se no seu custo, pois possui um preço atual de cerca de €10/unidade, não adicionando um valor significativo ao custo final do equipamento.

Devido às suas reduzidas dimensões (5 mm x 5 mm), e por ser um dispositivo do tipo montagem superficial, também conhecido por SMD – *surface-mount device*, foi necessária a criação de uma placa *breakout* para facilitar a sua instalação no circuito.

Esta placa *breakout* tem o único objetivo de dispersar e estender cada um dos 32 pinos do circuito integrado, distanciando-os entre si, permitindo uma melhor instalação dos componentes eletrônicos adjacentes a cada um desses pinos.

A placa *breakout* foi desenhada com recurso ao *software* gratuito de desenvolvimento de placas de circuito impresso KiCad, e o resultado apresenta-se na figura que se segue.

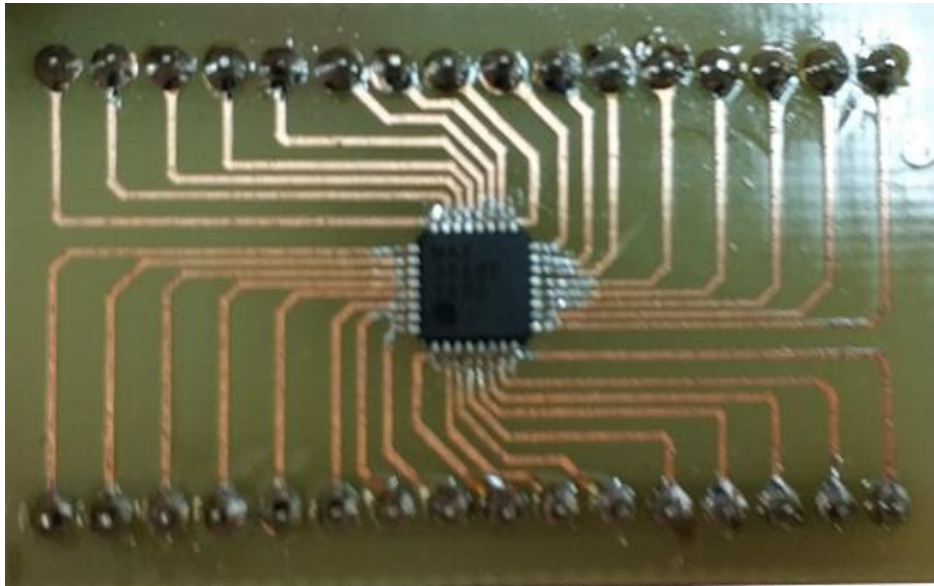


Figura 4.6 - Placa *breakout* para o circuito integrado do *driver* MAX3668.

4.2.2 Circuito de Modulação de Corrente

Foi necessário desenvolver um circuito que permitisse modular a corrente do laser em frequência (1 kHz), por forma a efetuar um *dithering* e ser possível a medição de um *grating* de Bragg.

Foi inicialmente testada a possibilidade de utilizar o *driver* anterior para efetuar também esta função, através da manipulação da resistência do pino BIASMAX.

Para esta última situação foram testadas duas abordagens, uma delas recorrendo a um potenciômetro digital e outra recorrendo a um transístor do tipo FET, atuando na região óhmica e fazendo variar a sua resistência.

Para o primeiro caso verificou-se que o potenciômetro digital não apresentava uma resposta rápida o suficiente para permitir a variação da resistência à frequência desejada.

Para o caso do transístor do tipo FET, a implementação experimental demonstrou ser algo complexa, uma vez que variação da resistência interna do transístor era extremamente sensível ao valor de tensão fornecido na *gate*, para além de ser não linear.

Após se verificar que nenhuma das soluções era adequada ao objetivo pretendido, foi desenvolvido um circuito de alimentação baseado numa fonte de corrente.

Este circuito recebe uma tensão de referência (V_{ref}) e impõe uma corrente diretamente proporcional a fluir pela carga, neste caso o laser. O circuito implementado é apresentado de seguida.

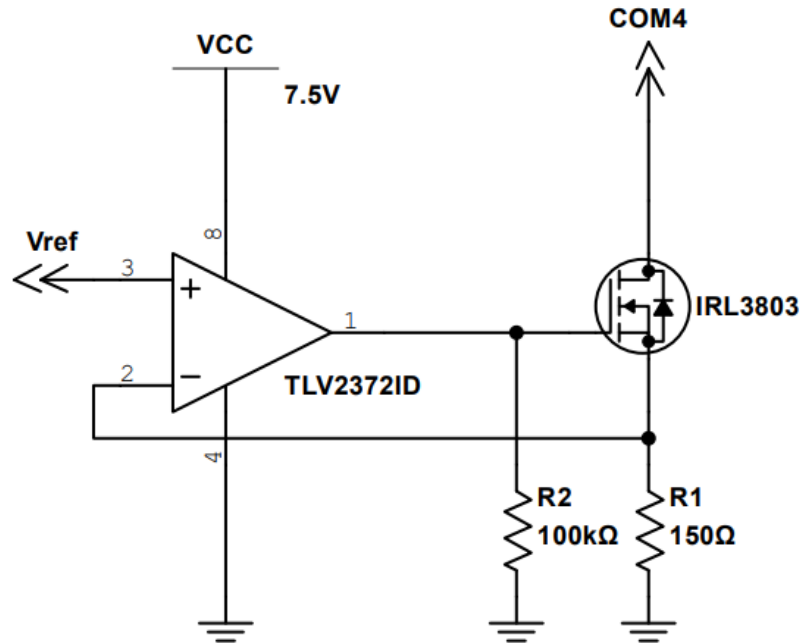


Figura 4.7 - Circuito Fonte de Corrente.

O circuito desenvolvido utiliza um amplificador operacional (ampop) cuja saída está ligada à *gate* de um mosfet tipo N.

O ampop é implementado numa configuração de realimentação negativa, sendo a entrada não inversora alimentada com a tensão de referência, e a entrada inversora ligada à *source* do mosfet. Com o ampop nesta configuração, a saída irá apresentar um valor tal que garanta a igualdade das tensões em ambas as entradas, desde que dentro dos limites de alimentação do ampop. Foi utilizado o modelo TLV2372, pois apresenta as vantagens de permitir alimentação simples e ser do tipo *rail-to-rail*, fornecendo a excursão completa dos 0 aos 7,5 V na sua saída.

Relativamente ao mosfet, foi instalada uma resistência de 100 kΩ que permite descarregar a *gate*, e na *source* foi utilizada uma resistência de 150 Ω para a massa. O *drain* fica ligado ao pino COM4 do interruptor analógico (apresentado mais à frente), ficando em série com o laser quando esta configuração é ativada.

Sendo utilizada uma resistência de 150 Ω, o valor da corrente que flui pelo laser é dado pela seguinte expressão:

$$I = \frac{V_{ref}}{150} [A] \quad (4.1)$$

Para o fornecimento da tensão de referência foi desenvolvido um circuito analógico que cria um sinal triangular, com uma frequência de 1 kHz e uma amplitude pico a pico de 1,5 V, que corresponde a uma variação de corrente de 10 mA no laser.

O esquema do circuito apresenta-se abaixo.

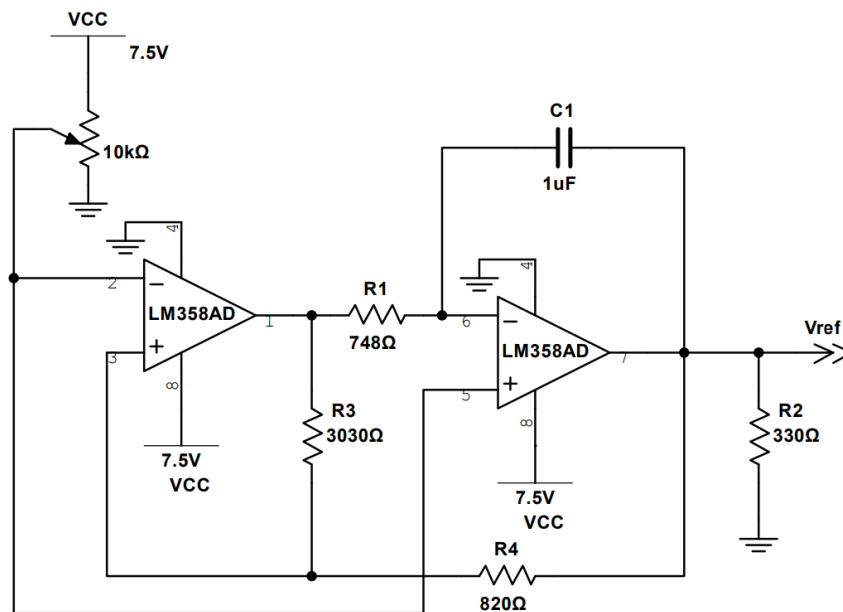


Figura 4.8 - Gerador do sinal triangular de referência.

As equações de dimensionamento utilizadas foram as seguintes:

$$\Delta V = \frac{R_4}{R_3} V_{cc} [V] \quad (4.2)$$

$$f = \frac{R_3}{4R_1R_4C_1} [Hz] \quad (4.3)$$

Sendo ΔV a variação pico a pico e f a frequência pretendidas. Devido às incertezas associadas aos componentes, bem como outros fatores não contabilizados no modelo matemático, foram necessários alguns ajustes iterativos sobre o valor das resistências até terem sido obtidos valores aceitáveis de tensão e frequência.

O princípio de funcionamento deste circuito assenta na instalação em série de dois ampops, sendo o primeiro (do lado esquerdo) um comparador e o segundo (do lado direito) um integrador numa configuração inversora.

O comparador coloca os 7,5 V na sua saída sempre que a sua entrada não inversora é superior à inversora. De forma análoga, coloca 0 V na sua saída sempre que se encontra em situação contrária. Estando o integrador numa configuração inversora, o valor à saída do comparador será integrado

negativamente. Uma vez que a saída do integrador realimenta por meio da resistência R_4 o comparador, este tenderá a oscilar.

A utilização do potenciômetro permite um ajuste de *offset* caso se pretenda aumentar, ou diminuir, o valor médio da corrente fornecida ao laser, notando-se uma ligeira distorção da forma de onda. No entanto, para a gama de valores estipulada para o laser (15 mA até 25 mA), o sinal triangular apresenta uma forma de onda de boa qualidade. Abaixo são apresentadas as formas de onda da tensão de referência e da tensão na resistência R_1 da figura 4.7, que fica ligada em série com o laser.

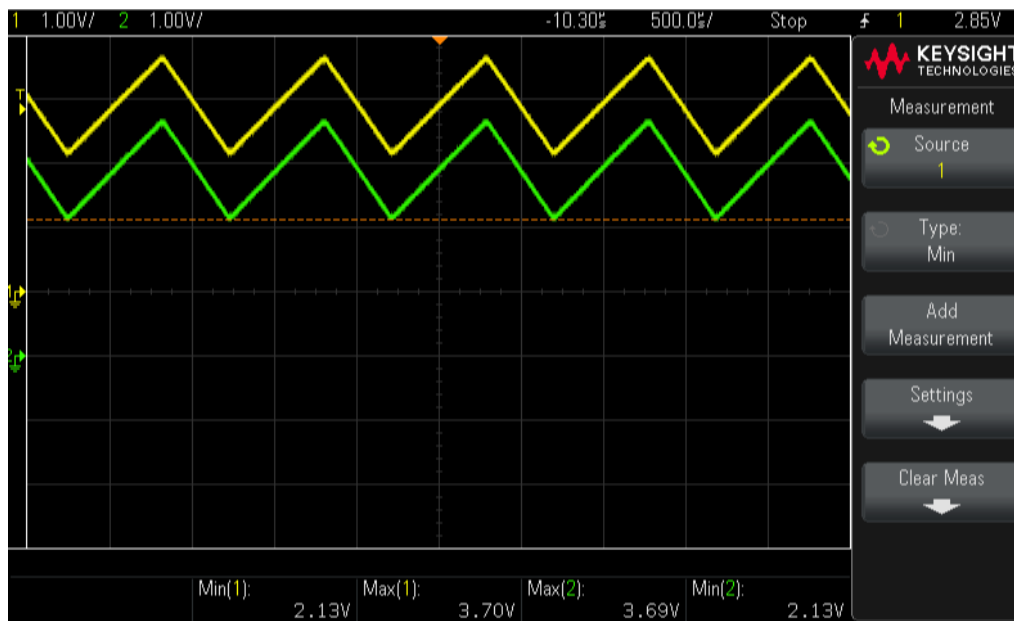


Figura 4.9 - Formas de onda da tensão de referência e tensão na carga.

O traço a amarelo corresponde à tensão de referência e o traço a verde corresponde à tensão na carga, resistência R_1 . Para melhor visualização, evitando a sobreposição de ambas as formas de onda, foi atribuído um *offset* de 1V no osciloscópio. É possível observar que os valores de tensão registados pelo osciloscópio são muito semelhantes, indicando que a tensão pretendida segue a referência.

Ainda, os valores apresentados correspondem a uma corrente a variar entre os 24,7 e os 14,2 mA, valores muito próximos dos pretendidos.

4.2.3 Comutação entre fontes

Um dos desafios enfrentados durante o desenvolvimento do circuito foi a procura por uma solução que permitisse efetuar a comutação entre as duas fontes de alimentação.

Uma das primeiras abordagens testada foi através de um relé do tipo DPDT (*double pole double through*), atuando como uma ponte H mecânica. Esta era uma solução extremamente apelativa devido à sua simplicidade de

implementação. Acontece que, devido à sua natureza mecânica, os contactos físicos ao serem fechados originam um elevado tremor na tensão aos terminais do laser. Este tremor é causado pelo facto de o contacto não ser feito uma única vez durante o fechar do circuito, mas sim múltiplas vezes até todos os componentes mecânicos estabilizarem no interior do relé. A figura abaixo ilustra o ruído que surgia nos terminais do laser durante uma comutação.

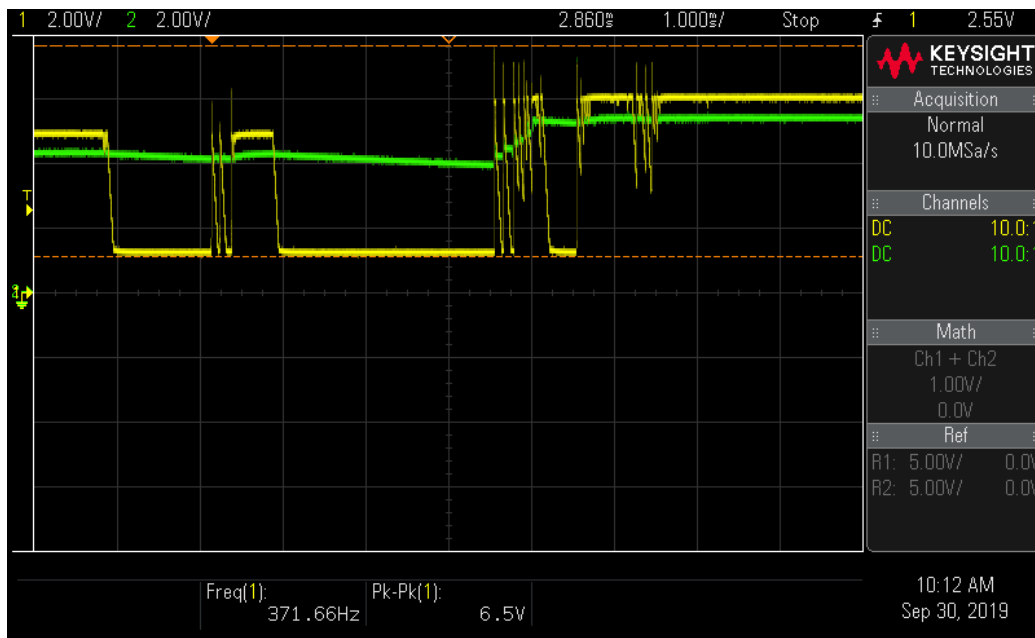


Figura 4.10 – Exemplo do ruído gerado pela comutação do relé nos terminais do laser. A risca amarela representa a tensão no ânodo e a risca verde representa a tensão no cátodo do laser.

Este tremor não é, de todo, aconselhado ao laser, motivo pelo qual esta abordagem foi abandonada.

A segunda abordagem baseou-se na utilização de 4 transístores do tipo mosfet numa configuração em ponte H. Esta abordagem permitiu anular o problema da solução anterior, no entanto, devido aos baixos níveis de tensão utilizados no circuito, surgiram problemas de polarização dos transístores, não sendo possível colocá-los na região de saturação.

A solução que apresentou melhores resultados consistiu na utilização de um interruptor analógico do fabricante Maxim, cujo modelo é o MAX4678. Este circuito integrado possui quatro interruptores no seu interior, que são comandados por sinais de tensão. Desta forma, um único circuito integrado permite comutar entre ambas as fontes (fonte modulada a 1 kHz para interrogação dos FBG e *driver* para interrogação dos LPG).

Este componente demonstrou-se bastante adequado pois não apresenta ruído durante as comutações e possui uma resistência máxima de 3,5 Ω , sendo praticamente insignificante perante o circuito. Para além disso, permite a passagem de correntes até 50 mA, muito acima dos valores permitidos pelo laser. Abaixo é apresentada uma figura da constituição interna deste componente.

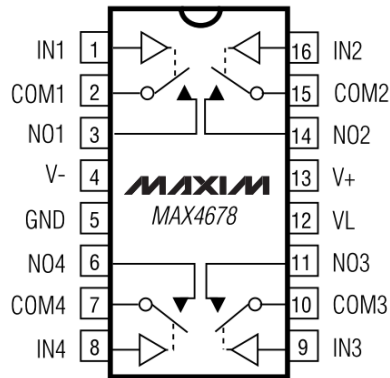


Figura 4.11 - Arquitetura interna do interruptor analógico MAX4678 [57].

É também de salientar que este componente pode ser controlado diretamente pelo microcontrolador, o que se torna bastante útil, e a sua implementação é apresentada no subcapítulo seguinte.

4.2.4 Circuito de proteção e leitura de corrente do laser

Como medida de segurança para proteger o laser de quaisquer picos de corrente inesperados, foi idealizado um circuito de proteção de corrente. Este circuito utiliza um sensor de corrente, modelo MAX9929 (apresentado mais abaixo), um comparador e um circuito lógico do tipo *latch SR*, para o qual foi utilizado o componente 74HC00 que possui 4 portas lógicas do tipo NAND.

Uma porta do tipo NAND tem a seguinte tabela de verdade.

Tabela 4.2 - Tabela de verdade de uma porta lógica NAND.

Entrada 1	Entrada 2	Saída
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Uma *latch* do tipo SR (*Set/Reset*) possui a seguinte configuração.

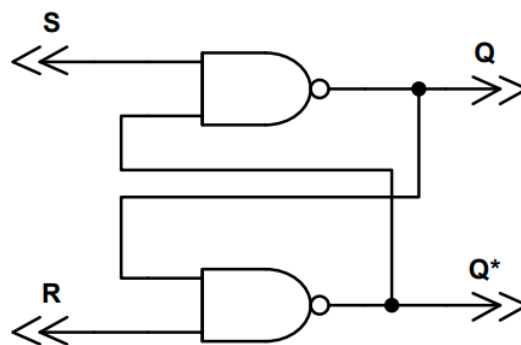


Figura 4.12 - Circuito lógico de uma *latch* do tipo SR.

E tem a seguinte tabela de verdade.

Tabela 4.3 - Tabela de verdade de uma *latch* SR.

Set (S)	Reset (R)	Q	Q*
0	0	Situação inválida	
0	1	1	0
1	0	0	1
1	1	Mantém os valores	

Pela tabela de verdade verifica-se que, em situação normal, ambas as entradas se encontram no nível lógico *High*. Caso se pretenda ativar a saída Q, é necessário transitar a porta *Set* a *Low*, mantendo a porta *Reset* a *High*. Para desativar a saída é necessário efetuar o procedimento contrário.

A lógica de proteção implementada consistiu na utilização de um comparador, que compara o valor proveniente do sensor de corrente com uma tensão de referência ajustável por um potenciômetro. Esta tensão de referência permitirá ajustar o valor máximo de corrente que pode fluir pelo laser.

Caso a corrente lida pelo sensor ultrapasse o valor determinado, a saída do comparador atua sobre a porta *Reset* do circuito lógico, interrompendo a alimentação do laser por meio de atuação sobre 2 transístores mosfet.

Para voltar a ligar o circuito é necessário dar um impulso na porta *Set*, após se garantir que a corrente se encontra dentro do limite.

Uma vez que este circuito não permite o desligar intencional da alimentação do laser, a saída Q foi ligada a uma terceira porta NAND, sendo a outra entrada ligada ao microcontrolador. Assim, o laser pode ser desligado através da atuação da proteção de corrente ou através do comando do operador.

À saída da porta lógica NAND foi colocado um comparador, que compara a tensão à saída da porta com um valor de tensão intermédio, dado pelo divisor resistivo de R7 e R8 (da figura apresentada abaixo). Quando a saída da porta NAND está no nível lógico "*High*", correspondendo aos 5V da sua alimentação, a saída do comparador apresenta uma tensão de 0V. Analogamente, quando a porta NAND está no nível lógico "*Low*" a saída do comparador encontra-se em torno dos 7,5V.

Este pequeno circuito foi adicionado para negar a saída da porta NAND e polarizar mais eficazmente o mosfet tipo P, utilizando o de tipo N. Estes são os transístores responsáveis pelo corte ou condução de corrente no laser

O circuito final encontra-se representado na figura que se segue.

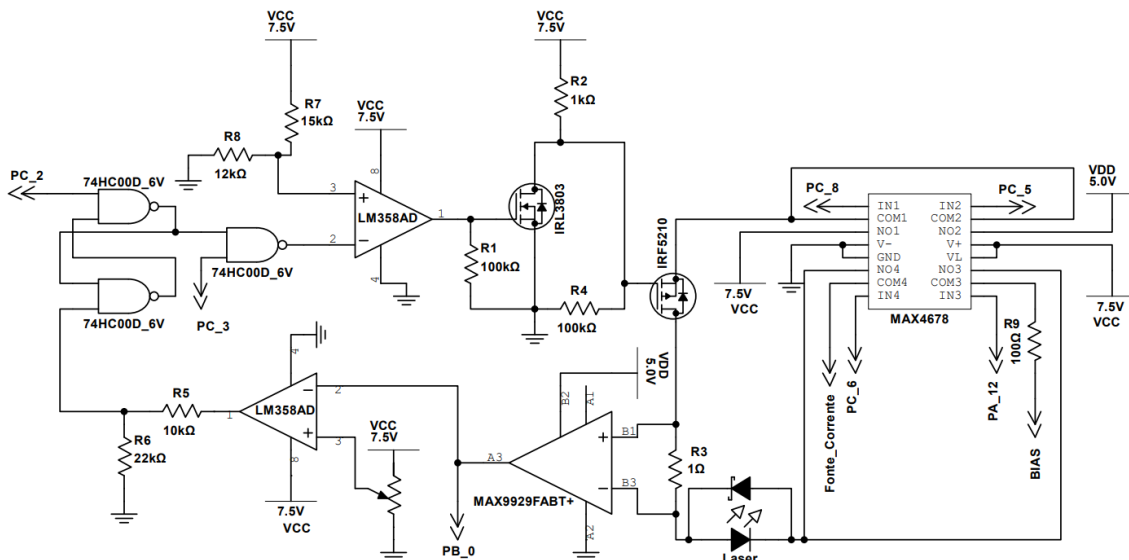


Figura 4.13 - Circuito de ligação do laser, proteção e monitorização da corrente.

Em paralelo, e de forma contra polarizada ao laser, foi colocado um díodo *schottky* para limitar possíveis contra polarizações sobre o laser. Este tipo de díodos apresenta um tempo de resposta mais rápido que os díodos convencionais, e irá limitar qualquer tensão inversa a um valor máximo de 0,7 V, sendo este um valor que se encontra dentro dos limites aceitáveis.

Também na figura estão representadas todas as ligações deste circuito ao microcontrolador utilizado. Abaixo encontra-se uma tabela com as funções de cada uma destas ligações.

Tabela 4.4 - Funções dos pinos de ligação ao microcontrolador da figura 4.13.

Pino	Função
PC_3	Comando da porta lógica NAND para o ligar e desligar do laser.
PC_2	Comando da porta <i>Set</i> da <i>Latch SR</i> .
PC_8	Controlo do Interruptor da entrada da fonte de corrente.
PC_6	Controlo do Interruptor da saída da fonte de corrente.
PC_5	Controlo do Interruptor da entrada do <i>driver</i> do laser.
PA_12	Controlo do Interruptor da saída do <i>driver</i> do laser.
PB_0	Leitura do sensor de corrente.

Tal como foi referido anteriormente, a leitura de corrente é feita com recurso ao circuito integrado MAX9929, presente na Figura 4.13.

Este circuito integrado comporta-se como um amplificador operacional, que mede a queda de tensão numa resistência colocada em série com o circuito ao qual se pretende medir o valor de corrente. Este valor de corrente é, então, convertido para um valor de tensão através da seguinte fórmula:

$$V = (R_{sense} \times I)A_v [V] \quad (4.4)$$

Sendo V a tensão na saída do sensor de corrente, I a corrente a medir, R_{sense} a resistência colocada em série com o circuito e A_v um ganho atribuído à

multiplicação destes dois valores, e que é dado pelo fabricante como sendo de 50 V/V.

A resistência R_{sense} deverá ser o mais pequena possível para ter pouca influência no circuito, por outro lado, uma vez que este valor será lido pelo microcontrolador, é desejável que a tensão na saída do sensor de corrente apresente uma gama de variação próxima da gama de tensão aceitável pelos ADCs do microcontrolador. Assim sendo, foi utilizada uma resistência de 1Ω .

Devido à incerteza associada ao valor real desta resistência, foi feita uma calibração do sensor de corrente através da montagem de um pequeno circuito em *breadboard*, utilizando uma fonte de tensão, uma carga, um amperímetro e um voltímetro. O esquema de montagem apresenta-se abaixo.

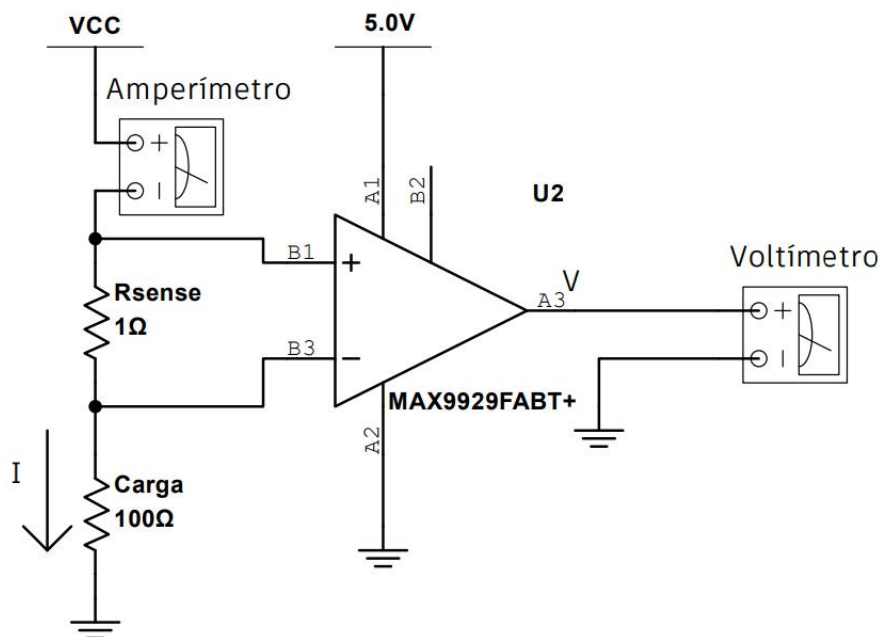


Figura 4.14 - Esquema de montagem utilizado para calibração do sensor de corrente MAX9929.

Para o processo de calibração fez-se variar a tensão de alimentação (VCC) da carga de 100Ω , e registados os valores à saída do sensor de corrente e da corrente medida com o amperímetro. O pino B2 é um pino adicional que indica o sentido da corrente. Por não ser necessário neste projeto este pino não foi utilizado.

Apresenta-se de seguida a reta da tensão à saída do sensor de corrente, em V, em função da corrente medida pelo amperímetro, em mA.

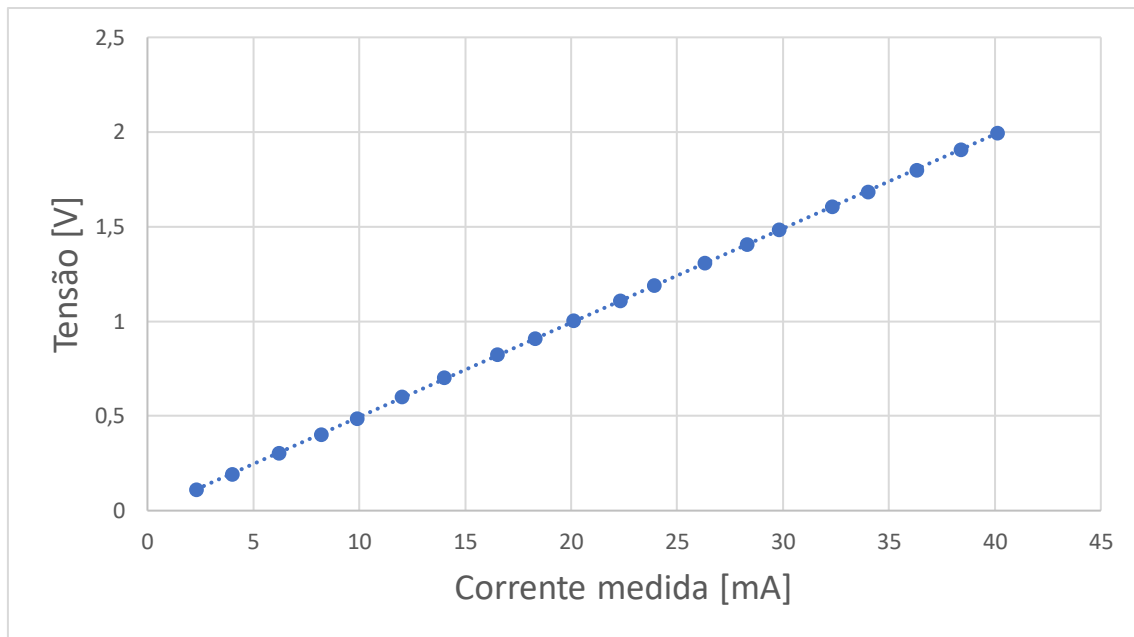


Figura 4.15 - Reta de calibração do sensor de corrente MAX9929.

Verifica-se um comportamento linear entre a corrente e a tensão de saída do sensor de corrente, e que se traduz pela equação abaixo:

$$V = (0,0489 \times I) - 0,0022 [V] \quad (4.5)$$

Como seria de esperar, comprova-se que o ganho se encontra muito próximo do ganho fornecido pelo fabricante.

Por fim, o valor de corrente é dado por:

$$I = \frac{V + 0,0022}{0,0489} [mA] \quad (4.6)$$

4.3 Controlo de temperatura do laser

Como foi já referido, para a medir a característica espectral dos LPG, será feito um varrimento no espetro por meio da variação da temperatura do laser.

Esta metodologia é possível graças ao coeficiente térmico do laser, que representa a variação do seu comprimento de onda em função da temperatura. De acordo com o fabricante do laser este valor anda em torno dos 0,5 nm/°C, sendo que a gama de temperaturas aceitáveis encontra-se entre os 0°C e os 60°C, o que se traduz num varrimento espectral máximo de 30 nm.

Tipicamente, o valor do coeficiente térmico desejável é o menor possível, por forma a que o laser se mantenha estável e independente da temperatura. No entanto, para o âmbito deste projeto, foi escolhido um laser que apresentasse a situação completamente oposta para permitir cobrir uma largura espectral o maior possível.

A transferência de calor de, e para, o laser será feita através de um bloco de alumínio no qual aquele fica embutido, e será utilizada uma pasta térmica para permitir uma melhor transferência de calor entre ambos os corpos. A escolha pelo alumínio baseou-se no facto de ser um material com elevada condutividade térmica e preço baixo, comparativamente a outros candidatos, como por exemplo o cobre.

A monitorização da temperatura do conjunto bloco e laser será feita através de dois orifícios feitos no bloco de alumínio, onde serão colocados dois termístores.

O bloco desenhado apresenta-se na figura que se segue e o desenho técnico criado está remetido no Anexo B.

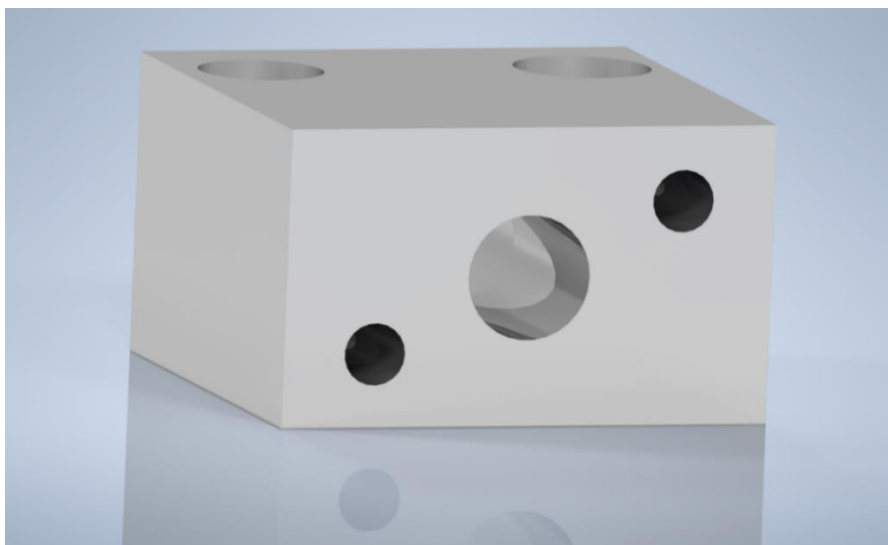


Figura 4.16 - Bloco de alumínio projetado para acomodar o laser e termístores para efeitos de trocas de calor com os *peltiers*.

A geração de calor será feita através de dois módulos *peltier* colocados um sobre o outro, ligados eletricamente em série e acoplados ao bloco de alumínio. Foi, novamente, utilizada massa térmica para melhorar o contacto entre ambos.

Um módulo de *peltier* consiste num dispositivo composto por dois materiais semicondutores distintos (sendo um do tipo N e outro do tipo P), ligados em série e colocados fisicamente em paralelo como representado na figura abaixo [58].

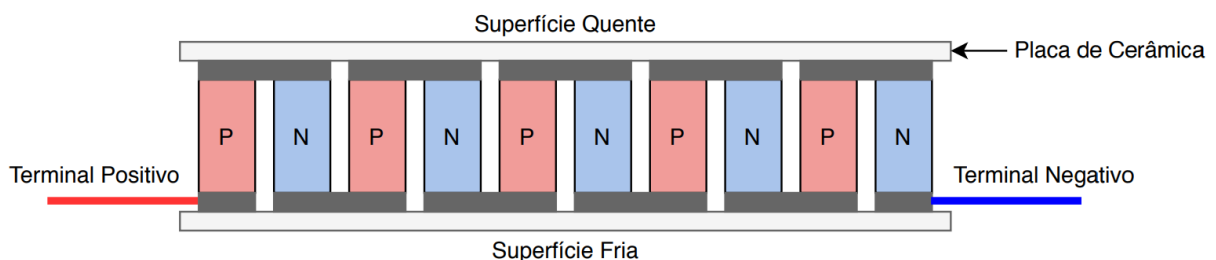


Figura 4.17 - Constituição física de um módulo de *peltier*.

Ao ser colocada uma diferença de potencial nos terminais de um módulo de *peltier*, ocorre por ele uma passagem de corrente e dá-se uma transferência de calor de um dos lados para o lado oposto. Assim, uma das faces do módulo irá aquecer enquanto que a outra irá arrefecer. Invertendo a polaridade dos terminais surge uma corrente em sentido oposto, e a transferência de calor muda também de sentido. Este fenómeno é baseado no Efeito de *Peltier*.

Esta característica permite que os módulos de *peltier* sejam capazes de aquecer e arrefecer o bloco de alumínio.

Os *peltiers* adquiridos, modelo MCPE1-03108NC-S, apresentam uma tensão e corrente nominais de 3,8V e 8,5 A. Sendo este um consumo elevado de corrente, superior àquele que a fonte de alimentação adquirida é capaz de fornecer, o seu controlo será feito com recurso à técnica de PWM, cujo fator de ciclo será dado por um controlador do tipo proporcional.

A técnica PWM (*Pulse Width Modulation* – Modulação por Largura de Impulso) consiste numa lógica de comutação periódica e que será aplicada na alimentação dos *peltiers*. Nesta técnica, os módulos serão ligados e desligados a uma frequência de 1 kHz com fatores de ciclo variáveis. A seguinte figura ilustra este comportamento.

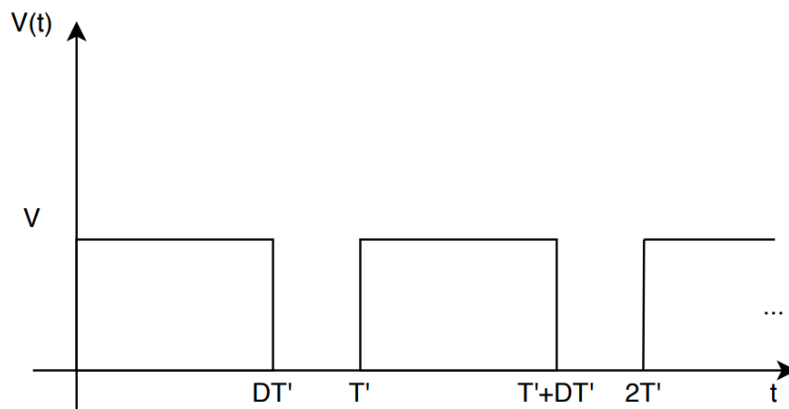


Figura 4.18 - Representação da técnica PWM.

Sendo V a tensão de alimentação dos *peltiers*, t o tempo, T' o período e D o fator de ciclo. Este último consistirá num valor compreendido entre 0 e 1 e representa o período de tempo, normalizado ao período de comutação, que os *peltiers* são alimentados. Quanto maior o fator de ciclo, maior o valor médio da tensão fornecida aos *peltiers* e, conseqüentemente, maior será o valor médio da corrente por estes consumida. Para evitar um valor elevado de corrente, será atribuído um valor máximo do fator de ciclo a aplicar.

O circuito de comando dos *peltiers* implementado foi o seguinte.

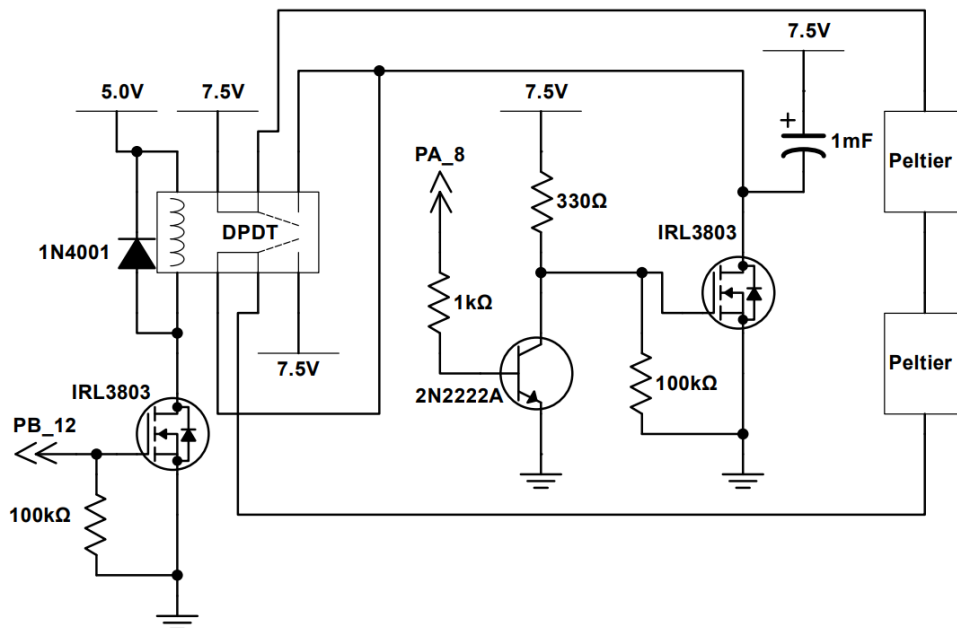


Figura 4.19 - Circuito de alimentação e troca de polaridade dos módulos de *peltier*.

Foram utilizados dois módulos de *peltier* pois, por um lado, a soma das suas tensões de alimentação resulta na tensão fornecida pelo transformador adquirido, evitando a necessidade de instalação de um conversor DC-DC redutor. Por outro lado, reduz a diferença de temperatura entre ambas as faces de cada *peltier*, reduzindo o esforço térmico.

A troca de polaridade foi realizada através de um relé do tipo DPDT, cujo comando é efetuado através do microcontrolador que atua na *gate* do mosfet a ele associado. Ainda, nos terminais de alimentação do relé, foi instalado um díodo de roda livre para suprimir quaisquer tensões que possam surgir, resultantes do desligar do relé, e evitar que estas possam danificar qualquer componente do circuito.

Também para melhor polarizar o transistor, por onde irá fluir a corrente proveniente dos *peltiers*, foi utilizada uma configuração *pull up* com recurso a um BJT 2N2222. O sinal de PWM, fornecido pelo microcontrolador, é colocado na base do transistor BJT surgindo, de forma negada e amplificada, o mesmo sinal PWM no seu coletor. Este último sinal é, então, fornecido ao mosfet.

Em paralelo com os *peltiers* foi necessário colocar um condensador de 1 mF pois verificou-se que, para a situação de arrefecimento, os *peltiers* não funcionavam corretamente, não sendo capazes de arrefecer. A instalação deste condensador mostrou uma melhoria significativa na capacidade de arrefecimento do sistema.

Este comportamento foi atribuído ao facto de os *peltiers* serem dispositivos pouco eficientes, sobretudo quando operados sob uma lógica PWM. Em [59] é comparada a alimentação de dois módulos *peltier*, sendo um alimentado com uma tensão DC e outro através de PWM. Os resultados

demonstraram uma eficiência superior em seis vezes no caso da alimentação DC.

Portanto, ao ser incluído o condensador em paralelo com os *peltiers*, foi possível filtrar o valor da tensão de alimentação e estes passaram a ser, efetivamente, capazes de arrefecer o bloco de alumínio.

Devido à elevada corrente que flui pelo mosfet associado aos *peltiers* e, pelo facto de lhe ser aplicada uma lógica PWM, observou-se uma elevada dissipação de calor. Por este motivo, foi necessária a colocação do mosfet num dissipador passivo, permitindo arrefecê-lo adequadamente evitando que se danifique a longo prazo.

No modo de arrefecimento é ainda necessário garantir uma dissipação de calor na superfície dos *peltiers* que irá aquecer. Isto deve-se ao facto de que, caso não haja esta dissipação, começa a haver transferência de calor da superfície quente para a superfície fria sendo que, após algum tempo, ambas as superfícies atingem um equilíbrio térmico e começam a aumentar a sua temperatura em simultâneo.

Para resolver esta situação foi utilizado um método de arrefecimento ativo, com recurso a uma ventoinha removida de uma placa gráfica de computador. Uma vantagem desta solução é o facto de a ventoinha possuir um dissipador incorporado, não sendo necessário adquirir um dissipador externo, havendo ainda a garantia de que este conjunto funciona em harmonia.

O circuito implementado para a ventoinha foi o seguinte.

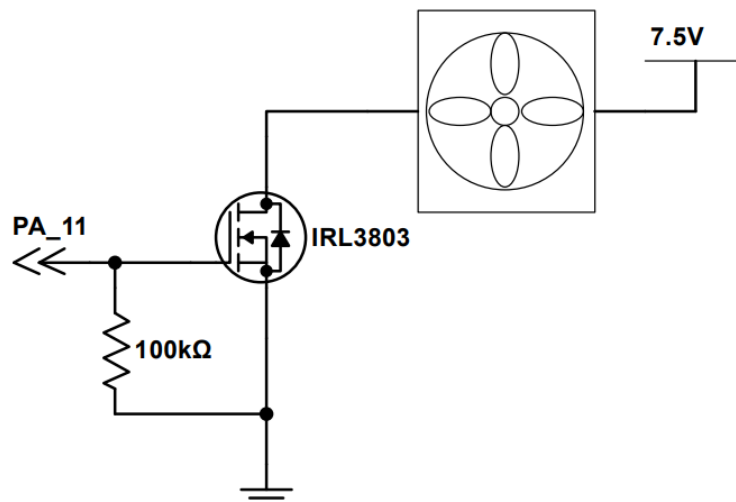


Figura 4.20 - Circuito de comando do arrefecimento ativo.

Um outro fator a considerar relaciona-se com a condensação, que é expectável que ocorra, para a situação em que é pretendido o arrefecimento do bloco para temperaturas abaixo da temperatura ambiente.

Sendo de extrema importância evitar que esta condensação entre em contacto com qualquer parte do circuito elétrico, foi desenhado um

encapsulamento externo para o conjunto laser, bloco de alumínio e *peltiers*. Este bloco foi, posteriormente, criado com recurso a uma impressora 3D. Desta forma, é possível reter qualquer condensação que possa eventualmente ocorrer. O encapsulamento apresenta-se abaixo e o desenho técnico encontra-se no Anexo C.

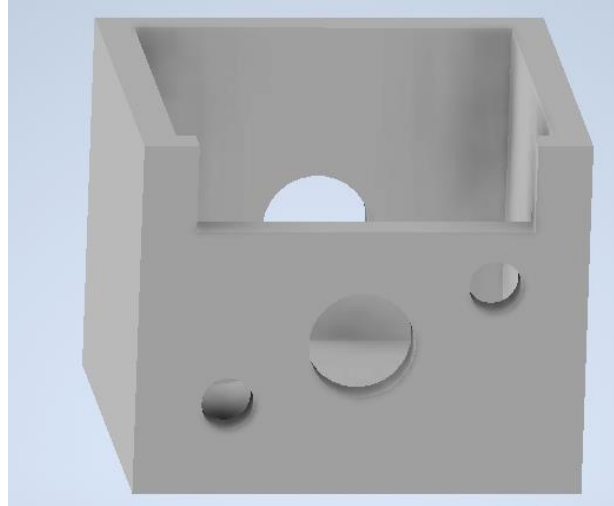


Figura 4.21 - Encapsulamento desenvolvido na impressora 3D para acomodar o bloco de alumínio e conter possíveis condensações.

Quando montado, o conjunto encapsulamento, bloco de alumínio e ventoinha apresenta o seguinte aspeto.

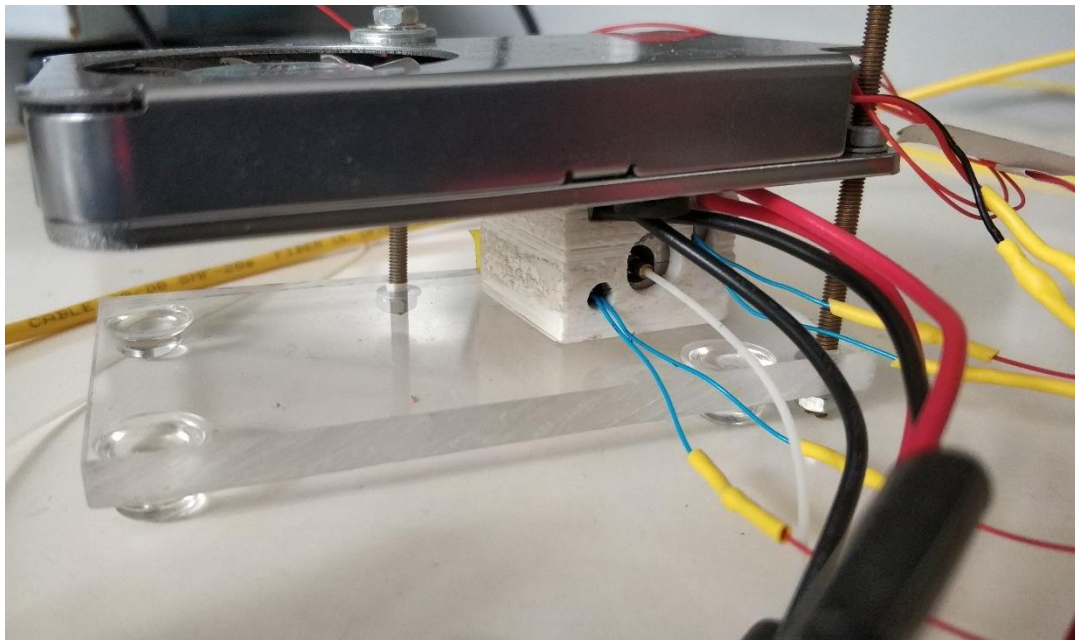


Figura 4.22 - Montagem do encapsulamento, bloco de alumínio e ventoinha.

4.3.1 Medição de temperatura

A medição da temperatura do laser é feita com recurso a dois termístores do tipo NTC (*Negative Temperature Coefficient*).

O termistor é um dispositivo resistivo, cuja resistência é afetada pela temperatura a que ele está sujeito. Sendo um termistor do tipo NTC, este irá apresentar uma redução da sua resistência com o aumento da temperatura [60].

Cada um dos termistores será colocado num dos orifícios do bloco de alumínio apresentado anteriormente, medindo a temperatura do bloco e, conseqüentemente, do laser nele contido, uma vez atingido o equilíbrio térmico.

Uma vez que o comportamento da resistência do termistor não é linear, torna-se necessária a utilização de uma equação aproximada deste comportamento, a fim de se poder obter o valor da temperatura.

A equação da temperatura, em Kelvin, utilizada neste projeto, foi adaptada de um modelo deduzido por John S. Steinhart e Stanley R. Hart [61], e é dada por:

$$\frac{1}{T_K} = \frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{R}{R_0}\right) + \frac{1}{T_0} \leftrightarrow T_K = \frac{1}{\frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{R}{R_0}\right) + \frac{1}{T_0}} [K] \quad (4.7)$$

Sendo β um parâmetro fornecido pelo fabricante e R_0 a resistência do termistor à temperatura T_0 . Os termistores utilizados, modelo B57861S0303F045, possuem um β de 3964 e apresentam uma resistência R_0 de 30 k Ω a 25°C (298.15 K). Para a medição da resistência de cada um dos termistores foi criado o seguinte circuito.

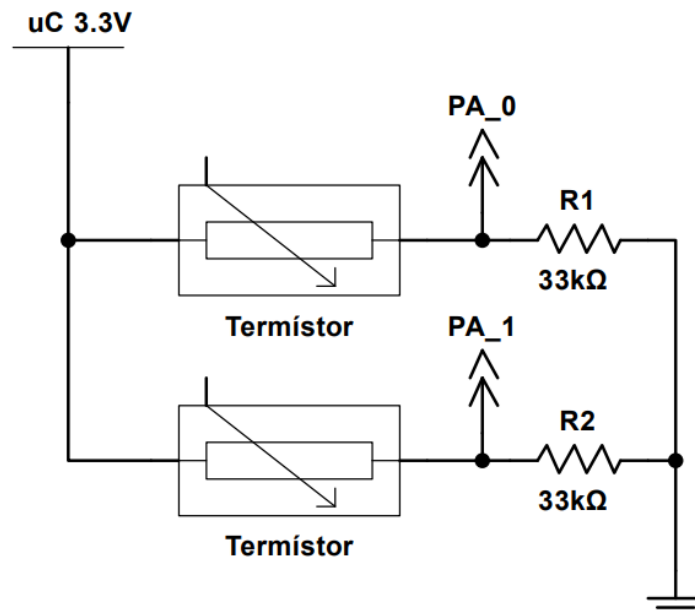


Figura 4.23 - Circuito implementado para leitura da temperatura fornecida pelos termistores.

O circuito consiste em dois divisores resistivos, um para cada termistor, sendo estes colocados em série com uma resistência de 33 k Ω . Todo o circuito é alimentado pelos 3.3 V provenientes do microcontrolador.

A medição da resistência dos termístores é, então, feita de forma indireta, através da medição do valor de tensão no ponto intermédio entre os termístores e as resistências.

Posteriormente, pode ser efetuado o cálculo da resistência dos termístores através da expressão:

$$R = \frac{33 \times 10^3}{V} \times 3.3 - 33 \times 10^3 \text{ } [\Omega] \quad (4.8)$$

Este último resultado é, então, utilizado para obter o valor da temperatura através da equação adaptada de Steinhart-Hart apresentada em (4.7).

4.4 Circuito do Fotodetector

Para a medição da potência ótica após os *gratings* foi adquirido um fotodetector, modelo PF512 do fabricante Roithner. A escolha deste modelo baseou-se no facto de atuar no comprimento de onda de interesse (1300 nm) e incorporar um conector do tipo FC (*ferrule connector*), o que facilita o acoplamento da luz.

Para que o microcontrolador seja capaz de obter informação sobre a potência ótica na entrada do fotodetector, foi utilizado um amplificador de transimpedância cujo circuito se apresenta abaixo.

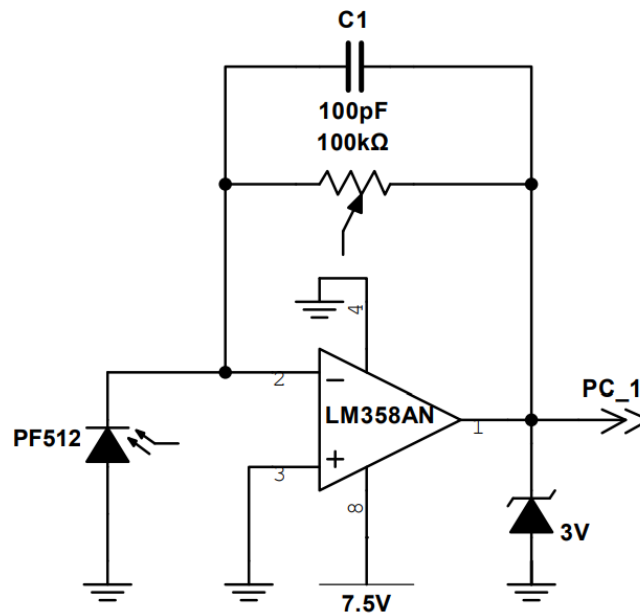


Figura 4.24 - Circuito do amplificador de transimpedância implementado.

O fotodetector, quando sujeito a uma determinada potência ótica, induz um fluxo de corrente do cátodo para o ânodo e, tipicamente, esta corrente apresenta boa linearidade com a intensidade ótica, mas apresenta valores bastante baixos. Por outro lado, o microcontrolador é apenas capaz de medir valores de tensão.

O circuito amplificador de transimpedância permite a conversão dos valores de corrente para valores de tensão. O potenciômetro apresentado na figura anterior serve para atribuir um determinado ganho, para que os valores de tensão variem dentro da gama permitida pelo microcontrolador.

O condensador efetua a filtragem de algumas componentes de alta frequência que possam surgir. Este valor foi ajustado iterativamente por forma a não distorcer o sinal triangular quando está a ser utilizado o circuito responsável pelo *dithering*.

Para proteção do microcontrolador foi colocado um díodo zener de 3V contra polarizado entre a saída do ampop e o *ground*. Desta forma, se por algum motivo a tensão for superior a 3V, o díodo zener irá entrar em condução, protegendo o microcontrolador contra possíveis sobretensões que o possam danificar.

4.5 Microcontrolador

Para o controlo, comunicação com a interface de utilizador e aquisição de dados de todo o sistema foi utilizado o microcontrolador STM32F030R8, do fabricante STMicroelectronics.

Este microcontrolador possui um processador modelo Arm 32-bit Cortex M0 e, portanto, de 32 bits, sendo alimentado com uma tensão de 3,3V.

Possui um periférico ADC (*analog to digital converter*), de 16 canais, responsável pela leitura dos valores de tensão provenientes dos vários circuitos de medição. Este ADC possui uma resolução de 12 bits, o que representa uma resolução de cerca de 0,81 mV, sendo este um valor adequado para todas as medições efetuadas. A gama de leitura encontra-se compreendida entre 0 e 3,3 V.

O microcontrolador conta ainda com 55 portas GPIO (*General Purpose Input/Output*), algumas das quais serão utilizadas para comando do circuito, como por exemplo no interruptor analógico, ligar e desligar a ventoinha e controlo do relé DPDT.

Será também feito uso de alguns dos *Timers* disponíveis, para acionamento do ADC, efetuando leituras de forma periódica, sinal de PWM para os *peltiers* e envio da informação para o computador.

O envio da informação será feito através de uma comunicação UART (*Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*) que este microcontrolador também dispõe.

4.6 Custo total do equipamento

Uma das premissas deste projeto é a criação de um equipamento de baixo custo comparativamente às soluções existentes no mercado e apresentadas anteriormente.

A tabela que se segue reúne todos os custos associados ao circuito implementado.

Tabela 4.5 - Lista de preços do equipamento.

Componente	Referência	Preço (€)
Componentes eletrónicos		58,49
Fonte de alimentação	GS25E07-P1J	23,74
Módulos Peltier (x2)	MCPE1-03108NC-S	29,12
Laser	QFLD-1310-5SAX	141,29
Fotodetector	PF512	93,45
Ventoinha		7,85
Microcontrolador	STM32F030R8T6	9,95
Adaptador UART	SparkFun FTDI Basic Breakout – 3,3 V	13,30
Total		377,22

Contabilizando todos os componentes utilizados para construção do equipamento, o custo final rondou os €377, ficando muito abaixo dos valores das soluções apresentadas anteriormente, que requerem analisadores de espectro e fontes de espectro largo. Este valor não contempla, no entanto, o preço de um computador, necessário ao funcionamento deste equipamento de interrogação.

Comparativamente aos analisadores de espectro, o equipamento desenvolvido apresenta uma gama de leituras espectrais muito mais reduzida, e que depende diretamente da reposta em temperatura do laser adquirido. Ainda assim, acaba por ser uma solução a considerar no contexto de uma implementação prática para instalação no terreno, dadas as suas dimensões e por conter todos os componentes necessários para uma interrogação.

Este equipamento é também expansível em termos da largura espectral de interrogação, sendo possível a instalação em paralelo de mais lasers situados noutras zonas do espectro, permitindo alargar a janela existente ou introduzir outras janelas de interrogação.

Ainda, a adição de mais lasers ao equipamento não implica um encarecimento proporcional do valor, isto é, adicionando mais um laser não duplica o custo do equipamento, uma vez que é possível a reutilização de grande parte dos circuitos para o segundo laser, caso este apresente características semelhantes em termos de alimentação.

5 Trabalho desenvolvido em *Software*

O trabalho desenvolvido em *software* visa possibilitar o controlo e obtenção de dados provenientes do circuito em formato digital.

O desenvolvimento do presente capítulo centra-se, maioritariamente, no trabalho realizado a nível de *software* para dotar o equipamento da capacidade de interrogação de LPG. Apesar de ter sido contemplada no circuito a funcionalidade de interrogação de FBG, através do *dithering*, esta não foi explorada a nível de *software* visto que o laser adquirido não se demonstra adequado para tal, dada a sua elevada largura espectral comparativamente à dos FBG.

Tendo isto em consideração, apresenta-se de seguida o trabalho desenvolvido em *software*.

5.1 Código implementado no microcontrolador

O microcontrolador STM32F030R8, apresentado na secção anterior, foi programado com recurso à linguagem C++ e executa três funções principais sendo elas:

- Comando dos dispositivos de comutação do circuito e controlo de temperatura: como sendo o ligar e desligar do laser, alteração entre fontes de alimentação, sinal PWM para controlo da temperatura, entre outros;
- Aquisição de dados: associado à leitura de tensões com recurso aos ADC do microcontrolador;
- Comunicação com a interface de utilizador: através de uma comunicação UART.

De seguida são descritas, mais detalhadamente, estas funções.

5.1.1 Comando dos dispositivos de comutação e controlo de temperatura

Os dispositivos de comutação aqui associados são todos aqueles que sejam acionados por dois níveis de tensão, sendo eles de 0 V e 3,3V, que correspondem aos níveis lógicos *Low* e *High*, respetivamente. Estes dispositivos compreendem todos os transístores e alguns circuitos integrados, que estão ligados diretamente ao microcontrolador.

Para esta função, todas as portas associadas, excetuando o sinal de PWM para controlo de temperatura, foram configuradas como sendo portas GPIO.

Para o caso do sinal PWM, para controlo de temperatura através da ativação e desativação dos *peltiers*, foi utilizada a funcionalidade de *Timer* (temporizador) do microcontrolador. O *Timer* foi configurado com uma frequência

de 1 kHz, que corresponde a um período de 1 ms. Durante cada período, a porta do microcontrolador estará um determinado período de tempo no nível lógico *Low*, e o tempo restante no nível *High*. Estes tempos são fornecidos através de um algoritmo de controlo, no qual está implementado um controlador do tipo proporcional, que faz uso do erro entre a referência de temperatura e a temperatura atual do bloco, medida através dos termístores. No Anexo D, figura D.1, é apresentado o fluxograma do algoritmo de controlo de temperatura.

Foram implementados dois modos de temperatura, sendo um deles um modo de temperatura constante, cuja referência é proveniente do LabVIEW, e um modo de varrimento, no qual o laser é estabilizado em sucessivas temperaturas discretas e de forma automática. Neste último caso, as temperaturas de referência estão definidas internamente no microcontrolador. No Anexo D, figura D.2, é apresentado o fluxograma do algoritmo de varrimento em temperatura implementado.

A figura que se segue ilustra um varrimento em temperatura efetuado entre os 10°C e os 49°C.

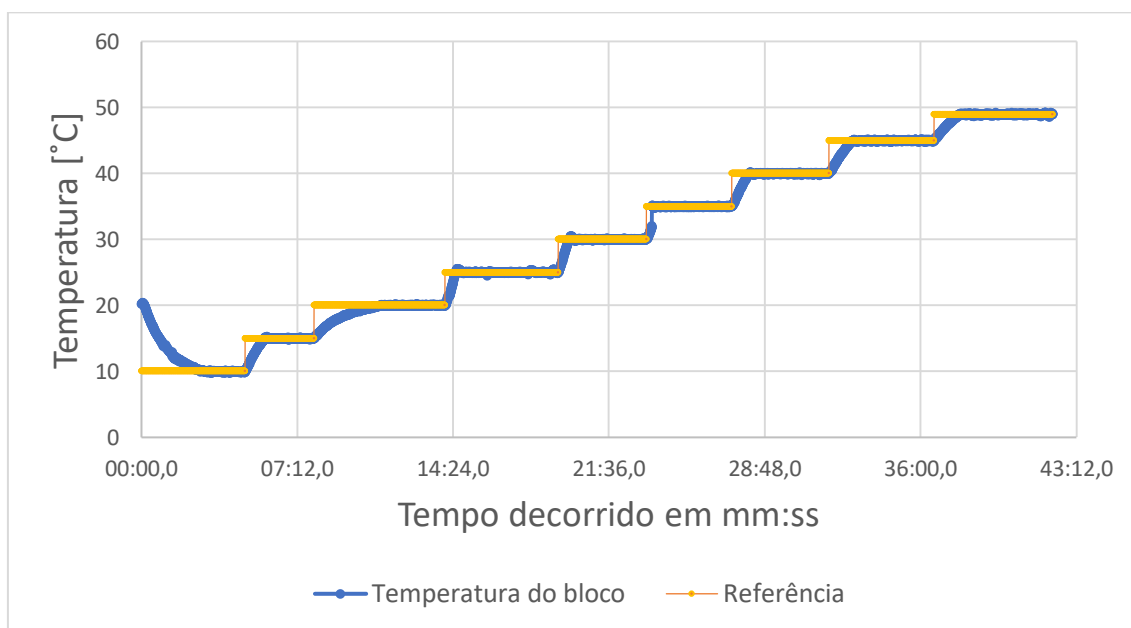


Figura 5.1 - Varrimento em temperatura entre os 10°C e os 49°C.

Ao longo dos vários testes efetuados observaram-se erros máximos de 0,2°C relativamente à referência em regime estacionário. Para além disso, observou-se repetibilidade entre sucessivos varrimentos, demonstrando-se o controlo adequado à tarefa destinada.

5.1.2 Aquisição de dados

A aquisição de dados do circuito é realizada pelo periférico ADC do microcontrolador. O ADC presente no microcontrolador possui 16 canais, permitindo a leitura de 16 valores de tensão em simultâneo.

No circuito implementado são efetuadas quatro leituras de tensão, cada uma necessitando de um pino dedicado no microcontrolador. A tabela seguinte apresenta o mapeamento dos pinos do ADC utilizados.

Tabela 5.1 - Mapeamento dos pinos do ADC do microcontrolador utilizados.

Pino	Funcionalidade
PA_0	Termístor 1
PA_1	Termístor 2
PB_0	Sensor de Corrente
PC_1	Amplificador de transimpedância

Uma vez que os periféricos ADC do microcontrolador são de 12 bits, o valor medido da tensão ($Valor_{ADC}$) estará entre 0 e 4095, sendo necessário converter este valor para valores reais. Para tal é utilizada a seguinte expressão:

$$V = \frac{Valor_{ADC} \times 3.3}{4095} [V] \quad (5.1)$$

A leitura do ADC é desencadeada por um *Timer* com uma cadência de 10 kHz, sendo obtidas as quatro tensões em sequência. Por forma a atenuar o ruído de leitura característico deste tipo de configuração, os valores obtidos ao longo de sucessivas leituras são armazenados em vetores e, posteriormente, é efetuada a média entre os valores armazenados. Este procedimento comporta-se, na prática, como sendo um filtro passa baixo.

Também para melhor aproximar os valores medidos pelo microcontrolador aos valores reais, antes de cada leitura do ADC é feita uma calibração do mesmo, com recurso a um regulador linear presente no microcontrolador. O fluxograma do algoritmo de aquisição de dados do ADC encontra-se apresentado no Anexo D, figura D.3.

A realização de médias e a calibração do ADC a cada leitura permitiram a redução do erro para valores máximos observados de 10 mV, por meio de comparação com um multímetro. Este valor corresponde a erros de cerca de 0,3 °C, 0,2 mA e 0,02 mW, para a temperatura, corrente e potência ótica, respetivamente, valores considerados aceitáveis no âmbito deste projeto.

5.1.3 Comunicação com a interface de utilizador

A comunicação com a interface de utilizador, cuja interface é apresentada no subcapítulo seguinte, é efetuada com recurso a uma comunicação UART.

Neste protocolo a comunicação é feita de forma assíncrona, significando que não existe nenhum sinal de relógio, para efeitos de sincronismo, entre o emissor e o recetor. A informação a transmitir é repartida em vários *bytes*, palavras de 8 bits, e estes são enviados em rajada. Isto obriga a que haja algum

tratamento da informação ao nível digital pois, por vezes, surgem dados cuja dimensão supera esse valor.

No caso concreto da implementação efetuada, esta comunicação foi configurada para funcionar com palavras de 8 bits de informação, adicionando-se um bit de início e um paragem, com uma taxa de transmissão de 115200 bit/s.

Foi ainda parametrizada uma frequência de comunicação de 3 Hz, significando que três vezes por segundo é enviada uma trama, de comprimento fixo, contendo todos os valores do microcontrolador para a interface, e uma outra trama contendo todos os comandos da interface para o microcontrolador.

Não sendo possível uma comunicação deste tipo através da porta USB incorporada na placa de desenvolvimento do microcontrolador, foi necessário um adaptador externo, modelo SparkFun FT232RL, para converter a comunicação UART para USB e ser possível ligar ao computador. A seguinte figura ilustra o esquema de ligação efetuado.

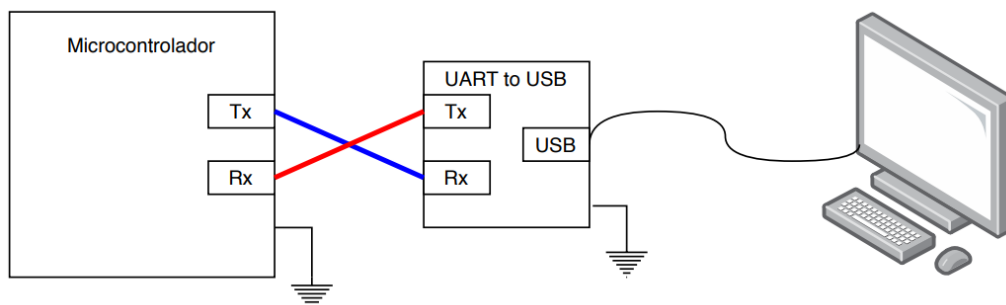


Figura 5.2 - Esquema de ligação utilizado para a comunicação entre o microcontrolador e a interface de utilizador.

As siglas Tx e Rx significam o pino transmissor e recetor, respetivamente, que estão associados aos pinos A9 e A10 do microcontrolador.

No Anexo D, figura D.4, é apresentado o fluxograma do código implementado no microcontrolador para receção dos dados do LabVIEW.

5.2 Interface de Utilizador

Para possibilitar a interação homem-máquina foi desenvolvida uma interface gráfica de utilizador. Será nesta interface onde se irá efetuar todo o controlo do equipamento, como o ligar e desligar do laser, dar ordem de leitura dos LPG, entre outros.

Para além disso, irá apresentar todos os dados de maior importância ao utilizador, como sendo os níveis de temperatura e corrente do laser e as leituras espectrais efetuadas.

O *software* utilizado para a criação da interface gráfica de utilizador foi o LabVIEW, desenvolvido pela empresa *National Instruments*.

O princípio de funcionamento deste *software* baseia-se na criação de Instrumentos Virtuais. É-lhes atribuído esta nomenclatura pelo facto de se assimilarem a um verdadeiro instrumento físico, mas que é exclusivamente desenvolvido a nível de *software*.

Um instrumento virtual é constituído por duas partes:

- Painel frontal: é no painel frontal onde é criada a interface propriamente dita, para a interação com o utilizador. Nele são inseridos todos os gráficos, mostradores e botões que possibilitem a execução de todas as funcionalidades do instrumento. O utilizador só deverá ter acesso a esta parte.
- Diagrama de blocos: é nesta secção onde é programada toda a lógica responsável pelo funcionamento do instrumento virtual. A programação é efetuada, quase exclusivamente, por blocos de funções que, interligados, realizam a lógica pretendida.

A interface gráfica desenvolvida, apresentada no Anexo E, é constituída por um único ambiente principal dividido em três partes, que serão apresentadas de seguida.

Do lado esquerdo do ecrã surge a zona responsável pelo controlo e monitorização da temperatura. É neste painel onde é apresentada a temperatura atual e de referência do laser, e onde se encontram os controlos associados a esta funcionalidade.

O utilizador tem ainda a capacidade de efetuar a calibração da temperatura ambiente, através de um botão dedicado. Esta funcionalidade permite calibrar o sistema para que este tenha uma referência, a fim de saber em que ponto deverá alterar a polaridade dos *peltiers* para efeitos de aquecimento ou arrefecimento. Por defeito o valor inicial encontra-se nos 25°C.

Neste painel é ainda dada a possibilidade ao utilizador de estabilizar a temperatura do laser num valor constante, definindo uma temperatura de referência, ou de efetuar um varrimento em temperatura de forma automática.

Neste último modo de temperatura, o sistema ignora a temperatura de referência fornecida e o varrimento é efetuado ao longo de várias temperaturas previamente estabelecidas no microcontrolador. Para cada temperatura, o microcontrolador certifica-se que esta se mantém estável durante 2 minutos, antes de medir o valor de potência e passar à temperatura seguinte. É neste modo de temperatura que são feitas as interrogações aos LPG.

Um exemplo da informação apresentada no painel da temperatura, durante um varrimento, é apresentado de seguida.

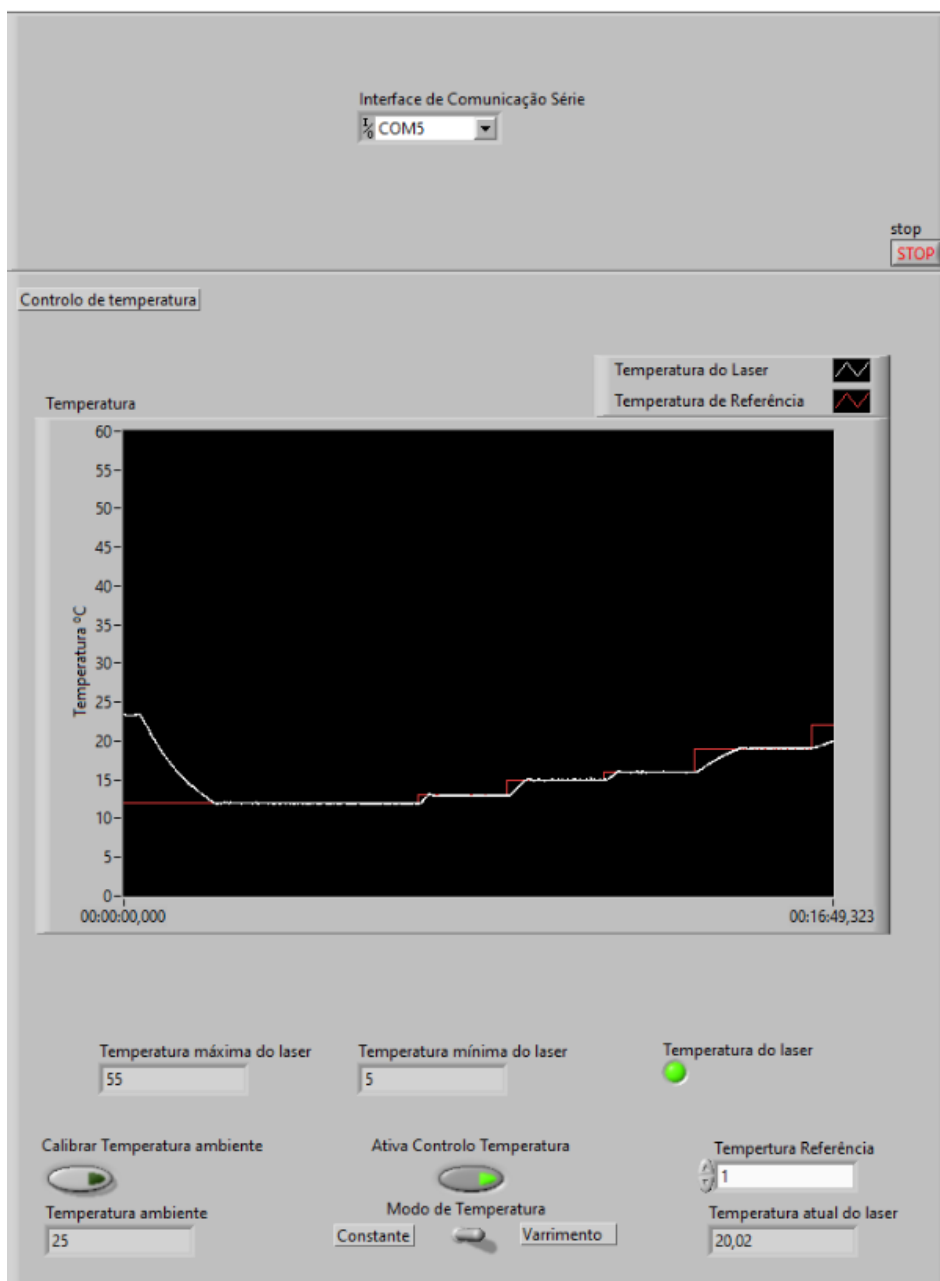


Figura 5.3 - Painel da temperatura na interface de utilizador durante um varrimento em temperatura.

Na figura anterior pode ser visto o gráfico apresentando a temperatura atual do laser (a branco) e as sucessivas temperaturas de referência que vão sendo definidas pelo microcontrolador (a vermelho).

Estão ainda representadas as temperaturas máximas e mínimas que poderão ser definidas para o laser. Caso o laser se encontre fora da gama apresentada por estes valores, um indicador led (presente na figura a verde) passa para uma cor vermelha e o algoritmo de controlo de temperatura do laser é interrompido.

Ao centro da interface homem-máquina surge o painel dos valores de atenuação do LPG resultantes do varrimento, e que vão sendo obtidos, em sequência, à medida que o laser vai estabilizando nas diferentes temperaturas.

Estes valores de atenuação resultam da diferença (em valores logarítmicos) entre a potência de saída do laser e a potência efetivamente recebida pelo fotodetector, na extremidade de saída do LPG.

Na parte inferior deste painel foram implementados os controlos associados ao ligar e desligar do laser, bem como da escolha da fonte de alimentação, sendo possível optar pelo *driver*, que fornece uma corrente constante, ou pela fonte de corrente, que efetua um *dithering* variando, em rampa, a corrente fornecida ao laser.

Também na parte inferior é dada a informação ao utilizador sobre a corrente de alimentação do laser. Para efeitos de *dithering* é ainda apresentada a corrente máxima e mínima fornecida. Desta forma, o utilizador tem conhecimento de qual a excursão de corrente que está a ser utilizada.

Na figura seguinte é apresentado um exemplo do que surge neste painel durante um varrimento.

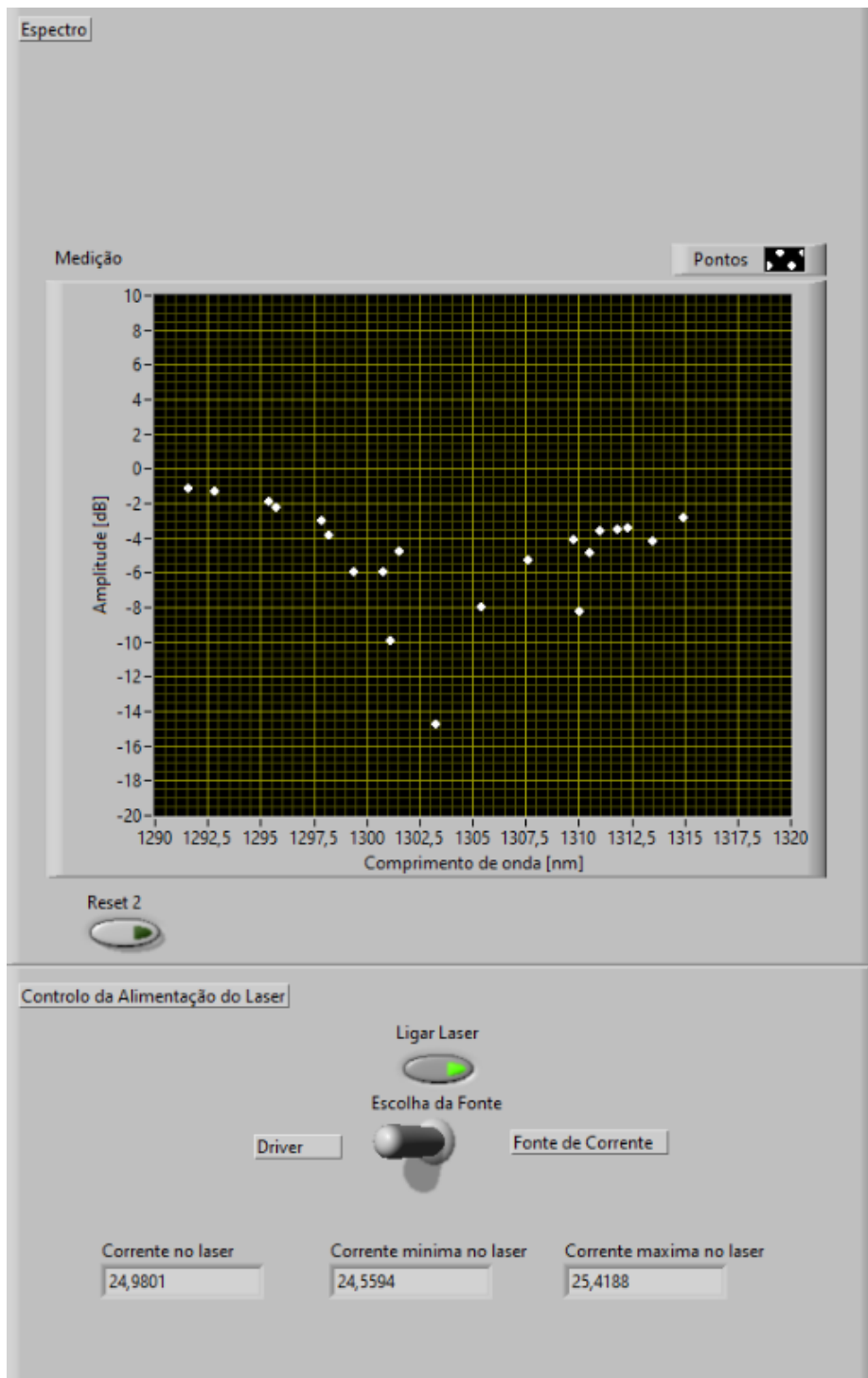


Figura 5.4 - Painel dos pontos de atenuação do LPG medidos pelo equipamento e controlo da alimentação do laser.

No lado direito da interface homem-máquina surge o terceiro painel. Este é dedicado exclusivamente à análise dos pontos registados de atenuação, e criação da curva que melhor se ajusta a esses pontos. A figura seguinte ilustra este painel.

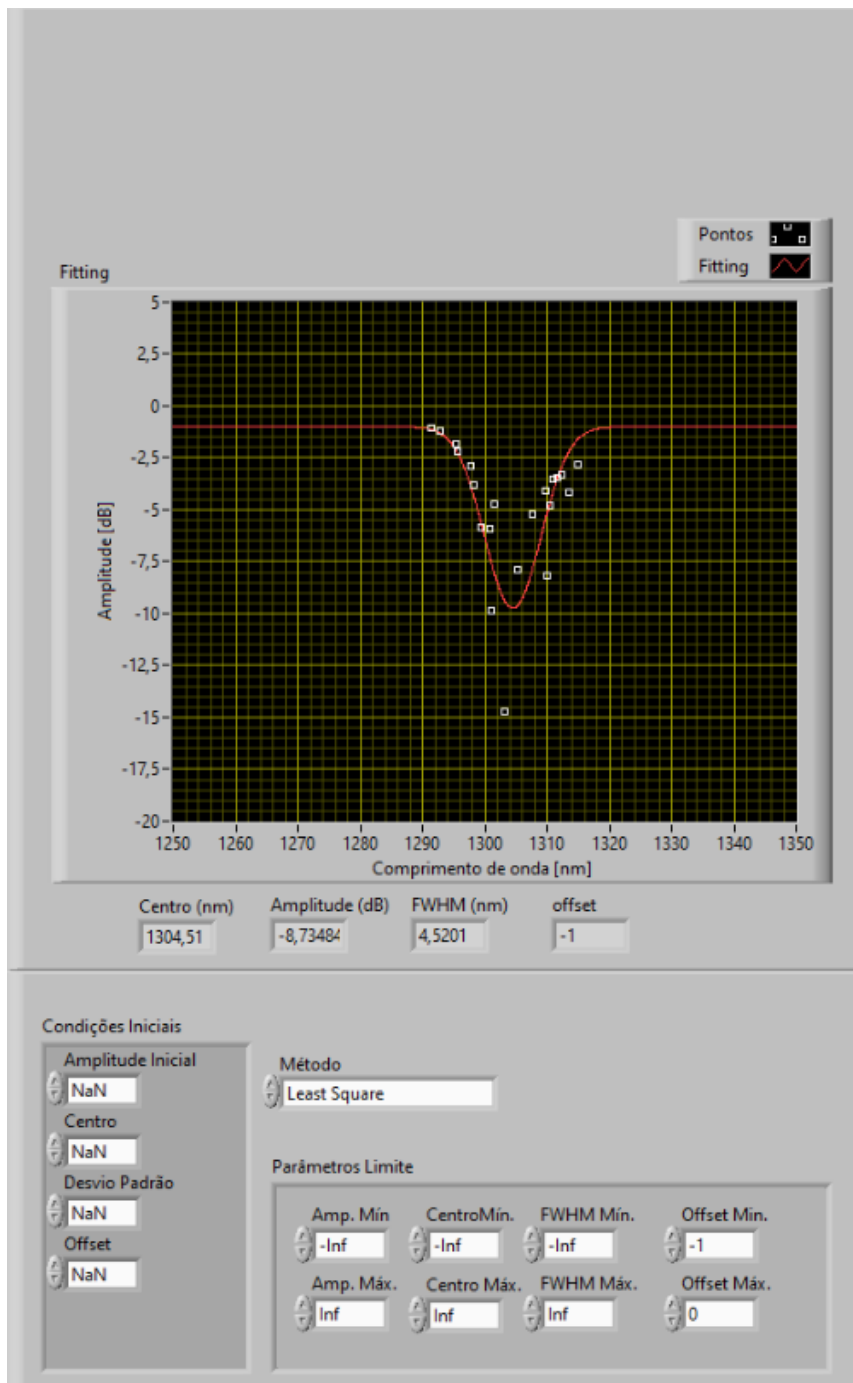


Figura 5.5 - Painel de ajuste dos pontos medidos pelo varrimento em temperatura do laser.

No topo encontra-se um gráfico com os pontos registados e a curva que, de acordo com o algoritmo, melhor se ajusta a esses mesmos pontos. Logo abaixo do gráfico encontram-se os parâmetros de interesse que permitem caracterizar a curva numa equação matemática.

O tipo de ajuste efetuado é baseado no ajuste da Curva de Gauss, cuja equação é dada por:

$$f(x) = a \times e^{-\frac{(x-b)^2}{2c^2}} + o \quad (5.2)$$

Sendo a a amplitude máxima, b o centro da curva, c a largura a meia altura (também denominada de desvio padrão ou *FWHM – Full Width Half Maximum*) e o o *offset*.

O método de ajuste implementado recorre a um bloco funcional do LabVIEW denominado “*Gaussian Peak Fit*”, que consiste num processo iterativo para determinar os parâmetros da Curva de Gauss que melhor se ajustam aos pontos, resultando no menor erro possível.

A fórmula de cálculo do erro difere consoante o método utilizado. Neste painel é dada a opção ao utilizador de escolher um de três métodos disponíveis, sendo eles:

- *Least Square*: este é o método definido por padrão e é adequado para situações em que o erro se encontra bem distribuído ao longo do eixo das ordenadas;
- *Least Square Residual*: este método é adequado quando os valores obtidos apresentam *outliers*, e o ajuste torna-se menos sensível a estes pontos;
- *Bisquare*: este método diminui ainda mais a sensibilidade à presença de *outliers* nos valores obtidos.

Dependendo do método seleccionado poderá observar-se uma melhoria no ajuste da curva, e o utilizador tem a opção de alterar o método e observar a mudança do ajuste em tempo real, permitindo seleccionar a opção que melhor se adapta aos valores registados.

Para além da escolha do método, o utilizador pode limitar a gama de valores entre os quais os parâmetros da Curva de Gauss poderão variar, inserindo-os no quadro denominado de “Parâmetros Limite”.

Por fim, sendo o ajuste um processo iterativo, poderá ser conveniente fornecer uma estimativa inicial dos valores esperados no quadro “Condições Iniciais”. Estes parâmetros poderão ser estimados com base nos pontos obtidos e poderão melhorar a precisão do ajuste. Não sendo fornecidos quaisquer parâmetros o algoritmo irá determiná-los de forma autónoma.

6 Caracterização do Laser e Fotodetetor

Uma componente fundamental para que seja possível efetuar interrogações com este equipamento é a caracterização tanto do laser como do fotodetetor. Estas caracterizações irão permitir traduzir os comportamentos do laser e do fotodetetor adquiridos para expressões matemáticas que serão, posteriormente, introduzidas no microcontrolador.

Relativamente ao laser, as caracterizações efetuadas basearam-se na obtenção da variação do seu comprimento de onda central e da potência ótica em função da temperatura.

Quanto ao fotodetetor, que está associado ao amplificador de transimpedância, a caracterização efetuada permitirá determinar a relação entre a tensão à saída do amplificador e a potência ótica incidente para um determinado comprimento de onda. Esta análise permitirá estudar a variação da responsividade do fotodetetor.

6.1 Caracterização do Laser

O laser adquirido foi o modelo QFLD-1310-5SAX do fabricante QPhotonics, cujas principais características encontram-se reunidas na tabela abaixo.

Tabela 6.1 - Características principais do laser QFLD-1310-5SAX.

Potência ótica nominal	5.4 mW
Tensão de alimentação	1.24 V
Corrente nominal	26 mA
Corrente de limiar	8 mA
Temperatura máxima	60 °C
Temperatura mínima	0 °C

Este laser multimodo é constituído por uma cavidade de Fabry-Pérot e, como tal, tem a sua potência distribuída ao longo do espectro por múltiplos picos, correspondendo aos vários modos suportados pela cavidade. Abaixo surge um exemplo do espectro do laser à temperatura ambiente de 23°C e uma corrente de 25 mA.



Figura 6.1 - Espectro do laser QFLD-1310-5SAX a 23°C e 25 mA.

Observando a figura é possível verificar que o espectro do laser abrange um comprimento total de cerca de 10 nm, e que os picos distam entre si, sensivelmente, 1 nm. Nestas condições, e com recurso a um multímetro ótico, foi registada uma potência ótica de 6,16 dBm.

Dado o facto de o laser ser multimodo, para efeitos de caracterização foi considerado que o comprimento de onda central é aquele que apresenta maior amplitude, uma vez que é em torno deste comprimento de onda que se concentra a maior parte da potência.

A primeira caracterização foi efetuada utilizando o *driver* MAX3668 no modo de realimentação (controlo de potência), utilizando o fotodetetor embutido no laser. Para tal, foi configurada a potência ótica pretendida bem como a corrente máxima de alimentação através dos potenciômetros apresentados na figura 4.5.

O objetivo desta configuração era o de manter a potência ótica constante, independentemente da temperatura.

A caracterização efetuada consistiu no varrimento em temperatura do laser entre os 11°C e os 50°C. Imediatamente se verificou que a potência ótica não se mantinha constante, apresentando diferenças de cerca de 0,4 dBm entre os extremos de temperatura.

Um segundo varrimento confirmou os resultados já obtidos do primeiro e, por outro lado, verificou-se uma inconsistência entre sucessivos varrimentos. Estas oscilações atribuíram-se ao facto de o fotodetetor interno do laser estar, também ele, sujeito a variações de temperatura, adicionando um grau de incerteza suplementar ao sistema, oriundo da variação da responsividade face à temperatura.

Verificou-se ainda que, utilizando o sistema de realimentação com o fotodetector interno do laser, o controlo de potência era sensível a ações mecânicas efetuadas sobre o conector do laser.

Esta característica foi atribuída ao facto de poderem estar a ocorrer reflexões da luz na interface fibra – ar que, por sua vez, viajam em sentido contrário influenciando a potência ótica incidente sobre o fotodetector interno.

Dados estes comportamentos optou-se por utilizar um fotodetector externo (FCL InGaAs 70L - FC), para realimentação, ligado ao laser por meio de um *splitter* 2x2, 50/50 com terminação em conectores FC/PC. A ligação entre o laser e o *splitter* foi efetuada com recurso a um acoplador FC. A seguinte figura ilustra esta configuração.

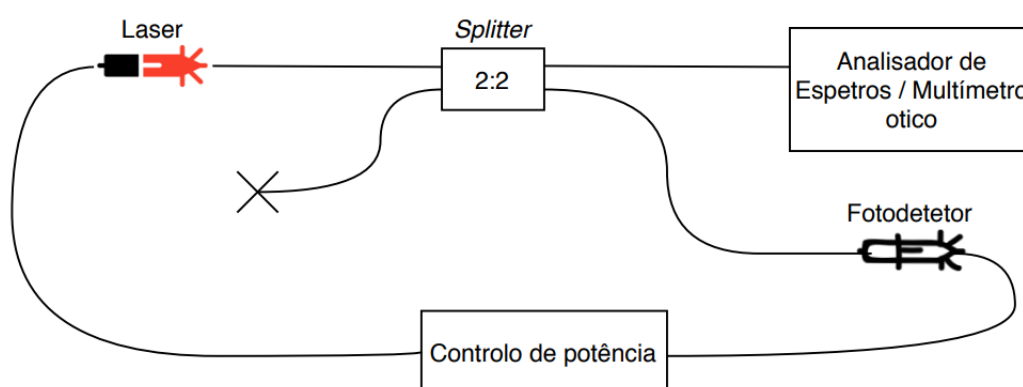


Figura 6.2 - Configuração utilizada para realização de controlo de potência com recurso a um fotodetector externo.

A implementação do *splitter* introduziu uma distorção no espetro do laser, atuando como um filtro ótico e provocando um desvio nos vários modos presentes no espetro do laser. Além da distorção observada, verificou-se uma instabilidade na distribuição dos modos do laser, tanto em termos de potência como em termos de comprimento de onda, mesmo para condições de corrente e temperatura constantes.

Para tentar resolver esta situação, a fibra acoplada ao laser foi fundida numa das entradas do *splitter*, e nas restantes três extremidades foram instalados conectores FC/APC.

O objetivo desta última configuração era o de eliminar possíveis reflexões que pudessem estar a ocorrer nas interfaces fibra – ar, evitando que fossem criadas cavidades de Fabry-Pérot indesejadas.

Nas condições descritas no parágrafo anterior foi possível eliminar por completo a instabilidade observada na situação inicial, no entanto continuava a se observar a distorção do espetro original do laser. Ainda assim, e com o laser nestas condições, foi realizada uma caracterização seguindo a configuração da figura 6.2.

O varrimento consistiu, novamente, na configuração da potência ótica pretendida e na posterior estabilização do laser, em diversas temperaturas entre os 11 e os 51°C. Para cada temperatura foi registada a potência ótica e o comprimento de onda do laser.

Nesta última caracterização foi possível obter uma estabilidade de temperatura muito superior à obtida quando utilizado o fotodetector interno. Entre a potência máxima e mínima registada, a diferença foi de cerca 0,1 dBm, indicando um correto controlo de potência.

Foi feito um segundo varrimento, mantendo as mesmas condições do primeiro para atestar os resultados obtidos, mas verificou-se que os espectros resultantes ao longo das várias temperaturas não coincidiam com os inicialmente registados, chegando a observar-se diferenças de 8 nm. Este comportamento foi atribuído ao facto do *splitter*, na zona de interação, poder estar a criar interferência aleatória entre modos e, dessa forma, ir alterando o espectro modal da luz.

Tendo em conta a importância de reduzir a incerteza num equipamento desta natureza, optou-se por não utilizar a realimentação e efetuar as caracterizações e interrogações alimentando o laser com recurso ao *driver* no modo de corrente constante.

Nesta caracterização a corrente do laser foi mantida a 25 mA, e foi efetuado um varrimento em temperatura desde os 11°C até aos 51°C, em passos de 1°C. Esta caracterização foi utilizada para posterior compensação por *software*.

De seguida apresenta-se o espectro do laser em três temperaturas distintas.

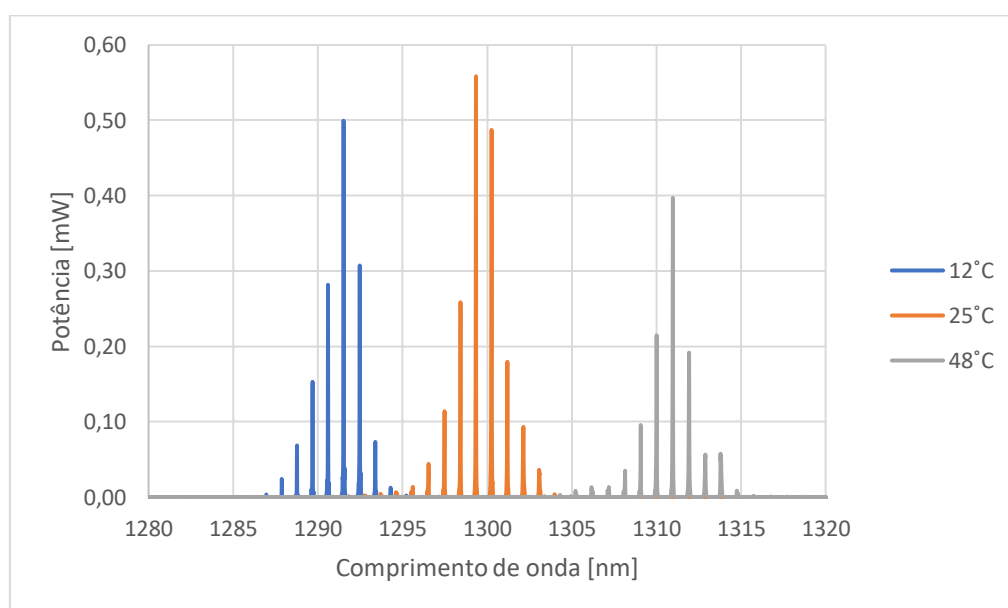


Figura 6.3 - Espectro do laser para uma corrente de 25 mA e temperaturas de 12°C, 25°C e 48°C, respetivamente.

Este comportamento vai de encontro ao esperado, na medida em que um aumento da temperatura provoca um aumento no comprimento de onda de emissão do laser.

Verificou-se, no entanto, que o laser apresenta um ligeira instabilidade relativamente à distribuição da potência entre os vários modos, observando-se trocas de potência entre eles. Estas trocas de potência podiam, inclusive, dar origem a alterações no comprimento de onda do modo dominante, no entanto este fenómeno não se verificou com muita frequência. Além disso, são resultados bem mais estáveis que aqueles que se observam com utilização do *splitter*.

Obtidos os espectros em função da temperatura traçou-se o gráfico que relaciona o comprimento de onda central (de maior amplitude) em função da temperatura do laser, e o resultado está apresentado no gráfico que se segue.

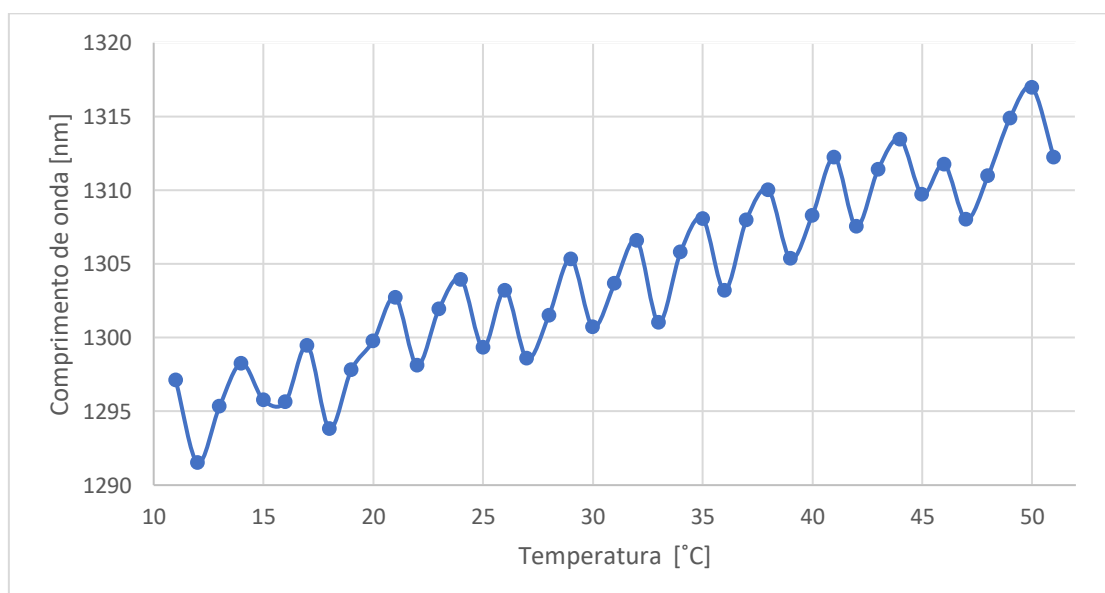


Figura 6.4 - Comprimento de onda central do laser em função da temperatura.

Por observação do gráfico, conclui-se que o comprimento de onda central do laser apresenta um comportamento periódico, com declive positivo, em função da temperatura. Isto acontece pois, apesar dos comprimentos de onda dos vários modos do laser sofrerem um desvio positivo com a temperatura, a distribuição da potência entre esses modos tende a variar de forma periódica. Este comportamento é típico deste género de lasers e é coerente com os resultados apresentados em [62].

Esta situação faz ainda com que o espectro do laser possa apresentar um de quatro tipos de espectro, em função da temperatura, sendo eles os seguintes.

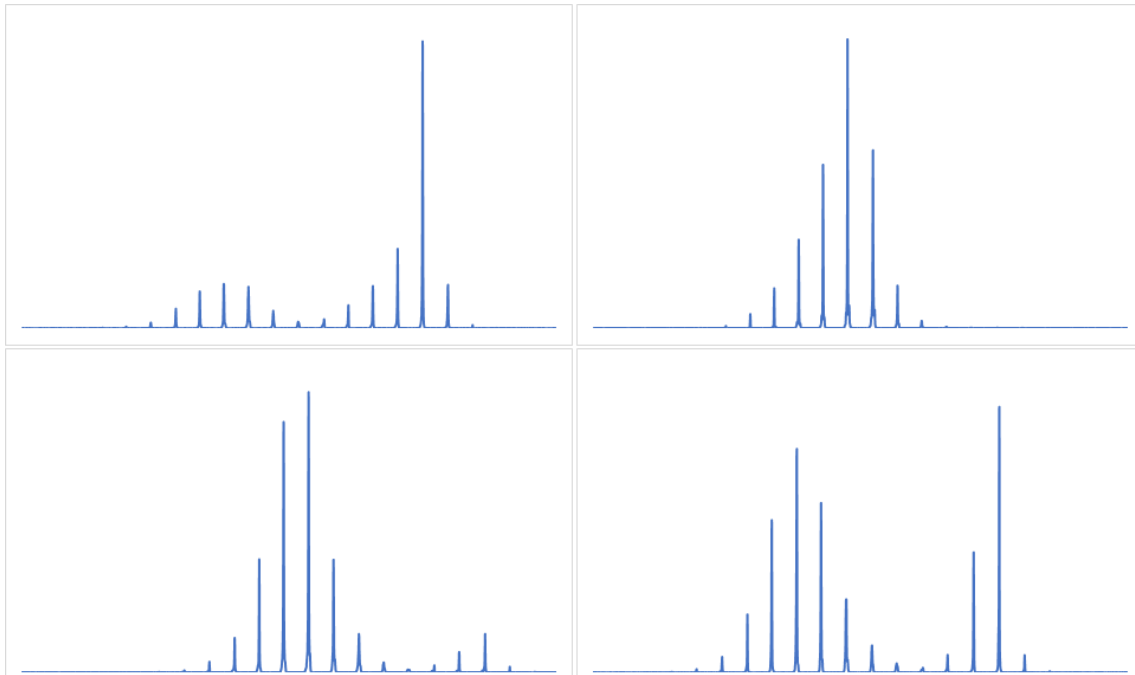


Figura 6.5 - Tipos de espectros passíveis de serem apresentados pelo laser em função da temperatura.

Dadas estas variabilidades, optou-se por utilizar temperaturas discretas (ao invés de uma função matemática que permitisse caracterizar o comportamento do laser em função da temperatura) para a interrogação dos LPG, fazendo uma associação entre a temperatura do laser e o seu comprimento de onda central.

Das temperaturas discretas utilizadas foram removidas todas aquelas cujo espectro não se demonstrava adequado à tarefa de interrogação.

Foram considerados um total de 21 valores discretos de temperatura, correspondendo a 21 valores de comprimento de onda diferentes, dentro de uma gama compreendida entre os 1291,5 nm e os 1314,9 nm. Posteriormente, foram inseridos estes valores discretos no microcontrolador, por forma a poder associar uma temperatura a um determinado comprimento de onda. Serão estas as temperaturas que o sistema irá percorrer, sucessivamente, para as interrogações dos LPG.

Pelo facto de não ter sido realizado o controlo de potência do laser, através do *driver*, foi também efetuada a caracterização da potência ótica emitida em função da temperatura, pois a potência tende a diminuir quanto maior for a temperatura.

Neste procedimento foram utilizadas todas as temperaturas cujo espectro resultante se assemelhava ao gráfico superior direito da figura 6.5, por apresentar um espectro mais estreito relativamente aos restantes, garantindo que a distribuição de potência se dava de forma uniforme em torno do comprimento de onda central.

O seguinte gráfico apresenta os valores registados.

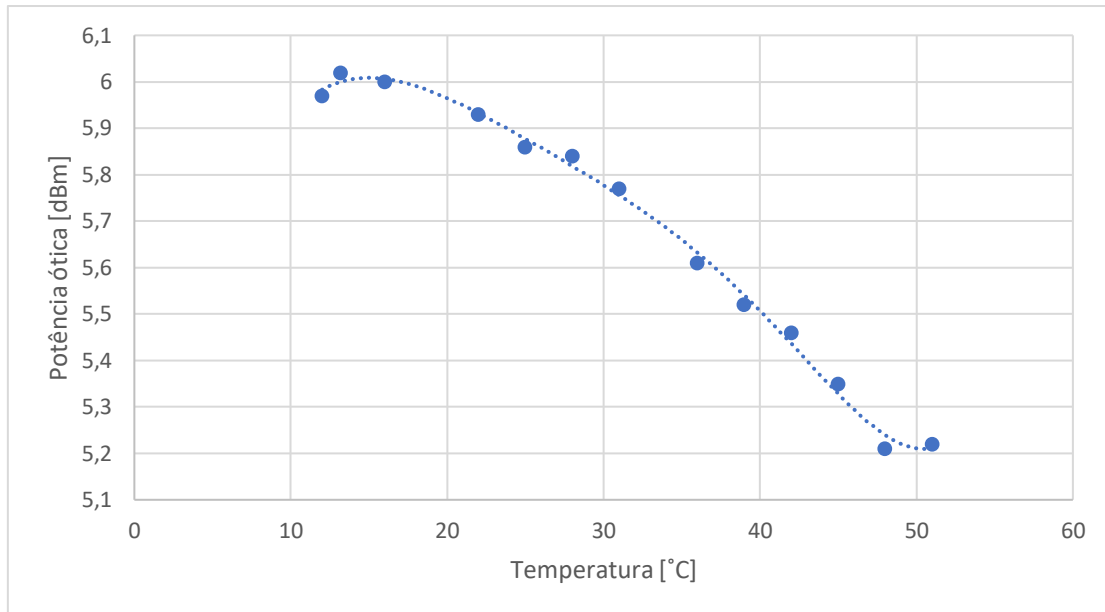


Figura 6.6 - Potência do laser em função da temperatura para uma corrente de 25 mA.

Com os pontos utilizados foi realizado um ajuste através de uma curva polinomial de grau 6, cuja equação foi inserida no microcontrolador e apresenta-se abaixo:

$$\begin{aligned}
 \text{Potência} = & 1,16417 \times 10^{-9} \times T^6 - 1,24738 \times 10^{-7} \times T^5 + 2,0676 \times 10^{-6} \times T^4 \\
 & + 2,20015 \times 10^{-4} \times T^3 - 1,17670 \times 10^{-2} \times T^2 \\
 & + 2,02966 \times 10^{-1} \times T + 4,84595 \quad [\text{dBm}]
 \end{aligned}
 \tag{6.1}$$

6.2 Caracterização do Fotodetector

A caracterização do fotodetector PF512 foi realizada a fim de ser possível determinar a potência ótica incidente, através da tensão na saída do amplificador de transimpedância, tendo ainda em consideração o comprimento de onda central do laser, para compensação da variação da responsividade do fotodetector em função do comprimento de onda.

Para este procedimento fez-se variar a temperatura do laser e, para cada temperatura, provocaram-se variações de potência ótica por meio da alteração da corrente fornecida. Para cada configuração foi registada a tensão, apresentada à saída do amplificador, e potência ótica emitida com recurso ao multímetro ótico.

As temperaturas utilizadas neste procedimento foram as mesmas que as utilizadas anteriormente para a caracterização da potência ótica do laser em função da temperatura.

De seguida, apresentam-se três exemplos da relação entre a potência ótica incidente e a tensão à saída do amplificador de transimpedância para três comprimentos de onda distintos.

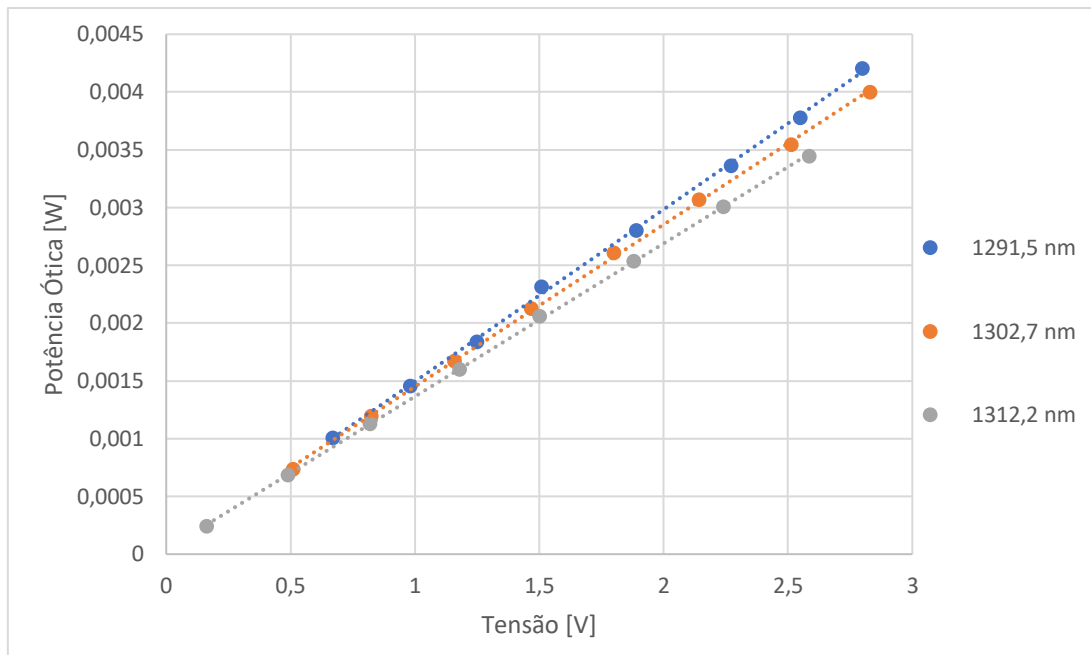


Figura 6.7 - Relação entre a potência ótica incidente e a tensão à saída do amplificador de transimpedância.

Observando o gráfico, verifica-se que a potência ótica e a tensão à saída do amplificador de transimpedância são diretamente proporcionais, e apresentam uma elevada linearidade entre si.

Por outro lado, é possível observar que quanto maior for o comprimento de onda central do laser (motivado pela utilização de temperaturas mais elevadas) menor é o declive da reta de ajuste dos pontos. Este fenómeno indica-nos que a responsividade do fotodetector está a aumentar com o aumento do comprimento de onda, e este comportamento vai de encontro ao especificado na folha de características do fotodetector.

Para a caracterização, foram então obtidos todos os valores de declive da potência ótica em função da tensão, para todas as temperaturas / comprimentos de onda utilizados. Os resultados apresentam-se no seguinte gráfico.

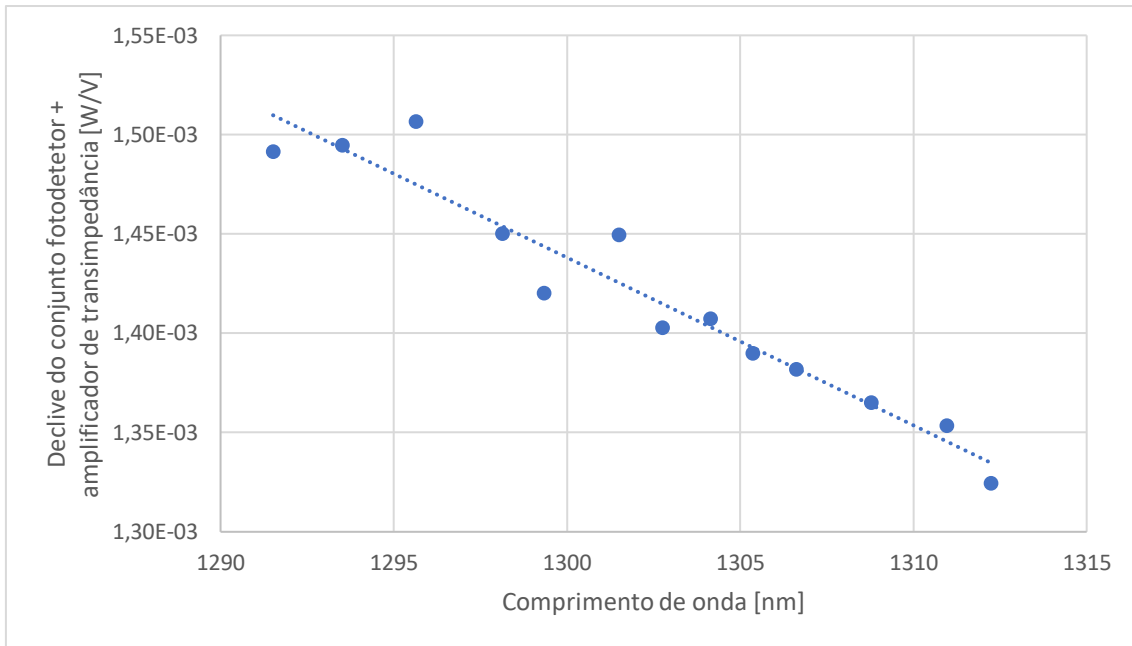


Figura 6.8 - Variação do declive do conjunto fotodetector + amplificador de transimpedância em função do comprimento de onda.

Por fim, foi efetuado um ajuste linear aos pontos registados e foi obtida a seguinte equação linear, com λ o comprimento de onda:

$$\text{Declive} = -8,44802 \times 10^{-6} \lambda + 1,24205 \times 10^{-2} \text{ [W/V]} \quad (6.2)$$

Esta última equação foi inserida no microcontrolador, permitindo efetuar a compensação do fotodetector relativamente à sua responsividade em função do comprimento de onda.

7 Resultados

Para verificar o desempenho do equipamento desenvolvido foi utilizado um LPG disponível em laboratório.

O espectro original do LPG utilizado apresentava um pico situado em torno dos 1323 nm quando em condições normais, ou seja, à temperatura ambiente e sem sofrer ações mecânicas externas. O seguinte gráfico ilustra o pico de atenuação referido.

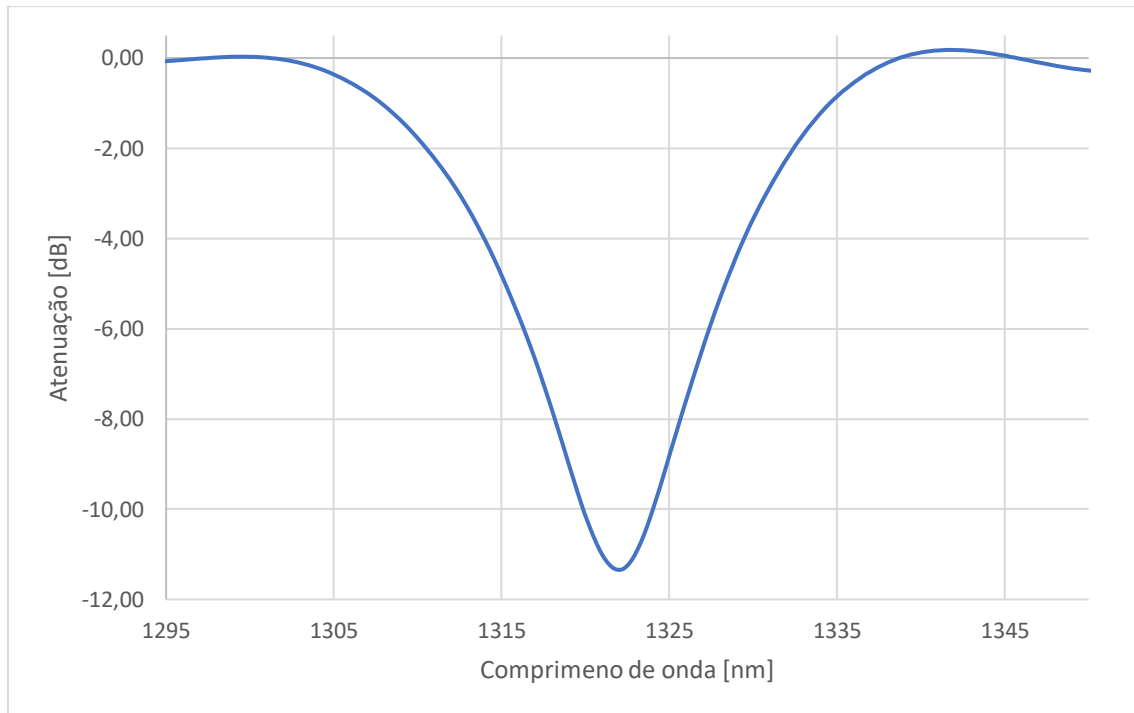


Figura 7.1 - Espectro original do LPG utilizado.

Este valor de comprimento de onda encontra-se fora da gama de leitura mensurável pelo laser. Para ser possível medi-lo foi criada uma plataforma em acrílico à qual era possível imobilizar o LPG com recurso a adesivos. A seguinte figura ilustra o esquema de montagem.

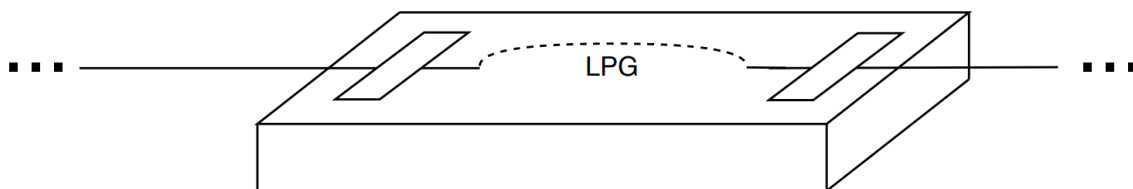


Figura 7.2 - Esquema de montagem utilizado para as interrogações efetuadas ao LPG.

Atribuindo sucessivos níveis de curvatura foi possível diminuir o comprimento de onda ressonante e colocá-lo dentro da gama de interesse. Todas as interrogações foram efetuadas com recurso à imposição de diferentes curvaturas no LPG, por forma a controlar a posição do pico de atenuação.

Apresentam-se, de seguida, quatro exemplos de interrogações, efetuadas ao longo do espectro mensurável.

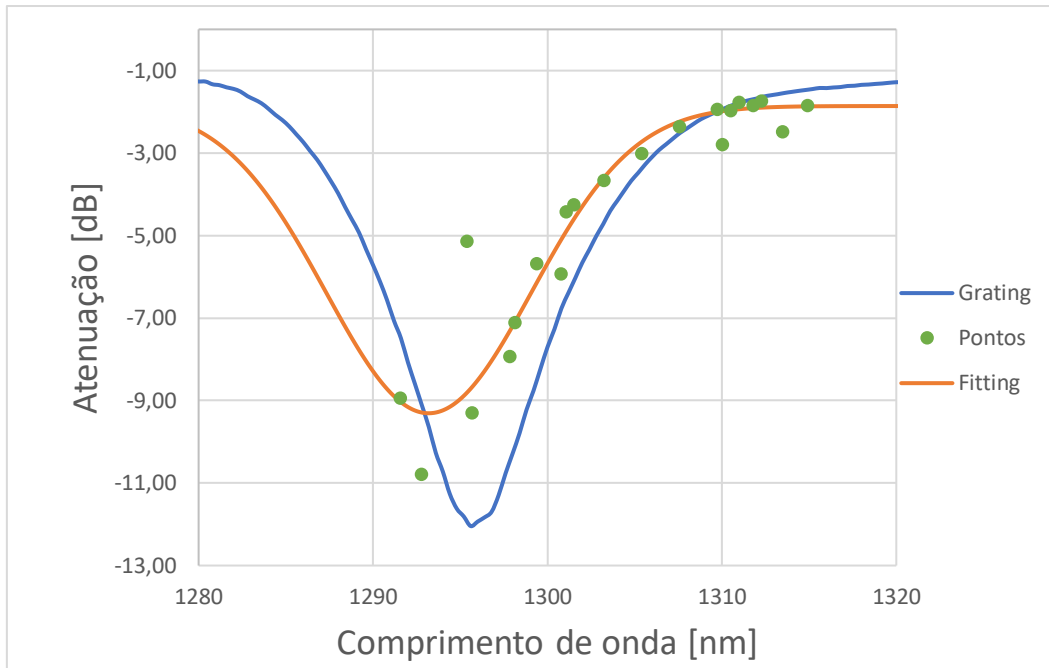


Figura 7.3 - LPG com pico de atenuação centrado nos 1295,6 nm.

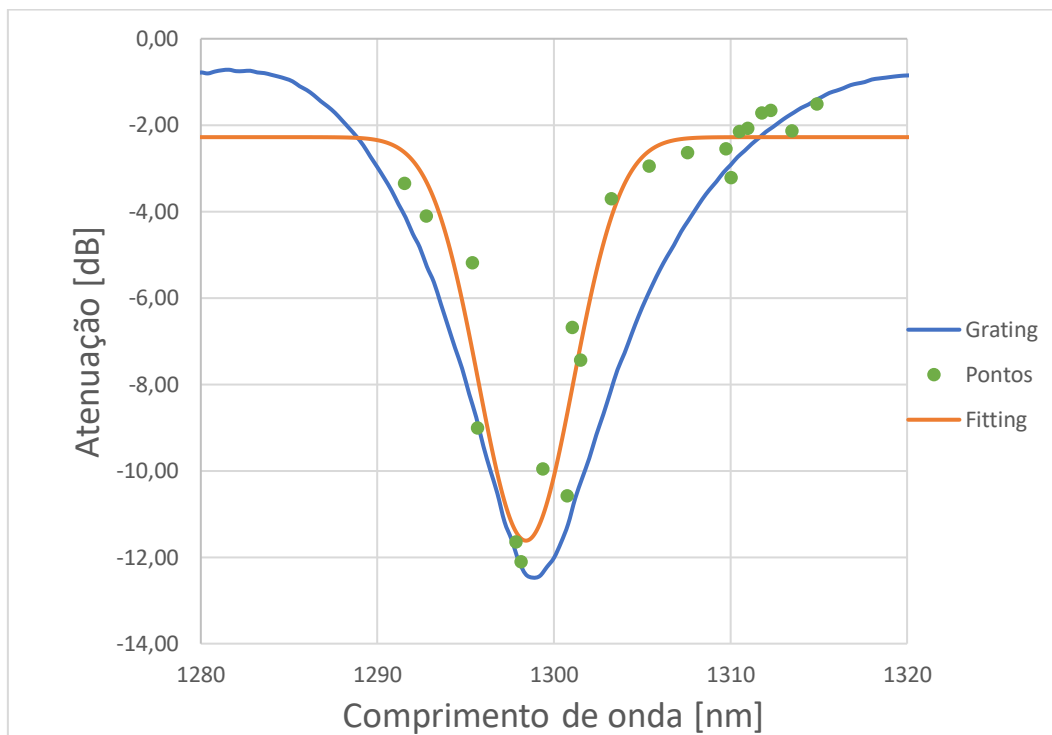


Figura 7.4 - LPG com pico de atenuação centrado nos 1298,8 nm.

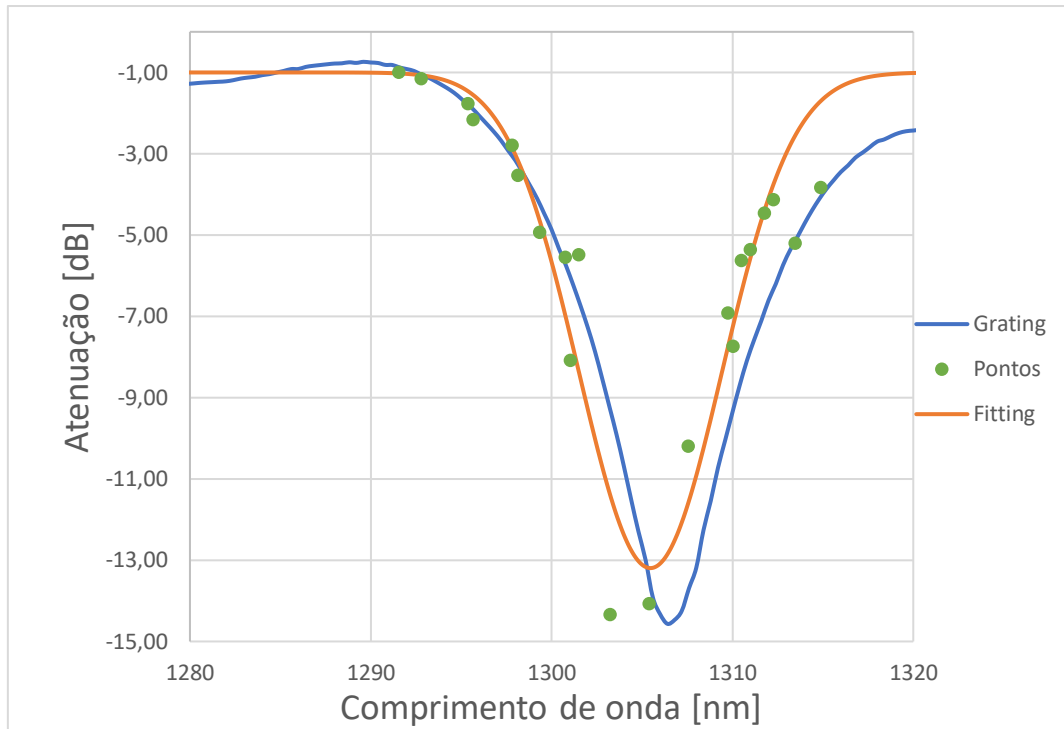


Figura 7.5 - LPG com pico de atenuação centrado nos 1306,4 nm.

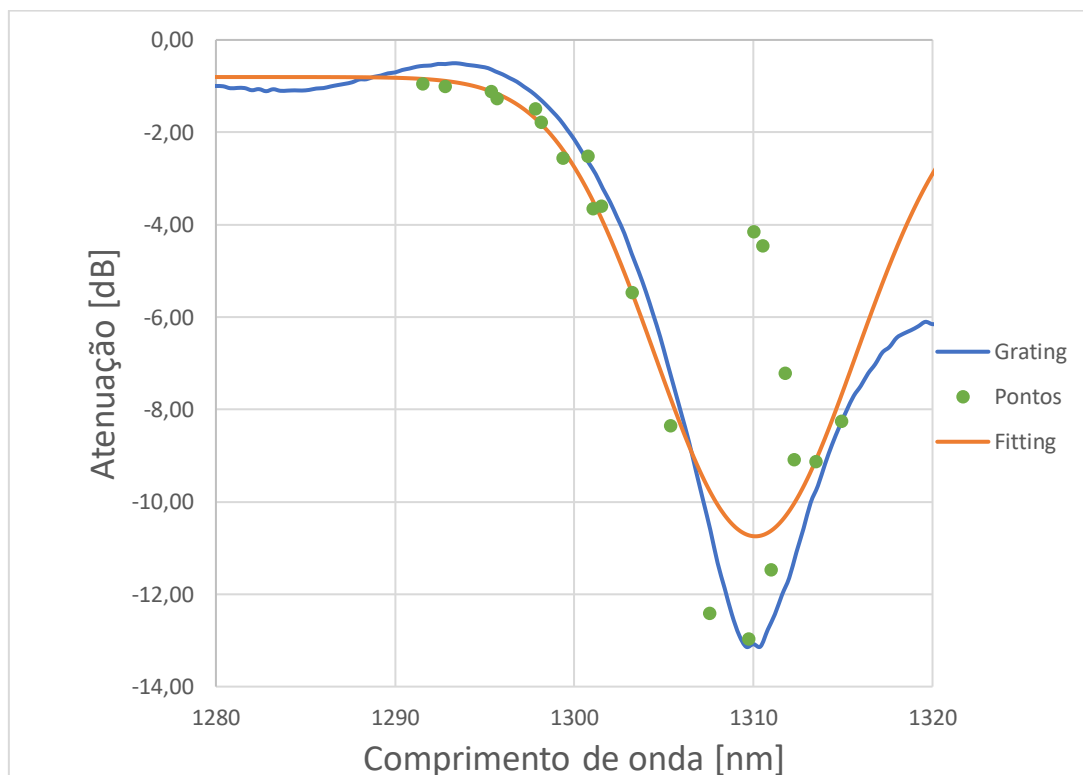


Figura 7.6 - LPG com pico de atenuação centrado nos 1310 nm.

Nos gráficos anteriores, a linha azul representa o espectro real do LPG, obtido através do analisador de espectros de bancada, os pontos a verde representam os pontos obtidos pelo varrimento em temperatura do laser, e a

linha laranja representa o ajuste efetuado a esses pontos com recurso a uma curva de Gauss.

Na figura 7.3 obteve-se uma curva de ajuste centrada nos 1293,2 nm e uma atenuação de -9,3 dB, quando o espectro real se situava nos 1295,6 nm com uma atenuação de -12 dB. Estes valores representam um erro de 2,4 nm e 2,7 dB, respetivamente.

Nesta situação pode observar-se que o ajuste se afasta ligeiramente do espectro real. Este fator é potencialmente motivado pelo baixo número de pontos para comprimentos de onda inferiores ao ponto central, o que dificulta o algoritmo de ajuste. Por outro lado, também se verifica a presença de alguns *outliers*.

Na figura 7.4 a curva de ajuste apresentou um centro nos 1298,4 nm e uma atenuação de -11,6 dB. Comparativamente, o espectro real encontrava-se centrado nos 1298,8 nm com uma atenuação de -12,5 dB. Estas diferenças traduzem-se num erro de 0,4 nm e 0,9 dB, respetivamente.

Para a situação da figura 7.5, o ajuste centrou-se nos 1305,5 nm com uma atenuação de -13,2 dB, enquanto que o espectro real do LPG encontrava-se centrado nos 1306,4 nm, com uma atenuação de -14,6 dB. Estes valores resultam num erro de 0,9 nm e 1,4 dB, respetivamente.

Por fim, para a situação da figura 7.6, o ajuste efetuado resultou numa curva centrada nos 1310,1 nm com uma atenuação de -10,7 dB. O espectro real situava-se nos 1310 nm com uma atenuação de -13,1 dB. Para este caso os erros foram de 0,1 nm e 2,4 dB, respetivamente.

Apesar deste último resultado ter apresentado um baixo erro relativamente ao comprimento de onda central, observou-se que as interrogações efetuadas apresentavam alguma variabilidade quando o pico de atenuação se encontrava próximo dos extremos da gama de varrimento. Tal como foi referido anteriormente, isto deve-se ao facto de existirem poucos pontos numa das caudas da curva, tendo impacto sobre o ajuste efetuado.

Por outro lado, os *outliers* observados contribuem também para o aumento do erro. Dois fatores poderão contribuir para esta situação, sendo eles a largura espectral do laser relativamente ao LPG interrogado, e possíveis trocas de potência entre modos, que fazem com que se observem desvios entre o comprimento de onda central do laser e o comprimento de onda considerado.

Para a primeira situação, sendo um laser multimodo, existe uma distribuição de potência ótica ao longo dos vários modos do laser, tornando o seu espectro relativamente largo.

Esta situação dá origem a casos em que a atenuação sofrida por cada modo do laser é diferente e, uma vez que o fotodetector recebe uma convolução do espectro do LPG com o do laser, poderão ocorrer situações em que a

atenuação medida pelo fotodetector não corresponde ao valor real de atenuação no comprimento de onda considerado.

Este fenómeno é particularmente significativo nos pontos em torno do comprimento de onda central do LPG pois, dada a sua “espessura”, acaba por abranger pouca largura espectral do laser.

Para além da largura espectral, há ainda a questão da troca de potência entre modos do laser para as mesmas condições de temperatura e corrente. Estes fenómenos, apesar de esporádicos, quando surgem acabam por contribuir para o aumento do erro. Ao longo dos testes efetuados, verificaram-se trocas de modo central distanciados até 2 nm do modo central inicialmente considerado.

Possíveis contribuições para estas variações poderão ser pequenas diferenças na temperatura ambiente e na corrente de alimentação.

O sistema de controlo de temperatura implementado consiste em dois módulos *peltier* instalados no topo do bloco metálico que envolve o laser. O facto de o arrefecimento / aquecimento ser exclusivamente proveniente do topo do bloco dá origem a gradientes de temperatura ao longo deste. Com o sistema em modo de aquecimento verificava-se que a parte superior do bloco se encontrava mais quente que a inferior. Analogamente, em modo de arrefecimento, a parte superior apresentava-se mais fria.

Dependendo da temperatura de referência foram verificados gradientes de temperatura superiores a 1°C. Sendo estes gradientes resultado de trocas de calor com o meio ambiente, a variação da sua temperatura poderá provocar pequenas alterações na forma como o gradiente se expressa, acabando por alterar, ligeiramente, as condições de funcionamento do laser.

Relativamente à corrente de alimentação do laser, apesar desta estar configurada para fornecer 25 mA constantes, chegaram a observar-se variações máximas de 0,1 mA. Este fator contribui também para alterar as condições de funcionamento.

Também a plataforma utilizada para imobilizar o LPG apresentou alguns problemas em termos de estabilidade do mesmo. Por cada vez que o LPG era posicionado com uma curvatura diferente eram aguardados vários minutos para que ele pudesse estabilizar numa determinada posição. Em alguns casos observavam-se desvios superiores a 2 nm relativamente ao espetro inicial. Cada interrogação só era iniciada caso o LPG se mantivesse estável durante 5 minutos. Ainda assim, em alguns casos, verificaram-se pequenas diferenças entre o espetro do LPG antes e depois do varrimento, o que poderá ser um fator de contribuição adicional para o erro.

Dos resultados obtidos das interrogações efetuadas concluiu-se que a gama de leitura útil do equipamento encontra-se entre os 1298 e os 1308 nm. Os valores de erro observados para o comprimento de onda variaram entre os

0,4 nm e os 2,8 nm. Relativamente ao erro das amplitudes de pico dos LPG, estes variaram entre os 0,4 dB e os 5,1 dB.

Os valores de erro da amplitude são, comparativamente aos de comprimento de onda, superiores, sendo isto motivado pela presença de *outliers* que interferem com o algoritmo de ajuste.

Para interrogações em que o centro do LPG se encontra próximo dos extremos da gama de leitura, os resultados tendem a variar no que toca ao erro, podendo ocorrer situações em que a interrogação apresenta um erro dentro dos valores apresentados anteriormente, e situações em que o erro é demasiado elevado para que a interrogação possa ser considerada bem sucedida.

Na análise de resultados não foi estudado o desempenho do equipamento na interrogação de FBG, dada a largura espectral do laser ser excessivamente elevada comparativamente à largura dos *gratings* de Bragg que, tipicamente, se situam abaixo de 1 nm [50]. Ainda assim, o circuito eletrónico foi desenvolvido tendo esta funcionalidade em mente, como tal, para possibilitar estas interrogações é necessário substituir o laser utilizado por um que melhor se adegue a esta tarefa.

8 Conclusões e trabalhos futuros

O recurso a sensores em fibra ótica para efeitos da criação de sistemas de medição pode, em alguns casos, ser mais atrativo e adequado face à alternativa elétrica, dadas as suas características de imunidade a interferência eletromagnética, pequeno volume e a não necessidade de alimentação elétrica do sensor, o que permite que se encontre a longas distâncias do equipamento de medição.

Dentro dos diversos tipos de sensores em fibra ótica destacaram-se os *gratings* de Bragg e de período longo, que se caracterizam por serem sensores intrínsecos e de modulação de comprimento de onda. O primeiro termo significando que o próprio sensor está incorporado na fibra, sendo que a luz se propaga exclusivamente por ela, e o segundo significando que a variação do parâmetro mensurado dará origem a variações de comprimentos de onda.

No caso concreto dos *gratings* referidos anteriormente, que se comportam como filtros rejeita banda em zonas bem definidas no espetro, verificam-se flutuações dos comprimentos de onda centrais dessas bandas de rejeição consoante as variações do mensurado.

Um desafio que advém da utilização deste tipo de sensores é a técnica de interrogação. Apesar de terem surgido, ao longo do tempo, algumas propostas de diferentes técnicas, na sua grande maioria são necessários dispositivos caros como analisadores de espetros e fontes de espetro largo. Estes requisitos inviabilizam qualquer tentativa de implementação de baixo custo.

O dispositivo criado surge como uma alternativa compacta e de baixo custo que permite a interrogação destes sensores. Foi construído todo o circuito eletrónico, que compreende as funcionalidades de alimentação e proteção do laser, controlo de temperatura e circuitos para leitura de dados. Todo o circuito é controlado por um microcontrolador que, por sua vez, comunica com um computador através de um instrumento virtual criado em LabVIEW.

O circuito foi desenvolvido com o objetivo de permitir a interrogação de *gratings* de Bragg e de período longo. O primeiro fazendo uso de um controlo de temperatura para sintonização do laser no comprimento de onda pretendido e, posteriormente, a realização de um *dithering* para seguimento em tempo real do comprimento de onda de reflexão. O *dithering* é realizado através do fornecimento de uma corrente com o formato de uma onda triangular, com uma frequência de 1 kHz, permitindo o varrimento de uma zona estreita do espetro. Dada a largura espectral do laser ser significativamente superior às larguras típicas dos FBG, o desempenho do equipamento não foi avaliado para este tipo de interrogações.

Para a interrogação de *gratings* de Bragg propõe-se a utilização de um laser com uma largura espectral mais adequada ou ainda, na falta de outra alternativa, um laser monomodo.

As interrogações aos LPG foram efetuadas com recurso a um varrimento em temperatura do laser, estabilizando-o em várias temperaturas discretas entre os 11°C e os 51°C, para as quais o espectro apresentado era conhecido. Comparando a potência ótica recebida com a potência ótica emitida, é possível criar um espectro discreto com os vários valores de atenuação do LPG. Posteriormente, aplicando uma curva de ajuste Gaussiano aos pontos recolhidos, o espectro original é reconstruído.

Nestas interrogações o equipamento apresentou uma gama de leitura útil entre os 1298 nm e os 1308 nm, com os erros a variar entre os 0,4 nm e os 2,8 nm para o comprimento de onda central do LPG, e entre os 0,4 dB e os 5,1 dB para a amplitude dos picos de atenuação. Estes valores poderão ser adequados o suficiente para aplicações menos exigentes.

O equipamento desenvolvido apresenta também margem para melhoria tanto a nível de *software* como de *hardware*.

A nível de *software* propõe-se a introdução de pesos aos vários pontos obtidos, como uma solução que permita ignorar por completo os *outliers*, que ocasionalmente surgem ao longo do varrimento, sendo o ajuste apenas realizado nos os pontos definidos.

Relativamente ao *hardware*, o circuito tem capacidade de expansão, sendo possível adicionar mais lasers centrados noutros comprimentos de onda, alargando a janela já existente ou criando outras em diferentes zonas do espectro. Esta última solução apresenta o potencial de interrogação de mais do que um sensor em simultâneo.

Por forma a minimizar os custos e intervenção necessária no circuito, sugere-se que o laser a adicionar apresente as mesmas características em termos de tensão e corrente de funcionamento.

O equipamento poderia ainda beneficiar de uma alimentação isolada do circuito dos *peltiers*, uma vez que estes apresentam um impacto na tensão de alimentação de todo o circuito. Este isolamento iria beneficiar, sobretudo, a alimentação do laser e as leituras dos ADC do microcontrolador, tornando-as mais estáveis.

Adicionalmente, a implementação de um controlo de temperatura não só no topo do bloco, mas também no seu fundo, apresenta potencial para corrigir a presença de gradientes de temperatura que, ocasionalmente, surgem ao longo do bloco, e que podem ter influência no controlo de temperatura do laser.

Por fim, a criação do circuito numa placa de circuito impresso poderá dar uma contribuição adicional para melhorar a estabilidade e reduzir possíveis ruídos parasitas, comparativamente à solução em *perfboard* implementada.

9 Referências

- [1] M. Yasin, S. Harun, and H. Arof, *Fiber Optic Sensors*. InTech, 2012.
- [2] Z. Fang, K. K.Chin, R. Qu, and H. Cai, *Fundamentals of Optical Fiber Sensors Wiley Series in Microwave and Optical Engineering*. 2012.
- [3] G. Rajan and K. K. Iniewski, *Optical fiber sensors: Advanced techniques and applications*, 1st ed. CRC Press, 2015.
- [4] G. M. do Rego, "Arc-Induced Long-Period Fibre Gratings . Fabrication and Their Applications in Optical Communications and Sensing," Universidade do Porto, 2006.
- [5] K. S. Chiang and Q. Liu, "Long-period grating devices for application in optical communication," no. January 2006, pp. 128–133, 2006.
- [6] K. O. Hill, Y. Fujii, D. C. Johnson, and B. S. Kawasaki, "Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 32, no. 10, pp. 647–649, May 1978.
- [7] A. M. Vengsarkar, P. J. Lemaire, J. B. Judkins, V. Bhatia, T. Erdogan, and J. E. Sipe, "Long-period fiber gratings as band-rejection filters," *J. Light. Technol.*, vol. 14, no. 1, pp. 58–65, 1996.
- [8] S. W. James and R. P. Tatam, "Optical fibre long-period grating sensors: characteristics and application," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 14, no. 5, pp. R49–R61, May 2003.
- [9] J. M. P. Coelho, C. Silva, M. Nespereira, M. Abreu, and J. Rebordão, "Writing of Long Period Fiber Gratings Using CO2 Laser Radiation," in *Advances in Optical Fiber Technology: Fundamental Optical Phenomena and Applications*, InTech, 2015.
- [10] V. Bhatia and A. M. Vengsarkar, "Optical fiber long-period grating sensors," *Opt. Lett.*, vol. 21, no. 9, p. 692, May 1996.
- [11] Y. Liu, L. Zhang, and I. Bennion, "Fibre optic load sensors with high transverse strain sensitivity based on long-period gratings in B/Ge co-doped fibre," *Electron. Lett.*, vol. 35, no. 8, p. 661, 1999.
- [12] M. Nespereira, J. M. P. Coelho, M. Abreu, and J. M. Rebordão, "Ultrashort Long-Period Fiber Grating Sensors Inscribed on a Single Mode Fiber Using CO2 Laser Radiation," *J. Sensors*, vol. 2017, pp. 1–9, 2017.
- [13] J. M. Senior, *Optical Fiber Communications Principles and Practice*, 3rd ed. Pearson, 2009.
- [14] K. Thyagarajan and A. Ghatak, "Fiber Bragg Gratings," in *Fiber Optic Essentials*, Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2007, pp. 168–185.
- [15] K. O. Hill, B. Malo, F. Bilodeau, D. C. Johnson, and J. Albert, "Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 62, no. 10, pp. 1035–1037, Mar. 1993.

- [16] K. O. Hill and G. Meltz, "Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview," *J. Light. Technol.*, vol. 15, no. 8, pp. 1263–1276, 1997.
- [17] V. Grubsky and J. Feinberg, "Rewritable densification gratings in boron-doped fibers," *Opt. Lett.*, vol. 30, no. 11, p. 1279, Jun. 2005.
- [18] B. A. Tahir, J. Ali, and R. A. Rahman, "Fabrication of fiber grating by phase mask and its sensing application," *J. Optoelectron. Adv. Mater.*, vol. 8, no. 4, pp. 1604–1609, 2006.
- [19] R. M. Atkins, P. J. Lemaire, T. Erdogan, and V. Mizrahi, "Mechanisms of enhanced UV photosensitivity via hydrogen loading in germanosilicate glasses," *Electron. Lett.*, vol. 29, no. 14, p. 1234, 1993.
- [20] P. J. Lemaire, R. M. Atkins, V. Mizrahi, and W. A. Reed, "High pressure H₂ loading as a technique for achieving ultrahigh UV photosensitivity and thermal sensitivity in GeO₂ doped optical fibres," *Electron. Lett.*, vol. 29, no. 13, p. 1191, 1993.
- [21] Y. Masuda *et al.*, "Wavelength Evolution of Fiber Bragg Gratings Fabricated From Hydrogen-Loaded Optical Fiber During Annealing," *J. Light. Technol.*, vol. 22, no. 3, pp. 934–941, Mar. 2004.
- [22] A. Martinez, M. Dubov, I. Khrushchev, and I. Bennion, "Direct writing of fibre Bragg gratings by femtosecond laser," *Electron. Lett.*, vol. 40, no. 19, p. 1170, 2004.
- [23] Y. Zhang, S. Liu, Q. Xu, Y. Zhao, and Y. Xi, "Sensing characteristics of long-period fiber grating fabricated by 800nm femtosecond laser pulses," in *2017 16th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON)*, 2017, vol. 2, pp. 1–3.
- [24] F. Ahmed, M. S. Ahsan, M. S. Lee, and M. B. G. Jun, "Femtosecond laser based in-fiber long period grating fabrication for improved solution sensing," in *Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing (LAMOM) XVIII*, 2013, vol. 8607.
- [25] B. Li, L. Jiang, S. Wang, H.-L. Tsai, and H. Xiao, "Femtosecond laser fabrication of long period fiber gratings and applications in refractive index sensing," *Opt. Laser Technol.*, vol. 43, no. 8, pp. 1420–1423, Nov. 2011.
- [26] A. I. Kalachev, V. Pureur, and D. N. Nikogosyan, "Investigation of long-period fiber gratings induced by high-intensity femtosecond UV laser pulses," *Opt. Commun.*, vol. 246, no. 1–3, pp. 107–115, 2005.
- [27] R. Z. V. Costa, R. C. Kamikawachi, M. Muller, and J. L. Fabris, "Thermal characteristics of long-period gratings 266nm UV-point-by-point induced," *Opt. Commun.*, vol. 282, no. 5, pp. 816–823, Mar. 2009.
- [28] N. Chen, L. Wang, F. Yan, Z. Chen, Y. Liu, and T. Wang, "Characterization of Nb/Al codoped silica fiber by writing long-period gratings with CO₂ laser," *Opt. Fiber Technol.*, vol. 19, no. 6, pp. 519–522, Dec. 2013.
- [29] J.-O. Gaudron, "Design and characterisation of long period grating (LPG) - based optical fibre sensors for acoustic wave detection," University of London, 2015.

- [30] T. Almeida, R. Oliveira, P. André, A. Rocha, M. Facão, and R. Nogueira, "Automated technique to inscribe reproducible long-period gratings using a CO₂ laser splicer," *Opt. Lett.*, vol. 42, no. 10, p. 1994, May 2017.
- [31] S. Savin, M. J. F. Digonnet, G. S. Kino, and H. J. Shaw, "Tunable mechanically induced long-period fiber gratings," *Opt. Lett.*, vol. 25, no. 10, p. 710, May 2000.
- [32] G. A. Cárdenas-Sevilla, D. Monzón-Hernández, I. Torres-Gómez, and A. Martínez-Ríos, "Mechanically induced long-period fiber gratings on tapered fibers," *Opt. Commun.*, vol. 282, no. 14, pp. 2823–2826, Jul. 2009.
- [33] Xiaojun Zhou, Shenghui Shi, Zhiyao Zhang, and Yong Liu, "Refractive Index Sensing by Using Mechanically Induced Long-Period Grating," *IEEE Photonics J.*, vol. 4, no. 1, pp. 119–125, Feb. 2012.
- [34] M. Fujimaki, Y. Ohki, J. L. Brebner, and S. Roorda, "Fabrication of long-period optical fiber gratings by use of ion implantation," *Opt. Lett.*, vol. 25, no. 2, pp. 88–89, Jan. 2000.
- [35] M. L. von Bibra, A. Roberts, and J. Canning, "Fabrication of long-period fiber gratings by use of focused ion-beam irradiation," *Opt. Lett.*, vol. 26, no. 11, p. 765, Jun. 2001.
- [36] G. Rego, "Arc-Induced Long Period Fiber Gratings," *J. Sensors*, vol. 2016, pp. 1–14, 2016.
- [37] S. H. Nam *et al.*, "Bend-insensitive ultra short long-period gratings by the electric arc method and their applications to harsh environment sensing and communication," *Opt. Express*, vol. 13, no. 3, p. 731, 2005.
- [38] G. Rego, L. M. N. B. F. Santos, and B. Schröder, "Estimation of the fiber temperature during an arc-discharge," *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 50, no. 8, pp. 2020–2025, Aug. 2008.
- [39] C. Colaço, P. Caldas, R. Chibante, and G. Rego, "Arc-induced gratings in the turning points," in *24th International Conference on Optical Fibre Sensors*, 2015, vol. 9634, p. 96346K.
- [40] O. V. Ivanov and G. Rego, "Origin of coupling to antisymmetric modes in arc-induced long-period fiber gratings," *Opt. Express*, vol. 15, no. 21, p. 13936, 2007.
- [41] K. Körber and C. Kulik, "Fiber Bragg Gratings," in *Excimer Laser Technology*, Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2005, pp. 313–320.
- [42] D. Betz, L. Staudigel, and M. N. Trutzel, "Test of a fiber Bragg grating sensor network for commercial aircraft structures," in *2002 15th Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest. OFS 2002(Cat. No.02EX533)*, 2002, vol. 1, pp. 55–58.
- [43] X. W. Zhao and Q. Wang, "Mini review: Recent advances in long period fiber grating biological and chemical sensors," *Instrum. Sci. Technol.*, vol. 47, no. 2, pp. 140–169, 2019.
- [44] V. Bhatia, "Properties and Sensing Applications of Long-Period Gratings,"

Virginia Polytechnic Institute and State University, 1996.

- [45] C. Du, Y. Zhao, Q. Wang, and F. Xia, "Sensitivity-optimized long-period fiber gratings for refractive index and temperature sensing," *Instrum. Sci. Technol.*, vol. 46, no. 4, pp. 435–449, Jul. 2018.
- [46] Joo-Nyung Jang, Se Yoon Kim, Sun-Wook Kim, and Min-Sung Kim, "Novel temperature insensitive long-period grating by using the refractive index of the outer cladding," in *Optical Fiber Communication Conference. Technical Digest Postconference Edition. Trends in Optics and Photonics Vol.37 (IEEE Cat. No. 00CH37079)*, 2000, vol. 1, pp. 29–31.
- [47] K. Shima, K. Himeno, T. Sakai, S. Okude, A. Wada, and R. Yamauchi, "A novel temperature-insensitive long-period fiber grating using a boron-codoped-germanosilicate-core fiber," in *Proceedings of Optical Fiber Communication Conference* (, 1997, pp. 347–348.
- [48] Q. Han, X. Lan, J. Huang, T. Wei, Z. Gao, and H. Xiao, "Refractive-index insensitive long-period fiber gratings point-by-point inscribed by CO₂ laser for fiber sensors and lasers," in *Optical Components and Materials IX*, 2012, vol. 8257, no. 573, p. 825717.
- [49] S. Chen, Z. Tong, Q. Zhao, Z. Liu, and X. Dong, "A smart bending sensor with a novel temperature- and strain-insensitive long-period grating," *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 116, no. 1, pp. 103–106, Oct. 2004.
- [50] M. M., R. C. S. B. Allil, B. A., and F. V. B. de Nazaré, "A Guide to Fiber Bragg Grating Sensors," in *Current Trends in Short- and Long-period Fiber Gratings*, InTech, 2013, pp. 1–24.
- [51] H. Guo, G. Xiao, and J. Yao, "Interrogation of a Long Period Grating Fiber Sensor With an Arrayed-Waveguide-Grating-Based Demultiplexer Through Curve Fitting," *IEEE Sens. J.*, vol. 8, no. 11, pp. 1771–1775, Nov. 2008.
- [52] P. S. S. dos Santos, P. A. S. Jorge, J. de Almeida, and L. Coelho, "Low-Cost Interrogation System for Long-Period Fiber Gratings Applied to Remote Sensing," *Sensors*, vol. 19, no. 7, p. 1500, Mar. 2019.
- [53] "Optical Spectrum Analysis," *Application Note 1550-4*. Agilent Technologies.
- [54] "Yokogawa AQ6370." [Online]. Available: <https://tmi.yokogawa.com/solutions/products/optical-measuring-instruments/optical-spectrum-analyzer/aq6370-optical-spectrum-analyzer/>. [Accessed: 26-Mar-2020].
- [55] "Ocean Insight STS-NIR." [Online]. Available: <https://www.oceaninsight.com/products/spectrometers/microspectrometer/sts-series/sts-nir/>. [Accessed: 26-Mar-2020].
- [56] M. Fukuda, T. Mishima, N. Nakayama, and T. Masuda, "Temperature and current coefficients of lasing wavelength in tunable diode laser spectroscopy," *Appl. Phys. B*, vol. 100, no. 2, pp. 377–382, Aug. 2010.
- [57] MAXIM, "2Ω, Quad, SPST, CMOS Analog Switches." pp. 1–12.

- [58] R. M. Atta, "Thermoelectric Cooling," in *Bringing Thermoelectricity into Reality*, InTech, 2018.
- [59] "Peltier Element Efficiency." [Online]. Available: <https://www.meerstetter.ch/customer-center/compendium/71-peltier-element-efficiency#DCvsPWM>. [Accessed: 01-Apr-2020].
- [60] P. Scherz and S. Monk, *Practical Electronics for Inventors, Fourth Edition*, 4th ed. 2016.
- [61] J. S. Steinhart and S. R. Hart, "Calibration curves for thermistors," *Deep Sea Res. Oceanogr. Abstr.*, vol. 15, no. 4, pp. 497–503, Aug. 1968.
- [62] Y. Deok Jeong, Y. Hyub Won, S. Ook Choi, and J. Hyun Yoon, "Tunable single-mode Fabry-Perot laser diode using a built-in external cavity and its modulation characteristics," *Opt. Lett.*, vol. 31, no. 17, p. 2586, Sep. 2006.

Anexo A

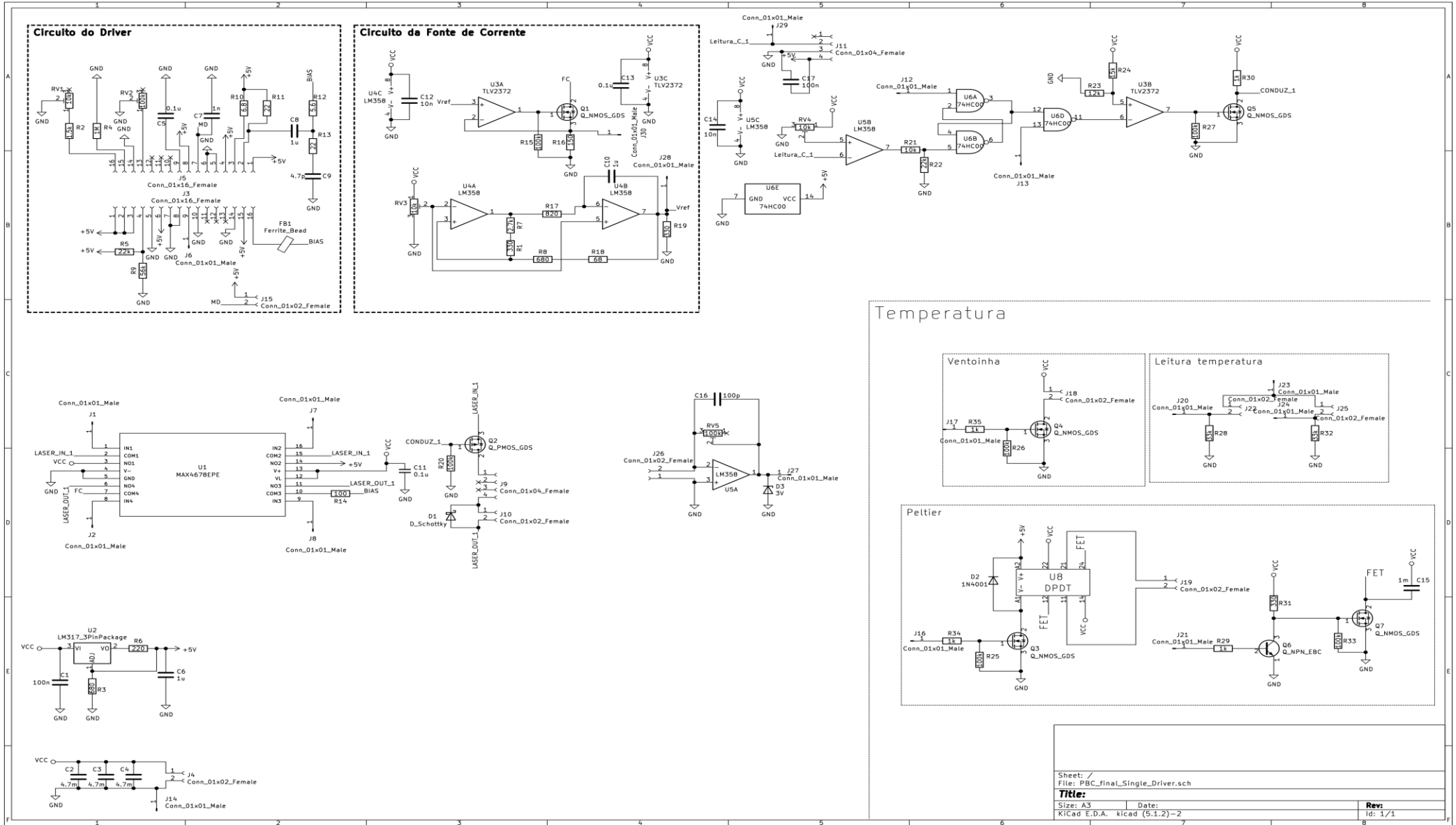


Figura A. 1 - Esquema do circuito elétrico desenhado no Kicad.

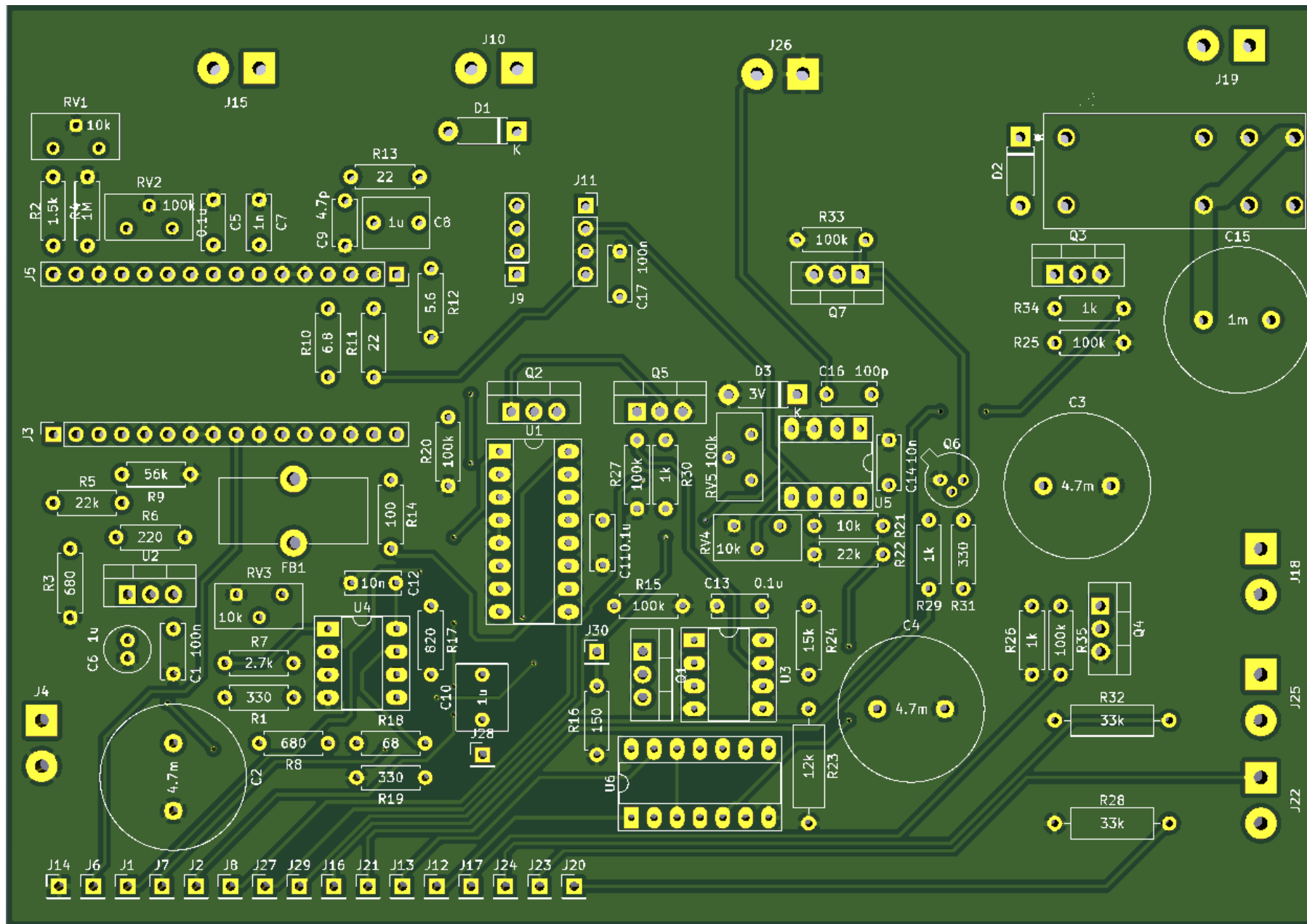


Figura A. 2 - Vista superior da placa de circuito impresso.

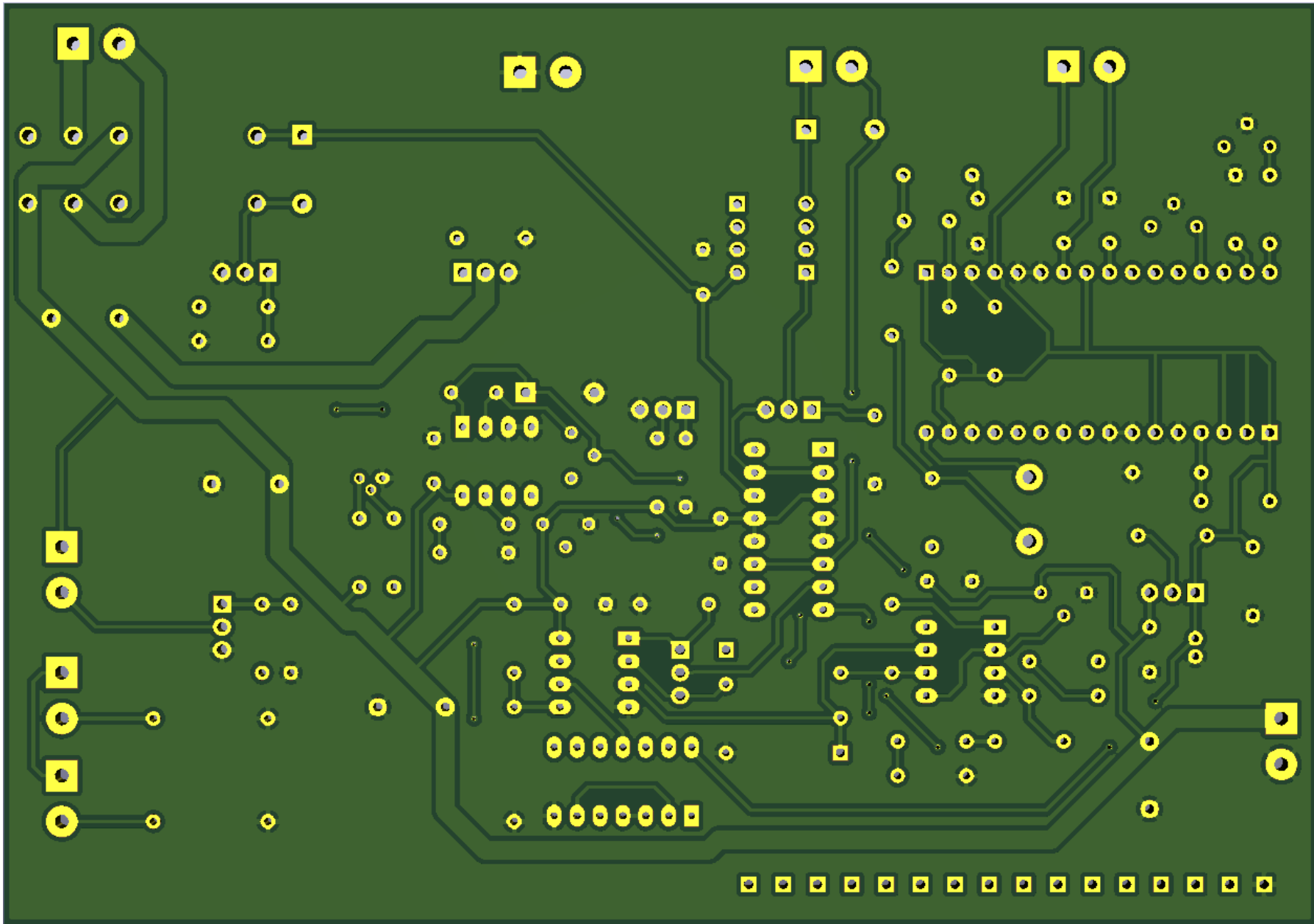


Figura A. 3 - Vista inferior da placa de circuito impresso.

Anexo B

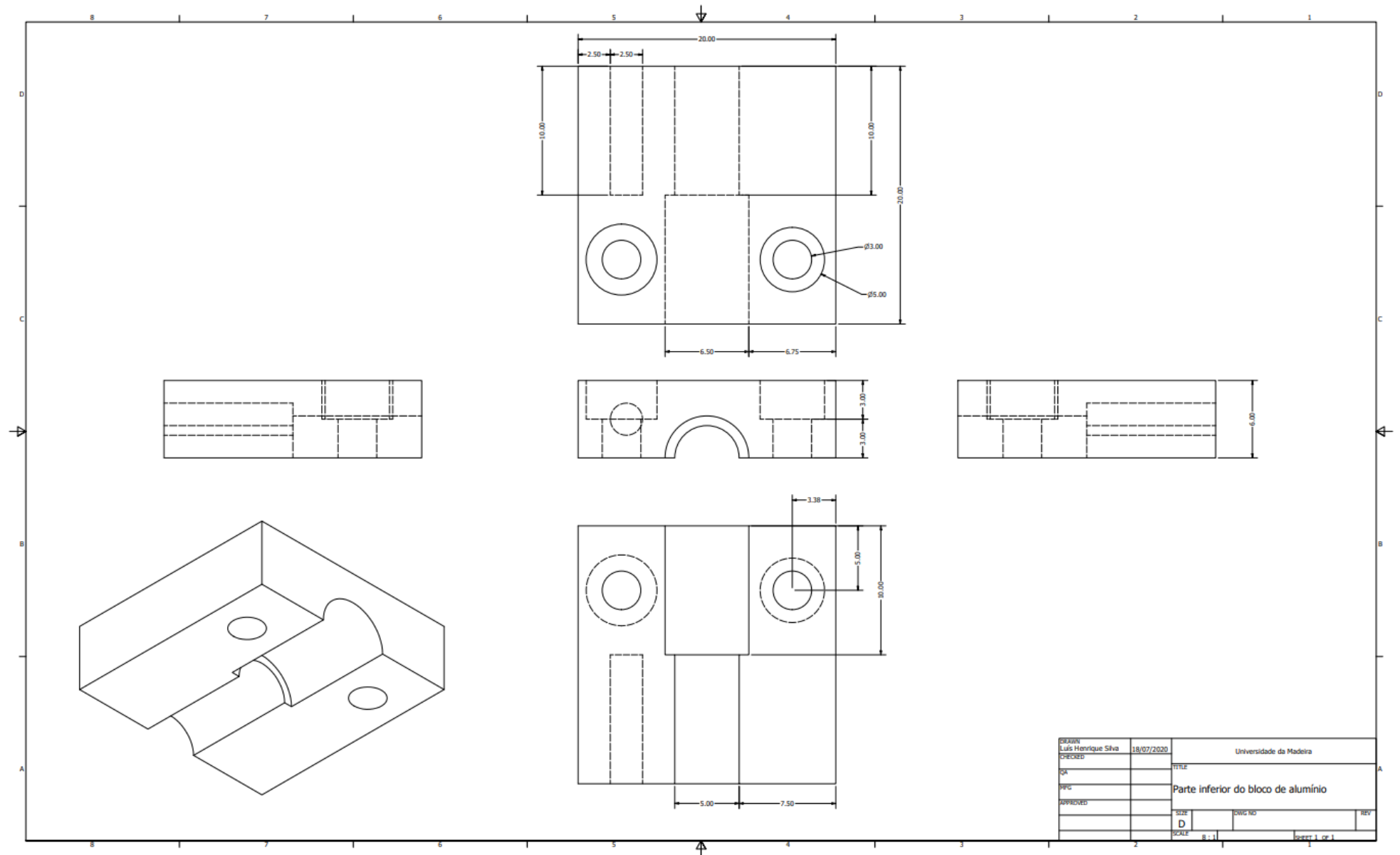


Figura B. 1 - Desenho técnico da parte inferior do bloco de alumínio.

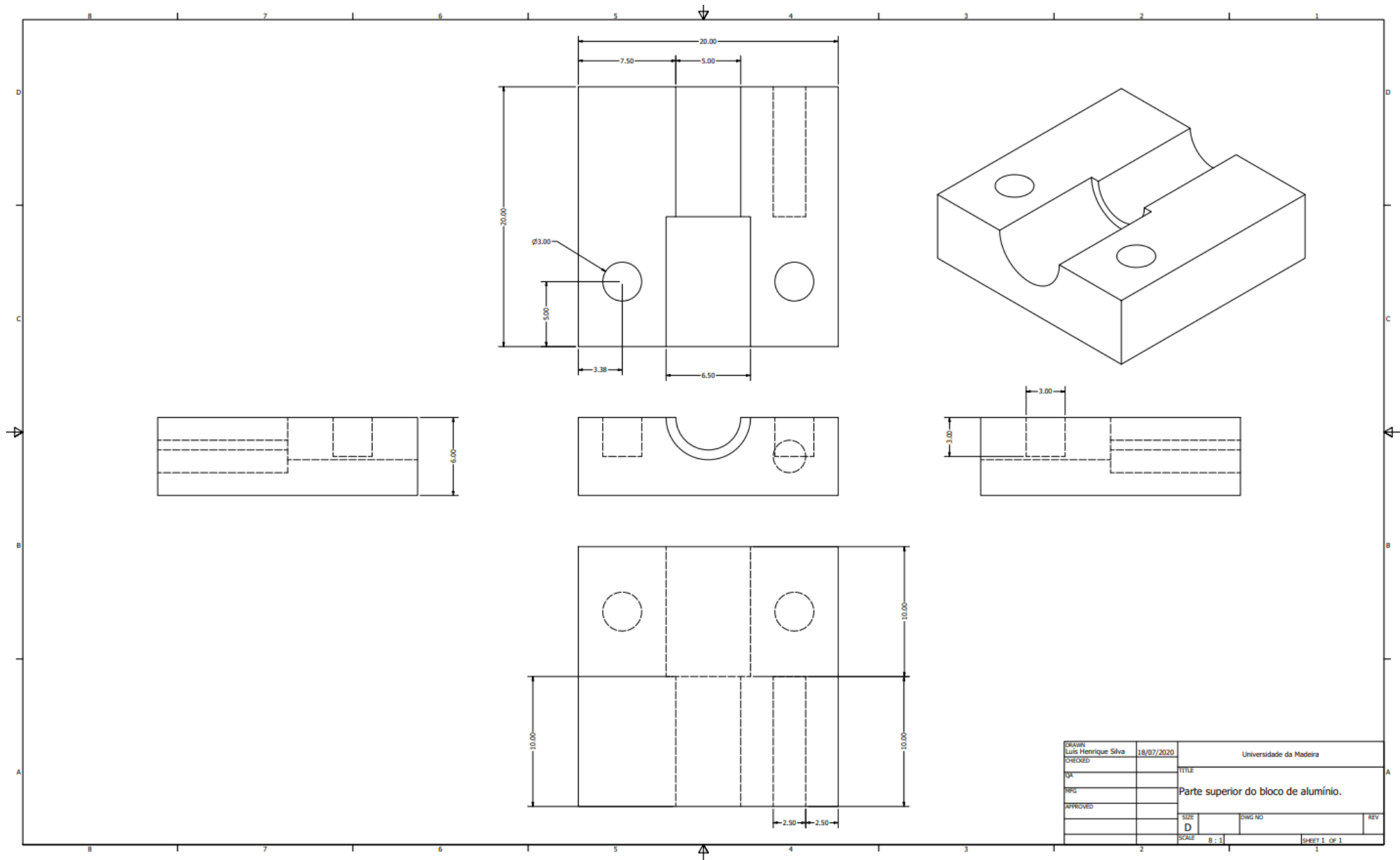


Figura B. 2 - Desenho técnico da parte superior do bloco de alumínio.

Anexo C

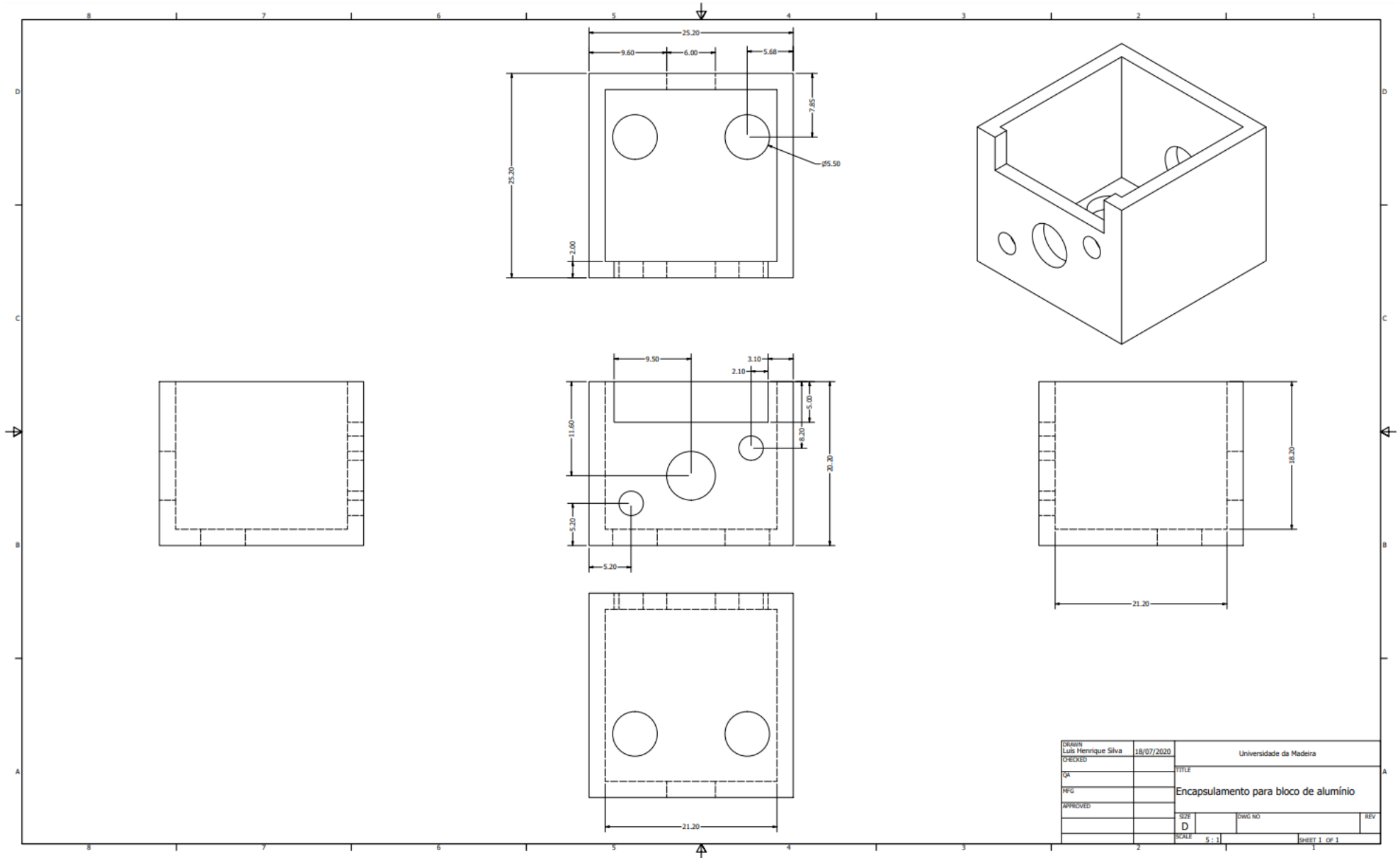


Figura C. 1 - Desenho técnico do encapsulamento criado para o bloco de alumínio

Anexo D

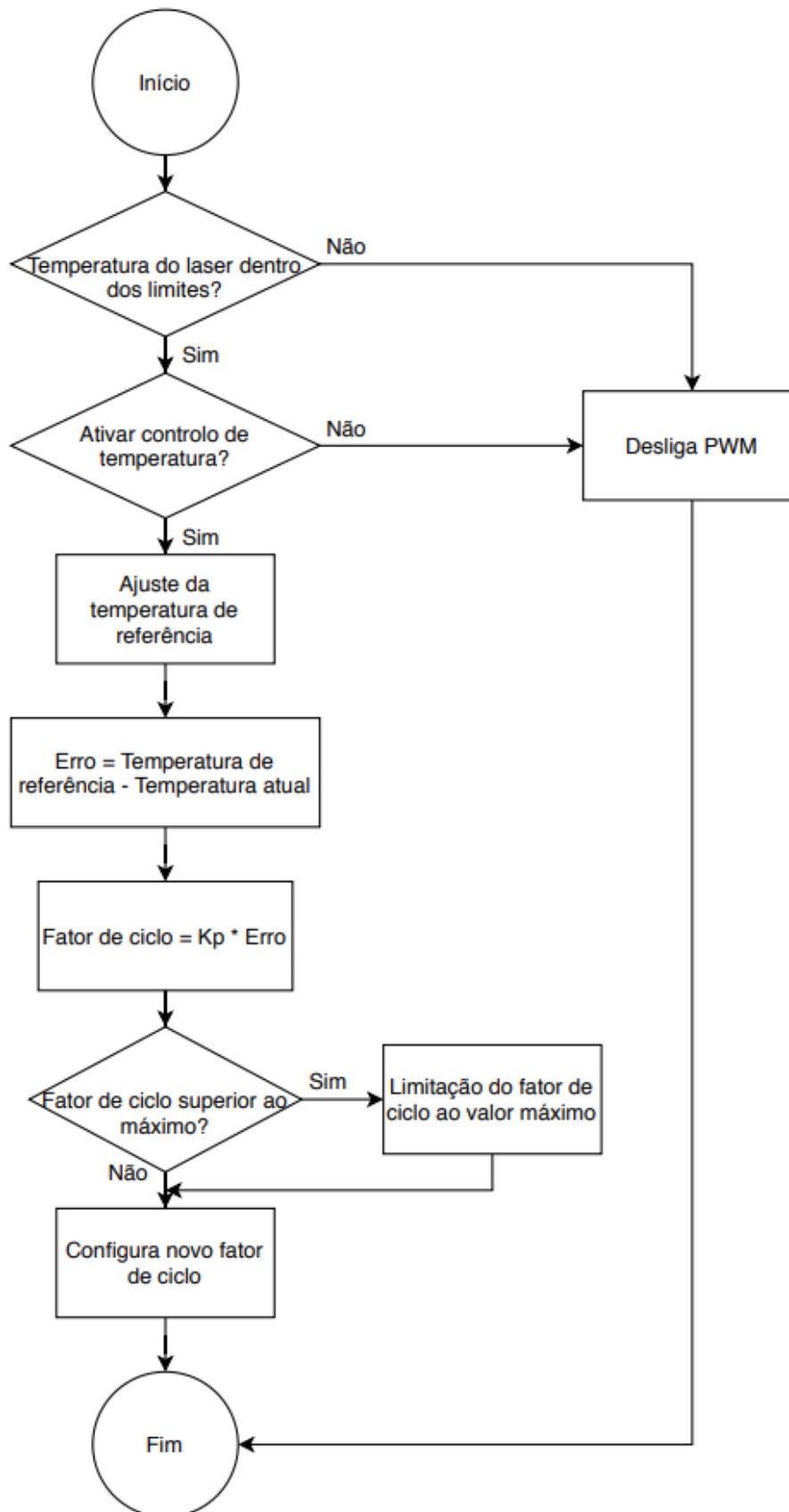


Figura D. 1 - Fluxograma do algoritmo de controlo de temperatura implementado.

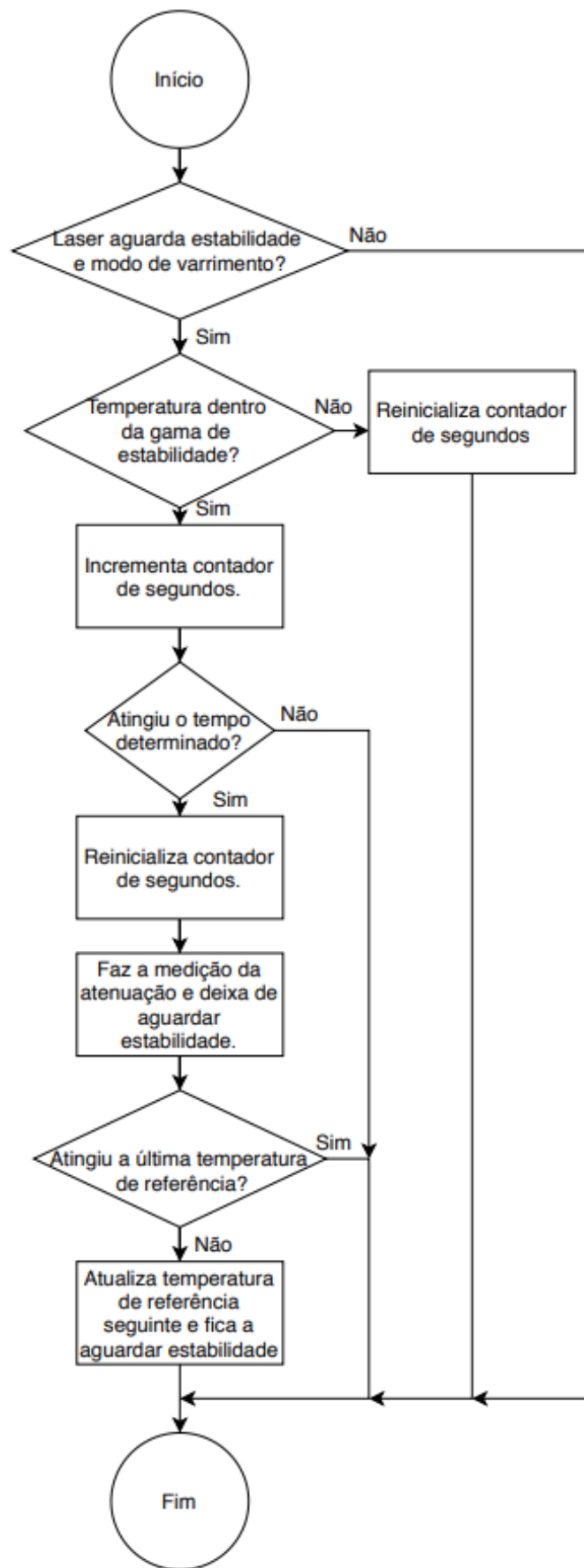


Figura D. 2 - Fluxograma do algoritmo de varrimento em temperatura.

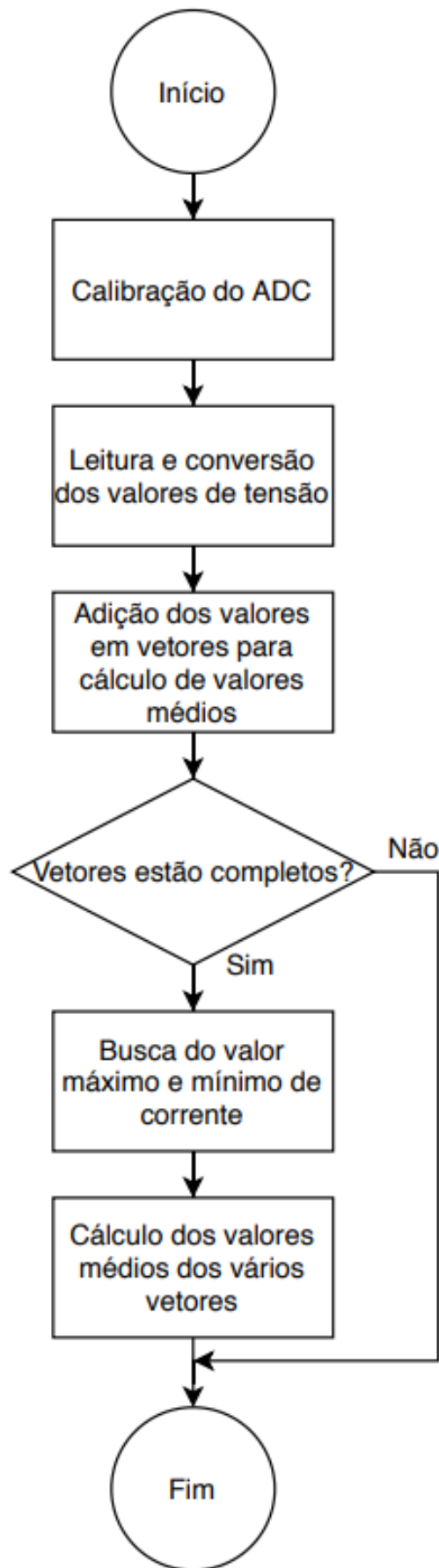


Figura D. 3 - Fluxograma do algoritmo dos ADC do microcontrolador.

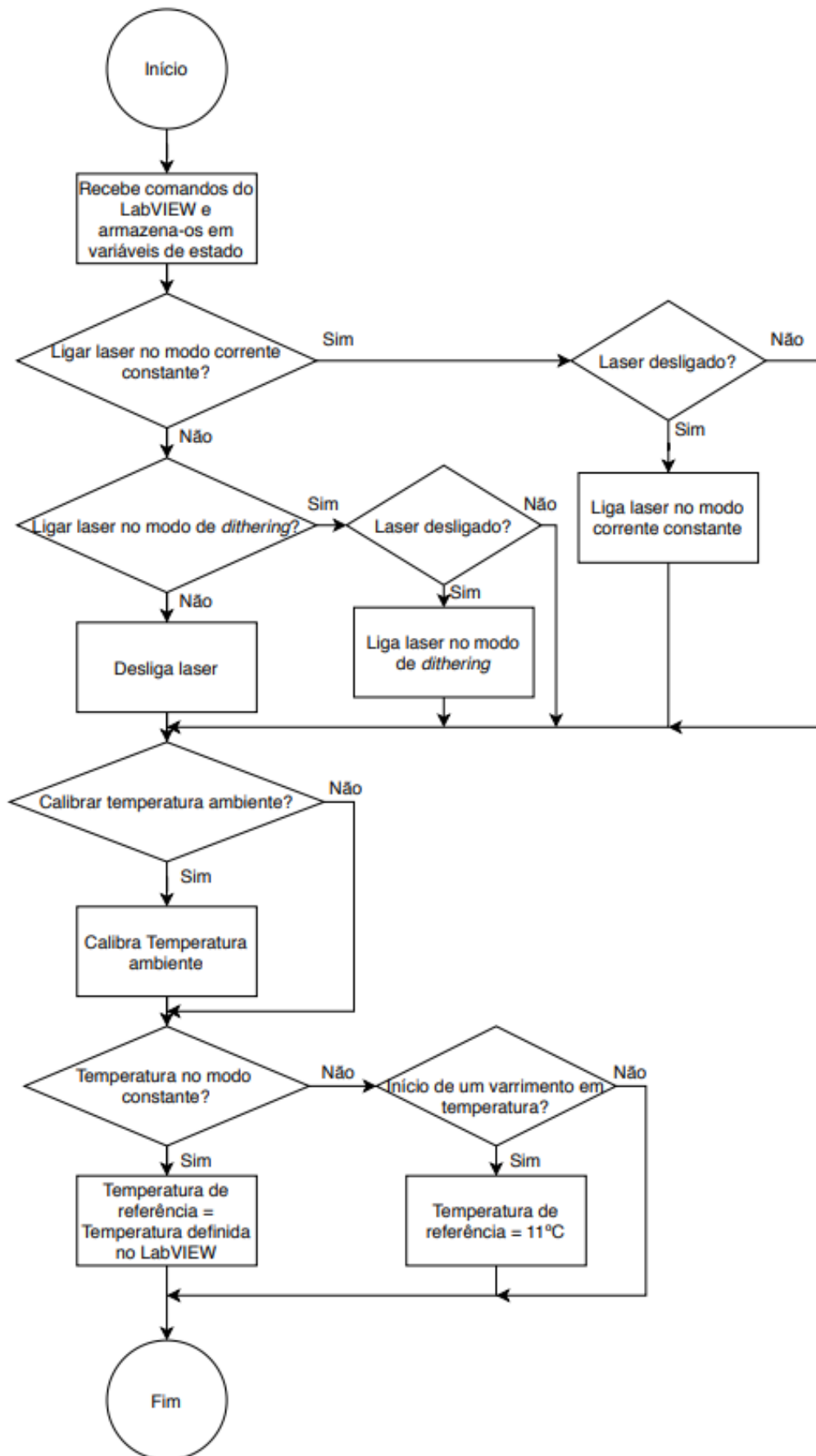


Figura D. 4 – Fluxograma do algoritmo de recepção de comandos provenientes do LabVIEW.

Anexo E

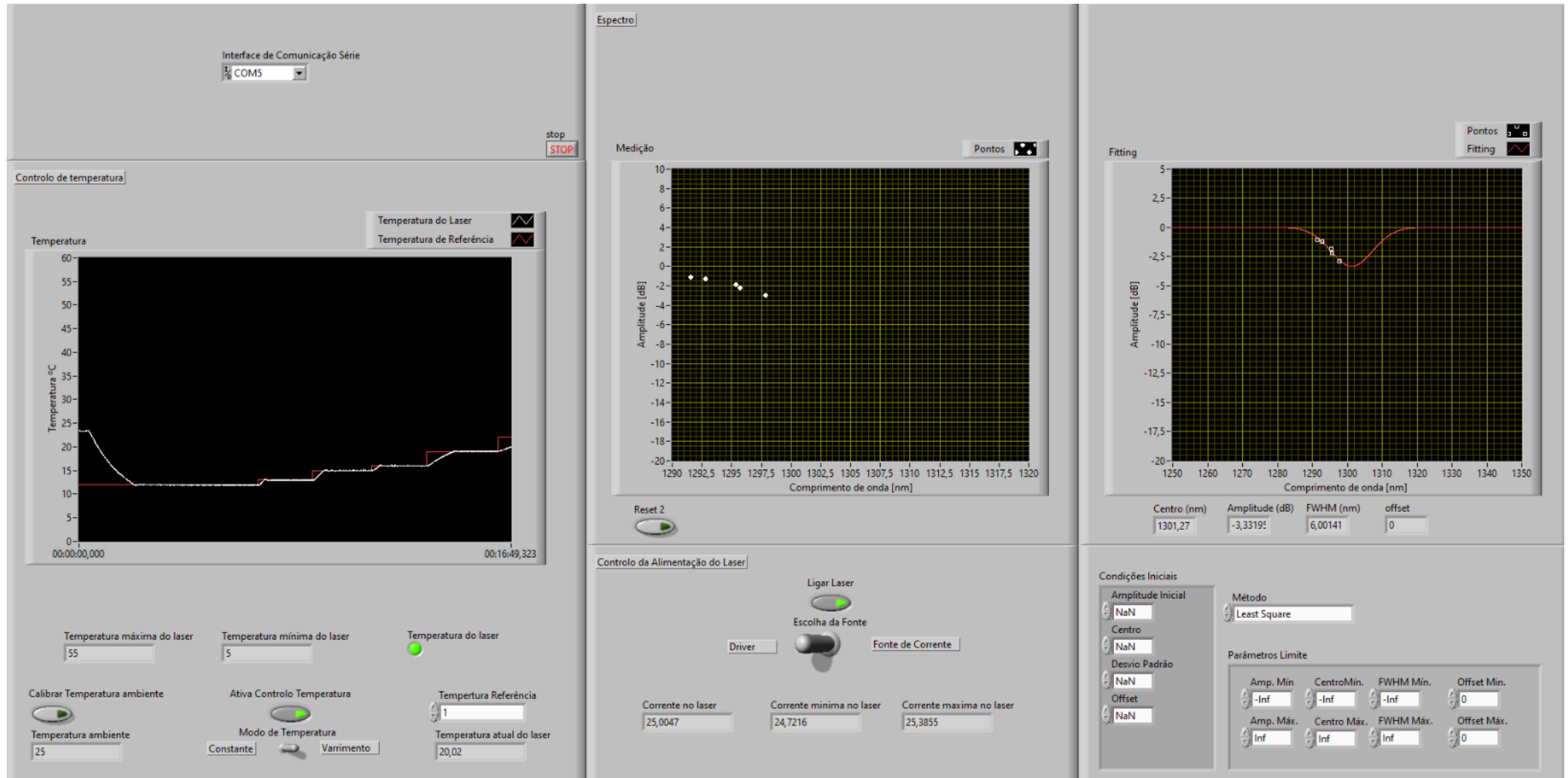


Figura E. 1 - Interface gráfica de utilizador desenvolvida em LabVIEW.