



**Fábio de Jesus  
Mendes**

**Técnicas de teste de circuitos óticos integrados para  
redes PON**





**Fábio de Jesus  
Mendes**

**Técnicas de teste de circuitos óticos integrados para  
redes PON**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Eletrónica e Telecomunicações, realizada sob a orientação científica do Doutor António Teixeira, Professor Associado do Departamento de Eletrónica e Telecomunicações da Universidade de Aveiro, do Doutor Mário Lima, Professor Auxiliar do Departamento de Eletrónica e Telecomunicações e do Engenheiro Francisco Rodrigues da empresa PICAdvanced S.A.



**o júri**

presidente

**Professor Doutor Telmo Reis Cunha**

Professor Auxiliar, Universidade de Aveiro

vogais

**Professora Doutora Maria do Carmo Raposo de Medeiros**

Professora Associada, Universidade de Coimbra

**Professor Doutor António Luís Jesus Teixeira**

Professor Associado com Agregação, Universidade de Aveiro



## **Agradecimentos**

Queria agradecer aos meus pais, que me deram um grande apoio ao longo desta extensa etapa. Agradeço também ao Engenheiro Francisco Rodrigues, ao Engenheiro Hugo Neto, à Doutora Ana Tavares, ao professor Doutor Mário Lima e ao professor Doutor António Teixeira, que me ajudaram a ultrapassar as várias dificuldades que iam surgindo ao longo deste projeto e também pelo forte apoio demonstrado.

Este trabalho é financiado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER), através do Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (COMPETE 2020) do Portugal 2020 [Projeto Virtual Fiber Box com o nº 033910 (POCI-01-0247-FEDER-033910)]





## palavras-chave

Redes PON, Circuitos Óticos Integrados(PIC's), Automação de Instrumentos

## resumo

Nestes últimos anos, é de notável percepção que a utilização constante da Internet é cada vez mais frequente em praticamente todas as gerações. Esta grande utilização, vai gerar uma necessidade enorme de criar tecnologias para a obtenção de uma maior largura de banda e velocidade, satisfazendo assim os vastos utilizadores. As fibras óticas passivas e redes óticas passivas(PON), têm tido uma grande contribuição para a evolução dos sistemas de telecomunicação, pelo fato de oferecer uma enormes taxas de transmissão de dados capaz de atender ao mercado atual. Na última década, várias arquiteturas de PON foram desenvolvidas pela União Internacional de Telecomunicações (ITU) e pelo Instituto de Engenheiros Elétricos e Eletrônicos (IEEE). As quatro principais variações de PON desenvolvidas pela ITU e IEEE podem ser divididas em dois grupos. O primeiro tipo de arquitetura é fundamentado no modo de transferência assíncrona (ATM) e inclui ATM PON (APON), PON de banda larga (BPON) e Gigabit PON (GPON) e o segundo grupo consiste em Ethernet PON (EPON). EPON e GPON são as variações de PON mais populares que se encontram em uso. Atualmente foi desenvolvida uma rede ótica passiva(PON), designada por Nova Geração de Rede Ótica Passiva(NG-PON2) e no futuro pretendem implementar uma Super PON. Este trabalho é todo ele incidido nos PICs(Circuitos Óticos Integrados), que são uns chips integrados com várias funcionalidades óticas. O objetivo é fazer vários testes para estudar o desempenho de cada chip e depois integrá-los em aparelhos óticos como por exemplo, na Linha de Terminal Ótico (OLT). Na OLT o sinal vai ser (transmitido/recebido) (da/para a) Rede de Unidade Ótica (ONU), no qual os utilizadores poderão ter acesso. Para além de testes em circuitos óticos, realizados em laboratório empresarial (PICadvanced S.A.), executar-se-á a automaização de alguns instrumentos de bancada para facilitar a obtenção dos valores desses testes. Este trabalho terá uma parte teórica que retratará as redes PON e a fotónica integrada e a parte prática que mencionará os equipamentos automatizados e os testes realizados nos PICs.

**keywords**

PON Networks, Integrated Optical Circuits (PIC's), Instrument Automation

**abstract**

In recent years, it is notable that the constant use of the Internet is more and more frequent in practically all generations. This great use, will generate an enormous need to create technologies to obtain a greater bandwidth and speed, thus satisfying the vast users. Passive optical fibers and passive optical networks (PON), have made a great contribution to the evolution of telecommunication systems, due to the fact that they offer enormous data transmission rates capable of serving the current market. In the last decade, several PON architectures have been developed by the International Telecommunication Union (ITU) and the Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE). The four main PON variations developed by ITU and IEEE can be divided into two groups. The first type of architecture is based on asynchronous transfer mode (ATM) and includes ATM PON (APON), broadband PON (BPON) and Gigabit PON (GPON) and the second group consists of Ethernet PON (EPON). EPON and GPON are the most popular PON variations that are in use. Currently, a passive optical network (PON) has been developed, called the New Generation of Passive Optical Network (NG-PON2) and in the future they intend to implement a Super PON. This work is all focused on PICs (Integrated Optical Circuits), which are integrated chips with various optical features. The objective is to do several tests to study the performance of each chip and then integrate them in optical devices such as, for example, in the Optical Terminal Line (OLT). In the OLT the signal will be (transmitted / received) (from / to) the Optical Unit Network (ONU), to which users will be able to access. In addition to tests on optical circuits, carried out in a corporate laboratory (PICadvanced S.A.), the automation of some bench instruments will be carried out to facilitate the achievement of the values of these tests. This work will have a theoretical part that will portray the PON networks and the integrated photonics and the practical part that will mention the automated equipment and the tests carried out on the PICs.



# Índice

Índice.....	ii,iii
Lista de Figuras.....	iv,v,vi
Lista de Tabelas .....	vii
Acrónimos .....	viii,ix
1. Introdução.....	1
1.1 Contexto e Motivação .....	1
1.2 Objetivos .....	2
1.3 Estrutura .....	2
1.4 Contribuições.....	3
2. Redes PON e Fotónica Integrada.....	4
2.1 Redes PON .....	4
2.1.1 Desenvolvimento das redes PON e arquitetura NG-PON2 .....	5
2.2 Fotónica Integrada .....	7
2.2.1 Caracterização de Circuitos Óticos Integrados .....	7
2.2.2 Evolução dos Circuitos Óticos Integrados.....	8
2.3 Caracterização dos Componentes Óticos .....	9
2.3.1 Fotodetetores.....	10
2.3.2 Laser de Feedback Distribuído .....	12
2.3.3 Amplificadores de Semicondutor.....	16
2.3.4 Interferómetro Multimodo.....	17

2.3.5	Modulador de Eletro-absorção.....	18
3.	Procedimento experimental e Automatização dos Test Benches .....	19
3.1	Descrição do Equipamento.....	19
3.2	Cuidados no Setup .....	21
3.3	Caracterização das Fibras Óticas .....	21
3.3.1	Fibras Clivadas e sua Clivagem.....	22
3.3.2	Fibras de Lente Esféricas.....	24
3.3.3	Fibras de Lente de Cone .....	25
3.3.4	Alinhamento da Fibra.....	26
3.4	Automatização dos Aparelhos .....	27
3.4.1	Osciloscópio.....	28
3.4.2	Medidor de Potência Ótica .....	32
3.4.3	Analisador de Espectro Ótico .....	35
4.	Testes Experimentais no PIC.....	39
4.1	Caracterização dos Designs .....	39
4.1.1	Design 1 – Arquitetura 4 .....	39
4.1.2	Design 2 – Arquitetura 1 .....	42
4.1.3	Design 2 – Arquitetura 2.1 e 2.2 .....	50
4.1.4	Design 3 – Arquitetura 1 .....	57
5.	Conclusões e Trabalhos Futuros .....	63
5.1	Conclusões.....	63
5.2	Trabalho Futuro .....	64
6.	Referências .....	65
7.	Anexos.....	69



## Lista de Figuras

2.1 Exemplos das arquiteturas PON.....	4
2.2 Gerações PON.....	5
2.3 Sistema de Arquitetura NG-PON2.....	6
2.4 Circuito Ótico Integrado (PIC).....	7
2.5 PIC realizada numa plataforma genérica COBRA: (a) Laser baseado em AWG; (b) circuito SOA monolítico; (c) interferômetro de retardo multifuncional; (d) conexão cruzada seletiva de comprimento de onda; (e) comutador fotônico; (f) Laser ampla frequência.....	8
2.6 Estudo da integração das PIC's.....	9
2.7 Processo de fotodeteção.....	10
2.8 Fotodetector do tipo PIN.....	10
2.9 Fotodetector do tipo APD (avalanche).....	11
2.10 Comparação entre o feedback Fabry-Perot e grating feedback.....	12
2.11 Estrutura do DFB com a cavidade de Fabry-Perot.....	13
2.12 Variação da Potência Ótica (DFB laser) com a temperatura e corrente.....	14
2.13 Exemplo de variação do comprimento de onda com a potência ótica e temperatura.....	15
2.14 Estrutura básica do SOA.....	16
2.15 Esquemático de uma estrutura 1x2 MMI.....	17
2.16 Esquemático simples de um modulador de eletro-absorção.....	18
3.1 Setup para testes experimentais.....	19
3.2 Equipamento para clivagem da fibra.....	22
3.3 Fibra ótica com lente esférica, onde $\varepsilon$ - ângulo de incidência, e $\theta$ - ângulo de refração.....	24
3.4 Fibra de cone longo [3900 um ]; Fibra de cone com espaçador [1350 um]; Fibra de cone [750 um];.....	25

3.5	Alinhamento de uma fibra ótica com a PIC (V-groove utilizado) .....	26
3.6	Aplicação para automação do osciloscópio .....	28
3.7	Dados guardados no Excel (Média, Mínimo, Máximo, Valor pico a pico e Frequência).....	30
3.8	Valores do gráfico guardado no Excel (A – tensão(eixo dos xx)) e (B – tempo(eixo dos yy)).....	30
3.9	Interface Thorlabs do Medidor de Potência Ótica (Devices).....	32
3.10	Interface Thorlabs do Medidor de Potência Ótica (Monitoring).....	33
3.11	Dados recolhidos de potência ótica para o Excel .....	34
3.12	Aplicação para automação do Analisador espectral ótico .....	35
3.13	Sinal de um espectro ótico.....	37
3.14	Dados retirados do espectro ótico para o Excel .....	38
4.1	Diagrama de blocos do Design 1 - Arquitetura 4.....	39
4.2	Potência ótica à saída variando o eixo dos xx.....	40
4.3	Potência ótica à saída variando o eixo dos yy.....	41
4.4	Potência ótica à saída variando o eixo dos zz .....	41
4.5	Diagrama de blocos do Design 2 - Arquitetura 1 .....	42
4.6	Potência ótica à saída variando o eixo dos xx,yy,zz para uma fibra de lente (150um) .....	43
4.7	Potência ótica à saída variando o eixo dos xx,yy,zz para uma fibra de lente (100um) .....	44
4.8	Potência ótica à saída variando o eixo dos xx,yy,zz para uma fibra cónica .....	45
4.9	Potência ótica logarítmica para (20,25,30) °C   Potência ótica linear para (20,25,30) °C .....	47
4.10	Comprimento de onda para (20,25,30) °C .....	47
4.11	Potência ótica logarítmica para [80. 120] mA / Comprimento de onda para [90...120] mA.....	48
4.12	Arquitetura 2.1 (MMI 3x3) / Arquitetura 2.2 (MMI 4x4) .....	50
4.13	Potência Ótica para MMI 3x3 em Banda-L (teste ótico/ótico) / Potência Ótica para MMI 3x3 em Banda-L (teste ótico/elétrico).....	51
4.14	Potência Ótica para MMI 3x3 em Banda-C (teste ótico/ótico) / Potência Ótica para MMI 3x3 em Banda-C (teste ótico/elétrico).....	52
4.15	Potência Ótica para MMI 4x4 em Banda-L (teste ótico/ótico) / Potência Ótica para MMI 4x4 em Banda-L (teste ótico/elétrico).....	53
4.16	Potência Ótica para MMI 4x4 em Banda-C (teste ótico/ótico) / Potência Ótica para MMI 4x4 em Banda-C (teste ótico/elétrico).....	55



4.17	Diagrama de blocos do Design 3 - Arquitetura 1.....	57
4.18	Potência ótica à saída variando a corrente (PIC 7).....	57
4.19	Relação do pico 1 e pico 2 com a potência ótica e o comprimento de onda variando a corrente (PIC 7).....	58
4.20	Potência ótica à saída variando a corrente (PIC 2).....	59
4.21	Relação do pico 1 e pico 2 com a potência ótica e o comprimento de onda variando a corrente (PIC 2).....	59
4.22	Potência ótica à saída variando a corrente (PIC 4).....	60
4.23	Relação do pico 1 e pico 2 com a potência ótica e o comprimento de onda variando a corrente (PIC 4).....	61

## Lista de Tabelas

2.1 Especificações relativamente ao DFB.....	13
3.1 Equipamento usado para testes óticos .....	20
3.2 Equipamento usado para clivagem da fibra.....	23
3.3 Circuito Ótico Integrado (PIC) .....	23
3.4 Funcionalidades do osciloscópio.....	29
3.5 Funcionalidades do analisador de espectro ótico.....	36
4.1 Potência ótica máxima nos posicionadores (x,y,z) para uma fibra de lente (150um) .....	44
4.2 Potência ótica máxima nos posicionadores (x,y,z) para uma fibra de lente (100um) .....	45
4.3 Potência ótica máxima nos posicionadores (x,y,z) para uma fibra cónica .....	46
4.4 Valores de potência ótica para [25...50] °C.....	49

## Acrónimos

AWG	Grades Dispostas em Guias de Onda
DFB	Laser de Feedback Distribuído
DML	Laser Diretamente Modulado
DWDM	Divisor Multiplexado de Comprimento de Onda
EAM	Modulador de Eletro-Absorção
FC	Fibra cônica
FL	Fibra de Lente
FTTH	Fibra Para A Casa
GPON	Rede Ótica Passiva Gigabit
LASER	Amplificação de Luz Por Emissão Estimulada de Radiação
LDC	Controlador Laser Díodo
NG-PON	Próxima Geração de Rede Ótica Passiva
OFA	Amplificador de Fibra Ótica
OLT	Terminal de Linha Ótica
ONT	Terminal de Rede Ótica
ONU	Unidade de Rede Ótica
OSA	Analisador de Espectro Ótico
PIC	Circuito Fotônico Integrado
PIN	Fotodiodos P-I-N
PL	Potência do Laser
PON	Rede Ótica Passiva
SOA	Amplificador de Semicondutor Ótico
SSC	Spot Size Converter
SMSR	Relação de Supressão de Modo Lateral

TC	Controlador de Temperatura
TDMA	Acesso Múltiplo Por Divisão de Tempo
TI	Tensão de Entrada
TO	Tensão de Saída
TSML	Taxa de Supressão de Modo Lateral
TWDM	Divisor Multiplexado de Tempo e Comprimento de Onda
WDM	Comprimento de Onda Multiplexado
XGPON	Rede Ótica Passiva 10 Gigabit





# 1. Introdução

## *1.1 Contexto e Motivação*

A evolução no estudo e desenvolvimento da fibra ótica até ao destino final FTTx (fibra até x), sendo “x” casa ou prédio, tem mostrado uma enorme evolução nos últimos anos. As redes FTTH foram desenvolvidas e implementadas por todo o mundo, tendo vindo a sofrer avanços positivos graduais devido às redes PON (rede ótica passiva), que desempenham um papel importante na progressão da conexão. Neste sentido, estas redes foram evoluindo desde as GPON e XGPON até à NG-PON2 e tendem a ser o futuro [1]. Adicionalmente, possuem uma grande largura de banda, têm um maior alcance e são fáceis de instalar. Através de uma fibra, é possível fazer a transmissão de dados, voz e vídeo, sendo, portanto, uma mais-valia para qualquer negócio que necessite de uma boa conexão à internet para potenciar o seu crescimento. A progressão das redes PON está de acordo com três fatores, especificamente, baixo custo da camada ótica das redes, ocupação de menos espaço e consumo de menor potência. Para que tal aconteça, apresentou-se a mesma solução que ocorreu no domínio elétrico, ou seja, a integração [1][2]. Saliente-se que os protótipos dos Circuitos Óticos Integrados (PIC's) são um exemplo dessa integração, porque num só chip apresentam diversos componentes, entre eles, lasers, fotodíodos, filtros, SOA e moduladores.

Esta dissertação vai incidir na automatização dos test benches e na realização de testes dos Circuitos Óticos Integrados (PIC's), tendo como base o desenvolvimento desses blocos e arquiteturas. Para a sua realização, é necessário apresentar um setup devido, com vista ao correto funcionamento dos mesmos. Assim, foram utilizados 3 PIC's diferentes,

ou seja, cada um com o seu design e os testes foram feitos de acordo com a arquitetura proposta.

## ***1.2 Objetivos***

Os principais objetivos para a realização deste trabalho focaram-se em:

- Compreender o desenvolvimento das redes PON;
- Saber utilizar todo o material de bancada para a realização dos testes óticos;
- Perceber o motivo da realização de todos os testes e estudar o comportamento obtido em cada um;
- Introduzir a automatização nos test benches, para estudar com uma maior eficiência os resultados obtidos no PIC.

## ***1.3 Estrutura***

A estrutura deste documento é composta por 5 capítulos, o capítulo 1, que reside na introdução ao tema que foi desenvolvido ao longo deste trabalho, estando os restantes organizados da seguinte forma:

- **Capítulo 2 – Redes PON e fotónica integrada**, que retrata de uma maneira geral a evolução das redes PON, mais especificamente, da arquitetura NG-PON2, e a caracterização dos componentes óticos que farão parte dos PIC's, nos quais serão realizados os testes.
- **Capítulo 3 – Automatização dos aparelhos**, onde são abordados todos os aparelhos que foram automatizados para os testes de bancada, demonstrando assim a utilização e funcionamento dos mesmos.
- **Capítulo 4 – Testes Experimentais no PIC**, que apresenta todos os testes realizados e o estudo relativo a cada um. Neste capítulo, serão testados 3 designs de PIC's diferentes, cada qual com as suas arquiteturas;



- **Capítulo 5 – Conclusões e Trabalhos Futuros**, que resume todo o conhecimento adquirido ao realizar esta dissertação e possíveis sugestões, as quais eu possa vir a desenvolver e conseguir que sejam úteis para a abertura de portas no mercado de trabalho.

### ***1.4 Contribuições***

O desenvolvimento de trabalho pode contribuir ainda para:

- Desenvolver novos métodos, ao nível de bancada, para uma maior eficácia na realização dos testes no PIC;
- Perceber o estudo de cada design do PIC e o que poderá ser melhorado na sua assemblagem para os resultados serem os mais esperados;
- Produzir uma aplicação através da qual se consigam controlar os vários instrumentos utilizados nos testes, procedendo, deste modo, à sua automatização.

## 2. Redes PON e Fotônica Integrada

### 2.1 Redes PON

Uma Rede Ótica Passiva (PON) é uma arquitetura ponto-multiponto que permite que uma fibra ótica seja compartilhada por múltiplos pontos finais [3]. Esta rede apresenta três modelos de arquitetura: centralizado, convergência local e splitters distribuídos. A arquitetura centralizada contém uma fibra para cada utilizador vindo da central, a convergência local possui uma fibra a partir de um ponto de convergência e nos splitters distribuídos é utilizada uma arquitetura que apresenta diferentes pontos de convergência para a ocorrência da distribuição [4]. Como se pode verificar, a Figura 2.1 representa as três arquiteturas:

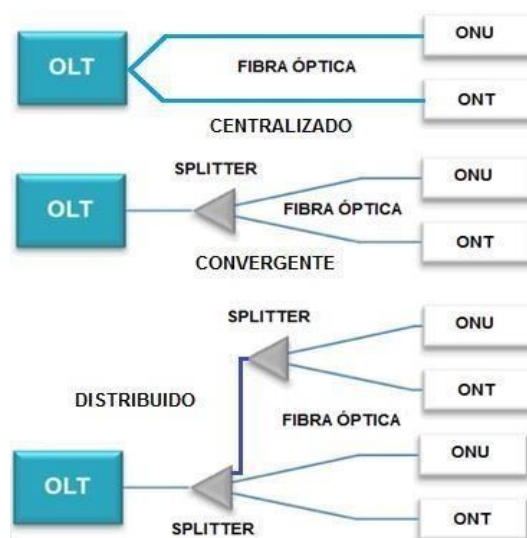


Figura 2.1 - Exemplos das arquiteturas PON [4]

O sinal ótico na rede PON, transmitido para todos os utilizadores proveniente do Terminal de Linha Ótica (OLT), é responsável por emitir sinal através de uma fibra ótica, em transmissão bidirecional. De seguida, passa pelo divisor ótico passivo (splitter), cuja função é a divisão do sinal ótico e fracionamento da taxa de transmissão, distribuindo os sinais resultantes para a Unidade de Rede Ótica (ONU's) e Unidade de Terminação Ótica (ONT's), onde serão transmitidos e recebidos. Na ONU e ONT, o sinal ótico é convertido para sinal elétrico, para que o utilizador consiga usufruir dos dados. A diferença entre ambas reside no modo como o sinal chega ao consumidor final [3][4].

### 2.1.1 Desenvolvimento das redes PON e arquitetura NG-PON2

O avanço da tecnologia PON é classificado em três gerações: a primeira (PON implantada), baseada num Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo (TDMA), o estágio 1, referente ao NG-PON1 e o estágio 2, que envolve o NG-PON2. Esta evolução está presente na Figura 2.2.[5]



Figura 2.2 - Gerações PON[5]

Como mostra a Figura 2.2, NG-PON2 é o modelo com o qual estamos a lidar nesta geração. O Divisor Multiplexado de Tempo e de Comprimento de Onda (TWDM) é a solução principal para o NG-PON2. O TWDM-PON da linha de base usa quatro canais-bidirecionais espaçados com o Divisor Multiplexado de Denso Comprimento de Onda (DWDM), cada um de 10 Gb/s (*Downstream*) e taxa de linha de 2,5 Gb/s (Figura 2.3). Desta forma, resulta numa capacidade agregada de (*Downstream*) de 40 Gb/s e 10 Gb/s (*Upstream*) [5][6].

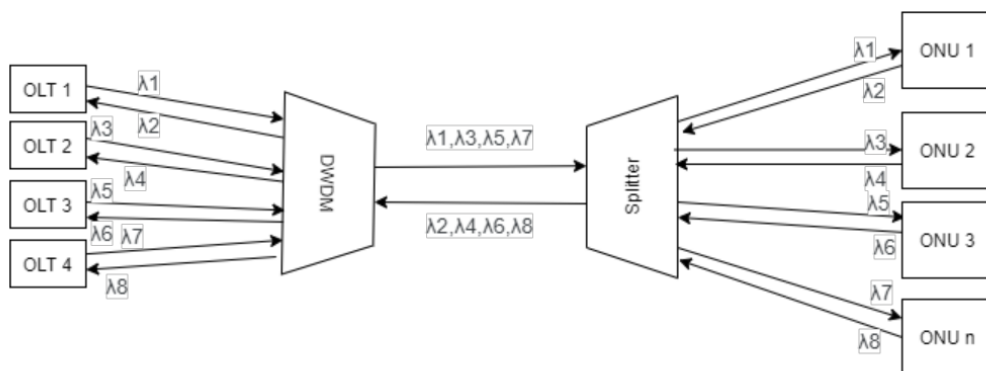


Figura 2.3 - Sistema de Arquitetura NG-PON2[7]

Como podemos observar na imagem acima, os quatro (OLT's CT) vão enviar o sinal óptico, cada um com o seu comprimento de onda, que vai ser combinado numa única fibra, usando um Comprimento de Onda Multiplexado (WDM). Quando entrar no (splitter), o sinal vai ser dividido e a cada ONU vai ser atribuída dinamicamente uma OLT que vai comunicar com lasers (*Upstream*) e filtros (*Downstream*). Um dos principais desafios para o TWDM-PON é realizar os componentes ajustáveis subjacentes a um baixo custo e controlar e gerenciar com precisão o domínio  $\lambda$  [7].

## 2.2 Fotónica Integrada

A ideia da fotónica integrada surgiu em 1970 e assumiu grandes conquistas nos anos seguintes, a título de exemplo um modulador a laser. No entanto, devido ao grande interesse no crescimento de largura de banda com menos custo e consumo e devido à capacidade do processamento optoelectrónico de semicondutores, PIC's extremamente complexos foram desenvolvidos e produzidos industrialmente [8].

### 2.2.1 Caracterização de Circuitos Óticos Integrados

A primeira PIC comercializada nas comunicações óticas apresentava duas funções no chip, um DFB laser e um laser diretamente modulado. Estes chips foram integrados em sistemas de rede de longas distâncias e apresentavam taxa de bits de 2,5 Gb/s e de 10Gb/s [5][6].

Nestes últimos anos, a fotónica integrada conseguiu crescer em termos de sistemas de comunicação. Este desenvolvimento é impulsionado principalmente pelo aumento do tráfego de vídeo na rede da internet, sendo o acesso possível através de smartphones e tablets, permitindo que o vídeo seja consumido de forma mais conveniente por meio de conexões de rede em qualquer lugar e a qualquer momento [9].

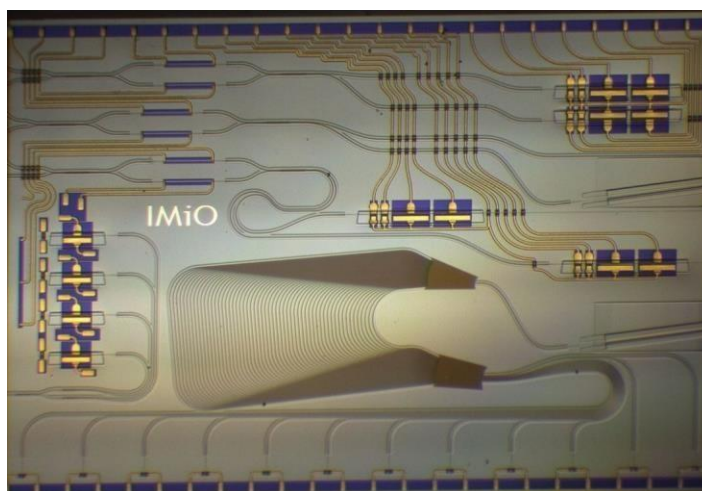


Figura 2.4 - Circuito Ótico Integrado (PIC)[10]

Na Figura 2.4, podemos observar um exemplo de um PIC. Estes circuitos óticos integrados são geralmente fabricados com uma tecnologia de escala de wafer (envolve litografia) em substratos de silício, sílica ou um material de cristal não linear. As guias de onda de sílica permitem a realização de acopladores, filtros (Mux e Desmux), divisores e combinadores de potência. O lítio e o silício são essenciais para materiais não lineares como moduladores eletro-óticos e a dopagem de íons e pedras raras possibilita que sejam feitos amplificadores e lasers, tudo o que constitui uma PIC [10][11]. Outros exemplos de PIC surgem apresentados na Figura 2.5, com as respectivas características [12].

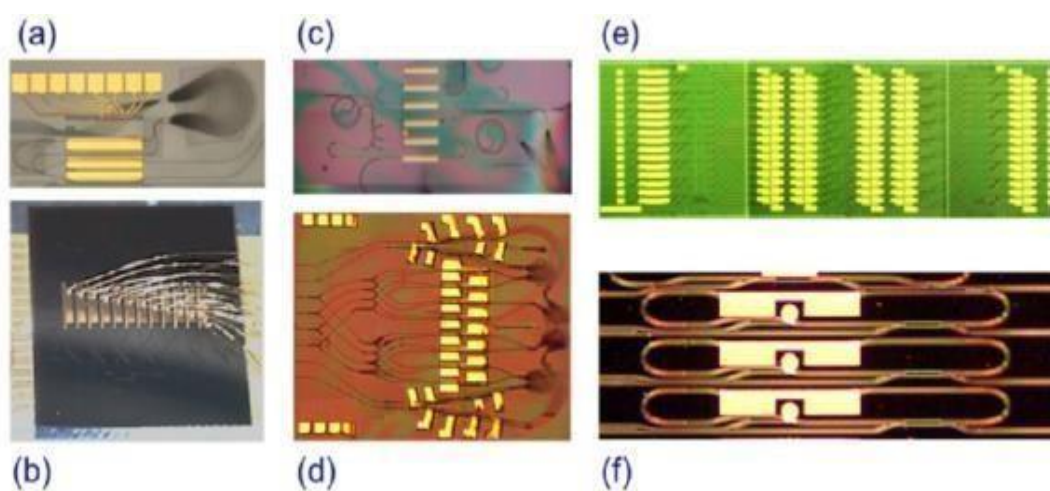


Figura 2.5 - PIC realizada numa plataforma genérica COBRA: (a) Laser baseado em AWG; (b) circuito SOA monolítico; (c) interferómetro de retardo multifuncional; (d) conexão cruzada seletiva de comprimento de onda; (e) comutador fotónico; (f) Laser ampla frequência [12]

## 2.2.2 Evolução dos Circuitos Óticos Integrados

Os circuitos óticos integrados apresentam de ano para ano uma densidade de integração cada vez mais eficiente. Através de estudos de laboratório, Figura 2.6, podemos ver essa linha de progressão.

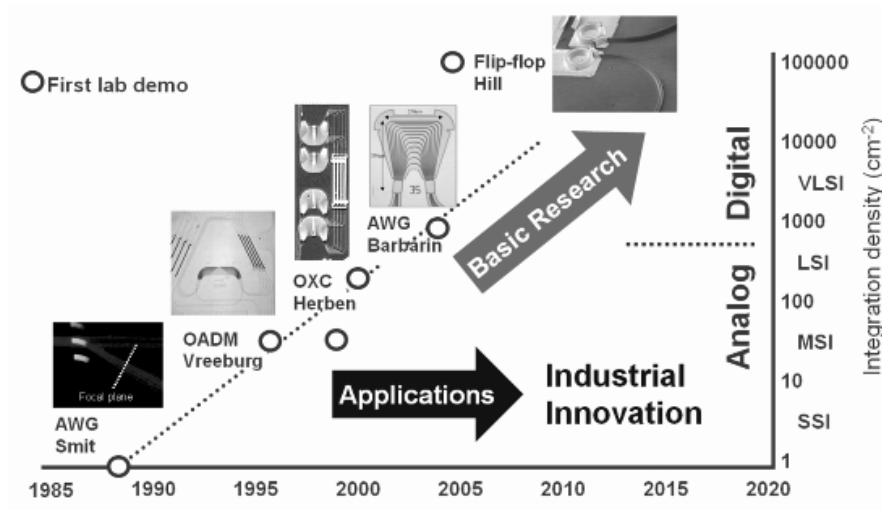


Figura 2.6 - Estudo da integração das PIC's[13]

O exemplo mais recente é o chip transmissor WDM de 10 canais, com capacidade de 100Gb/s. Este chip integra mais de 40 componentes, tendo 10 lasers DFB, 10 moduladores EA, 10 atenuadores, 10 díodos de monitor e um AWG de 10 canais. A densidade deste chip é de cerca de 500 componentes por  $\text{cm}^2$ . Um outro aspeto importante está relacionado com a capacidade dos dados (Gb/s) dos chips, visto que nos últimos tempos está a aumentar algo primordial para sistemas de rede ótica como NG-PON2, na medida em que favorecem o sistema de implementação (TDWM) [13].

### 2.3 Caracterização dos Componentes Óticos

Neste tópico, irei apenas retratar alguns componentes óticos nos quais trabalhei durante os meus testes práticos, devido a fazerem parte da constituição dos vários PIC's. Esses componentes serão os fotodetetores, o Laser de Feedback Distribuído (DFB), o Amplificador Ótico Semicondutor (SOA), o Interferómetro Multimodo (MMI) e o Modulador de Eletro-Absorção (EAM).

### 2.3.1 Fotodetetores

Os fotodetetores são dispositivos usados para a detecção de luz. De uma maneira mais específica, os fotodetetores são geralmente compreendidos como detetores de fótons, que utilizam a foto-excitação de transportadores elétricos. Geram um sinal de saída eletrónico, como uma tensão ou corrente proporcional à potência ótica incidente, pertencendo assim à área da optoelectrónica [14]. A Figura 2.7 apresenta o processo de fotodeteção.

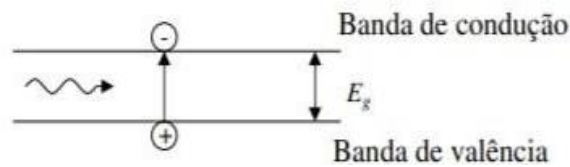


Figura 2.7 - Processo de fotodeteção[15]

No processo de fotodeteção, os fótons absorvidos pelo material semicondutor fazem com que os elétrons da banda de valência transitem para a banda de condução. Para que isto aconteça, o comprimento de onda tem de ser inferior a um valor crítico [15].

Temos 2 tipos de fotodetetores, os PIN e os de avalanche ou (APD). A Figura 2.8 e 2.9 apresentam a estrutura de cada um:

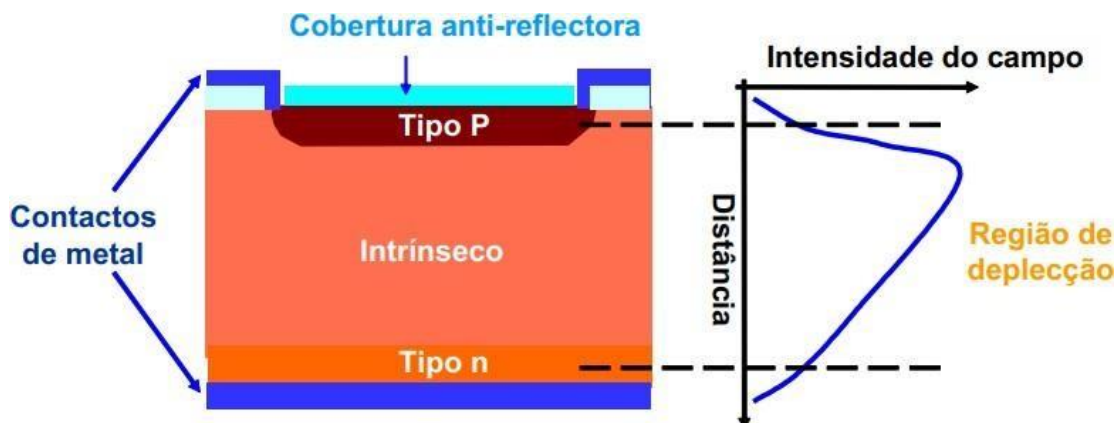


Figura 2.8 - Fotodetector do tipo PIN[16]



Estes fotodetectors PIN são baseados numa junção  $pn$  com material intrínseco colocado entre os dois tipos de semiconductor. Esta junção é inversamente polarizada. Devido à maior espessura da região de depleção, a estrutura PIN apresenta uma menor capacidade de junção, logo uma maior largura de banda. O aumento desta região conduz à absorção de uma grande parte dos fótons incidentes, o que resulta de um aumento dos pares elétron-lacuna gerados dentro da região de depleção, uma boa condição para a resposta do fotodetector. Existe igualmente um aumento da eficiência quântica.

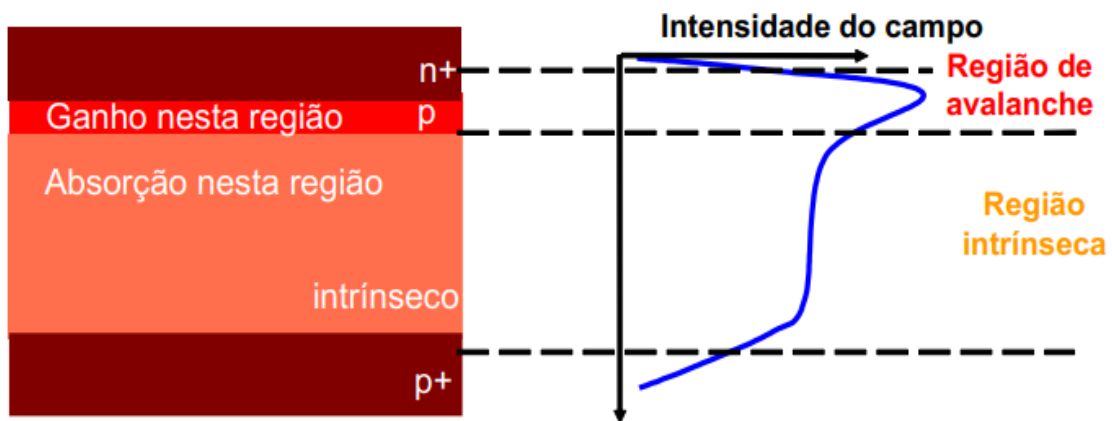


Figura 2.9 - Fotodetector do tipo APD (avalanche)[16]

O fotodetector APD apresenta um campo elétrico mais elevado na região de avalanche. Ao acelerar, o portador irá conduzir a uma maior energia cinética, o que resultará em ganho de corrente, já que os elétrons livres podem eles próprios colidir e libertar mais e a alta energia de colisão libertará os elétrons ligados, ou seja, irão ser gerados portadores secundários por ionização de impacto [16].

### 2.3.2 Laser de Feedback Distribuído

O Laser Semicondutor de Feedback Distribuído (DFB) foi implementado por volta de 1980 e era usado principalmente para sistemas de multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM). É constituído por uma fina camada ativa entre camadas de revestimento tipo p e tipo n.

A ideia básica do Laser de Feedback Distribuído (DFB) encontra-se ilustrada na Figura 2.10, que mostra o tipo de feedback Fabry-Perot usual (reflexão no fim do laser clivado) e *grating feedback* (retorno da radiação pela dispersão das saliências da grade).

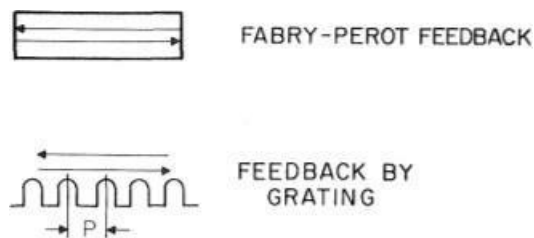


Figura 2.10 - Comparação entre o feedback Fabry-Perot e grating feedback [18]

Este processo de dispersão reversa é distribuído ao longo da cavidade. A relação entre o período de grade (P) e o comprimento de onda em que a luz é refletida na grade é dada pela expressão:

$$P = m\lambda/(2n_{eff}) \quad (1)$$

Onde  $n_{eff}$  é o índice efetivo do guia de onda,  $\lambda$  é o comprimento de onda do vácuo e  $m$  é um número inteiro que denota a ordem da grade. O acoplamento mais forte entre as ondas para a frente e para trás é alcançado para a difração de primeira ordem ( $m=1$ ) [18]. Podemos observar a estrutura em si do DFB na imagem da Figura 2.11.

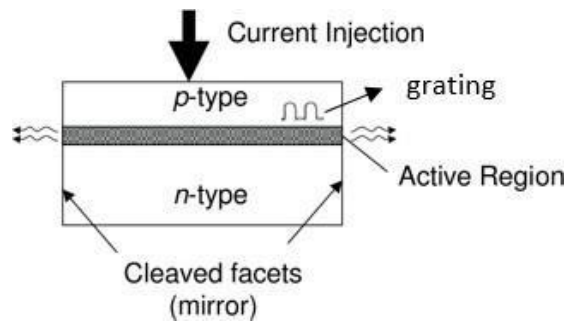


Figura 2.11 - Estrutura do DFB com a cavidade de Fabry-Perot[19]

O díodo laser Fabry-Perot é um oscilador no qual dois espelhos são separados por um amplificador com uma população invertida, formando uma cavidade Fabry-Perot (Figura 2.11) [19]. Estes díodos a laser são o tipo mais comum e os mais económicos, mas geralmente são mais lentos e mais ruidosos que os Lasers de Feedback Distribuído (DFB) [20]. Para os testes práticos, foi usado um DFB laser com as propriedades óticas da Tabela 2.1.

Propriedades Óticas	
Faixa de sintonia do comprimento de onda	-3nm
Precisão do comprimento de onda	+/- 5m
Supressão de modo lateral	>50 dB
Potência de saída de um lado	3mW @ 150mA
Corrente de treshold	-10mA

Tabela 2.1 - Especificações relativamente ao DFB

Após adquirir as especificações do DFB (Tabela 2.1), verificamos que a potência ótica se encontra linearizada e os valores práticos estarão na forma logarítmica. Para converter a potência ótica de (dBm) para (W) vamos necessitar da expressão:

$$P \text{ (dBm)} = 10\log (P/ (1\text{mW})) \quad (2)$$

A parte experimental deste trabalho vai incidir maioritariamente na obtenção da potência ótica à saída, vinda do Laser de Feedback Distribuído (DFB), variando a corrente e a temperatura nos diferentes PIC's. Ao observarmos a Figura 2.12, conseguimos perceber que ocorreu uma emissão do laser de feedback distribuído a uma dada corrente e para diferentes temperaturas.[21]

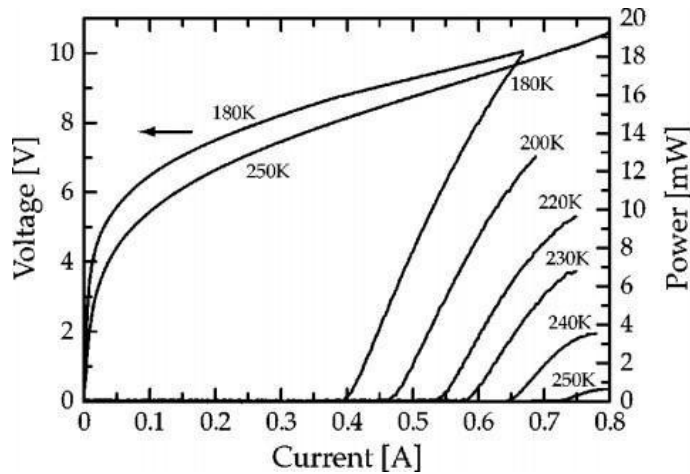


Figura 2.12 - Variação da Potência Ótica (DFB laser) com a temperatura e corrente [21]

Teoricamente, e observando a imagem, verificamos a expressão de potência ótica expressa em watt:

$$P = \eta \frac{I}{q} h\nu = \eta \frac{hcI}{q\lambda} \quad (3)$$

Onde,  $\eta(I/q)$  corresponde à eficiência do diodo-laser,  $(h)$  é a constante de Plank e  $(\nu)$  é a velocidade de luz no vácuo sendo igual a  $c/\lambda$ . [22] Pela expressão (3), se aumentarmos a corrente, a potência ótica também tende a aumentar consoante a temperatura. Outro aspeto que também se pode verificar é que a potência ótica diminui com o aumento da temperatura (Figura 2.12). Através da Figura 2.13, podemos ver a variação do comprimento de onda para várias temperaturas e concluímos que o comprimento de onda aumenta não apenas com o aumento da temperatura como também com o da corrente (expressão (3)).

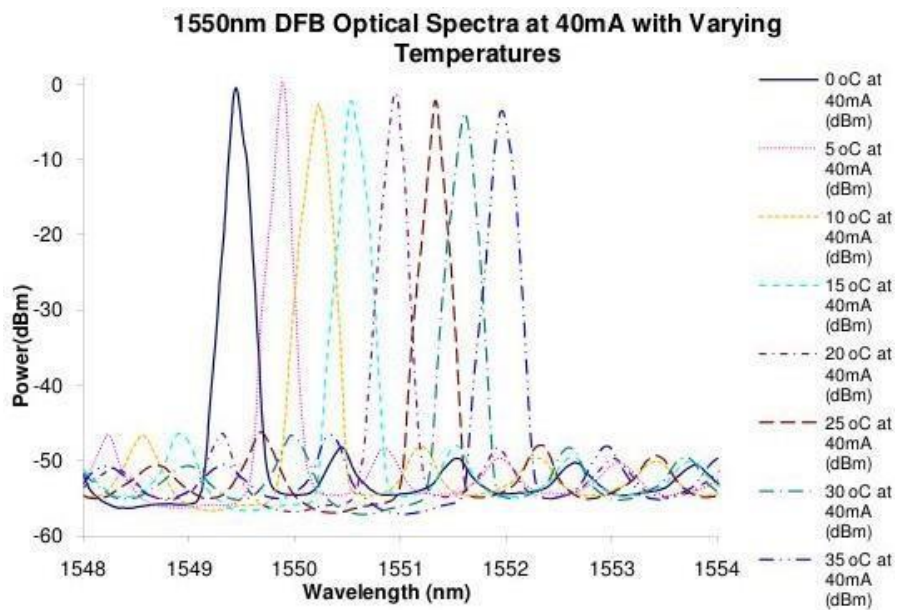


Figura 2.13 – Exemplo de variação do comprimento de onda com a potência ótica e temperatura[23]

A Figura 2.13 é uma experiência semelhante a uma outra realizada na vertente prática deste documento. O objetivo desta experiência é observar a variação da temperatura de acordo com o comprimento de onda.[23] Este teste, como podemos observar no título da Figura 2.13, foi realizado com laser de feedback distribuído a 1550nm com uma corrente fixa de 40mA.

### 2.3.3 Amplificadores de Semicondutor

Os amplificadores óticos podem ser divididos em duas ordens: Amplificadores de Fibra Ótica (OFA) e os Amplificadores Óticos de Semicondutores (SOA). O primeiro tendia para aplicações de sistemas convencionais, como a amplificação em linha usada para compensar as perdas de fibra. No entanto, com os avanços nas técnicas de fabricação de semicondutores óticos e no design dos dispositivos, o SOA mostra uma grande promessa de uso na evolução das redes de comunicação ótica.[24] A Figura 2.14 apresenta a forma estrutural do SOA.

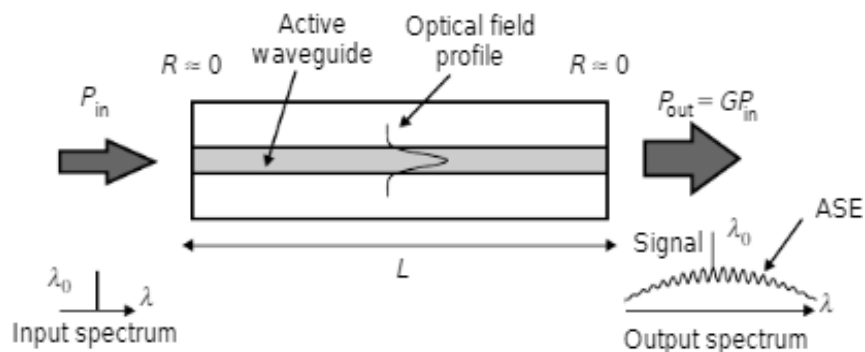


Figura 2.14 - Estrutura básica do SOA[25]

O SOA é baseado numa tecnologia semelhante a um díodo laser. O ganho ótico é alcançado bombeando eletricamente um material semicondutor adequado, de modo a que a inversão de população ocorra entre as bandas de condução e as bandas de valência do material. Um fóton de entrada pode ser amplificado quando a emissão estimulada resultante exceder as perdas devido à absorção motivada pelas privações internas de material. Nesta perspetiva, os SOAs podem ser projetados para operar nas janelas de comunicação ótica de 1300nm ou 1550nm.[25]

### 2.3.4 Interferómetro Multimodo

Os dispositivos MMI, como sugere o próprio nome, são baseados na interferometria multimodo nos guias de ondas multimodais [26]. A interferometria é acompanhada pelos efeitos de autoimagem do campo de entrada, que faz excitar o guia de ondas multimodais. Como resultado desses efeitos, o campo de entrada, que apresenta uma maior frequência de um guia de ondas de modo único ou de vários guias de ondas, é produzido como imagens diretas, múltiplas e espelhadas. Esse fenómeno integra um suporte para a operação de estruturas de interferometria multimodo (MMI) [27].

Estes dispositivos tornaram-se populares e de grande interesse nos últimos anos, devido às suas propriedades, entre elas, tamanho compacto, fácil produção, relações de separação de potência tolerantes à fabricação, insensibilidade de comprimento de onda e polarização e baixa perda e robustez [26].

A Figura 2.15 mostra uma estrutura 1x2 MMI. O guia de ondas de modo único de entrada é limitado ao centro do guia de ondas multimodo. De duas saídas simples, guias de onda são colocados nas posições simétricas [28].

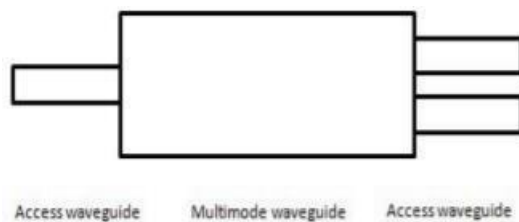


Figura 2.15 - Esquemático de uma estrutura 1x2 MMI [28]

### 2.3.5 Modulador de Eletro-absorção

Os Moduladores de Eletro-Absorção (EAMs) estão atualmente a ser investigados para uso em links óticos analógicos de baixa perda. Uma vez que é necessária uma grande potência ótica para modular um link externo, para obter alto ganho de link é necessário investigar os efeitos de alta potência ótica nos EAMs[29].

Um EAM é um dispositivo semiconductor cujo objetivo é controlar a intensidade de um feixe de laser através de uma tensão elétrica. A sua maneira de atuar é fundamentada no efeito Franz-Keldysh , ou seja, uma alteração no espectro de absorção originada por um campo elétrico aplicado, que altera a energia da banda gap (energia de fótons de uma borda de absorção), mas que normalmente não envolve a excitação de transportadores pelo campo elétrico [30].

As vantagens deste modulador residem no facto de apresentarem uma tensão de polarização a zero, uma baixa tensão de condução, alta velocidade, menor dependência de polarização e integração com o laser DFB, o que possibilita que uma única fonte de energia ótica seja usada para grandes números de informações que transportam feixes[31]. A Figura 2.16 mostra um modelo muito simples do EAM, considerando apenas duas fontes de perda, as de acoplamento independentes de tensão (TI e TO) e a de absorção dependente da tensão[32].

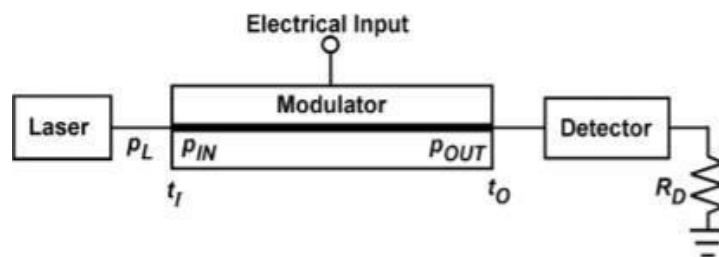


Figura 2.16 - Esquemático simples de um modulador de eletro-absorção [32]

Na Figura 2.16, são ignoradas as perdas por espalhamento distribuídas e a absorção, independentemente da tensão. A potência ótica no guia de ondas da entrada do modulador encontra-se onde está a potência do laser de entrada (PL)[32].



### 3. Procedimento experimental e Automatização dos Test Benches

#### 3.1 Descrição do Equipamento

Nesta primeira parte, vou começar por apresentar o *setup* de teste em relação aos testes óticos que foram feitos tanto para o Design 1 como para o Design 2. Na Figura 3.1, podemos observar todo o material que foi usado para os mesmos.



Figura 3.1 - Setup para testes experimentais

Na Tabela 3.1, temos o equipamento listado, fazendo corresponder o número que se encontra na Figura 3.1 ao aparelho.

Número	Aparelho	Modelo
1	Analisador do espectro ótico (OSA)	FTB-400
2	Controlador de Temperatura (TC)	TED200C
3	Controlador Laser Díodo (LDC)	LDC210C
4	Medidor de Potência ótica (Powermeter)	PM100D
5	DC probes	PVX400
6	Estrutura com posicionadores de 3 eixos	-----
7	Microscópio	-----

*Tabela 3.1 - Equipamento usado para testes óticos*

Acerca do setup apresentado, podemos verificar que foi utilizado o Analisador de Espectro Ótico (OSA), responsável por medir a potência ótica do sinal de saída do PIC e expor o seu espectro ótico. Este vai ser também capaz de obter os comprimentos de onda relativamente à potência medida, podendo haver oscilações nos valores devido a fatores externos como a montagem do setup e a temperatura ambiente. Outro aparelho que é igualmente capaz de medir a potência ótica do sinal à saída da PIC é o medidor de Potência (Powermeter). Temos também o Controlador de Temperatura (TC), que vai fazer variar o valor de temperatura e o Controlador Laser Díodo (LDC), com a função de alterar o valor de corrente. As DC probes vão ser responsáveis por conduzir corrente elétrica para o Laser de Feedback Distribuído (DFB laser), para que este possa emitir o feixe de luz, sendo que a estrutura com posicionadores de 3 eixos tem como objetivo alinhar a fibra à saída ótica do PIC, a fim de que o sinal obtido seja o mais eficiente possível. Para fazermos esse alinhamento, usamos o microscópio com o propósito de, ao mexer nos posicionadores, evitar o contato entre a fibra e o PIC.

### ***3.2 Cuidados no Setup***

A realização dos testes de bancada para qualquer tipo de experiência que se vai realizar, independentemente da área em questão, deverá ser feita com os devidos preparos e respeitando ao máximo todos os cuidados a ter na utilização de cada instrumento.

No caso dos testes óticos, existem alguns pontos fundamentais para que os resultados sejam de acordo com o previsto. Enumerando assim esses pontos, temos então:

- Fixar e ajustar os instrumentos de maneira a que não haja nenhuma danificação no ato de realizar a experiência;
- Ligar e desligar adequadamente qualquer instrumento utilizado;
- Utilizar a pulseira antiestática, para que não ocorra nenhuma descarga elétrica, podendo danificar os componentes e causar resultados inesperados;
- Tapar todos os instrumentos que possam ser danificados por estarem expostos ao pó, luz solar e humidade. (Ex: PIC)

### ***3.3 Caracterização das Fibras Óticas***

A fibra ótica é um filamento feito de material transparente e flexível e que são utilizadas como meio de propagação de luz. Esta é formada por um núcleo de material dielétrico (normalmente, vidro) e por uma zona à volta similarmente feita com o mesmo material, mas com índice de refração um pouco inferior ao do núcleo. Desta forma, a fibra ótica propaga a luz por reflexões contínuas [33].

Este capítulo irá retratar alguns tipos de fibras, nas quais se trabalharam ao longo desta dissertação, sendo estas as fibras clivadas, as fibras de lente e as fibras cónicas. Também se irá retratar a maneira de alinhamento destas fibras.

### 3.3.1 Fibras Clivadas e sua Clivagem

As execuções dos testes óticos de bancada necessitam geralmente de grandes cuidados, principalmente no que concerne ao material que tende a ser usado. Um dos componentes mais importantes nestes testes é a fibra ótica, que permitirá conduzir o sinal ótico vindo do chip até um instrumento próprio para medir esse sinal, como é o caso do analisador espectral ótico ou do medidor de potência ótica. Se esta fibra não passar por processos de clivagem antes de ser feito qualquer teste, poderá haver perdas significativas que condicionem a medição da potência ótica. A Figura 3.2 ilustra todas as ferramentas necessárias para assegurar que a fibra é clivada corretamente.

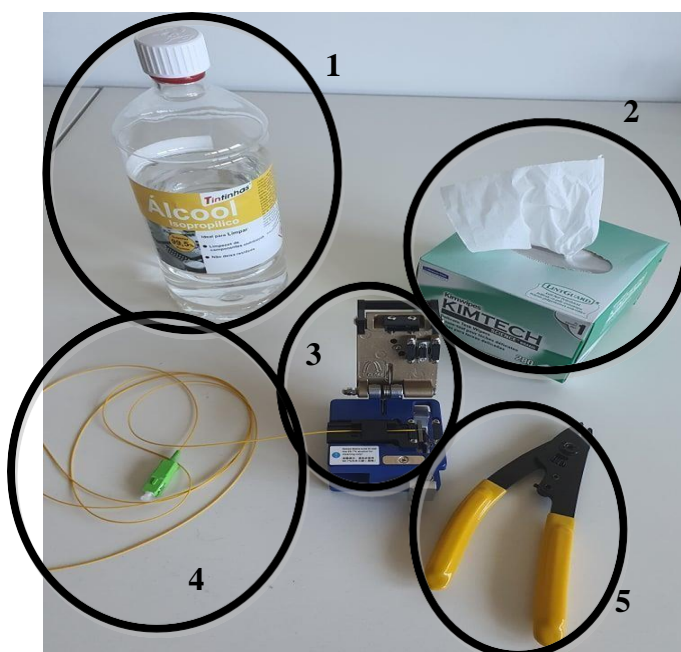


Figura 3.2 - Equipamento para clivagem da fibra

O equipamento apresentado na Figura 3.2 encontra-se identificado na Tabela 3.2, fazendo corresponder o número ao instrumento utilizado.

Número	Instrumento
1	Álcool isopropílico
2	Lenços Kimtech
3	Clivador (C-6S)
4	Fibra ótica
5	Descarnador de fibra

Tabela 3.2 - Equipamento usado para clivagem da fibra

Neste processo de clivagem da fibra ótica, precisamos de respeitar algumas regras e fazê-lo de acordo com os passos representados na Tabela 3.3:

Passos	Medida a executar
1º	Com o descarnador de fibra (5) deve remover o revestimento de plástico externo, usando a zona média, mantendo a pressão na execução para que a fibra (4) não fique assimétrica.
2º	Usando o mesmo descarnador (5), remova agora o revestimento de plástico interno da fibra (4). Neste passo, tenha em atenção em descarnar uma quantidade razoável de fibra (4), para que a clivagem seja mais fácil de fazer
3º	Neste passo, após ter descarnado a fibra (4) por completo, deite num lenço Kimtech (2) com um pouco de álcool isopropílico (1) e limpe a fibra (4), de modo a remover todos os seus resíduos. Tenha cuidado na limpeza da fibra (4), com vista a não correr o risco de a quebrar, tendo em conta a sua fragilidade.
4º	Finalmente, use o clivador (3) para clivar a fibra (4), a fim de ser possível fazer os testes nas melhores condições.

Tabela 3.3 – Passos a seguir para calibrar uma fibra ótica

Após terem sido executados todos os passos da Tabela 3.3, poder-se-á proceder à realização dos testes. O *setup* onde será colocada a fibra ótica deverá estar devidamente preparado para que, ao serem feitas as medições, a fibra não se encontrar exposta a pressões ou até mesmo a contatos.

### 3.3.2 Fibras de Lente Esféricas

Para a obtenção de uma alta eficiência do acoplamento das fibras, é fundamental minimizar a distância entre a fibra e o elemento ativo, sendo de destacar que a condição acima mencionada dificulta o processo de implementação de conexões óticas integradas. Uma das soluções que pode facilitar os processos de acoplamento, ativos e passivos, é o uso de fibras de lentes esféricas, como representado na Figura 3.3 [34].

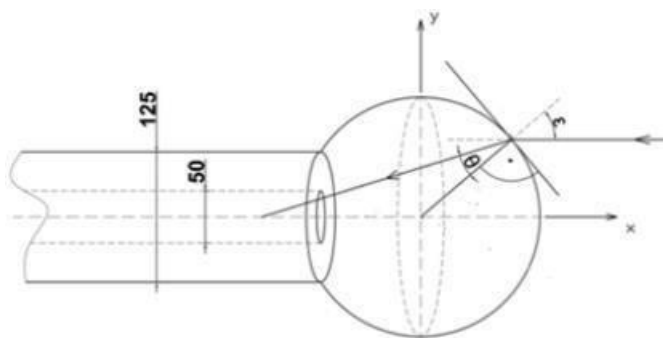


Figura 3.3 - Fibra ótica com lente esférica, onde  $\varepsilon$  - ângulo de incidência, e  $\theta$  - ângulo de refração [34]

As fibras de lente esféricas são geralmente compostas por um vidro ótico com boa transparência na região de comprimento de onda de interesse. Um material muito usado é a sílica fundida. Apresentam também diâmetros ligeiramente pequenos, de cerca de alguns milímetros e são mais fáceis de fabricar do que as lentes com os designs tradicionais [35].

Como já foi mencionado anteriormente, as fibras de lente esféricas não necessitam de serem colocadas ao lado da saída do laser. Devido ao uso das microlentes esféricas, o elemento ativo pode ser colocado a uma certa distância da fibra, enquanto que a eficiência do acoplamento irá manter-se em alto nível. A mudança do diâmetro das microlentes resulta numa modificação da sua distância focal. Esta distância entre a fibra e os elementos ativos podem ser controlados, sendo vantajosa no design de sistemas óticos integrados [34][35].

### 3.3.3 Fibras de Lente de Cone

As fibras de lente cónicas, assim como as fibras de lente esféricas, são também uma solução para facilitar o sistema de acoplamento, item já referenciado no subcapítulo (3.3.2). Estas são compostas igualmente por um vidro ótico, mas a sua forma, como o nome indica, é idêntica à de um cone. Dentro destas existem diferentes tipos de formatos, tais como:

- Fibras de Cone, que apresentam uma divergência de campo ótico de luz distante para a ponta da fibra da lente;

- Fibras de Cone com topo plano, que têm uma divergência de campo ótico distante igual para uma fibra não processada;

- Fibras de Cone longo, onde a ponta da fibra pode ser plana ou com uma microlente;

- Fibras de Cone com espaçador, que são semelhantes às fibras de cone, apenas com uma lente de maior diâmetro;

Para os dispositivos óticos, que são os que interessam para os testes realizados, podemos utilizar as fibras de cone ou as fibras de cone longo [36]. Neste caso, recorreu-se às fibras de cone de 10um de diâmetro. A imagem da Figura 3.4 apresenta diferentes tipos de fibras cónicas.

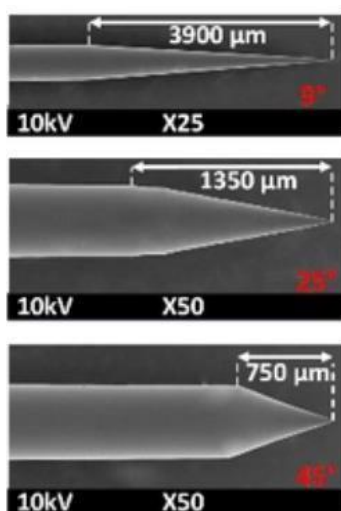


Figura 3.4 - Fibra de cone longo [3900 um]; Fibra de cone com espaçador [1350 um]; Fibra de cone [750 um]; [12]

### 3.3.4 Alinhamento da Fibra

A maioria das redes óticas possui muitos acoplamentos de fibra e as pequenas perdas em que possam existir essas junções, poderão produzir privações significativas de sinal, causadoras de problemas na transmissão de dados. A perda mínima de sinal resulta em menores requisitos de potência ótica que, por sua vez, significam menos repetidores, menos custos e uma probabilidade reduzida de haver fracasso.[37]

No alinhamento da fibra é usado um posicionador de 3 eixos, no qual é possível manobrar a fibra em 3 dimensões, no eixo do xx, yy e zz. Esta fibra será manuseada de maneira que consiga encontrar a potência máxima do sinal à saída do SSC (Spot Size Converter). Em alguns *setups* de teste, foi utilizada também uma ranhura em V (V-groove), onde a fibra pudesse ser colocada e assim facilitar os testes de alinhamento. Através da Figura 3.5, podemos observar um exemplo de um *setup* acerca do alinhamento de uma fibra.

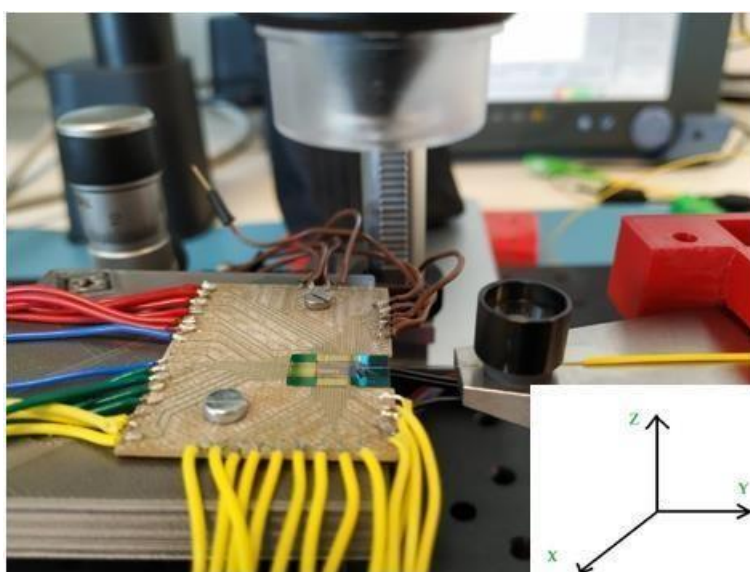


Figura 3.5 - Alinhamento de uma fibra ótica com a PIC (V-groove utilizado)

Ao analisarmos a Figura 3.5, podemos verificar que o *setup* onde foi realizado este teste apresenta as ranhuras em V (V-groove) e também é possível detetar que a fibra está colocada num posicionador de 3eixos. Foi disposto um íman em cima da fibra para que esta permanecesse o mais estável possível.



### ***3.4 Automação dos aparelhos***

Nos tempos que correm, as medições manuais estão cada vez mais em desuso, isto devido à automação dos instrumentos de bancada que garante benefícios essenciais como a economia de tempo e dinheiro. Apesar de tudo, existem medições que trazem mais vantagens em serem retiradas manualmente. Para a obtenção de testes mais complexos, como repetibilidade, erros nos dados e agregação entre vários sinais e instrumentos, a automação será a medida mais adequada, pois fornecerá dados de teste com maior qualidade e num curto espaço de tempo.

Um dos objetivos primordiais deste projeto era a automação de alguns instrumentos, nomeadamente o osciloscópio, o Controlador de Corrente (LDC), o Controlador de Temperatura (TC), o medidor de potência ótica e o Medidor do Espectro Ótico (OSA).

### 3.4.1 Osciloscópio

O osciloscópio foi um dos aparelhos no qual era importante fazer essa automação devido à necessidade de obter vários valores de tensão, comportamento e variação, para as placas de teste das PIC's. Como podemos constatar na Figura 3.6, foi criada uma aplicação na qual, sucintamente, o utilizador poderá retirar vários valores de tensão e guardá-los num documento Excel, para depois conseguir fazer um estudo desses valores.



Figura 3.6 - Aplicação para automação do osciloscópio

Recorrendo a uma observação atenta, verificamos que esta aplicação apresenta várias funcionalidades que vão ser descritas e apresentadas na Tabela 3.4. Para o seu desenvolvimento, foi indispensável recorrer ao datasheet e ao guia de programação do osciloscópio Rigol DS1104Z para a obtenção das várias funções responsáveis pela sua automação.

1	<p>RUN/STOP – Tira medidas contínuas do osciloscópio e deixa de as tirar.</p> <p>CLEAR – Limpa os dados do osciloscópio.</p> <p>Acquire graph – Faz a obtenção do gráfico.</p> <p>Channel to Acquire graph – Seleciona o canal para a obtenção do gráfico.</p> <p>Mode – Forma de como o osciloscópio tira medidas.</p> <p>Nr samples – Seleciona o número de amostras que pretende observar no osciloscópio.</p>
2	<p>Channel – Seleciona o canal para obter os valores de AVG (média de tensão),Min (mínimo de tensão),Max (máximo de tensão),Vpp (tensão pico a pico) e Freq (frequência). É necessário clicar no botão obtain para retirar estes valores.</p>
3	<p>Save_data_to_excel – Guarda os dados obtidos em (2) num Excel. FILE_NAME pode ser alterado para o nome que pretende dar ao ficheiro.</p> <p>Save_graph_to_excel – Guarda os dados obtidos pelo gráfico num Excel. FILE_NAME_2 pode ser alterado pelo utilizador para o nome que pretende dar ao ficheiro.</p> <p>Sheetname – Local onde o utilizador escreve o nome da folha de Excel onde vai ser guardado os dados.</p> <p>Cell – Seleciona a linha e a coluna onde deseja começar a escrever os dados.</p>
4	<p>Channel – Seleciona os canais que pretende visualizar no osciloscópio.</p> <p>Set voltage - Ajusta a escala da tensão que pretende visualizar no osciloscópio para cada canal.</p> <p>Probe(all channels) – Seleciona entre apresentar o sinal em AC, DC ou GND.</p> <p>Coupling(all channels) – Seleciona a escala de acordo com a ponta de prova.</p> <p>Autoscale – Ordena o osciloscópio para ajustar a escala para a onda que está a ser medida no momento.</p> <p>Time (Scale) – Ajusta a escala do tempo consoante aquilo que pretende visualizar no osciloscópio.</p> <p>Trigger – Seleciona o canal que pretende e de acordo com a escala imposta nesse canal o utilizador introduz um valor de tensão apropriado. Após essa introdução é necessário clicar no botão mk_trigger.</p> <p>Trigger(Sweep) – Seleciona a forma de funcionamento do trigger.</p>
5	<p>Zona onde o utilizador pode observar o gráfico obtido do osciloscópio.</p>

*Tabela 3.4 – Funcionalidades do osciloscópio*

De acordo com as medições pretendidas para os testes de bancada, estas funções são o essencial, não obstante inúmeras outras apresentadas por este osciloscópio.

Como referido acima, o objetivo é automatizar as medições e com estas fazer o estudo pretendido, o qual pode estar relacionado com médias, variações, variâncias, entre outras medidas. Nas Figuras 3.7 e 3.8, podemos observar os resultados que foram enviados do osciloscópio para ambos os ficheiros em formato Excel.

	A	B	C	D	E	F
1	AVG	Min	Max	Vpp	Freq	
2	1,501739	-0,02	3,02	3,04	1002,004	
3						
4						
5						
6						
7						

Figura 3.7 – Dados guardados no Excel (Média, Mínimo, Máximo, Valor pico a pico e Frequência)

	A	B	C	D	E	F
1	-0,0012	-1,54286				
2	-0,0012	-1,62857				
3	-0,0012	-1,62857				
4	-0,00119	-1,54286				
5	-0,00119	-1,54286				
6	-0,00119	-1,65				
7	-0,00119	-1,62857				

Figura 3.8 – Valores do gráfico guardado no Excel (A – tensão(eixo dos xx)) e (B – tempo(eixo dos yy))

Podemos observar que são retirados da Figura 3.7 os dados relativamente ao estudo da onda, isto é, os valores de tensão (min, média, max, vpp) e os valores de frequência. Retirando repetidamente vários valores dessa mesma zona onde foi colocada a ponta de prova, podemos fazer o estudo dos resultados obtidos e comparar. Relativamente à Figura 3.8, são retirados 1200 pontos, onde na coluna A observamos a escala do tempo (eixo dos xx) e na coluna B a escala da tensão (eixo dos yy). Com estes valores podemos traçar um gráfico que vai ser idêntico ao observado na aplicação do osciloscópio. Mais uma vez, podemos recolher vários pontos nessa zona e traçar vários gráficos, com o objetivo de verificar as diferenças detetadas relativamente às várias medições.

### 3.4.2 Medidor de Potência Ótica

O medidor de potência ótica é considerado um dos instrumentos fundamentais nos testes de bancada, precisamente por medir a potência ótica. Por outras palavras, mede a energia de um fóton na forma de corrente ou tensão de um semiconductor [38]. É de realçar que este medidor funciona com fibras óticas e não consegue ler com precisão a energia de outros tipos de cabos [39]. Uma das suas características é conseguir fazer medições simultâneas em redes PON para comprimentos de onda de 1310nm, 1490nm e 1550nm. Assim, a automação deste instrumento torna-se importante de fazer, para que se consiga com uma maior rapidez a obtenção desses valores.

O aparelho utilizado faz parte da Thorlabs, modelo PM100D, tendo, pois, uma interface capaz de obter automaticamente os valores de potência ótica. Neste caso, seria apenas necessário mudar as configurações dessa aplicação, consoante o que se pretende medir. Podemos visualizar essa interface na Figura 3.9 [40].

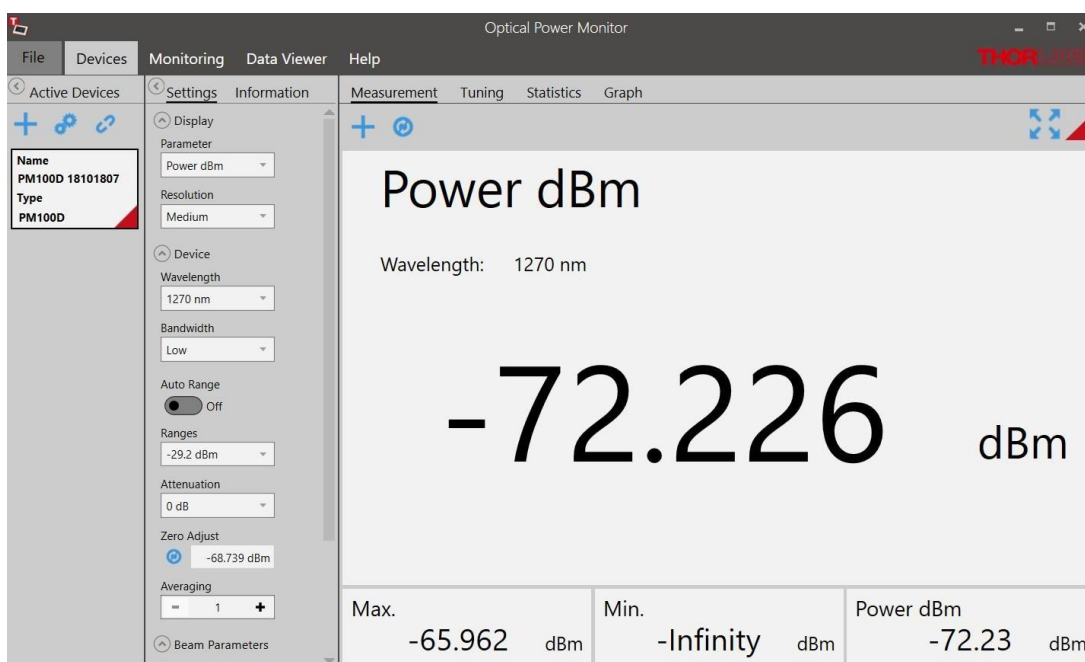


Figura 3.9 - Interface Thorlabs do Medidor de Potência Ótica (Devices)[10]

Ao observarmos a Figura 3.9, podemos entender que a interface está dividida por janelas, das quais se destacam a do Devices e do Monitoring. A janela do Devices é onde

podemos conectar o dispositivo e variar a resolução, o parâmetro de medição, o comprimento de onda, entre outros critérios menos relevantes. Verificamos em tempo real a potência em dBm a ser diretamente medida do aparelho e conseguimos observar identicamente em tempo real, o gráfico da potência ótica em função do tempo a partir da janela Graph.

Na parte do Monitoring, conseguimos variar vários parâmetros importantes à medida que observamos o gráfico na zona do Logging Chart. Esses parâmetros estão relacionados com o intervalo de segundos a fazer uma medição e com a duração do tempo em que essa medição vai ser feita. Para além disto, podemos também variar o número de amostras que pretendemos retirar nesse intervalo e guardar esses valores num ficheiro Excel. A Figura 3.10 representa a janela do Monitoring.

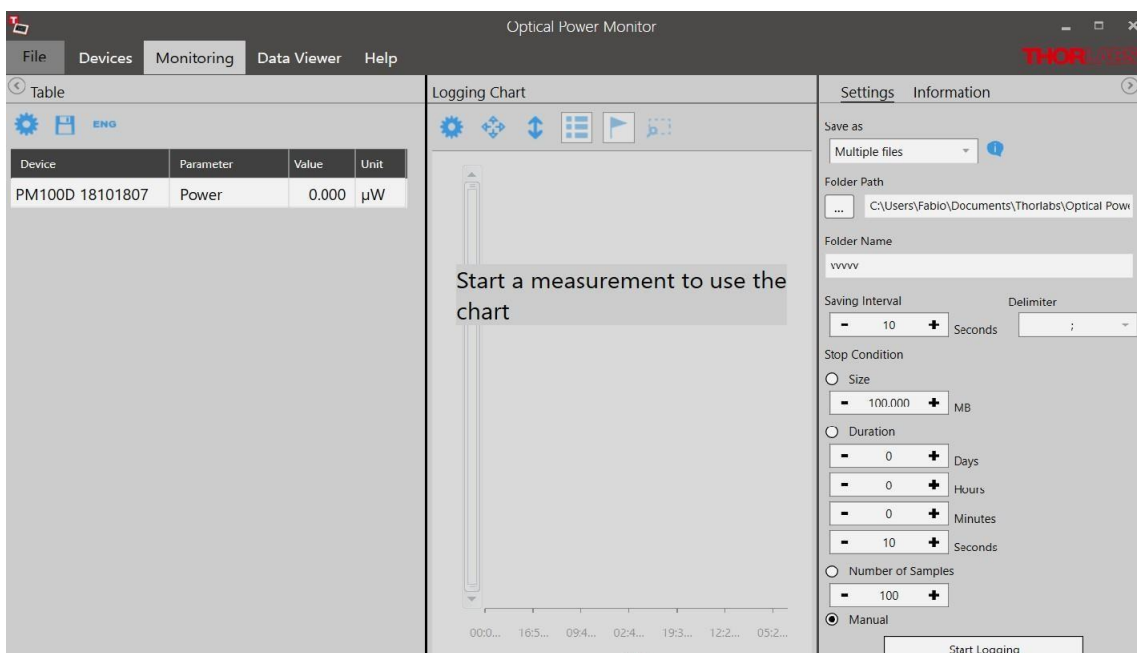


Figura 3.10 - Interface Thorlabs do Medidor de Potência Ótica (Monitoring) [10]

Com a análise da Figura 3.11, podemos verificar todos os valores de potência ótica retirados para um comprimento de onda de 1550nm.

Powermet	P0019623					
Sensor ser	18101807					
Sensor Typ	Photodiode					
Wavelengt	1550					
Date (MM,	Time of d:	PowerdBm(dBm)				
1/16/2020	19:13:22.8	-75.521				
1/16/2020	19:13:22.8	-79.859				
1/16/2020	19:13:22.8	NaN				
1/16/2020	19:13:22.9	NaN				
1/16/2020	19:13:22.9	-77.169				
1/16/2020	19:13:22.9	-79.859				
1/16/2020	19:13:22.9	NaN				
1/16/2020	19:13:22.9	NaN				
1/16/2020	19:13:22.9	NaN				
1/16/2020	19:13:22.9	-73.394				
1/16/2020	19:13:22.9	-77.169				
1/16/2020	19:13:22.9	NaN				
1/16/2020	19:13:22.9	NaN				
1/16/2020	19:13:22.9	-88.314				
1/16/2020	19:13:22.9	-88.314				
1/16/2020	19:13:22.9	-77.169				
1/16/2020	19:13:22.9	-72.626				

*Figura 3.11 - Dados recolhidos de potência ótica para o Excel*

Nesta situação, os dados foram retirados seguidamente para um intervalo de 6 horas, não tendo um número específico de amostras durante esse período. Com estes valores, conseguimos alcançar uma linha de tendência à medida que se ia procedendo ao seu cálculo. O propósito nesta automação é obter esses valores variando outros fatores, especificamente o valor de corrente e de temperatura.



### 3.4.3 Analisador de Espectro Ótico

O analisador de espectro ótico constitui outro dos aparelhos onde era importante fazer a automação. Este instrumento mede a potência ótica em vários comprimentos de onda, conseguindo avaliar o comportamento de certos dispositivos óticos, separando o espectro do sinal recebido, através da técnica de multiplexação por divisão do comprimento de onda[41].

Através da Figura 3.12, é possível controlar várias funções do analisador espectral ótico, de maneira a que sejam retirados eficientemente os dados mais importantes nas medições. Estas funções foram retiradas do manual de operações do analisador espectral ótico Q8384.

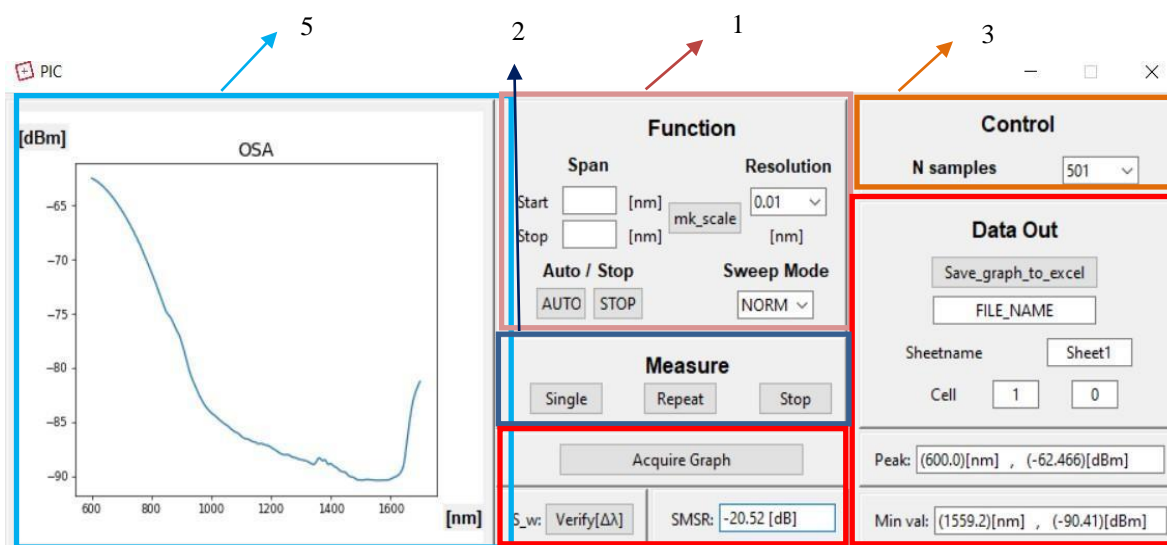


Figura 3.12 - Aplicação para automação do Analisador espectral ótico

Como podemos visualizar, esta aplicação apresenta partes distintas, com o intento do seu manuseamento ser mais fácil para o utilizador. Conseguimos analisar também ao pormenor cada instrução da interface da Figura 3.12, através da Tabela 3.5.

1	<p>Span – Zona onde o utilizador pode introduzir o intervalo de comprimento de onda que pretende.</p> <p>Resolution – Seleciona a resolução desejada.</p> <p>Sweep Mode – Seleciona o tipo de função pretendida.</p> <p>Auto/Stop – Atualiza o analisador de espectro ótico com um ajuste na escala, de acordo com o sinal medido. O sinal deixa de ser medido com o utilizador decidir parar.</p>
2	<p>Single – Faz a medição do sinal, apenas uma vez, de acordo com os parâmetros introduzidos.</p> <p>Repeat – Faz uma medição contínua do sinal.</p> <p>Stop – O sinal deixa de ser medido.</p>
3	<p>N samples – Seleciona o número de amostras que o utilizador pretende visualizar no analisador espectral.</p>
4	<p>Acquire graph – Faz a obtenção do gráfico.</p> <p>S_w – O utilizador consegue verificar a largura espectral do sinal medido.</p> <p>SMSR – Zona onde é indicada a taxa de supressão do modo lateral.</p> <p>Save_graph_to_excel – Guarda os pontos obtidos pelo gráfico num Excel, assim como alguns dados relevantes relativamente ao sinal medido. É possível também mudar o nome do ficheiro FILE_NAME.</p> <p>Sheetname – Zona onde poderá ser alterado o nome da folha.</p> <p>Cell – O utilizador poderá seleccionar a linha e a coluna onde deseja escrever os dados.</p> <p>Peak – Zona onde é fornecida as coordenadas do ponto máximo do sinal medido.</p> <p>Min val – Local onde é indicado as coordenadas do ponto mínimo do sinal medido.</p>
5	<p>Local onde o utilizador poderá observar graficamente o sinal medido.</p>

*Tabela 3.5 – Funcionalidades do analisador de espectro ótico*

Ao analisarmos a Tabela 3.5, conseguimos perceber que existem vários dados que podem ser retirados ao medirmos um sinal. Através desse sinal, podemos saber o ponto máximo (pico), o ponto mínimo, a largura espectral, a taxa de supressão do modo lateral e também  $\Delta P$  (potência) e  $\Delta \lambda$  (comprimento de onda) entre o ponto máximo e mínimo. Estes

valores são importantes para o estudo do sinal, tendo em conta as especificações do laser que o emite.

A Figura 3.13 representa um exemplo de um gráfico com um sinal medido no analisador de espectro ótico e alguns pontos importantes nele obtidos.

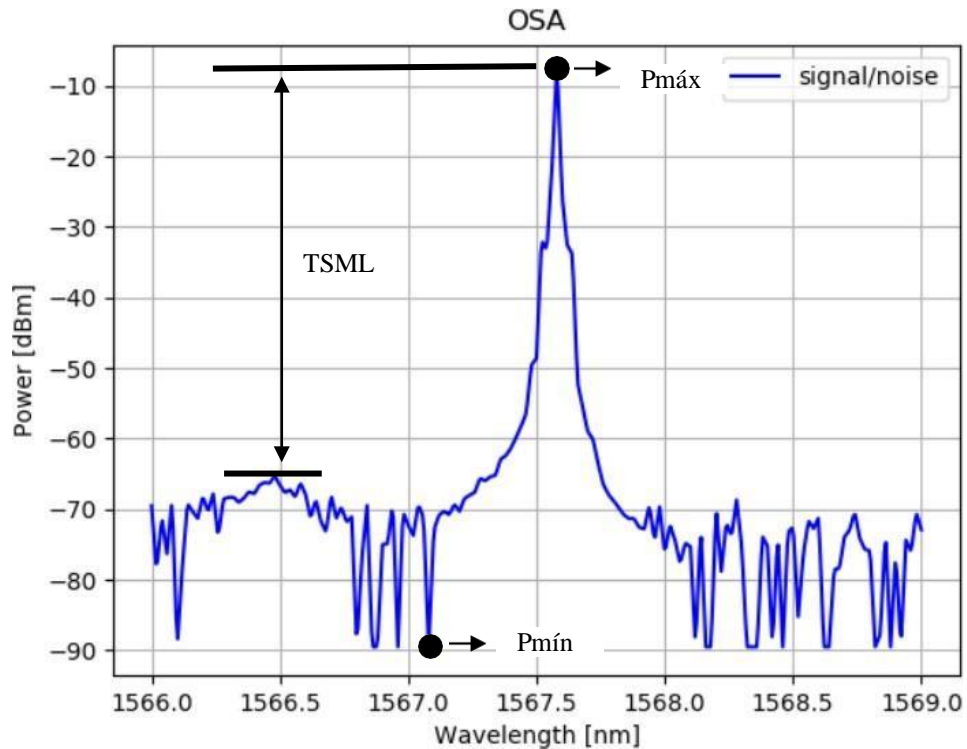


Figura 3.13 - Sinal de um espectro ótico

Um outro ponto já mencionado, mas que não consta no gráfico da Figura 3.13, devido à escala da imagem, é o caso da largura espectral, a qual, no caso do domínio ótico, se refere à largura total na metade do ponto máximo (Pmáx). Por outras palavras, é a faixa de frequência na qual a energia cai para metade (-3dB neste caso). Podemos concluir teoricamente, que:

$$\text{Largura espectral} = \Delta\lambda / \lambda \quad (4)$$

onde,  $\Delta\lambda$  é a diferença entre ambos os comprimentos de onda a -3dB do ponto máximo e o  $\lambda$  é o comprimento de onda central [42].

A Taxa de Supressão do Modo Lateral (TSML) é a razão de amplitude do modo fundamental à amplitude do próximo modo dominante no espectro [43], como podemos observar na Figura 3.13. Temos também o ponto Pmáx e Pmín. O objetivo da recolha destes dados é comparar a variação destes valores para o mesmo espectro ótico, analisando as variações e posteriormente alterar os valores de corrente e temperatura e fazer as mesmas análises, estudando assim o sinal emitido.

Através da Figura 3.14, conseguimos verificar todas as medições acima retratadas, assim como os pontos que originam graficamente o sinal, como se vê no exemplo da Figura 3.13.

X:comprimento de onda (nm) , Y: potência ótica (dBm)							
600	-62,466						
601,1	-62,477						
602,2	-62,489						
603,3	-62,503						
604,4	-62,507						
605,5	-62,52	Peak:	Min_val:	Amp_total(Peak/min)	$\lambda$ _total(Peak/min):	S_width:	SMSR
606,6	-62,535	600.0[nm]	1559.2[nm]	27.94[dBm]	959.2[nm]	0.001[nm]	-20.52 dB
607,7	-62,55	-62.466[dBm]	-90.41[dBm]				
608,8	-62,565						
609,9	-62,581						
611	-62,626						

Figura 3.14 - Dados retirados do espectro ótico para o Excel

## 4. Testes Experimentais no PIC

### 4.1 Caracterização dos Designs

Neste ponto irão ser retratados todos os testes experimentais realizados, desde o método de execução até ao estudo detalhado de cada um. As experiências realizadas foram feitas para 3 Designs diferentes. No Design 1, realizaram-se os testes relativamente à Arquitetura 4, para o Design 2 foram feitos testes em relação à Arquitetura 1 e Arquitetura 2.1 e 2.2 e para o Design 3 os testes relativos à Arquitetura 1.

#### 4.1.1 Design 1 – Arquitetura 4

Nesta arquitetura vão ser colocados as DC probes, que vão ligar ao DFB4, fazendo com que este emita luz e envie o sinal para a saída para depois ser obtida a sua potência ótica com medidor de potência ótica. Esta potência vai ser adquirida no SSC4 (spotsizer converter 4) e, portanto, a fibra teve de ser alinhada no sentido desse SSC. O modulador de Eletro-Absorção (EA modulator) não vai ser usado neste teste ficando assim desligado. A arquitetura 4 encontra-se apresentada na Figura 4.1.

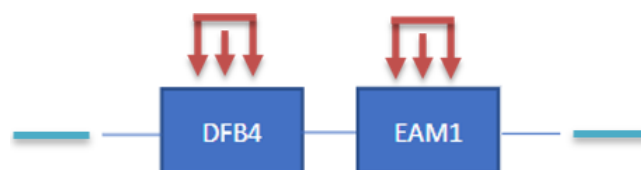


Figura 4.1 - Diagrama de blocos do Design 1 - Arquitetura 4

O objetivo deste teste da arquitetura 4 é fazer testes de alinhamento da fibra através da estrutura com posicionadores de 3 eixos, variando os posicionadores (X, Y, Z), um de cada vez, de modo a obter potência do sinal ótico à saída e perceber as variações que ocorreram. Estas experiências foram feitas com o Controlador de Temperatura (TC) regulado a 20°C e com o Controlador Laser Díodo (LDC) a 80mA. As Figuras 4.2,4.3 e 4.4 mostram o resultado desses testes.

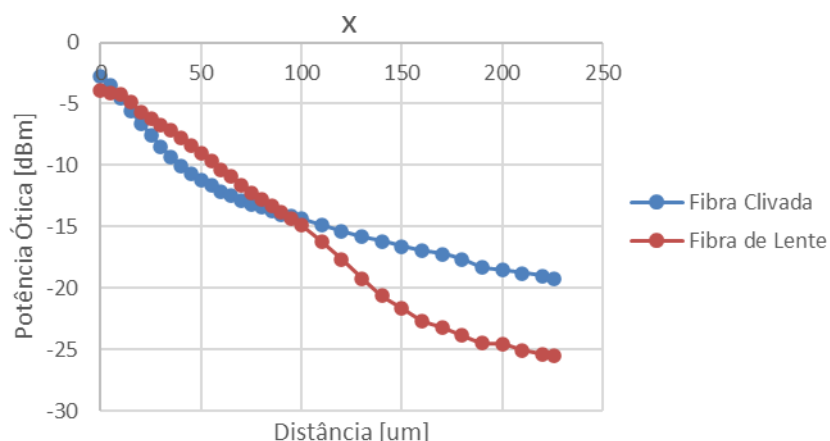


Figura 4.2 - Potência ótica à saída variando o eixo dos xx

Ao observar a Figura 4.2, podemos verificar que foram realizados 2 testes para diferentes fibras, as fibras clivadas e as fibras de lente. Relativamente ao gráfico, é possível observar que a potência máxima ocorre na posição inicial em que  $x=0$ , como seria de esperar, sendo esses valores:  $P_{\text{máx}}(\text{Cf})=-2,74$  dBm e  $P_{\text{máx}}(\text{Lf})=-3,86$  dBm. Notamos também uma diminuição da potência do sinal ótico à saída, à medida que se aumenta a distância do eixo dos xx, apesar de que para as fibras de lente a Potência mínima ocorre para -17 dBm e para as fibras de lente ocorre a -25 dBm. Concluimos que para a (FC) a potência até cerca dos 100um tem uma queda bastante mais acentuada em relação à (FL), mas depois vai estabilizando enquanto a FL vai perdendo mais potência até normalizar.

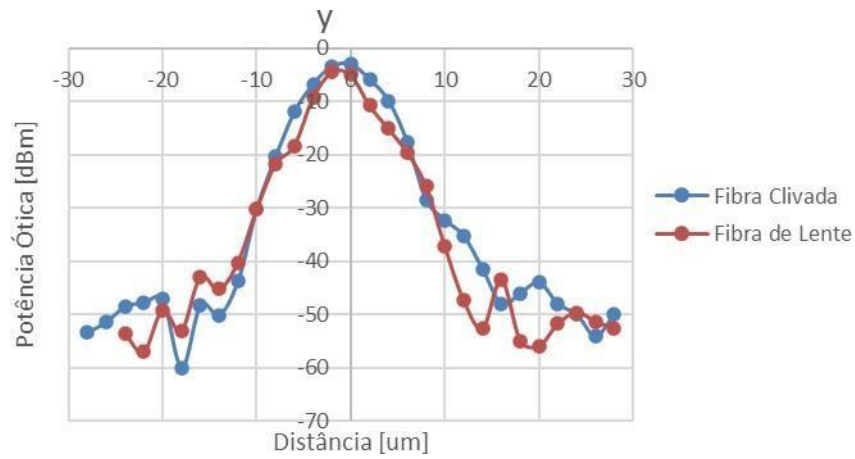


Figura 4.3 - Potência ótica à saída variando o eixo dos yy

No gráfico da Figura 4.3, podemos retirar que  $y=0$ , a  $P_{\text{máx}}(Cf)=-3,05\text{dBm}$  e  $P_{\text{máx}}(Lf)=-4,98\text{dBm}$ . Verificamos que a potência do sinal ótico à saída vai ter uma queda acentuada quando afastamos a fibra do eixo dos yy. A tendência seria que para  $y>0$  e  $y<0$  o gráfico teria que apresentar uma curvatura idêntica tanto para FC como para FL, o que pudemos comprovar.

Em suma, ambas as fibras apresentam uma potência idêntica quando variamos o eixo dos yy.

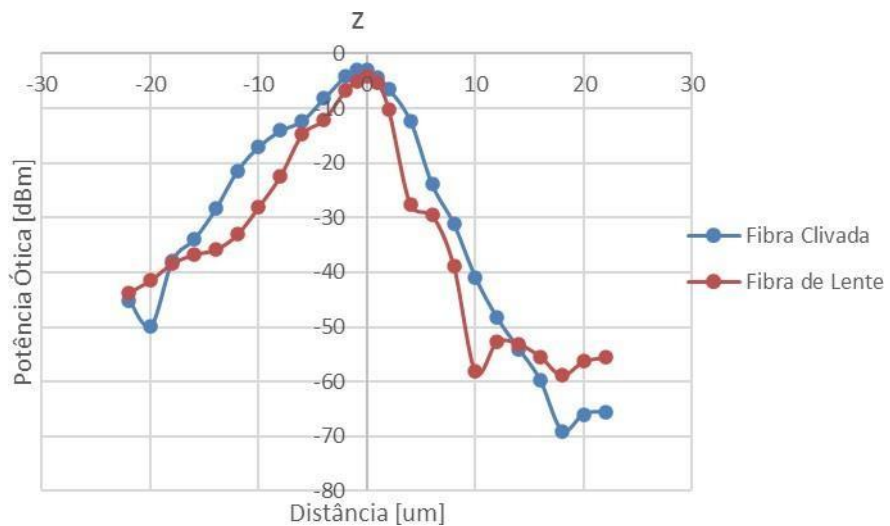


Figura 4.4 - Potência ótica à saída variando o eixo dos zz

Por fim, analisando a Figura 4.4, conseguimos verificar a potência máxima em  $z=0$ , sendo  $P_{\text{máx}}(Cf)=-3,06\text{dBm}$  e  $P_{\text{máx}}(Lf)=-4,19\text{dBm}$ . Pela análise do gráfico, percebemos

que para  $z > 0$  existe uma queda mais significativa tanto na FC como em FL em relação aos valores de  $z < 0$ . Esta diferença de valores pode ser causada pelo alinhamento da fibra ou pelo grau de incerteza da variação do posicionador nesse eixo. A fibra clivada e a fibra de lente apresentam curvaturas idênticas, não havendo pontos críticos que se possam analisar nesta imagem.

No geral, após o estudo dos 3 casos, conseguimos averiguar que os resultados estão dentro do esperado, em relação aos valores de potência ótica à saída, sendo que a fibra clivada apresentou os melhores valores de  $P_{máx}$ .

#### 4.1.2 Design 2 – Arquitetura 1

Esta arquitetura é muito semelhante à Arquitetura 4 do Design 1 (Figura 4.1), ou seja, as DC probes vão ser ligadas na mesma ao DFB laser, para que este envie luz para a saída, e depois seja obtida a sua potência ótica com o medidor de potência ótica. A diferença é que o DFB laser não apresenta nenhuma guia de onda que envie o sinal para um SSC4 e, por isso, a fibra vai estar alinhada na direção onde se encontra o DFB laser. Assim como no teste anterior, também neste não vai ser usado o modulador de Eletro-Absorção (EAM). A arquitetura 1 é visível na Figura 4.5.

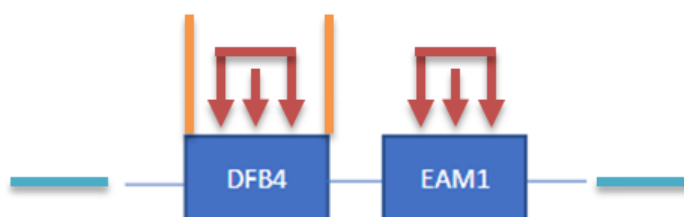


Figura 4.5 – Diagrama de blocos do Design 2 - Arquitetura 1

Nesta arquitetura vão ser efetuados, objetivamente, 3 tipos de testes, que podem ser observados na Figura 4.6, 4.7 e 4.8. O primeiro vai ser parecido com o da arquitetura anterior, ou seja também se irá efetuar o alinhamento da fibra variando os posicionadores



(X,Y,Z), um de cada vez, de modo a obter a potência do sinal ótico à saída e compreender graficamente as suas variações. Os testes vão ser feitos em 3 fibras diferentes, as Fibras de Lente (*diâmetro=150um*) (FL), as Fibras de Lente (*diâmetro=100um*) (FL) e as Fibras Cónicas (FCo). Nestas experiências, o Controlador de Temperatura (TC) ficou ajustado a 20°C e o Controlador Laser Díodo (LDC) a 100mA.

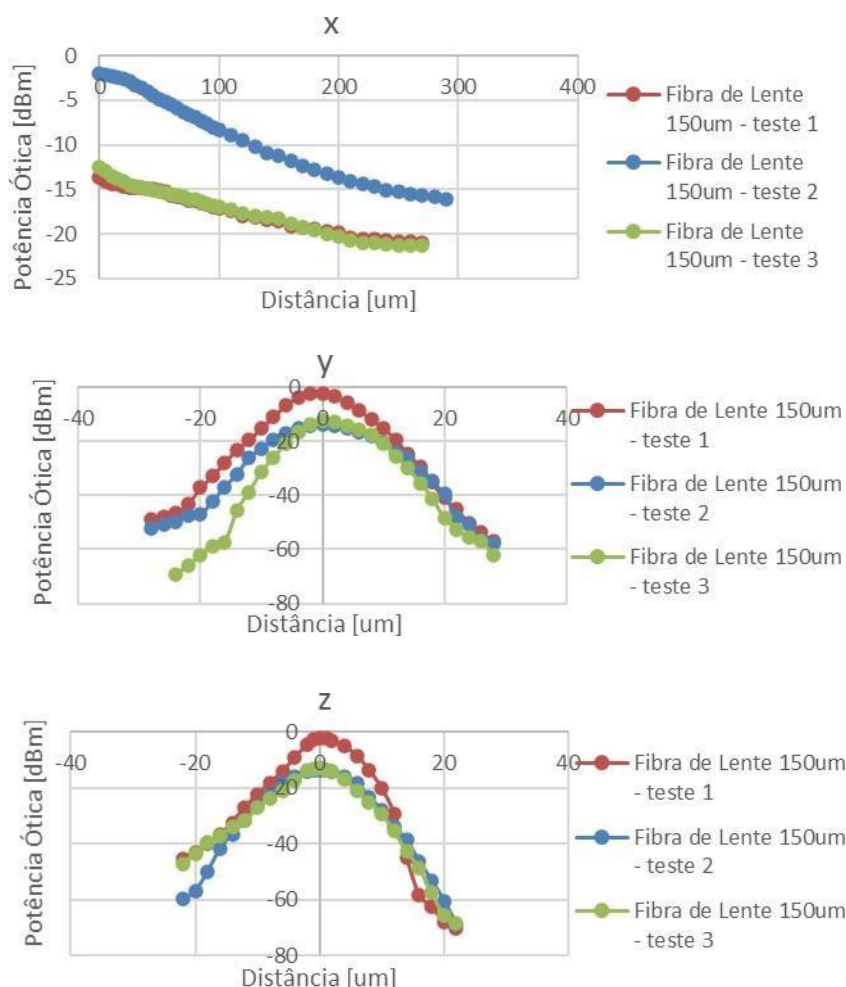


Figura 4.6 - Potência ótica à saída variando o eixo dos xx,yy,zz para uma fibra de lente (150um)

Ao analisar a Figura 4.6, podemos constatar que foram efetuados para os posicionadores (X, Y, Z) 3 testes para uma FL de 150um. Podemos comparar ambas as potências do sinal ótico à saída de todos os posicionadores (X, Y, Z) do teste 1 com os testes 2 e 3 e verificámos uma diferença significativa de cerca de 10dBm. Esta situação acontece, na medida em que o *setup* montado para o primeiro teste era diferente do

segundo e terceiro. Contudo, verificamos que ambas as curvas dos 3 testes são idênticas, comprovando assim que as fibras se encontravam todas em boas condições. Os valores de potência ótica máxima encontram-se na Tabela 4.1:

	X	Y	Z
Fibra de lente teste 1 -150um	-2,08 dBm	-2,2 dBm	-2,17 dBm
Fibra de lente teste 2 -150um	-13,69 dBm	-13,57 dBm	-13,77 dBm
Fibra de lente teste 3 -150um	-12,48 dBm	-12,43 dBm	-12,69 dBm

Tabela 4.1 - Potência ótica máxima nos posicionadores (x,y,z) para uma fibra de lente (150um)

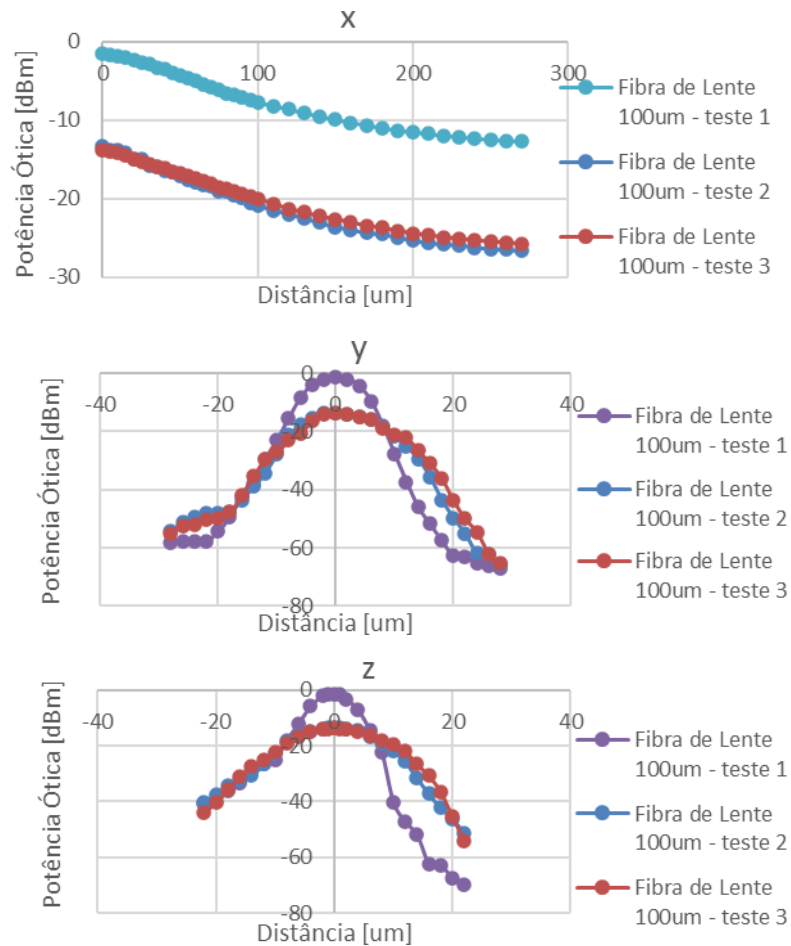


Figura 4.7 - Potência ótica à saída variando o eixo dos xx,yy,zz para uma fibra de lente (100um)

De acordo com a Figura 4.7, podemos verificar os testes efetuados com uma FL de 100um para os posicionadores (X, Y, Z). É observado, como no caso anterior, que este

teste foi efetuado nas mesmas condições, tendo uma diferença de potência ótica de cerca de 12dBm entre o teste 1 e o teste 2 e 3. No posicionador x, verificamos que as curvas dos 3 testes são idênticas, o mesmo não se verificando para o posicionador y e z. Verificamos que em ambos os casos a curva do teste 1 tem um declive de decaimento maior, quando afastamos os posicionadores, em relação aos testes 2 e 3. Na Tabela 4.2, foram retirados os valores de potência ótica máxima.

	X	Y	Z
Fibras de lente teste 1 -100um	-1,52 dBm	-1,32 dBm	-1,29 dBm
Fibras de lente teste 2 -100um	-13,41 dBm	-13,46 dBm	-13,48 dBm
Fibras de lente teste 3 -100um	-13,81 dBm	-13,85 dBm	-13,51 dBm

Tabela 4.2 - Potência ótica máxima nos posicionadores (x,y,z) para uma fibra de lente (100um)

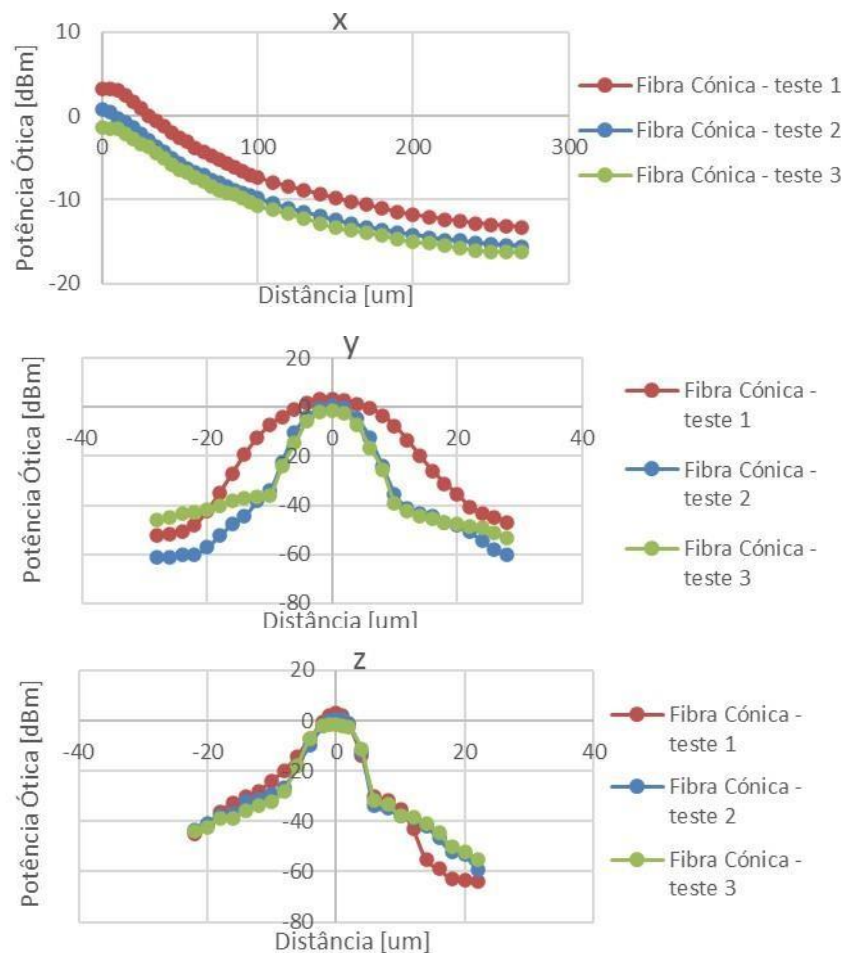


Figura 4.8 - Potência ótica à saída variando o eixo dos xx,yy,zz para uma fibra cônica

A partir da Figura 4.8, conseguimos observar todas as experiências executadas para os posicionadores (X, Y, Z) com uma FCo. Este teste foi realizado no mesmo *setup* constatando-se uma grande semelhança na curvatura em todos os eixos para os 3 testes. Verificamos que o teste 1 apresenta valores de potência ótica mais elevados comparativamente com o teste 2 e 3 e, ao contrário do que acontecia na FL de 150um, a curvatura no eixo dos yy do teste 2 e 3 tende a ter um declive maior que no teste 1, perdendo este, em relação ao 2 e ao 3, menos potência quando afastado desse eixo. A Tabela 4.3 apresenta os valores de potência ótica máxima.

	X	Y	Z
Fibra cónica teste 1	3,27 dBm	3,29 dBm	3,25 dBm
Fibra cónica teste 2	0,73 dBm	0,79 dBm	0,72 dBm
Fibra cónica teste 3	-1,35 dBm	-1,28 dBm	-1,33 dBm

Tabela 4.3 - Potência ótica máxima nos posicionadores (x,y,z) para uma fibra cónica

Sintetizando, analisando todos os testes que foram realizados para a Fibra de Lente (*diâmetro=150um*), a Fibra de Lente (*diâmetro=100um*) e a Fibra Cónica, podemos confirmar que as FCo apresentam melhores valores de potência. Isto justifica-se pelo facto de apresentarem uma geometria precisa, garantindo uma maior eficiência de desempenho e de acoplamento.

Passando agora ao segundo teste efetuado também nesta arquitetura 1, iremos usar o OSA para obter a potência ótica de saída do PIC e os respetivos comprimentos de onda (Figuras 4.9 e 4.10). Nesta experiência, iremos variar a corrente do LDC para valores de temperatura de 20°C, 25°C e 30°C. A fibra usada será uma Fibra de Lente (*diâmetro=150um*). Outro dado importante reside nas especificações do DFB laser, que vão ser importantes para comparar os valores teóricos de potência do sinal ótico à saída com os valores práticos, assim como os de comprimento de onda com diferentes temperaturas.

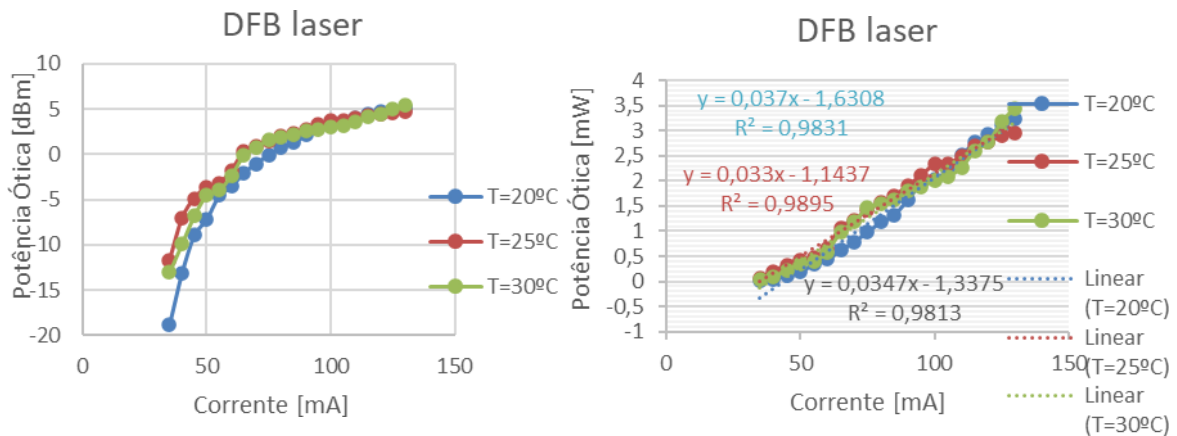


Figura 4.9 - Potência ótica logarítmica para (20,25,30) °C | Potência ótica linear para (20,25,30) °C

De acordo com a Figura 4.9, podemos verificar que a potência ótica máxima é de 3,22mW, 2,96mW, 3,45mW para (20,25,30) °C, respetivamente, sendo a corrente máxima de 130mA. O valor teórico expectável, de acordo com as especificações da Tabela 2.1 (capítulo 2.3.2 Laser de Feedback Distribuído), é de 3mW com uma corrente de 150mA, podendo ser constatado que os valores obtidos na prática são semelhantes aos teóricos. Outro facto que podemos confirmar é que as curvas para as diferentes temperaturas se encontram igualmente idênticas, apresentando ambas um declive em cerca de 0.03.

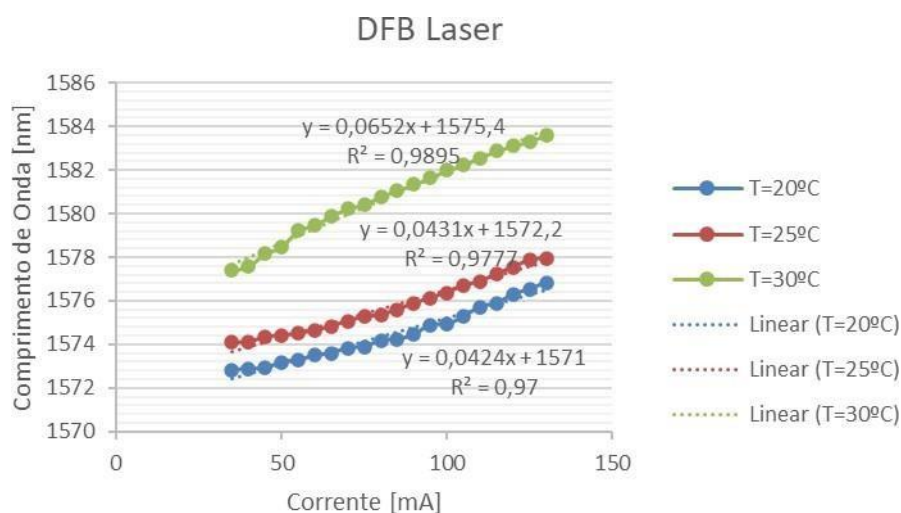


Figura 4.10 - Comprimento de onda para (20,25,30) °C

A Figura 4.10 representa a variação do comprimento para (20,25,30) °C. Para 25°C, podemos verificar que as medições do comprimento de onda variam de [1574,08 a 1577,96] nm, dependente da corrente bias. O valor teórico a 25°C é de cerca de 1570nm com uma margem de (+/-) 5nm de acordo com as especificações da Tabela 2.1 (*capítulo 2.3.2 Laser de Feedback Distribuído*). Significa isto que os valores práticos estão ligeiramente afastados do esperado, tendo em contas os valores teóricos.

Finalmente, irá ser abordado o último teste da arquitetura 1. Neste teste, voltaremos a usar o OSA para obter novamente a potência ótica de saída do PIC e os respectivos comprimentos de onda. Neste caso, iremos variar a temperatura do TC para valores de corrente de [80,85,90,95,100,105,110,115,120] mA. Usaremos uma *Lensed Fiber* (diâmetro=150um). Os gráficos da Figura 4.11 apresentam os valores práticos da potência ótica e do comprimento de onda em função da temperatura.

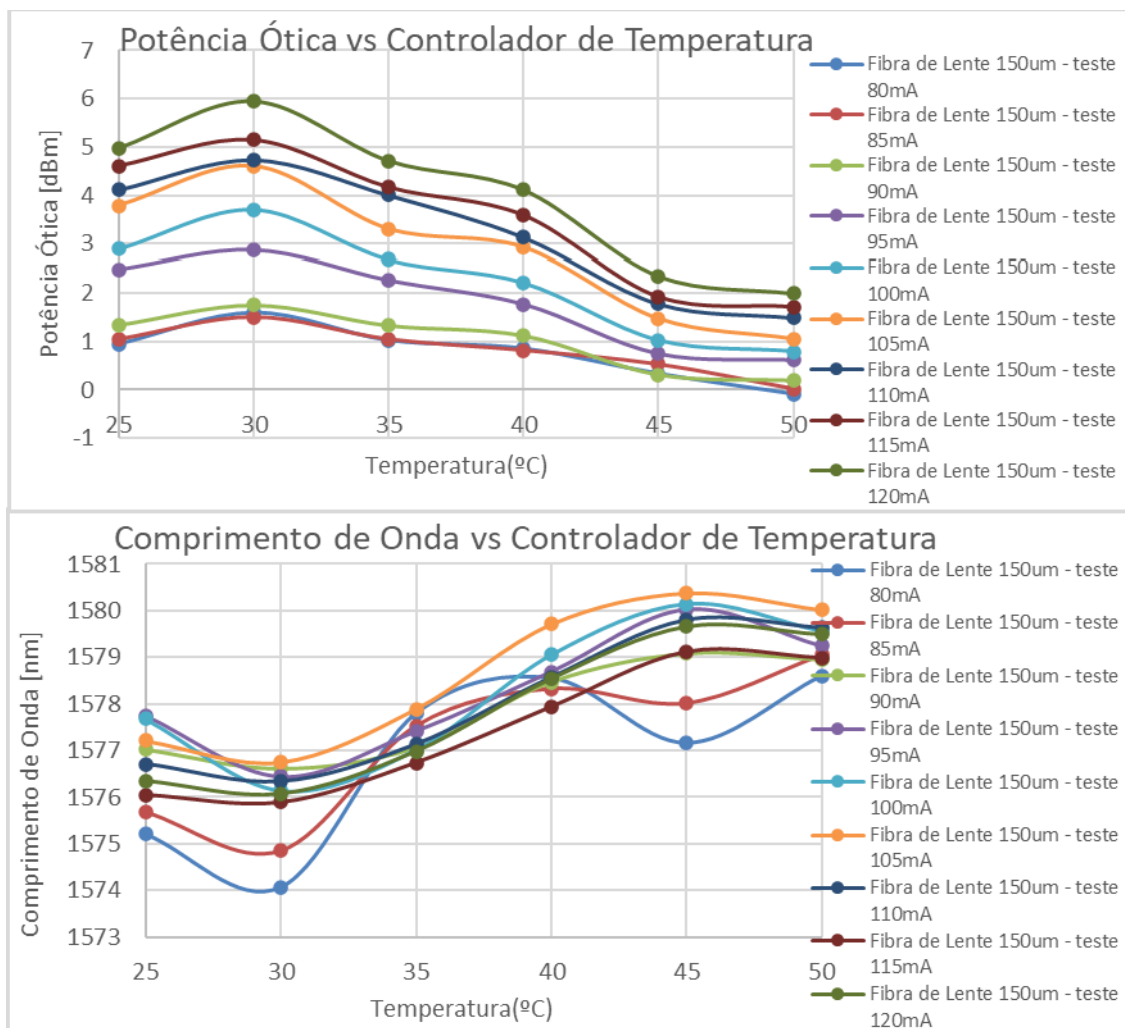


Figura 4.11 - Potência ótica logarítmica para [80...120] mA / Comprimento de onda para [90...120] mA

Ao analisar a Figura 4.11, podemos observar que no gráfico da potência ótica em função da temperatura, a potência de sinal ótico à saída atinge o máximo de T=30°C e depois vai diminuindo com o aumento de temperatura. Certifica-se que as curvas das correntes se assemelham bastante. Na Tabela 4.4 é apresentado a potência ótica máxima para a corrente máxima de (120mA) às diferentes temperaturas:

Temperatura (°C)	Potência ótica (dBm)
25	4,97
30	5,94
35	4,71
40	4,11
45	2,35
50	1,99

*Tabela 4.4 - Valores de potência ótica para [25...50] °C*

Na execução destas 3 fases, relativamente à Arquitetura 1 do Design 2, foi conseguido em laboratório melhorar significativamente os valores de potência de sinal ótico à saída de uma fase para a outra. Isto deveu-se às várias modificações que se foram fazendo para as condições de teste, como já tinha sido anteriormente referido. Esperam-se novas evoluções nos testes futuros para se conseguir obter os resultados previstos.

### 4.1.3 Design 2 – Arquitetura 2.1 e 2.2

A arquitetura 2.1 e 2.2 do design 2, são baseadas na medição de potência ótica à saída em relação ao comprimento de onda. Em ambas as arquiteturas os testes foram feitos com uma fibra de arrays, onde o objetivo era medir a potência ótica, tanto num MMI 3x3 como num MMI 4x4 para a Banda-C e Banda-L, nos spot size converters (ótico/ótico) e nos PIN (ótico/elétrico). Os testes experimentais realizaram-se a uma temperatura de 25°C. A Figura 4.12 representa os esquemas de ambas as arquiteturas.

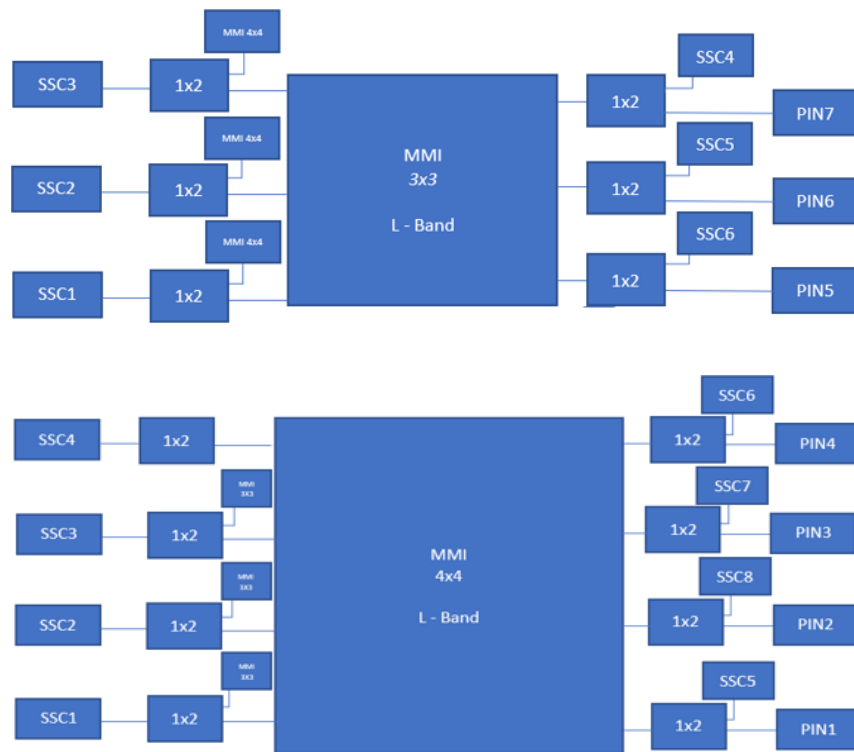


Figura 4.12 - Arquitetura 2.1 (MMI 3x3) / Arquitetura 2.2 (MMI 4x4)

Começando pela Arquitetura 2.1 para a Banda-L e no MMI 3x3, conseguimos observar através da Figura 4.13 a variação da potência ótica com o comprimento de onda do spot size converter 1 ao 6 e também do PIN5 ao PIN6. Para o PIN7 não foram retiradas medições, pois não havia passagem de luz.



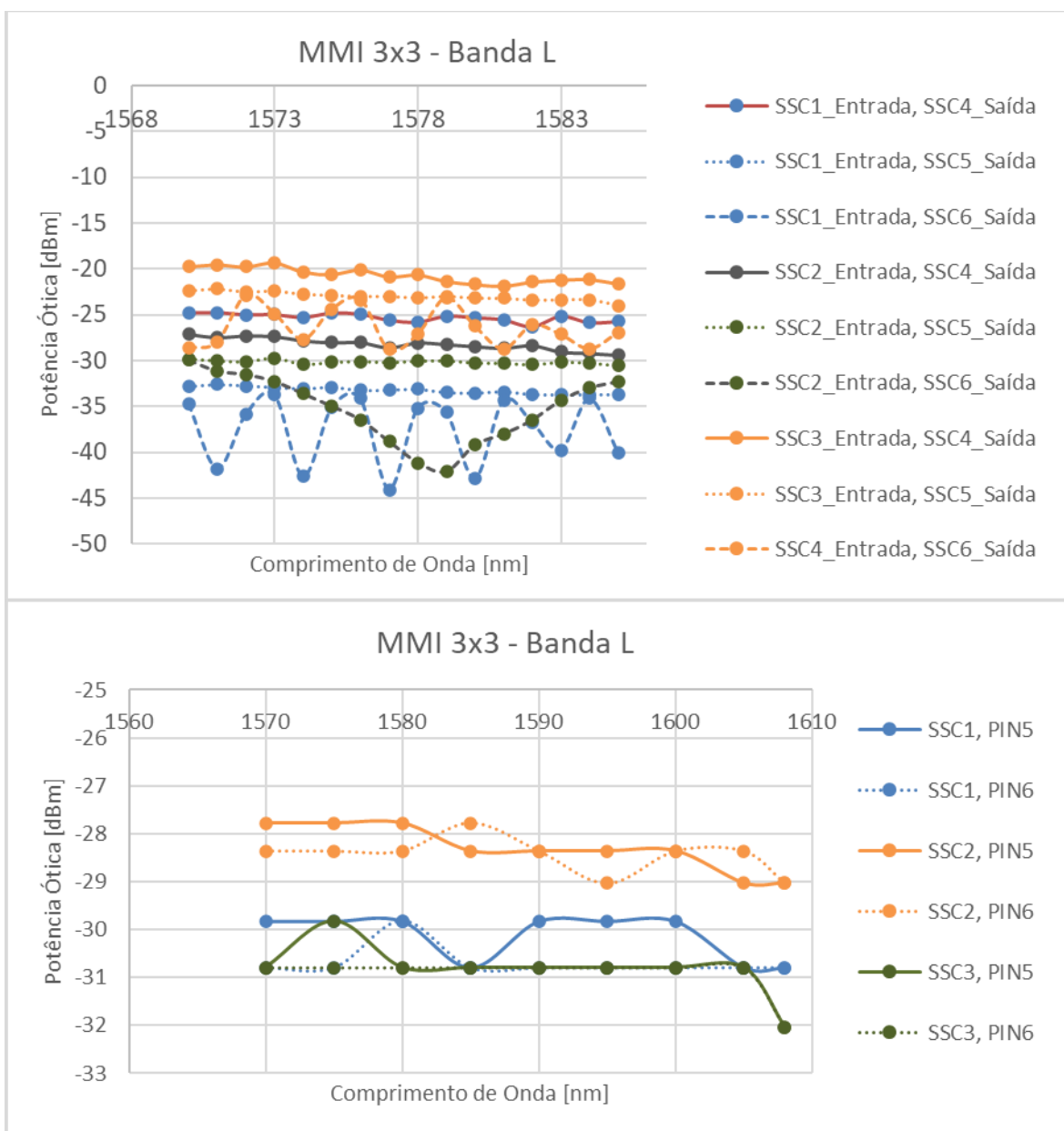


Figura 4.13 – Potência Ótica para MMI 3x3 em Banda-L (teste ótico/ótico) / Potência Ótica para MMI 3x3 em Banda-L (teste ótico/elétrico)

Ao observar o gráfico em Banda-L de potência ótica em relação ao comprimento de onda no teste ótico/ótico, verifica-se que, independentemente de qual for a entrada do SSC (1,2,3,4), a potência ótica à saída vai diminuindo do SSC4 para o SSC6. Consta-se também que os melhores valores de potência ótica à saída foram retirados para a entrada do SSC3, sendo estes cerca de -20 a -25dBm. Ainda assim, houve três valores que tiveram ligeiras oscilações, que aconteceram na saída do SSC6. No teste ótico/elétrico comprova-se que os valores de potência ótica à saída são menores que os do teste ótico/ótico. Consegu

perceber-se, através da análise desse gráfico, que os melhores valores de potência ótica à saída ocorrem para a entrada do SSC2, variando dos -27 aos -29dBm.

Seguidamente foram feitos os mesmos testes, mas neste caso em vez de ser para a Banda-L foi para a Banda-C. (Figura 4.14)

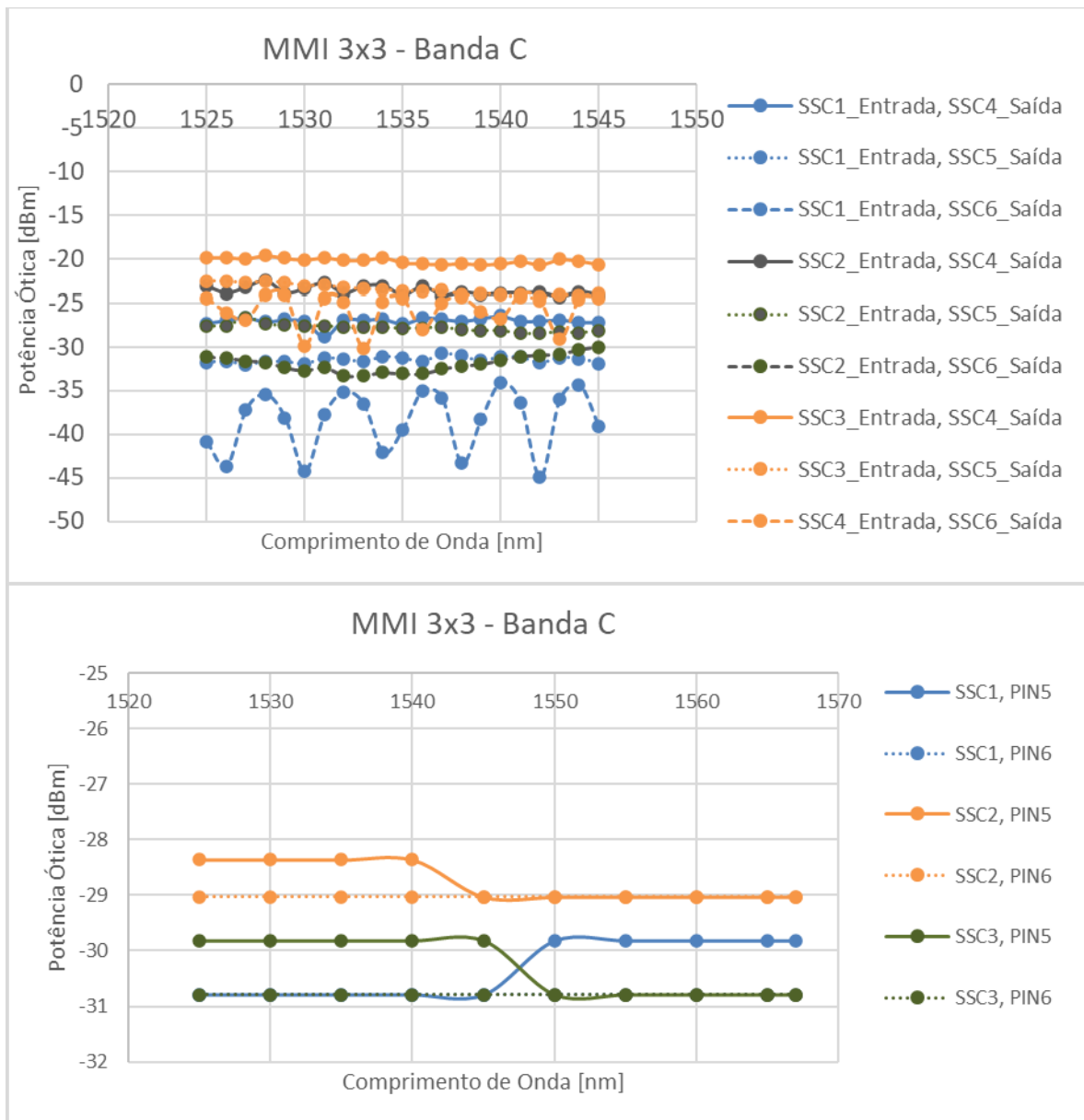


Figura 4.14 - Potência Ótica para MMI 3x3 em Banda-C (teste ótico/ótico) / Potência Ótica para MMI 3x3 em Banda-C (teste ótico/elétrico)

Com a análise do gráfico em Banda-C para o teste ótico/ótico constatamos que, tal como acontecia no caso anterior, seja qual for a entrada do SSC, a potência ótica à saída vai diminuindo do SSC4 para o SSC6. Os melhores valores de potência ótica foram

obtidos para a entrada do SSC3, estando entre os -20 e os -25dBm. Para a saída do SSC6 voltaram a verificar-se ligeiras oscilações, assim como tinha acontecido no teste da Figura 4.13. Observando o gráfico para o teste ótico/elétrico, consegue verificar-se que, para além dos valores de potência ótica à saída serem mais baixos que os do teste ótico/ótico, os valores mais elevados de potência ocorrem para a entrada do SSC2, estando eles entre os -28 e os -29dBm.

Em relação à arquitetura 2.2, referente ao MMI 4x4 para a Banda-L, observa-se na Figura 4.15 a variação da potência ótica com o comprimento de onda desde o SSC1 ao SSC7 e também do PIN1 ao PIN4. Para o SSC8 não foram realizados os testes devido à inexistência de luz.

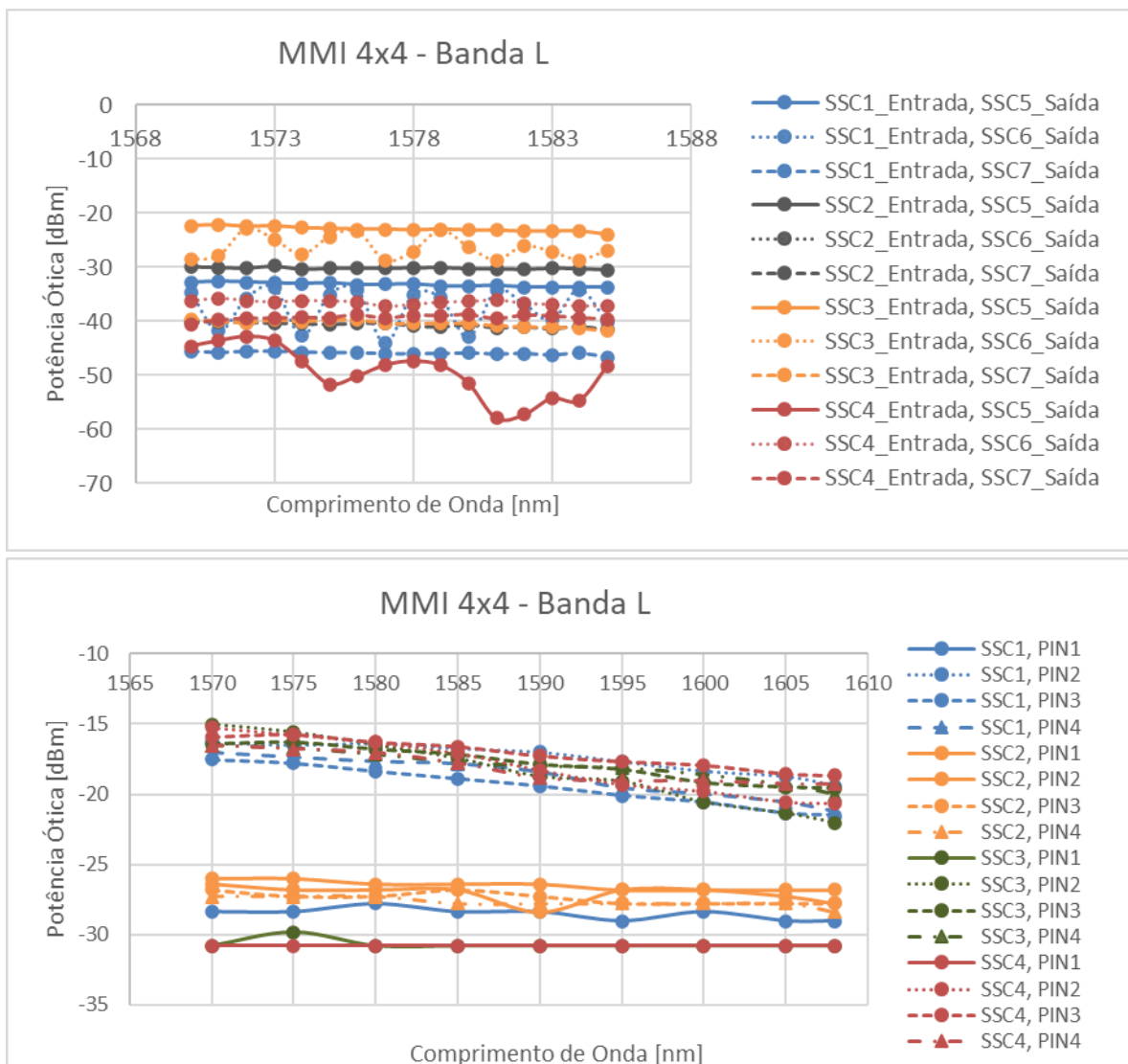


Figura 4.15 - Potência Ótica para MMI 4x4 em Banda-L (teste ótico/ótico) / Potência Ótica para MMI 4x4 em Banda-L (teste ótico/elétrico)

Com a observação do gráfico em Banda-L de potência ótica em relação ao comprimento de onda no teste ótico/ótico, consegue-se averiguar que a potência ótica à saída vai diminuindo do SSC5 para o SSC7, exceto para a entrada do SSC4. Verificamos igualmente que para a entrada do SSC3 e saída do SSC5 encontram-se os melhores valores de potência ótica, variando estes entre os -20 e os -25dBm. Na entrada do SSC1 e saída do SSC6, na entrada do SSC3 e saída do SSC6 e também na entrada do SSC4 e saída do SSC5, acontecem umas ligeiras oscilações. Em relação ao teste ótico/elétrico, ao contrário do que acontecia no MMI 3x3, os valores de potência ótica são maiores que no teste ótico/ótico. No teste ótico/elétrico para os PINs 2,3 e 4, tirando aqueles que se encontram para uma entrada do SSC2, são exibidos os maiores valores de potência ótica à saída, que se apresentam num intervalo de cerca de -15 a -22 dBm.

O último caso estudado para a arquitetura 2 foi realizado para a Banda-C no MMI 4x4. (Figura 4.16)

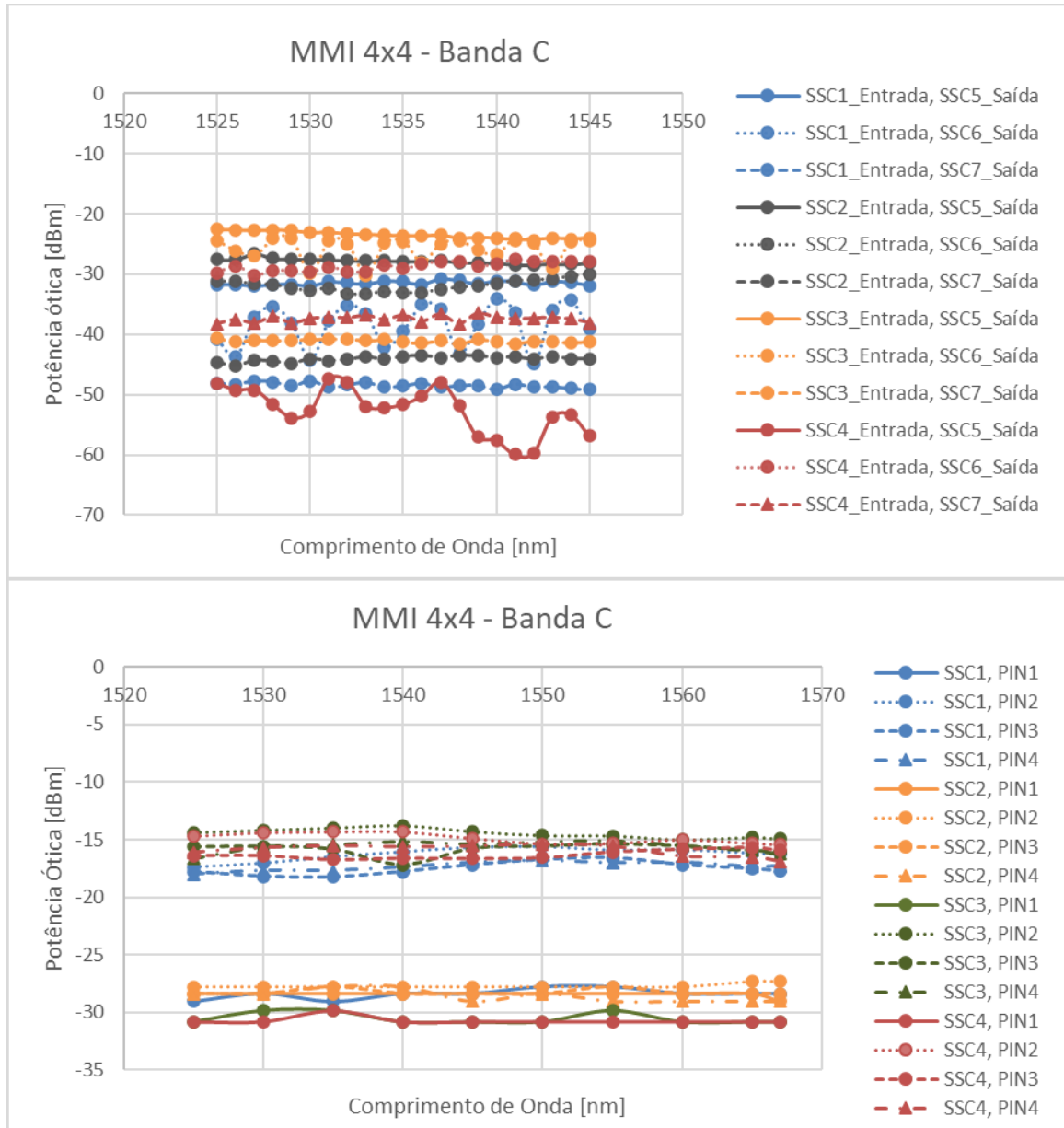


Figura 4.16 - Potência Ótica para MMI 4x4 em Banda-C (teste ótico/ótico) / Potência Ótica para MMI 4x4 em Banda-C (teste ótico/elétrico)

Ao analisar o gráfico em Banda-C de potência ótica em relação ao comprimento de onda para o teste ótico/ótico, verifica-se que a potência ótica à saída vai diminuindo do SSC5 até aos SSC7, exceto no caso em que a entrada é no SSC4, como aconteceu na situação anterior. Os melhores valores de potência ótica observam-se para a entrada do

SSC3 e saída do SSC5, encontrando-se estes entre os -22 e os -25dBm. Os valores na entrada do SSC1 e saída do SSC6, na entrada do SSC3 e saída do SSC6 e também na entrada do SSC4 e saída do SSC5 apresentam algumas oscilações, como se pode observar no gráfico. No teste ótico/elétrico para os PINs 2,3 e 4, sem ser para a entrada do SSC2, verificam-se os valores mais elevados de potência ótica num intervalo de -14 a -18 dBm. Nestes testes, constata-se também que os valores de potência ótica são maiores que os do teste ótico/ótico.

Ao realizar-se o estudo de ambas as arquiteturas, 2.1 e 2.2, conseguiu perceber-se quais os PINs e os SSC que estariam em melhores condições de acordo com a potência ótica que se foi analisando para os vários testes. Adicionalmente, nesta atividade experimental pôde compreender-se que os valores de potência ótica à saída que foram observados se encontravam demasiado baixos, de acordo com o que pretendíamos comprovar.

#### 4.1.4 Design 3 – Arquitetura 1

Neste design, foram efetuados testes semelhantes aos Designs 1 e 2. O objetivo na Arquitetura 1, como podemos observar na Figura 4.17, é medir a potência ótica à saída do SSC. Para este procedimento iremos ligar as DC probes ao DFB1 laser, com o intuito de que seja emitida luz. Neste processo, o modulador de Eletro-Absorção (EAM) vai estar desligado, assim como o Amplificador Ótico de Semicondutores (SOA). Um acréscimo neste teste em relação aos anteriores é que foram utilizados equipamentos como o medidor de potência ótica e o Analisador Espectral Ótico (OSA) já automatizados, facilitando a obtenção dos valores e dos gráficos.

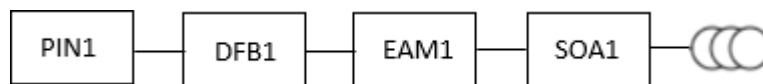


Figura 4.17 - Diagrama de blocos do Design 3 - Arquitetura 1

Na realização destes testes irá ser usada uma fibra de lente com 200um de diâmetro e o Controlador de Temperatura (TC) estará regulado a 20°C. Uma vez que este design foi recentemente produzido, foram gerados vários PIC's com o mesmo design. Os testes foram realizados para a PIC 7 (2C), PIC 2 (1B) e PIC 4 (1D). Irá ser analisada para cada PIC a potência ótica obtida, aumentando a corrente no Controlador Laser Díodo (LDC) e as variações do pico 1 e 2, tendo em conta a variação da potência ótica e do comprimento de onda com o aumento da corrente. As Figuras 4.18, 4.20 e 4.22 representam os gráficos em relação à primeira parte dos testes, sendo estes medidos com um medidor de potência ótica e as Figuras 4.19, 4.21 e 4.23 em relação à segunda parte, medidos pelo Analisador Espectral Ótico (OSA).

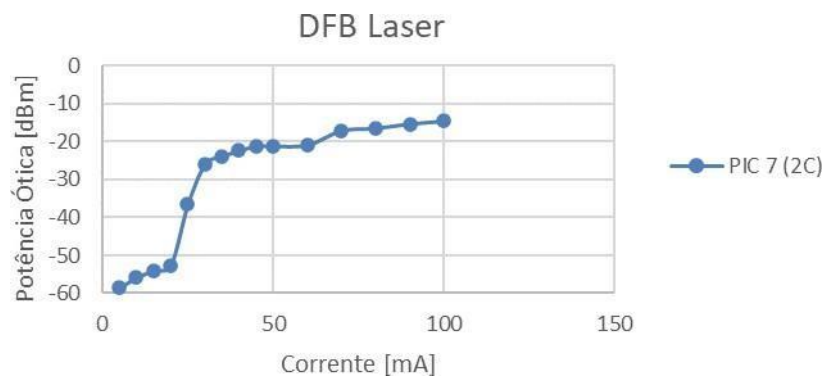


Figura 4.18 - Potência ótica à saída variando a corrente (PIC 7)

Como podemos observar na Figura 4.18, existe uma subida acentuada dos valores de potência ótica quando passamos de uma corrente de 20mA a 25Ma para uma de 30mA. De 20mA para 25 mA, temos uma subida em cerca de 15dBm e de 25mA a 30mA, uma de 10dBm. A partir dos 30mA, a potência ótica vai aumentando ligeiramente, atingindo o ponto máximo a 100mA com um valor de -14,61dBm.

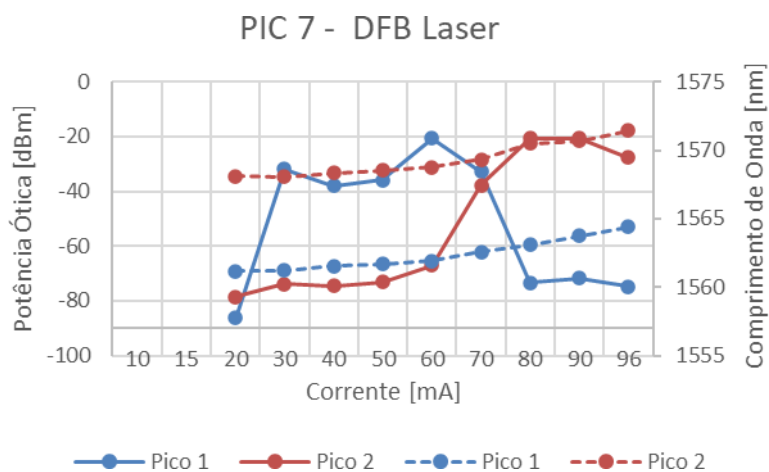


Figura 4.19 - Relação do pico 1 e pico 2 com a potência ótica e o comprimento de onda variando a corrente (PIC 7)

Na análise da Figura 4.19, podemos constatar que se fizeram dois estudos para o pico 1 e pico 2, que foram examinados no Analisador Espetral Ótico (OSA). Estes estudos foram realizados pelo facto desses 2 picos se alterarem ao medirmos a potência ótica e comprimento de onda no PIC consoante a variação da corrente.

Ao observar o pico 1 e 2 (não tracejado), relação entre potência ótica e corrente, existe um ponto onde ambos se cruzam (70mA). Isto ocorre devido ao aumento da corrente que faz variar a potência ótica dos 2 picos. Podemos ver que o pico 1 dos 30mA até aos 70mA apresenta valores de potência ótica elevados, contrariamente ao pico 2, que patenteia valores mínimos de potência ótica. A partir do 70mA até aos 100mA, acontece exatamente o contrário, isto é, os valores do pico 1 tornam-se reduzidos e os valores do pico 2 têm uma ascensão. O ponto de potência ótica máxima foi atingido no pico 2, sendo esse valor de -20,52dBm. Em relação ao pico 1 e 2 (tracejado), relação entre comprimento de onda e corrente, conseguimos analisar que ambos os picos apresentam uma curva



idêntica, ocorrendo uma subida no comprimento de onda com o aumento da corrente. O valor do comprimento de onda para o qual a potência ótica é máxima, encontra-se a cerca de 1570,48nm.

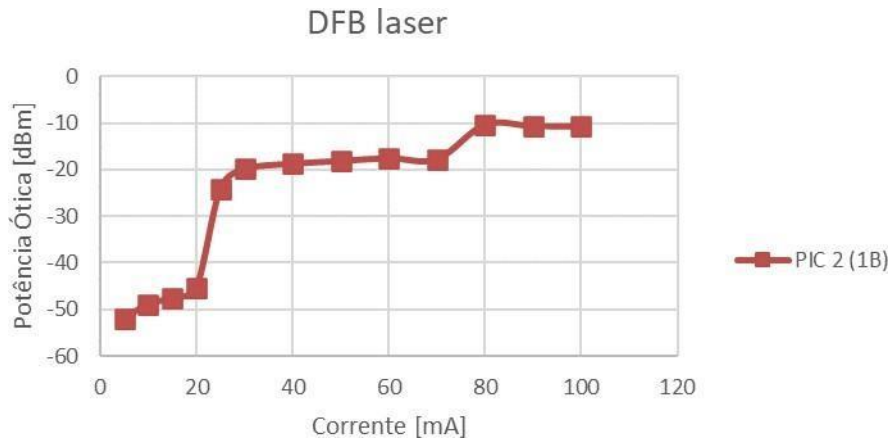


Figura 4.20 - Potência ótica à saída variando a corrente (PIC 2)

Com a análise da Figura 4.20, podemos verificar que acontece um aumento considerável da potência ótica entre os 20mA e os 30mA. Dos 20mA até aos 25mA temos uma subida em cerca de 20dBm e dos 25mA aos 30mA, um aumento de 5dBm. Quando passamos dos 30mA, esse aumento tende a ser mais ligeiro, atingindo o máximo de potência ótica à saída do SSC de 80mA, com um valor de -10,42dBm.

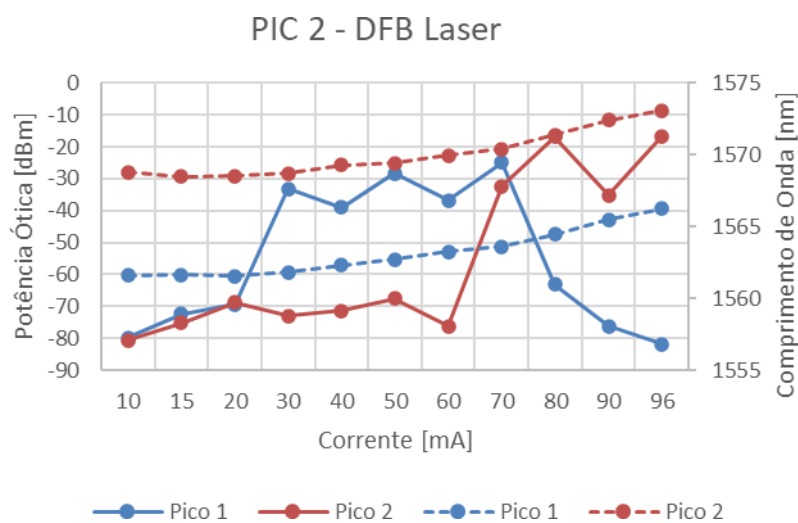


Figura 4.21 - Relação do pico 1 e pico 2 com a potência ótica e o comprimento de onda variando a corrente (PIC 2)

Com a observação da Figura 4.21, podemos compreender que se voltou a realizar novamente o estudo tanto para o pico 1 como para o pico 2, como se tinha feito para o PIC 7 (2C). (Figura 4.19)

Ao analisar o pico 1 e 2 (não tracejado), potência ótica em relação à corrente, podemos verificar que existe um ponto a cerca dos (70mA) onde ambos se intersejam. Tal acontece devido à variação da corrente, fazendo assim alterar a potência ótica nos 2 picos. Visualizando inicialmente o pico 1, podemos constatar valores elevados de potência ótica, ao contrário do pico 2 que apresenta valores baixos, ambos entre os 30mA e os 70mA. No intervalo dos 70mA e 100mA, o valor do pico 1 tende a diminuir e por outro lado, o valor do pico 2 a aumentar. A potência ótica máxima foi atingida no pico 2, cujo valor ronda os -16,69dBm. Falando também do pico 1 e 2 (tracejado), que relaciona o comprimento de onda com a corrente, percebemos que a curva de ambos é semelhante, confirmando-se um aumento do comprimento de onda com o aumento da corrente. A 1573,07nm encontra-se a potência ótica máxima.

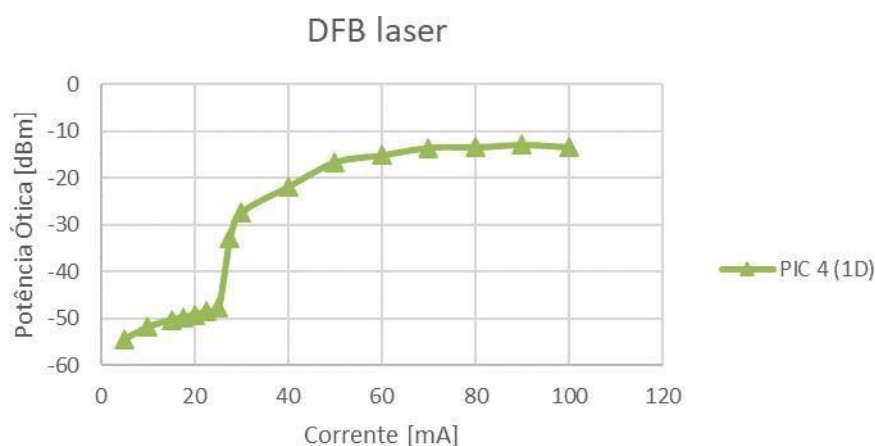


Figura 4.22 - Potência ótica à saída variando a corrente (PIC 4)

Após a análise da Figura 4.22, verificamos uma subida notável entre os 25mA e os 30mA. Entre estes valores observamos um aumento em cerca de 20dBm e, a partir dos 30mA, os valores tendem a estabilizar. A 90mA encontra-se o valor máximo de potência ótica, que é cerca de -12,95dBm.

Finalmente, como observamos na Figura 4.23, será analisado o pico 1 e 2 da PIC 4 (1D).

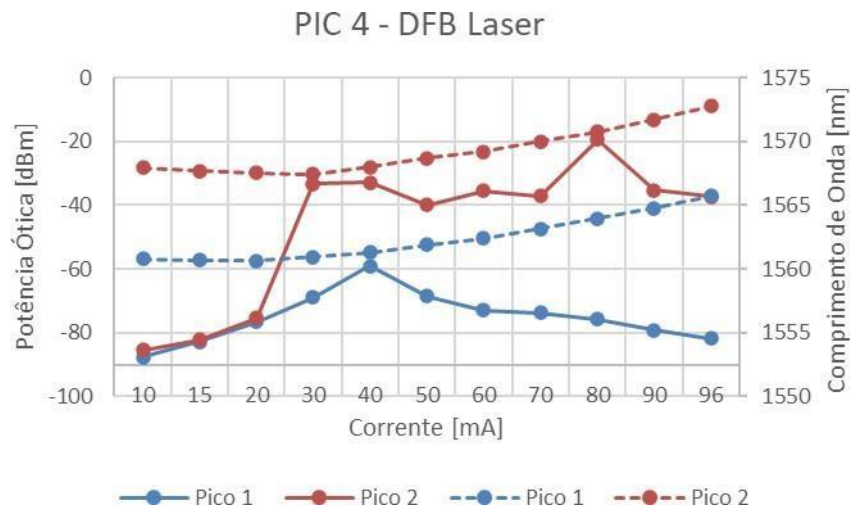


Figura 4.23 - Relação do pico 1 e pico 2 com a potência ótica e o comprimento de onda variando a corrente (PIC 4)

Com a observação do pico 1 e 2 (não tracejado), relação entre potência ótica e corrente, verificamos neste caso que, ao contrário do que aconteceu com os PIC's anteriores, o pico 1 e 2 deste PIC nunca se intersectam. Neste caso, o pico 2 tende sempre aumentar e o pico 1 apresenta uma ligeira subida, mas a seguir tende a diminuir até ao final. No pico 2, entre os 20mA e os 30mA acontece uma subida abrupta em cerca de 40dBm e, de seguida, mantém-se ligeiramente estável até aos 100mA. Por outro lado, o pico 1 apresenta o ponto máximo aos 40mA e, a partir desta corrente, tende sempre a diminuir até serem alcançados os 100mA. Podemos concluir que, nesta situação, o pico 2 apresenta melhores valores de potência ótica, podendo ser desprezados os valores do pico 1. O valor máximo de potência ótica é atingido aos 80mA e é de -19,38dBm. Em relação ao pico 1 e 2 (tracejado), voltamos a verificar uma curva semelhante para ambos os picos, apresentando assim um ligeiro aumento do comprimento de onda com o aumento da corrente. A potência ótica máxima pode ser encontrada a um comprimento de onda de 1570,76nm.

Fazendo uma análise geral em relação às 3 PIC's estudadas, podemos concluir que, em relação à primeira parte dos testes (variação da potência ótica com o aumento da corrente), todos apresentam curvaturas idênticas. Explicitando, era suposto que ocorresse um aumento da potência ótica com o aumento da corrente e tal aconteceu. Para a segunda parte dos testes (variação da potência ótica e do comprimento de onda com o aumento da corrente), analisámos os gráficos em relação ao pico 1 e 2 (não tracejado) e observámos que tanto a curvatura do PIC 7 (2C) como a do PIC 2 (1B) se encontravam semelhantes, mas para o caso do PIC4 (1D) já não se confirmava a mesma situação. Neste caso, o pico 2 era o único que prevalecia devido à apresentação dos valores mais elevados de potência ótica à saída do SSC. Finalizando com o pico 1 e 2 (tracejado), podemos comprovar graficamente que ambos os PIC's apresentavam curvaturas similares.

## 5. Conclusões e Trabalhos Futuros

### 5.1 Conclusões

Durante a realização deste trabalho, foram adquiridos mais conhecimento na área da fotônica integrada. Todos os testes feitos em laboratório empresarial facilitaram a percepção dos cuidados a ter para conseguir obter resultados cada vez melhores e apreender a utilidade de cada material utilizado, nomeadamente o que estava a medir. Neste último caso, referem-se os chips de teste usados (PIC's) pois, como já previamente mencionado no documento, contêm muitos componentes óticos neles inseridos e era necessário saber as razões justificativas de tais medições e o porquê de tais acontecerem, para darem os respetivos valores.

Em relação à parte de automatização, foram alcançados vastos saberes sobre os aparelhos selecionados para trabalhar. Foram igualmente conquistados conhecimentos de algumas funções, que facilitaram os procedimentos da medição de alguns valores mas, acima de tudo, foram desenvolvidas novas capacidades de programar e de conseguir interagir de uma forma diferente com os aparelhos.

Os testes experimentais efetuados foram superiores aos que se encontram neste documento e não foram divulgados visto que, ou não eram muito relevantes tendo em conta que já tinham sido colocadas em experiências parecidas, ou porque seriam confidenciais. No entanto, em anexo encontram-se algumas experiências efetuadas que não foram colocadas nesta dissertação.

## ***5.2 Trabalho Futuro***

Após concluir este trabalho, são apresentados alguns pontos de interesse em termos de desenvolvimento do trabalho:

- Continuar a otimização de outros aparelhos de bancada (Controlador de Corrente (LDC210C), o Controlador de Temperatura (TED200C) e outros), criando assim melhores condições de teste e uma maior eficiência;
- Prosseguir na realização de testes dos diferentes PIC's, para realizar o estudo para cada caso e compreender os vários resultados;
- Utilização de novos aparelhos e de novos PIC's para que possa realizar novas experiências e retirar novos dados.

## 6. Referências

- [1] Cláudio Gonçalves, "GPON/FTTH FTTH\_Fiber to the home", Universidade da Madeira,2009. <https://digituma.uma.pt/handle/10400.13/87>
- [2] Cláudia Sofia de Sousa Mendonça, "Requisitos para Redes NG-PON2", Universidade de Aveiro,2010. <https://ria.ua.pt/bitstream/10773/4393/1/Requisitos%20para%20Redes%20NG-PON2.pdf>
- [3] Cleiber Marques da Silva, "PON – Passive Optical Network", Instituto Federal de Santa Catarina,2009.
- [4] José Pinheiro, "PON - Conheça como é a estrutura dessa rede",2016. <https://www.ispblog.com./2016/09/16/estrutura-pon/>
- [5] H. S. Abbas and M. A. Gregory, "The next generation of passive optical networks: A review," *Journal of Network and Computer Applications*. 2016, doi: 10.1016/j.jnca.2016.02.015.
- [6] C. Dalamagkas, P. Sarigiannidis, S. Kapetanakis, and I. Moscholios, "Dynamic scheduling in TWDM-PONs using game theory," *Opt. Switch. Netw.*, 2019, doi: 10.1016/j.osn.2017.12.004.
- [7] D. Nasset, "NG-PON2 technology and standards," *J. Light. Technol.*, 2015, doi: 10.1109/JLT.2015.2389115.
- [8] H. Debrégeas-Sillard and C. Kazmierski, "Challenges and advances of photonic integrated circuits," *Comptes Rendus Physique*. 2008, doi: 10.1016/j.crhy.2008.10.004.
- [9] D. Geuzebroek, R. Dekker, E. Klein, and J. Van Kerkhof, "Photonic Integrated Circuits for visible light and near infrared: Controlling transport and properties of light," in *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 2016, doi: 10.1016/j.snb.2015.09.096.

- [10] “<http://fp7.actphast.eu/technology-platform/tp-6-inp-based-photonic-integrated-circuits-pics-or-chips>”.
- [11] D. R. Paschotta, “Photonic Integrated Circuits”,2012. [https://www.rp-photonics.com/photonic\\_integrated\\_circuits.html](https://www.rp-photonics.com/photonic_integrated_circuits.html)
- [12] J. Chovan and F. Uherek, “Photonic integrated circuits for communication systems,” *Radioengineering*, 2018, doi: 10.13164/re.2018.0357.
- [13] M. Smit, ““How complex can integrated optical circuits become?” Proceedings of the European Conference on Integrated Optics (ECIO 2007)”, 2007.
- [14] D. R. Paschotta, “Photodetectors”,2012. <https://www.rp-photonics.com/photodetectors.html>
- [15] “<http://radio.lx.it.pt/STG/STG0405acetatos11.pdf>”.
- [16] Mário Lima, António Teixeira, "Recetores óticos.pdf", Universidade de Aveiro (slides 2019/2020).
- [17] Hugo Daniel Barbosa Neto, "Encapsulamento de circuitos óticos integrados of Photonic Integrated Circuits", Universidade de Aveiro, 2017.
- [18] Ladany, I., J. T. Andrews, and Gary A. Evans. "Distributed feedback lasers.",1988. <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19880015564.pdf>
- [19] Keang-Po Ho, "Advanced Topics in Lightwave Communications Generation of Optical Signals.", 2005. [https://www.researchgate.net/publication/239374959\\_Advanced\\_Topics\\_in\\_Lightwave\\_Communications\\_Generation\\_of\\_Optical\\_Signals](https://www.researchgate.net/publication/239374959_Advanced_Topics_in_Lightwave_Communications_Generation_of_Optical_Signals)
- [20] “<https://www.timbercon.com/resources/glossary/fabry-perot-laser-diode/>”.
- [21] T. Aellen, S. Blaser, M. Beck, D. Hofstetter, J. Faist, and E. Gini, “Continuous-wave distributed-feedback quantum-cascade lasers on a Peltier cooler,” *Appl. Phys. Lett.*, 2003, doi: 10.1063/1.1609044.
- [22] Kerrie Harrington, “Chapter 4 Photonic Sources”,2016. <https://slideplayer.com/slide/6112253/>
- [23] “<https://www.laserdiodesource.com/dfb-lasers>”.
- [24] Michael Connelly, "Semiconductor optical amplifiers and their applications" Third Spanish Meeting of Optoelectronics, OPTOEL'03 (Madrid, Spain, 14–16 July



- 2003), 2003.
- [25] Michael Connelly, "Semiconductor Optical Amplifiers", 2004.  
[https://www.researchgate.net/publication/309211523\\_Semiconductor\\_Optical\\_Amplifiers](https://www.researchgate.net/publication/309211523_Semiconductor_Optical_Amplifiers)
- [26] S. Amin and K. Aziz, "Multimode interference (MMI) devices: A survey," *Proc. 8th Int. Conf. Front. Inf. Technol. FIT'10*, no. Mmi, pp. 1–6, 2010, doi: 10.1145/1943628.1943674.
- [27] D. K. M. BŁAHUT, "Multimode interference structures –," *Opt. Appl.*, vol. XXXIV, no. 4, pp. 573–587, 2004.
- [28] F. Yu, K. Yamamoto, X. Piao, and S. Yokoyama, "Multimode interference waveguide switch of electro-optic polymer with tapered access waveguides," *Phys. Procedia*, vol. 14, pp. 25–28, 2011, doi: 10.1016/j.phpro.2011.05.006.
- [29] L. A. Johansson, Y. A. Akulova, G. A. Fish, and L. A. Coldren, "Photocurrent effects in an electroabsorption modulator integrated with SGDBR laser," *MWP 2003 - Proceedings, Int. Top. Meet. Microw. Photonics*, no. October, pp. 161–164, 2003, doi: 10.1109/MWP.2003.1422854.
- [30] D. R. Paschotta, "Electroabsorption Modulators", 2012.  
[https://www.rp-photonics.com/electroabsorption\\_modulators.html](https://www.rp-photonics.com/electroabsorption_modulators.html)
- [31] H. Soda and K. Morito, "Electroabsorption modulators," *Broadband Opt. Modul. Sci. Technol. Appl.*, pp. 129–150, 2016, doi: 10.1201/b11444-8.
- [32] G. E. Betts, X. B. Xie, I. Shubin, W. S. C. Chang, and P. K. L. Yu, "Gain limit in analog links using electroabsorption modulators," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 18, no. 19, pp. 2065–2067, 2006, doi: 10.1109/LPT.2006.883292.
- [33] M. Rouse, "What is fiber optics (optical fiber)? - Definition from WhatIs.com,"  
<http://Searchtelecom.Techtarget.Com>, 2017.
- [34] B. Guzowski, Z. Lisik, and G. Tosik, "Realization of optical fibers terminated with ball lenses," *Bull. Polish Acad. Sci. Tech. Sci.*, 2016, doi: 10.1515/bpasts-2016-0031.
- [35] D. R. Paschotta, "Ball Lenses", 2012. [https://www.rp-photonics.com/ball\\_lenses.html](https://www.rp-photonics.com/ball_lenses.html)
- [36] [https://www.wttechnology.com/lensed%20fibers\\_v5.pdf](https://www.wttechnology.com/lensed%20fibers_v5.pdf).

- [37] G. Bouvree and B. Espinoza, "Software supports multiple optical fiber alignment options," *Laser Focus World*, 2014.
- [38] J. Y. Jeong, "Optical power meters: Versatile and economical," *Photonics Spectra*, 2009.
- [39] D. R. Paschotta, "Optical Power Meters.",2012.  
[https://www.rp-photonics.com/optical\\_power\\_meters.html](https://www.rp-photonics.com/optical_power_meters.html)
- [40] "<https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=PM100D>".
- [41] "<https://wmelectronica.com/project/analizador-de-espectro-optico/>".
- [42] A. M. Alaíz-Gudín and A. P. González-Marcos, "Spectral width study in a wavelength detector," *Opt. Pura y Apl.*, 2016, doi: 10.7149/OPA.49.2.48540.
- [43] N. I. Khan, A. Bergmann, and R. Michalzik, "Miniaturized VCSEL modules for optical manipulation of microparticles," in *8th International Conference on Electrical and Computer Engineering: Advancing Technology for a Better Tomorrow, ICECE 2014*, 2015, doi: 10.1109/ICECE.2014.7026917.

## 7. Anexos

### 7.1 Resultados do Analisador de Espectro Ótico

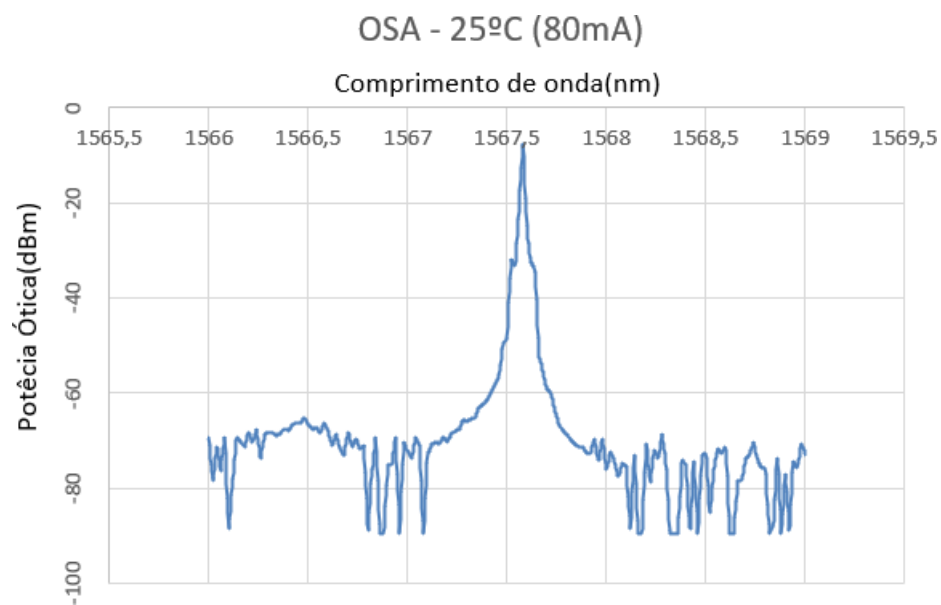


Figura 7.1.1 - Medição no Analisador de Espectro Ótico da Potência Ótica em relação ao comprimento de onda (25°C(80mA))

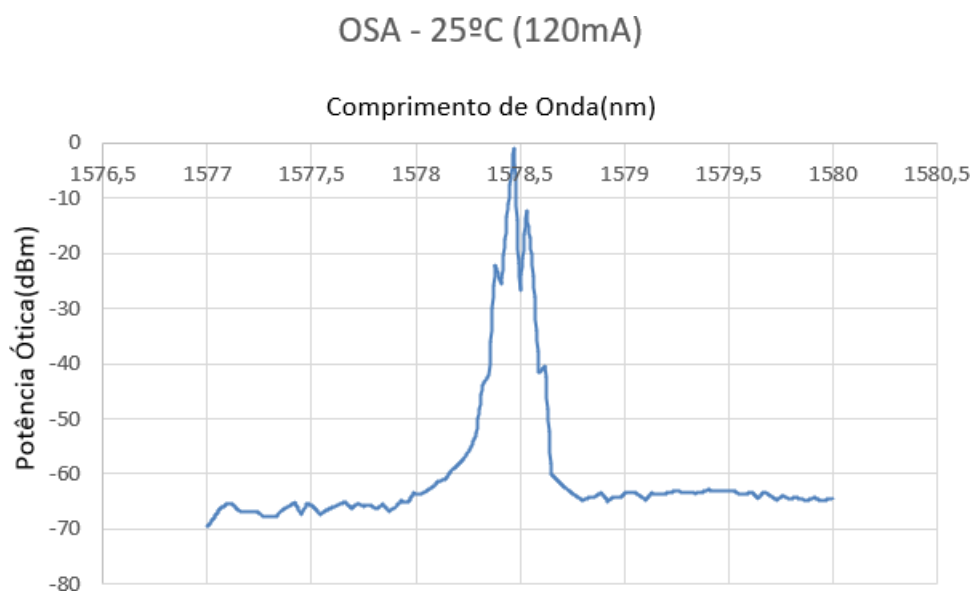


Figura 7.1.2 - Medição no Analisador de Espectro Ótico da Potência Ótica em relação ao comprimento de onda (25°C(120mA))

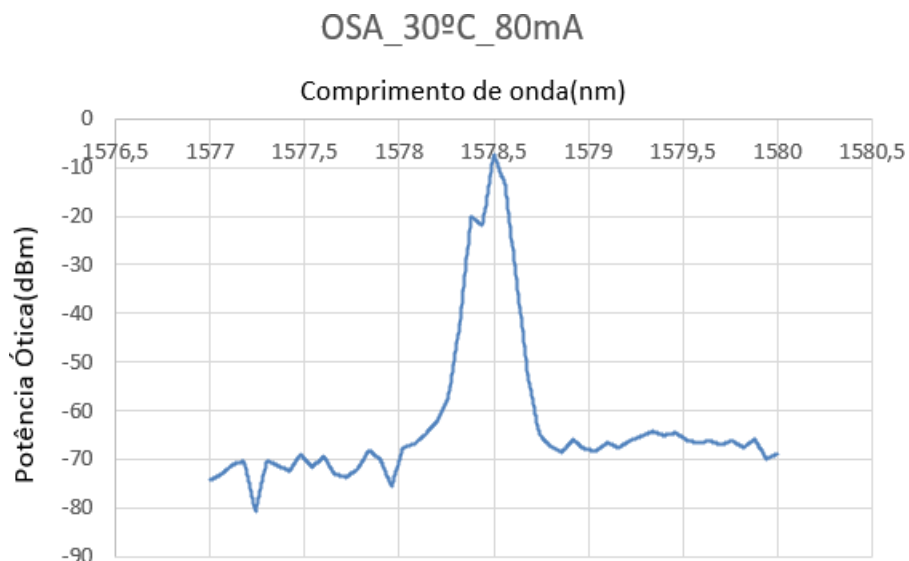


Figura 7.1.3 - Medição no Analisador de Espectro Ótico da Potência Ótica em relação ao comprimento de onda (30°C(80mA))



Figura 7.1.4 - Medição no Analisador de Espectro Ótico da Potência Ótica em relação ao comprimento de onda (30°C(120mA))

## 7.2 Design 2 - Arquitetura 1

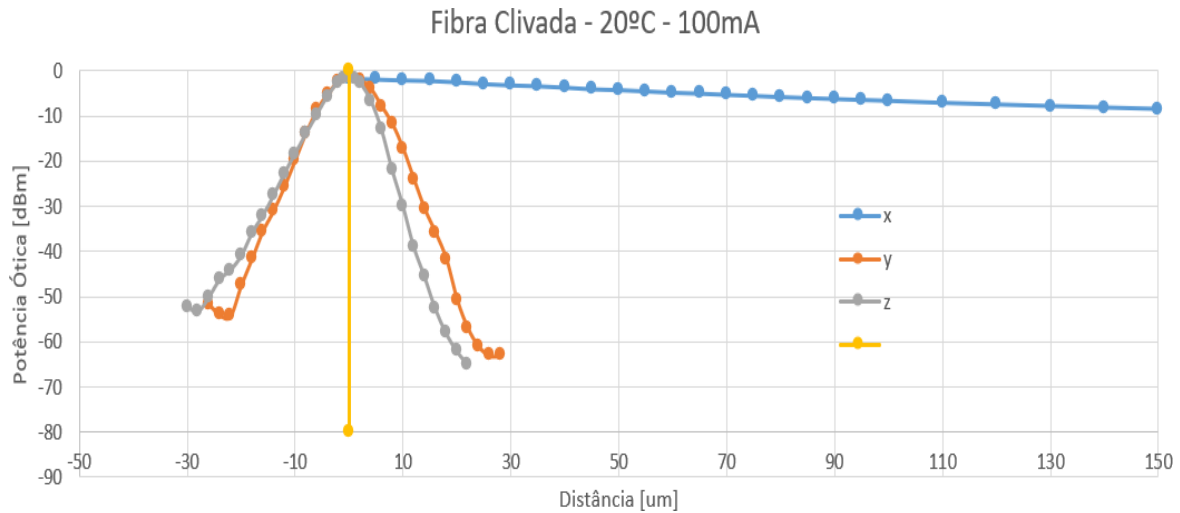


Figura 7.2.1 - Potência Ótica à saída variando os vários eixos para uma fibra clivada (xx,yy,zz )(20°C(100mA))

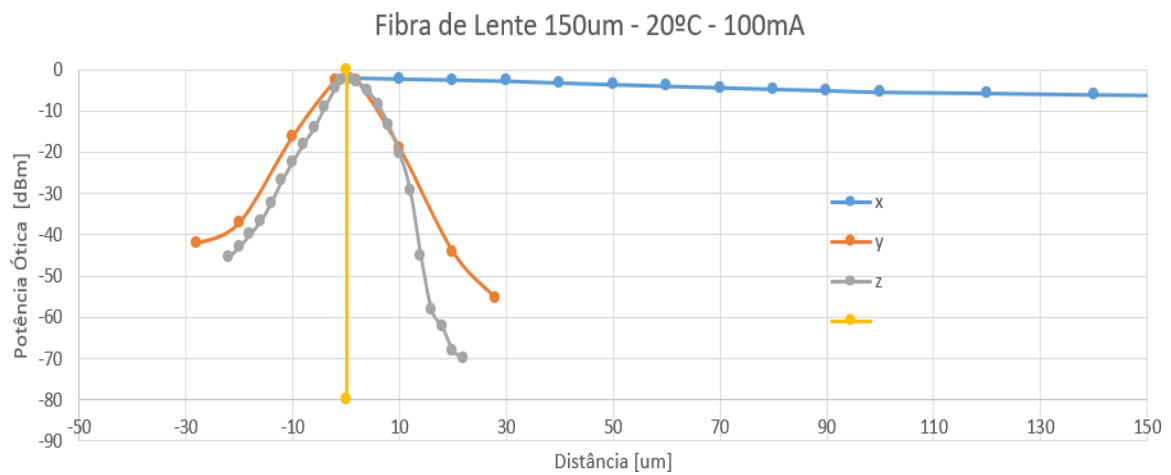


Figura 7.2.2 - Potência Ótica à saída variando os vários eixos para uma fibra de Lente (xx,yy,zz )(20°C(100mA))