



Universidade de Aveiro
2010

Departamento de Electrónica,
Telecomunicações e Informática (DETI)

**José Pedro
de Sousa Girão**

***Extender Box* para Redes Ópticas Passivas GPON**



Universidade de Aveiro
2010

Departamento de Electrónica,
Telecomunicações e Informática (DETI)

**José Pedro
de Sousa Girão**

Extender Box para Redes Ópticas Passivas GPON

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Electrónica e Telecomunicações, realizada sob a orientação científica do Prof. Dr. António Teixeira e do Prof. Dr. Mário Lima, ambos do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática e do Instituto de Telecomunicações da Universidade de Aveiro.

Dedico este trabalho à minha Avó Olinda, à minha Mãe Maria do Céu, ao meu Pai Fernando, ao meu irmão Nuno e a todos os meus amigos.

o júri

presidente

Prof. Doutor José Ferreira da Rocha
Professor Catedrático da Universidade de Aveiro

Orientador Prof. Doutor António Luís Jesus Teixeira
Professor Associado da Universidade de Aveiro

Co-orientador Prof. Doutor Mário José Neves de Lima
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

Vogal Doutora Natasa Pavlovic
Investigadora Sénior na Nokia Siemens Networks

Agradecimentos

Em primeiro lugar quero agradecer à Universidade de Aveiro, especialmente ao Instituto de Telecomunicações por me ter disponibilizado os recursos materiais e a envolvente social e psicológica necessária à realização desta dissertação.

Ao Prof. Doutor António Teixeira, meu orientador, e ao Prof. Doutor Mário Lima, meu co-orientador, os meus sinceros agradecimentos por todo o apoio prestado ao longo da dissertação e pela pronta disponibilidade que sempre me dispensaram na realização deste projecto.

À Doutora Berta Neto agradeço todo o apoio de que necessitei para uma melhor integração no Instituto de Telecomunicações, nomeadamente no ambiente laboratorial, onde recebi o apoio necessário, facilitando, deste modo, o trabalho desenvolvido.

Ao Engenheiro João Prata a minha palavra de agradecimento pela ajuda no laboratório de óptica e pela rapidez com que preparou todos os dispositivos que necessitavam de integração electrónica.

Quero agradecer também à Agência de Inovação, através do projecto “*GPON in a Box*”; à FCT, através do TOMAR-PON e ao projecto Europeu FP7, “SARDANA”, que me permitiram ter acesso a recursos materiais que foram indispensáveis para o desenvolvimento deste trabalho.

Finalmente, a todos os elementos do grupo de comunicações ópticas, especialmente aos meus colegas dos projectos supra mencionados, deixo uma palavra de agradecimento pela rápida integração e ajuda que sempre me disponibilizaram.

palavras-chave

Redes Ópticas Passivas, GPON, EPON, *Reach Extension*, Amplificadores Ópticos.

resumo

As Redes Ópticas Passivas de Acesso são hoje uma forte aposta dos operadores de telecomunicações. A constante necessidade de baixar os custos de instalação, levou o ITU a criar normas para regular a criação de dispositivos que aumentem a capacidade das redes GPON actualmente instaladas.

Ao longo desta dissertação vamos analisar os requisitos definidos na norma GPON, para a implementação destes dispositivos, e avaliar os já existentes no mercado. Vão ser analisados os amplificadores ópticos existentes, e vai ser proposto um protótipo para uma *Extender Box* totalmente óptica. Esse protótipo vai ser implementado e serão feitos testes que aprovam o seu funcionamento em redes GPON.

keywords

Passive Optical Networks, GPON, EPON, *Reach Extension*, Optical Amplifiers.

abstract

The Passive Optical Access Networks are today very important to the telecommunications operators. The constant need for lowering cost lead the ITU to create recommendations to allow the creation of devices that can increase the capability of the installed GPON networks.

In the scope of this thesis we will analyze the requirements defined in the GPON recommendation to the implementation of such devices, and we will evaluate the available solutions in the market. We will analyze as well the optical amplifiers available and propose a prototype for an all-optical *Extender Box*. This prototype will be implemented and tests will be performed to validate its operation in GPON networks.

Conteúdo

Conteúdo	i
Lista de Figuras	v
Lista de Tabelas.....	xi
Lista de Acrónimos	xiii
Capítulo 1. Introdução.....	1
1.1 Contexto	1
1.2 Organização.....	2
1.3 Contribuições	3
Capítulo 2. Normas para as Redes de Acesso	5
2.1 Introdução	5
2.2 Norma GPON.....	5
2.2.1 Enquadramento e Requisitos	7
2.2.2 Reach Extender	8
2.3 Norma EPON	13
2.3.1 Enquadramento e Requisitos	13
2.4 Compatibilidade entre GPON e EPON para testes	14

Capítulo 3. Estado da Arte	15
3.1 Introdução	15
3.2 Alphon PON.ext.....	16
3.3 Telnet GPON Extender v1:1	18
3.4 Teknovus Intelligent PON Node (IPN).....	20
3.5 Soluções Propostas para Extended Reach em GPON	21
Capítulo 4. Amplificadores Ópticos.....	23
4.1 Introdução	23
4.2 Amplificadores de Fibra Dopada	23
4.2.1 Princípios de Operação Básicos	24
4.2.2 Características dos DFA.....	27
4.3 Amplificadores SOA.....	32
4.3.1 Princípios de Operação Básicos	33
4.3.2 Características dos SOAs	35
4.4 Amplificadores Raman.....	37
4.4.1 Princípios de Operação Básicos	38
4.4.2 Características dos Amplificadores de Raman.....	39
4.5 Comparação entre Amplificadores Ópticos	42
4.5.1 Aplicação em Redes Passivas de Acesso	43
Capítulo 5. <i>Extender Box</i>	47
5.1. Introdução	47
5.2. Amplificadores Ópticos.....	47
5.2.1 IPG Photonics TAD-20.....	49
5.2.2 CIP SOA-S-OEC-1550	52
5.2.3 Alphon SOA29p.....	56
5.3. Protótipo para a Extender Box	59
5.4. Testes de Integração.....	61
5.4.1 Amplificador de Fibra Dopada para Downstream	65
5.4.2 Amplificador SOA para Downstream.....	67
5.4.3 Amplificador SOA para Upstream.....	69
5.4.4 Análise dos Resultados.....	71
5.5 Teste da Extender Box em cenário Real	72

Capítulo 6. Conclusões e Trabalho Futuro.....	75
6.1 Conclusões	75
6.2 Trabalho Futuro.....	76
Anexo A. Equipamento EPON da Fiberhome: Configuração da OLT AN5116-2	77
A.1 Overview	77
A.2 Configuração de ligação por Telnet	78
A.3 Registo de uma ONU	79
A.4 Configuração das larguras de banda.....	79
A.5 Configuração em uso na OLT	80
Anexo B. Analisador de Redes IXIA	83
B.1 Introdução.....	83
B.2 Aplicação em teste de Redes de cobre Ethernet	83
B.3 Aplicação em teste de sistemas ópticos	85
B.3.1 Características dos transceivers da carta 10GEthernet	88
Anexo C. Esquema Completo da Montagem Experimental do Cenário Real Emulado	89
Anexo D. <i>Reach extension</i> em CWDM-stacked PON usando amplificação híbrida Raman/EDFA 91	
D.1 Introdução.....	91
D.2 Montagem Experimental	92
D.3 Resultados	93
D.4 Conclusões	95
Referências.....	97

(Esta página foi deixada em banco intencionalmente.)

Lista de Figuras

Figura 2.1: Configuração de referência da GPON

Figura 2.2: Esquema de integração de uma *Extender Box*

Figura 2.3: Esquema dos pacotes de *downstream* (no topo) e de *upstream* (em baixo) [1]

Figura 2.4: Detalhes de um *Burst* de *upstream* [1]

Figura 3.1: Alphion PON.ext™ [2]

Figura 3.2: Esquema interno do Alphion PON.ext™

Figura 3.3: Exemplo de aplicação no terreno da *Extender Box* da Telnet [3]

Figura 3.4: TELNET GPON Extender v1:1[3]

Figura 3.5: Teknovus Intelligent PON Node [4]

Figura 3.6: Arquitectura e Diagrama de Blocos do Intelligent PON Node [4]

Figura 4.1: Esquema de uma emissão estimulada ao longo de um amplificador de fibra dopada

Figura 4.2: Esquema de uma emissão espontânea ao longo de um amplificador de fibra dopada

Figura 4.3: Configurações básicas para bombear as fibras dopadas: (a) Co-propagante, (b) Contra-propagante e (c) Bidirecional

Figura 4.4: Ganho em função do comprimento de onda para uma potência de sinal à entrada de 0 dBm.

Figura 4.5: Ganho em função do comprimento de fibra dopada para diferentes potências de bomba a 1480 nm (Potência do sinal à entrada de 0 dBm a 1550 nm)

Figura 4.6: Ganho em função da potência de bomba para um sinal à entrada a 1550 nm de 0 dBm e com uma EDF de 20 metros bombeada a 1480 nm

Figura 4.7: Ganho em função da potência de sinal à entrada a 1550 nm com uma EDF de 20 metros bombeada a 1480 nm com 20 dBm

Figura 4.8: Diagrama de olho e pacote no receptor do osciloscópio para (a) *back-to-back* (escala vertical 10.0 mV/div), (b) EDFA com corrente de bomba a 0.8 A (escala vertical 5.0 mV/div), (c) EDFA com corrente de bomba a 1.0 A (escala vertical 25 mV/div), (d) EDFA com corrente de bomba a 1.5 A (escala vertical 100 mV/div). A escala horizontal para os diagramas de olho é 200 ps/div e 10.00 μ s/div para os pacotes

Figura 4.9: Esquema de funcionamento dos dois tipos de SOA

Figura 4.10: Principais transições entre a banda de valência e a banda de condução de um SOA: (a) Absorção, (b) Emissão Espontânea e (c) Emissão estimulada

Figura 4.11: Ganho em função da corrente de polarização do SOA-S-OEC-1550 para três comprimentos de onda da banda C. [5]

Figura 4.12: Figura de ruído em função da corrente de polarização do SOA-S-OEC-1550 para três comprimentos de onda da banda C. [5]

Figura 4.13: Esquema de uma *Stimulated Raman Scattering* [6]

Figura 4.14: Coeficiente de ganho de Raman para dois tipos de fibra: *Standard Single Mode Fiber* (SSMF) e para *Dispersion Compensating Fiber* (DCF), para um comprimento de onda da bomba de 1450 nm [6]

Figura 4.15: Esquema de uma amplificação de Raman (a) distribuída e (b) *lumped*

Figura 4.16: Potência óptica relativa de um sinal propagado ao longo de 80 Km de fibra usando amplificação de Raman distribuída. No topo é apresentado o regime co-propagante e em baixo o regime contra-propagante. [7]

Figura 4.17: Coeficientes do ganho de Raman perpendiculares e paralelos para a sílica. [7]

Figura 4.18: Sumário dos amplificadores ópticos para GPON [8]

Figura 5.1: IPG Photonics S-Band Fiber Amplifier Model TAD-20

Figura 5.2: CIP SOA-S-OEC-1550

Figura 5.3: Alphion SOA29p

Figura 5.4: Montagem experimental para a caracterização dos amplificadores ópticos.

Figura 5.5: Ganho em função da corrente de bomba para quatro potências ópticas de entrada a 1490 nm.

Figura 5.6: Ganho em função da potência de entrada a 1490 nm para quatro correntes de bomba na saturação.

Figura 5.7: Ganho em função do comprimento de onda para uma potência de entrada fixa de -10 dBm e para uma corrente de bomba de 0.45 Amperes.

Figura 5.8: Montagem experimental para caracterização dos amplificadores ópticos usando um filtro óptico.

Figura 5.9: Ganho em função da corrente de bomba para várias potências de entrada a 1490 nm.

Figura 5.10: Figura de Ruído em função da corrente de bomba para várias potências de entrada a 1490 nm.

Figura 5.11: Integral da potência ASE em função da corrente de bomba para várias potências de entrada a 1490 nm para uma largura de banda de 20 nm.

Figura 5.12: Ganho em função da corrente de polarização para diferentes potências de entrada a 1490 nm.

Figura 5.13: Ganho em função da potência de entrada a 1490 nm para várias correntes de polarização.

Figura 5.14: Ganho em função do comprimento de onda para uma potência óptica de -10 dBm e para uma corrente de polarização de 100 mA.

Figura 5.15: Ganho em função da corrente de polarização para várias potências de entrada a 1490 nm.

Figura 5.16: Figura de Ruído em função da corrente de polarização para várias potências de entrada a 1490 nm.

Figura 5.17: Integral da potência de ASE em função da corrente de polarização para várias potências de entrada a 1490 nm para uma largura de banda de 20 nm.

Figura 5.18: Ganho em função da corrente de polarização para diferentes potências de entrada a 1310 nm.

Figura 5.19: Ganho em função da potência de entrada a 1310 nm para várias correntes de polarização.

Figura 5.20: Integral da potência de ASE em função da corrente de polarização sem sinal à entrada. Foi considerada uma largura de banda de 10 nm em torno dos 1310 nm.

Figura 5.21: Ganho em função da corrente de polarização para várias potências de entrada a 1310 nm.

Figura 5.22: Figura de Ruído em função da corrente de polarização para várias potências de entrada a 1310 nm.

Figura 5.23: Integral da potência de ASE em função da corrente de polarização para várias potências de entrada a 1310 nm para uma largura de banda de 80 nm.

Figura 5.24: Protótipo proposto para a *Extender Box*

Figura 5.25: Equipamento EPON disponível no laboratório de óptica: (a) OLT e (b) ONUs

Figura 5.26: Montagem Experimental para o teste do equipamento EPON. No topo para o tráfego *downstream* e em baixo para o tráfego *upstream*.

Figura 5.27: Taxa de pacotes errados para o canal de *downstream* sem a *Extender Box*.

Figura 5.28: Taxa de pacotes errados para o canal de *upstream* sem a *Extender Box*.

Figura 5.29: Montagem Experimental para teste dos amplificadores de *downstream* para a *Extender Box*.

Figura 5.30: Sequência de bits obtida para a situação de máximo *power budget* (59 dBs) à saída do segundo VOA.

Figura 5.31: Taxa de pacotes errados para combinações de *power budgets* na OTL e ODN usando o amplificador IPG Photonics TAD-20.

Figura 5.32: Sequência de bits obtida para a situação de máximo *power budget* (51 dBs) à saída do segundo VOA.

Figura 5.33: Taxa de pacotes errados para combinações de *power budgets* na OTL e ODN usando o amplificador CIP SOA-S-OEC-1550.

Figura 5.34: Montagem Experimental para teste do amplificador de *upstream* para a *Extender Box*.

Figura 5.35: Taxa de pacotes errados para combinações de *power budgets* na ODN e OTL usando o amplificador Alphion SOA29p.

Figura 5.36: Montagem Experimental para emular um cenário GPON com 60Km e 128 clientes.

Figura A.1: Esquema de interligação entre o IXIA e o Equipamento a testar.

Figura B.1: Exemplo de ligação do IXIA com um sistema a testar.

Figura B.2: Esquema de interligação entre os portos 10GE do IXIA e o sistema a testar.

Figura C.1: Montagem Experimental para o teste do cenário 128 clientes 60 km (55 km na OTL e 5 km na ODN). A atenuação correspondente aos 40 km que falta é

emulada com os VOAs da Extender Box, 35 km com os VOAs do lado da OLT e 5 km com os VOAs do lado das ONUs.

Figura D.1: Esquema geral da rede óptica passiva CWDM analisada. Os espectros medidos para cada canal em back-to-back são apresentados assim como o espectro medido para o laser de Raman. A potência do laser de Raman foi configurada para 1W e foi usado um atenuador de 20 dB para proteger o OSA.

Figura D.2: Caracterização da EDF de 15 metros para os comprimentos de onda dos canais considerados.

Figura D.3: (a) Ganho on/off dos canais CWDM retirados usando apenas amplificação de Raman e usando amplificação híbrida Raman/EDFA. (b) Figura de ruído dos canais CWDM retirados usando apenas amplificação de Raman e usando amplificação híbrida Raman/EDFA.

(Esta página foi deixada em banco intencionalmente.)

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Níveis de potência óptica definidos para a classe B+ em 2.4/1.2 Gbit/s em GPON [9]

Tabela 2.2: Parâmetros (mais relevantes) da *Extender Box* baseada em amplificadores ópticos [9]

Tabela 2.3: Níveis de potência óptica definidos para o EPON 1000BASE-PX20 [10]

Tabela 3.1: Características principais da *Extender Box* da Alphion [2]

Tabela 3.2: Características principais da *Extender Box* da Telnet [3]

Tabela 5.1: Características principais dos *Add/Drop Filters*

Tabela 5.2: *Power budgets* totais obtidos para cada um dos amplificadores testados e o ganho em relação à situação onde não é usado *Extended Reach*.

Tabela B.1: Especificações operacionais do Transmissor (Bookham IGF-32511J).[39]

Tabela B.2: Especificações operacionais do Receptor (Bookham IGF-32511J) [39]

(Esta página foi deixada em banco intencionalmente.)

Lista de Acrónimos

10GEAPON	10 Gigabit Ethernet Passive Optical Network
ASE	Amplified Spontaneous Emission
BER	Bit Error Rate
BAPON	Broadband Passive Optical Network
DBRu	Dynamic Bandwidth Report upstream
DBRu	Dynamic Bandwidth Report upstream
DCF	Dispersion Compensation Fiber
DFA	Doped Fiber Amplifier
EDF	Erbium Doped Fiber
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier
EPON	Ethernet Passive Optical Network
FP-SOA	Fabry-Perot Semiconductor Optical Amplifier
FWM	Four Wave Mixing
GEM	Gigabit-capable Passive Optical Network Encapsulation Method
GPON	Gigabit Passive Optical Network

GTC	Gigabit-capable Passive Optical Network Transmission Convergence
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IPN	Intelligent PON Node
ITU	International Telecommunication Union
ODN	Optical Distribution Network
OEO	Optical Electrical Optical
OLT	Optical Line Termination
ONU	Optical Network Unit
OTL	Optical Trunk Line
PER	Packet Error Rate
PLOu	Physical Layer Overhead upstream
PR	Polarization Rotator
QD-SOA	Quantum-Dot Semiconductor Optical Amplifier
SGM	Self-Gain Modulation
SMF	Single Mode Fiber
SNMP	Simple Network Management Protocol
SOA	Semiconductor Optical Amplifier
SPM	Self-Phase Modulation
SSMF	Standard Single Mode Fiber
TDMA	Time Division Multiplex Access
TW-SOA	Travelling-Wave Semiconductor Optical Amplifier
WDM	Wave Division Multiplex
XGM	Cross-Gain Modulation
XG-PON	10 Gigabit Passive Optical Network

Capítulo 1. Introdução

1.1 Contexto

A tecnologia GPON está a ser comercializada em diversos países do mundo. Em alguns casos a sua implementação já é bastante elevada; estamos a falar de países como a Coreia do Norte, Índia, Suécia, Japão, Emirados Árabes Unidos, etc. Através da resolução do Conselho de Ministros 120/2008, o Estado Português, em conjunto com as diversas operadoras do país, comprometeu-se a implementar uma cobertura de redes ópticas passivas, a uma significativa percentagem da população, estando já a ser investida uma grande quantidade de recursos.

Na generalidade dos cenários urbanos, o standard GPON consegue satisfazer a maioria dos clientes sem grandes adaptações. No entanto, para cenários mais rurais e dispersos (interior e sul do país ou países de grande dimensão) o equipamento standard não consegue operar. As margens de potência que a norma define não se coadunam com este tipo de cenários, onde as distâncias são maiores que 20 Km (definido na norma [11]) e o rácio de divisão são pequenos.

Uma das formas de solucionar este problema passará pela instalação de equipamento de classe superior. Esta solução acarreta um maior custo e, em muitos casos não irá ser suficiente, pois o acréscimo de margem é pequeno, tendo como consequência, a ausência de cobertura em algumas zonas. A outra solução consistirá em instalar um

dispositivo que permita aumentar o alcance físico do sinal, quer em amplitude, quer em qualidade.

A presente dissertação assenta na segunda solução. Para tal, procurou-se investigar e propor um dispositivo que fosse capaz de aumentar as capacidades básicas da tecnologia GPON, para suprir as actuais dificuldades. Assim, por simplicidade, passaremos a chamar este dispositivo de *Extender Box*.

A norma GPON já define, na recomendação G984.6 [9], a possibilidade de integrar uma *Extender Box* para aumentar as capacidades da GPON. São definidos na norma os requisitos necessários para que este dispositivo não seja incompatível com os restantes equipamentos já existentes, nomeadamente, OLTs e ONUs. O ITU apresenta requisitos para duas implementações: amplificadores ópticos e regeneradores eléctricos. A escolha passa pelo uso de amplificadores ópticos, pois procura-se um dispositivo totalmente óptico.

1.2 Organização

Este documento está organizado em seis capítulos, estruturados da seguinte forma:

- Introdução;
- Normas para as Redes de Acesso;
- Estado da Arte;
- Amplificadores Ópticos
- Extender Box
- Conclusões
- Anexos

Na introdução apresenta-se o contexto do projecto, a organização do documento e as suas contribuições.

No capítulo seguinte é feita uma análise aos requisitos de duas redes ópticas passivas, GPON e EPON, na óptica da construção da *Extender Box*. A norma EPON é aqui

também incluída por razões de limitação laboratorial, pois não se dispõe de equipamentos GPON, nomeadamente de OLT e ONUs.

No terceiro capítulo são apresentadas as *Extender Box*, já disponíveis no mercado, no qual são descritas as suas características, capacidades e discutidas também as vantagens e desvantagens de cada implementação.

No capítulo quatro apresentam-se os três tipos de amplificadores ópticos que existem, explicando-se os seus princípios de operação e as suas características. São enunciadas as vantagens e desvantagens de cada tipo de amplificador realçando-se a sua aplicação em redes ópticas de acesso.

No capítulo seguinte, são dados a conhecer os amplificadores ópticos disponíveis no laboratório. Aqui, procede-se à sua caracterização e procura do ponto ideal de funcionamento de cada um. É apresentado o protótipo para a *Extender Box* que se pretende construir, descrito o seu funcionamento e as suas características. Apresentam-se os resultados dos testes efectuados aos amplificadores em cenários reais de *Extended Reach* e, por fim, demonstra-se o funcionamento da *Extender Box*, num cenário de 60 km e 128 clientes.

No último capítulo são descritas as conclusões e sugeridos alguns trabalhos futuros na área de *Extended Reach*.

1.3 Contribuições

As principais contribuições deste trabalho são as seguintes:

- Descrição dos requisitos necessários à construção de uma *Extender Box* para a tecnologia GPON.
- Análise dos princípios de funcionamento e das características principais dos amplificadores ópticos.
- Descrição e análise das soluções disponíveis do mercado para *Extended Reach*.
- Dimensionamento de um protótipo para *Extended Reach* em GPON

- Demonstração prática da viabilidade do protótipo para aumentar para 60 Km e 128 clientes as capacidades de um sistema GPON
- Demonstração experimental de uma técnica de equalização do ganho para redes CWDM-PON usando um amplificador híbrido Raman/EDFA.

Capítulo 2. Normas para as Redes de Acesso

2.1 Introdução

A crescente necessidade de largura de banda exigida pelos clientes e a saturação das redes de cobre actuais, levou os operadores a optarem por mudar o meio de transporte da informação do cobre para a fibra óptica. Esta nova visão levou ao aparecimento de sistemas de transmissão ópticos para redes de acesso e redes locais, onde se incluem o GPON e o EPON.

A norma que define as recomendações para a tecnologia GPON (G.984) foi redigida pelo ITU (*International Telecommunication Union*) em 2008. [12] No caso do EPON (802.3ah), a norma que define as recomendações para a tecnologia foi redigida pelo IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) em 2004. [10]

Nas seguintes secções serão abordados os detalhes relativos a cada uma destas tecnologias, de forma a averiguar os seus requisitos e as suas limitações.

2.2 Norma GPON

Numa visão mais geral, com a tecnologia GPON pretende-se implementar redes de acesso domésticas e empresariais onde a velocidade da ligação não seja inferior a 1.2 Gbit/s. Para isso, recorre-se a ligações de fibra óptica, onde se definem dois pares de

velocidades: 1.2 Gbit/s para *upstream* e 2.4 Gbit/s para *downstream* ou 2.4 Gbit/s para *upstream* e 2.4 Gbit/s para *downstream*. Desta forma, permite-se ao operador disponibilizar serviços para clientes residenciais e clientes empresariais de alta velocidade, que podem ser usadas para suportar serviços de dados, televisão e telefone, bem como ligações privadas para empresas e instituições.

As limitações físicas da tecnologia impõem um alcance máximo de 10 ou 20 Km, que depende da classe de equipamentos utilizada. De qualquer forma, em termos de distância o limite da tecnologia é 60 Km - limite lógico imposto pela norma. [11] Esta recomenda 64 como número máximo de clientes a servir. É do interesse dos operadores que o número de clientes servidos seja o maior possível, daí que na camada de transmissão seja recomendado que a mesma suporte 128 clientes. O valor de 64 clientes deve-se apenas a limitações físicas dos equipamentos, esperando-se, no entanto, uma rápida evolução da tecnologia, para que passe a suportar os 128 clientes. [11]

A configuração de referência para a GPON é apresentada na figura 2.1.

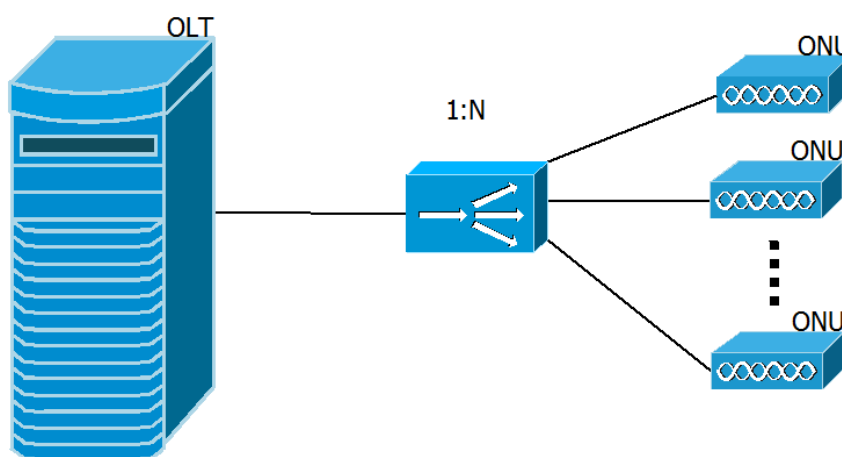


Figura 2.1: Configuração de referência da GPON

Aqui podem-se observar os componentes básicos necessários à implementação de uma rede GPON: a OLT (*Optical Line Termination*), a ONU (*Optical Network Unit*), o *splitter* óptico e a fibra óptica.

- A OLT é o dispositivo que faz o interface entre a rede de acesso e a rede de transporte do operador. É responsável pela gestão e manutenção da rede de distribuição e das funções da ONU.

- A ONU é o dispositivo que termina a rede óptica de acesso servindo de ponte entre esta e a rede de cobre que irá servir o cliente.
- A função do *splitter* óptico é, como o nome indica, dividir o sinal que vem da OLT por todas as fibras secundárias que ligam às ONUs.
- Por último, a fibra óptica, que é o meio de propagação da informação.

O acesso ao meio é baseado em TDMA (*Time Division Multiplex Access*) onde cada cliente tem o seu intervalo temporal para enviar e receber informação. [12]

Na subsecção seguinte abordar-se-á mais pormenorizadamente os aspectos relevantes na norma que estão directamente relacionados com a construção de uma *Extender Box*.

2.2.1 Enquadramento e Requisitos

A norma define várias abordagens para a implementação da tecnologia GPON. A escolha do mercado [11] recaiu no uso de apenas uma fibra onde é feita a multiplexagem do comprimento de onda usado para *downstream* e para *upstream*. As velocidades de transmissão são de 2.4 Gbit/s e 1.2 Gbit/s para *downstream* e *upstream* respectivamente. O equipamento considerado é o de classe B+ e o alcance é de 20 Km.

Os comprimentos de onda a ser multiplexados na fibra são de 1310 nm e 1490 nm, o primeiro para *upstream* e o segundo para *downstream*. A escolha destes valores pode ser explicada pela necessidade de ter ONUs mais acessíveis em termos económicos, daí ter sido escolhida a banda O, onde a dispersão é mínima, permitindo o uso de lasers com largura espectral mais relaxada e, consequentemente, mais económicos. A escolha da banda S para *downstream* está relacionada com a baixa atenuação que a banda S apresenta, deixando-se a banda C para futuras tecnologias que operam a velocidades muito superiores, da ordem dos 10 Gbit/s, nomeadamente o XG-PON.

Para que a rede seja viável comercialmente, é necessário que esta tenha requisitos bem definidos. Estes impõem valores mínimos e máximos de potência a circular

na rede, de maneira a evitar taxas de erros elevadas. Valores baixos de potência óptica geram altas taxas de erro, pois o sinal não tem potência suficiente para se sobrepor ao ruído. Valores altos de potência óptica geram efeitos não lineares que degradam significativamente o sinal, elevando também a taxa de erro. Valores elevados de potência óptica são também prejudiciais para os utilizadores da rede, domésticos e de manutenção. Foram definidos valores de potências ópticas ao longo da linha, para se conseguir uma BER nunca superior a 10^{-10} . Para o valor das perdas máximas na linha foi definido o valor de 28 dB quer para *downstream* quer para *upstream*. Como valor mínimo de perdas foi recomendado o valor de 13 dB. [9]

Os valores mínimos e máximos de potência óptica para os emissores e receptores da OLT e ONU são apresentados na tabela 2.1. A fibra óptica a ser utilizada é a fibra monomodo definida pelo ITU sobre a norma G.652. Com os sistemas instalados a funcionar sobre estes pressupostos, a *Extender Box* terá de funcionar necessariamente nestas condições.

OLT		
Parâmetros	Unidades	Valor
Potência óptica emitida máxima	dBm	+5.0
Potência óptica emitida mínima	dBm	+1.5
Sensibilidade mínima	dBm	-28.0
Máxima potência óptica no receptor	dBm	-8.0
ONU		
Parâmetros	Unidades	Valor
Potência óptica emitida máxima	dBm	+5.0
Potência óptica emitida mínima	dBm	+0.5
Sensibilidade mínima	dBm	-27.0
Máxima potência óptica no receptor	dBm	-8.0

Tabela 2.1: Níveis de potência óptica definidos para a classe B+ em 2.4/1.2 Gbit/s em GPON [9]

2.2.2 Reach Extender

Nesta subsecção pretende-se focar os requisitos mais importantes da tecnologia GPON e que têm de ser considerados no desenvolvimento da *Extender Box*.

A necessidade de aumentar o alcance e o número de clientes servidos por uma OLT em GPON levou o ITU a criar orientações que os fabricantes pudessem seguir para atingir esse objectivo. A norma que define essas orientações [9] apresenta dois tipos de abordagem para a construção de uma *Extender Box*. Segundo a norma, a *Extender Box* pode ser construída recorrendo a amplificadores ópticos e/ou regeneradores eléctricos. No caso do recurso a amplificação óptica, a solução mais investigada e que tem colhido bons resultados é o uso de um par de amplificadores, um para *downstream* e outro para o *upstream*. [13]

Caso a escolha recaia sobre o uso de repetidores eléctricos, pode-se optar pelo repetidor 2R ou 3R. O repetidor 2R faz a remodulação e a reamplificação do sinal e o repetidor 3R faz a remodulação, reamplificação e a retemporização do sinal. Em qualquer dos casos é feita uma conversão do sinal do domínio óptico para o domínio eléctrico e só depois é feito todo o processamento eléctrico. Após o processamento eléctrico, o sinal é novamente convertido para o domínio óptico. Como seria de esperar, em termos de desempenho, os regeneradores 3R apresentam melhores resultados do que os regeneradores 2R. [14] Na figura 2.2 é apresentada a recomendação de integração da *Extender Box* nos sistemas GPON.

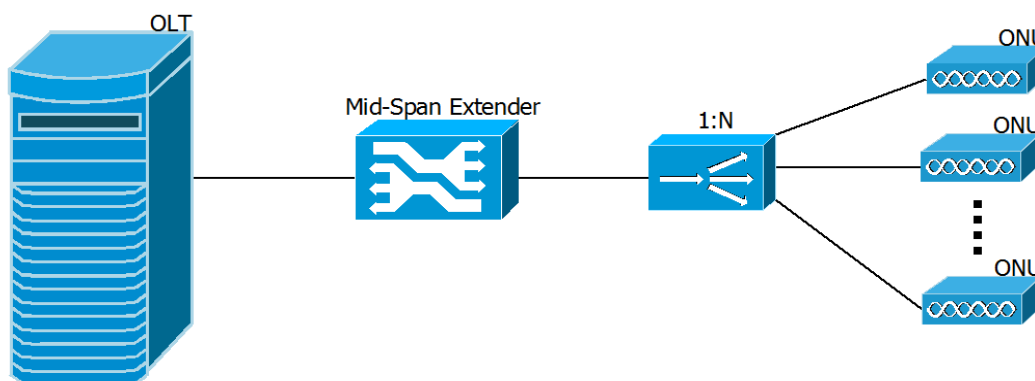


Figura 2.2: Esquema de integração de uma *Extender Box*

Para a construção de uma *Extender Box* é necessário conhecer alguns parâmetros essenciais da rede, para que a integração na mesma não degrade nem altere o seu funcionamento. Há necessidade de garantir que o *Extender* consiga operar de maneira transparente para os nós da rede ou muito perto disso. Com a introdução da *Extender Box* novos parâmetros são definidos. Na OTL (*Optical Trunk Line*), definida entre a OLT e a

Extender Box, no máximo podemos perder 28 dB em *upstream* e 23 dB em *downstream*. Na ODN (*Optical Distribution Network*), definida entre o *Extender* e as ONUs, as perdas têm de estar compreendidas no intervalo de 13 a 28 dB. Os parâmetros relativos à *Extender Box*, onde se utilizam amplificadores ópticos, são apresentados na tabela 2.2. Todos estes parâmetros, mais uma vez, devem ser seguidos de forma a manter a taxa de erros inferior a 10^{-10} . Um dos problemas do uso de amplificadores ópticos prende-se com a introdução de ASE (*Amplified Spontaneous Emission*) na linha, que vai degradar o sinal a amplificar. Por esse motivo foram também definidos valores máximos de ASE que os amplificadores podem gerar.

			Unidades	Valor
Downstream	Emissor	Potência máxima	dBm	+ 5 + Ganho Máximo - Perdas OTL
		Potência mínima	dBm	+ 1.5 + Ganho Mínimo - Perdas OTL
		ASE Máxima @ -23 dBm de Potência de Entrada	dB	5
	Receptor	Sensibilidade Mínima	dBm	-23
		Potência Máxima	dBm	-5
Upstream	Emissor	Potência máxima	dBm	+ 5 -Atenuação mínima ODN + Ganho máximo
		Potência mínima	dBm	+ 0.5 -Atenuação máxima ODN + Ganho mínimo
		ASE Máxima @ -23 dBm de Potência de Entrada	dB	7
	Receptor	Sensibilidade mínima	dBm	-28
		Potência máxima	dBm	-8

Tabela 2.2: Parâmetros (mais relevantes) da *Extender Box* baseada em amplificadores ópticos [9]

Na camada física, os sistemas GPON operam da seguinte forma: a OLT envia um sinal contínuo de *downstream* no qual vai a informação dirigida aos clientes. O pacote GTC de *downstream* tem a duração de 125 μ s e cada ONU retira a “sua” informação desse pacote. A informação direccionada a cada ONU é colocada dentro do pacote GTC recorrendo a outro tipo de pacote, o GEM, em que o *header* desse pacote GEM identifica a ONU a que se dirige essa informação. O funcionamento em sentido contrário, *upstream*, é feito em TDMA, cada ONU transmite num intervalo de tempo que é atribuído no pacote de *downstream* anterior. O pacote de *upstream* tem também a duração de 125 μ s e está sincronizado com o pacote de *downstream*. No pacote de *upstream* existem intervalos de

tempo onde não pode ser transmitida informação. O esquema de funcionamento destes é apresentado na figura 2.3.

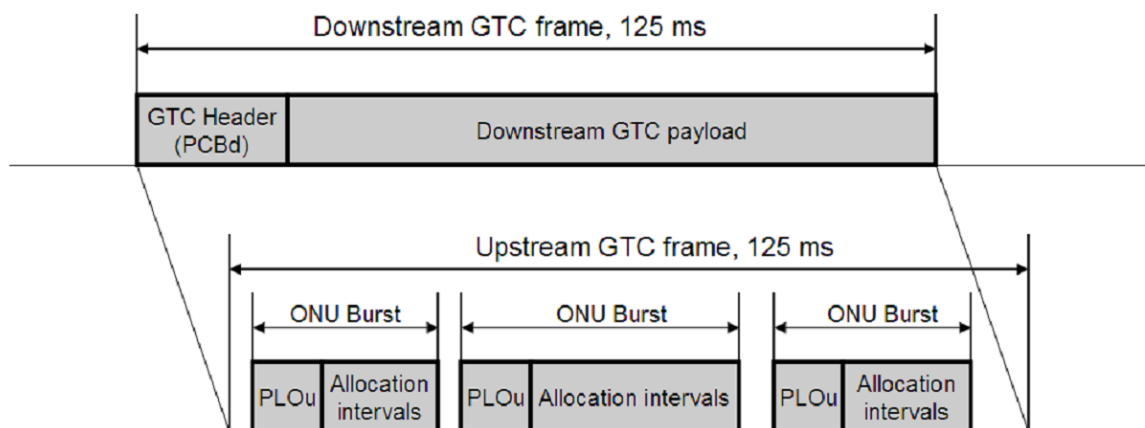


Figura 2.3: Esquema dos pacotes de *downstream* (no topo) e de *upstream* (em baixo) [1]

A existência de intervalos temporais onde não é transmitida nenhuma informação deve-se à necessidade de garantir que duas ONUs não têm os lasers ligados em simultâneo, o que poderia destruir o sinal de *upstream* de uma ou mais ONUs. É então definido um tempo de espera antes do *burst* de cada ONU ser transmitido. Esse tempo é denominado tempo de guarda (*Guard Time*). O esquema do pacote de *upstream* é apresentado na figura 2.4. O tempo de guarda varia consoante a velocidade de transmissão dos dados, sendo que para este caso, 1.2 Gbit/s, o tempo de guarda mínimo é de 32 bits, aproximadamente 26.67 ns. [11]

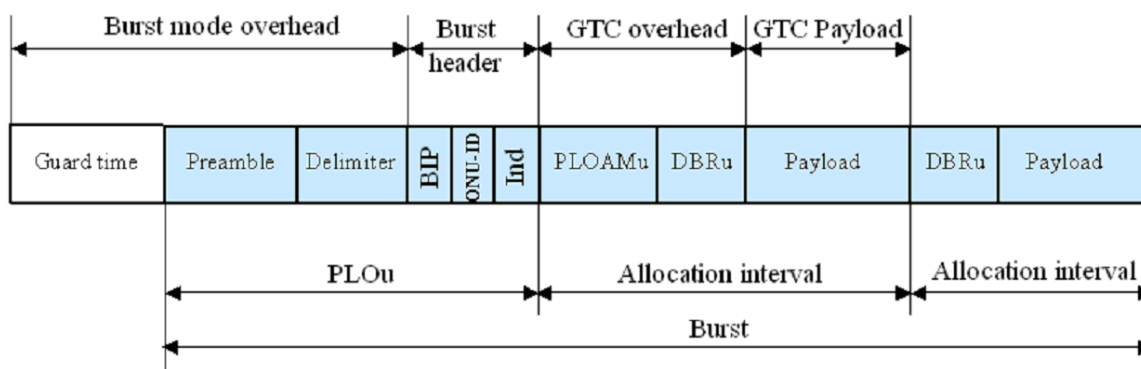


Figura 2.4: Detalhes de um Burst de upstream [1]

Do PLOu (*Physical Layer Overhead upstream*) do pacote de *upstream* fazem parte o preâmbulo, o *delimiter* e o *burst header*, como se pode ver na figura 2.4. O *burst header* tem um valor fixo de 3 bytes, o preâmbulo e o *delimiter* têm um valor sugerido de

44 bits e 20 bits respectivamente, para a velocidade de *upstream* considerada de 1.2 Gbit/s. [11]

Quando é atribuído um intervalo temporal a uma ONU, essa atribuição apenas é referente à carga paga do *burst*, ou seja, no intervalo temporal alocado não está incluído o tempo de guarda, o preâmbulo, *delimiter* nem o *burst header*. Faz parte então das tarefas da OLT garantir que esses tempos são tomados em conta, quando faz os mapeamentos dos intervalos de tempo a atribuir a cada ONU. Caso sejam definidos num pacote de *upstream* vários intervalos de tempo a uma ONU, estes terão de ser ou adjacentes, de maneira a não haver tempo morto entre transmissão, ou então deverão ser tomados em conta os tempos necessários para o início de um *burst*: o tempo de guarda e o PLOu. No primeiro caso, onde os intervalos de alocação são adjacentes, não é necessário voltar a introduzir o tempo de guarda nem voltar a transmitir o PLOu. A figura 2.4 ilustra também esta situação. Cada intervalo temporal alocado a uma ONU tem um tamanho mínimo de 2 bytes, que corresponde à transmissão apenas do DBRu (*Dynamic Bandwidth Report upstream*). [1]

A operação em *burst mode* por parte das ONUs gera uma complicação extra no dimensionamento do amplificador de *upstream*, daí a importância de especificar muito bem os tamanhos de pacote e os tempos mínimos e máximos que uma ONU pode beneficiar durante o seu acesso ao meio, de maneira a cobrir todos os casos possíveis de operação. No caso do *downstream* não há este tipo de problemas, pois a transmissão é feita em modo contínuo. Quando não há informação a transmitir para alguma das ONUs, ou quando a informação não enche a totalidade do pacote de *downstream*, este é completado por pacotes GEM cujo cabeçalho tem o valor fixo 0xB6AB31E055, que identifica esse pacote GEM como um *idle frame*. O receptor usa estes pacotes apenas para manter o sincronismo. Os pacotes de *downstream*, como os de *upstream*, são baralhados usando um polinómio síncrono. O polinómio usado é x^7+x^6+1 . Desta forma não há grandes sequências de 0s ou 1s que poderiam fazer o receptor perder o sincronismo. O valor 0xB6AB31E055 é já um valor obtido após a passagem pelo polinómio, pois, previamente, corresponde a um *header* GEM, onde todos os bits são 0s.

2.3 Norma EPON

A norma EPON é, a par da GPON, uma outra solução para implementar redes ópticas passivas de acesso. As duas tecnologias são semelhantes a nível físico e funcionam as duas sobre o pressuposto de TDMA. No caso do EPON as velocidades de transmissão são de 1.25 Gbit/s quer para *downstream* quer para *upstream*, mas a taxa máxima de transmissão de dados é de 1 Gbit/s. Isto deve-se ao facto de o EPON usar codificação 8B/10B. As distâncias máximas suportadas são de 10 ou 20 Km e o número de clientes máximo suportado é 64. A configuração de referência do EPON é igual à da GPON (figura 2.1) sendo constituída por um *splitter*, a fibra óptica, a OLT e as ONUs. A única diferença reside no tipo de OLTs e ONUs, que agora passam a ser de EPON.

2.3.1 Enquadramento e Requisitos

Como foi referido na introdução, não é possível testar a *Extender Box* com um sistema GPON. Desta forma foi necessário averiguar os requisitos do sistema EPON disponível no laboratório. O sistema EPON do laboratório está desenhado para suportar no máximo 20 Km de distância entre OLT e ONUs. Os comprimentos de onda de funcionamento são para *downstream* 1490 nm e para *upstream* 1310 nm. Em relação às perdas de inserção máximas, a norma define que podemos perder 24 dB em *upstream* e 23.5 dB em *downstream*. No mínimo o sistema deverá ter 10 dB de perdas de inserção.

Os níveis de potência óptica definidos nos receptores e emissores da OLT e das ONUs para o EPON são apresentados na tabela 2.3.

O IEEE perante as necessidades de aumento das capacidades da tecnologia PON criou uma outra norma a que chamou 10GEPON, onde é aumentada a velocidade de transmissão para 10Gbit/s.

OLT		
Parâmetros	Unidades	Valor
Potência óptica emitida máxima	dBm	+7.0
Potência óptica emitida mínima	dBm	+2.0
Sensibilidade mínima	dBm	-27.0
Máxima potência óptica no receptor	dBm	-6.0
ONU		
Parâmetros	Unidades	Valor
Potência óptica emitida máxima	dBm	+4.0
Potência óptica emitida mínima	dBm	-1.0
Sensibilidade mínima	dBm	-24.0
Máxima potência óptica no receptor	dBm	-3.0

Tabela 2.3: Níveis de potência óptica definidos para o EPON 1000BASE-PX20 [10]

2.4 Compatibilidade entre GPON e EPON para testes

As duas tecnologias são muito semelhantes ao nível físico (PHY), sendo que o GPON leva alguma vantagem pois permite alguns dBs adicionais (4.5 dB em *downstream* e 4 dB em *upstream*) nos seus valores de perdas máximas ao longo da linha.

Ao nível das camadas superiores as diferenças acentuam-se. Há diferenças significativas em termos de eficiência, alcance, largura de banda, custo por utilizador, entre outras. [15-16] Além da velocidade da GPON ser superior, esta é mais eficiente nas alocações e nos tempos atribuídos aos pacotes de *upstream*, o que faz com que o GPON tenha uma performance superior. [17]

A implementação e o teste da *Extender Box* apenas com um sistema EPON impõem algumas limitações. O EPON tem um *power budget* inferior, logo em termos de potências ópticas deverá ter-se atenção apenas aos níveis de ruído gerados. A maior diferença é o limite de 20 km de fibra no EPON. Esta limitação pode ser parcialmente ultrapassada, pois é possível simular a passagem por fibra com atenuadores. A dispersão e o atraso introduzido na linha não é possível emular, mas desde que não se ultrapassem os 60 Km definidos na norma GPON, em princípio, não causará dificuldades. Apesar de, em primeira análise, se poder utilizar o EPON como base de desenvolvimento, o teste de integração com um sistema GPON não pode ser esquecido.

Capítulo 3. Estado da Arte

3.1 Introdução

A necessidade de reduzir os recursos necessários à instalação de redes de acesso GPON levou os construtores de equipamento a colocar no mercado dispositivos prontos a serem utilizados pelos operadores, para aumentar o alcance das redes ópticas de acesso.

Neste capítulo, apresentam-se as soluções que estão disponíveis no mercado e é discutida a tecnologia em que são baseadas. Aqui são apresentados três dispositivos que permitem aumentar o alcance e a capacidade das redes ópticas de acesso. Apenas dois deles podem funcionar com o GPON: o PON.ext da Alphion e o GPON Extender v1.1 da Telnet. O terceiro dispositivo da Teknovus, o Intelligent Pon Node, apenas é compatível com o EPON, mas é aqui apresentado devido a conseguir uma grande distância de alcance e um grande número de clientes servidos. Os três dispositivos são baseados em tecnologias diferentes. A Alphion recorreu a amplificadores ópticos e a Telnet usa repetidores eléctricos. A Teknovus utiliza repetidores eléctricos e WDM para aumentar o número de clientes.

3.2 Aliphion PON.ext

A *Extender Box* da Aliphion é baseada em amplificadores ópticos e permite aumentar a capacidade da classe B+ da GPON para servir 128 clientes a distâncias da OLT de 60 Km. A gama de amplificação deste sistema cobre a banda dos 1490 nm e dos 1310 nm. É transparente a protocolos e velocidades de transmissão e pode ser utilizada, além de no GPON, em BPON e EPON. A PON.ext é apresentada na figura 3.1.



Figura 3.1: Aliphion PON.ext™ [2]

A solução da Aliphion usa amplificadores SOA desenhados também pela própria, onde o amplificador de *downstream* apresenta um ganho de 23 dB e o amplificador de *upstream* apresenta um ganho de 26 dB. Os amplificadores SOA apresentam uma resposta rápida no tempo o que permite acomodar tanto sinais contínuos de *downstream* como sinais em *burst mode* de *upstream*. Além dos amplificadores, fazem parte da *Extender Box* filtros ópticos para limitar o ruído, *multiplexers* ópticos, detectores de potência óptica, quer à entrada quer à saída da *Extender Box*, e toda a electrónica de controlo e alimentação do dispositivo. Os filtros ópticos são utilizados para limitar a ASE. O amplificador de *upstream* tem um filtro de 40 nm centrado em 1310 nm para que a ASE não ultrapasse os limites impostos pela norma. Para limitar o ruído do amplificador de *downstream* é também introduzido um filtro. Os *multiplexers* ópticos separam os sinais de *upstream* e *downstream* para diferentes fibras, que depois de amplificados isoladamente voltam a ser inseridos numa só fibra com a ajuda de outro *multiplexer* óptico. Os detectores

de potência controlam os limites impostos na norma para as potências a circular na linha e, além disso, ajudam no caso de haver alguma falha, à sua localização mais eficiente. A *Extender Box* suporta gestão por SNMPv2 o que facilita a sua integração e configuração. Na tabela 3.1 são apresentadas as características principais da PON.ext e na figura 3.2 é apresentado o esquema interno. Como se pode ver a *Extender Box* da Aliphion não suporta internamente um amplificador de vídeo, mas já faz a sua separação para permitir a sua amplificação.

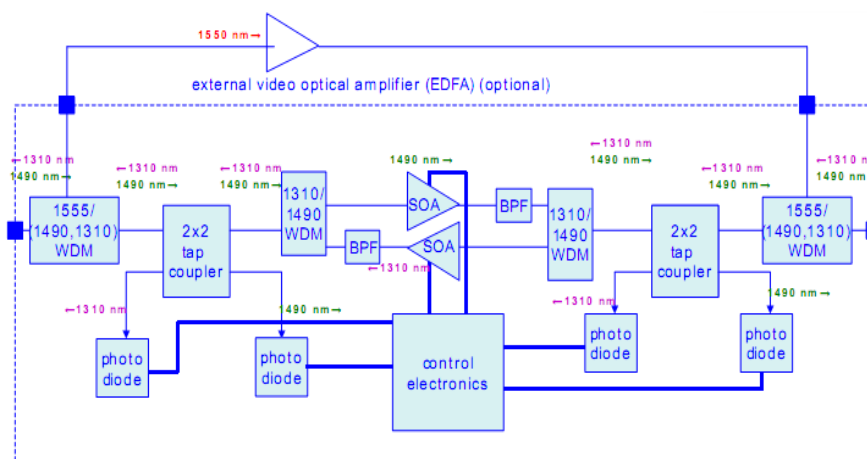


Figura 3.2: Esquema interno do Aliphion PON.ext™

PON.ext - Downstream		
Parâmetros	Unidades	Valor
Potência óptica mínima à entrada	dBm	-23
Ganho mínimo @ -23 dBm à entrada	dB	+23
Excursão máxima do ganho @ -23 dBm à entrada	dB	+2
Potência de saturação mínima à saída (3 dB)	dBm	+8
Figura de ruído máxima à saída @ -23 dBm à entrada	dB	+9.5
PON.ext - Upstream		
Parâmetros	Unidades	Valor
Potência óptica mínima à entrada	dBm	-28
Ganho mínimo @ -28 dBm à entrada	dB	+26
Excursão máxima do ganho @ -28 dBm à entrada	dB	+4
Potência de saturação mínima à saída (3 dB)	dBm	+7
Figura de ruído máxima à saída @ -28 dBm à entrada	dB	+8
PON.ext – Especificações Gerais		
Parâmetros	Unidades	Valor
Máxima potência consumida @ 50 °C	W	34
Temperatura de Operação	°C	+5 to +50
Preço	€ (aprox.)	N.A.

Tabela 3.1: Características principais da *Extender Box* da Aliphion [2]

3.3 Telnet GPON Extender v1:1

A *Extender Box* da Telnet é baseada em regeneradores eléctricos. O sinal é detectado e convertido para o domínio eléctrico e só depois é feita a regeneração. Depois de o sinal ser regenerado electricamente, é novamente convertido para o domínio óptico.

A *Extender Box* regenera os sinais de 1310 nm e 1490 nm, e adicionalmente permite a amplificação óptica, com recurso a um EDFA, do canal de vídeo transmitido sobre os 1550 nm. Permite aumentar o alcance do sinal GPON para 60 Km e o número de clientes para 128, ainda que não seja claro no *datasheet* que as duas situações sejam possíveis com apenas um dispositivo. Faz-se esta referência devido à figura 3.3 que aparece no *datasheet* da *Extender Box*, onde se podem ver dois dispositivos *Extender Box* para a situação de 60 Km e 128 clientes.

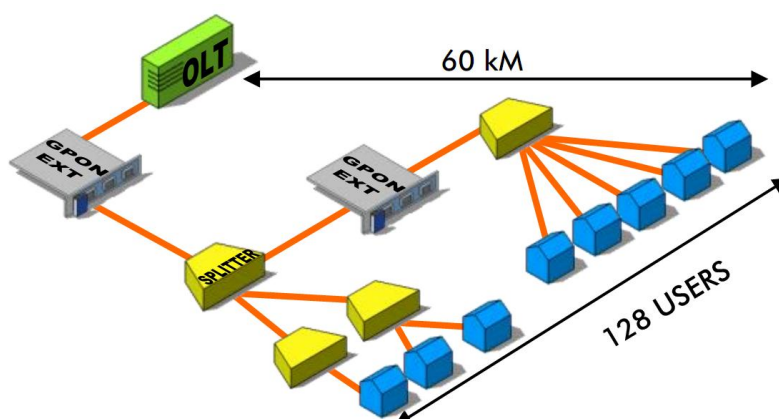


Figura 3.3: Exemplo de aplicação no terreno da *Extender Box* da Telnet [3]

A *Extender Box* da Telnet recorre à conversão dos sinais ópticos para sinais eléctricos com a ajuda de fotodetectores. Seguidamente é feita a amplificação dos sinais eléctricos e a conversão novamente para o domínio óptico com a ajuda de um laser. Não é feita nenhuma mudança de comprimento de onda, os comprimentos de onda dos lasers são os mesmos da OLT e da ONU. A detecção e conversão dos sinais ópticos não dispensa o uso de *multiplexers* ópticos para separar os três canais, neste caso temos também de separar o canal de vídeo que circula nos 1550 nm. Depois da regeneração e conversão para o domínio óptico são multiplexados novamente numa única fibra. Este tipo de solução permite que seja possível o uso de cascatas deste tipo de *Extender Box*. Na figura 3.4 é apresentada a solução da Telnet.



Figura 3.4: TELNET GPON Extender v1:1[3]

O canal de vídeo é amplificado com a ajuda de um amplificador de fibra dopada. O EDFA permite um ganho de aproximadamente 20 dB com uma figura de ruído inferior a 5 dB. A *Extender Box* é configurada remotamente por SNMP. Na tabela 3.2 são apresentadas as características principais da GPON Extender v1:1.

GPON Extender v1:1 - Downstream		
Parâmetros	Unidades	Valor
Potência óptica mínima à entrada	dBm	-28
Potência óptica máxima à entrada	dBm	-8
Potência óptica transmitida à saída	dBm	2.0
GPON Extender v1:1 - Upstream		
Parâmetros	Unidades	Valor
Potência óptica mínima à entrada	dBm	-26
Potência óptica máxima à entrada	dBm	-10
Potência óptica transmitida à saída	dBm	1
Extinction Ratio do transmissor	dB	> 20
GPON Extender v1:1 - Parâmetros Temporais		
Parâmetros	Unidades	Valor
High/Low Ratio	dB	15
Espaçamento mínimo entre pacotes	ns	25
Período máximo de estabilização	ns	8
Tempo de atraso no repetidor para downstream	ns	9
Tempo de atraso no repetidor para upstream	ns	2
GPON Extender v1:1 – Especificações Gerais		
Parâmetros	Unidades	Valor
Máxima potência consumida (sem EDFA)	W	6
Temperatura de Operação	°C	50 to 85
Preço (sem EDFA)	€ (aprox.)	1084

Tabela 3.2: Características principais da *Extender Box* da Telnet [3]

3.4 Teknovus Intelligent PON Node (IPN)

A *Extender Box* da Teknovus é a opção mais ambiciosa que é apresentada neste capítulo. Apesar de não suportar a tecnologia GPON, a sua capacidade de aumentar para 100 Km e 512 clientes a capacidade da OLT justifica a sua inclusão no mesmo.

Na figura 3.5 é apresentada a solução da Teknovus e na figura 3.6 apresenta-se a arquitectura e um diagrama de blocos. Como se pode ver pela arquitectura apresentada na figura 3.6 o IPN recebe vários canais multiplexados numa única fibra criando depois 4 PONs independentes. Recorre à tecnologia WDM para aumentar o número de clientes servidos e permite distâncias de até 100 Km, ainda que para isso o sistema tenha de ter uma OLT especial, visto esta ter de suportar WDM e distâncias superiores a 20 Km, o que encarece os dispositivos. Além disso aumenta o alcance da rede para os 100 Km recorrendo à retemporização dos pacotes EPON feita no IPG.[4]



Figura 3.5: Teknovus Intelligent PON Node [4]

Do lado dos clientes, os componentes quer do IPG quer dos clientes, são os característicos do EPON, o que permite cortar nos custos de interfaces que suportem WDM. Os comprimentos de onda também são os mesmos para cada uma das 4 PONs. O IPN permite também o uso de OLTs *standard*, mas passará apenas a suportar uma só PON, o que diminui necessariamente o número de clientes servidos. A potência consumida, com as 4 PONs a funcionar, é de 20W, o que dá 5W por PON.

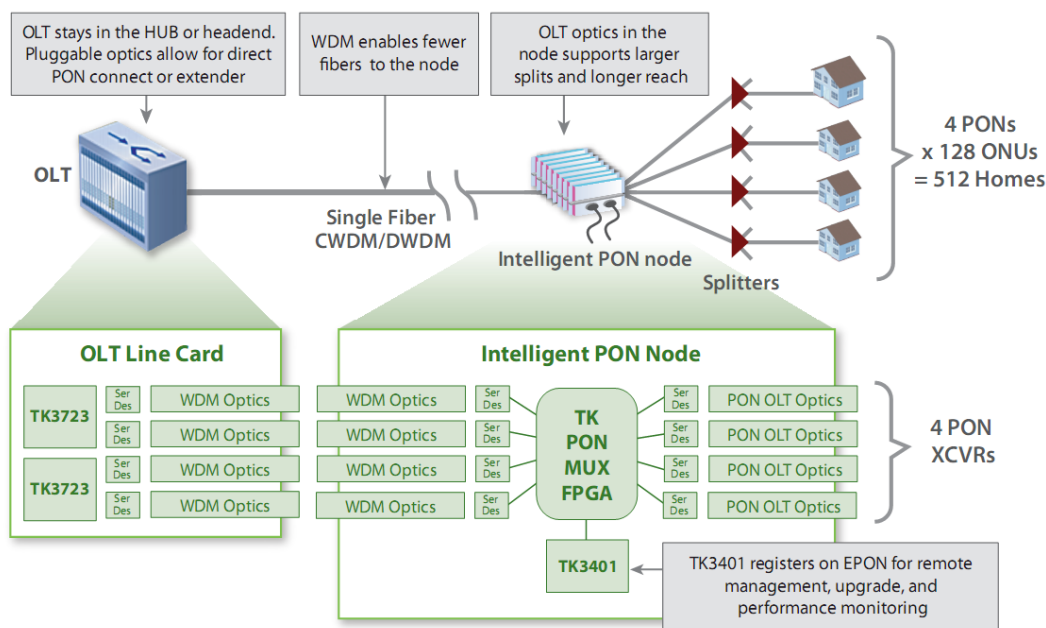


Figura 3.6: Arquitetura e Diagrama de Blocos do Intelligent PON Node [4]

3.5 Soluções Propostas para *Extended Reach* em GPON

As soluções encontradas no mercado para aumentar o alcance e o número de clientes suportados pelo GPON centram-se em dois tipos de abordagem: uns recorrem a amplificadores ópticos e outros à regeneração eléctrica.

A solução encontrada pela Aliphion é a que apresenta o melhor desempenho em termos de número de clientes servidos e distância atingida, mas tem claramente como desvantagem o facto de consumir muito mais potência que a solução da Telnet.

Os repetidores OEO representam uma solução barata, simples e o seu consumo energético é baixo. O sinal ao ser regenerado electricamente impede que seja introduzido ruído adicional, o que faz com que os regeneradores OEO tenham um alcance superior aos amplificadores ópticos. Têm também a vantagem de serem adaptáveis quando se migrar para soluções que usem WDM (IPG da Teknovus), não estando sujeitos a fenómenos não lineares, o que acontece com os amplificadores ópticos. Os repetidores têm como desvantagem o facto de não serem transparentes a formatos de modulação, nem a velocidades de transmissão. [13-14]

Com base nos dispositivos disponíveis no mercado, chega-se à conclusão que os amplificadores ópticos são uma boa opção para aumentar o alcance da GPON, como se pretende uma solução totalmente óptica, esta é a opção a seguir. Resta agora avaliar os tipos de amplificadores ópticos disponíveis que permitem construir uma *Extender Box*. No próximo capítulo são estudados três tipos de amplificadores ópticos e proceder-se-á à escolha da melhor solução a ser implementada em laboratório.

Capítulo 4. Amplificadores Ópticos

4.1 Introdução

Os amplificadores ópticos são hoje em dia parte integrante das redes ópticas instaladas. A sua flexibilidade no que se refere à adaptação a vários cenários, e o facto de serem transparentes a taxas de transmissão e formatos de modulação, fazem deles a primeira escolha quando há necessidade de aumentar a potência de um sinal óptico em amplitude e qualidade. [18]

Neste capítulo pretende-se apresentar os diferentes amplificadores disponíveis e analisar as suas características e aplicações. Vão ser abordados três tipos de amplificadores: os amplificadores de fibra dopada (DFA), os amplificadores ópticos semicondutores (SOA) e os amplificadores de Raman. Finalmente os três amplificadores vão ser analisados na óptica da sua integração na *Extender Box*.

4.2 Amplificadores de Fibra Dopada

Os amplificadores de fibra dopada, como o nome indica, são baseados na dopagem de fibra com iões de terras raras. Consoante o ião com que for dopada a fibra esta terá propriedades de amplificação diferentes. As primeiras experiências com lasers dopados com iões de terras raras foi feita em 1964, mas apenas há uns anos atrás é que a

tecnologia explodiu na aplicação em comunicações ópticas. [19] As fibras podem ser dopadas com vários íons, sendo que hoje em dia a dopagem mais utilizada é a dopagem com érbio. O érbio permite a amplificação na banda C, muito importante nas comunicações ópticas actuais, pois é a banda de utilização preferencial. [19] Outros dopantes podem também ser integrados, e sendo do interesse para a *Extender Box* a amplificação nas bandas O e banda S, podemos dopar a fibra com Praseodímio para a banda O e Túlio para a banda S. [20]

4.2.1 Princípios de Operação Básicos

Os princípios por detrás da operação dos amplificadores de fibra dopada são complexos. [19, 21-22] Nesta subsecção são apresentados os princípios básicos que nos vão permitir perceber o seu funcionamento.

As fibras dopadas são fibras onde o núcleo é uniformemente preenchido com íons de terras raras, sendo este íão o responsável pela amplificação. A operação deste tipo de amplificador é baseada no simples pressuposto de que se fornecermos aos íons de terras raras uma dada quantidade de energia eles mudam do seu estado fundamental para um estado excitado. Neste estado duas situações podem ocorrer: emissão espontânea ou emissão estimulada. Emissão estimulada é o fenómeno que nos interessa na amplificação. Quando um fóton de sinal chega ao DFA, os íons de terras raras transitam do seu estado excitado para o estado fundamental libertando um fóton com as mesmas características (fase, orientação e comprimento de onda) do fóton do sinal. Este fenómeno ao longo da fibra dopada aumenta o número de fótons com as características do sinal aumentando assim a sua potência. Este fenómeno é ilustrado na figura 4.1.

Na figura 4.2 é apresentado o outro fenómeno, emissão espontânea, onde a transição dos íons do estado excitado para o estado fundamental é feita sem que tenha havido qualquer estímulo por parte de um sinal. Isto gera um fóton com características aleatórias, prejudicial para a amplificação, pois o fóton libertado é ruído que vai degradar o sinal.

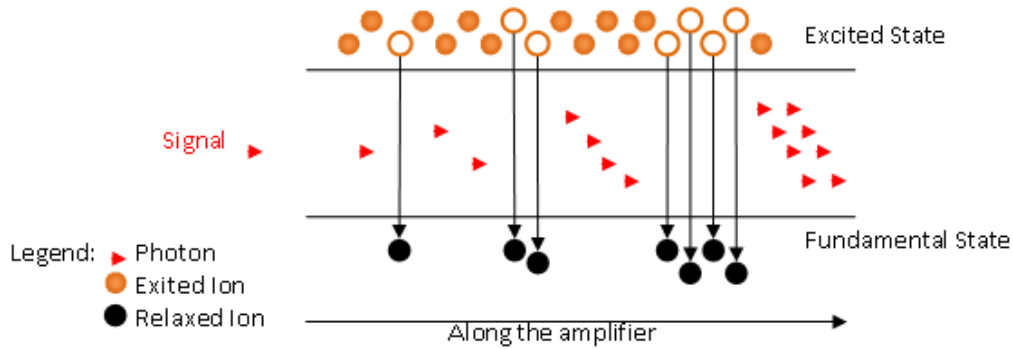


Figura 4.1: Esquema de uma emissão estimulada ao longo de um amplificador de fibra dopada

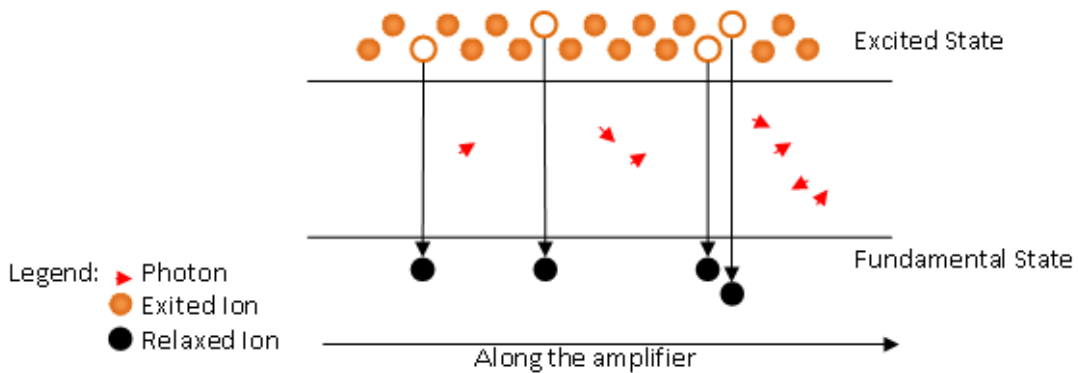


Figura 4.2: Esquema de uma emissão espontânea ao longo de um amplificador de fibra dopada

Temos estado a considerar um modelo para a passagem dos íões de érbio para o estado excitado de apenas dois níveis, o fundamental e o excitado. Na realidade o modelo do sistema é um modelo de três níveis, onde temos dois estados excitados e o estado fundamental. O estado de maior energia é um estado temporário, porque os íões ao serem bombeados para este estado só lá permanecem aproximadamente 1 micro segundo (no caso dos íões de érbio) [19], decaindo depois para o estado excitado de nível inferior. É neste estado que os íões se encontram quando libertam o fóton por emissão estimulada ou espontânea. O tempo que permanece no terceiro nível de energia é tão baixo, em comparação com o tempo que ficam no segundo nível de energia, que podemos considerar apenas um modelo de dois níveis sem cometer um erro significativo. [19]

Os íões de terras raras presentes nas fibras dopadas encontram-se naturalmente no estado fundamental. Para que estes passem para o estado excitado é necessário fornecer

energia. Isso é feito recorrendo a lasers de alta potência a operar em comprimentos de onda que são específicos para cada tipo de íon e comprimento de onda que se pretenda amplificar. Esses lasers de alta potência são designados por bombas. Na figura 4.3 podemos ver três das montagens mais usadas quando pretendemos implementar um amplificador de fibra dopada.

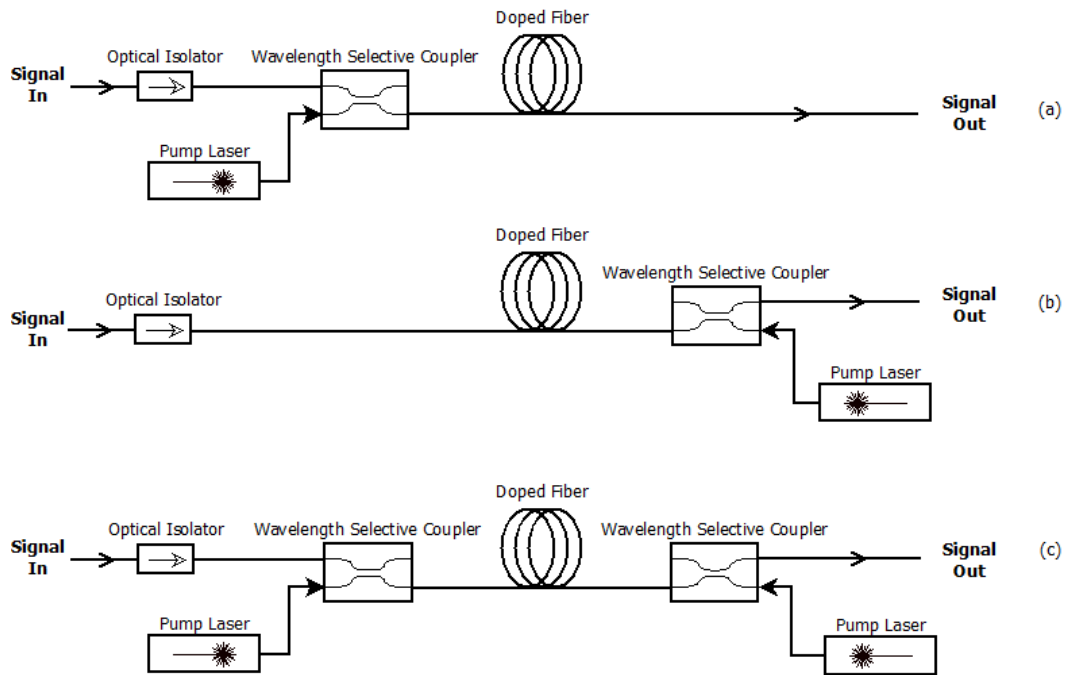


Figura 4.3: Configurações básicas para bombear as fibras dopadas: (a) Co-propagante, (b) Contra-propagante e (c) Bidirecional.

Na figura 4.3a é apresentada a configuração co-propagante, onde a bomba é inserida na mesma direção em que o sinal percorre a fibra. Na figura 4.3b a bomba é inserida em sentido contrário à propagação do sinal, chama-se a esta configuração contra-propagante. Por último, na figura 4.3c a configuração bidireccional é apresentada, em que usamos duas bombas a propagarem-se em sentido contrário uma em relação à outra. Os três tipos de configuração têm características diferentes. A montagem co-propagante é a que gera melhor performance em termos de ruído e a contra-propagante permite obter ganhos mais elevados.[19] A montagem bidireccional tem as vantagens das outras duas, co-propagante e contra-propagante, tendo a desvantagem de precisar de mais componentes aumentando o seu custo. [19]

4.2.2 Características dos DFA

Infelizmente, os amplificadores ópticos não são ideais. O amplificador tem limitações que podem ser um problema em cenários reais. De forma a ilustrar as características e as limitações dos amplificadores de fibra dopada, é usado como exemplo o amplificador de fibra dopada com érbio. Com a ajuda de um programa em Matlab simulou-se o seu comportamento. O programa em Matlab foi baseado num modelo para os amplificadores de fibra dopada com érbio do autor Hodgkinson. [23]

Os amplificadores de fibra dopada com érbio têm uma banda específica onde produzem ganho. A banda de amplificação varia entre 1530 nm e 1560 nm, a banda C. Em outros comprimentos de onda a performance é inferior. Na figura 4.4 é apresentada a resposta de um amplificador de EDF para diferentes comprimentos de onda de sinal à entrada. A bomba utilizada foi co-propagante de comprimento de onda 1480 nm e com uma potência óptica de 30 dBm. O comprimento da fibra dopada é de 20 metros.

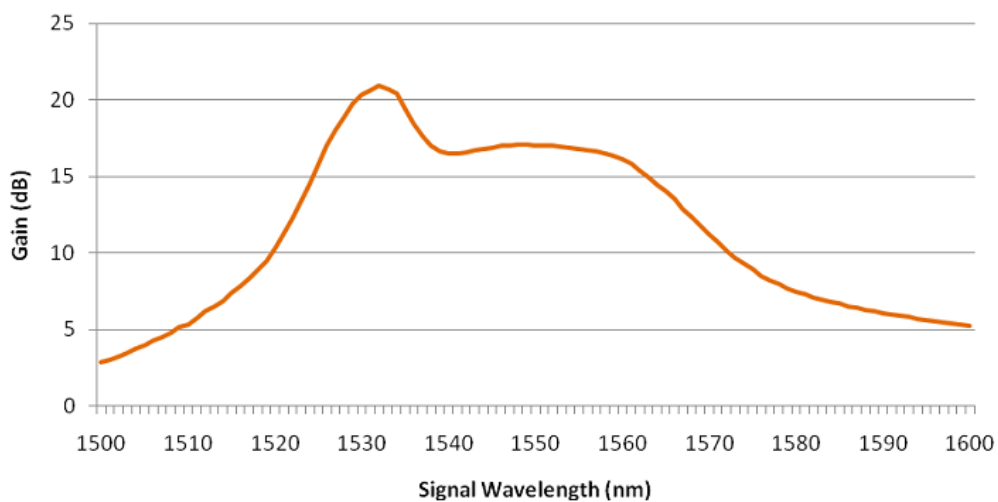


Figura 4.4: Ganho em função do comprimento de onda para uma potência de sinal à entrada de 0 dBm.

É possível obter ganho noutros comprimentos de onda mas, como se pode ver na figura 4.4, são obtidos valores baixos de ganho. Para obter valores mais altos noutros comprimentos de onda, como já foi dito atrás, temos de usar outro dopante como por exemplo Túlio, Praseodímio, Itérbio ou Alumina. [22]

O comprimento da fibra dopada também é importante para a amplificação. Como se pode ver na figura 4.5, o ganho do amplificador varia consoante o comprimento da fibra dopada. Para cada potência de bomba existe um comprimento óptimo, onde é obtido o máximo valor de ganho.

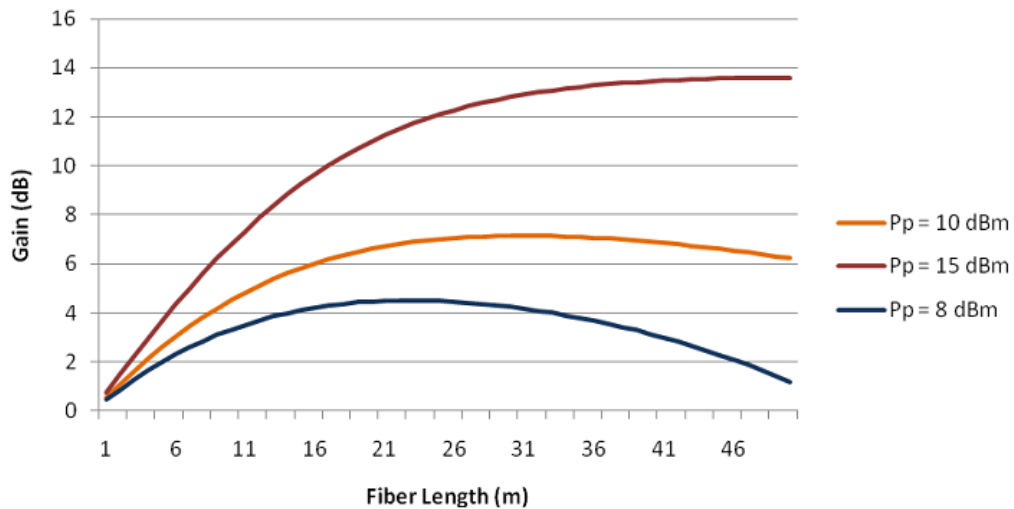


Figura 4.5: Ganho em função do comprimento de fibra dopada para diferentes potências de bomba a 1480 nm (Potência do sinal à entrada de 0 dBm a 1550 nm).

O ganho muda com o comprimento da fibra pois ao aumentar o comprimento, a potência da bomba começa a não ser suficiente para excitar todos os iões. Quando os iões não estão excitados a EDF comporta-se como um atenuador e o ganho é reduzido significativamente, como se pode ver na figura 4.5 no final da fibra.

Na figura 4.6 é apresentada a performance do amplificador para diferentes potências de bomba. Com uma fibra dopada de tamanho fixo, o amplificador só começa a produzir ganho positivo para potências de bomba superiores a aproximadamente 5 dBm. A esse valor dá-se o nome de *Pump Power Threshold*, que é o valor de potência de bomba para o qual temos 0 dB de ganho.

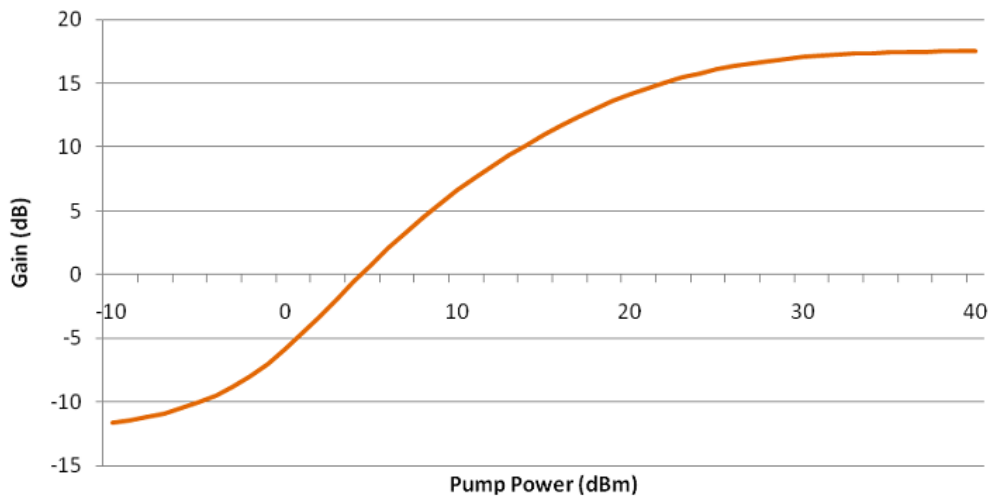


Figura 4.6: Ganho em função da potência de bomba para um sinal à entrada a 1550 nm de 0 dBm e com uma EDF de 20 metros bombeada a 1480 nm.

Os amplificadores de fibra dopada também sofrem de saturação do ganho. A saturação pode acontecer por duas razões: por potência de bomba excessiva ou por potências de sinal à entrada elevadas. Como foi dito anteriormente, para que se gere amplificação ao longo da fibra dopada, é necessário usar uma bomba para inverter a população dos íons para o estado excitado. Quando se começa a bombear a fibra dopada, a população começa a inverter e começa o fenómeno de amplificação. Ao aumentar a potência da bomba a inversão de população também aumenta, aumentando consequentemente o ganho. Após a população estar toda no estado excitado, o ganho começa a saturar e mesmo que se aumente a potência da bomba, o ganho não vai aumentar estando-se a desperdiçar potência. Este resultado é também ilustrado na figura 4.6, onde para potências de bomba superiores a 25 dBm o ganho começa a crescer mais lentamente até estabilizar. A outra situação que leva à saturação do amplificador de fibra dopada é ilustrada na figura 4.7. O ganho começa por ser constante para baixas potências de sinal à entrada. Com o aumento da potência do sinal o ganho começa a reduzir significativamente. A razão desta redução está relacionada mais uma vez com a inversão da população. Para baixas potências de sinal, a população no estado excitado é suficiente para gerar emissão estimulada. Aumentando a potência de sinal, o número de fótons de sinal aumenta e a população no estado excitado começa a não ser suficiente para produzir emissão estimulada para todos os fótons de sinal e o ganho decresce.

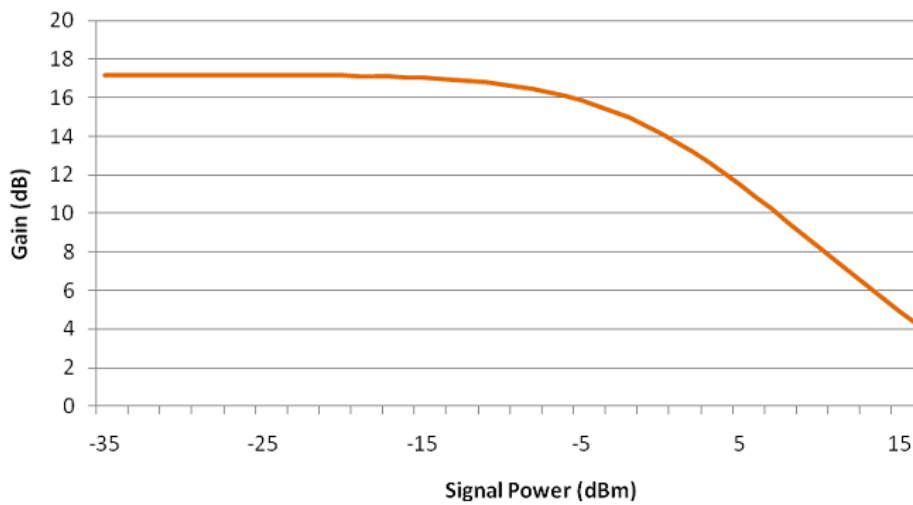
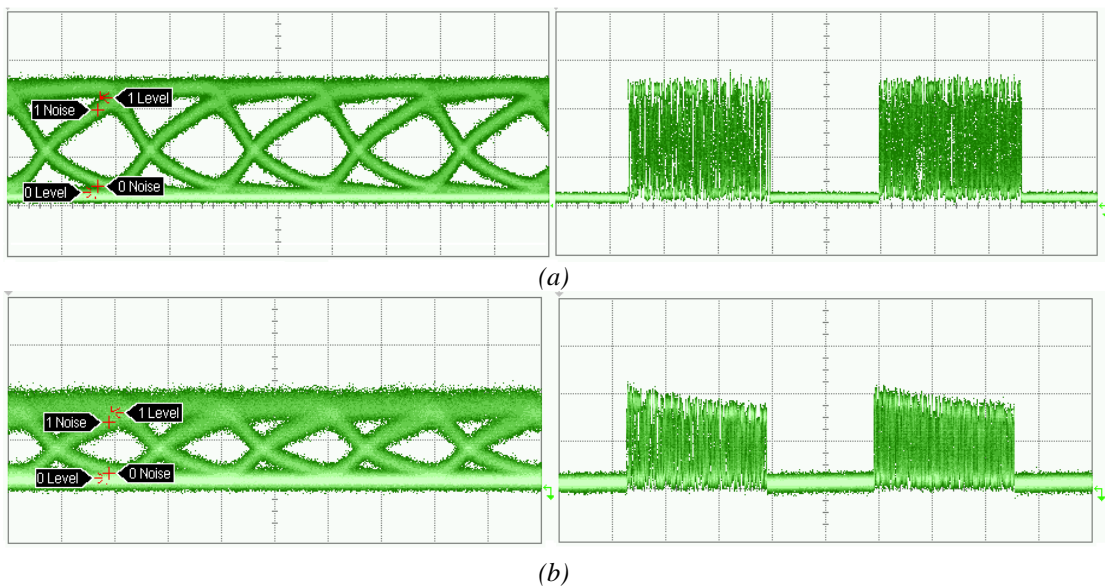


Figura 4.7: Ganho em função da potência de sinal à entrada a 1550 nm com uma EDF de 20 metros bombeada a 1480 nm com 20 dBm.

O problema da saturação do ganho com o sinal de entrada ganha uma nova dimensão quando se está na presença de uma rede de comutação de pacotes. Nas redes de comutação de pacotes o tráfego não é contínuo, chegando aos amplificadores em *bursts*. Em redes onde a potência do sinal varia dinamicamente ao longo do tempo o uso de amplificadores de fibra dopada gera um problema chamado ganho transitório, que é ilustrado na figura 4.8. [24] .



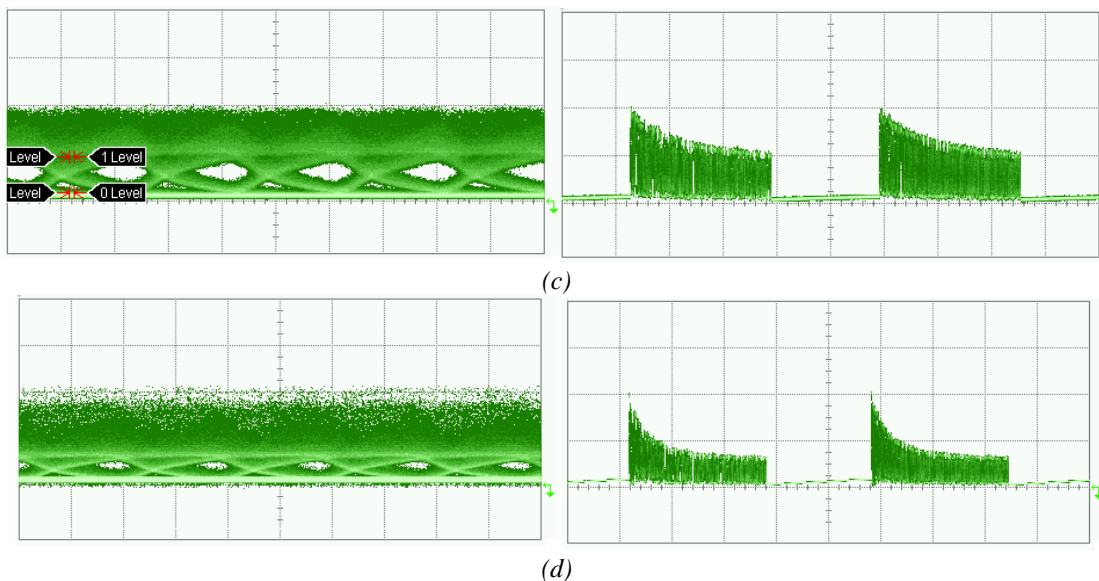


Figura 4.8: Diagrama de olho e pacote no receptor do osciloscópio para (a) *back-to-back* (escala vertical 10.0 mV/div), (b) EDFA com corrente de bomba a 0.8 A (escala vertical 5.0 mV/div), (c) EDFA com corrente de bomba a 1.0 A (escala vertical 25 mV/div), (d) EDFA com corrente de bomba a 1.5 A (escala vertical 100 mV/div). A escala horizontal para os diagramas de olho é 200 ps/div e 10.00 μ s/div para os pacotes.

Como se pode ver na figura 4.8, o pacote ao ser amplificado pelo EDFA é também distorcido. A distorção aumenta com o aumento da corrente da bomba, logo necessariamente, com a potência óptica a ser injectada na EDF. Este fenómeno está novamente relacionado com a inversão da população. No início do pacote a inversão da população é suficiente para produzir emissão estimulada para os primeiros fotões do sinal. Quando os outros fotões chegam ao EDFA já não encontram o mesmo número de iões no estado excitado e o ganho é progressivamente reduzido até ao final do pacote. A deformação introduzida pelo amplificador é, como seria de esperar, prejudicial para a transmissão. Um dos problemas prende-se com o limiar de decisão dos receptores, que idealmente está a meio da diferença entre a potência do zero e a potência do um. Com esta distorção, o fotodetector poderá detectar alguns “zeros” no final do pacote, o que na realidade são “uns” que foram distorcidos pelo amplificador.

Hoje em dia, o ganho transitório dos amplificadores de fibra dopada pode ser compensado. Podem-se destacar técnicas como o *feedback* óptico, o *feedback* electrónico com recurso à bomba ou a um sinal auxiliar, o *feedforward* electrónico com recurso à bomba ou a um sinal auxiliar e a distorção prévia dos pacotes antes de entrarem na fibra dopada. [25-30]

Os amplificadores de fibra dopada sofrem de ASE, que, caso não seja controlada, pode deteriorar o sinal ao ponto de este se tornar irrecuperável. A emissão espontânea está presente em toda a gama de amplificação da fibra dopada. Os fótons gerados por emissão espontânea são adicionados ao sinal afectando não só o desempenho em termos de ruído do sistema mas também limitando o ganho máximo que pode ser obtido devido à saturação.

O factor de ruído dos amplificadores de fibra dopada depende tanto das potências da bomba e do sinal como dos respectivos comprimentos de onda. No caso dos EDFAs, e considerando os comprimentos de onda mais usados para a bomba, o comprimento de onda de 980 nm apresenta uma performance em relação ao ruído superior às bombas a operarem no comprimento de onda 1480 nm. Outro aspecto que influencia o ruído gerado é o tipo de montagem do amplificador. A montagem contra-propagante é mais ruidosa que a montagem co-propagante. Isto acontece pois o sinal ao sofrer menos amplificação no início da fibra vai estar menos imune às introduções de ruído.

4.3 Amplificadores SOA

Os primeiros amplificadores SOA datam da invenção do laser semiconductor na década de 60. Esses amplificadores eram baseados em junções de GaAs (*Gallium Arsenide*) e operavam a baixas temperaturas. Nos finais da década de 80 estudos sobre InP/InGaAsP (*Indium Phosphide / Indium Gallium Arsenide Phosphide*) levaram ao aparecimento de SOAs a operar na banda dos 1300 nm e dos 1550 nm. [31]

Apesar de não serem os amplificadores que permitem obter maiores ganhos, nem os que geram menos ruído, e serem dos mais afectados por não linearidades, a rápida evolução da tecnologia em que são baseados e a sua fácil integrabilidade, fazem deles uma solução de baixo custo, oferecendo uma vasta panóplia de aplicações, nomeadamente processamento totalmente óptico de sinais a velocidades muito elevadas. [31-32] Na próxima subsecção vão ser apresentados os princípios de funcionamento dos SOAs.

4.3.1 Princípios de Operação Básicos

Os *Semiconductor Optical Amplifiers* (SOA) são dispositivos optoelectrónicos. A região activa do dispositivo é responsável pela amplificação do sinal colocado à entrada, onde uma fonte de corrente externa fornece a energia necessária à amplificação. A onda de sinal ao entrar na região activa do SOA fica confinada, mas as paredes desse guia são permeáveis, permitindo que uma parte do sinal consiga sair. O processo de amplificação gera ruído que é adicionado ao sinal de saída.

Os SOAs podem ser classificados em dois tipos: Fabry-Perot SOA (FP-SOA), onde as faces são significativamente reflectoras (o sinal passa várias vezes pelo amplificador) e o outro tipo de SOA é o *Travelling-wave* SOA (TW-SOA), onde o sinal passa apenas uma vez pelo amplificador, as faces não são reflectoras. Os dois tipos de SOAs são ilustrados na figura 4.9.

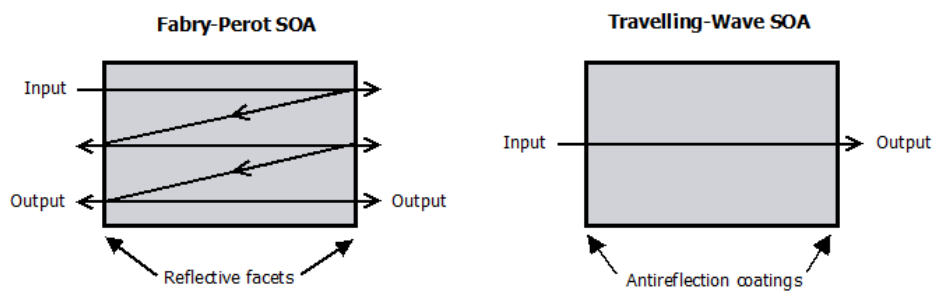


Figura 4.9: Esquema de funcionamento dos dois tipos de SOA

Para que o processo de amplificação ocorra é necessário injectar electrões provenientes de uma fonte externa na região activa do SOA. Estes portadores de energia vão ocupar a banda de condução e deixar lacunas na banda de valência. [32] O ganho nos amplificadores SOA é obtido através de transições radiactivas entre as bandas de energia, que, considerando um modelo de dois níveis, são a banda de valência e banda de condução. As três principais transições são absorção, emissão espontânea e emissão estimulada. As três transições estão ilustradas na figura 4.10.

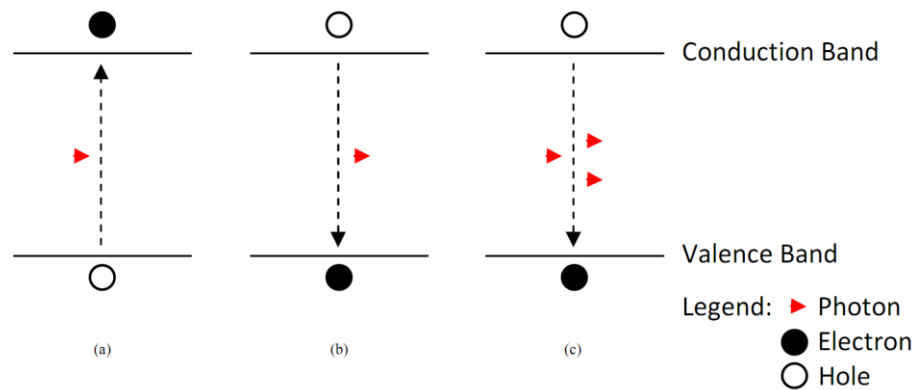


Figura 4.10: Principais transições entre a banda de valência e a banda de condução de um SOA: (a) Absorção, (b) Emissão Espontânea e (c) Emissão estimulada

Na figura 4.10(a) é ilustrada a transição de um electrão da banda de valência para a banda de condução. Este fenómeno acontece quando a corrente injectada na região activa do SOA é nula ou muito baixa e a energia do fotão é superior à diferença de energia entre os dois níveis de energia. Este processo é designado por absorção e gera perdas pois o fotão incidente é extinto. Na figura 4.10(b) é ilustrada uma emissão espontânea. Os electrões na banda de condução têm uma probabilidade não nula de se recombinarem com uma lacuna, libertando energia em forma de fotão. Este fotão tem direcção, fase e comprimento de onda aleatórios. Este processo diminui o número de portadores disponíveis na banda de condução e origina ruído que vai degradar o sinal a ser amplificado. Este ruído é designado de ASE. A emissão estimulada, ilustrada na figura 4.10(c), acontece quando a região activa do SOA está a ser excitada por uma corrente designada de corrente de polarização. A corrente de polarização coloca os electrões na banda de condução que com a passagem de um fotão incidente passam para a banda de valência libertando um fotão com direcção, fase e comprimento de onda iguais ao fotão incidente. Gera-se assim o processo de amplificação que se repete ao longo da região activa. Num cenário de amplificação, os três processos ocorrem em simultâneo, o que faz com que só haja amplificação quando a emissão estimulada for superior à emissão espontânea e à absorção do dispositivo.

4.3.2 Características dos SOAs

Os SOAs têm limitações que influenciam o seu funcionamento. Nesta subsecção vão ser apresentadas as suas principais características com base num amplificador para a banda C, o CIP SOA-S-OEC-1550. Além da banda C, os SOAs podem também operar noutras bandas.

Na figura 4.11 é apresentado o comportamento do amplificador para diferentes correntes de polarização e comprimentos de onda.

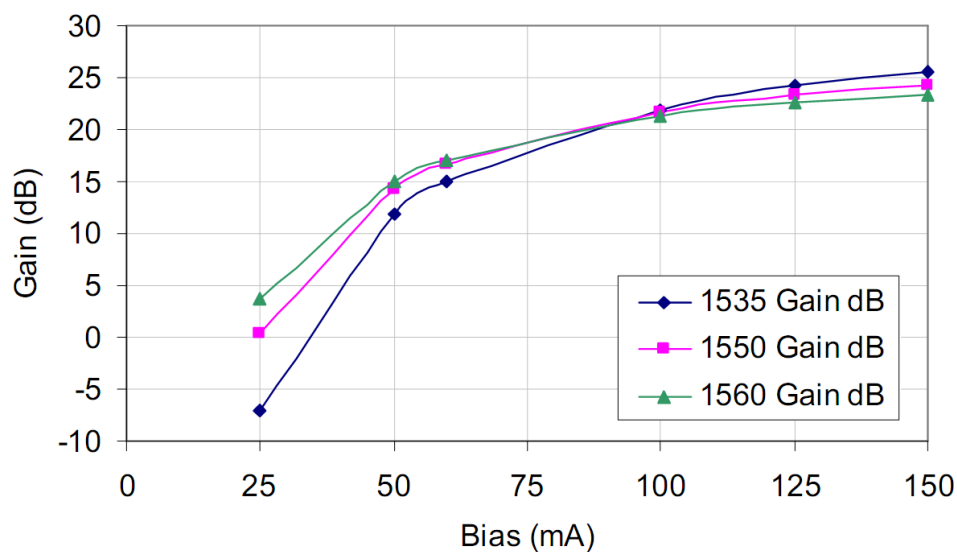


Figura 4.11: Ganho em função da corrente de polarização do SOA-S-OEC-1550 para três comprimentos de onda da banda C. [5]

Como se pode ver, há um corrente mínima para o qual o amplificador começa produzir ganho. É também de notar que o ganho é maior para correntes de polarização mais elevadas, mas começa a saturar para valores próximos dos 150 mA. O valor de 150 mA é o valor máximo de corrente admitida pelo SOA da CIP. [5] Outro factor característico dos SOAs é o facto de o ganho ser aproximadamente constante para larguras de banda consideráveis, neste amplificador cerca de 60 nm. [5] O ganho a partir aproximadamente dos 65 mA de corrente de polarização apresenta valores muito próximos para os três comprimentos de onda considerados, estando estes relativamente afastados. A saturação do ganho deve-se ao facto de o amplificador já não ter mais electrões na banda de valência para passarem à banda de condução. Isto faz com que apesar de se injectar ainda mais corrente não haver aumento proporcional do ganho.

A potência do sinal de entrada também leva à saturação do ganho. Quando o sinal de entrada se aproxima do limite de potência permitido à saída, o ganho do amplificador reduz significativamente. O ganho do amplificador satura pois o número de electrões na banda de condução começa a não ser suficiente para o aumento de fótons que chegam ao amplificador. Daí o ganho vir reduzido. Quando o número de fótons é muito maior que o número de electrões na banda de condução o ganho é nulo.

O ruído aparece na totalidade da banda de amplificação, como pode ser visto na figura 4.12. Para comprimentos de onda mais baixos, a figura de ruído é superior, tendendo, quando se está perto da saturação, para um valor muito próximo.

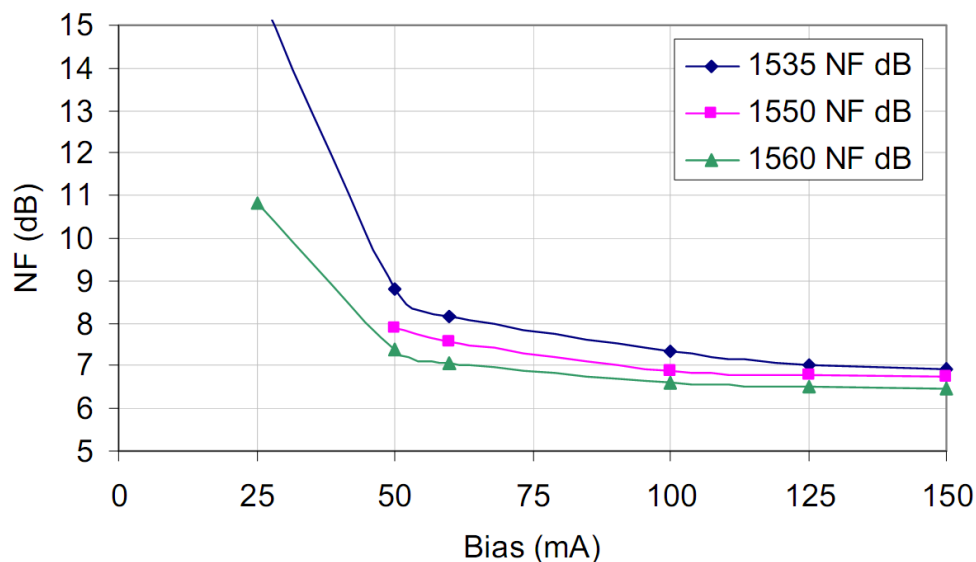


Figura 4.12: Figura de ruído em função da corrente de polarização do SOA-S-OEC-1550 para três comprimentos de onda da banda C. [5]

Os SOAs têm uma resposta rápida, na ordem das dezenas dos picosegundos, o que os torna imunes a transições rápidas de potência óptica, factor muito importante quando se está na presença de redes de comutação de pacotes onde podem haver *bursts*. [31]

Além dos efeitos lineares, os SOA são severamente afectados por efeitos não lineares. Os efeitos não lineares que o SOA pode produzir são os seguintes:

- Auto modulação de fase (SPM): Modulação da fase do sinal de saída devido a variações do índice de refração. Este fenómeno deve-se às variações de potência do sinal de entrada.

- Auto modulação do ganho (SGM): Variações da potência do sinal à entrada geram modulação no ganho do sinal.
- Modulação cruzada do ganho (XGM): Modulação do ganho dos sinais amplificados induzido por um dos sinais a amplificar.
- *Four Wave Mixing* (FWM): Troca de energia entre o canal a amplificar e outros canais, gerando novos comprimentos de onda.
- Rotação da polarização (PR): Efeitos de birrefringência que causam a rotação da polarização à saída do SOA devido a variações de potência do sinal de entrada.

À primeira vista interpretadas como desvantagens, as não linearidades dos SOAs permitem o seu uso, além da amplificação linear, por exemplo em moduladores, receptores e conversores de comprimento de onda. [32]

4.4 Amplificadores Raman

Os amplificadores de Raman são baseados num efeito não linear chamado *Raman Scattering*. O efeito *Raman Scattering* foi inicialmente publicado pelo autor C. V. Raman em 1928, ao qual deu o nome, e cujo trabalho foi galardoado com a entrega do Prémio Nobel em 1930. Em 1972 foi observado pela primeira vez o fenómeno *stimulated Raman scattering* (SRS) em fibras monomodo e foi também nesse ano que os coeficientes de ganho de Raman foram medidos pela primeira vez. [7]

Apesar da descoberta do fenómeno ser anterior à década de 90, só nesta década começou a aparecer o interesse neste tipo de amplificadores. Isto fez com que em meados de 2000, os amplificadores Raman fizessem parte de quase todas as redes ópticas de longa e muito longa distância. [7]

Os amplificadores de Raman permitem ganho em qualquer comprimento de onda, é apenas necessário que o comprimento de onda da bomba de Raman seja sincronizado com o comprimento de onda do sinal. A separação ideal é de 13.2 THz acima

do sinal a amplificar. Tomando por exemplo um sinal a 1550 nm, o comprimento de onda ideal para a bomba de Raman é aproximadamente nos 1450 nm. [7]

4.4.1 Princípios de Operação Básicos

Como foi dito anteriormente, a amplificação de Raman é baseada num fenómeno chamado *Stimulated Raman Scattering* (SRS). Simplificando, o *Raman Scattering* pode ser visto como uma dispersão inelástica onde a luz incidente no meio é convertida para uma frequência inferior. [6] O processo de SRS pode ser descrito como a excitação de uma molécula do meio até um nível virtual, que com a incidência de um fóton leva a que a energia dessa molécula diminua, libertando um outro fóton com as mesmas características do fóton incidente inicial. A molécula do meio é excitada recorrendo a um laser chamado bomba. Usando uma bomba de comprimento de onda adequado é então possível gerar amplificação no sinal incidente. Este processo é esquematizado na figura 4.13. É este processo que está por detrás da amplificação de Raman, que para potências de bomba elevadas faz com que a amplificação se faça rapidamente. [6]

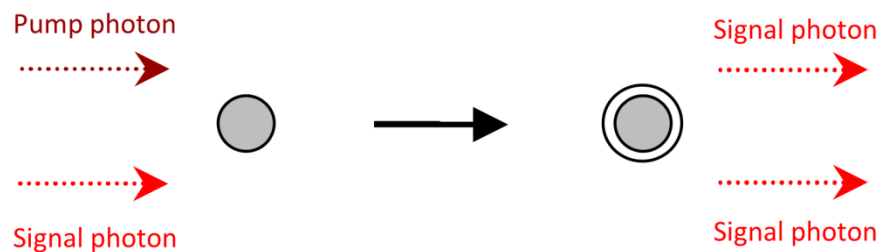


Figura 4.13: Esquema de uma *Stimulated Raman Scattering* [6]

Ao contrário dos amplificadores de fibra dopada, o meio de propagação onde se dá a amplificação não precisa de comprimentos extra ou de dopantes. A fibra de propagação é o meio de amplificação. [6]

Apesar da fibra de amplificação ser a mesma de propagação, diferentes tipos de fibra geram diferentes respostas em termos de amplificação. As áreas efectivas das fibras intervêm significativamente no ganho do amplificador, e quanto menor a área da fibra maior será o seu coeficiente de ganho e consequentemente o seu ganho. Isto é ilustrado na figura 4.14.

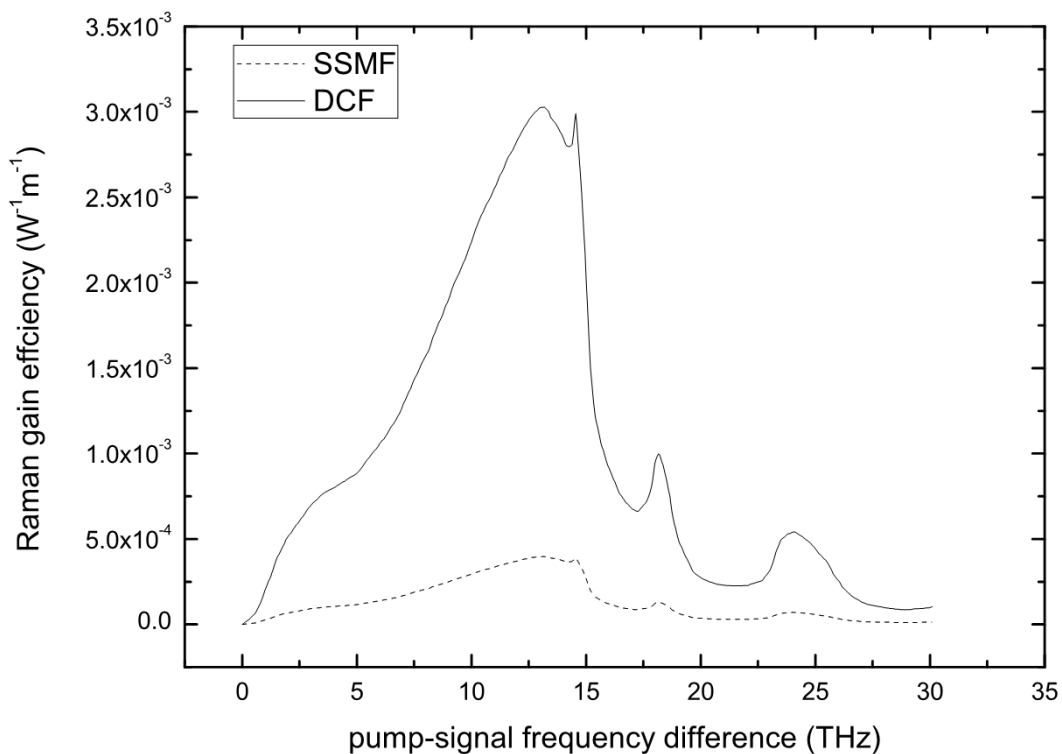


Figura 4.14: Coeficiente de ganho de Raman para dois tipos de fibra: *Standard Single Mode Fiber* (SSMF) e para *Dispersion Compensating Fiber* (DCF), para um comprimento de onda da bomba de 1450 nm [6]

Como se pode ver na figura 4.14, a fibra com menor área efectiva, DCF, aproximadamente $15 \mu m^2$ é a que apresenta maior eficiência do ganho. A fibra SSMF que tem aproximadamente $80 \mu m^2$ apresenta necessariamente uma eficiência muito inferior. Na próxima subsecção vão ser apresentadas as características principais dos amplificadores de Raman.

4.4.2 Características dos Amplificadores de Raman

Os amplificadores de Raman podem ser agrupados em dois tipos de topologias, *distributed* e *lumped*. No caso dos *distributed* a amplificação é feita ao longo de toda a fibra e no caso dos *lumped* a amplificação é feita apenas numa secção da fibra. As duas topologias são ilustradas na figura 4.15.

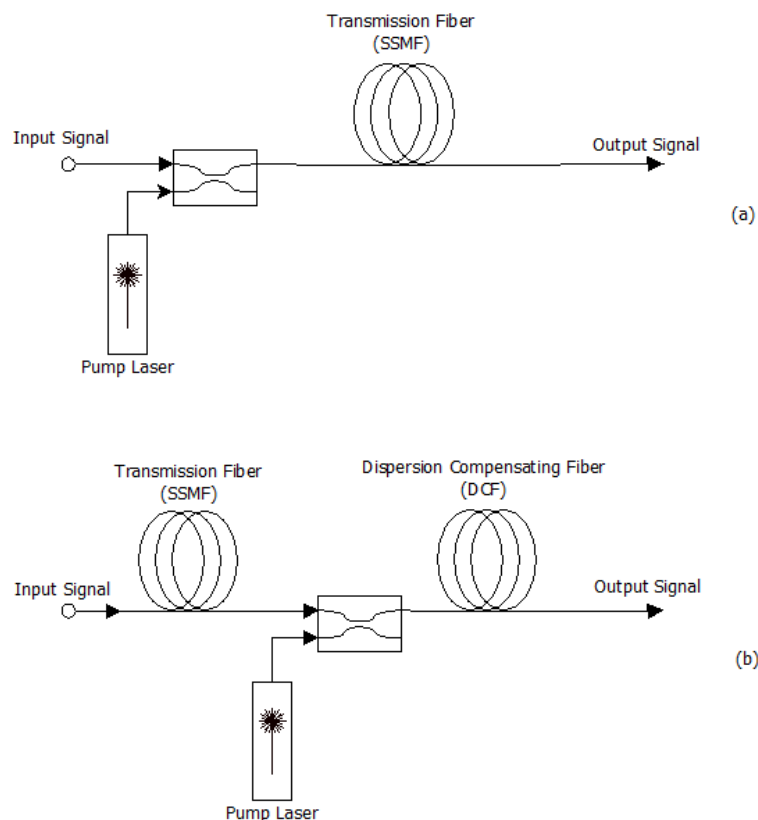


Figura 4.15: Esquema de uma amplificação de Raman (a) distribuída e (b) *lumped*.

A amplificação de Raman *lumped* permite obter um maior ganho e menor figura de ruído, mas um maior ganho aumenta a potência óptica na fibra, o que vem acompanhado com a maior probabilidade de se gerarem efeitos não lineares. A DCF tem, no entanto, a vantagem de além de oferecer um maior ganho, compensar também a dispersão acumulada ao longo da fibra de transmissão. Na amplificação de Raman distribuída acontece o contrário, o ganho é menor, o que aumenta a figura de ruído mas ganha-se com a redução significativa da probabilidade de se gerarem efeitos não lineares. [33] Na figura 4.15 é apresentado apenas um tipo de inserção de bomba para amplificação, mas a par das bombas dos amplificadores de fibra dopada, além da inserção co-propagante, é possível inserir a bomba em regime contra-propagante ou bidireccional. Na figura 4.16 é apresentada um gráfico que compara as potências ao longo da linha para o regime co-propagante e contra-propagante.

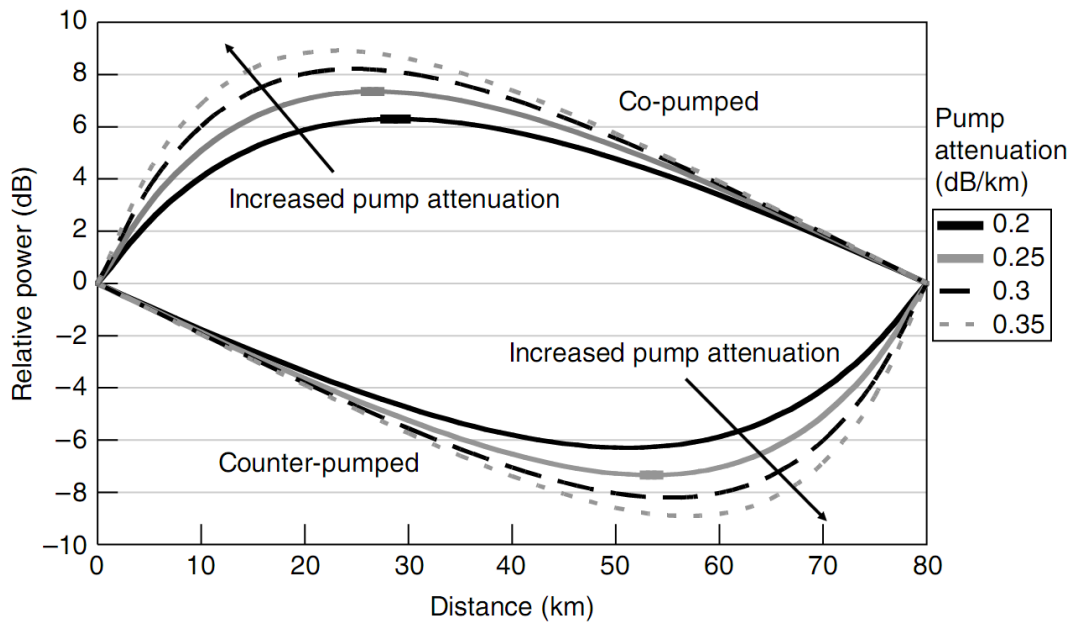


Figura 4.16: Potência óptica relativa de um sinal propagado ao longo de 80 Km de fibra usando amplificação de Raman distribuída. No topo é apresentado o regime co-propagante e em baixo o regime contra-propagante. [7]

Com a bomba de Raman a ser inserida na mesma direcção que o sinal a amplificar a potência da bomba vai ser superior no início da fibra o que implica que o ganho seja maior no início da fibra (figura 4.16 curvas do topo). Usando a bomba contra-propagante é obtida maior potência no final da fibra, o que faz com que o ganho seja maior também no final da fibra. À primeira vista pode-se dizer que os dois tipos de propagação de bomba são idênticos, mas, como se pode ver na figura 4.16, com a bomba co-propagante tem-se maiores potências na fibra, o que propicia o aparecimento de fenómenos não lineares. Com a bomba contra-propagante, tendo menores níveis de potência na fibra, o amplificador fica mais imune a efeitos não lineares. [7]

O amplificador de Raman pode fornecer ganho em qualquer comprimento de onda. É apenas necessário que o comprimento de onda da bomba esteja sincronizado com o comprimento de onda do sinal. Na figura 4.17 podem-se ver os coeficientes de ganho. Para que o ganho seja máximo é necessário estar 13.2 THz acima do sinal a amplificar. O ganho é também proporcional à energia dos fótons da bomba. Além do comprimento de onda da bomba e da potência desta, o ganho é também dependente do comprimento do meio. Como se pode ver na figura 4.16, a amplificação é grande perto do local onde inserimos a bomba e começa a decrescer à medida que nos afastamos desta, sendo que caso

nos afastemos em demasia a potência da bomba começa a não ser suficiente para gerar amplificação no sinal e este apenas sofre a atenuação característica da fibra.

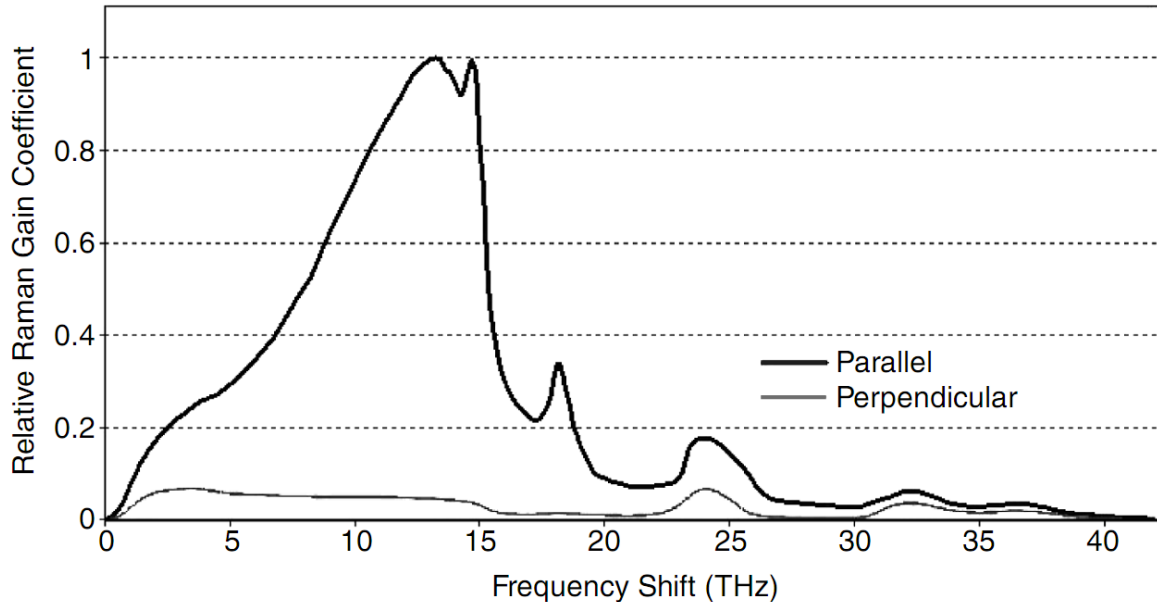


Figura 4.17: Coeficientes do ganho de Raman perpendiculares e paralelos para a sílica. [7]

A largura de banda do amplificador de Raman é elevada, da ordem dos 6 THz. Caso seja preciso aumentar a largura de bandas destes amplificadores podemos inserir uma ou mais bombas em comprimentos de onda adjacentes. O coeficiente de ganho total passará então a ser maior e com uma largura de banda superior. [7, 33]

Outro factor que intervém na performance do amplificador de Raman é a *Spontaneous Raman Scattering*, que faz com que o ruído esteja presente a par da amplificação. O ruído introduzido tem características aleatórias: comprimento de onda, fase e amplitude. Como acontece nos amplificadores de fibra dopada, a maneira com a bomba é introduzida na fibra também intervém na geração do ruído. As topologias contra-propagantes são mais afectadas pelo ruído que as co-propagantes. [33]

4.5 Comparação entre Amplificadores Ópticos

Os SOAs são tipicamente os amplificadores mais baratos para as bandas em causa. Estes amplificadores podem aparecer em muitas formas (travelling wave, partial reflection, etc). Especificamente, os traveling wave, apresentam ganho para uma grande

largura de banda e o facto de serem bombeados por fontes de corrente eléctrica permitem a sua fácil integração em dispositivos electrónicos. As suas aplicações passam mais pelo uso em aplicações de rede devido a sofrerem de efeitos não lineares significativos e serem geralmente sensíveis à polarização, fazendo deles uma escolha menos apetecida para amplificação de linha. A sua utilização passa pelo uso como moduladores, conversores de comprimento de onda, receptores, etc. [31-32]

Os amplificadores Raman são tipicamente os amplificadores mais dispendiosos devido à necessidade de recorrerem a lasers de alta potência para servirem de bombas. [33] O facto de utilizarem lasers de alta potência torna-os desadequados para algumas aplicações. É também necessário, no caso dos amplificadores distribuídos, ter tipicamente comprimentos de fibra para obter amplificação significativa. O ganho em SSMF é menor que no caso das DCFs. No entanto, quando usados em DCF's estes podem permitir a amplificação e compensação ao mesmo tempo. Têm também a vantagem de, devido a serem distribuídos, o processo de amplificação ser menos ruidoso.

Os amplificadores de fibra dopada têm um custo intermédio entre os dois amplificadores anteriores. [19] A sua janela de amplificação, no caso dos EDFAs é coincidente com a janela de menor atenuação da sílica, o que faz deles o amplificador mais usado em transmissões sobre fibra óptica. O facto de terem um tempo de resposta lento, da ordem dos milissegundos, evidencia alguns problemas quando em contextos de redes de comutação de pacotes, nas quais se geram *bursts* de pacotes com um grande tempo de espera entre eles. A sua figura de ruído é em general um pouco pior que a dos amplificadores de Raman mas é melhor que os SOAs. [19]

4.5.1 Aplicação em Redes Passivas de Acesso

Para a tecnologia GPON foi escolhida a operação nas bandas O e banda S. Os SOAs, como já foi referido, têm uma figura de ruído aceitável, ganho elevado e rápida resposta a variações do sinal de entrada. Têm também a vantagem de tamanho reduzido e terem perdas devidas à polarização baixas. No mercado temos um grande número destes amplificadores disponíveis, e a preços baixos, em comparação com os outros amplificadores para as bandas consideradas.

O amplificador de fibra dopada também está disponível no mercado para as bandas consideradas, Túlio para a banda S e Praseodímio para a banda O. Este tipo de amplificador é mais complexo de trabalhar, pois as dopagens requeridas pelas bandas de utilização são pouco comercializadas, o que eleva o preço deste tipo de amplificador para dez ou mais vezes o preço de um EDFA normal ou de um SOA. Além disso, o seu tempo de resposta a variações de sinal é lento, o que gera regimes transitórios no sinal de saída que são prejudiciais para a recepção quando submetido a “bursts”. O consumo de energia é também mais elevado que o dos SOAs assim como o seu tamanho.

Os amplificadores Raman são os mais dispendiosos e têm um ponto que os limita que se relaciona com a potência de bomba necessária, que pode ser considerada perigosa. Têm a vantagem de ter a menor figura de ruído quando comparando com os outros dois tipos de amplificador.

Uma pesquisa sobre trabalhos publicados neste âmbito revela que a tendência no uso de amplificadores passa pelo uso de SOAs. O seu uso é recomendado em [5, 30-31]. Em [13] é apresentada mesmo uma *Extender Box* que recorre a SOAs e sobre a qual são feitos variados testes de operação em contexto laboratorial e em contexto real. Estes testes foram bem sucedidos, o que aprova a utilização de SOAs para *reach extension*. Um quadro com o resumo das vantagens e desvantagens de cada amplificador, obtido em [8] é apresentado na figura 4.18.

(😞 NOT SUITED, 😊 SUITED, 😄 VERY WELL SUITED)

Characteristic	x DFA (fiber amplifiers)		QD-SOA (optical amplifiers)		Raman (non-linear amplifier)
	Upstream (O-band)	Downstream (S-band)	Upstream (O-band)	Downstream (S-band)	
Maturity	😞	😊	😊	😊	😞
Size	😊 (2~3)	😊 (2~3)	😊 (0.5~1)	😊 (0.5~1)	😞 (1)
Cost	😞 (4~10)	😊 (3~8)	😊 (3)	😊 (2.5)	😞 (0.5~1)
Power consumption	😊 (2~4)	😊 (2~4)	😊 (0.5~1)	😊 (0.5~1)	😊 (0.5)
Gain	😞	😊	😊	😊	😞
Optical bandwidth	😊	😊	😊	😊	😊
Noise	😊	😊	😞	😊	😊
Overall	😞	😊	😊	😊	😞

Figura 4.18: Sumário dos amplificadores ópticos para GPON [8]

O amplificador Raman é como se pode ver pela figura 4.18 considerado como desadequado e os SOAs levam vantagem em relação aos amplificadores de fibra dopada em cada uma das bandas de amplificação. De qualquer forma o uso de amplificadores de fibra dopada não está fora de questão. Vários trabalhos publicados mostram que o seu uso é possível. São exemplo [20, 25]. Acontece o mesmo para os amplificadores de Raman, como se pode ver na referência [34].

A escolha está então dependente da disponibilidade e custo de cada amplificador. A necessidade de controlo adicional para os amplificadores de fibra dopada a operar em *upstream* coloca o SOA em vantagem. Com a necessidade de implementar a *Extender Box* num período de tempo relativamente curto, o amplificador que mais se adequa é o SOA. Não precisa de controlo adicional para operar em *burst mode* e a sua capacidade já foi demonstrada. Poderá no entanto haver a necessidade de incluir filtros ópticos para reduzir ao máximo a figura de ruído que estes introduzem. Os amplificadores de fibra dopada existentes no mercado não possuem controlo electrónico do ganho o que implicaria mais tempo de investigação e desenvolvimento na área do controlo de ganho em comutação de pacotes.

(Esta página foi deixada em banco intencionalmente.)

Capítulo 5. *Extender Box*

5.1. Introdução

Neste capítulo vai ser apresentado e descrito o protótipo desenvolvido para a *Extender Box* para GPON através da apresentação dos testes que foram efectuados a cada um dos amplificadores escolhidos e os resultados obtidos quando a funcionar na topologia escolhida para a implementação da *Extender Box*. No anexo D é apresentada uma solução de amplificação em que são usados amplificadores híbridos. Este trabalho experimental não está relacionado com a *Extender Box* para GPON, tendo sido um trabalho paralelo para *Extended Reach* em redes de acesso baseadas em WDM.

5.2. Amplificadores Ópticos

Com base na análise feita no capítulo 4 sobre os amplificadores escolhidos de entre as opções de mercado, a *Extender Box* foi implementada. Dadas as gamas de comprimento de onda de funcionamento da GPON, teremos que ter, como já anteriormente referido, amplificadores na banda S (soluções disponíveis: IPG, o TAD-20 um DFA nativo de banda S, figura 5.1; e o CIP SOA-S-OEC-1550, desenhado para operar na banda C, mas dada a sua grande largura de banda permite o seu uso nos 1490 nm, figura 5.2). Apesar de a decisão de implementação ter sido favorável ao uso de SOAs, dada a sua flexibilidade em termos de comprimentos de onda, foi aqui introduzido o amplificador de fibra dopada para

a banda S para que possa também ser avaliado o seu desempenho. Para a banda O temos apenas disponível em laboratório o Alphion SOA29p, figura 5.3.



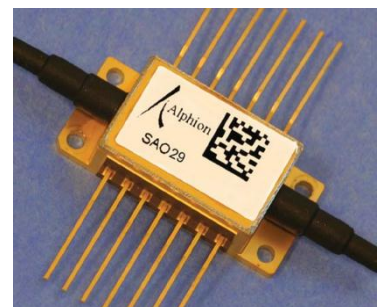
Figura 5.1: IPG Photonics S-Band *Fiber Amplifier* Model TAD-20



Figura 5.2: CIP SOA-S-OEC-1550



Figura 5.3: Alphion SOA29p



Nas subsecções seguintes vamos apresentar as caracterizações feitas a estes três amplificadores, por forma a avaliar as potencialidades destes amplificadores neste contexto, bem como estabelecer o melhor ponto de funcionamento para a *Extender Box*.

5.2.1 IPG Photonics TAD-20

O amplificador da IPG é um amplificador de fibra dopada de banda S, e como tal contempla os 1490 nm. Na sua caracterização foi utilizada montagem da figura 5.4.

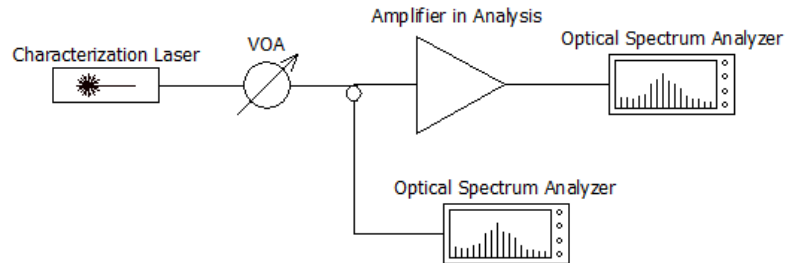


Figura 5.4: Montagem experimental para a caracterização dos amplificadores ópticos.

Na figura 5.5 é apresentada a resposta do ganho em função da corrente de bomba para várias potências de entrada que cobrem os valores admissíveis pelos standards nas redes ópticas passivas de acesso. Na figura 5.6 é apresentada a resposta do ganho do amplificador em função da potência de entrada para várias correntes de bomba. Na figura 5.7 temos a resposta do amplificador para diferentes comprimentos de onda da banda S. O amplificador apresenta um ganho em saturação de aproximadamente 28 dB. Tem também um ganho aproximadamente constante entre os -30 dBm e os -20 dBm. O pico de ganho está nos 1480 nm.

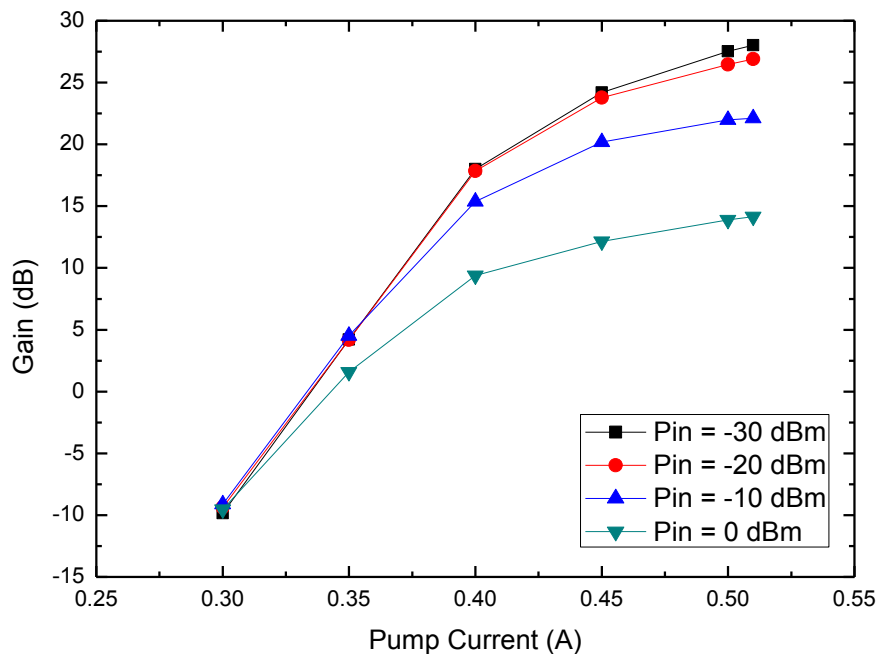


Figura 5.5: Ganho em função da corrente de bomba para quatro potências ópticas de entrada a 1490 nm.

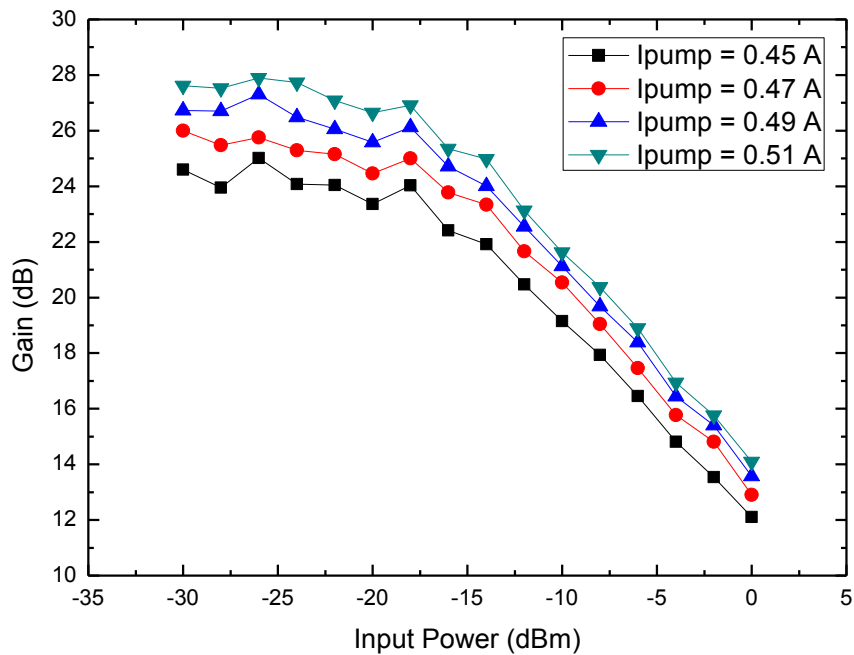


Figura 5.6: Ganho em função da potência de entrada a 1490 nm para quatro correntes de bomba na saturação.

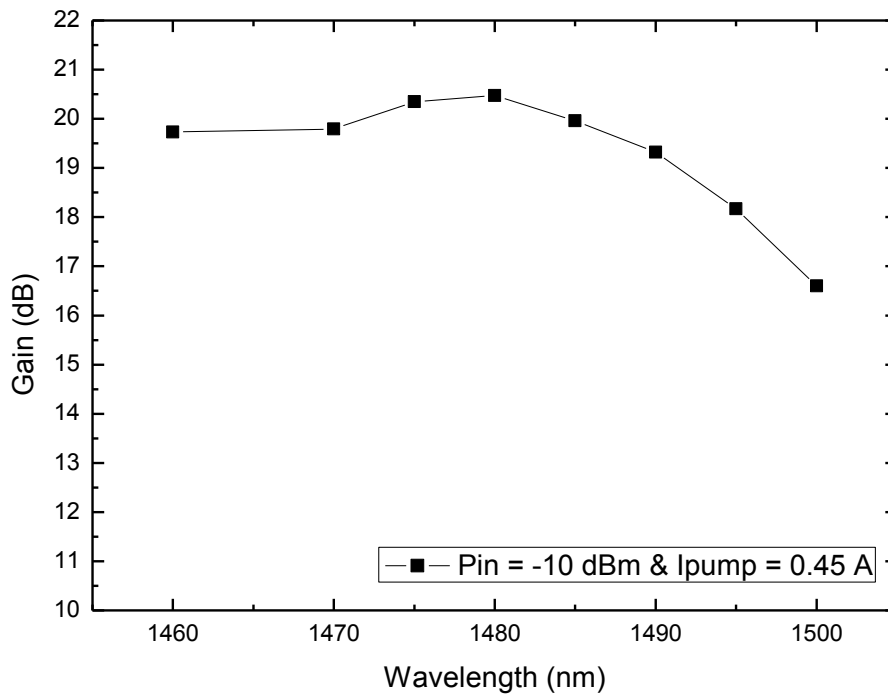


Figura 5.7: Ganho em função do comprimento de onda para uma potência de entrada fixa de -10 dBm e para uma corrente de bomba de 0.45 Amperes.

Segue-se a caracterização do amplificador em termos de figura de ruído. Com esse objectivo, introduziu-se um filtro centrado em 1490 nm com 20 nm de largura de banda e com 0.6 dB de perdas de inserção e utilizou-se a montagem da figura 5.8. Os resultados em termos de ganho, figura de ruído e potência de ASE são apresentados nas

figuras 5.9, 5.10 e 5.11. O objectivo destas medidas é identificar a melhor zona de operação em termos de ganho e figura de ruído.

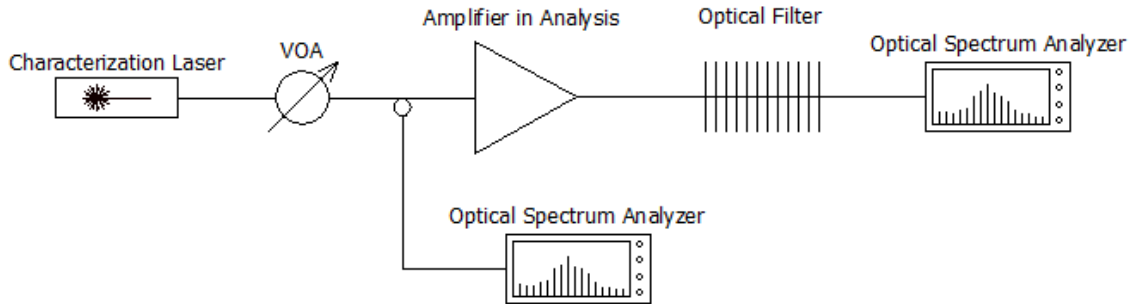


Figura 5.8: Montagem experimental para caracterização dos amplificadores ópticos usando um filtro óptico.

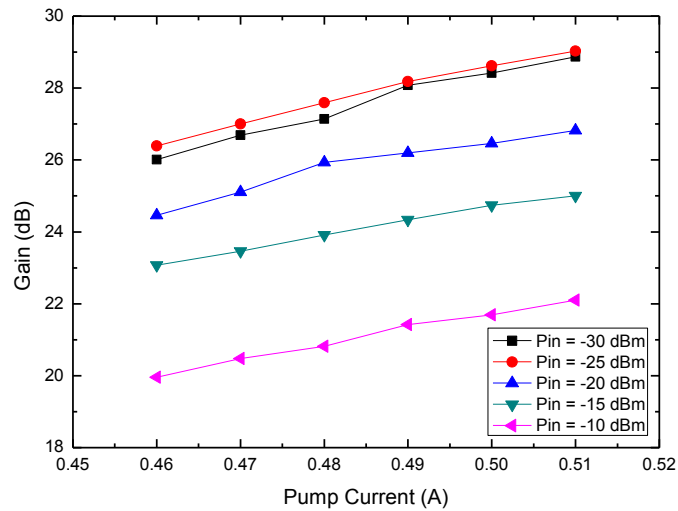


Figura 5.9: Ganho em função da corrente de bomba para várias potências de entrada a 1490 nm.

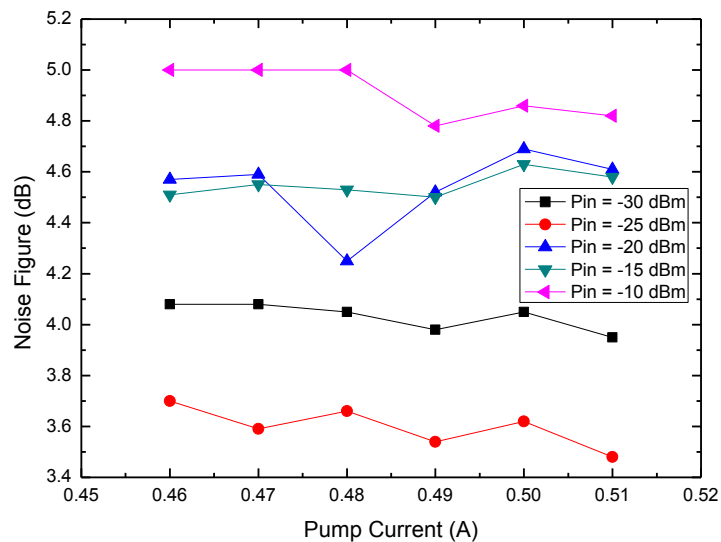


Figura 5.10: Figura de Ruído em função da corrente de bomba para várias potências de entrada a 1490 nm.

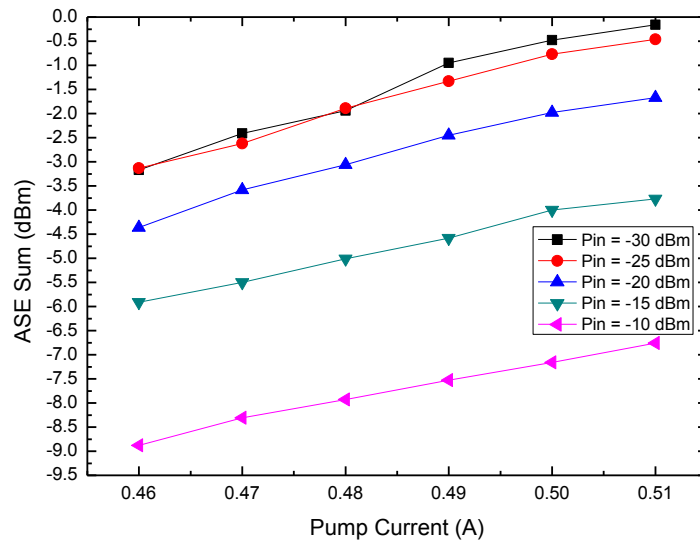


Figura 5.11: Integral da potência ASE em função da corrente de bomba para várias potências de entrada a 1490 nm para uma largura de banda de 20 nm.

Para os testes executados, tendo em vista simultaneamente um bom ganho e uma figura de ruído (NF) baixa, o melhor resultado foi obtido para correntes mais altas, que dentro dos limites estipulados, se traduz em 0.51 Amperes resultando num ganho de entre 20 e 29dB (para a gama de potências de entrada consideradas) e uma NF entre 3.6 e 4.8dB. Uma primeira análise indica-nos que este amplificador apresenta, para uma corrente de bomba de 0.51 A, uma figura de ruído inferior à estipulada na norma GPON como valor máximo para o amplificador de *downstream*, 5 dB.

5.2.2 CIP SOA-S-OEC-1550

O amplificador da CIP é um SOA. Foi desenhado para operar nos 1550 nm, mas dado que a sua gama de frequências de operação ainda abrange os 1490 nm, é também uma solução de interesse para a aplicação. Mais uma vez foi utilizada a montagem da figura 5.4.

Na figura 5.12 podemos ver a caracterização do ganho em função da corrente de polarização, na figura 5.13 o ganho em função da potência de entrada e na figura 5.14 o ganho em função do comprimento de onda.

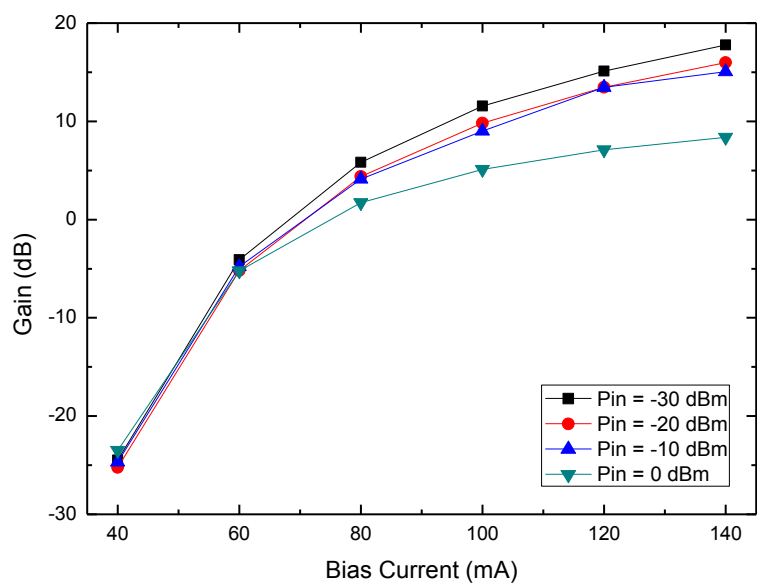


Figura 5.12: Ganho em função da corrente de polarização para diferentes potências de entrada a 1490 nm.

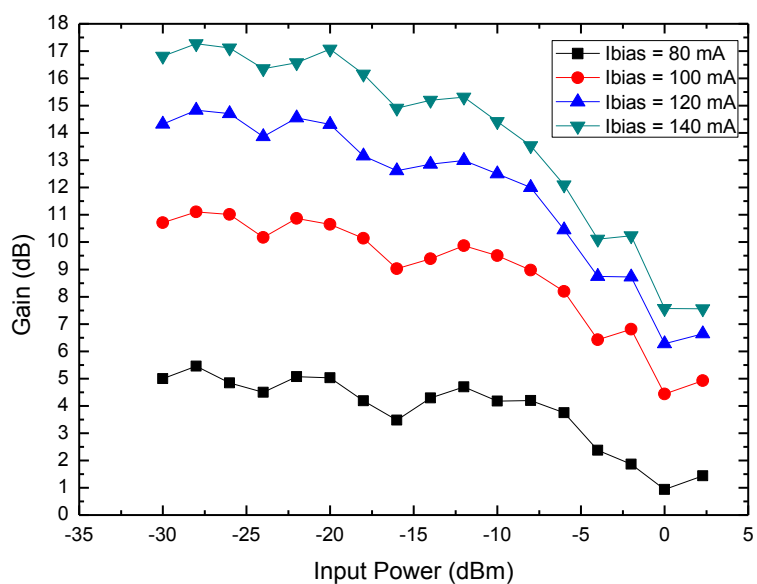


Figura 5.13: Ganho em função da potência de entrada a 1490 nm para várias correntes de polarização.

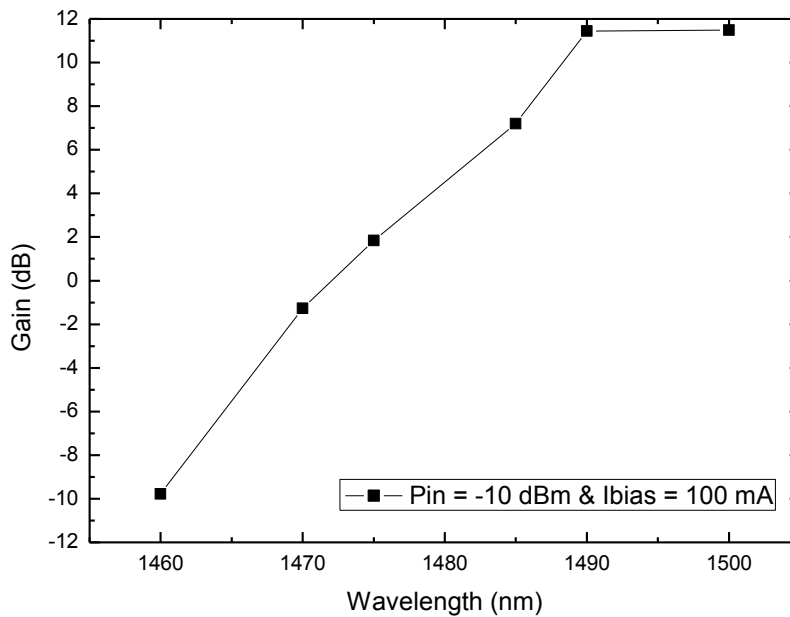


Figura 5.14: Ganho em função do comprimento de onda para uma potência óptica de -10 dBm e para uma corrente de polarização de 100 mA.

O SOA da CIP, como já foi referido, não foi desenhado para operar nos 1490 nm, no entanto apresenta ainda um ganho considerável, cerca de 20 dB nesse comprimento de onda, que comparando com o amplificador de fibra dopada, é o valor mínimo por este atingido. A análise ao ruído é feita recorrendo à montagem da figura 5.8 onde utilizamos o mesmo filtro centrado a 1490 nm, com 20 nm de largura de banda e com 0.6 dB de perdas de inserção.

Na figura 5.15 é apresentada a resposta do amplificador quanto ao seu ganho, a NF na figura 5.16 e na figura 5.17 a potência da ASE, quando variamos nos três casos a corrente de polarização.

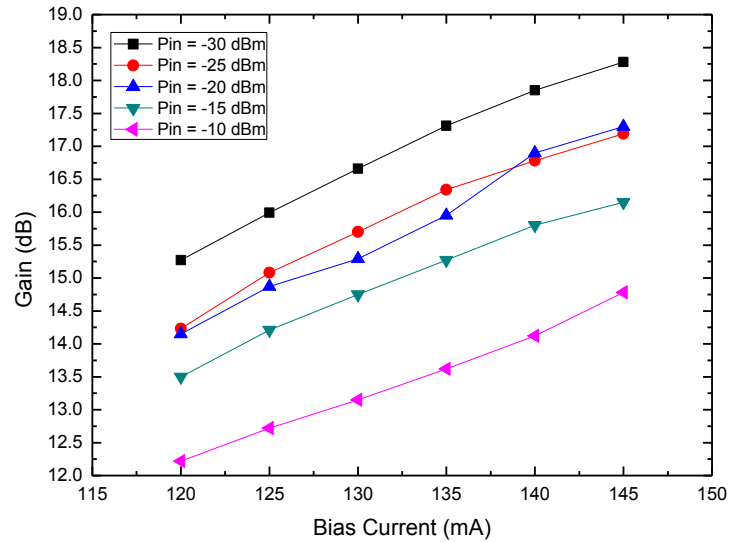


Figura 5.15: Ganho em função da corrente de polarização para várias potências de entrada a 1490 nm.

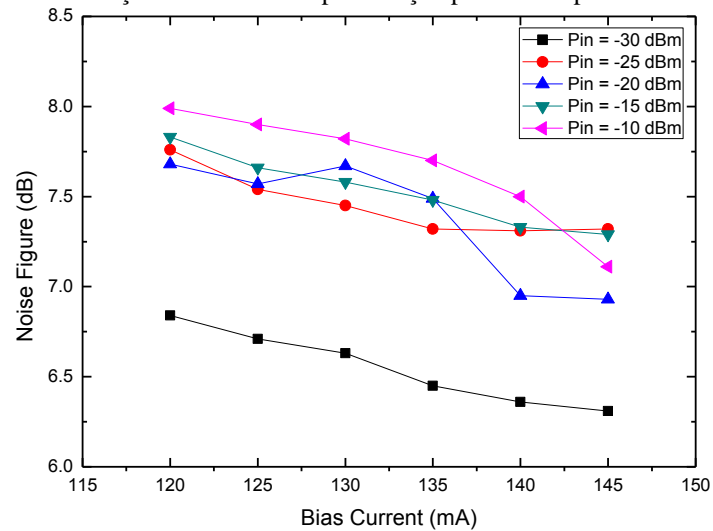


Figura 5.16: Figura de Ruído em função da corrente de polarização para várias potências de entrada a 1490 nm.

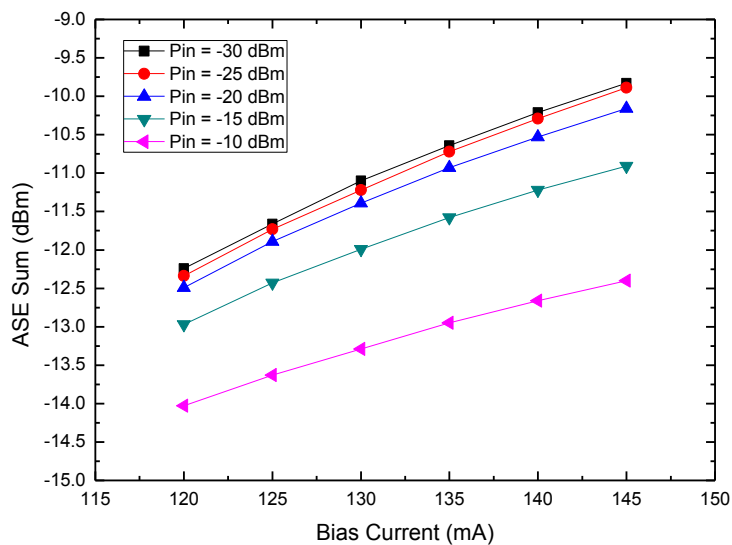


Figura 5.17: Integral da potência ASE em função da corrente de polarização para várias potências de entrada a 1490 nm para uma largura de banda de 20 nm.

Dos resultados apresentados para este amplificador, o seu desempenho em termos de NF é inferior, como esperado, ao do amplificador de fibra dopada. Os valores mínimos de figura de ruído foram atingidos para 145 mA (o valor máximo de corrente admissível pelo SOA são 150 mA, mas por razões de estabilidade e segurança não considerámos esse valor), onde também o ganho é mais elevado: $G=14-18\text{dB}$; $NF=6.25-7.5\text{dB}$. De notar que no caso do SOA, a figura de ruído chega a ser 2.5 dB superior à figura de ruído recomendada na norma GPON, de 5 dB. Esta penalização está relacionada com o comprimento de onda do sinal estar perto da largura de banda limite de amplificação do SOA, como se pode ver na figura 5.14.

5.2.3 Alphon SOA29p

O amplificador da Alphon é o amplificador que se pretende utilizar para a banda O, 1310 nm. Este foi projectado com este fim, operar em redes ópticas passivas de acesso. Utilizando a montagem experimental da figura 5.4 foi caracterizado o amplificador com um laser a 1310 nm. Apenas foi utilizado um comprimento de onda pois não estava disponível nenhum laser sintonizável para a banda O. Na figura 5.18 é apresentada a caracterização do ganho em função da corrente de polarização.

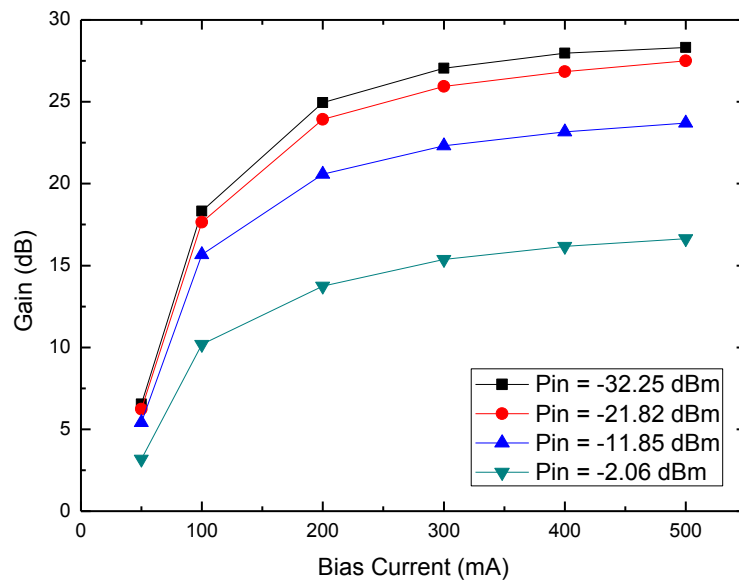


Figura 5.18: Ganho em função da corrente de polarização para diferentes potências de entrada a 1310 nm.

Na figura 5.19 é apresentado o ganho em função da potência de entrada para diferentes correntes de polarização.

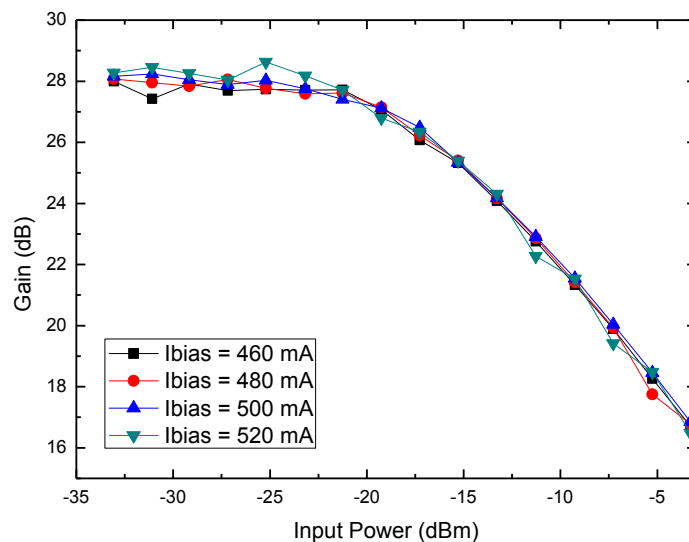


Figura 5.19: Ganho em função da potência de entrada a 1310 nm para várias correntes de polarização.

Este amplificador tem um ganho elevado, 28dB, e baixa potência de saturação (-15dBm). Dado o comportamento do tráfego de *upstream*, este amplificador vai ser sujeito a operação *burst mode*, tendo assim que ter uma resposta a rápida e tanto quanto possível livre de regimes transitórios. Na figura 5.20 é apresentado o integral da potência de ASE para diferentes correntes de polarização sem sinal à entrada.

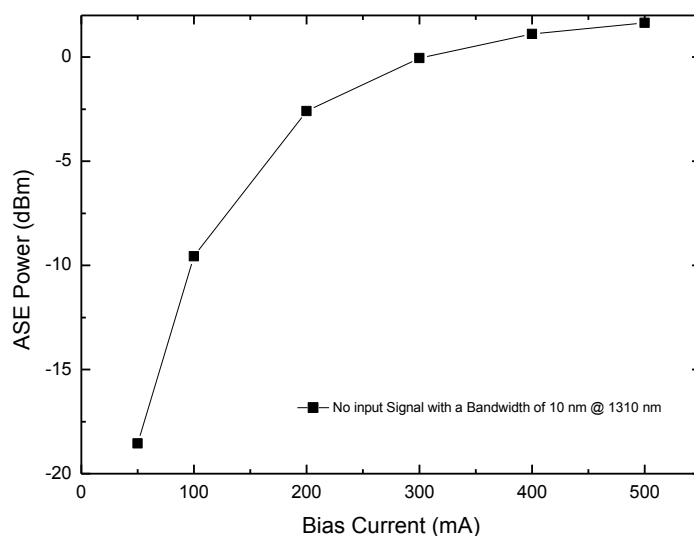


Figura 5.20: Integral da potência ASE em função da corrente de polarização sem sinal à entrada. Foi considerada uma largura de banda de 10 nm em torno dos 1310 nm.

O ruído, na ausência de sinal, é elevado, ultrapassa os 0 dBm para 500mA de corrente de polarização. Na presença do sinal a análise é apresentada nas figuras 5.21, 5.22 e 5.23. Mais uma vez foi utilizada a montagem da figura 5.8, mas agora com um filtro centrado em 1310 nm, com 80 nm de largura de banda e com 0.4 dB de perdas de inserção. O máximo valor de corrente de polarização admissível pelo SOA da Alphion são 500 mA, mais uma vez considerámos como valor máximo um valor inferior ao indicado no *datasheet* para que o SOA não esteja a operar no limite de corrente.

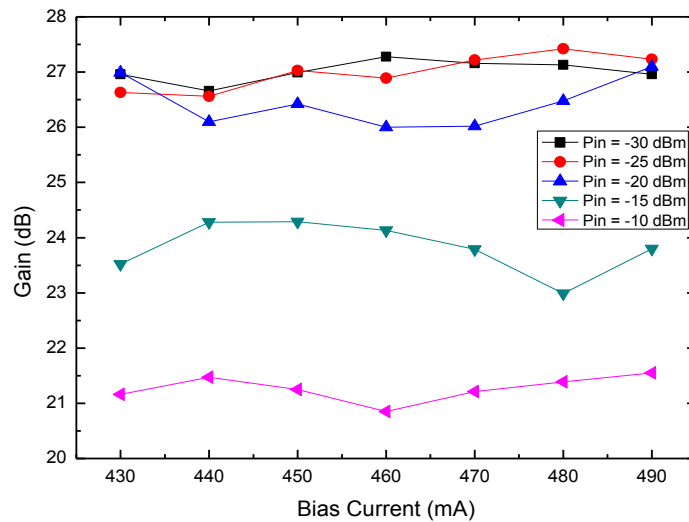


Figura 5.21: Ganho em função da corrente de polarização para várias potências de entrada a 1310 nm.

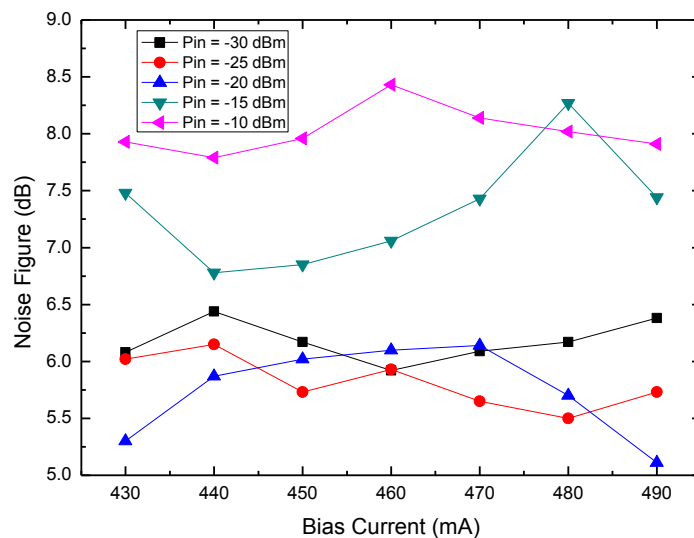


Figura 5.22: Figura de Ruído em função da corrente de polarização para várias potências de entrada a 1310 nm.

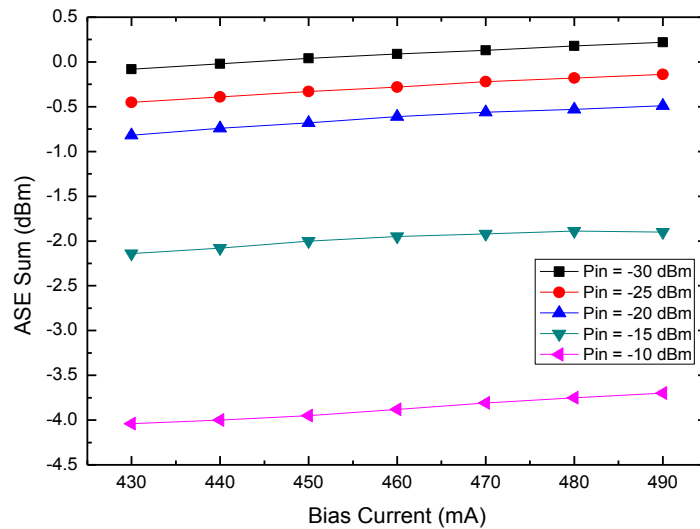


Figura 5.23: Integral da potência de ASE em função da corrente de polarização para várias potências de entrada a 1310 nm para uma largura de banda de 80 nm.

Ao contrário do que aconteceu nas medidas anteriores o comportamento de ruído deste amplificador é menos assintótico com o aumento da corrente de polarização e apresenta um valor tendencialmente mais baixo para 440-450 mA, onde o ganho é aproximadamente igual aos valores mais altos de corrente: $G=21-27\text{dB}$; $NF= 5.75-8\text{dB}$. Comparando com o valor de figura de ruído recomendado na norma, 7 dB, para potência superiores a -15 dBm ultrapassam esse valor, chegando a ter 8 dB para uma potência de entrada de -10 dBm.

5.3. Protótipo para a *Extender Box*

Na figura 5.24 é apresentado o protótipo proposto para a *Extender Box*.

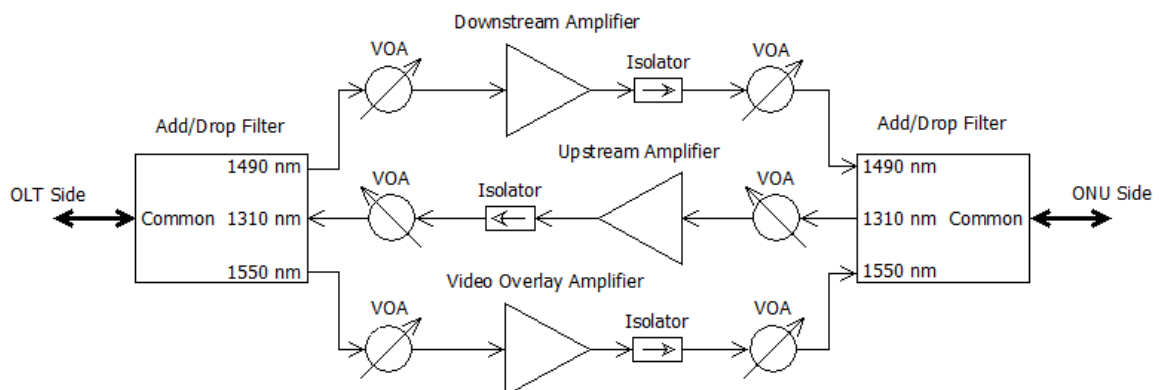


Figura 5.24: Protótipo proposto para a *Extender Box*

Com este dispositivo, além de aumentar o alcance da rede óptica passiva, pretendemos dar suporte a um canal de vídeo a circular na banda C, que também pretendemos amplificar. Para que seja possível amplificar os três canais que circulam na fibra é primeiro preciso separá-los pois as três bandas de amplificação não são coincidentes. Estando na presença de duas bandas adjacentes e onde o tráfego tem a mesma direcção, banda C e S, poderíamos pensar em utilizar um amplificador para amplificar o tráfego *downstream* e o *vídeo overlay*. No entanto, baseando-nos nos resultados do SOA da CIP disponível, onde, apesar de, este ter largura de banda suficiente para acomodar os dois comprimentos de onda, o ganho para o comprimento de onda de *downstream* é de apenas 20 dB. Este ganho é já limitado e poderia vir a ser reduzido pela saturação que o canal de vídeo poderia impor. Por tal, optou-se por separar as três bandas, que é feita com *Add/Drop Filters*. Estes dispositivos separam os três canais para fibras diferentes permitindo que sejam tratados separadamente. São eles que servem de filtros ao ruído introduzido quando se juntam novamente os três canais numa só fibra. Na tabela 5.1 é apresentada a caracterização dos *Add/Drop Filters*.

Parâmetro	Unidade	Valor
Banda de Passagem	nm	1490 ± 10
Banda de Reflexão 1	nm	1310 ± 40
Banda de Reflexão 2	nm	1550 ± 10
Perdas de Inserção a 1490 nm	dB	0.63
Perdas de Inserção a 1310 nm	dB	0.75
Perdas de Inserção a 1550 nm	dB	0.88
Isolamento a 1490 nm	dB	≥ 30
Isolamento a 1310 nm	dB	≥ 20
Isolamento a 1550 nm	dB	≥ 15
Perdas por Retorno	dB	≥ 50
Temperatura de Operação	°C	-40 ~ +85

Tabela 5.1: Características principais dos *Add/Drop Filters*

Os isoladores presentes à saída de cada amplificador garantem a imunidade a reflexões ou outros sinais que possam causar défice de qualidade no sinal amplificado. Os isoladores apresentam perdas de aproximadamente 0.5 dB.

É nosso objectivo garantir que a *Extender Box* se adapte a vários cenários no terreno. Desta forma temos de garantir que os amplificadores operam sempre no seu melhor ponto de funcionamento. Em vez de adaptar as correntes de polarização ou de bomba para controlar o ganho, vamos otimizar o amplificador para obter o melhor

desempenho em termos de ganho e de ruído, e quando necessário, actuar nos atenuadores de maneira a adaptar o ganho. Assim tiramos sempre o melhor partido do amplificador mantendo a sua flexibilidade e estabilidade, pois caso não seja preciso um ganho elevado podemos atenuar o sinal para os valores que mais nos convêm, sem comprometer as figuras de ruído. É nosso objectivo garantir que a *Extender Box* opere nas gamas máximas admitidas pela norma GPON: na OTL 23 dB para *downstream* e 28 dB para a *upstream* e na ODN compreendidas entre 13 e 28 dB em *downstream* e *upstream*.

Apesar de não estar ilustrado na figura 5.24, é necessário que a *Extender Box* dê algum feedback do seu funcionamento. Dessa forma há a possibilidade de integrar alguns medidores de potência óptica implementados recorrendo a acopladores 1%/99% e a fotodetectores. Esses fotodetectores medem a potência óptica à entrada e saída de cada amplificador, que depois será analisada por um controlador. Esse dispositivo terá também a função de controlar os atenuadores variáveis permitindo a sua configuração para uma instalação inicial por parte do operador ou para um ajuste no caso de introdução de novos clientes.

5.4. Testes de Integração

Como já foi dito anteriormente não dispomos de nenhum equipamento GPON (OLT e ONUs). Os únicos equipamentos que possuímos são equipamentos EPON, que são apresentados na figura 5.25. São equipamentos da Fiberhome e os modelos são os seguintes:

- OLT – AN5116-02
- ONU – AN5006-074.

Mais detalhes sobre como configurar estes equipamentos podem ser encontrados no anexo A.

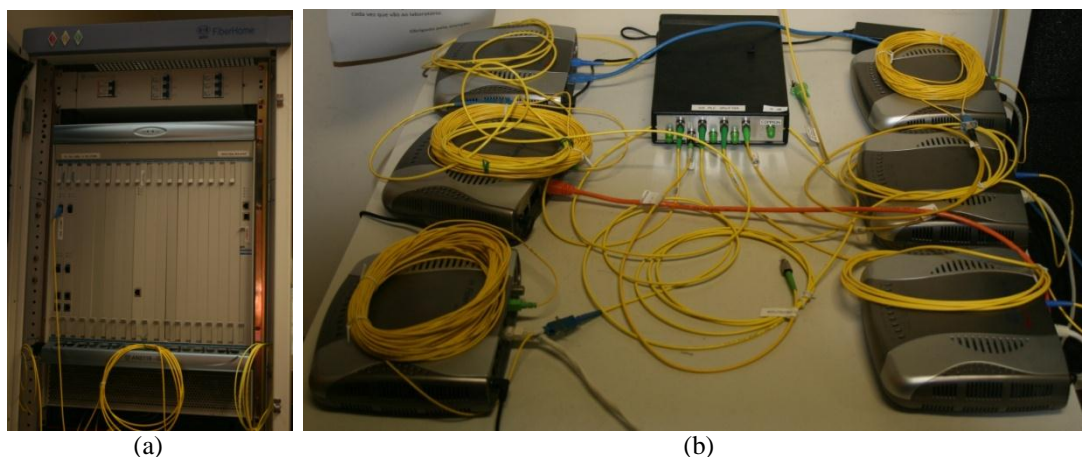


Figura 5.25: Equipamento EPON disponível no laboratório de óptica: (a) OLT e (b) ONUs

Como já foi dito anteriormente os níveis de potência mínimos admissíveis para o GPON são inferiores ao do EPON em cerca de 3 dB para *downstream* e 1 dB para *upstream*. A distância máxima admitida é também inferior, no caso do EPON são possíveis distâncias de até 20 Km e no GPON de 60 Km. Quando a *Extender Box* for testada em GPON espera-se que no mínimo as condições verificadas em EPON se mantenham.

O primeiro passo nos testes à *Extender Box* passa por caracterizar o funcionamento do sistema EPON no seu funcionamento normal, ou seja sem *extended reach*. Para facilitar a tarefa os testes ao tráfego *downstream* e *upstream* foram feitos em separado. Foram usados os *Add/Drop Filters* da *Extender Box* para separar os dois canais. Um troço de fibra de 20 km e um *splitter* 1:8 para servir 6 ONUs também foram introduzidos. O atenuador variável é usado para emular *power budgets* no sistema. Com este teste pretende-se verificar os *power budgets* máximos admitidos pelos equipamentos EPON. A montagem é ilustrada na figura 5.26. Os *power budgets* foram medidos recorrendo a um laser auxiliar a operar no comprimento de onda específico do canal que pretendemos avaliar, não foram usados os lasers da OLT e ONUs. No caso do canal de *downstream* é possível medir a potência média com um *Power Meter*, já para *upstream* o mesmo não acontece. Além de termos de ter a ONU a receber pacotes de *downstream* para poder enviar os pacotes de *upstream*, o tempo que o pacote de uma ONU ocupa na trama de *upstream* é muito pequeno, fazendo com que a potência média seja muito pequena e não permitindo medir estes valores com um *Power Meter*.

O tráfego usado é tráfego IP gerado por um equipamento chamado IXIA (no anexo B são apresentados mais detalhes sobre este equipamento), um gerador e analisador de tráfego IP. São feitas simulações em que são enviados pacotes IP de tamanho aleatório uniformemente distribuído entre 128 bytes e 1500 bytes. A velocidade de transmissão dos dados é 90 Mbit/s e em cada simulação são enviados 1 milhão de pacotes. A carga paga dos pacotes IP é também aleatória. O tráfego é inserido na OLT através de uma porta Ethernet a 1 Gbit/s, tendo como IP de destino uma outra porta do equipamento IXIA que está ligada também por Ethernet, mas agora a 100 Mbit/s, a uma das ONUs. O tráfego é gerado a 90 Mbit/s, longe do limite máximo do Ethernet sobre cobre, para garantir que caso haja erros estes apenas se devam à parte óptica e não à parte eléctrica.

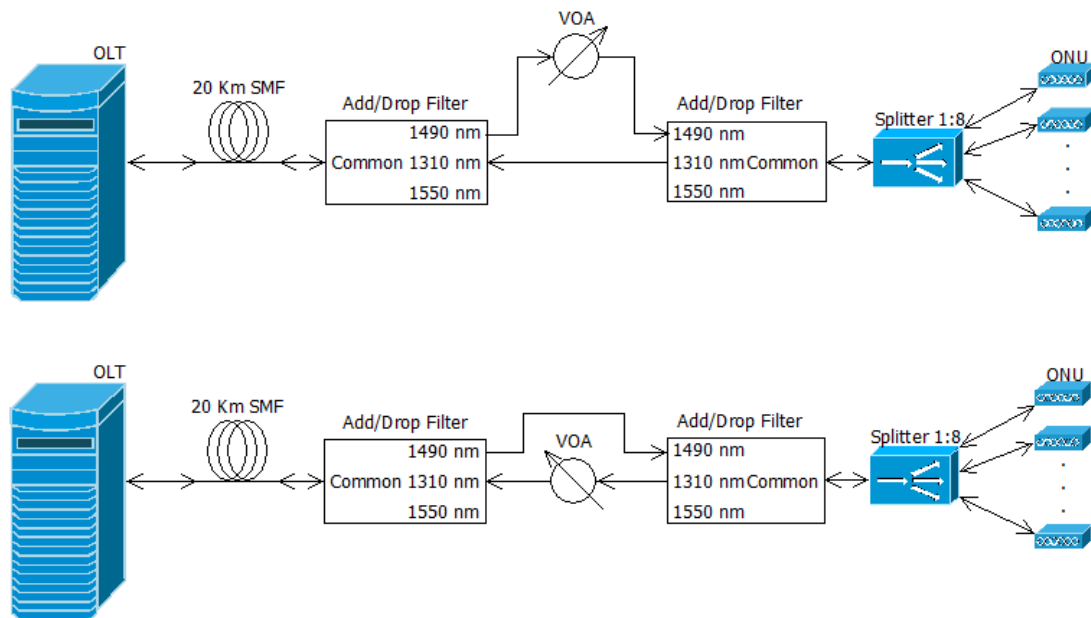


Figura 5.26: Montagem Experimental para o teste do equipamento EPON. No topo para o tráfego *downstream* e em baixo para o tráfego *upstream*.

No caso do tráfego de *downstream* foi obtido um *power budget* máximo de 33 dB. Aos 34 dB a transmissão ocorre mas já com alguns erros e aos 35 dB a ONU liga o alarme para *Loss of Signal*, indicando que já não recebe nenhum pacote correcto. Estes resultados são apresentados na figura 5.27. O *Packet Error Rate* (PER) é calculado através de dois valores obtidos nas estatísticas do equipamento IXIA no que diz respeito à transmissão efectuada, *Valid Received Packets* e *Transmitted Packets*. O PER é calculado pela seguinte fórmula:

$$PER = 1 - \frac{\text{Valid Received Packets}}{\text{Transmitted Packets}}$$

Um pacote é considerado válido quando todos os seus bits recebidos estão correctos, não havendo na transmissão qualquer código corrector de erros.

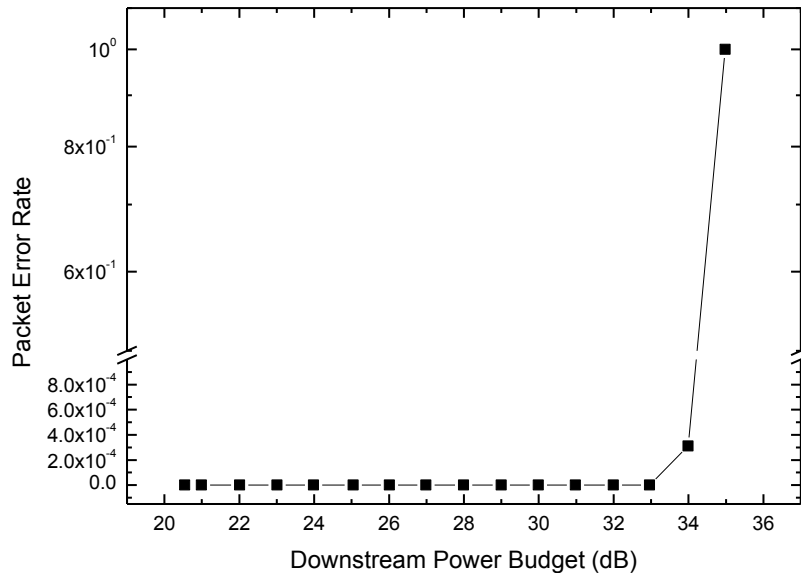


Figura 5.27: Taxa de pacotes errados para o canal de *downstream* sem a *Extender Box*.

O tráfego gerado no IXIA para *upstream* tem as mesmas características do tráfego de *downstream*. Foi também obtido um *power budget* máximo de 33 dB. Os resultados estão ilustrados na figura 5.28. A partir dos 36 dB a ONU anuncia um alarme indicando que não se consegue registar. Isto acontece pois apesar de a ONU receber as informações para proceder ao seu registo na OLT, como o canal de *upstream* está muito degradado devido à atenuação, a ONU não consegue transmitir a sua identidade à OLT, não fazendo parte das tabelas de clientes ligados da OLT. Este método de registos permite à OLT saber que clientes estão a utilizar a linha e detectar dispositivos que não devam estar a utilizar a linha.

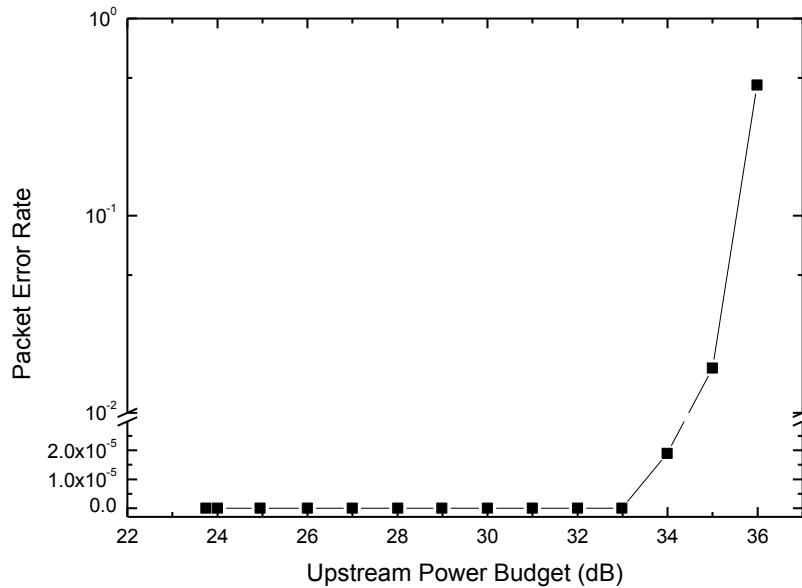


Figura 5.28: Taxa de pacotes errados para o canal de *upstream* sem a *Extender Box*.

Seguem-se os testes aos amplificadores integrados no cenário de operação real. Primeiro, vai-se testar o DFA, depois o SOA da CIP e finalmente o SOA da Alphon.

5.4.1 Amplificador de Fibra Dopada para *Downstream*

O amplificador da IPG foi introduzido na montagem experimental entre a fibra de 20 Km e o *splitter* de 1:8. Foi configurada a corrente de bomba de 0.51 Amperes. O objectivo é analisar o máximo *power budget* admitido com a introdução deste amplificador. Introduzem-se dois atenuadores variáveis que simulam as perdas antes da *Extender Box* e depois da *Extender Box*, nomeadamente na OTL e na ODN. As medidas são feitas isoladamente para cada canal. A montagem experimental é ilustrada na figura 5.29.

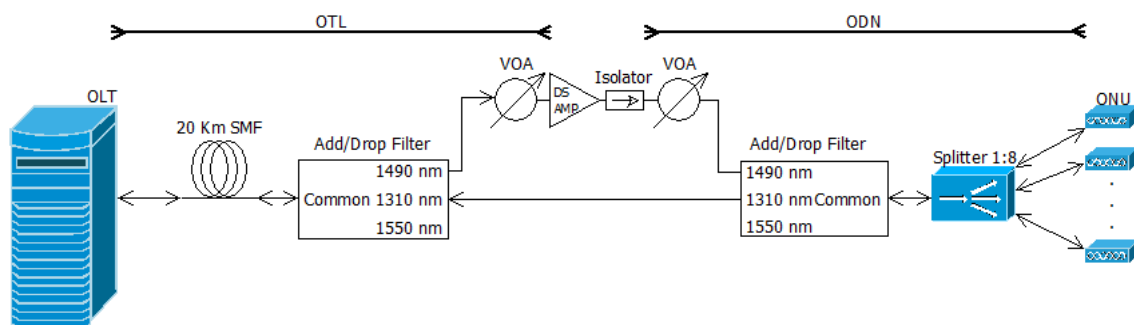


Figura 5.29: Montagem Experimental para teste dos amplificadores de *downstream* para a *Extender Box*.

O tráfego tem as mesmas características das experiências anteriores, são enviados pacotes IP com tamanho aleatório uniformemente distribuído entre 128 bytes e 1500 bytes com carga paga também aleatória. As simulações são feitas a 90 Mbit/s e são enviados 1 milhão de pacotes.

Os resultados demonstram que é possível aumentar o *power budget* total para um valor máximo de 59 dBs. Este resultado foi obtido com 24 dB de *power budget* na OTL e 35 dB de *power budget* na ODN. O *power budget* na OTL é definido como as perdas introduzidas na *Optical Trunk Line*, ou seja, entre a OLT e a *Extender Box* e o *power budget* na ODN como as perdas introduzidas entre a *Extender Box* e as ONUs. O amplificador permite assim um aumento em relação à situação normal de 26 dB. Na figura 5.30 é apresentada a sequência de bits à saída do segundo VOA e na figura 5.31 são apresentados os resultados com outras combinações de *power budgets* na OTL e ODN.

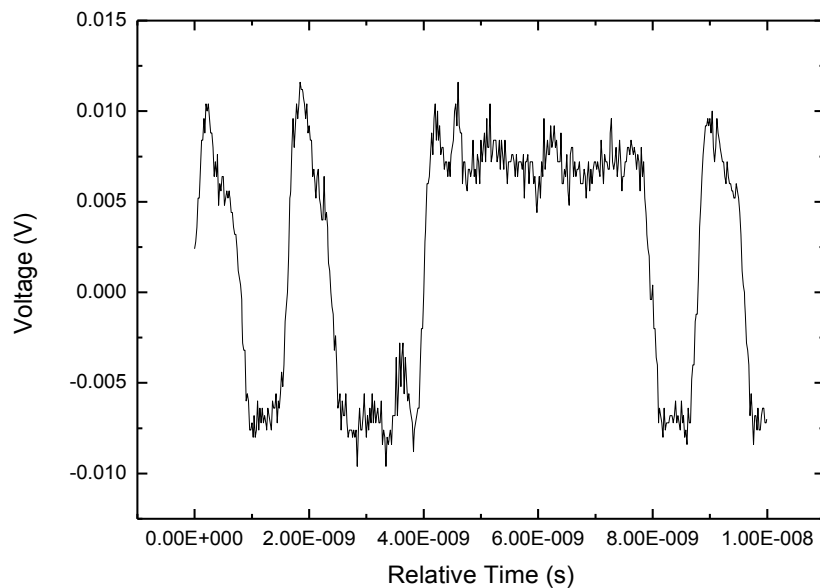


Figura 5.30: Sequência de bits obtida para a situação de máximo *power budget* (59 dBs) à saída do segundo VOA.

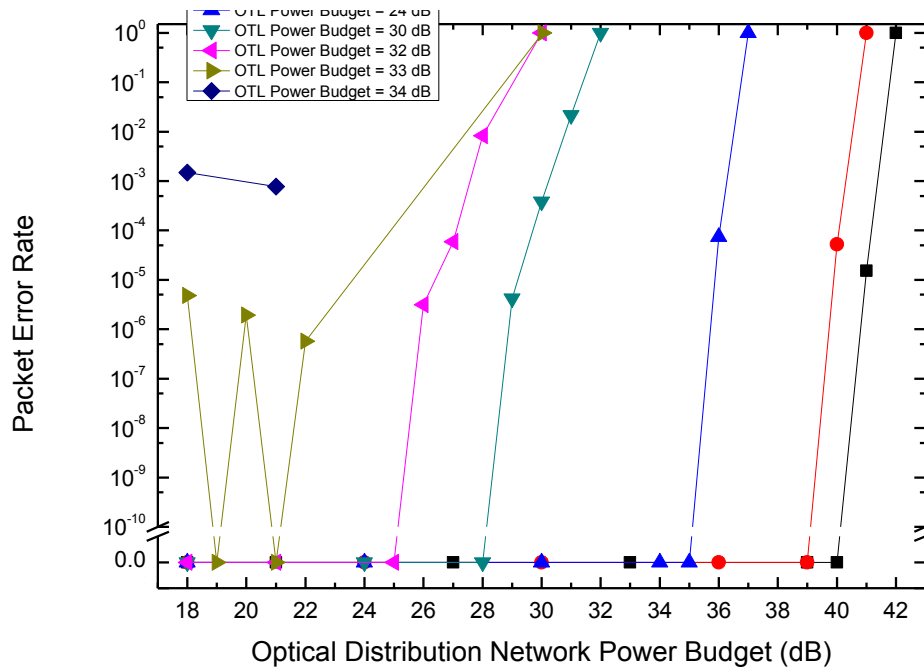


Figura 5.31: Taxa de pacotes errados para combinações de *power budgets* na OTL e ODN usando o amplificador IPG Photonics TAD-20.

Os resultados demonstram que o amplificador consegue operar em situações em que temos valores muito altos de atenuação na linha, conseguindo ir de forma estável até aos 30 dB na OTL com um valor na ODN compreendido entre 18 e 28 dB. Estes valores mostram que com este amplificador conseguimos atingir os valores máximos recomendados na norma GPON, de 23 dB na OTL e 13 a 28 dB na ODN.

5.4.2 Amplificador SOA para *Downstream*

A montagem para o amplificador SOA da CIP é a mesma que foi utilizada para o amplificador de fibra dopada (figura 5.29). Apenas se trocou um amplificador pelo outro. A corrente de polarização usada foi de 145 mA. O tráfego e o procedimento utilizado foram o mesmo da secção anterior.

Os resultados mostram que o amplificador SOA permite aumentar o *power budget* para 51 dB. Este resultado foi obtido em três combinações de *power budget* para a OTL e ODN:

- 25 dB na OTL e 26 dB na ODN

- 32 dB na OTL e 19 dB na ODN
- 33 dB na OTL e 18 dB na ODN.

O amplificador permite um aumento de 18 dB no power budget em relação à situação normal. A sequência de bits referente à última combinação de atenuações (33/18) é apresentada na figura 5.32. As taxas de erro referentes às outras combinações de *power budgets* são apresentadas na figura 5.33.

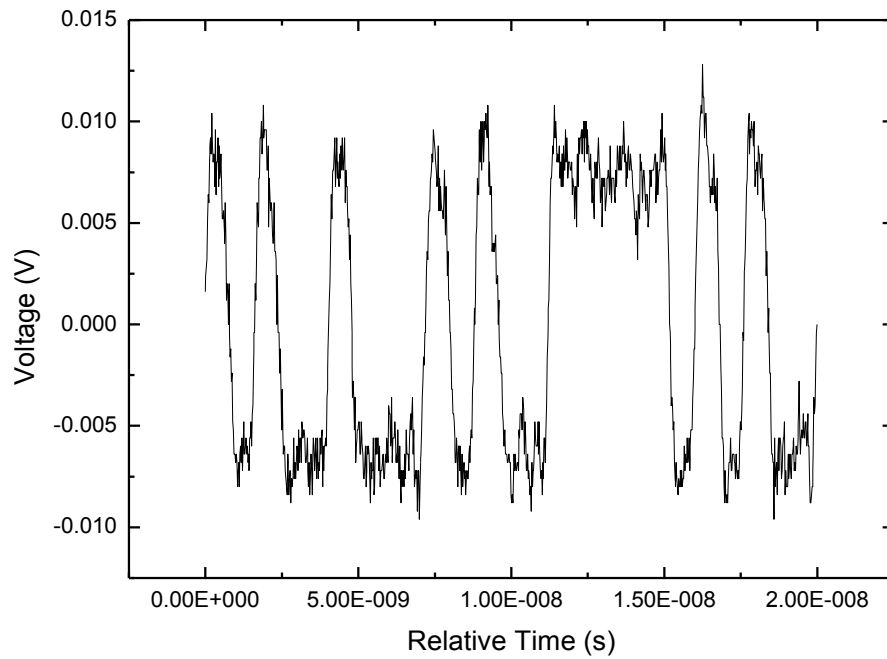


Figura 5.32: Sequência de bits obtida para a situação de máximo *Power Budget* (51 dBs) à saída do segundo VOA.

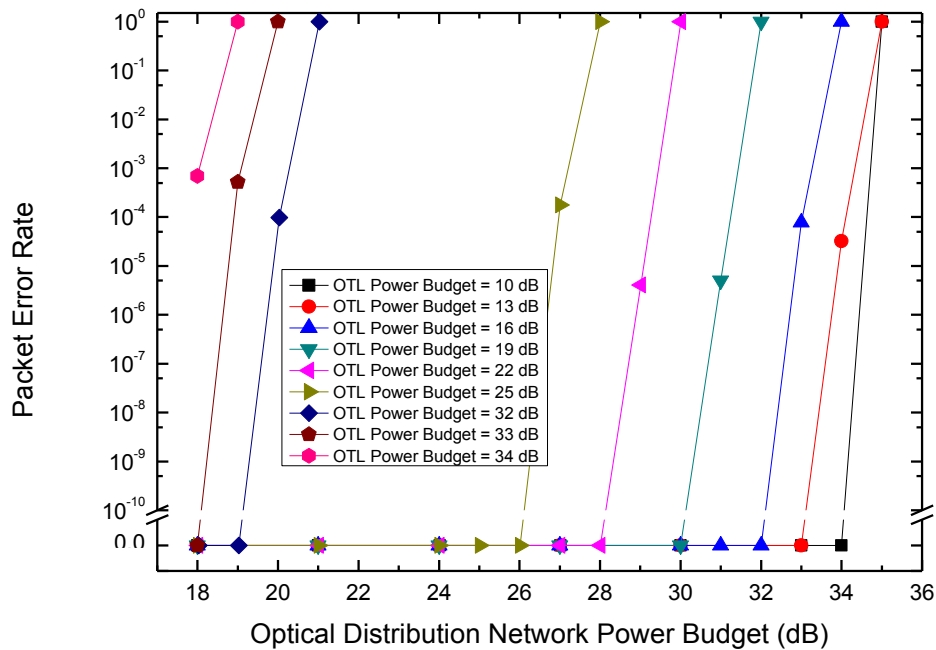


Figura 5.33: Taxa de pacotes errados para combinações de *power budgets* na OTL e ODN usando o amplificador CIP SOA-S-OEC-1550.

Com o amplificador da CIP, o desempenho é inferior ao desempenho obtido com o amplificador de fibra dopada. A figura de ruído superior e o ganho inferior penalizam claramente este amplificador em comparação com o amplificador de fibra dopada. Tomando por referência novamente os valores máximos admitidos na norma para o *power budget*, não conseguimos atingir os 23 dB na OTL para toda a gama admitida na ODN, apenas o conseguimos aos 22 dB (risca rosa). Estes valores já eram esperados, pois ao contrário do amplificador de fibra dopada, o SOA da CIP foi desenhado para operar na banda C, apresentando claras penalizações quando a operar na banda S.

5.4.3 Amplificador SOA para *Upstream*

O amplificador da Alphonion foi introduzido para o canal dos 1310 nm na mesma situação que os amplificadores anteriores, a montagem é ilustrada na figura 5.34. A corrente de polarização utilizada foi de 450 mA, o valor para o qual obtivemos melhor resultado para a relação ganho figura de ruído.

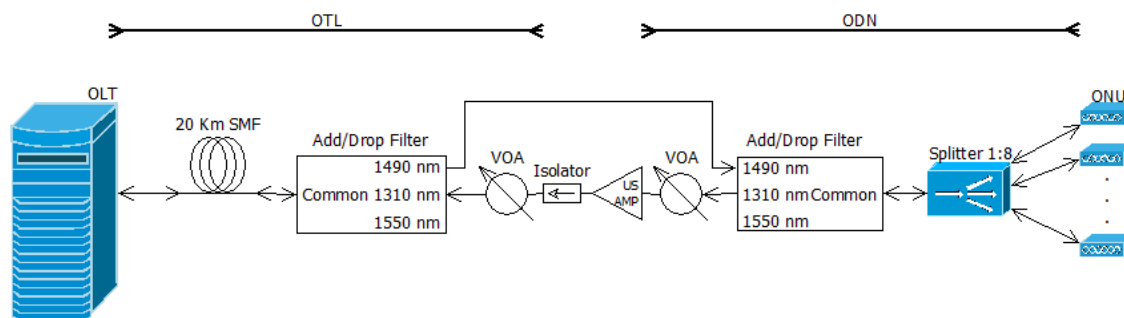


Figura 5.34: Montagem Experimental para teste do amplificador de *upstream* para a *Extender Box*.

O tráfego *upstream* é tráfego IP com tamanho aleatório uniformemente distribuído entre 128 bytes e 1500 bytes e com carga paga aleatória. A taxa de transmissão é 90 Mbit/s e são enviados 1 milhão de pacotes.

Os resultados das simulações mostram que o amplificador permite aumentar para 55 dB o *power budget* total, obtendo-se um ganho de 22 dB em relação à situação normal. Este *power budget* foi atingido com as seguintes combinações:

- 25 dB na OTL e 30 dB na ODN
- 26 dB na OTL e 29 dB na ODN.

Os resultados para todas as combinações testadas são apresentados na figura 5.35. É de notar que como o amplificador apresenta o ganho elevado é necessário atenuar entre cerca de 23 e 33 dBs a OTL para que a transmissão seja bem sucedida. Isto deve-se a estarmos no limite ou perto da potência máxima que o fotodetector da OLT de EPON pode suportar para uma transmissão sem erros (no mínimo podemos ter -27 dBm e no máximo -6 dBm de potência no receptor da OLT). Em relação aos balanços de potência conseguimos obter valores de perdas na ODN de 29 dB para uma gama na OTL de 23 a 26 dB. Estes valores são inferiores ao definido na norma GPON no caso da OTL em 2 dB, 28 dB na OTL e 13 a 28 dB na ODN. Mais uma vez este resultado está relacionado com o ruído que o amplificador introduz na linha.

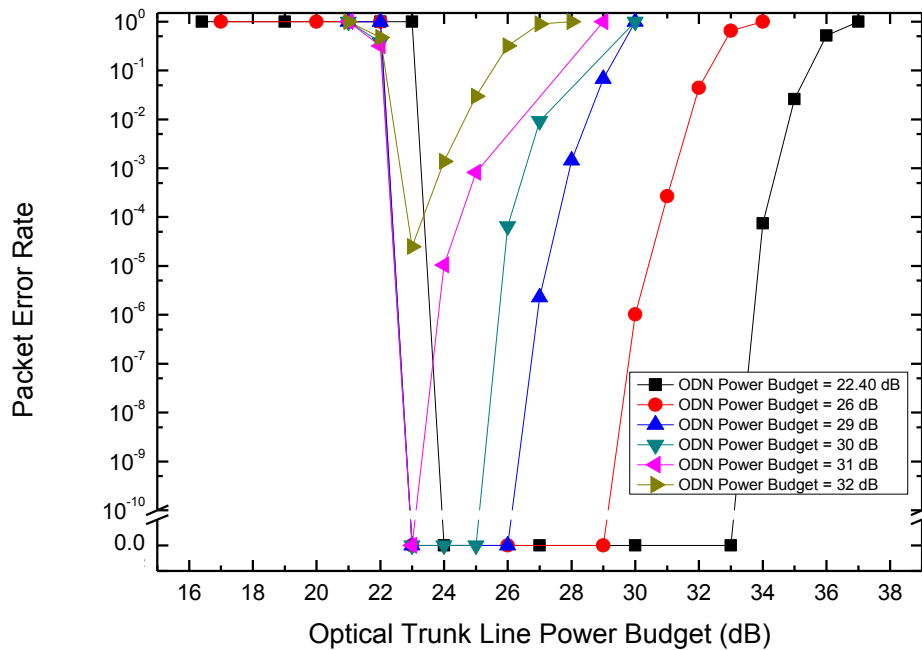


Figura 5.35: Taxa de pacotes errados para combinações de *power budgets* na ODN e OTL usando o amplificador Aliphion SOA29p.

5.4.4 Análise dos Resultados

Os três amplificadores apresentam desempenhos que nos permitem operar acima dos 50 dB de *power budget* total. Na tabela 5.2 são apresentados os valores totais.

Amplificador	Power Budget (dB)	Ganho (dB)
DFA em <i>Downstream</i>	59	26
SOA em <i>Downstream</i>	51	18
SOA em <i>Upstream</i>	55	22

Tabela 5.2: *Power budgets* totais obtidos para cada um dos amplificadores testados e o ganho em relação à situação onde não é usado *Extended Reach*.

É de notar que o ganho em *power budget* é inferior ao ganho de cada amplificador obtido na caracterização, isto deve-se ao facto de o ruído para os *power budgets* mais elevados começar a degradar o sinal. O pior caso acontece no amplificador da Aliphion onde tendo um ganho de aproximadamente 28 dB na caracterização só permite 22 dB de ganho no *power budget* total.

Apenas o amplificador de fibra dopada da IPG consegue operar em toda a gama definida para a *Extender Box* na norma GPON. O amplificador da CIP e da Aliphion

não conseguem suportar todas as combinações de *power budget* definidas, sendo que com diferenças de 1 dB no caso do SOA da CIP e 2 dB no caso do Alphon, a passagem para um cenário onde se usa equipamento GPON poderá compensar parcialmente este déficit pois a GPON apresenta uma sensibilidade nos receptores superior ao EPON (+3 dB em *downstream* e + 1 dB em *upstream*). O uso dos atenuadores variáveis permite diminuir o ganho e manter os amplificadores a operar nas gamas da norma GPON. Além disso os amplificadores não apresentam ganhos equivalentes, tendo de ser equalizados para que os níveis de potência sejam próximos.

No capítulo 2 foram apresentadas as recomendações para a norma GPON onde foi referido que no máximo podemos ter 60 Km de distância entre ONU e OLTs e que o número de clientes que são recomendados suportar são 128. Partindo destes valores chegamos a um *power budget* para esta situação de 39.4 dB para *downstream* e de 46 dB para *upstream*. [35-36] Todos os amplificadores permitem a operação nesta situação sem erros. Em relação ao amplificador de *upstream* não temos outra opção, o SOA da Alphon vai ser o amplificador escolhido. Para *downstream*, e mesmo apresentando valores superiores à norma GPON em termos de figura de ruído e ganho inferior ao amplificador de fibra dopada, vamos escolher o SOA da CIP pois o preço deste amplificador é muito mais reduzido que o amplificador de fibra dopada.

5.5 Teste da *Extender Box* em cenário Real

Os amplificadores a utilizar para *downstream* e *upstream* foram escolhidos na secção anterior. Segue-se o teste dos dois SOAs em simultâneo. O caso real que é considerado é 60 Km servindo 128 clientes. A OTL vai ser constituída por 55 Km de fibra e a ODN por dois *splitters* em cascata de 1:8 e 1:16 com as ONUs a 5 Km de distância do *splitter*. Este cenário pretende representar um cenário rural ou de consolidação de *Central Offices* onde temos clientes a uma distância significativa da OLT.

A tecnologia EPON só permite distâncias máximas de 20 Km. Para emular os 60 Km da GPON os atenuadores de cada canal são incrementados com a atenuação dos 40 Km que faltam em *downstream* e *upstream*. Em relação aos 128 clientes apenas

podemos usar na simulação 6 pois só temos 6 ONUs disponíveis. De qualquer forma estão disponíveis as 128 saídas para clientes.

A simulação foi feita com pacotes de tamanho aleatório uniformemente distribuído entre 128 bytes e 1500 bytes e de carga paga aleatória. A velocidade de transmissão foi de 90 Mbit/s e foram gerados 12 milhões de pacotes para as ONUs, 2 milhões para cada uma e 10 milhões de pacotes a partir de cada ONU em direcção à OLT, fazendo ao todo 60 milhões de pacotes a chegar à OLT. Todas as transmissões são feitas em simultâneo. A montagem é ilustrada na figura 5.36 (No anexo C é apresentada a montagem completa incluindo o equipamento de análise de tráfego IXIA).

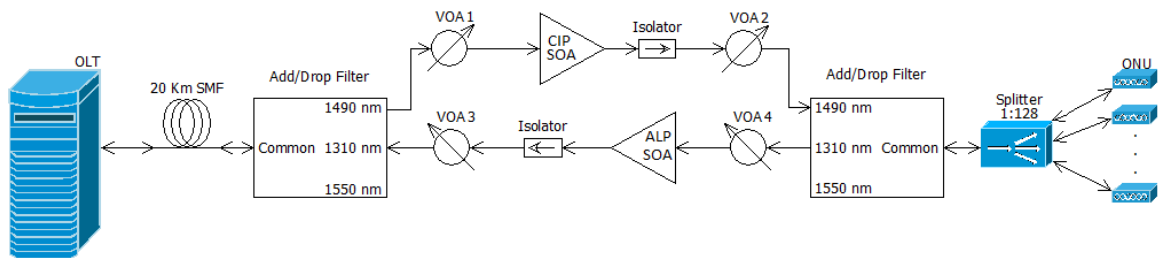


Figura 5.36: Montagem Experimental para emular um cenário GPON com 60Km e 128 clientes.

No final da experiência foi possível observar que não houve nenhum erro nos 72 milhões de pacotes enviados. Este facto demonstra que é possível com base nos dois amplificadores utilizados aumentar a extensão da rede óptica de acesso. O efeito da dispersão e dos atrasos de propagação não foi incluído neste teste, devido às limitações do sistema EPON. A norma GPON suporta os 60 Km, logo, caso tivéssemos à disposição um equipamento deste tipo não teríamos problemas de compatibilidade com os 60 Km.

(Esta página foi deixada em banco intencionalmente.)

Capítulo 6. Conclusões e Trabalho Futuro

6.1 Conclusões

Nesta dissertação foi apresentado o estudo dos requisitos que permitem implementar um dispositivo capaz de aumentar as capacidades básicas da tecnologia GPON. Para isso, foram estudados os dispositivos equivalentes disponíveis no mercado e os amplificadores ópticos disponíveis para a sua implementação.

Foi apresentado um protótipo para a *Extender Box* com base em SOAs e com um amplificador adicional para amplificar o canal de vídeo. Os amplificadores para *downstream* e *upstream* foram avaliados num cenário real, tendo conseguido aumentar para 128 clientes e 60 km a distância entre OLT e ONUs, igualando as capacidades do dispositivo da Alphion e ainda permitindo a amplificação de CATV. A avaliação da *Extender Box* foi feita com o recurso a um sistema EPON, mas como os balanços de potência da GPON são superiores ao do EPON, podemos supor que também funcionará em GPON, facto este que necessita de verificação experimental devido a termos utilizado um amplificador em *downstream* que apresenta uma figura de ruído superior à definida na norma GPON.

O protótipo apresenta um amplificador para CATV que não foi possível implementar devido às limitações de tempo e material (geradores para o canal de vídeo).

6.2 Trabalho Futuro

Como trabalho futuro seria interessante adaptar a *Extender Box* proposta a cenários em que se possa usar multiplexagem de comprimentos de onda para permitir ainda mais clientes suportados. Para isso teríamos de investigar métodos para converter comprimentos de onda de forma à operação ser transparente para as ONUs e OLTs Os amplificadores também teriam de ser avaliados pois os SOA podem apresentar efeitos não lineares quando em operação sobre WDM. [31]

Outro projecto interessante passa por implementar uma *Extender Box* que suporte as novas normas para redes de acesso a 10 Gbit/s em conjunto com as tecnologias GPON e EPON. Neste cenário a implementação de apenas um amplificador bidireccional para todos os fluxos de dados poderia ser investigado. Mais uma vez teríamos de recorrer a conversores de comprimento de onda.

Anexo A. Equipamento EPON da Fiberhome: Configuração da OLT AN5116-2

A.1 Overview

Antes de começar a descrever as configurações que foram feitas no sistema é necessário compreender a sintaxe que é utilizada. A linha de comandos da OLT está organizada em pastas. Cada pasta tem os seus parâmetros e respectivos comandos associados. Para navegar nas diferentes pastas é utilizado o comando “cd “ seguido da pasta onde se pretende entrar. No caso de querermos voltar à pasta anterior utilizamos o seguinte comando. “cd ..”, onde os dois pontos indicam que se pretende voltar à pasta raiz.

Em qualquer das pastas temos disponíveis comandos que ajudam nas suas configurações. Um desses comandos é o “list” que lista todos os comandos que estão disponíveis na pasta em que estamos. O comando “help” disponibiliza ajuda.

Quando nos é apresentado um comando e os respectivos parâmetros a introduzir, podem estar presentes as seguintes sintaxes:

1. *Square Brackets*: [a | b | ...]
2. *Braces*: { }*n
3. *Angle Brackets*: < >
4. a – b

A primeira indica um ou a lista de argumentos necessários. No segundo caso apresenta um valor opcional ou lista de argumentos opcionais, onde o número que define quantos argumentos são necessários é definido pelo valor de “ n ”. No terceiro caso é definido um valor ou variável necessária. A quarta sintaxe indica que é necessário um valor entre “ a “ e “ b “.

Nas configurações feitas ao longo deste documento, sempre que uma configuração é específica da aplicação que pretendemos utilizar, esse valor estará sublinhado. Estes valores devem ser modificados consoante a situação prática a ser considerada no projecto.

A.2 Configuração de ligação por Telnet

A configuração do sistema EPON AN5115-2 é feita recorrendo à porta de consola da carta GSWC da OLT. De maneira a facilitar todo o processo de acesso e configurações é também possível o acesso recorrendo a uma ligação Telnet com a OLT. Para isso devem ser introduzidas, utilizando a porta de consola, as configurações seguintes:

1. cd ..
2. erase startup-config (apaga a configuração que arranque, opcional)
3. cd vlan
4. delete managevlan (caso não tenha introduzido o comando de apagar a configuração de arranque)
5. set manage vlan inputport 4000 29:1 untagged
6. set manage ip 193.136.92.242/23 193.136.92.1
7. show manage vlan (Verificar as configurações introduzidas)
8. cd service
9. show services (Verificar se o Telnet e SNMP estão activos)
10. cd ..
11. save configuration (salva as alterações para a configuração de arranque).

Neste caso pretende-se que a VLAN para o acesso seja a VLAN 4000 e a porta pelo qual é feito o acesso seja a porta 29:1, em que esta é configurada no modo untagged. O IP para o acesso Telnet é 193.136.92.242/23 e o gateway é 192.136.92.1.

É recomendado que esta configuração seja a primeira a ser efectuada, daí as configurações existentes na OLT serem apagadas e carregadas as configurações por defeito. É também recomendado que se salve no final a configuração as alterações para que sempre que o equipamento seja ligado não seja necessário introduzir a sua configuração novamente.

Desta forma é possível aceder à OLT remotamente através de Telnet, usando por exemplo o programa Putty.

A.3 Registo de uma ONU

Para que a ONU tenha acesso à rede através da OLT é necessário que esta esteja registada nas tabelas de ONUs autorizadas. Temos então de registar a ONU antes de se ligar, pois caso esta seja ligada sem estar registada a OLT gera um alarme para ONU desconhecida.

A ONU pode ser então registada da seguinte forma:

1. cd device
2. set slot 1 type 5006_05 mac 544b5000c7f8 sequence 1
3. show slot 1 onu 1 information (verifica se a ONU está registada)
4. cd ..
5. save configuration

Neste caso pretende-se registar a ONU com o MAC address 544b5000c7f8 que é do modelo 5006_5 com o registo número 1.

Neste momento para que haja acesso da ONU à rede core através da OLT basta apenas ligar uma das portas GE (exceptuando a 29:1, que é usada para acessos de configuração) à rede core, no nosso caso utilizámos a porta GE3 (29:3).

A.4 Configuração das larguras de banda

Depois de registar a ONU podemos proceder às atribuições de largura de banda. Em primeiro lugar definimos a largura de banda a atribuir a cada uma das PONs, cada carta tem duas.

1. cd device
2. set epon slot 1 pon 1 downstream bandwidth 1000000 burst 256
3. set epon slot 1 pon 1 upstream bandwidth 1000000 burst 256
4. show epon slot 1 pon 1 downstream bandwidth (verificar a BW atribuída)

5. show epon slot 1 pon 1 upstream bandwidth (verificar a largura de banda atribuída)
6. cd ..
7. save configuration.

No nosso caso pretendemos apenas utilizar uma das PONs, a número 1, por isso atribuímos a esta o máximo de largura de banda possível. Em relação ao tamanho dos bursts, quer de downstream quer de upstream também utilizamos o maior valor possível pois só temos uma ONU a disputar o meio.

Além da largura de banda a atribuir a cada grupo de 64 ONUs, podemos também definir que parte dessa largura de banda atribuir a cada uma dessas ONUs. Temos disponíveis dois comandos que nos permitem fazer essa atribuição:

1. cd device
2. set slot 1 onu 1 port <1-16> service <1-2> downstream band <256-1000000>
3. set slot 1 onu 1 port <1-16> service <1-2> upstream min_band <0-1000000> max_band <256-1000000>
4. cd ..
5. save configuration

No nosso caso prático não definimos nenhuns serviços, daí não terem sido usados estes comandos. Os valores utilizados foram os valores default, que podem ser consultados utilizando o comando:

1. cd device
2. show slot 1 onu 1 service-band

A.5 Configuração em uso na OLT

As configurações que estão a correr na OLT ou que são carregadas quando esta faz boot podem ser vistas, respectivamente, utilizando os comandos seguintes:

- a. cd ..
- b. show running-config
- c. cd ..

d. show startup-config

Depois das configurações introduzidas acima ao correr o segundo comando obtemos o seguinte resultado:

```
Admin# show running-config
!WOS system config file-----
!Device config -----
set uplink port 29:1 flowcontrol disable
set uplink port 29:3 flowcontrol disable
set temperature thresh max 40.00 min 10.00
set humidity thresh max 80.00
set acv thresh max 280.00 min 170.00
set dcV thresh max 60.00 min 45.00
set battery thresh 43.00
set broadcast control disable
set multicast control disable
set unknown control disable

!vlan config -----
set manage vlan inputport 4000 29:1 untagged
set manage ip 193.136.92.242/23 193.136.92.1

set slot 1 type 5006_05 mac 544b5000c7f8 sequence 1
set slot 1 onu 1 port 1 service 1 upstream min_band 640 max_band 100000
set slot 1 onu 1 port 2 service 1 upstream min_band 640 max_band 100000
set slot 1 onu 1 port 2 service 2 upstream min_band 640 max_band 100000
set epon slot 1 pon 1 downstream bandwidth 950000 burst 256
!ac16 ngn config-----
set epon slot 1 onu 1 enable
!user config -----

!STPD config -----

!rapid spanning tree config -----
!rapid spanning tree config

!Qos config -----
set priority mode wrr

!usermanage config-----

user add wri login-password c11d09c7009e2efa9d68468ce7029794
user role wri ADMIN enable-password c11d09c7009e2efa9d68468ce7029794

!snmp config -----
```

```
set snmp community readonly adsl
set snmp community readwrite adsl
service snmp enable
service snmp trap enable

!end of config -----
Admin#
```

Como se pode ver estão configurados outros parâmetros além dos que foram introduzidos pelo utilizador. Estes parâmetros estão já configurados por defeito, como é o caso das temperaturas de operação.

Uma configuração que foi também introduzida e não foi feita referência é a de não limitar os pacotes ethernet de broadcast, multicast e desconhecidos que circulam na OLT. Esta configuração pode ser feita recorrendo aos seguintes comandos:

- a. cd device
- b. set broadcast control disable
- c. set multicast control disable
- d. set unknown control disable
- e. cd ..
- f. save configuration

Para limitar a circulação destes pacotes pode ser usado o comando:

- a. cd device
- b. set[broadcast|multicast|unknown|all] control enable limit <1-131071>

Onde escolhemos o tipo de pacote em que queremos impor limite e o número limite que pretendemos.

Anexo B. Analisador de Redes IXIA

B.1 Introdução

O equipamento IXIA é constituído por várias cartas em que cada uma delas é utilizada para avaliar o desempenho de diferentes sistemas. No nosso caso interessamos destacar a carta com interface *Ethernet* sobre cobre onde estão disponíveis várias portas. Estas foram as portas utilizadas no teste da *Extender Box* desenvolvida ao longo deste documento. Na secção B.2 vão ser apresentados os detalhes que nos permitem fazer este tipo de testes. A outra carta que é do nosso interesse é uma carta com dois interfaces *10 Gigabit Ethernet*. As capacidades desta carta e a sua utilização são detalhados em B.3.

B.2 Aplicação em teste de Redes de cobre *Ethernet*

Como foi referido na introdução, uma das cartas do equipamento IXIA possui várias portas Ethernet de cobre que suportam até 1 Gbit/s em *Full Duplex mode*. Qualquer uma destas portas funciona de forma bidireccional, permitindo gerar e receber tráfego. A aplicação que vai permitir aceder a estas capacidades chama-se ixNetwork. [37] É nesta aplicação onde vão ser inseridas as configurações, gerar e analisar os resultados.

Antes de as portas estarem prontas a funcionar é necessário configurar os seus IPs. No nosso caso é do interesse que todas as portas pertençam à mesma rede logo vamos usar os seguintes IPs: 192.168.1.254 para a porta 0, que liga à OLT e 192.168.1.1 para a porta 1 que liga à ONU 1 até 192.168.1.6 para a porta 6 que liga à ONU 6. O esquema destas ligações é apresentado na figura B.1. A EPON não opera na camada IP, logo as suas portas Ethernet não têm IPs, operam apenas na camada de transporte. São também configurados os *default gateway* de cada uma das portas, sendo que a porta 0 não tem *default gateway*, é configurado o valor 0.0.0.0 e cada um das ONUs tem como seu *default gateway* a porta 0, é então inserido o valor 192.168.1.254. Após a configuração inicial dos IPs podemos testar a conectividade entre todas as portas através de um comando *Ping*.

Neste momento podemos partir para a criação dos modelos de tráfego que vamos utilizar. O tráfego gerado é tráfego IP, onde podemos escolher além da origem e destino, o tamanho, o conteúdo da carga paga e a velocidade. Podemos também definir o número máximo de pacotes que são enviados ou o tempo de cada simulação.

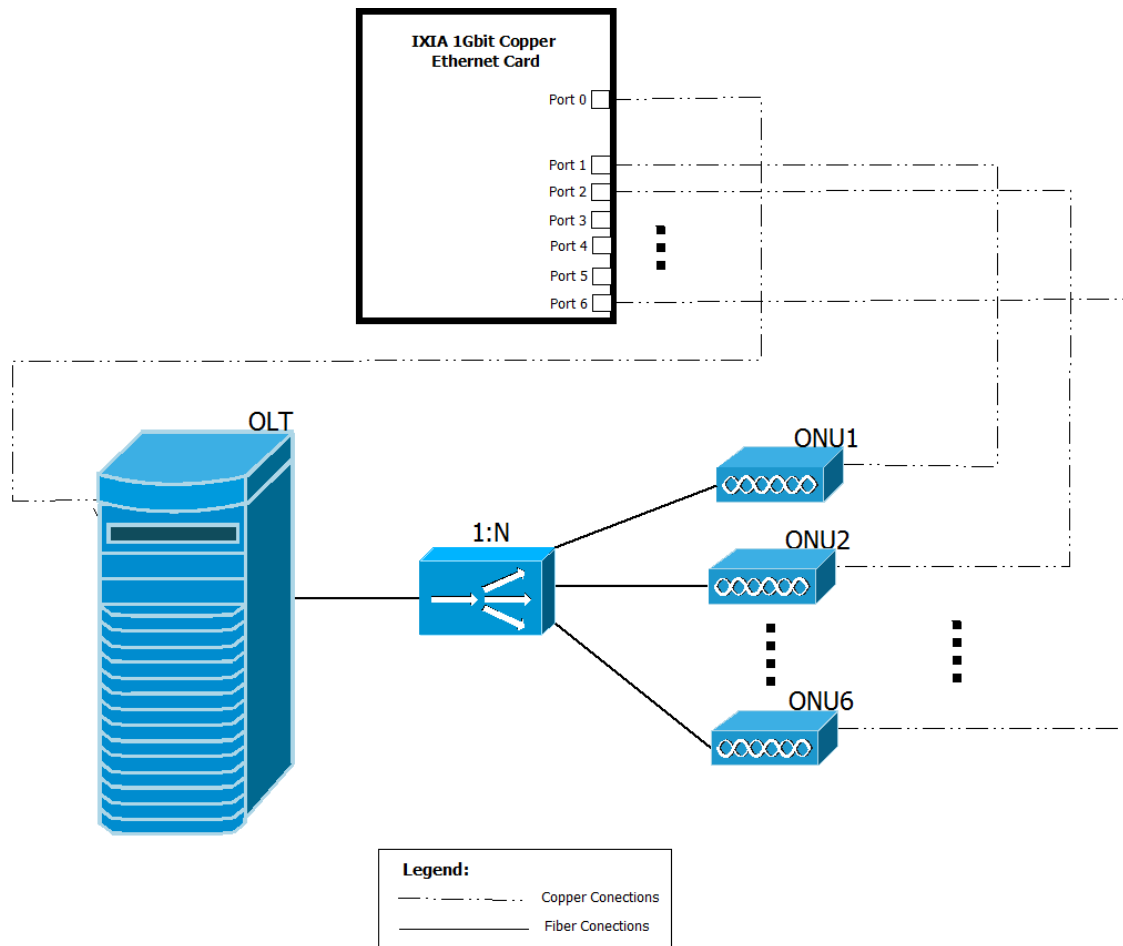


Figura B.1: Exemplo de ligação do IXIA com um sistema a testar.

Após a configuração do tráfego estamos prontos para começar a simulação. Os pacotes são enviados para as portas definidas. Os resultados das transmissões são apresentados sobre a forma de estatísticas no programa, onde se podem destacar as seguintes estatísticas:

- Frames Sent – Número total de pacotes enviados
- Valid Frames Received – Número total de pacotes válidos recebidos
- Bits Sent – Número total de bits enviados
- Bits Received – Número total de bits recebidos

- CRC Errors – Número total de erros de CRC

Com os resultados das estatísticas podemos analisar o desempenho do sistema.

Para finalizar, é também possível capturar todos os pacotes, ou apenas os pacotes com determinadas características, que são recebidos nas interfaces do IXIA, que pode ser um grande ajuda quando os equipamentos a testar enviam alguns pacotes que podem adulterar as estatísticas. Desta forma é-nos possível compreender exactamente o que está a acontecer ao nível da camada IP.

B.3 Aplicação em teste de sistemas ópticos

Nesta secção pretende-se apenas analisar a sua funcionalidade aplicada a medições de taxa de erros em redes ópticas passivas. O objectivo é a medição da taxa de erros de um sistema em que são utilizados amplificadores ópticos.

A função do IXIA, nesta secção através da aplicação ixExplorer [38], é gerar tráfego e analisar o desempenho do sistema. Na figura B.2 é apresentado o esquema de ligação do IXIA com o sistema a testar. O IXIA opera como gerador e receptor de tráfego, analisando o desempenho do sistema por onde o tráfego circula.

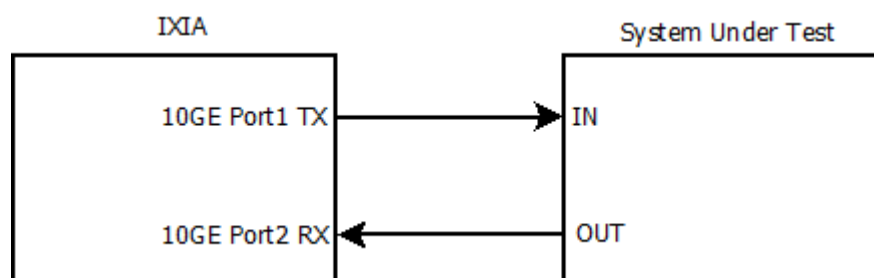


Figura B.2: Esquema de interligação entre os portos 10GE do IXIA e o sistema a testar.

Os módulos de que dispomos no laboratório não permitem fazer medições directas de BERT. O que é possível fazer é gerar PRBS para ser introduzido na carga paga do pacote. Esse pacote é enviado e no receptor do IXIA é feita a análise da carga paga que é comparada com o que foi enviado. O IXIA apresenta então nas suas estatísticas o número

total de bits errados das sequências PRBS geradas, que sabendo o número total de bits PRBS enviados, nos permite estimar a taxa de erros da transmissão.

Algumas das estatísticas que podem ser úteis na caracterização são as seguintes:

- Frames Sent – Número total de pacotes enviados
- Valid Frames Received – Número total de pacotes válidos recebidos
- Bits Sent – Número total de bits enviados
- Bits Received – Número total de bits recebidos
- CRC Errors – Número total de erros de CRC
- Input Signal Strength (dBm) – Potência óptica recebida no receptor
- Link Fault State – Estado da ligação
- Frames received with coding errors – Número total de pacotes recebidos com erros na codificação
- Dropped Frames – Número total de frames descartados
- PRBS Frames Received – Número total de pacotes com PRBS recebidos
- Rx PRBS Frames with Header Error – Número total de pacotes com PRBS recebidos com erros no cabeçalho
- PRBS Bits Received – Número total de bits PRBS recebidos
- PRBS Errored Bits – Número total de bits PRBS recebidos errados.

Em relação ao tráfego que é possível gerar, podemos escolher a maneira como é feita a transmissão. Podemos então definir os seguintes parâmetros:

- Line Speed – Velocidade de transmissão
- Packets per Burst – Número de pacotes por cada burst
- Inter-Burst Gap (IBG) – Intervalo temporal/bytes entre bursts
- Inter-Packet Gap (IPG) – Intervalo temporal/bytes entre pacotes
- Frame Size – Tamanho do pacote

Como se pode ver na figura é possível detalhar ao pormenor as características das rajadas de pacotes.

Ainda em relação aos pacotes, é permitido que se altere os bytes 2 até 7 do preâmbulo. Os bytes 1 e 8 não são possíveis alterar.

Para que seja possível colocar o sistema a analisar PRBS temos de garantir que essa função foi activada nos portos. De maneira a activar a análise de PRBS devemos seguir os seguintes passos:

- Reset Factory Defaults
- Reset Mode Defaults
- Em Receive Mode seleccionar PRBS
- Apagar todos os streams
- Criar um stream e em Traffic Options seleccionar PRBS
- Garantir que em Data Pattern temos Random

O ponto 1 e 2 servem apenas para garantir que não há outros parâmetros que possam ser incompatíveis com a análise PRBS que pretendemos fazer.

A partir daqui podemos alterar as características do tráfego que apresentámos acima. Sempre que alguma configuração introduzida altere as definições que já estão activas é apresentado um aviso, que devemos verificar pois pode alterar a função de análise de PRBS.

Para colocar a simulação em funcionamento pressionamos o botão Play garantindo que temos a porta emissora de tráfego seleccionada, caso contrário estamos a colocar em funcionamento outra porta e não a desejada. Para parar pressionamos o botão Stop. É possível também definir o tempo de simulação carregando no botão que tem um relógio. No final desse tempo a simulação pára automaticamente.

Quando pretendemos fazer novas simulações devemos apagar as estatísticas da simulação anterior caso contrário as variáveis vão ser incrementadas a partir dos valores da simulação anterior e não do valor zero.

B.3.1 Características dos *transceivers* da carta 10GEthernet

O módulo de 10Gbit/s do IXIA (LSM10GXM2XP) usa *transceivers* da Bookham (IGF-32511J) desenhados para operar a 1550nm. O seu funcionamento é transparente para os protocolos. O transmissor usa EML (*Electro-absorption Modulated Laser*) em conjunto com um isolador óptico. A sua potência de saída é controlada através de um *loop* interno. Na tabela B.1 são apresentadas as especificações do transmissor óptico.

O receptor usa um PIN com o respectivo limitador TIA e apresenta aproximadamente 18dB de gama dinâmica de entrada. Na tabela B.2 são apresentadas as especificações do receptor óptico.

Não é feito nenhum ajuste quer à potência transmitida quer à potência recebida. O uso dos *transceivers* em cenários onde se usam amplificadores não é desaconselhado desde que se respeitem os limites das potências no receptor, sendo que o emissor está protegido com um isolador.

Parameter	Value			Units	Notes
	min	Typical	Max		
Optical Transmit Power	-1.0		+2.0	dBm	EOL
Side mode supression	30			dB	
Extinction Ratio	8.2	9.8		dB	
Jitter Generation	Compliant to GR-253 Issue 4 And ITU-T G.825/G8251			UI	
Optical Path Penalty			2	dB	800ps/nm disp.
Output Optical Eye	Compliant with Telcordia GR-253, ITU-T G.691/G.691.1 and IEEE802.3ae				

Tabela B.1: Especificações operacionais do Transmissor (Bookham IGF-32511J).[39]

Parameter	Value			Units	Notes
	Min	Typical	Max		
Receiver Sensitivity			-15.8	dBm	Ave. Power at ER=8.2 dB (BER 1e-12 used)
Stressed Receiver Sensitivity (OMA)		-13.5	-11.4	dBm	(BER 1e-12 used)
Receiver Overload	+2			dBm	Ave. power (BER 1e-12 used)
Reflectance			-27	dB	
Loss of Signal					
Loss of Signal Assert (Off to On)	-32		-19	dBm	
Loss of Signal (On to Off)			-17	dBm	
Hysteresis	0.5		6	dB	

Tabela B.2: Especificações operacionais do Receptor (Bookham IGF-32511J) [39]

Anexo C. Esquema Completo da Montagem Experimental do Cenário Real Emulado

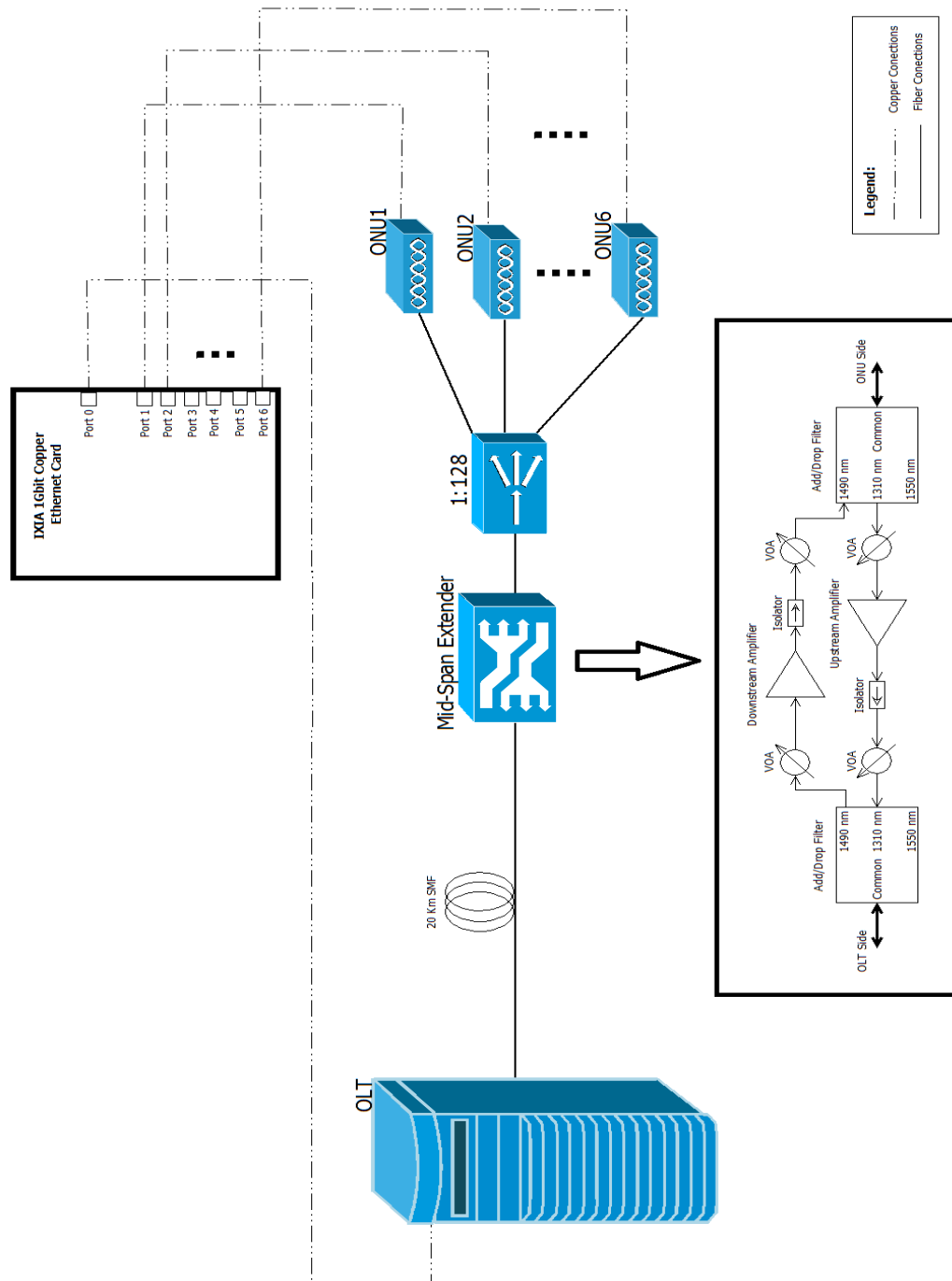


Figura C.1: Montagem Experimental para o teste do cenário 128 clientes 60 km (55 km na OTL e 5 km na ODN). A atenuação correspondente aos 40 km que falta é emulada com os VOAs da *Extender Box*, 35 km com os VOAs do lado da OLT e 5 km com os VOAs do lado das ONUs.

(Esta página foi deixada em banco intencionalmente.)

Anexo D. *Reach extension* em CWDM-stacked PON usando amplificação híbrida Raman/EDFA

D.1 Introdução

A multiplexagem de comprimentos de onda é uma tecnologia valiosa com que a capacidade das redes ópticas passivas pode ser significativamente aumentada. As redes de longo alcance baseadas em WDM-PONs combinam a rede de acesso com a rede de transporte reduzindo os custos associados à rede de transporte. [40] Neste tipo de arquiteturas, o custo da amplificação, o ganho constante e a baixa figura de ruído são essenciais para que o sistema tenha uma boa performance. Embora os amplificadores de fibra dopada com érbio (EDFA) já se tenham estabelecido como uma tecnologia barata, as soluções de amplificação híbrida que incluem amplificação de Raman, têm vantagens inerentes pois permitem uma utilização ampla e flexível da banda de amplificação. As soluções híbridas podem ser obtidas combinando SOAs com Raman [41] ou em alternativa EDFA com Raman. [42]

Neste trabalho pretende-se avaliar o desempenho de uma rede CWDM-PON composta por quatro canais na banda C, na qual um amplificador Raman híbrido em conjunto com um amplificador de fibra dopada é utilizado para aumentar o alcance da mesma. A experiência representa um anel com quatro nós remotos (RNs) ligados por troços de fibra SSMF. Em cada nó remoto um canal é sucessivamente retirado com uma ordem otimizada. O amplificador é constituído por uma bomba a operar em modo contínuo no comprimento de onda 1480 nm, troços otimizados de fibra EDF e por SSMF para obter ganho distribuído de Raman de acordo com o esquema da figura D.1.

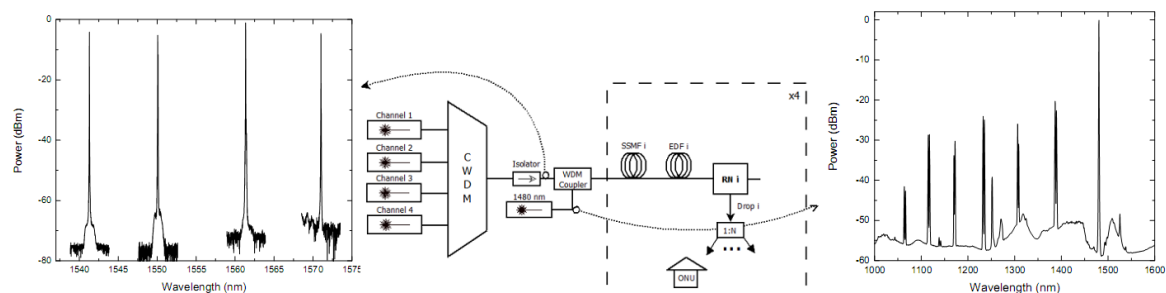


Figura D.1: Esquema geral da rede óptica passiva CWDM analisada. Os espectros medidos para cada canal em *back-to-back* são apresentados assim como o espectro medido para o laser de Raman. A potência do laser de Raman foi configurada para 1W e foi usado um atenuador de 20 dB para proteger o OSA.

D.2 Montagem Experimental

A montagem experimental é composta por quatro canais obtidos com quatro lasers sintonizáveis ECL com os seguintes comprimentos de onda: 1541.35 nm, 1550.12 nm, 1561.42 nm e 1571.00 nm. Os lasers são modulados para minimizar o efeito de Brillouin. O segundo e o terceiro canal são multiplexados usando dois *add/drop multiplexers* (perdas máximas de 0.68 dB) e o último por um acoplador C+L que introduz perdas de 3.72 dB nos 1571.00 nm. A bomba de Raman foi configurada a 1 W foi utilizado um atenuador variável para colocar 500 mW à entrada do primeiro troço de fibra. Os espectros dos sinais e da bomba são também apresentados na figura D.1.

Os canais e a bomba são acoplados com a ajuda de um WDM coupler. Os troços de fibra têm aproximadamente 11 km (11.091 km, 11.560 km, 10.260 km e 10.820 km) e a atenuação é de aproximadamente 0.2 dB/km para a largura de banda utilizada. Os canais são removidos nos nós remotos com *Add/drop multiplexers* para os comprimentos de onda de cada canal. Como os comprimentos de onda mais elevados são os que vão ter um maior ganho de Raman nos primeiros troços de fibra, estes vão ser os últimos a ser retirados. O objectivo passa por obter um ganho constante e portanto os comprimentos de onda mais baixos têm uma necessidade adicional de ganho. A estratégia passa pela inserção de troços adicionais de EDF de maneira a aumentar o ganho nos comprimentos de onda mais baixos para equalizar o ganho de todos os canais. De notar que o esquema de amplificação híbrida usa um laser a 1480 nm que actua simultaneamente como bomba de Raman e bomba para o EDFA. A experiência começou com a medição dos ganhos *on/off* e da figura de ruído com apenas amplificação de Raman, seguidamente foram introduzidos

os troços de EDF consoante a sua caracterização do ganho, tendo sido obtida a configuração otimizada.

D.3 Resultados

Como o ganho de Raman é mais eficiente nos canais do final da banda C (os dois últimos), apenas foi necessário inserir um troço de EDF para aumentar o ganho dos dois primeiros comprimentos de onda. Foi introduzida uma EDF de 15 metros cuja caracterização é apresentada na figura D.2, a seguir ao primeiro troço de SSMF. Não foram introduzidos mais nenhuns troços de EDF.

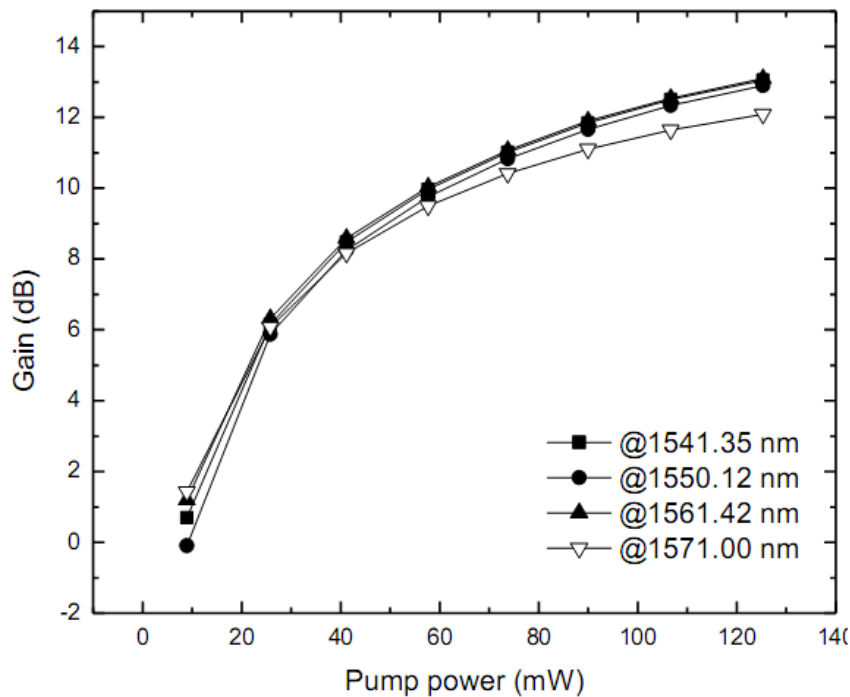


Figura D.2: Caracterização da EDF de 15 metros para os comprimentos de onda dos canais considerados.

O ganho *on/off* e a figura de ruído dos canais retirados em cada nó remoto foram medidos considerando apenas amplificação Raman e a amplificação híbrida. Os resultados são apresentados na figura D.3.

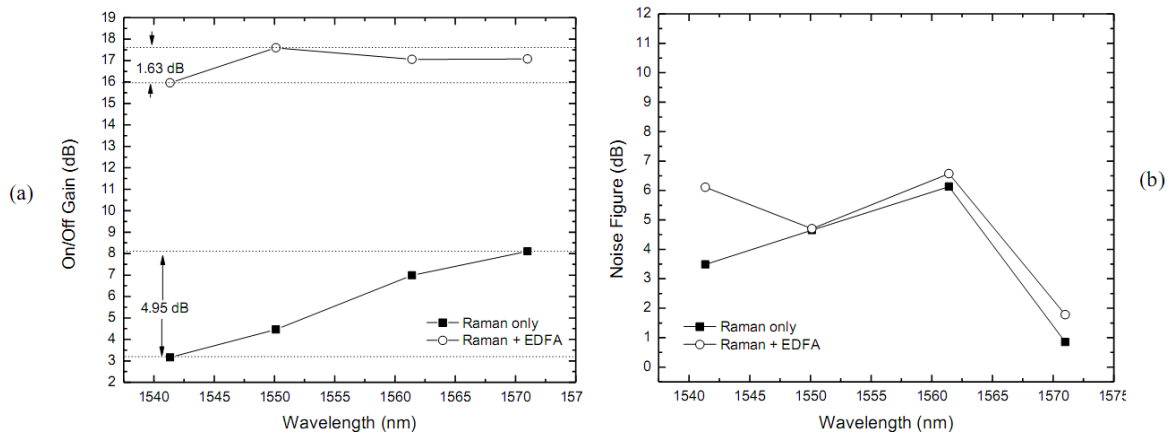


Figura D.3: (a) Ganho *on/off* dos canais CWDM retirados usando apenas amplificação de Raman e usando amplificação híbrida Raman/EDFA. (b) Figura de ruído dos canais CWDM retirados usando apenas amplificação de Raman e usando amplificação híbrida Raman/EDFA.

Os resultados mostram que o ganho assim como o seu *ripple* foram substancialmente melhorados de 4.95 dB para 1.63 dB usando a amplificação híbrida. No entanto a figura de ruído sugere que ambos os esquemas de amplificação têm um mau comportamento, especialmente os primeiros canais a cair. Aparentemente este resultados não são compatíveis com a expectativa teórica, pois os amplificadores de Raman e os EDFA saturados normalmente produzem um nível de ruído baixo. [43-44] Os resultados demonstram também que os dois esquemas de amplificação apresentam um comportamento idêntico. Além disso há uma melhoria significativa do ruído quando os canais na linha diminuem, indicando que o comportamento da figura de ruído não se deve à ASE mas sim a efeitos não lineares. Os efeitos não lineares esperam-se mais prejudiciais no primeiro troço de fibra onde a potência total e o número de canais é mais elevado. Os efeitos de Brillouin que são os mais prováveis de acontecer neste cenário são cancelados pela modulação dos canais. Olhando novamente para o espectro *back-to-back* dos canais na figura D.1, nota-se a existência de lobos laterais nos lasers ECL, que com uma potência elevada na fibra nos primeiros troços também vão ser amplificados e interpretados como ruído no cálculo da figura de ruído. Isto é mostrado na figura D.4 onde são apresentados os espectros do primeiro e do último canal a ser retirado.

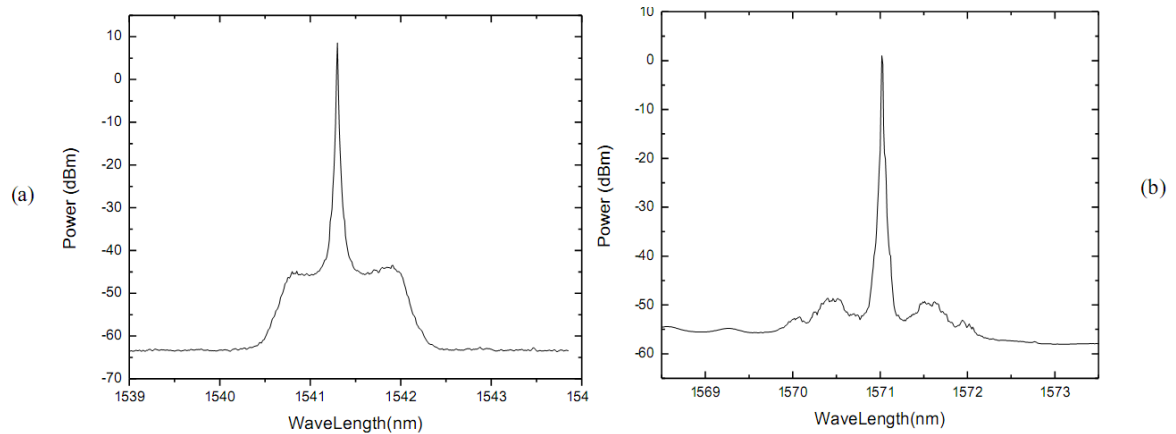


Figura D.4: Espectro do primeiro e do último canal a serem retirados do anel usando amplificação híbrida Raman/EDFA. (a) 1541.35 nm e (b) 1571.00 nm

O procedimento aqui descrito pode ser estendido para a banda L, utilizando a metodologia relatada em [42]. Nesta abordagem, com a potência de bomba a diminuir ao longo da cascata de fibras seriam necessários troços de fibra EDF de maiores dimensões para que o ganho nos canais de comprimento de onda com menor inversão de população seja maior. Poderiam também ser utilizadas EDF desenhadas para a banda L, mas essa solução requer um custo superior. O ponto fraco desta solução seria que quantos mais canais fossem introduzidos na banda L, o ruído dos EDFAs começaria a ser relevante pois estes passariam a operar em regimes não saturados.

D.4 Conclusões

Este trabalho apresenta e demonstra experimentalmente uma técnica de equalização do ganho para redes CWDM-PON usando um amplificador híbrido Raman/EDFA. Os resultados demonstram uma melhoria no *ripple* de 3.32 dB na banda C e banda C estendida. O comportamento do ruído no sistema híbrido não é alterado comparando com a amplificação simples de Raman, pois o EDFA está a operar na saturação.

(Esta página foi deixada em banco intencionalmente.)

Referências

- [1] ITU-T, "G. 984.3," *Gigabit-capable Passive Optical Networks (GPON): Transmission convergence layer specification*, 2008.
- [2] Alphion, "PON.ext Product Brief," PX0908A ed.
- [3] R. I. TELNET, "GPON-Extender v1.1," V2R1 ed.
- [4] TEKNOVUS, "TK3401 Product Brief," TK3401.091222 ed, 2009.
- [5] T. CIP, "SOA-S-OEC-1550 Preliminary Datasheet," REV M ed.
- [6] B. Neto, "Técnicas alternativas para amplificação de Raman em telecomunicações," PhD, Departamento de Física, Universidade de Aveiro, 2010.
- [7] N. I. Mohammed, *Raman Amplifiers for Telecommunications 1 - Physical Principles*: Springer-Verlag New York, Inc., 2004.
- [8] E. Trojer, et al., "Current and next-generation PONs: A technical overview of present and future PON technology," *Ericsson Review* No. 2, 2008.
- [9] ITU-T, "G. 984.6," *Gigabit-Capable Passive Optical Networks (GPON): Reach Extension*, 2008.
- [10] IEEE, "802.3ah - Part 3: Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD) Access Method and Physical Layer Specifications," 2004.
- [11] ITU-T, "G. 984.2," *Gigabit-capable Passive Optical Networks (GPON): Physical Media Dependent (PMD) layer specification*, 2006.
- [12] ITU-T, "G. 984.1," *Gigabit-Capable Passive Optical Networks (GPON): General Characteristics*, 2008.
- [13] R. Davey, et al., "Long-Reach Passive Optical Networks," *J. Lightwave Technol*, vol. 27, pp. 273-291, 2009.
- [14] F. Saliou, et al., "Reach Extension Strategies for Passive Optical Networks [Invited]," *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 1, pp. 51-60, 2009.
- [15] M. Bonilla, et al., "Techno-economical comparison between GPON and EPON networks," 2009, pp. 1-5.
- [16] S. Lallukka and P. Raatikainen, "Link utilization and comparison of EPON and GPON access network cost," *Proc. of the IEEE Globecom. St. Louis: IEEE Communications Society Press*, pp. 301-305, 2005.
- [17] B. Skubic, et al., "A comparison of dynamic bandwidth allocation for EPON, GPON, and next-generation TDM PON," *Communications Magazine, IEEE*, vol. 47, pp. S40-S48, 2009.
- [18] G. Keiser, "Optical Fiber Communications."
- [19] P. Becker, et al., *Erbium-doped fiber amplifiers: fundamentals and technology: Academic Pr*, 1999.
- [20] K. Suzuki, et al., "60 km, 256-split optically-amplified PON repeatered transmission using 1.24 Gbit/s upstream and 2.5 Gbit/s downstream PON system," *ECOC2006, Mo4*, vol. 5, p. 24, 2006.
- [21] E. Desurvire, *Erbium Doped Fiber Amplifiers: John Wiley & Sons, Inc*, 1994.
- [22] M. Dignonnet, *Rare-earth-doped fiber lasers and amplifiers: CRC*, 2001.

- [23] T. Hodgkinson, "Improved average power analysis technique for erbium-doped fiber amplifiers," *Photonics Technology Letters, IEEE*, vol. 4, pp. 1273-1275, 2002.
- [24] B. Neto, et al., "EDFA transient assessment for bursty traffic," 2010, pp. 1-4.
- [25] Y. Fukada, et al., "First demonstration of fast automatic-gain-control (AGC) PDFA for amplifying burst-mode PON upstream signal," 2008, pp. 1-2.
- [26] B. Puttnam, et al., "Performance of an advanced transient suppressed EDFA in diverse dynamic optical network scenarios," 2009, pp. 1-2.
- [27] M. Zirngibl, "Gain control in erbium-doped fibre amplifiers by an all-optical feedback loop," *Electronics letters*, vol. 27, pp. 560-561, 2008.
- [28] A. Bianciotto, et al., "EDFA gain transients: experimental demonstration of a low cost electronic control," *Photonics Technology Letters, IEEE*, vol. 15, pp. 1351-1353, 2003.
- [29] H. Krimmel, et al., "Hybrid electro-optical feedback gain-stabilized EDFAs for long-reach wavelength-multiplexed passive optical networks," 2009, pp. 1-2.
- [30] F. Bonada, et al., "Gain transient mitigation in remote Erbium Doped Fibre Amplifiers by burst packet carving at the ONU for extended power budget PONs," 2009, pp. 1-2.
- [31] M. Connelly, *Semiconductor optical amplifiers: Springer Netherlands*, 2002.
- [32] N. Dutta, et al., *Semiconductor optical amplifiers: World Scientific Pub.*, 2006.
- [33] N. I. Mohammed, *Raman Amplifiers for Telecommunications 2 - Sub-Systems and Systems: Springer-Verlag New York, Inc.*, 2004.
- [34] B. Zhu and D. Nesses, "GPON reach extension to 60 km with entirely passive fibre plant using Raman amplification," in *ECOC*, 2009, pp. 1-2.
- [35] Fiberon, "1xN PLC Splitter - Datasheet," ed.
- [36] Corning, "SMF-28e+ Optical Fiber with NexCor Technology - Product Information," ed.
- [37] IXIACOM, *IxNetwork User Guide*.
- [38] IXIACOM, *IxExplorer User Guide*, 5.60 ed., 2009.
- [39] Bookham, "XFP Optical Transceivers for 40km: IGF-32511J Datasheet," BH12981 Rev 2.0 ed, 2006.
- [40] G. Talli and P. Townsend, "Feasibility demonstration of 100km reach DWDM SuperPON with upstream bit rates of 2.5 Gb/s and 10Gb/s," 2005.
- [41] K. Reichmann, et al., "240-km CWDM transmission using cascaded SOA Raman hybrid amplifiers with 70-nm bandwidth," *Photonics Technology Letters, IEEE*, vol. 18, pp. 328-330, 2005.
- [42] B. Neto, et al., "C+L band gain equalization for extended reach WDM-ring PON using hybrid Raman/in line EDFA amplification," 2010, pp. 1-3.
- [43] J. Bromage, "Raman amplification for fiber communications systems," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 22, p. 79, 2004.
- [44] A. Saleh, et al., "Modelling of gain in erbium-doped fiber amplifiers," *IEEE PTL*, vol. 2, pp. 714-717, 1990.