



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO

RIVAEEL STROBEL PENZE

AUMENTO DA CAPACIDADE DE TRANSMISSÃO E EXTENSÃO DA REDE DE ACESSO
ÓPTICA UTILIZANDO TÉCNICA DE MULTIPLEXAÇÃO POR DIVISÃO EM
COMPRIMENTO DE ONDA

UPGRADE AND EXTEND THE REACH OF THE CURRENT PASSIVE OPTICAL NETWORK
(PON) BY USING WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEXING (WDM) IN THE
STANDARDIZED OPTICAL GRID OF GIGABIT PON

CAMPINAS
2016

RIVAEEL STROBEL PENZE

AUMENTO DA CAPACIDADE DE TRANSMISSÃO E EXTENSÃO DA REDE DE ACESSO
ÓPTICA UTILIZANDO TÉCNICA DE MULTIPLEXAÇÃO POR DIVISÃO EM
COMPRIMENTO DE ONDA

Tese de Doutorado apresentada a Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Telecomunicações e Telemática.

Orientador: Prof. Dr. RENATO BALDINI FILHO
Coorientador: Dr. JOÃO BATISTA ROSOLEM

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL
TESE DEFENDIDA PELO ALUNO RIVAEEL STROBEL
PENZE, E ORIENTADO PELO PROF. DR. RENATO
BALDINI FILHO COM COORIENTAÇÃO DO DR. JOÃO
BATISTA ROSOLEM.

CAMPINAS
2016

Agência(s) de fomento e nº(s) de processo(s): Não se aplica.

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Luciana Pietrosanto Milla - CRB 8/8129

P389e Penze, Rivael Strobel, 1973-
Aumento da capacidade de transmissão e extensão da rede de acesso óptica utilizando técnica de multiplexação por divisão em comprimento de onda / Rivael Strobel Penze. – Campinas, SP : [s.n.], 2016.

Orientador: Renato Baldini Filho.
Coorientador: João Batista Rosolem.
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Redes ópticas. 2. Semicondutores. 3. Fibras ópticas. 4. Dispositivos optoeletrônicos. 5. Amplificadores. I. Baldini Filho, Renato, 1956-. II. Rosolem, João Batista. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. IV. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Upgrade and extend the reach of the current passive optical network (PON) by using wavelength division multiplexing (WDM) in the standardized optical grid of gigabit PON

Palavras-chave em inglês:

Optical networks
Semiconductors
Optical fibers
Optoelectronic devices
Amplifiers

Área de concentração: Telecomunicações e Telemática

Titulação: Doutor em Engenharia Elétrica

Banca examinadora:

Renato Baldini Filho [Orientador]
Claudio Florida
Saulo Roberto Sodré dos Reis
Celso de Almeida

Darli Augusto de Arruda Mello

Data de defesa: 16-11-2016

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Elétrica

COMISSÃO JULGADORA - TESE DE DOUTORADO

Candidato: Rivael Strobel Penze RA: 982311

Data da Defesa: 16 de Novembro de 2016

Título da Tese: "Aumento da capacidade de transmissão e extensão da rede de acesso óptica utilizando técnica de multiplexação por divisão em comprimento de onda".

Prof. Dr. Renato Baldini Filho (Presidente, FEEC/UNICAMP)

Dr. Claudio Floridia (Fundação CPqD)

Prof. Dr. Saulo Roberto Sodré dos Reis (UFMT)

Prof. Dr. Celso de Almeida (FEEC/UNICAMP)

Prof. Dr. Darli Augusto de Arruda Mello (FEEC/UNICAMP)

A ata de defesa, com as respectivas assinaturas dos membros da Comissão Julgadora, encontra-se no processo de vida acadêmica do aluno.

“A mudança fundamental que precisamos fazer em nossas vidas, começa por mudar a nós mesmos, mudar de atitude, mudar de postura, somente sendo pessoas positivas poderemos ter a coragem de viver nosso sonho e realizar nesta vida tudo o que pudermos imaginar”.

(Drica Strobel - Coach)

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê”.

(Arthur Schopenhauer)

“É muito melhor lançar-se em busca de conquistas grandiosas, mesmo expondo-se ao fracasso, do que alinhar-se com os pobres de espírito, que nem gozam muito nem sofrem muito, porque vivem numa penumbra cinzenta, onde não conhecem nem vitória, nem derrota”.

(Theodore Roosevelt)

Agradecimentos

A Deus pela existência e por permitir concluir mais esta etapa da minha vida.

Uma tese de doutorado reúne contribuições de várias pessoas quer seja diretamente na ajuda de um experimento ou indiretamente na convivência do dia a dia. Durante esta fase da minha vida tive o privilégio de contar com a confiança e o apoio de inúmeras pessoas que sem suas contribuições este trabalho não teria sido possível.

Ao Professor Dr. Renato Baldini Filho, orientador da tese, pela dedicação e disponibilidade na colaboração sempre que por mim foi solicitada. A sua larga experiência e profunda capacidade de análise.

Ao pesquisador e coorientador Dr. João Batista Rosolem, agradeço o apoio, a partilha do saber e as valiosas contribuições para o trabalho. Acima de tudo, obrigado por continuar a acompanhar-me nesta jornada e por estimular o meu interesse pelo conhecimento.

Ao pessoal do LSMO pela convivência, ajuda nos experimentos e momentos de descontração tão importantes para consolidação desta dura jornada, Fabio Bassan, João Paulo, Claudio Florida, Felipe Marques, João Rosolem, Ulysses Duarte, Getúlio Paiva, Glauco Simões, Danilo Dini, Eduardo Ferreira, Rodrigo Perese Marco Sanches.

A fundação CPqD por possibilitar o uso dos laboratórios.

Aos meus familiares pelo incentivo recebido ao longo destes anos. Aos meus irmãos Helmann e Zemann, as minhas cunhadas, sobrinhas e sobrinhos, aos meus Pais, Thomaz Aquino Penze e Nelia Strobel Penze (in memória), obrigado pelo amor, alegria e atenção sem reservas.

As minhas filhas Raphaela B.L. Strobel Penze e Raissa B.L. Strobel Penze, os amores da minha vida.

A minha esposa e companheira Adriana Strobel (Drica Strobel), pelo amor incondicional, companheirismo e dedicação. Fique sabendo que sem os seus incentivos e motivações eu não teria conseguido. Agradeço a Deus por ter colocado você em minha vida, Te Amo Bastante.

RESUMO

Este trabalho apresenta contribuições na evolução da rede óptica passiva em termos do aumento da capacidade e da extensão usando comprimentos de onda sobrepostos dentro da grade espectral padronizada da rede Gigabit PON (GPON).

Nesta abordagem quatro sinais em comprimentos de onda distintos são escolhidos dentro da banda de transmissão da GPON entre 1480nm a 1500nm no sentido de descida (*downstream*) e são transmitidos a partir de um terminal de linha óptica (OLT). Estes quatro sinais se direcionam a quatro diferentes redes de distribuição óptica (ODN). Os sinais de subida (*upstream*) provenientes das quatro diferentes ODNs são também multiplexados em comprimento de onda dentro da banda *upstream* do GPON que vai de 1270 nm a 1360 nm. Provas experimentais do conceito são realizadas a fim de demonstrar a viabilidade desta proposta em uma PON de 20 km servindo 32 ONTs.

Em seguida é desenvolvido um estudo de uma PON estendida com a topologia de sobreposição estudada previamente com os canais em comprimento de onda utilizando extensores ópticos do tipo amplificadores ópticos semicondutores (SOA), mudando assim a característica de passividade da rede e tendo um alcance de 58 km.

Finalmente é apresentado um estudo relacionado aos dois tópicos anteriores no qual a alimentação dos SOAs é feita de através da técnica de alimentação pela fibra (*PoF*) para alimentar amplificadores semicondutores (SOAs) e levar a distância da rede até 50 km.

Palavras-chave: GPON, Extended PON, WDM-PON, Fiber Powering, PON Overlay, PON Stacking and CWDM.

ABSTRACT

This thesis presents a method to upgrade and extend the reach of the current passive optical network (PON) by using wavelength division multiplexing (WDM) in the standardized optical grid of gigabit PON. This proposal is named In-band WDM PON overlay.

The aim is to increase the number of optical distribution networks (ODNs) fed by a single fiber while preserving the users bandwidth.

In this approach four *downstream* (DS) wavelength signals are transmitted from an optical line terminal (OLT) to four distinct ODNs using standard DS PON spectrum ranging from 1480 nm to 1500 nm. The *upstream* (US) signals from the four ODNs are also wavelength multiplexed within the standardized US PON spectrum ranging from 1270 nm to 1330 nm. Experimental proofs of concept are presented in a 20 km PON serving 32 ONTs.

An extended PON to 58 km is presented based on semiconductor amplifiers (SOAs) powered electrically. Notice that this approach, changes the network passivity.

The last contribution presented is concerned to an innovative proposal to extend GPON and XGPON networks by using the power over fiber technique to amplify the signal to reach 50 km.

Keywords: GPON, Extended PON, WDM-PON, Fiber Powering, PON Overlay, PON Stacking and CWDM.

Lista de Ilustrações

FIGURA 2.1 - BANDA ESPECTRAL (FIGURA ADAPTADA [3])	24
FIGURA 2.2 - REDES ÓPTICAS PASSIVA	26
FIGURA 2.3 - REDE ÓPTICA PASSIVA – EXEMPLO DE UM TERMINAL DE LINHA ÓPTICA OLT (FONTE: HTTP://E.HUAWEI.COM/BR/PRODUCTS/FIXED-NETWORK/ACCESS)	26
FIGURA 2.4 – REDE ÓPTICA PASSIVA – TERMINAL DE REDE ÓPTICA ONT (FONTE: HTTP://E.HUAWEI.COM/BR/PRODUCTS/FIXED-NETWORK/ACCESS/ONT/OPTICAL-TERMINAL).	27
FIGURA 2.5 – REDE ÓPTICA PASSIVA – DIVISOR ÓPTICO PASSIVO “SPLITTER” (FONTE: HTTPS://WWW.LINKEDIN.COM/PULSE/COMPARISON-BETWEEN-FBT-PLC-SPLITTERS-CHLOE-WANG).	28
FIGURA 2.6 – TOPOLOGIA EM ANEL	29
FIGURA 2.7 – TOPOLOGIA EM ESTRELA	30
FIGURA 2.8 – TOPOLOGIA EM BARRAMENTO	31
FIGURA 2.9 – TOPOLOGIA EM ÁRVORE	31
FIGURA 2.10 – ARQUITETURA FTTX	32
FIGURA 2.11 – REDE DE DISTRIBUIÇÃO ÓPTICA	33
FIGURA 2.12- EVOLUÇÃO DA REDE ÓPTICA PASSIVA	35
FIGURA 2.13 - DIAGRAMA SIMPLIFICADO DE UMA REDE DO TIPO GPON	39
FIGURA 2.14 - PLANO DE FREQUÊNCIA GPON E XGPON (A) <i>UPSTREAM</i> E (B) <i>DOWNSTREAM</i>	40
FIGURA 2.15 - COEXISTÊNCIA GPON E XGPON	41
FIGURA 2.16 - ARQUITETURA TWDM-PON	42
FIGURA 2.17 - ARQUITETURA TWDM-PON COEXISTENTES COM AS TECNOLOGIAS GPON E XGPON [59]	43
FIGURA 2.18 - DIAGRAMA SIMPLIFICADO DE UMA REDE DO TIPO WDM-PON	44
FIGURA 2.19 - EXTENSÃO REDE GPON	48
FIGURA 2.20 – EXEMPLO DE COMO OCORRE A EMISSÃO ESTIMULADA	52
FIGURA 2.21 – AMPLIFICADOR ÓPTICO SOA 1300 NM DA KAMELIAN®	54
FIGURA 2.22 – HETEROESTRUTURAS DUPLAS DE UM AMPLIFICADOR SOA [71].	56
FIGURA 2.23 – AMPLIFICADOR SOA DO TIPO FABRYPEROT (FP- SOA) [71].	58
FIGURA 2.24 – ESTRUTURAS TW-SOA (A) SIMPLES E (B) FACE ANGULADA [64].	58
FIGURA 3.1- EXEMPLO DE UM DIAGRAMA GENÉRICO PARA UMA SOBREPOSIÇÃO DE PON POR CWDM.	61
FIGURA 3.2 - UM EXEMPLO DE UMA TDM - PON COM 32 ASSINANTES [32].	62
FIGURA 3.3- GRADE DE CANAIS CORRESPONDENTES AS ARQUITETURAS PROPOSTAS [72]: (A) QUATRO CANAIS SENTIDO <i>DOWNSTREAM</i> ENTRE 1440 NM E 1500 NM, E EM (B) DEZESSEIS CANAIS 16 DWDM SENTIDO <i>DOWNSTREAM</i>	64
FIGURA 3.4 – PROPOSTA DE EVOLUÇÃO DA REDE GPON [73].	65
FIGURA 3.5- GRADE DE ESPECTRO DISPONÍVEL PARA REDES CWDM PON: EM (A) TRABALHO PROPOSTO UTILIZANDO 4 COMPRIMENTOS DE ONDA [32] E EM (B) TRABALHO PROPOSTO USANDO 5 COMPRIMENTOS DE ONDA [73] AMBOS RESTRITO AO SENTIDO <i>DOWNSTREAM</i> E PROPOSTA DA TESE SENTIDO <i>DOWNSTREAM</i> E <i>UPSTREAM</i>	67
FIGURA 3.6 - ARQUITETURA STACKED-PON PROPOSTA VISÃO GERAL	68
FIGURA 3.7 -ARQUITETURA PROPOSTA DE REDE GPON COM SOBREPOSIÇÃO WDM	70
FIGURA 3.8 – DIAGRAMA DE BLOCO DETALHADO DO OLT EXPERIMENTAL.	71
FIGURA 3.9 – MONTAGEM DO OLT EXPERIMENTAL.	72
FIGURA 3.10 – DIAGRAMA DE BLOCO DETALHADO DO ONT PROJETADA.	73
FIGURA 3.11 – MONTAGEM EXPERIMENTAL DA REDE PROPOSTA.	73
FIGURA 3.12 – PROCESSO DE CARACTERIZAÇÃO DOS ELEMENTOS PASSIVOS.	74
FIGURA 3.13 - PERDA INSERÇÃO E ISOLAÇÃO ENTRE CANAIS DO MUX DA BANDA S.	76
FIGURA 3.14 - PERDA DE INSERÇÃO E ISOLAÇÃO NO FILTRO ADD/DROP CWDM 1490 NM.	76
FIGURA 3.15 - PERDA INSERÇÃO E ISOLAÇÃO ENTRE CANAIS DO MUX DA BANDA O.	77
FIGURA 3.16 - PONTO SELECIONADOS NA REDE PROPOSTA PARA DAS CARACTERIZAÇÕES DOS CANAIS DE <i>DOWNSTREAM</i> E <i>UPSTREAM</i>	78
FIGURA 3.17 – SINAL <i>DOWNSTREAM</i> MULTIPLEXADO DO OLT OBTIDO NO OSA.	79
FIGURA 3.18 – ONT: (A) FOTO DE UM TRANSCÉPTOR DO TIPO SFF UTILIZADO EM ONTS E (B) DIAGRAMA DO CIRCUITO INTERNO DO TRANSCÉPTOR.	79
FIGURA 3.19 – MONTAGEM EXPERIMENTAL PARA AVALIAÇÃO DA DETECÇÃO DOS COMPRIMENTOS DE ONDAS NAS ONTS.	80
FIGURA 3.20 – NORMALIZAÇÃO DO NÍVEL DE TENSÃO DE SAÍDA DO TRANSCÉPTOR ONT.	81
FIGURA 3.21 – VARIAÇÃO DE BER E DA POTÊNCIA RECEBIDA DE UM CANAL DA BANDA S (1492 NM) MEDIDO EM UM RECEPTOR DE ONT QUANDO O COMPRIMENTO DE ONDA DO LASER É VARIADO DE +/- 2.5 NM.	82

FIGURA 3.22 - ESQUEMÁTICO DA MONTAGEM EXPERIMENTAL PARA MEDIÇÃO DE TAXA DE ERROS. NA FIGURA É ILUSTRADA A MEDIÇÃO NA ONT.	83
FIGURA 3.23 – MONTAGEM SETUP REDE STAKED-PON	84
FIGURA 3.24 – AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO SISTÊMICO BER CANAIS DE BANDA S (<i>DOWNSTREAM</i>) MEDIDOS NO ONT.	85
FIGURA 3.25 – AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO SISTÊMICO BER CANAIS DA BANDA O MEDIDOS NO OLT.....	86
FIGURA 3.26 – ESPECTRO ÓPTICO DOS SINAIS DE <i>DOWNSTREAM</i> E <i>UPSTREAM</i> NO OLT PARA 20 KM.	86
FIGURA 4.1- EXTENSOR ATIVO DA REDE DE ACESSO ÓPTICA UTILIZANDO SOA E SUAS FORMAS DE ALIMENTAÇÃO ELÉTRICA.	88
FIGURA 4.2 – EXTENSÃO DA REDE <i>IN-BAND WDM PON OVERLAY</i>	90
FIGURA 4.3 – DETALHES DO EXTENSOR ATIVO BIDIRECIONAL PARA REDE <i>IN-BAND WDM PON OVERLAY</i>	90
FIGURA 4.4 – MONTAGEM EXPERIMENTAL DO EXTENSOR ATIVO BIDIRECIONAL PARA REDE PON.....	92
FIGURA 4.5 – PROTÓTIPO DO EXTENSOR ATIVO BIDIRECIONAL PARA REDE PON	92
FIGURA 4.6 - GANHO SOA DE 1310 NM, EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO DE ONDA.....	93
FIGURA 4.7 - POTÊNCIA DE SAÍDA DO SOA DE 1310 NM EM FUNÇÃO DA CORRENTE DE INJEÇÃO PARA POTÊNCIA DE ENTRADA NO AMPLIFICADOR DE P_{IN} DE -20 DBM E -30 DBM RESPECTIVAMENTE.....	94
FIGURA 4.8 – GANHO SOA DE 1310 NM EM FUNÇÃO DA CORRENTE DE INJEÇÃO.....	94
FIGURA 4.9 - GANHO SOA DE 1490 NM, EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO DE ONDA.....	95
FIGURA 4.10 - POTÊNCIA DE SAÍDA DO SOA DE 1490 NM EM FUNÇÃO DA CORRENTE DE INJEÇÃO PARA POTÊNCIA DE ENTRADA NO AMPLIFICADOR DE P_{IN} DE -20 DBM E -30 DBM RESPECTIVAMENTE.....	96
FIGURA 4.11 – GANHO SOA DE 1490 NM EM FUNÇÃO DA CORRENTE DE INJEÇÃO.....	96
FIGURA 4.12 – ESPECTRO ÓPTICO NAS SAÍDAS DO EXTENSOR PARA OS CANAIS DE <i>DOWNSTREAM</i> E <i>UPSTREAM</i> . .	97
FIGURA 4.13 – RESULTADOS DA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO BER DO EXTENSOR PON PARA OS CANAIS DA BANDA S <i>DOWNSTREAM</i> MEDIDOS NO ONT.....	98
FIGURA 4.14 – RESULTADOS DA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO BER DO EXTENSOR PON PARA OS CANAIS DA BANDA O <i>UPSTREAM</i> MEDIDO NO OLT.	99
FIGURA 5.1 – SISTEMA POF CONSTITUÍDO DE UMA FONTE DE LUZ ÓPTICA- LASER DIODO (LD), FIBRA ÓPTICA E UM FOTOCONVERSOR.....	101
FIGURA 5.2 – TÉCNICA <i>POWER OVER FIBER</i> UTILIZADA PARA ALIMENTAR UM AMPLIFICADOR.....	104
FIGURA 5.3 - PROPOSTA DE ALIMENTAÇÃO DOS EXTENSORES UTILIZANDO SOA.	104
FIGURA 5.4 - CIRCUITO ÓPTICO UTILIZADO NA ALIMENTAÇÃO DOS SOAS.....	106
FIGURA 5.5 - MONTAGEM PARA TESTE DO EXTENSOR PON.	108
FIGURA 5.6 - MONTAGEM DE TESTES DO SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DOS EXTENSORES USANDO POF, EM (A) TEMOS A VISÃO A PARTIR DO ANALISADOR DE BER E EM (B) TEMOS A VISÃO A PARTIR DO OSA.	110
FIGURA 5.7 - DETALHE EXTENSOR ALIMENTADO POR FIBRA ÓPTICA	111
FIGURA 5.8 - SIMULAÇÃO DA MÁXIMA POTÊNCIA ELÉTRICA CONVERTIDA REMOTAMENTE EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA DE ENLACES POF E DOS TIPOS DE FIBRAS UTILIZADAS	112
FIGURA 5.9 – (A) EFICIÊNCIA DA FOTOCONVERSÃO EM FUNÇÃO DA POTÊNCIA ÓPTICA E EM (B) CORRENTE E TENSÃO DO EXTENSOR EM FUNÇÃO DA POTÊNCIA ÓPTICA	115
FIGURA 5.10 - DIAGRAMA ESQUEMÁTICO PARA ANÁLISE DE DESEMPENHO DO EXTENSOR.....	116
FIGURAS 5.11 - GANHO DO SINAL EM FUNÇÃO DA POTÊNCIA ÓPTICA NA ENTRADA DO EXTENSOR P_{SUP} , PARA OS VALORES DE POTENCIAL DE SINAL DE ENTRADA P_{IN} : (A) $P_{IN} = -12DBM$, (B) $P_{IN} = -15DBM$, (C) $P_{IN} = -18DBM$, E (D) $P_{IN} = -21DBM$	117
FIGURAS 5.12 - A AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO SISTEMA PROPOSTO PARA: (A) XG-PON <i>UPSTREAM</i> , (B) XG-PON <i>DOWNSTREAM</i> , (C) G-PON <i>UPSTREAM</i> E (D) G-PON <i>DOWNSTREAM</i>	118
FIGURA 5.13 - ESPECTRO DA POTÊNCIA DE SAÍDA DO EXTENSOR A 50 KM DO OLT.....	119
FIGURA 5.14 - AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO EM TERMOS DE BER MEDIDOS NA OLT.....	120
FIGURA 5.15 - AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO EM TERMOS DE BER MEDIDOS NA ONT.....	121

Lista de Tabelas

TABELA 2.1 TECNOLOGIAS DSL: ALCANCE X TAXA ENLACE DE COBRE (PAR METÁLICO) [25].	22
TABELA 2.2 - VERSÕES DO PADRÃO DOCSIS ENLACE DE CABO COAXIAL [25].	23
TABELA 2.3 - TABELA DE RAZÃO DE DIVISÃO VERSUS ATENUAÇÃO DE <i>SPLITTER</i>	28
TABELA 2.4 - COMPARAÇÃO ENTRE AS TECNOLOGIAS APON/BPON E GPON PADRONIZADAS PELO ITU-T (ADAPTADO TELECO).....	38
TABELA 3.1 -PERDA DE INSERÇÃO POR CANAL E ISOLAMENTO ENTRE CANAIS PARA WDM1.....	75

Lista de abreviaturas e siglas

Acrônimo	Português	Inglês
ACTS- PLANET	Tecnologias e Serviços de Comunicação Avançada — Rede Fotônica de Acesso Local	<i>Advanced Communication Technologies and Services — Photonic Local Access Network</i>
ADSL	Linha Digital de Assinante Assimétrica	<i>Asymmetric Digital Subscriber Line</i>
AES	Padrão de Encriptação Avançado	<i>Advanced Encryption Standard</i>
AON	Rede Óptica Ativa	<i>Active Optical Network</i>
APC	Contato Físico Angulado	<i>Angled Physical Contact</i>
ASE	Emissão Espontânea Amplificada	<i>Amplified Spontaneous Emission</i>
ATM	Modo de Transferência Assíncrono	<i>Asynchronous Transfer Mode</i>
ATM PON (APON)	Rede Óptica Passiva baseada no protocolo Modo de Transferência Assíncrono	<i>Asynchronous Transfer Mode Passive Optical Network</i>
AWG	Grades Ordenadas em Guias de Onda	<i>Arrayed Waveguide Grating</i>
BER	Taxa de Erro de Bit	<i>Bit Error Rate</i>
BPON	Rede Óptica Passiva Banda Larga	<i>Broadband Passive Optical Network</i>
CATV	Televisão a Cabo	<i>Community Antenna Television</i>
CDWM	Multiplexação por Divisão Esparsa de Comprimento de Onda	<i>Coarse Wavelength Division Multiplexing</i>
CO	Central do Provedor de Serviço	<i>Central Office</i>
CPON	Rede Óptica Passiva Composta	<i>Composite Passive Optical Network</i>
DBA	Alocação Dinâmica de Largura de Banda	<i>Dynamic Bandwidth Allocation</i>
DFB	Realimentação Distribuída	<i>Distributed Feedback</i>
DOCSIS	Especificação de Interface para o serviço "Dados sobre Cabo"	<i>Data Over Cable Service Interface Specifications</i>
DS	Descida	<i>Downstream</i>
DSL	Linha Digital de Assinante	<i>Digital Subscriber Line</i>
DWDM	Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda Denso	<i>Dense Wavelength Division Multiplexing</i>
EDFA	Amplificador de Fibra Dopada com Érbio	<i>Erbium Doped Fiber Amplifier</i>
EFM	Ethernet na primeira milha	<i>Ethernet in the First Mile</i>
EPON	Rede Óptica Passiva baseada no protocolo Ethernet	<i>Ethernet Passive Optical Network</i>
FSAN	Rede de Acesso de Serviço Completo	<i>Full Service Access Network</i>
FTTB	Fibra até o Prédio	<i>Fiber to the Building</i>
FTTC	Fibra até o Meio Fio	<i>Fiber to the Curb</i>
FTTCab	Fibra até o Armário	<i>Fiber to the Cabinet</i>
FTTH	Fibra até a Residência	<i>Fiber to the Home</i>
G.SHDSL	Linha Digital Simétrica de Assinante de Alta Velocidade	<i>Symmetric High-Speed Digital Subscriber Line</i>
GPON	Rede Óptica Passiva capaz de atender Gigabit	<i>Gigabit-capable Passive Optical Network</i>
GUI	Interface Gráfica do Usuário	<i>Graphical User Interface</i>
HDTV	Televisão de Alta Definição	<i>High Definition Television</i>
HFC	Rede Híbrida Fibra-Coaxial	<i>Hybrid Fibre-Coaxial</i>

Acrônimo	Português	Inglês
IDSL	DSL baseada em ISDN	<i>ISDN Digital Subscriber Line</i>
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IP	Protocolo de Internet	<i>Internet Protocol</i>
ISDN	Rede Digital de Serviços Integrados	<i>Integrated Service Digital Network</i>
ITU-T	Setor de Padronização da Telecomunicação da União Internacional de Telecomunicações	<i>Telecommunication Standardization sector of International Telecommunication Union</i>
LAN	Redes Locais	<i>Local Area Networks</i>
LARNET	Rede Roteada de Acesso Local	<i>Local Access Router Network</i>
LED	Diodo Emissor de Luz	<i>Light Emitting Diode</i>
MAC	Controle de Acesso ao Meio	<i>Media Access Control</i>
MAN	Redes Metropolitanas	<i>Metro Area Networks</i>
NRZ	Não Retorno a Zero	<i>Non-return-to-zero</i>
OADM	Multiplexador Óptico de Inserção e Retirada de Comprimentos de Onda	<i>Optical Add- Drop Multiplexer</i>
ODN	Rede de Distribuição Óptica	<i>Optical Distribution Network</i>
OLT	Terminal de Linha Óptica	<i>Optical Line Terminal</i>
ONT	Terminal de Rede Óptica	<i>Optical Network Terminal</i>
ONU	Unidade de Rede Óptica	<i>Optical Network Unit</i>
OPS	Fonte de luz Óptica	<i>Optical Power Source</i>
ORL	Perda de Retorno Óptica	<i>Optical Return Loss</i>
OSA	Analisador de Espectro Óptico	<i>Optical Spectrum Analyser</i>
OXC	Comutador Óptico	<i>Optical Cross-Connect</i>
PoF	Energia na Fibra	<i>Powering Over Fiber</i>
PON	Rede Óptica Passiva	<i>Passive Optical Network</i>
PRBS	Sequência Pseudo- Aleatória de Bits	<i>Pseudo Random Binary Sequence</i>
PSTN	Rede Pública de Telefonia Comutada	<i>Public Switched Telephone Network</i>
QoS	Qualidade de Serviço	<i>Quality of Service</i>
RF	Rádio Frequência	<i>Radio frequency</i>
RITENET	Interrogação Remota do Terminal de Rede	<i>Remote Interrogation of Terminal Network</i>
RN	Nó Remoto	<i>Remote Node</i>
RSOA	Amplificador Óptico Semicondutor Reflexivo	<i>Reflective semiconductor optical amplifier</i>
SBS	Espalhamento Brillouin Estimulado	<i>Stimulated Brillouin Scattering</i>
SDSL	Linha Digital Simétrica de Assinante	<i>Symmetric Digital Subscriber Line</i>
SLA	Contrato de Nível de Serviço	<i>Service Level Agreement</i>
SRS	Espalhamento Raman Estimulado	<i>Stimulated Raman Scattering</i>
SUCCESS		<i>Stanford University Access</i>
TDM	Multiplexação por divisão no tempo	<i>Time-division multiplexing</i>
TDMA	Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo	<i>Time Division Multiple Access</i>
TDM-PON	Rede Óptica Passiva baseada em Multiplexação por Divisão no Tempo	<i>Time Division Multiplexing - Passive Optical Network</i>
UPC	Ultra Contato Físico	<i>UltraPhysical Contact</i>

Acrônimo	Português	Inglês
US	Subida	<i>Upstream</i>
VDSL	Linha Digital de Assinante de alta velocidade	<i>Very-high-bit-rate Digital Subscriber Line</i>
VoD	Vídeo sob Demanda	<i>Video on Demand</i>
WAN	Redes Geograficamente Distribuídas	<i>Wide Area Networks</i>
WDM	Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda	<i>Wavelength Division Multiplexing</i>
WDM-PON	Rede Óptica Passiva baseada em Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda	<i>Wavelength Division Multiplexed - Passive Optical Network</i>
WiMax	Interoperabilidade Mundial para Acesso por Microondas	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>

SUMÁRIO

1	Introdução.....	17
1.1	Proposta e Objetivos.....	18
1.2	Organização da tese.....	18
1.3	Produção Científica Vinculada ao Trabalho.....	19
2	Redes Ópticas Passivas.....	21
2.1	Introdução.....	21
2.2	Redes xDSL e modem a cabo.....	22
2.3	Redes de fibras ópticas.....	23
2.4	Topologias de redes.....	29
2.4.1	Topologia em anel.....	29
2.4.2	Topologia em estrela.....	30
2.4.3	Topologia em barramento.....	30
2.4.4	Topologia em árvore.....	31
2.5	Redes xPON.....	33
2.5.1	Rede APON.....	35
2.5.2	Rede BPON.....	36
2.5.3	Rede EPON.....	37
2.5.4	Rede GPON.....	37
2.5.5	Rede XGPON.....	40
2.5.6	REDE TWDM-PON.....	41
2.5.7	Rede WDM-PON.....	43
2.6	Extensores para redes GPON.....	45
2.7	Amplificadores ópticos.....	51
2.8	Amplificadores ópticos a semicondutor - SOA.....	54
2.9	Conclusões.....	59
3	Transmissão WDM por sobreposição em redes GPON.....	61
3.1	Introdução.....	61
3.2	Proposta de rede GPON com sobreposição WDM.....	67
3.3	Construindo a rede óptica experimental GPON com sobreposição WDM.....	70
3.4	Resultados obtidos da proposta de evolução da GPON com sobreposição WDM.....	74
3.4.1	Caracterização dos elementos passivos.....	74
3.4.2	Caracterização dos elementos ativos.....	78
3.4.3	Resultados experimentais de desempenho do receptor de ONT em função da variação térmica do laser. 81	
3.4.4	Caracterização sistêmica da rede.....	83
3.5	Conclusão.....	87
4	Extensor ativo para redes G-PON por sobreposição WDM.....	88
4.1	Introdução.....	88
4.2	Proposta de extensão da rede GPON com sobreposição WDM.....	89
4.3	Resultados obtidos da caracterização do extensor óptico para rede PON.....	91
4.3.1	Descrição do extensor óptico.....	91
4.3.2	Caracterização de ganho dos SOAs.....	93
4.3.3	Resultados experimentais de desempenho sistêmico da rede.....	97
4.4	Conclusão.....	99
5	Extensor alimentado por fibra para redes G-PON/XG-PON sobreposta.....	100
5.1	Introdução.....	100
5.2	Método convencional para alimentação de extensores de rede óptica PON.....	102
5.3	Extensores alimentados por fibra óptica.....	103
5.4	Descrição da técnica de alimentação do extensor por fibra óptica.....	105
5.5	Arranjo experimental de transmissão de energia na fibra óptica para alimentação do extensor proposto para rede sobreposta.....	107

5.6	Resultados obtidos do extensor óptico para rede sobreposta.....	111
5.6.1	Análise teórica da potência convertida em função da distância	112
5.6.2	Caracterização de ganho do extensor alimentado por fibra.	116
5.6.3	Resultados experimentais do desempenho sistêmico da rede	119
5.7	Conclusões.....	121
6	Conclusão final e contribuições da tese	122
7	Trabalhos futuros.....	123
8	Publicações adicionais com tema correlato.....	124
9	Referências Bibliográficas	125

CAPITULO 1

1 Introdução

O rápido crescimento do número de usuários e de serviços oferecidos na Internet levou as operadoras de telecomunicações a instalar sistemas ópticos que usam a técnica de multiplexação por divisão de comprimento de onda (*Wavelength Division Multiplexing* – WDM) para acomodar o aumento de tráfego gerado. Dentre as vantagens da utilização dos sistemas de multiplexação conhecidos como densos (*Dense Wavelength Division Multiplexing* – DWDM) podemos citar: a elevação da capacidade de transmissão dos sistemas ópticos, a economia de fibras e equipamentos de transmissão, o aumento da flexibilidade e da “escalabilidade” na operação [1]. A utilização de sistemas DWDM de longa distância contribuiu para uma drástica redução dos custos de instalação de novas fibras e equipamentos. Sistemas DWDM encontram-se, por exemplo, em aplicações como em cabos submarinos intercontinentais. Sistemas WDM alcançaram também a área metropolitana da planta de telecomunicações onde os paradigmas tecnológicos são diferentes dos sistemas de longa distância. Em redes metropolitanas, os sistemas WDM de grande espaçamento espectral (*Coarse Wavelength Division Multiplexing* – CWDM) têm sido empregados, por oferecerem baixo custo [2]. Finalmente, a fronteira final está no acesso a redes de comunicação. Novas tecnologias para sistemas WDM usando poucos comprimentos de onda foram desenvolvidas para o atendimento de serviços *Triple Play* (Internet de alta velocidade, Televisão e Telefonia) em uma única estrutura de conexão de rede passiva banda larga do tipo PON - *Passive Optical Network*[4]-[6]. Atualmente dois tipos de redes PON dominam o mercado para redes de acesso, as redes do tipo gigabit PON (GPON) e as redes ethernet PON (E-PON). Estas redes encontram-se já padronizadas pelos organismos de regulamentação como ITU-T e IEEE e razoavelmente disseminadas no mercado[2]-[12][19]-[21]. As redes gigabit óptica passiva (*Gigabit Passive Optical Network* - GPON) e redes passivas Ethernet (*Ethernet Passive Optical Network* – EPON) são multiplexada por divisão temporal (*Time Division Multiplexing* – TDM)[6]-[12], ou seja, as taxas de transmissão tanto da central para o usuário (*downstream*), como do usuário para a central (*upstream*) são compartilhadas por estes diversos usuários (normalmente entre 32 a 64), o que faz com que ocorra uma limitação

de banda para estes usuários. Outra limitação se dá no alcance da rede devido à divisão do sinal óptico pelos divisores de potência (*splitters*) e pela distância lógica da rede devido às janelas temporais de transmissão dos sinais dos usuários para a central. A ampla gama de novos serviços desenvolvidos sobre o protocolo IP para redes GPON podem gerar limitações de transmissão para os serviços [1] que exigem uma largura de banda dedicada para cada usuário. Desta forma, torna-se necessário a evolução das arquiteturas e aplicações existentes de redes PON que permitiram não somente uma maior extensão da rede atendida, mas também um maior número de usuários e capacidade de banda de transmissão para cada usuário.

1.1 Proposta e Objetivos

O objetivo desta pesquisa é propor formas de aumentar a capacidade de transmissão da rede GPON atual de 2.5 Gbit/s para 4 x 2.5 Gbit/s preservando e mantendo o legado de equipamentos instalados. É também objetivo aumentar a extensão da rede, utilizando amplificadores ópticos a semicondutor, aumentando a rede de 20 km para 58 km preservando a capacidade de transmissão do sistema e alimentando o extensor de forma tradicional e por fim aumentar a extensão da rede de 20 km para 50 km utilizando amplificadores semicondutores alimentados por fibra óptica. Tendo em vista o panorama exposto, neste trabalho, são estudados e analisados, por meio de investigações experimentais, possibilidades de evolução e ampliação da rede óptica de acesso.

1.2 Organização da tese

Os capítulos desta tese encontram-se organizados da seguinte maneira:

O Capítulo 2 (Redes Ópticas Passivas): descreve as redes ópticas passivas com as suas principais topologias de acesso óptico encontradas na literatura técnica, bem como discussões sobre a evolução das redes PON.

O Capítulo 3 (Transmissão WDM por sobreposição em redes GPON): descreve uma proposta de aumento da capacidade de transmissão de 2.5 Gbit/s para 4 x 2.5 Gbit/s, bem como, os procedimentos experimentais e os resultados obtidos da experimentação desta proposta em distâncias de cobertura no âmbito do acesso (20 km).

O Capítulo 4 (Extensor ativo para redes G-PON por sobreposição WDM): é descrita a proposta de extensão física da rede, bem como, os procedimentos experimentais e os resultados obtidos para extensão da proposta de evolução descrita no capítulo 3, utilizando amplificadores remotamente e eletricamente alimentado.

O Capítulo 5 (Extensor alimentado por fibra para redes G-PON/XG-PON sobreposta): é descrita a proposta de extensão física da rede, utilizando a técnica de transmissão de energia através da fibra óptica. São descritos os procedimentos experimentais e os resultados obtidos para extensão de uma rede sobreposta, utilizando amplificadores alimentados por fibra óptica.

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões obtidas desse estudo, bem como as linhas de pesquisa futuras correlatas.

1.3 Produção Científica Vinculada ao Trabalho

Foram elaboradas publicações, ligadas ao tema dessa proposta, em revistas internacionais e congressos internacionais, atestando, então, as contribuições originais provenientes desta proposta de tese. Entre os vários trabalhos, podem ser destacados os artigos publicados no *International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC2011)*, *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications (JMoe)* e, *Journal of Optical Communications and Networking (JOCN)*, outras publicações, como coautor, com temas correlatos são apresentadas no anexo 1. Abaixo estão listados os 4 artigos publicados em coautoria com o orientador e coorientador durante o desenvolvimento deste trabalho de doutorado.

1. J. B. Rosolem, R. S. Penze, et al, “Arquiteturas baseadas em WDM para as próximas redes PON”, *Caderno de Tecnologia do CPqD*, v. 6, n. 1, pp. 65-76, (2010).
2. R. S. Penze, J. B. Rosolem, U. R. Duarte, “Passive Optical Network Upgrading by Using In-Band WDM Overlay”, *International Microwave and Optoelectronics Conference – IMOC (2011)*.

3. R.S. Penze, J.B. Rosolem, R. Baldini Filho, “Upgrading and Extending PON by Using In-Band WDM Overlay”, Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications (2012).

4. R. S. Penze, J. B. Rosolem, U R Duarte, G ER Paiva, R. Baldini Filho, “Fiber Powered Extender for XG-PON2 G-PON Applications”, Journal of Optical Communications and Networking - JOCN 6.3 (2014): 250-258.

CAPITULO 2

2 Redes Ópticas Passivas

2.1 Introdução

Neste capítulo são descritas as tecnologias existentes para rede ópticas passivas padronizadas, além disto, também serão descritos de forma sucinta as principais arquiteturas de rede óptica passiva (*Passive Optical Network* – PON) e o uso de extensores para rede de acesso óptica passiva.

A crescente demanda de largura de banda devido a novos serviços[1]-[16], a saturação de banda e limitação de serviços das redes de cobre e a competitividade pela qualidade e entregas desses serviços estão levando as operadoras a implantarem e operarem redes por fibra óptica.

Entre as redes que utilizam sistemas de transmissão ópticos para redes de acesso e redes locais, podemos citar a rede óptica passiva gigabit (*Gigabit Passive Optical Network* - GPON)[6]-[16]/rede óptica passiva ethernet (*Ethernet Passive Optical Network* - EPON), rede óptica passiva 10 gigabit (10 *Gigabit Passive Optical Network* - XGPON)[17]-[21], rede óptica passiva por multiplexação por divisão no domínio do tempo e em comprimento de onda (*Time and Wavelength Division Multiplexed Passive Optical Network*- TWDM-PON)[23] e rede óptica passiva baseada em multiplexação por divisão em comprimento de onda (*Wavelength Dimension Multiplexing Passive Optical Network*- WDM-PON)[24].

Diversas são as opções de tecnologias utilizadas nas redes de acesso para atender os serviços *Triple Play* (Internet de alta velocidade, Televisão e Telefonia), sendo essa cabeada ou sem fio[1]. Dentro das opções de tecnologias utilizadas em redes cabeadas, estão a coaxial e fibra híbrida (*Hybrid Fiber Coax*-HFC), a linha digital do assinante (*Digital Subscriber Line* - DSL), incluindo suas variações ADSL (DSL assimétrica), ADSL2 (DSL assimétrica 2), ADSL2+ (DSL assimétrica 2+), VDSL (DSL de alta velocidade), IDSL (DSL baseada em Redes Digitais de Serviço Integrado (*Integrated Services Digital Network*-

ISDN), G.SHDSL (DSL simétrica de alta velocidade) e SDSL (DSL simétrica) [25], a rede óptica passiva (PON) e a ethernet, podendo existir combinações entre elas.

2.2 Redes xDSL e modem a cabo

A linha digital de assinante, xDSL, é uma tecnologia, onde, os cabos de cobre das linhas telefônicas tradicionais se conectam aos usuários residências e comerciais através da central telefônica. Dessa forma, as companhias telefônicas podem prover acesso banda larga a seus usuários usando parte do espectro que não é utilizado para transmissão de voz. A tecnologia xDSL usa arquitetura ponto-a-ponto e seu principal limitante é o ruído resultante da diafonia entre os cabos metálicos. Sua largura de banda depende do nível de ruído que, por sua vez, depende do comprimento do enlace de cobre. Algumas tecnologias xDSL, como a ADSL, VDSL, IDSL, G.SHDSL e SDSL estão mostradas na Tabela 2.1[25], com suas respectivas taxas e alcançestípicos.

Tabela 2.1Tecnologias DSL: alcance x taxa enlace de cobre (par metálico)[25].

	<i>Downstream</i>	<i>Upstream</i>	Distância
ADSL	8Mbps 1.5Mbps	1Mbps 640Kbps	5.5km
VDSL	51 - 55Mbps 13Mbps	1.6 - 2.3Mbps 1.6 - 2.3Mbps	0.3Km 1.5 Km
IDSL	144Kbps	144Kbps	5.5Km
G.SHDSL	2.3Mbps—192Kbps	2.3Mbps—192Kbps	8.52Km
SDSL	1168Kbps	1168Kbps	3.65Km

De forma similar às companhias telefônicas, as empresas de TV a cabo encontraram uma forma de prover acesso banda larga a seus usuários através da tecnologia modem a cabo(*Data Over Cable Service Interface Specification– DOCSIS*) [25].

Esta tecnologia utiliza canais de radiofrequência na infraestrutura de transmissão das TVs por assinatura. Para reduzir as perdas nos cabos coaxiais e a necessidade de muitos amplificadores em série, as empresas passaram a utilizar fibra óptica nos troncos de distribuição, isto é, na parte mais próxima à central de serviço. Na área de distribuição aos assinantes, continuou-se usando cabos coaxiais. Esta tecnologia mista de projeto denomina-se planta HFC. Diferentemente do DSL, onde a arquitetura física dos cabos de cobre é ponto-a-ponto, a tecnologia modem a cabo compartilha o meio de transmissão, dessa forma a largura de banda é dividida entre todos os usuários da rede.

Tabela 2.2 - Versões do padrão DOCSIS enlace de cabo coaxial[25].

Versão	<i>Downstream</i>	<i>Upstream</i>
1.x	38Mbps	9Mbps
2.0	38Mbps	27Mbps
3.0 - 4canais	+ 152Mbps	+ 108Mbps
3.0 - 8canais	+ 304Mbps	+ 108Mbps

A tecnologia DOCSIS define as taxas para *downstream* e *upstream*, como pode ser observado na Tabela 2.2. Compartilhando-se a largura de banda entre centenas de usuários, a taxa individual é relativamente baixa (inferior a 1Mbps). Esta rede foi construída principalmente para oferecer serviços *broadcast*, o que dificulta o modelo de comunicação bidirecional de uma rede de acesso.

2.3 Redes de fibras ópticas

A transmissão via fibra óptica oferece uma grande largura de banda quando comparada com as redes de comunicação que utilizam pares metálicos, sendo considerada a solução final para fornecer acesso de banda larga à última milha (termo utilizado para referenciar os acessos à rede dos usuários), onde se encontra o principal ponto de limitação ao

atendimento dos serviços que demandam alta velocidade de transmissão. Tecnologias como as xDSL, conseguem aumentar a largura de banda disponível na infraestrutura de cobre existente, entretanto, necessita-se de novas infraestruturas de rede para acomodar a demanda de novas aplicações. Nestas infraestruturas deve-se expandir a largura de banda, como garantia de qualidade de serviço (*Quality of Service* - QoS) e com um custo reduzido[1].

Há cinco bandas espectrais as quais são utilizadas para definir as características da fibra óptica e dos equipamentos destinados à implementação de sistema de comunicações ópticas (amplificadores, multiplexores, etc.), as bandas de transmissão são a banda original (O-Band): definida entre 1260 até 1360 nm, banda estendida (E-Band): definida entre 1360 até 1460 nm, banda curta S (S-Band): definida entre 1460 até 1530 nm, banda convencional (C-Band): definida entre 1530 até 1565 nm, e banda longa (L-Band): definida entre 1565 até 1625 nm. Os primeiros sistemas desenvolvidos compreendiam comprimentos de onda de 800 a 900 nm, o que pode ser considerado como a primeira vantagem da fibra óptica, entretanto, as perdas desta região são elevadas limitando a transmissão a distâncias curtas. O padrão ITU G.694.2[2] especifica 18 comprimentos de onda espaçados de 20 nm entre 1270 nm e 1610 nm, inclusive, como mostra a Figura 2.1. Este trabalho concentra-se na banda de operação da rede GPON que são as bandas O e S.

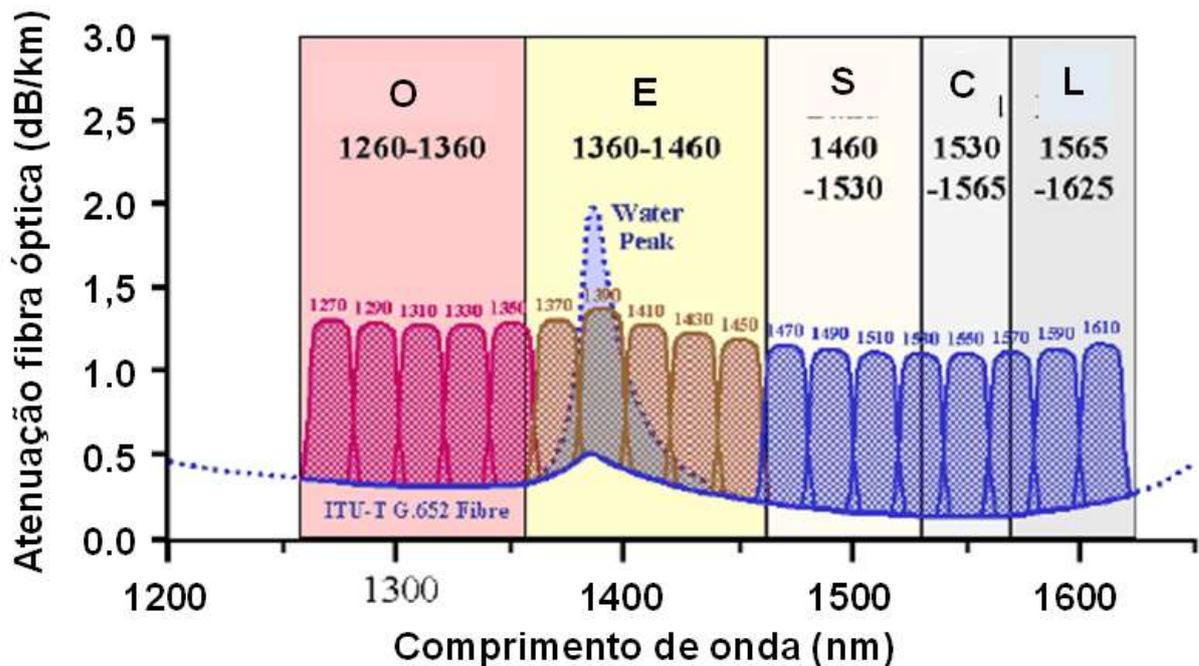


Figura 2.1 - Banda espectral (figura adaptada [3])

As redes de fibras ópticas de acesso podem ser classificadas em duas categorias de acordo com a distribuição dos cabos ópticos: a arquitetura ponto-a-ponto e a pontomultiponto.

Na topologia física ponto-a-ponto, o número de fibras é igual ao número de usuários, o que torna a rede menos flexível em relação à instalação e manutenção, portanto, limitada para atendimento em massa de usuários. Já na arquitetura ponto-multiponto, diversos usuários compartilham uma fibra até um nó remoto (*Remote Node* – RN), a partir do qual cada cliente dispõe do seu próprio enlace óptico.

O RN pode ser passivo ou ativo, dependendo se é eletricamente alimentado ou não. Se requerer suprimento de energia, a arquitetura é chamada de rede óptica ativa (*Active Optical Network* – AON). Caso contrário, a arquitetura recebe o nome rede óptica passiva (*Passive Optical Network* – PON). As PONs foram inicialmente desenvolvidas na década de 80 [26] como um método viável de compartilhamento da infraestrutura de fibra para prover telefonia às empresas.

Redes PONs são mais vantajosas do que as AONs em termos de instalação, operação, manutenção da rede e possibilidade de evolução[27]. A planta externa de uma rede óptica passiva tem menor custo, visto que, não há componentes elétricos, tais como, switches Ethernet ou amplificadores. Custos operacionais também são reduzidos na PON, tendo em vista que não há necessidade dos operadores proverem e monitorarem a energia elétrica ou manterem baterias reservas. Adicionalmente, componentes elétricos são passíveis de falha, o que demanda mais manutenção com as AONs.

Nas redes PONs, conforme podemos observar na Figura 2.2, o terminal de linha óptica (*Optical Line Terminal* - OLT), localizado na central do provedor de serviço (*Central Office* - CO), é conectado a várias unidades de rede óptica (*Optical Network Units* - ONUs) ou terminais de rede óptica (*Optical Network Terminal* - ONTs) através de um ou vários divisores ópticos, *splitters*, que estão localizados dentro do RN, superando sobremaneira as limitações impostas pelas redes xDSL.

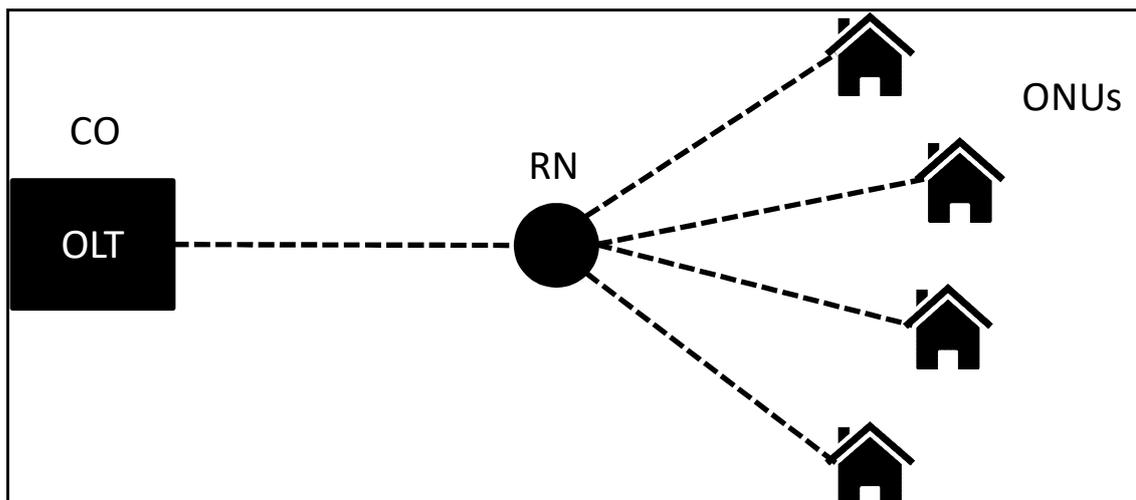


Figura2.2 - Redes ópticas passiva

Antes de detalhar as topologias aplicadas a redes ópticas passivas é importante mencionar cada elemento que compõem a rede PON, que são:

O Terminal de Linha Óptica, conhecido como “OLT”:Elemento de rede instalado no site ou central de serviços de telecomunicações da operadora.É o elemento da rede responsável pela gerência do sistema, podendo estar fisicamente na central ou remotamente em um armário ou ponto de presença da operadora.

O sinal óptico é transmitido pela OLT através da rede de distribuição óptica. É responsável por agregar e rotear todo o tráfego proveniente dos clientes encaminhando-o à rede de serviços. Além disso, é responsável por processar os sinais GPON, realizar a sincronia entre as ONUs e realizar as verificações de segurança. Possui interfaces para comunicação com switches em direção ao núcleo da rede e interfaces ópticas GPON para comunicação com os assinantes, conforme apresentado na Figura2.3.



Figura2.3 -Rede Óptica Passiva –Exemplo de um terminalde linha óptica OLT (Fonte: <http://e.huawei.com/br/products/fixed-network/access>)

Normalmente à distância de alcance de um OLT para atender os ONT/ONU é de 20 km e a mesma pode controlar um total de até 128 ONT dependendo da distância e topologia adotada.

O Terminal de Rede Óptica, conhecido como ONT ou a Unidade de Rede Óptica, conhecido como ONU: É o elemento da rede que é instalado no usuário, e fornece a conexão efetiva à rede de dados. Tem como principais funções a de processar os dados recebidos da OLT e disponibilizar interfaces para serviços de comunicação de dados, telefonia, televisão.

Quando o equipamento é instalado próximo ao usuário, ele é denominado ONU. Além da ONU é instalada toda uma infraestrutura de proteção física (para evitar vandalismo e como proteção climática) e bateria reserva para eventuais quedas de energia.

A partir desse ponto temos um exemplo de uma rede FTTx, onde o atendimento aos usuários pode ser realizado através de cabo par metálico (xDSL), cabo coaxial, ligação de fibra óptica independente ou ainda uma conexão sem fios. Já quando o equipamento é instalado na casa do usuário, ele é denominado ONT, conforme exemplo da Figura 2.4.



Figura 2.4—Rede Óptica Passiva – Terminal de Rede Óptica ONT (Fonte: <http://e.huawei.com/br/products/fixed-network/access/ont/optical-terminal>).

O Divisor Óptico Passivo conhecido como Splitter: é o elemento da rede responsável dividir ou combinar o sinal óptico da fibra. No sentido *downstream*, o sinal de entrada é dividido e enviado para todas as portas de saída, já no sentido *upstream*, os sinais de todas as ONUs/ONTs são combinados e transmitidos para o OLT.

O *splitter* possibilita a divisão do sinal em 1x4, 1x8, 1x16, 1x32, 1x64 e 1x128, assim, uma única fibra é capaz de ter até 128 fibras de saída para atendimento de usuários, conforme Figura 2.5.



Figura 2.5–Rede Óptica Passiva – Divisor Óptico Passivo “*Splitter*” (Fonte: <https://www.linkedin.com/pulse/comparison-between-fbt-plc-splitters-chloe-wang>).

Na Tabela 2.3 é mostrada a perda de potência no sinal de saída em relação ao sinal de entrada para os diversos coeficientes de divisão do *splitter*. Quanto maior a razão de divisão menor será a potência de saída em cada porta, por exemplo, em um divisor com razão de 1:2, ou seja, uma entrada e duas saídas, cada saída seria idealmente 3dB menor que a potência da entrada.

Tabela 2.3 - Tabela de razão de divisão versus atenuação de *Splitter*

Divisão	Atenuação (dB)
1:2	3
1:4	6
1:8	9
1:16	12
1:32	15
1:64	18
1:128	21

Uma vez conhecidos os principais elementos da rede óptica passiva, é importante saber as diversas topologias de rede que podem ser aplicadas a uma rede óptica passiva – PON.

O tipo de topologia de rede xPON é determinado pela forma de levar o sinal até o usuário. A topologia mais adequada para um determinado atendimento é fundamental para minimizar custos, garantir qualidade de serviço e o orçamento de potência.

A definição adequada da topologia tem forte influência no planejamento da rede óptica, alguns fatores que influenciam na definição da topologia são: a distribuição geográfica dos usuários e os custos de manutenção e operação da rede. Várias são as topologias que podem ser aplicadas, tais como: anel, estrela, barramento e árvore cada qual com as suas vantagens e desvantagens. As topologias comumente empregadas em redes PONs são aquelas onde a maior parte do trecho físico para transmissão de dados se dá pelo enlace de fibra óptica, chegando o mais próximo possível dos terminais dos usuários.

2.4 Topologias de redes

2.4.1 Topologia em anel

Na topologia em anel, geralmente utilizada em redes metropolitanas, os terminais de rede óptica (*Optical Network Terminal* - ONTs) se interligam de forma serial formando um anel com o OLT conforme Figura 2.6. Nesse tipo de topologia é possível enviar e receber sinal nos dois sentidos do anel. A grande vantagem desta topologia é a redundância, pois, caso a rede seja interrompida em um determinado ponto, nela há outro caminho distinto de transmissão da OLT, que mantém o sinal em caso de interrupção. Como desvantagem podemos citar a sua capacidade de oferecer um número limitado de enlaces.

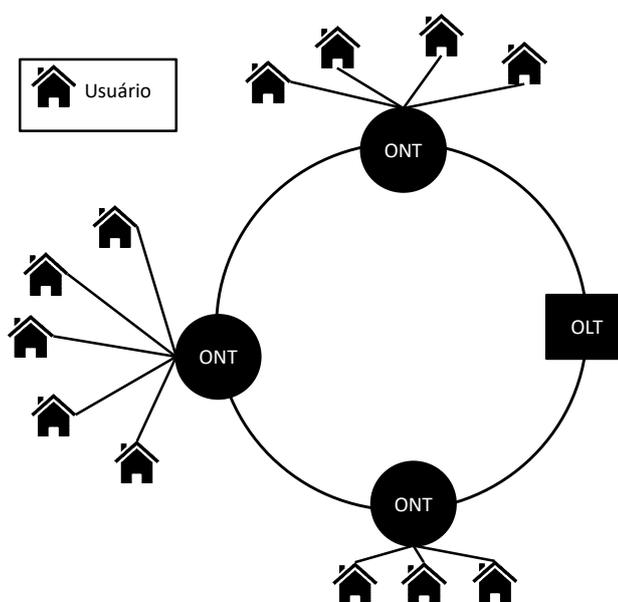


Figura 2.6–Topologia em anel

2.4.2 Topologia em estrela

A topologia em estrela, conforme Figura 2.7, implementa a conectividade ponto-a-ponto entre OLT e ONT.

Tem como vantagem a capacidade de entregar banda dedicada de altas taxas aos usuários finais e também possui um baixo custo em operação, administração e manutenção.

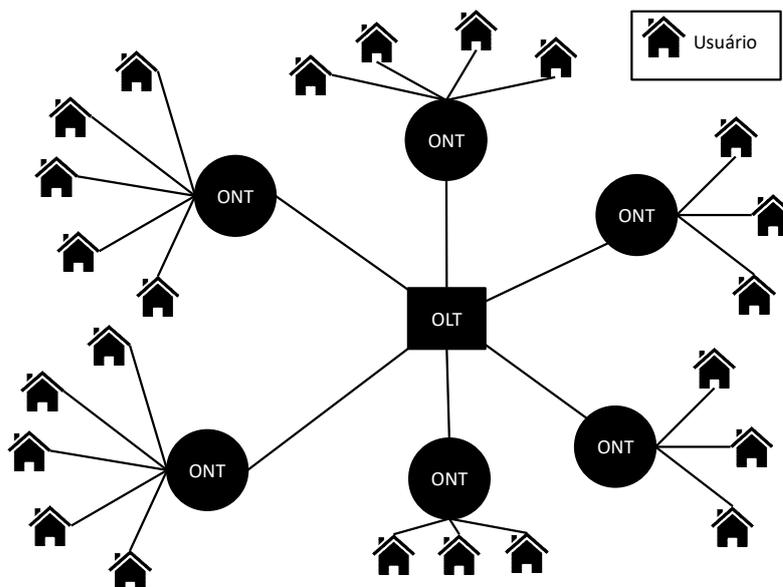


Figura 2.7 – Topologia em estrela

2.4.3 Topologia em barramento

A topologia em barramento, conforme Figura 2.8, utiliza uma fibra óptica para interligar OLT e ONTs, onde, ao longo do caminho de atendimento são adicionados *splitters* em sequência que é denominada como “cascata” para atendimento das ONTs.

Tem como vantagem a flexibilidade da rede para atendimento dos usuários. Como desvantagem essa topologia atende distâncias curtas devido às perdas dos *splitters*.

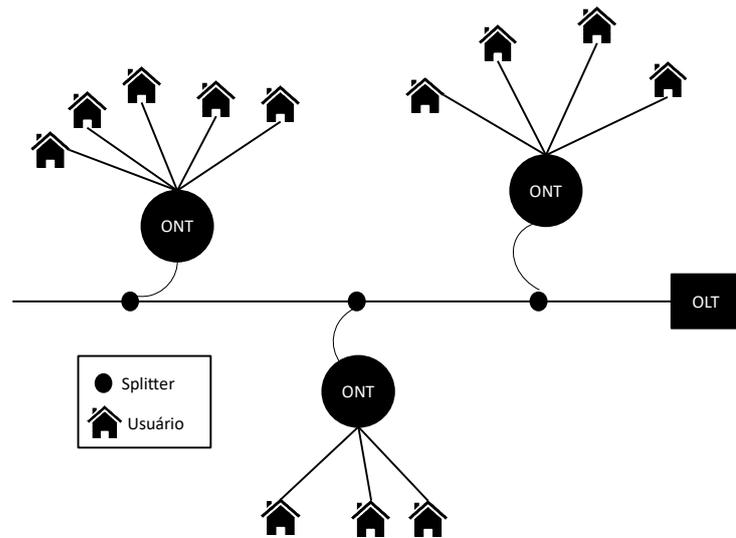


Figura 2.8– Topologia em barramento

2.4.4 Topologia em árvore

A topologia em árvore, conforme Figura 2.9 é a mais utilizada em redes de acesso. Esta topologia programa a arquitetura ponto-multiponto, e tem como vantagem o compartilhamento da infraestrutura entre todos os usuários, bem como, apresenta redução nos custos de manutenção na rede de acesso. Uma única fibra óptica é utilizada para conectar os OLTs através de um único *splitter*, que interliga com usuários geograficamente dispersos.

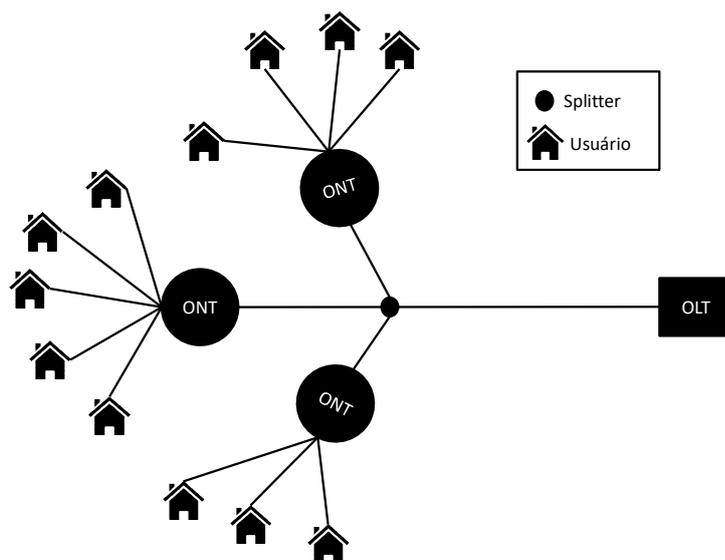


Figura 2.9– Topologia em árvore

Uma rede óptica de assinantes pode ser classificada também em relação ao ponto de atendimento do usuário, ou seja, em levar a fibra óptica até o ponto “x” (*Fiber to the x – FTTx*), onde o “x” refere-se a um local de terminação da rede óptica.

Uma rede FTTx é uma rede de acesso baseada em fibra que conecta uma grande quantidade de usuários a um ponto central, conhecido como nó de acesso, dependendo da localização da terminação de rede óptica o “x” pode referir-se a:

- Fibra até o prédio (*Fiber to the Building – FTTB*),
- Fibra até a central de comutação (*Fiber To The Exchange - FTTE*),
- Fibra até um armário de distribuição de rua (*Fiber To The Cabinet - FTTC*),
- Fibra até um armário que se localiza no quarteirão do usuário (*Fiber to the Curb – FTTC*)
- Fibra até o estabelecimento de um usuário, ou fibra até a residência (*Fiber to the Home – FTTH*), e conforme podemos observar na Figura 2.10.

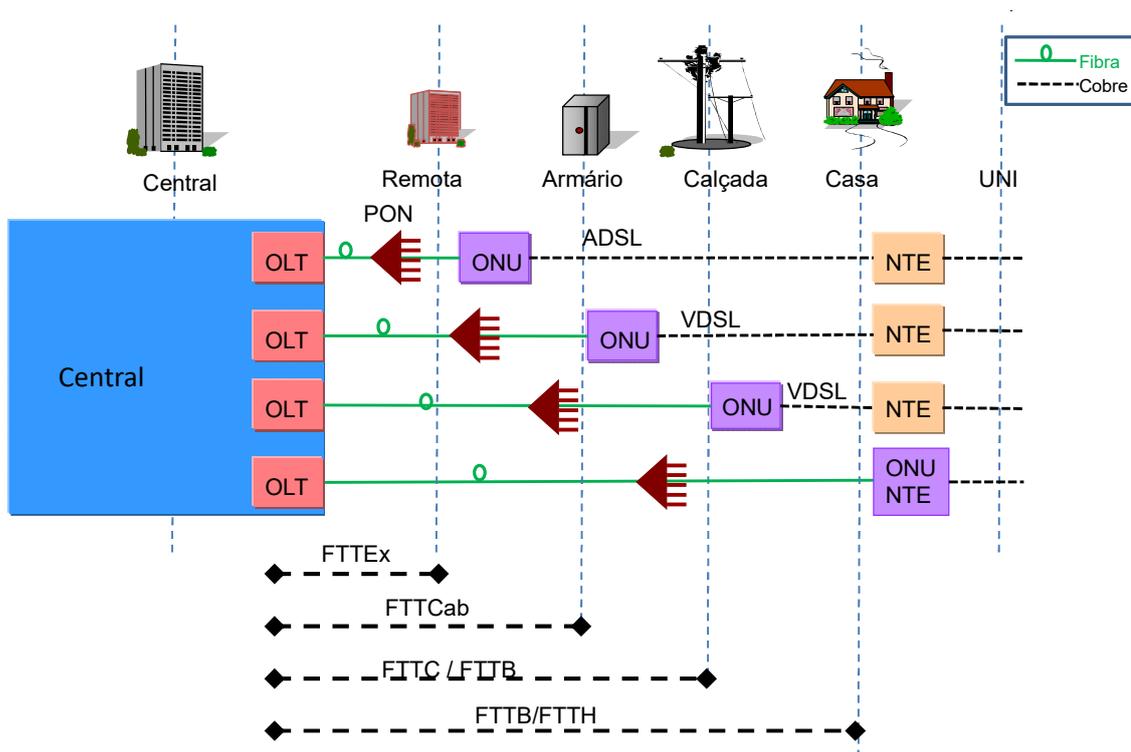


Figura 2.10 –ArquiteturaFTTx

O conceito FTTx veio para suprir o crescente aumento da demanda por serviços de alta capacidade pelos usuários. Entre as redes PONs existentes, a rede óptica passiva

baseada em multiplexação por divisão no tempo é a tecnologia mais utilizada atualmente, que é descrita na próxima seção.

2.5 Redes xPON

O consórcio FSAN (*Full Service Access Network – FSAN*) padronizou a rede óptica passiva sobre modo de transferência assíncrona (*Asynchronous Transfer Mode Passive Optical Network – APON*) em 1993 como solução mais barata e rápida de se ter uma rede com elevadas taxas de transmissão suportando dados, voz e vídeo simultaneamente, utilizando fibra óptica. O FSAN atua de forma a estimular a aplicação dos padrões relacionados à PON na indústria, contando com membros tais como: fabricantes e desenvolvedores de equipamentos e componentes utilizados em redes de telecomunicações, além de empresas operadoras. A partir dessa iniciativa deu-se início a rede xPON que tem uma arquitetura ponto-multiponto que permite que uma única fibra seja compartilhada por múltiplos usuários, não existindo elementos ativos entre o OLT e as ONT's. A rede óptica passiva, como mencionado anteriormente, caracteriza-se por não necessitar de energia elétrica para alimentar os elementos que compõem a rede externa de telecomunicações. O sistema de transmissão de uma xPON apresenta três elementos principais o OLT, ONT e a ODN. O OLT e o ONT contêm componentes ópticos e eletrônicos ativos, enquanto a ODN constitui a rede de distribuição passiva contendo a fibra, os divisores / combinadores e os conectores, conforme é observado na Figura 2.11.

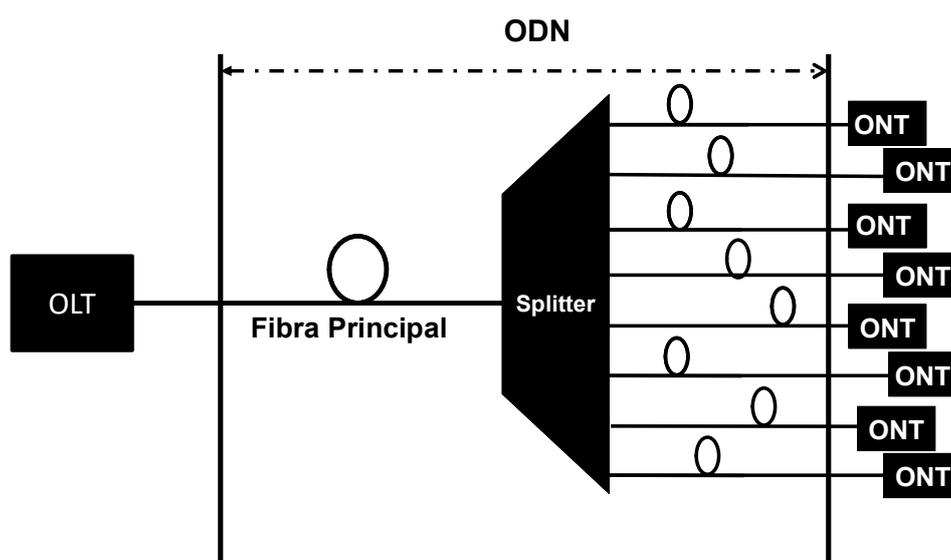


Figura 2.11 – Rede de distribuição óptica

A rede de distribuição óptica também conhecida como rede externa contém os elementos necessários para estabelecer um caminho entre a central de serviços de telecomunicações e os usuários do sistema. A rede PON opera em conjunto com tecnologias padronizadas capazes de controlar os acessos múltiplos de usuários à rede através da divisão do tempo entre os eles.

Nesta configuração, um único comprimento de onda é compartilhado entre todas as ONTs do sistema, por meio da utilização de divisores / combinadores ópticos passivos conhecidos como *splitters*. O sentido de fluxo de dados do OLT para as ONTs sentido *downstream* ocorre na forma *broadcast*, cada ONT recebe toda informação provida pelo OLT e filtra somente as informações que lhe são destinadas. Para o sentido de fluxo de dados dos terminais dos usuários para o OLT sentido *upstream* cada ONT possui uma janela temporal definida para transmissão de dados para o OLT, o qual é responsável por garantir o sincronismo no sistema, evitando colisão entre os pacotes oriundos das diferentes ONTs. Para transmissão *upstream* um outro comprimento de onda é utilizado.

A tendência natural de evolução da rede GPON é aumentar a taxa de bits de transmissão para 10 Gb/s [16]-[30] ou migrar para rede WDM-PON [24]. Há uma proposta de utilização de canais com multiplexação por divisão esparsa em comprimento de onda (*Coarse Wavelength Division Multiplexing* – CWDM) sobrepostos nas PON [16][29]– [38], ou seja, um empilhamento de sistemas PON independentes e coloridos sobre uma única rede ODN. Essa proposta é conhecida como rede óptica passiva baseada em multiplexação por divisão no domínio do tempo e em comprimento de onda (*Time and Wavelength Division Multiplexed Passive Optical Network* - TWDM-PON), conforme será descrito na seção 2.5.6.

O gráfico da Figura 2.12, apresenta uma evolução da rede óptica passiva, onde temos as redes atuais GPON e XGPON, as redes ópticas de nova geração 2 (*New Generation Passive Optical Network 2*- NG-PON 2) que contempla as redes TWDM-PON que foi selecionada pelo grupo FSAN e descrita na ITU-T G.989[22] e as redes ópticas de nova geração 3 (*New Generation Passive Optical Network 3* – NG-PON 3), onde, está em estudos proposta de uso de redes WDM-PON que pode ser denso ou ultra denso, a multiplexação por divisão de frequência ortogonal PON (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing* PON – OFDM-PON) e 40 Gigabit PON (XL-PON).

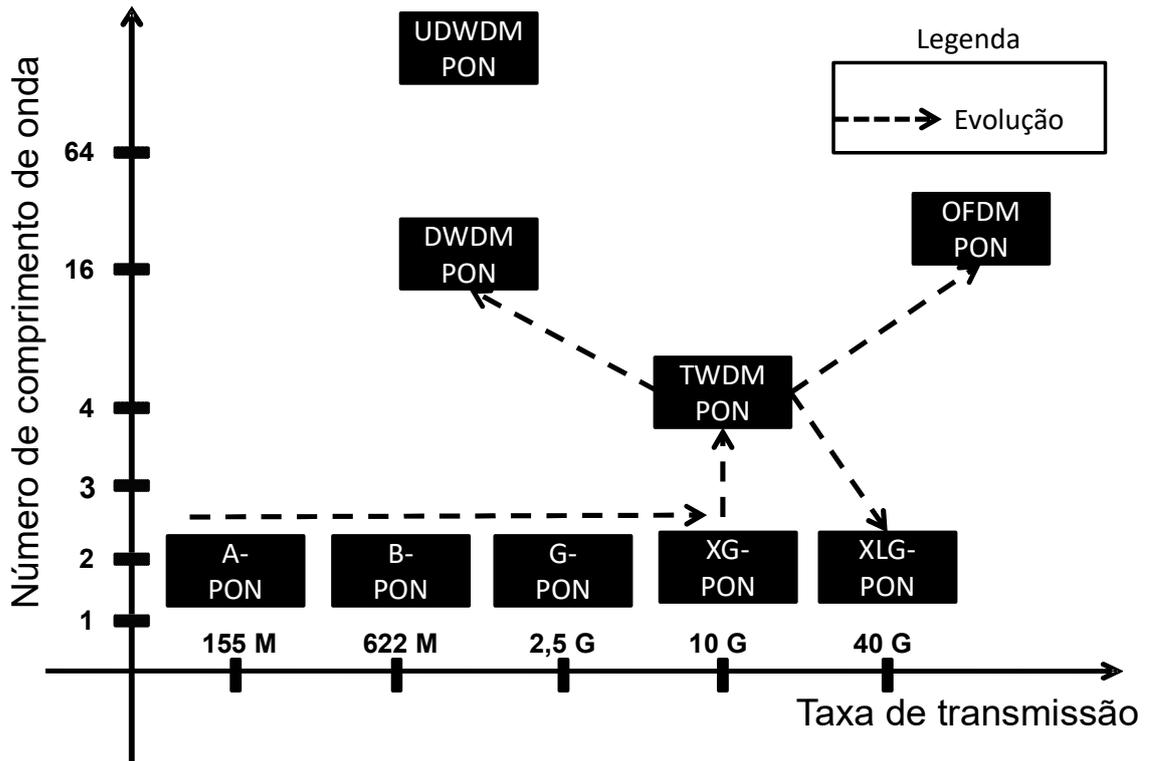


Figura 2.12- Evolução da rede óptica passiva

Dentre as redes PONs existentes, redes ópticas passivas baseadas em multiplexação por divisão no tempo (*Time Division Multiplexing* – TDM-PON) são as tecnologias mais utilizadas, sendo o assunto das nossas próximas subseções.

Paralelamente à proposta de padronização da rede óptica passiva GPON pelo ITU-T, outro grupo ligado ao instituto de engenheiros eletricitas e eletrônicos (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*– IEEE) propôs um padrão PON. Baseado no padrão Ethernet 802.3, EPON 802.3ah especifica uma rede passiva semelhante com a proposta da ITU-T de até 20 km de alcance. O padrão proposto pela IEEE utiliza os mesmos comprimentos de onda proposto para a tecnologia GPON. A taxa de transmissão de dados é 1.25 Gbits/s, em ambos os sentidos de *downstream* e *upstream*. A rede também é conhecida como *Gigabit Ethernet PON* - GEPON.

2.5.1 Rede APON

A rede óptica passiva sobre modo de transferência assíncrona (*Asynchronous Transfer Mode Passive Optical Network* – APON) foi o primeiro padrão para redes PON aceita pela ITU-T em com norma G.983. O padrão utilizaria o protocolo modo de

transferência assíncrono (*Asynchronous Transfer Mode - ATM*), onde as fontes de informação são mutuamente assíncronas e a informação é segmentada em células, que são transmitidas pelas fontes em instantes independentes.

A arquitetura foi projetada para transmissão simétrica e taxa de 155Mbit/s, utilizando o comprimento de onda de 1310 nm para voz e dados no sentido *upstream* 1550 nm para vídeo e 1490 nm para voz e dados no sentido *downstream*. Esta rede óptica passiva foi denominada como APON ou ATM PON.

Uma rede APON é composta por OLT e ONTs, a fibra que suporta os componentes ópticos e um sistema de gerência de rede. A OLT situa-se tipicamente na central de serviços de telecomunicações, enquanto a ONT se localiza no usuário. Como é da característica de rede PON, a rede externa (fibra e componentes ópticos) é totalmente passiva. Uma única fibra conecta uma porta OLT com múltiplas ONTs, utilizando filtros ópticos. Uma única APON, conforme as recomendações G.983 é limitada em 20km de distância entre OLT e ONT e pode atender no máximo 32 ONTs.

Esta rede foi projetada para atender usuários residenciais, onde, na sua versão inicial, não se incluiu o serviço de vídeo. Além disso, utilizam as células de camada física de operação, administração e manutenção (*Physical Layer Operation Administration and Maintenance – PLOAM*) para alocação de banda, sincronização, controle de erros, segurança e manutenção, além das células ATM.

O termo APON fez com que os usuários acreditassem que apenas os serviços estavam restritos a uma rede ATM, em função disso a FSAN decidiu modificar o nome para *Broadband PON* ou BPON e em 1998 foi lançada a norma para BPON, que teve origem na tecnologia APON modificada, permitindo novos serviços como o suporte à multiplexação por comprimento de onda, transmissão de vídeo, alocação dinâmica da largura de banda, e qualidade de serviço e configuração que garantem a interoperabilidade dos diferentes equipamentos [4].

2.5.2 Rede BPON

O padrão rede óptica passiva banda larga (*Broadband Passive Optical Network – BPON*) foi introduzido devido à necessidade de atender altas taxas de transmissão para transferência de informações. O primeiro padrão para o BPON é definido na norma ITU-T

G983[4][5], que atende taxas de 155 Mbit/s simétricos e 622/155 Mbit/s assimétrico sendo para sentido *downstream* 622 Mbit/s e 155 Mbit/s para o sentido *upstream* [28].

O protocolo ATM dá suporte aos diferentes tipos de serviços por meio de adaptação de camadas. As células ATM e o uso de canais virtuais e enlaces possibilitam a alocação da largura de banda disponível para o usuário. O BPON utiliza taxas de transmissões padronizadas o que permite a interconexão com as redes de transporte.

A partir da BPON deu-se início a toda a evolução das recomendações para tecnologia rede óptica passiva capaz de atender gigabit (*Gigabit-capable Passive Optical Network* – GPON).

2.5.3 Rede EPON

Concomitante ao desenvolvimento das redes PON pelo consórcio FSAN e devido à evolução das redes de computadores e de telecomunicações, o IEEE formou um grupo de estudo chamado ethernet na primeira milha (*Ethernet in the First Mile* – EFM), em Janeiro de 2001. O grupo teve como meta aumentar o desempenho da rede ethernet, minimizando custos de equipamentos, operação e de manutenção.

Dentre os padrões disponíveis para redes PON, a tecnologia Ethernet – PON, padronizado pelo grupo IEEE 802.3ah[18], é uma opção atraente porque é bastante difundido nas redes locais. O protocolo de controle multiponto (*Multipoint Control Protocol* - MPCP) é responsável pelo controle de acesso ao meio e fornece a infraestrutura opção de sinalização para transmissão entre OLT e ONUs.

A tecnologia EPON provê taxas de 1 Gbit/s nos dois sentidos usando o comprimento de onda 1490 nm para *downstream* e 1310 nm para *upstream*. O comprimento de onda 1550 nm é reservado para serviços adicionais, como o broadcast de vídeo analógico. Considerando que a cada OLT se conectam, tipicamente, 16 ou 32 ONUs, a largura de banda média para cada usuário seria em torno de 60 ou 30 Mbit/s, respectivamente.

2.5.4 Rede GPON

GPON é uma rede de acesso de banda larga compartilhada utilizada para fornecer serviços “*triple play*” em topologias de rede do tipo FTTx. Esta tecnologia foi padronizada pela ITU-T, nas séries do G.984.x ($x = 1,2,3,4,5$) [6]-[12].

Essa tecnologia permite operar com as taxas de 1,25 Gbps e 2.5 Gbps na direção *downstream* e 155Mbps, 622 Mbps, 1,25 Gbps e 2.5 Gbps na direção *upstream* com um par de fibras ótica ou somente com uma fibra utilizando dois comprimentos de ondas diferentes, 1490nm para o canal de *downstream* e 1310nm para o canal de *upstream* e com a possibilidade de um segundo comprimento de onda de 1550nm de *downstream* para a distribuição do sinal de vídeo.

A tecnologia GPON suporta dois métodos de encapsulamento: O ATM e/ou método de encapsulamento GPON (GPON *Encapsulation Method* GEM). Com o GEM é possível o envio de quadros Ethernet, assim como o transporte de tráfego TDM, além de também trabalhar com o serviço de ATM, conforme Tabela 2.4 garantindo assim a interoperabilidade entre sistemas em razão de suas características.

Tabela 2.4 - Comparação entre as tecnologias APON/BPON e GPON padronizadas pelo ITU-T
(adaptado Teleco)

Características	APON/BPON	GPON
Padrão	ITU G.983	ITU G.984
Taxa de transmissão	622 Mbit/s	2.5 Gbit/s
Protocolo	ATM	GEM/ATM
Comprimento de onda <i>downstream</i>	1490 nm e 1550 nm	1490 nm e 1550 nm
Comprimento de onda <i>upstream</i>	1310 nm	1310 nm
Distância	20 km	20 km
Razão de <i>splitter</i>	1:32	1:128

O diagrama simplificado de uma rede do tipo GPON é mostrado na Figura 2.13[6], este tipo de rede tem como características ser totalmente passiva, fator este que a torna muito atrativa para as empresas que oferecem serviços de telecomunicações, pois, não é necessário o uso de equipamentos e sistemas de alimentação elétricos.

A operação por uma única fibra óptica é possível através do uso de alguns poucos comprimentos de onda em WDM, conforme podemos observar na Figura 2.13. O sinal sentido *upstream*, ou seja, do usuário para a central é feita na região espectral de 1300 nm (1260 a 1360 nm) e o sinal sentido *downstream*, ou seja, da central para os usuários é feita na região espectral de 1490 nm (1480 a 1500 nm).

A transmissão de vídeo também poder ocorrer na região espectral de 1550 nm (1530 a 1560 nm). A largura de banda é utilizada pelos usuários da rede por multiplexação por divisão de tempo (*Time Division Multiplexing* – TDM).

A taxa de transmissão no sentido *downstream* é 2.5 Gb/s e *upstream* 1,25 Gb/s, atendendo segmentações de até 128 usuários por OLT (1:128) previstas pela norma [13], embora as configurações usuais sejam de 1:32 e 1:64, em distâncias de até 20 km, ou 60 km com emprego de amplificadores ou repetidores [11].

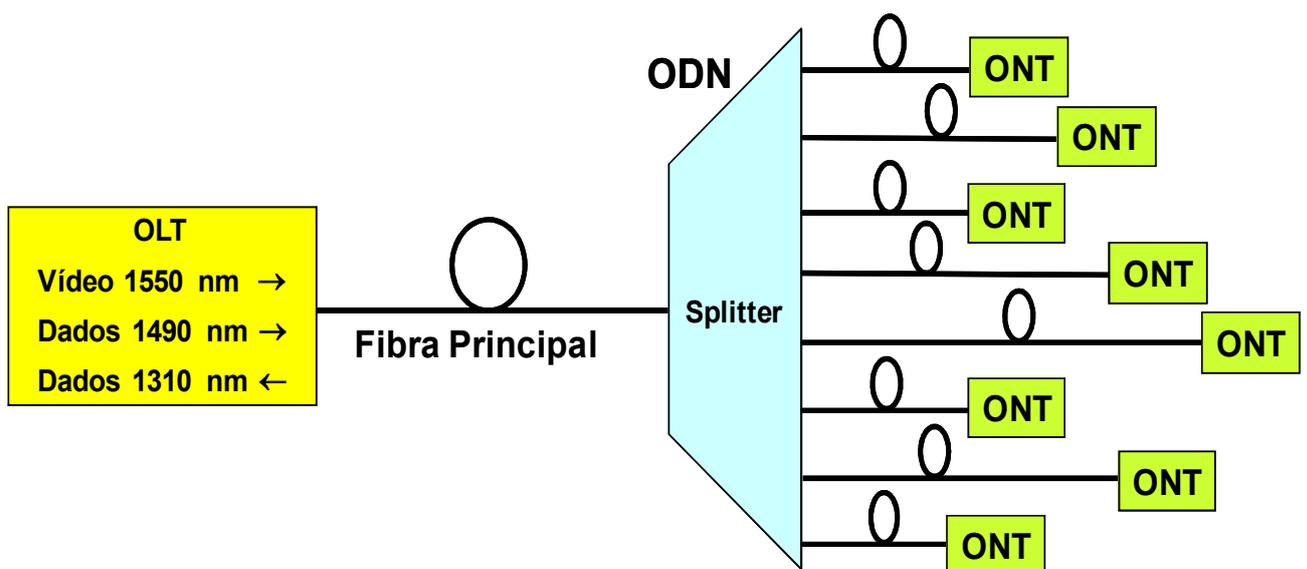


Figura 2.13 - Diagrama simplificado de uma rede do tipo GPON

O protocolo de controle de acesso ao meio (*Media Access Control*- MAC) do GPON permite uma distância máxima de 60 km e uma máxima divisão de sinal de 128 vezes. Na prática, devido às perdas na fibra e nos *splitters*, muitos sistemas comerciais atendem à especificação classe B prevista na prática G.694.2 [2], isto é, que permite uma faixa dinâmica de 28 dB e divisão do sinal óptico de até 32 vezes e uma distância física de 20km.

2.5.5 Rede XGPON

A tecnologia XGPON está padronizada pelo ITU-T com colaboração da FSAN (*Full Service Access Network*) na recomendação G.987[54] - [57]. O XGPON foi desenvolvido com propósito de aumentar a quantidade de usuários e as taxas de transmissões da GPON, entretanto, um dos requisitos fundamentais é que ambas as tecnologias coexistam sobre a mesma rede de distribuição óptica - ODN.

A letra X do algarismo romano significa 10, pois essa arquitetura possibilita taxa de *downstream* entre todas as ONUs de 10 Gb/s. A transmissão no sentido *downstream* ocorre na banda de 1575 – 1580nm. No sentido *upstream* opera na banda de 1260-1280 nm com taxa de transmissão de 2.5 Gbps. Entretanto, esta tecnologia também permite taxas de transmissão simétricas, isto é, 10 Gbps nos dois sentidos. A Figura 2.14 apresenta o plano de frequência das tecnologias GPON e XGPON.

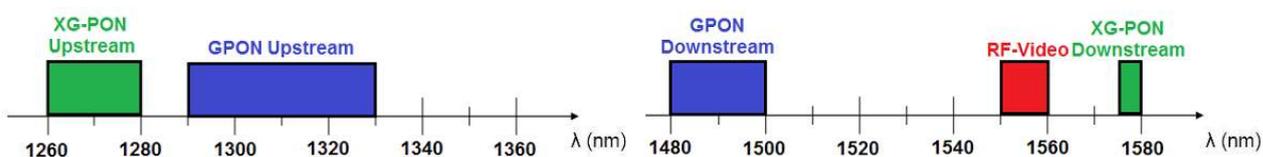


Figura 2.14 - Plano de frequência GPON e XGPON (a) *Upstream* e (b) *Downstream*

Uma das grandes vantagens da tecnologia XGPON é a sua capacidade de coexistir com a tecnologia GPON sem a necessidade de trocar qualquer dos elementos da rede externa, conforme podemos observar na Figura 2.15.

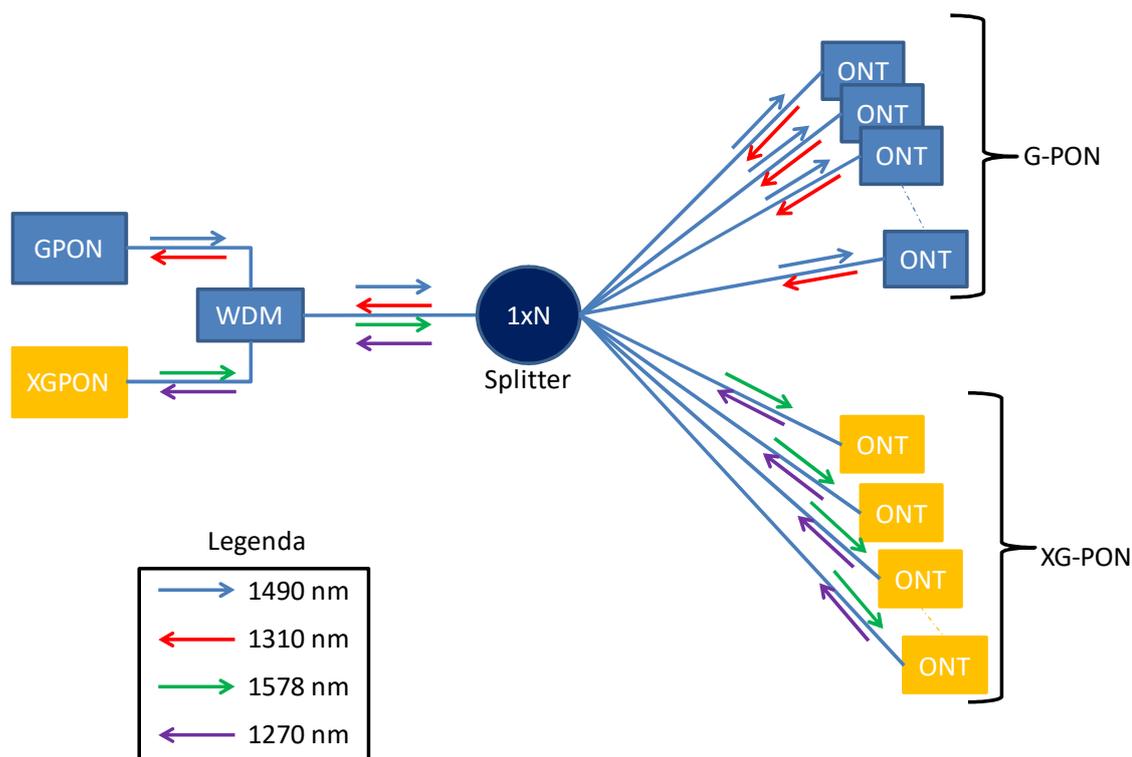


Figura 2.15 - Coexistência GPON e XGPON

2.5.6 REDE TWDM-PON

Para a padronização de próxima geração de rede ótica de acesso estado 2 (*Next Generation Passive Optical Network 2*, NG-PON2) várias propostas foram estudadas e analisadas, sendo que, os requisitos que norteavam a NG-PON2 estavam relacionados a suportar taxa agregada de todas as ONUs de 40 Gb/s, oferecer suporte a internet para dispositivos móveis com taxas da ordem de 1 Gb/s, ou mais, para os usuários, para uma distância de 40 km de alcance e atendendo a 64 unidades de ONUs[58].

Várias arquiteturas foram analisadas pelo consórcio FSAN que atendem os requisitos da NG-PON2. Entre elas, foram estudadas:

- Multiplexação por divisão de comprimento de onda PON (*Wavelength Division Multiplexing PON*, WDM-PON),
- Multiplexação por divisão de frequência ortogonal PON (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing PON*, OFDM-PON), e
- Multiplexação por divisão de comprimento de onda e tempo PON (*Time and Wavelength Division Multiplexed PON*, TWDM-PON)[58].

Dentre todas as propostas de arquiteturas apresentadas, a TWDM-PON foi a selecionada pelo FSAN. Esta tecnologia utiliza WDM para empilhar múltiplos pares de comprimentos de ondas XG-PONs. Para alcançar os requisitos de taxa de transmissão da NGPON2, é necessário um sistema TWDM-PON com no mínimo 4 XGPONs coloridos. A Figura 2.16 mostra a arquitetura TWDM-PON com quatro comprimentos de onda utilizados no sentido *downstream* e outros quatro no sentido *upstream*.

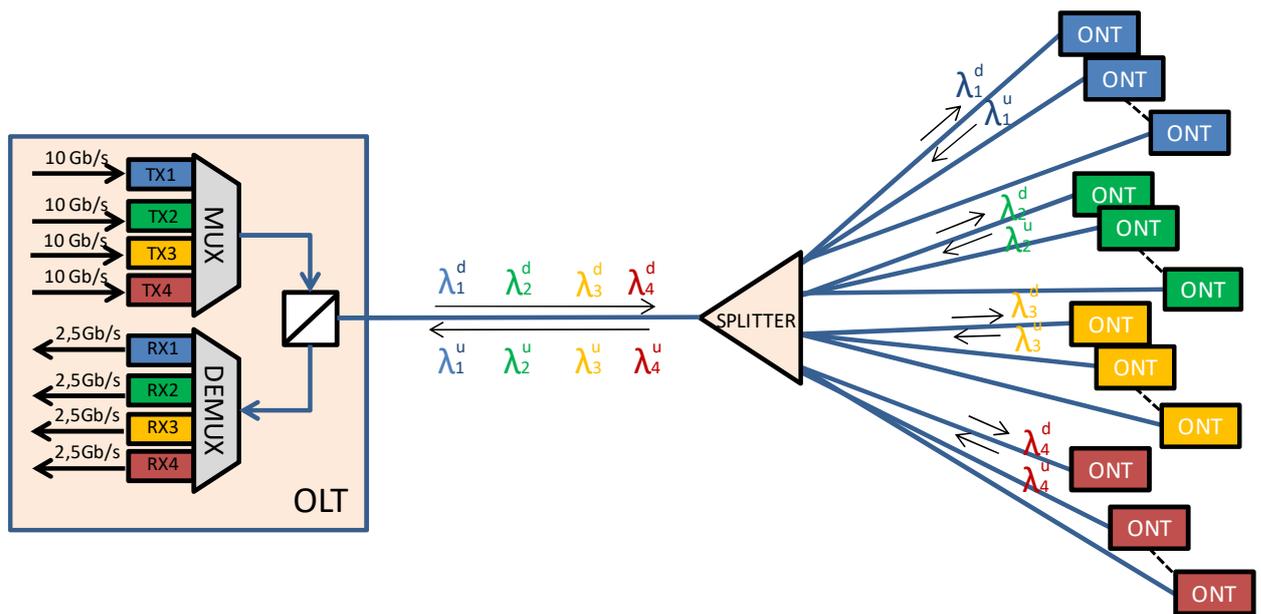


Figura 2.16 - Arquitetura TWDM-PON

Note que o TWDM-PON, apresentado pela ITU-T em conjunto com o FSAN, define uma arquitetura de 40 Gb/s que podem facilmente ser aplicada como evolução da rede GPON de 2.5 Gb/s para 10 Gb/s, com a grande vantagem de reaproveitando do legado de equipamentos existentes, isso deve-se ao fato dos comprimentos de ondas dessas tecnologias não se sobreporem no espectro óptico.

As referências [59] e [60] demonstram essa viabilidade com o desenvolvimento de transceptores ópticos com desempenho livre de erros em um sistema que utiliza a tecnologia TWDM-PON. Em [59] é apresentado um protótipo de um sistema TWDM-PON operando com 40 Gb/s sentido *downstream* e 10 Gb/s no sentido *upstream*. Este sistema atende uma distância de até 20 km quando um splitter de razão 1:512 é utilizado. Já em [60] é apresentado um módulo transceptor integrado à OLT que possui uma potência de transmissão (P_{TX}) de 10dBm com uma sensibilidade de recepção de -36dBm. Um transceptor (*Small Form Factor*

Pluggable – SFP)sintonizável é utilizado como um transceptor ajustável da ONU ao longo de 4 canais com potência 4dBm e -26dBm de sensibilidade.

Este sistema tem a vantagem de poder coexistir com os sistemas implantados GPON e XGPON. Na Figura 2.17 temos um exemplo de utilização do GPON com um sistema TWDM-PON, e XGPON. A topologia abaixo tem similaridade com o tema da proposta da tese.

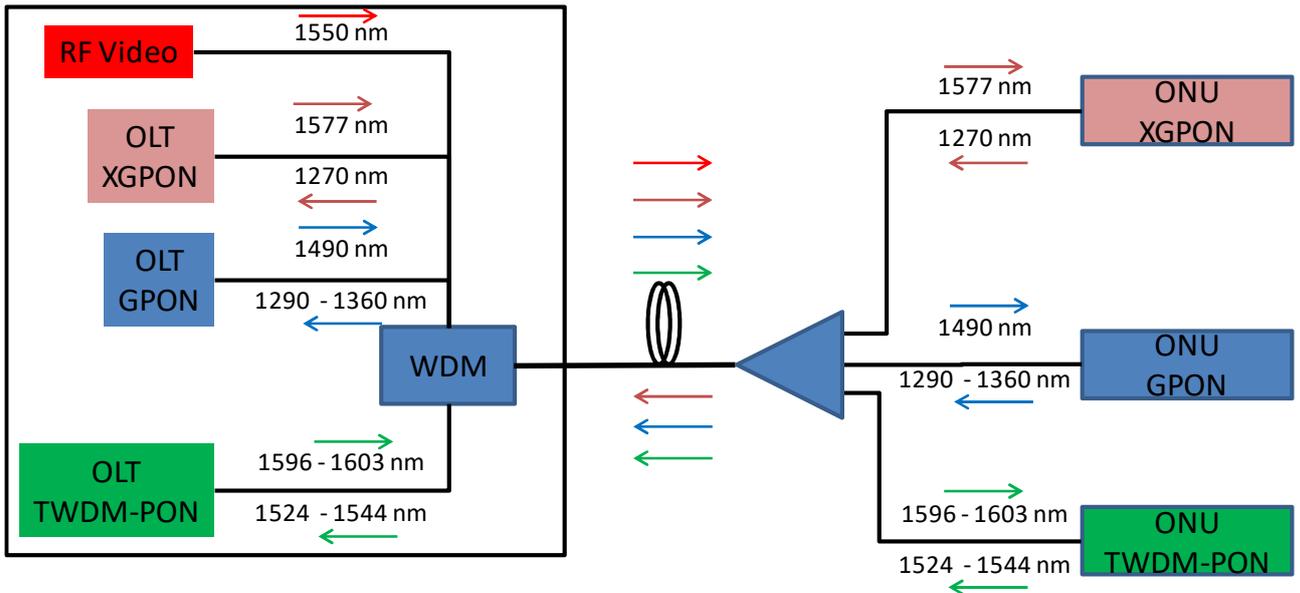


Figura 2.17 - Arquitetura TWDM-PON coexistentes com as tecnologias GPON e XGPON[59]

2.5.7 Rede WDM-PON

As redes WDM-PON caracterizam por possuir um equipamento OLT com múltiplos comprimentos de onda de um lado e, no outro lado da rede, os usuários. Cada comprimento de onda gerado no OLT é destinado a um dado usuário, como ilustra o diagrama simplificado da Figura 2.18. Na central, há diversos transmissores e receptores para cada comprimento de onda. Esses sinais, em distintos comprimentos de onda, são multiplexados (mux) e enviados para a fibra. Próximo às ONTs, um demultiplexador (demux) separa os sinais com comprimento de ondas diferentes e entrega a cada usuário. Da mesma forma as ONT's de cada usuário enviam, também, um comprimento de onda específico para a central na mesma fibra e, preferencialmente, no mesmo comprimento de onda recebido. Esse sinal é inserido na fibra no mesmo Mux/Demux, e enviado para a central. Na central, após passar por um circulador óptico que separa os sinais *downstream* e *upstream*, um demultiplexador separa os comprimentos de onda, direcionando-os para os seus respectivos receptores ópticos.

Conforme mostra Figura 2.18, em redes WDM-PON, a cada ONT é atribuído um par de comprimentos de onda dedicados. Desse modo, cada usuário pode enviar e receber dados do OLT a qualquer instante, independentemente da condição dos outros usuários. Nessa configuração, cada usuário fica com um canal óptico ponto a ponto com o OLT, apesar da arquitetura física da rede ser ponto-multiponto.

Para que essa configuração seja possível, um multiplexador/demultiplexador óptico deve ser utilizado, na ODN, no lugar do divisor de potência usado em redes GPON. Além disso, um demultiplexador óptico deve ficar localizado no OLT para separar os diversos comprimentos de onda, como mostrado na Figura 2.18. Essas operações de multiplexação e demultiplexação podem ser realizadas através da utilização de um multiplexador de grades ordenadas em guias de onda (*Array Waveguide Grating* – AWG) localizado no nó remoto (*Remote Node* – RN).

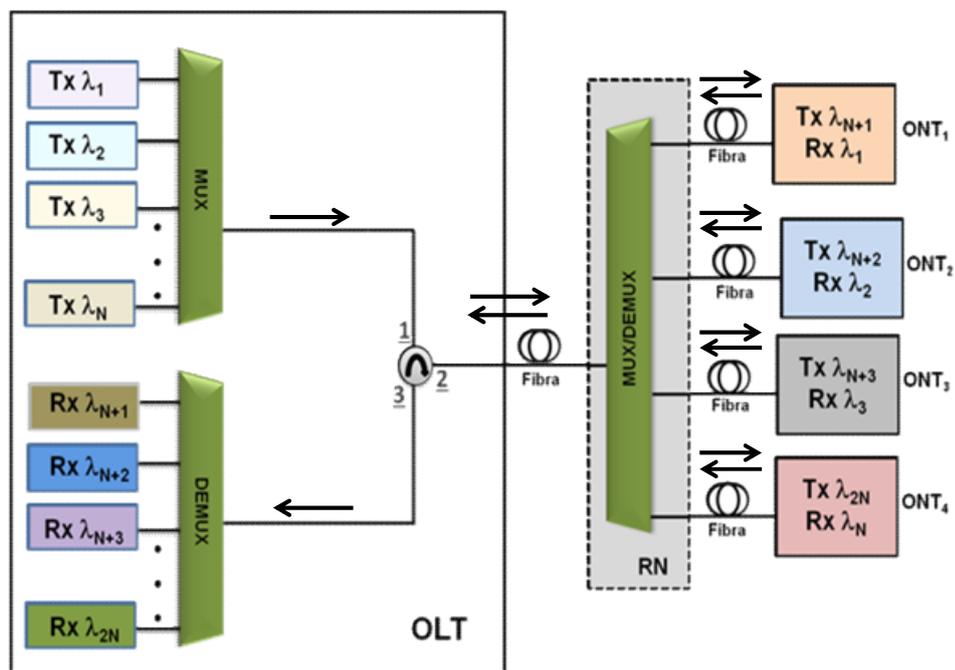


Figura 2.18 - Diagrama simplificado de uma rede do tipo WDM-PON

Com a utilização de WDM-PON os problemas de qualidade de serviço (*Quality of Service* – QoS) são bastante reduzidos, já que a rede é baseada em conexões ponto a ponto dedicadas. Além disso, não há necessidade de transmissão do sinal das ONTs em modo rajada (*burst*), nem de utilização de algoritmos para gerenciar os tempos de transmissão de cada ONT – como acontece nas redes GPON. Esses fatores permitem que a operação da rede WDM-PON seja bastante simples.

Outra vantagem é a utilização de um AWG, ao invés de divisores de potência no ONT. Dessa forma, a perda de inserção é muito menor que a perda apresentada pelos *splitters* e independe do número de usuários. Além disso, como a largura de banda de cada receptor nas ONTs é igual à largura de banda dedicada do canal, não há deterioração adicional da relação sinal-ruído óptica (*Optical Signal Noise Rate* – OSNR), associada ao número de usuários. O fato de a OSNR ser independente do número de usuários torna as redes WDM-PON flexíveis e com grande escalabilidade. Uma desvantagem é a impossibilidade de realocar a banda não utilizada de um usuário para outro. Na próxima seção analisaremos o uso de extensores para redes GPON.

2.6 Extensores para redes GPON

Um dos grandes desafios das redes ópticas passivas é o seu limitado orçamento de potência devido às taxas de divisão óptica para atender distâncias elevadas [6]. O orçamento de potência também conhecido como *power budget* ou *link budget*, é o cálculo de potência que é feito desde a fonte óptica até o receptor e é um fator determinante não só na quantidade de ONT's que poderão ser ligadas em um OLT como também na distância entre os dois. Uma forma de aumentar esta distância é através do uso de regeneradores ou amplificadores ópticos.

Como foi dito anteriormente, os sistemas WDM alcançaram a área metropolitana da planta de telecomunicações, com paradigmas diferentes dos sistemas de longa distância. Na área metropolitana, os sistemas WDM espectralmente esparsos (CWDM) têm sido mais empregados por oferecerem menor custo. As redes GPON, XGPON e GE-PON são do tipo multiplexada no domínio do tempo (*Time Domain Multiplexing* - TDM), ou seja, as taxas de transmissão tanto da central para o usuário (*downstream*) ou como do usuário para a central (*upstream*) são compartilhadas com diversos usuários (normalmente entre 32 a 64) o que faz com que ocorra uma limitação de banda para os usuários. Outra limitação se dá em distância da rede devido à divisão do sinal óptico pelos *splitters* e pela distância lógica da rede devido às janelas temporais de transmissão dos sinais dos usuários para a central [11]. Na próxima seção será apresentada uma forma de ampliação da faixa dinâmica das atuais redes do tipo PON, solução esta conhecida como *Extended PON*.

Uma rede do tipo PON (G-PON ou GE-PON) conforme previamente descrito é composta pelo terminal da estação central (OLT) que é conectado com várias unidades ópticas

de distribuição (ONUs) por uma rede de óptica de distribuição (ODN) que consiste de fibras ópticas e acopladores de distribuição ou splitters.

A ODN é totalmente passiva. A operação por uma única fibra óptica é possível através do uso de multiplexação em comprimento de onda (WDM). O sinal *upstream*, ou seja, do usuário para a central é feita na região espectral de 1300 nm (1260 a 1360 nm) e o sinal *downstream*, ou seja, da central para os usuários é feita na região espectral de 1490 nm (1480 a 1500 nm). Transmissão de vídeo poder ocorrer também na região espectral de 1550 nm (1530 a 1560 nm). A largura de banda é dividida entre os assinantes da rede usando multiplexação por divisão de temporalque garante um pedaço no quadro de transmissão para cada usuário.

O protocolo G-PON suporta uma distância máxima lógica de 60 km e uma máxima divisão de sinal de 128 vezes. Na pratica muitos sistemas comerciais se adequam a especificação classe B previstas nas práticas G.694 que permitem uma faixa dinâmica de 28 dB e divisão do sinal de até 32 vezes e um comprimento lógico de 20 km [6]. De forma similar às normas para as redes GE-PON especificam distâncias máximas de 10 ou 20 km, No cálculo da distância a ser atingida, as perdas totais devido ao splitters e fibra devem estar dentro da faixa dinâmica permitida, considerando as perdas de fibras e splitters reais instaladas em campo.

Para aumentar a distância ou as divisões de uma rede PON de forma que a distância física e as divisões da rede possam aumentar até o limite da distância lógica suportada pelo protocolo PON pesquisa-se atualmente o conceito de um extensor de rede. Entretanto a opção de instalar um extensor/repetidor de rede, conforme Figura 2.19origina uma série de benefícios e exigências, entre elas podemos citar [70]:

1 - Frequentemente novas instalações de rede de usuários por fibra óptica podem se localizar muito longe das centrais e potencialmente além da distância máxima permitida pelas redes PON. Nestas situações uma opção é construir uma nova central nas imediações das novas instalações ou alternativamente instalar o equipamento OLT da central em um armário de rua. Claramente existe um custo de capital e operacional associado com a construção de uma nova central e também não é atrativo instalar uma OLT em um armário de rua. Uma alternativa, portanto, seria o uso de um extensor para PON para ser instalado em um armário de rua. O extensor deverá ser compacto, de baixo consumo, com custo atrativo e deverá requerer atributos de gerência simplificados. O extensor para PON deverá operar

somente na camada física, ou seja, deverá ser transparente à taxa de transmissão e aos diversos protocolos.

2 – Um extensor de PON deverá permitir a consolidação dos nós da rede pela localização das OLTs em um número reduzido de centrais de maior porte. Um extensor para PON, portanto deverá ser instalado nas estações de menor porte restantes. Imediatamente isto simplifica a operação da rede uma vez que extensor deverá ter atributos de gerência simplificados. Para um longo prazo existe uma oportunidade em potencial de eliminar as estações de menor porte conjuntamente, quando todos os equipamentos legados forem retirados. Neste caso o extensor para PON poderá ser instalado em um pequeno armário fora da central. A simplificação da rede deste tipo é importante para reduzir custo fim-a-fim em um ambiente onde o retorno incremental devido ao aumento da taxa de transmissão não é grande.

3 – Um extensor para PON deverá evitar a necessidade de redes *backhaul* separadas ou equipamento de transmissão metropolitano para conectar a OLT em uma estação central de pequeno porte com equipamentos de roteamento de estações centrais de grande porte. As redes PON estendidas possibilitam a combinação de redes de acesso, *backhaul* e metropolitanas em um único sistema. Este benefício é dependente de uma específica arquitetura de rede. *Backhaul* é a porção de uma rede hierárquica de telecomunicações responsável por fazer a ligação entre o núcleo da rede, ou backbone, com as sub-redes periféricas.

4 – Um extensor de rede PON deverá propiciar às empresas de telecomunicações mais flexibilidade nas implantações de redes PON. Em uma instalação de rede PON longa as perdas de potência podem não permitir instalar a máxima capacidade de divisão por *splitter* como poderia ocorrer em uma rede PON curta. Pelo uso do extensor de PON têm-se mais possibilidades de entregar a mesma divisão independente da geografia.

5 – Em áreas de rurais ou pouco assistidas, um extensor de PON deverá ser usado para melhorar a utilização da rede PON. Isto pode ocorrer pela partilha da fibra alimentadora e equipamento OLT. Isto significa, entretanto que a ODN será ativa e baseada em instalação de armários de rua em alguns braços da ODN para estender a distância da rede PON para usuários distantes. A fibra principal é a parte da rede PON que leva o sinal da OLT até os *splitters*, onde ocorre a divisão do sinal.

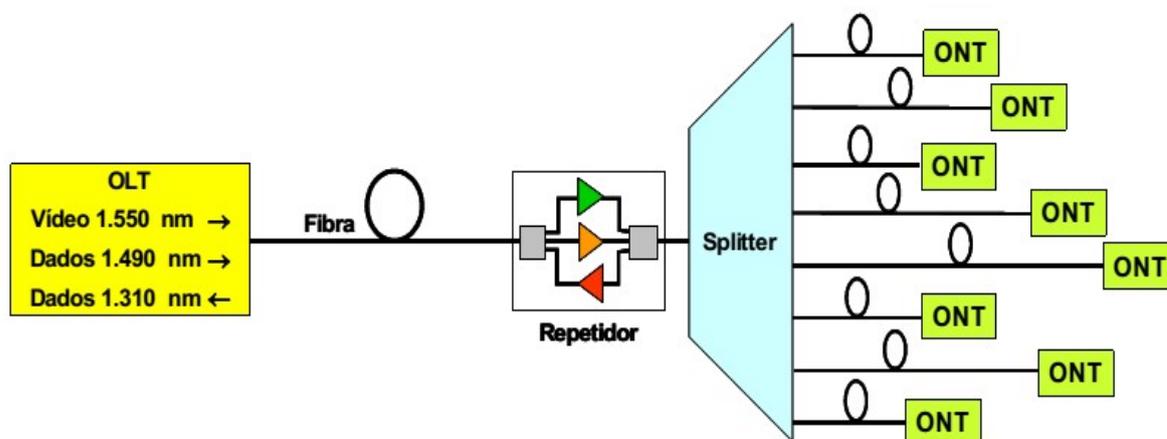


Figura 2.19 - Extensão rede GPON

Uma outra opção tecnológica para redes PON extendidas é através do uso de regeneradores eletrônicos. Os regeneradores do tipo optoeletrônicos são um dos tipos de extensores possíveis para serem usados em aplicação em redes ópticas. Para uso desta alternativa o extensor deve estar preparado para sinais do tipo rajada (sentido *upstream*). Os regeneradores também são conhecidos como repetidores, eles podem ser do tipo 3R (Reamplificação (*Re-amplifying*) e Reformatação (*Re-shaping*) + Ressincronização (*Re-timing*)) e 2R (Reamplificação (*Re-amplifying*) e Reformatação (*Re-shaping*)), os quais possuem conversão óptica – elétrica – óptica (O-E-O) e os 1R que são puramente ópticos e são conhecidos como amplificadores ópticos.

A inserção de repetidores ao longo do caminho óptico transforma a rede óptica passiva em rede óptica ativa, uma vez que seus componentes, fotodetectores, circuitos de recuperação e lasers, necessitam de alimentação elétrica [14]. Os repetidores do tipo 3R (Reamplificação, Reformatação, Ressincronização), tem a função de recuperação de sincronismo e formato dos bits, além da reemissão, a partir de uma fonte óptica. Estes repetidores devem apresentar custo atrativo, baixo consumo de potência e empacotamento mecânico mais simples do que os repetidores utilizados nos terminais do OLT, entretanto, tais requisitos acabam por inviabilizar o seu uso na rede. Uma vez que o requisito empacotamento mecânico pode constituir um desafio, dado que um extensor para GPON contém muitos dos componentes utilizados nos terminais do OLT, apresentando um custo elevado. Um segundo requisito importante, é que os extensores (repetidores) para PON devem atender a questão de transparência das informações, não interferindo ou distorcendo as informações e as diversas taxas de transmissão que trafegam na rede.

Além dos regeneradores 3R, existem também os repetidores 2R, que realizam a reformatação e reamplificação do sinal recebido, sendo, portanto, mais simples que os regeneradores 3R. Esta maior simplicidade do repetidor 2R faz com que ele se torne um dispositivo de menor custo que o repetidor 3R, implicando numa redução de custos quando introduzidos na rede. No entanto, os conversores O-E-O apresentam algumas limitações uma vez que são desenvolvidos para operação em taxas de transmissão e formatos de modulação específicos [15].

Algumas pesquisas com extensores, do tipo repetidor eletrônico, para GPON são encontradas nas referências [28]-[43] que demonstram as aplicações e uso dos extensores. Um benefício do uso deste tipo de extensor GPON é permitir uma eventual conversão de comprimentos de onda diretamente no repetidor, resultando em melhor utilização da fibra. Usando essa técnica, um extensor repetidor para GPON bidirecional foi demonstrado em [28].

Amplificadores a fibra dopada por érbio (EDFAs) são largamente empregados na planta óptica de longa distância e metropolitana. Nas redes GPON padronizadas, os comprimentos de onda centrais *upstream* e *downstream* são respectivamente 1310 e 1490nm, enquanto, os EDFAs são tradicionalmente projetados para as bandas C e L (1530-1565 nm e 1565 - 1610nm). Entretanto, estes podem ser usados em comprimentos de onda mais baixos, tais como a banda S (1480 a 1520nm) [45][46]. O uso de EDFAs como extensores para GPON foi apresentado em [46]. Uma característica interessante dos EDFAs em redes PON é a possibilidade de serem utilizados como um amplificador alimentado remotamente por fibra [47]. Nesse caso, o extensor para GPON mantém a característica totalmente passiva das redes GPON, entretanto o amplificador EDFA não podem ser usado em 1310 nm.

A arquitetura de rede com amplificador remoto, em [47], apresenta dois estágios de amplificação: um no OLT, com um EDFA; e outro remoto, que é constituído de uma fibra dopada com érbio (EDF), bombeada remotamente por um laser de 1480nm, localizado no OLT. A potência de saída do laser é de 200 mW. O comprimento de fibra até a EDF é 20 km. Através de simulação por computador é mostrado que quando o amplificador remoto é adicionado, há um acréscimo de 14 dB no orçamento de potência do enlace em relação a uma rede GPON convencional. Isso significa, por exemplo, a possibilidade de troca de um splitter de 64 divisões para um de 1024 divisões, mantendo uma margem de segurança de 4,8 dB. No entanto os extensores GPON, do tipo amplificadores ópticos, devem ter suas bandas de amplificação compatíveis com os comprimentos de onda de operação já padronizados.

Outros tipos de amplificadores a fibra apresentam banda de amplificação compatível com os comprimentos de onda da rede GPON. Por exemplo, os amplificadores a fibra dopada por praseodímio (PDFA) podem ser usados para a banda de 1300 nm como um extensor para o sinal *upstream* [46] e os amplificadores a fibra dopada por túlio (TDFA) [47] podem ser usados como extensor para GPON, para o sinal *downstream* (1490 nm).

Os amplificadores ópticos devem amplificar adequadamente os sinais do tipo *rajada*, originados das ONTs (sinal *upstream*), sem distorção. Para isso, o amplificador óptico necessita de controle de ganho para suprimir a geração de transientes ópticos, devido à rajada presente na sua entrada. Os dois métodos mais usados para controle do ganho do amplificador são: o controle automático de ganho (*Automatic Gain Control* – AGC), e o controle do ganho ajustável. A técnica AGC utiliza realimentação para controlar o ganho na saída do amplificador de modo a mantê-lo dentro de uma faixa de valores pré-determinados, para sistemas ópticos de longa distância, o tempo de resposta dessa técnica depende da dinâmica do ganho do amplificador, bem como da velocidade dos circuitos de controle, tais como: amplificadores operacionais e microcontroladores, de tal forma que sua utilização fica comprometida para sinais do tipo burst.

A técnica de ganho ajustável é independente da dinâmica do ganho e da velocidade do circuito. Em [49] amplificadores PDFA e TDFA são usados como extensores para PON com bom desempenho para sinais do tipo *burst*. O amplificador-extensor GPON utiliza o método do grampeamento, sendo dividido em duas seções de amplificação: uma consistindo em um PDFA e a outra, em um TDFA. O PDFA consiste em dois estágios de ganho: O primeiro estágio utilizou bombeamento copropagante, com grampeamento de ganho, enquanto que o segundo estágio utiliza bombeio e grampeamento de ganho contra propagante. O comprimento de onda escolhido para grampeamento é 1330nm. Um filtro óptico é utilizado para suprimir uma parcela da potência de ruído amplificado de emissão espontânea (*Amplified Spontaneous Emission* – ASE) gerada pelo amplificador, reduzindo, dessa forma, as penalidades no receptor devido ao ruído gerado pela ASE. O comprimento de onda de 3 nm de largura de banda do filtro foram fixados em 1310 nm, respectivamente. O uso do filtro compromete a largura de banda total usada no sinal *upstream* das redes GPON, que é de 1310 nm \pm 50 nm. Nesse experimento, todas as potências de bombeio são ajustadas para 300 mW.

Outro repetidor que pode ser usado como extensor para GPON é baseado em amplificadores ópticos semicondutores (*Semiconductors Optical Amplifier* – SOA) [49] a

[52]. Esses dispositivos são construídos através de processo similar ao utilizado para construir lasers, onde, a principal diferença é que os espelhos das faces do SOA são camadas antirreflexivas, para permitir uma grande inversão de população com intuito de conseguir um ganho alto.

Os SOAs são dispositivos que vêm sendo desenvolvidos desde a década de 80 e, devido à existência de vários fornecedores, espera-se que o custo de tais dispositivos diminua o suficiente para a utilização em redes de acesso. As ligas de materiais da região ativa dos SOAs, que são do tipo $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}/\text{InP}$, podem ser escolhidas de tal forma que eles operem dentro da região entre 1200 e 1700nm.

Os SOAs possuem ganho de pequeno de sinal, da ordem de 20dB; potência de saturação acima de 10 dBm; e figura de ruído inferior a 7dB. Assim estes amplificadores devem amplificar adequadamente os sinais do tipo burst originados das ONTs (sinal *upstream*). Em [49], um sistema GPON operando em 1.25GB/s, os transientes são evitados se o SOA operar em seu regime linear. Também em [49], é descrita um esquema da British Telecom com rede GPON estendida usando SOAs tanto para o sinal *downstream* como para o *upstream*.

Existem ainda extensores GPON que utilizam tecnologias de amplificação híbridas, tais como, amplificação Raman, conjugada com a de SOAs[53]. Estes extensores permitem serviços da rede GPON em 1310 e 1490 nm e mais três sinais de vídeo em 1510, 1530 e 1550 nm, sobre 60 km de distância de enlace e 64 divisões de potência pelo splitter. Extensor híbrido SOA-Raman, com 75 nm de largura de banda na janela de 1550 nm, e um SOA convencional, operando em 1300 nm. O SOA opera com corrente de 250 mA e a potência do laser de bombeio do amplificador Raman discreto opera no comprimento de onda de 1455 nm, com 400 mW. O amplificador Raman discreto e a fibra utilizada têm as seguintes características: comprimento de onda de 1550 nm, com comprimento de 4.5 km, área ativa de $18,7\mu\text{m}^2$, atenuação de 0,32 dB/km, dispersão de -20 ps/nm/km e coeficiente de ganho Raman de $2.5\text{W}^{-1}/\text{km}$.

2.7 Amplificadores ópticos

Os amplificadores ópticos revolucionaram os sistemas de transmissão óptica e contribuem imensamente para a expansão das redes de telecomunicações em todo o mundo. A evolução da tecnologia dos amplificadores aumentou dramaticamente a capacidade dos

sistemas ponto-a-ponto implementados com transmissão via DWDM, como também, possibilitou a evolução das interfaces ópticas e conseqüentemente, promoveu uma reconstrução em nível fundamental das redes de comunicação ópticas numa escala internacional.

À medida que os sistemas a fibra evoluem para um número cada vez maior de canais e taxas de transmissão por canal, como por exemplo: 10 Gb/s, 40 Gb/s, 100 Gb/s, e recentemente 400 Gb/s, além de enlaces mais longos, os amplificadores ópticos evoluem para prover bandas mais largas, com figuras de ruído mais baixas e melhor controle das características espectrais de seu ganho. Os amplificadores ópticos, conhecidos como 1R, operam somente no domínio óptico sem que haja a necessidade de conversões Óptica – Elétrica – Óptica, são transparentes às taxas de transmissão e ao formato da modulação, sendo geralmente utilizados em situações em que a distância entre repetidores é limitada pela atenuação. A amplificação óptica é baseada no processo de emissão estimulada, como mostra Figura 2.20, entre dois níveis de energia (E_1 e E_2) que mantêm inversão de população.

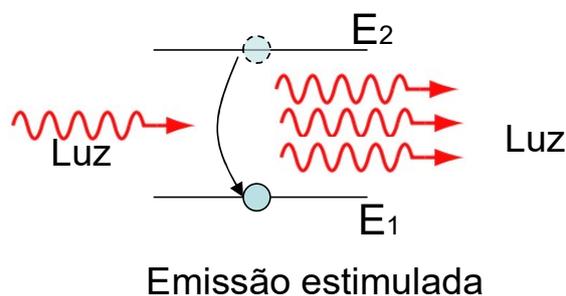


Figura 2.20–Exemplo de como ocorre a emissão estimulada

Nesse processo, novos fótons são gerados com mesma energia, fase, direção e polarização dos fótons incidentes na entrada do dispositivo. O ganho óptico depende do comprimento de onda do sinal incidente, além das intensidades do sinal e do bombeamento, comprimento de onda do bombeamento, além de outros parâmetros.

Existem dois grandes grupos de amplificadores ópticos: os amplificadores à fibra que são aqueles que utilizam propriedades próprias da fibra e/ou a ação de dopantes para a geração de ganho e os amplificadores ópticos a semicondutor que baseiam o fornecimento de ganho no mecanismo de geração de luz em semicondutores.

Dentre os vários tipos de amplificadores ópticos destacamos de forma breve os amplificadores ópticos mais amplamente utilizados:

- Amplificadores ópticos a fibra dopada com Érbio (*Erbium Doped Fiber Amplifiers*- EDFA): tem uma banda de emissão que vai da faixa de 1530 a 1560 nm, a chamada banda C e, entre 1565 nm – 1625 nm que é a chamada banda L. São utilizados em redes metropolitanas e de longa distância;
- Amplificadores ópticos de semicondutor (*Semiconductor Optical Amplifiers* - SOA): Construído a partir material semicondutor, possui estrutura semelhante à de um laser semicondutor. A amplificação ocorre devido à heterojunção de material semicondutor, tem como característica operar em modo rajada;
- Amplificadores Raman a fibra (*Fiber Raman Amplifiers*– FRA): O fenômeno da amplificação por efeito Raman ocorre, quando os fótons, provenientes de uma fonte de bombeio, que possuem níveis elevados de energia, interagem com as vibrações dos átomos da fibra óptica, e ao encontrar com os fótons do sinal óptico que se propagam na fibra, estes são estimulados e, o seu nível de energia é aumentado. Este tipo de amplificador é amplamente utilizado em comunicação óptica de grande capacidade e longa distância, e podem ser combinados com amplificadores ópticos dopada com Érbio em aplicações de alta velocidade.
- Amplificadores ópticos paramétricos (*Optical Parametric Amplifiers* – OPA): são dispositivos baseados em efeitos não lineares conhecidos como mistura de quatro ondas (*Four Wave Mixin*–FWM). Com estes, é possível a geração de frequências mais altas através da geração de fótons anti-Stokes, ou de frequências mais baixas através da geração de fótons Stokes.
- Amplificadores ópticos a fibra dopada com Praseodímio (*Praseodimium Doped Fiber Amplifiers* – PDFA): Apresenta ganho na faixa de 1300 nm, entretanto, a eficiência é baixa.
- Amplificadores ópticos a fibra dopada com Neodímio (*Neodimium Doped Fiber Amplifiers* – NDFA): como o praseodímio este amplificador também apresenta ganho na faixa de 1300 nm.
- Amplificadores ópticos a fibras dopadas com Túlio (*Thulium Doped Fiber Amplifiers* - TDFA): são utilizados na faixa de 1480 nm, chamada de banda S.

Os amplificadores ópticos foram e continuaram sendo fundamentais para o desenvolvimento das comunicações ópticas. Recentemente, os sistemas WDM alcançaram a área metropolitana da planta de telecomunicações, com paradigmas e requisitos diferentes dos sistemas de longa distância. Em função destes novos desafios, desenvolver soluções que atendam usuários de forma massiva e com qualidade estão sendo propostas, conforme apresentaremos na seção 2.6.

Neste sentido, com a chegada da rede GPON, XG-PON e sua limitação quanto ao alcance de 20 km dar-se-á destaque na próxima seção ao amplificador SOA. Dado o fato de este pode operar na banda de 1300 nm ou em 1550 nm apresenta solução atraente para rede óptica de acesso[11][12]. Este amplificador é o foco do trabalho, quanto da proposta de extensão da rede óptica de acesso.

2.8 Amplificadores ópticos a semicondutor - SOA

Todos os tipos de amplificadores apresentados de forma breve na seção anterior, são capazes de compensar a atenuação da fibra sobre grandes distâncias. No entanto, os amplificadores ópticos a semicondutor conhecidos como SOAs, possuem um atrativo a mais, pois, apresentam potencial para aplicações diversas à amplificação devido às não linearidades inerentes ao dispositivo. Outra vantagem dos SOAs, deve-se ao fato de serem compactos, conforme observamos na Figura 2.21, e permitirem a integração com outros componentes opto-eletrônicos.

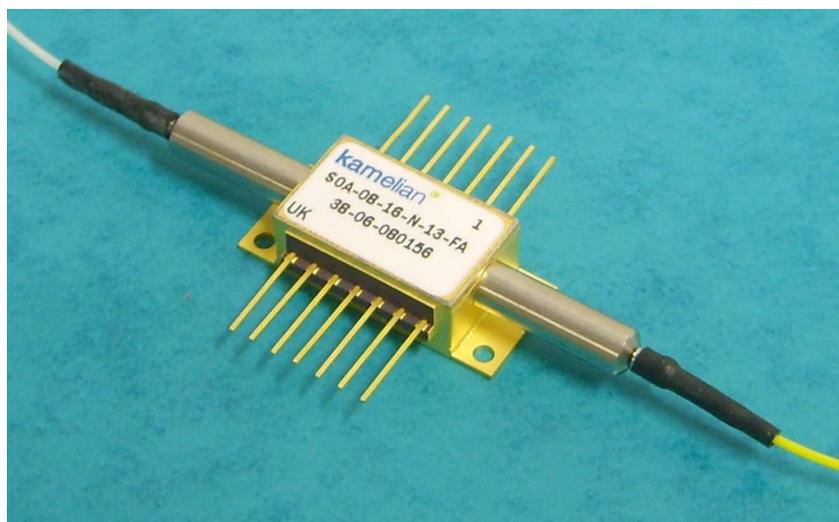


Figura 2.21 – Amplificador óptico SOA 1300 nm da Kamelian®

Todos estes fatores motivam os pesquisadores a utilizarem, cada vez mais, os SOAs em diferentes aplicações para sistemas e redes de comunicações ópticas. Dentre as diversas aplicações utilizando SOAs, podemos citar a sua utilização como conversor de comprimento de onda totalmente óptico. Neste sentido, os dados carregados por um canal em um dado comprimento de onda na entrada do SOA são convertidos para outro comprimento de onda na saída do dispositivo. A capacidade de conversão de comprimento de onda, em nós de uma rede óptica, torna esta rede capaz de operar roteamento tornando-a reconfigurável. A utilização do SOA como conversor de comprimento de onda possibilita a redução da taxa de bloqueio nos nós ópticos de redes que utilizam o sistema de multiplexação por WDM, e conseqüentemente possibilita o aumento da flexibilidade para configurar um caminho de luz através de uma rede com diferentes operadores tornando a interconexão de equipamentos mais simples.

Outro exemplo de aplicação usando SOAs pode ser observado em redes ópticas de altas capacidades de transmissão, onde o SOA pode ser empregado como chave óptica, pois, suas características de ganho e de absorção de luz obtidas pela aplicação de corrente elétrica ao dispositivo, possibilita que um comprimento de onda, ao passar por um nó, possa ser amplificado ou bloqueado. Além disso, se os SOAs forem dispostos de forma adequada funcionam como chaves com várias entradas e saídas evitando assim a necessidade de conversão do comprimento de onda para o domínio eletrônico para um posterior roteamento.

Os SOAs são dispositivos cujas estruturas são derivadas de diodos lasers semicondutores e, portanto, o seu ganho é obtido por meio das transições radiativas entre suas bandas de energia, denominadas banda de condução e de valência [63][64]. A diferença entre as energias destas duas bandas é denominada de energia de banda proibida conhecida como bandgap.

Os primeiros SOAs foram fabricados com homojunções de GaAs como material amplificador, não obtendo sucesso devido a alta corrente de polarização, baixa temperatura de operação e dificuldades em se obter um sinal contínuo. Com os avanços das pesquisas foi possível obter a recombinação de portadores e, portanto, a corrente de polarização, pode ser reduzida pela inserção de barreiras de potencial ao redor da região ativa, e assim foi possível o desenvolvimento de SOAs eficientes. Essa estrutura de barreiras conhecida como heterojunção envolve duas barreiras de potencial denominadas heteroestruturas duplas, conforme mostra a Figura 2.22, cada uma de um lado p e n. A infraestrutura de barreiras

restringe a recombinação excessiva de portadoras, e permite que o sinal óptico seja guiado através da região ativa, melhorando a uniformidade do ganho ao longo da direção longitudinal. Assim o SOA pode ser usado como uma fonte de sinal contínuo sob temperaturas ambientes [71].

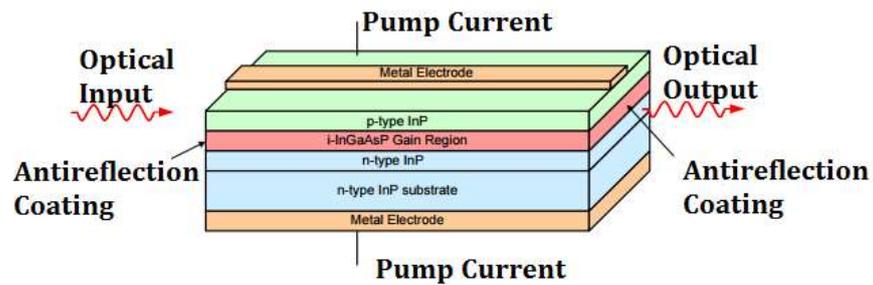


Figura 2.22 – Heteroestruturas duplas de um amplificador SOA [71].

De acordo com [64], para um amplificador semiconductor, considerando um sistema simples de dois níveis de energia, podem ocorrer três processos de transição entre as bandas que são:

- Absorção: A absorção ocorre quando o fóton incidente na região ativa é absorvido por um elétron da banda de valência, o qual passa para a banda de condução. Esse processo ocorre somente se o fóton incidente possuir energia igual ou superior à energia de bandgap;
- Emissão espontânea: elétrons da banda de condução se recombinam com lacunas da banda de valência, dando origem a fótons de direção e fase aleatórias. Esses fótons percorrem a cavidade e geram um ruído, chamado de ruído de emissão espontânea amplificada (*Amplified Spontaneous Emission – ASE*), o qual é adicionado ao sinal na passagem pelo amplificador;
- Emissão estimulada: a presença de fótons próximos a elétrons excitados da banda de condução estimulam a recombinação destes elétrons com lacunas da banda de valência. Como resultado, os fótons gerados por este processo possuem mesma fase, direção e polarização que os fótons que estimularam os decaimentos. São as emissões estimuladas por fótons do sinal ao longo do dispositivo que resultam na amplificação na saída do SOA [64].

A emissão de luz espontânea e estimulada em SOAs está diretamente relacionada ao bombeio elétrico de portadores por meio da corrente de polarização do dispositivo, conforme a corrente injetada aumenta, o fenômeno de emissão cresce, e conseqüentemente chega-se a uma condição onde a potência óptica do sinal em amplificação alcança amplitude suficiente para compensar, na saída do amplificador SOA, a soma da absorção com as perdas intrínsecas do dispositivo. Neste caso, o SOA tem comportamento de um amplificador de ganho unitário. Com o aumento da corrente injetada a partir deste ponto a emissão estimulada sobrepõe os efeitos de absorção e perdas intrínsecas, e assim têm-se a condição de inversão de população no dispositivo, de maneira que o SOA passa a apresentar ganho crescente.

Quanto à estrutura do SOA, pode-se generalizá-la por uma região ativa que consiste da junção semicondutora pn, limitada por duas faces reflexivas, uma de entrada e outra de saída, e conseqüentemente, podem-se classificar os SOAs em duas amplascategorias que são Fabry-Perot (FP-SOA) e Onda caminhante (*Traveling-Wave* – TW-SOA).

Fabry-Perot (FP-SOA): A clivagem da estrutura do SOA em 90° em relação ao eixo de propagação da luz na região ativa forma duas faces que apresentam refletividade ($\sim 32\%$). Numa primeira aproximação, o comportamento dos FP-SOAs se aproxima de lasers semicondutores do tipo Fabry-Perot. No laser, os espelhos que limitam a região ativa criam uma condição de ressonância na cavidade. O SOA apresenta um alto ganho quando o comprimento de onda do sinal de entrada está sintonizado ao comprimento de onda de transmissão de pico da cavidade ressonante. É como se a amplificação ocorresse devido ao travamento do SOA em relação ao sinal de entrada. Contudo, o ganho do amplificador é extremamente sensível aos parâmetros estruturais e operacionais, como a polarização da luz. Além disto, como o alto ganho é obtido pelas sucessivas passagens do sinal pela cavidade devido às reflexões nas faces, os FP-SOAs, como mostra Figura 2.23, saturam para potências de entrada relativamente baixas.

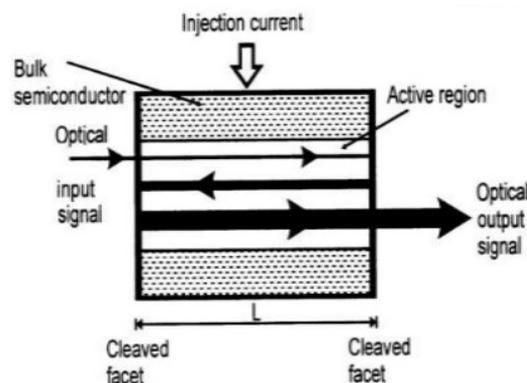


Figura 2.23 – Amplificador SOA do tipo FabryPerot (FP- SOA)[71].

Devido à cavidade ressonante dos FP-SOAs, o espectro de ganho do amplificador é estreito em relação ao que se espera para um amplificador óptico. Por outro lado, esta característica de largura de banda estreita pode ser utilizada na concepção de filtros ópticos ativos e no chaveamento ou regeneração não linear [64].

Onda caminhante (*Traveling-Wave* – TW-SOA): aplicação de camadas antirefletoras, tais como, facetas enterradas ou o corte do material em ângulos diferentes de 90° , diminuem consideravelmente as reflexões das faces do dispositivo, que definem a característica principal dos TW-SOAs. Os TW-SOAs são mais apropriados para aplicações sistêmicas. Seu ganho é mais estável que os FP-SOAs e a amplificação aparece pela ocorrência de emissões estimuladas durante uma única passagem do sinal pela cavidade do dispositivo, devido à redução a quase zero das reflexões nas faces. Também por esta razão, os TW-SOAs tem uma largura de banda bem superior à dos FP-SOAs, aproximando-se do espectro de ganho do meio semiconductor. A redução da refletividade das faces do TW-SOA pode ser obtida utilizando-se um material dielétrico de cobertura antireflectora. Por este processo, as refletividades podem ser reduzidas à ordem de 0,1%. No entanto, com o material dielétrico, as refletividades residuais se tornam diferentes para diferentes comprimentos de onda dos sinais de entrada, resultando numa diferença de ganho de sinal para diferentes comprimentos de onda. A fim de superar este problema, outras técnicas são utilizadas para a redução das refletividades das faces, tais como a estrutura de faceta enterrada (*buried-facet structure*), que também reduz a dependência do dispositivo com a polarização da luz, e a estrutura de faceta angulada (*angled facet structure*) [63][64], apresentadas na Figura 2.24.

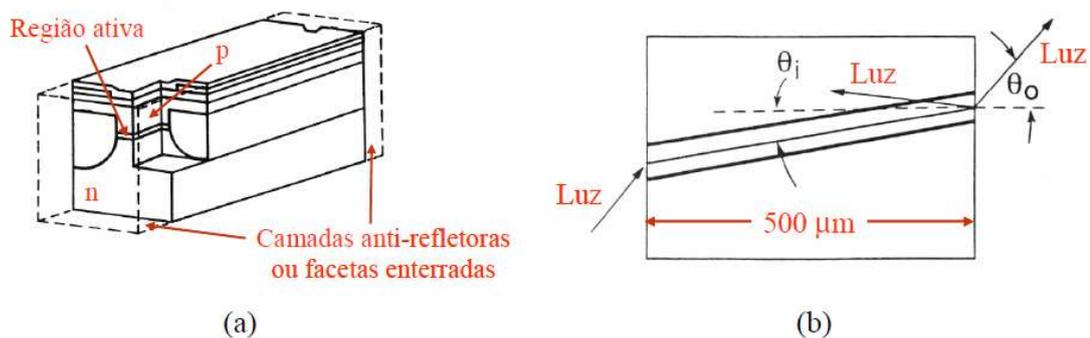


Figura 2.24 – Estruturas TW-SOA (a) simples e (b) face angulada [64].

Como comentado, a versatilidade do SOA em diversas aplicações, torna o uso deste dispositivo interessante para os sistemas ópticos atuais e futuros. Com a motivação de utilizar tal dispositivo em rede de acesso óptico, será apresentado, neste trabalho, um estudo, onde, será analisada a sua capacidade de amplificação aplicada a múltiplos canais. Além disso será estudada a alimentação do SOA a partir de uma fonte de luz óptica através da técnica conhecida como *Power over Fiber* – PoF [65].

Por apresentar uma largura de banda óptica tipicamente de 50nm [66], os SOAs podem ser utilizados como amplificadores multicanais, pois são capazes de amplificar mais de um canal simultaneamente. No entanto, é necessário que as potências dos canais amplificados sejam baixas o suficiente para que o dispositivo opere em regime linear [67]. Caso contrário, ocorre diafonia entre os canais, isto é, um sinal em um dado comprimento de onda interfere na amplificação do sinal com comprimento adjacente [68]. Este efeito é denominado modulação de ganho cruzado [68], e está relacionado a disputa de amplificação pelos diversos comprimentos de onda.

Outra vantagem com o uso do SOA em redes ópticas de acesso deve-se ao tempo de resposta dos SOAs da ordem de centenas de picossegundos [69]. Tal característica é extremamente importante para a amplificação do tráfego de informação no sentido *upstream* em redes PON [32][36][38], já que o fluxo de informação ocorre no modo rajada e o amplificador deve ser rápido o suficiente para amplificar os pulsos de informação que chegam à porta de entrada, provenientes de ONUs localizadas a distâncias distintas. O modo rajadas ou modo '*burst*', consiste na transmissão de um conjunto de bits de uma determinada ONU. A OLT atribui para cada ONU um tempo de burst, que é o tempo que a ONU tem para enviar dados; entre o tempo de burst destinado a cada ONU, deve haver um intervalo de guarda para garantir que as informações enviadas por duas ONUs consecutivas não colidam. Tal intervalo de guarda varia de acordo com a diferença entre as distâncias da OLT para cada ONU consecutiva. Portanto, é preciso controlar os diferentes níveis de amplitude do sinal, já que as ONUs estão localizadas em distâncias diferentes do OLT.

2.9 Conclusões

Neste capítulo foram apresentadas as principais tecnologias PON existentes em processo de padronização e tendências de futuro, também foram apresentadas às principais topologias que podem ser aplicadas as diferentes arquiteturas de redes PON, além de uma

visão geral dos principais amplificadores ópticos e os diversos tipos de extensores ópticos mais utilizados na rede de acesso abordando as principais características de cada tecnologia. Comentou-se também a importância do FSN no processo de padronização da rede óptica de acesso, tendo como foco delinear e determinar as características das NG-PON de forma a permitir a coexistência com as redes existentes.

CAPITULO 3

3 Transmissão WDM por sobreposição em redes GPON

3.1 Introdução

Como mencionado nos capítulos 1 e 2, a evolução das redes de acesso é um processo tecnológico natural, e pode ser observado na literatura especializada [29]-[41]. O aumento da capacidade de transmissão de 2.5 Gb/s para 4 x 2.5 Gbit/s, de uma rede PON, e a utilização de espaçamentos entre comprimentos de ondas mais estreitos como DWDM [37] são exemplos dessa evolução. Há estudos propostos ao ITU-T para implementar o conceito de empilhamento da rede PON utilizando a técnica de multiplexação conhecida como CWDM-PON [41] ou *Stacked - PON*. A técnica CWDM-PON, consiste na transmissão de comprimentos de ondas independentes e diferentes dos comprimentos de onda adotados pelos sistemas GPON atuais, mas que compartilham a mesma infraestrutura de rede já existente, está técnica também é conhecida como *Colored - PON* [39][40]. A Figura 3.1 apresenta uma topologia genérica de rede PON com CWDM, neste esquema pode-se notar a sobreposição de comprimentos de ondas através de uma única fibra compartilhada para atender diferentes ODNs. Cada conjunto de OLT e ONTs trabalha em comprimentos de ondas específicos e como consequência operaria de forma independente compartilhando a mesma infraestrutura de fibras ópticas instaladas.

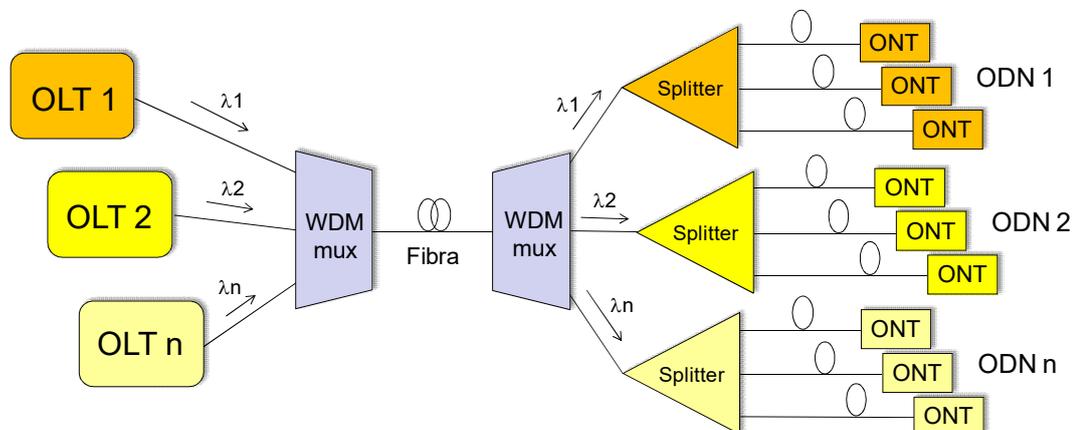


Figura 3.1- Exemplo de um diagrama genérico para uma sobreposição de PON por CWDM.

Existem também trabalhos sobre a sobreposição da rede utilizando a técnica CWDM-PON para aumentar a distância da rede de distribuição óptica (ODN), alimentados por uma única fibra [32]-[40][72][73]. Isto aumenta a capacidade de transmissão da rede em até quatro vezes no sentido *downstream* mantendo a taxa de transmissão original da tecnologia GPON, no sentido *upstream* em 1,25 Gb/s. Neste sistema, o terminal de linha óptica (OLT) é substituído por OLTs coloridos, mantendo os terminais de rede óptica (ONT) inalterados. Por OLTs coloridas entendem-se três novas OLT com comprimentos de onda de 1430 nm, 1450 nm e 1470 nm, além do comprimento de ondado padrão GPON de 1490 nm, no canal de *downstream* para enviar sinais para as ONTs.

Em [32] é proposto e demonstrado o compartilhamento de comprimento de ondas em uma rede PON, com o intuito de aumentar a capacidade de transmissão e reutilização da infraestrutura instalada. Essa proposta é um meio termo entre a tecnologia utiliza atualmente e os sistemas WDM-PON.

A arquitetura é híbrida em dois aspectos fundamentais. No primeiro, o sistema emprega métodos distintos e independentes de transmissão WDM para sentido *downstream* e *upstream*. O segundo aspecto refere-se a compartilhamento de comprimentos de onda WDM por vários usuários usando a técnica de acesso múltiplo por divisão de tempo (*Time Division Multiple Access* – TDMA). A Figura 3.2 apresenta uma visão geral da proposta [32], onde, quatro OLTs geram quatro comprimentos de onda que atendem quatro conjuntos de 32 ONUs ou assinantes aumentando assim a capacidade do sistema para 4 x 2.5 Gbit/s sentido *downstream* ou a capacidade de recepção do usuário de 78 Mbits/s para 312 Mbits/s.

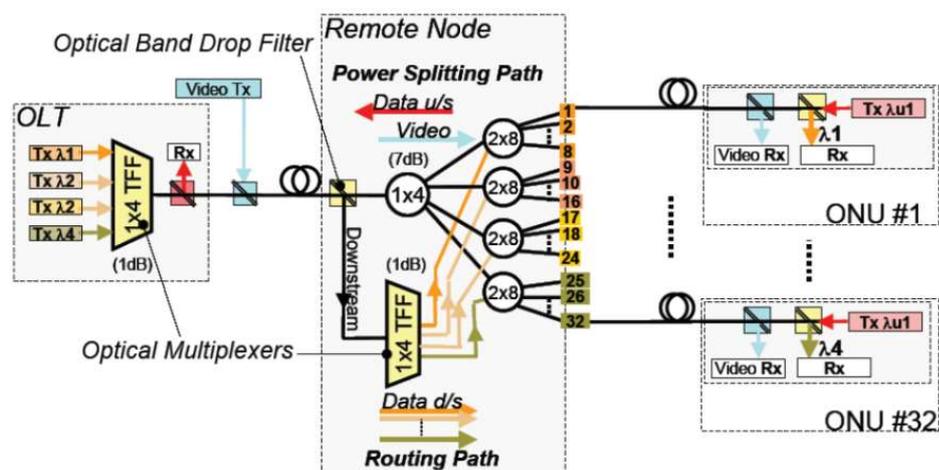


Figura 3.2 - Um exemplo de uma TDM - PON com 32 assinantes[32].

Em [32] os sinais provenientes da OLT são multiplexados e seguem por uma única fibra óptica no sentido *downstream* e chegam a um nó remoto de distribuição (*Remote Node* – RN). Os sinais no RN são separados através de um demultiplexador óptico e distribuídos para os quatro conjuntos com 32 ONUs. Os sinais em direção ao OLT, sentido *upstream*, chegam ao mesmo RN e são encaminhados para o receptor do OLT. Neste exemplo, existem apenas oito usuários por comprimento de onda *downstream* em comparação com 32 usuários por comprimento de onda do sistema GPON tradicional antes do upgrade. No sentido de *upstream*, a situação permanece a mesma situação original. Na proposta deste trabalho foram selecionados quatro comprimentos de onda sentido *downstream* pertencentes a grade do padrão CWDM, 1430 nm, 1450 nm, 1470 nm e 1490 nm.

Analisando a proposta [32] nota-se que a desvantagem da mesma se refere ao fato de utilizar comprimentos de onda fora da padronização da tecnologia GPON [6], isto implica no desenvolvimento de ONUs específicas para cada comprimento de onda não padronizado, tornando assim a proposta pouco atrativa. Em [72], os mesmos autores realizaram experimentos a partir do trabalho proposto em [32] para demonstrar a viabilidade de estender o alcance de um sistema GPON utilizando ONTs *colorless* (sem comprimento de onda definido), como mostra a Figura 3.3 (a) e Figura 3.3 (b). Na Figura 3.3(a) é mostrada a extensão da rede com sobreposição utilizando quatro comprimentos de onda CWDM entre as faixas de 1531 nm a 1611 nm operando junto com os sistemas GPON como evolução da proposta. Como mostra a Figura 3.3 (b) utilizou-se 16 comprimentos de onda de densidade média (*Medium-dense WDM* – MWDM) com canais de 100 GHz de espaçamento para atender 128 assinantes com 40 Gbps de capacidade sentido *downstream* através de uma única fibra compartilhada, entretanto é selecionado apenas um canal de *downstream* por vez para ser transmitido.

No sentido de *upstream*, é comentado pelos autores, que a proposta não é atrativa. Isso se deve ao fato das ONTs ficarem distantes entre si, já que as mesmas podem ser instaladas em qualquer ponto da rede. Outro fator negativo é a perda alta introduzida pelo uso dos multiplexadores inseridos ao longo da rede.

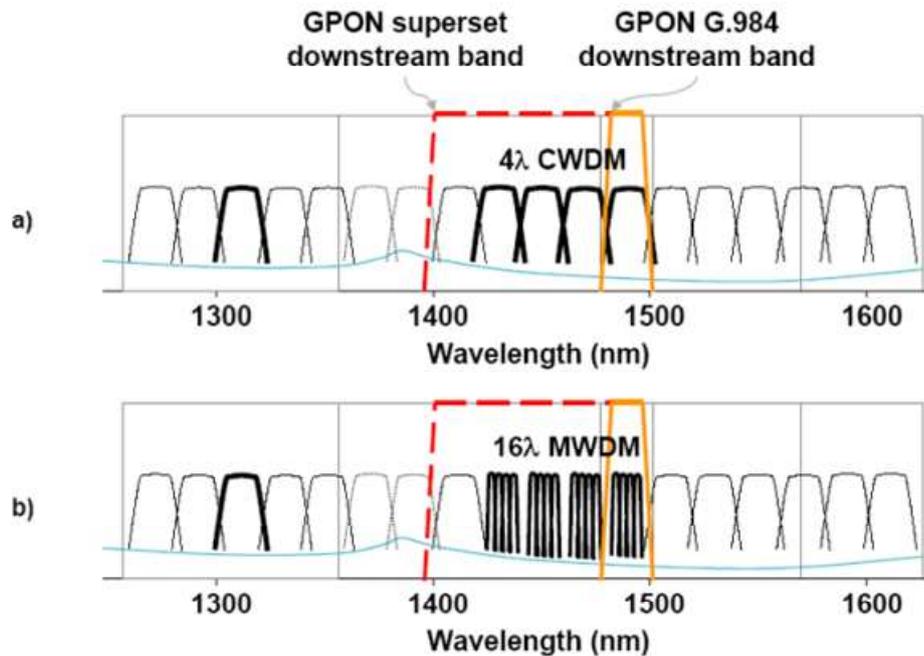


Figura 3.3- Grade de canais correspondentes as arquiteturas propostas [72]: (a) Quatro canais sentido *downstream* entre 1440 nm e 1500 nm, e em (b) Dezesesseis canais 16 DWDM sentido *downstream*.

Em [73] é apresentada uma proposta de sobreposição de cinco sinais na faixa de 1531 nm a 1611 nm operando com os sistemas G-PON. Os autores utilizam transceptores CWDM com comprimentos de onda de 1551, 1571, 1591 e 1611 nm em conjunto com os comprimentos de onda de uma OLT GPON, como mostra Figura 3.4, para transmitir as informações no sentido *downstream* por 15 km.

Os autores utilizaram transceptores do tipo laser diodo de realimentação distribuída (*Distributed Feedback Laser Diode – DFB LD*) que operam com potência de transmissão da ordem de 0 dBm e na recepção utilizaram receptores do tipo avalanche (*Avalanche Photodiode – APD*) com sensibilidade de -28 dBm, o que garantiu um orçamento de potência em torno de 28 dB. Nota-se que nenhum dos comprimentos de onda escolhidos são aderentes ao padrão GPON, o que implica no desenvolvimento de OLTs e ONTs.

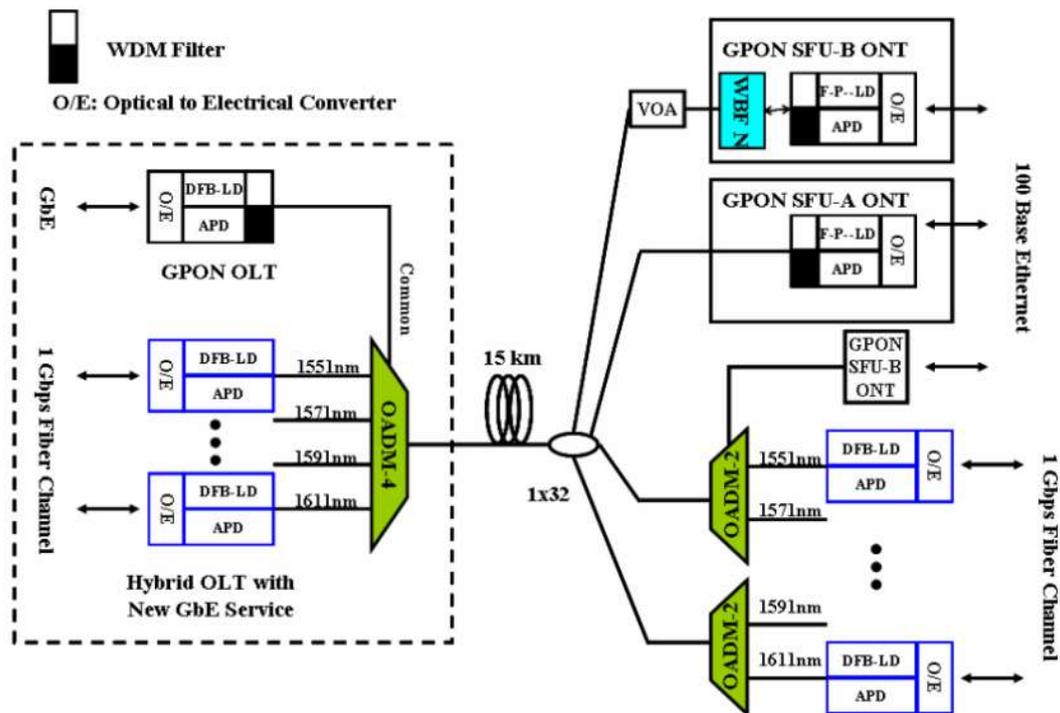


Figura 3.4 – Proposta de evolução da rede GPON[73].

Notamos que as propostas apresentadas em [32], [72] e [73] utilizam comprimentos de onda no sentido *downstream* incompatíveis com a largura de banda óptica dos transceptores das ONT, que trabalham na faixa espectral de 1480 nm a 1500 nm (banda S) de acordo com a recomendação da ITU-T G.984.2 [7]. Assim, o filtro do transceptor do ONT deve ser reprojetoado para detectar esses comprimentos de onda adicionais inseridos na rede. A aplicação destas propostas na arquitetura PON atual obrigaria a fabricação de novos transceptores ONT, o que torna sua aplicação prática pouco atrativa.

A recomendação da ITU-T G.984.2 especifica para esta aplicação comprimentos de onda de 1260 a 1360 nm *upstream* e 1480 a 1500 nm *downstream*. Esta norma também especifica o tipo de tráfego digital, a razão de divisão imposta pelos *splitters* (até 64), entre outras informações como classes de transmissão e recepção, sensibilidade e distâncias máximas. A recomendação ITU-T G.984.2 prevê uma capacidade de rede de acesso óptica flexível para suportar as necessidades de largura de banda de serviços para empresas e usuários e abrange sistemas com taxas nominais de 1244 Mbit/s, 2488 Mbit/s para sentido *downstream* e 155 Mbit/s, 622 Mbit/s, 1244 Mbit/s e 2488 Mbit/s para sentido *upstream*. A camada de convergência da transmissão (TC) e o protocolo de determinação de distâncias para os sistemas GPON são descritos em outra recomendação ITU-T. O sistema GPON

descrito na recomendação ITU-T G.984.2 é uma evolução da ITU-T G.983.1. Nesta recomendação os requisitos prévios da ITU-T G.983.1 devem permanecer na medida do possível, a fim de conseguir o máximo de compatibilidade com os sistemas existentes e a infraestrutura de fibra óptica instalada.

Como exposto, uma proposta intermediária de evolução da rede deve ser a mais assertiva possível, e deve contemplar ao máximo as recomendações da IUT [6]-[12]. Assim neste capítulo é apresentada uma proposta de utilização da técnica WDM dentro da grade de padronização da rede PON, denominada neste trabalho de “*In-band PON Overlay*”. Nesta proposta, quatro comprimentos de onda escolhidos na banda ‘S’ e espaçados de 5nm (1482, 1487, 1492 e 1497 nm) são transmitidos no sentido *downstream* para 4 diferentes ODNs e, da mesma forma, 4 comprimentos de onda da banda ‘O’, provenientes das ONTs do sentido *upstream* espaçados de 20 nm (1270, 1290, 1310 e 1330 nm), são também multiplexados nas ODNs e transmitidos para central de serviços de telecomunicações (*Central Office – CO*). Vale ressaltar que todos os comprimentos de onda escolhidos tanto no sentido *downstream* como no sentido *upstream* estão contidos dentro do espectro de transmissão da recomendação da ITUT 984.x definidas para o sentido *downstream* da banda S e para o sentido *upstream* da banda O. Esta técnica permite que a capacidade de transmissão da rede seja expandida preservando o mesmo padrão de transmissão da tecnologia GPON e reutilizando toda a infraestrutura de rede existente, sendo esta uma inovação testada pela primeira vez.

Os comprimentos de onda *downstream* (1482, 1487, 1492 e 1497 nm) escolhidos estão contidos dentro da banda de transmissão do sistema GPON, o que possibilita a manutenção de toda infraestrutura de rede existente de ONTs. Já os comprimentos de onda *upstream* (1270, 1290, 1310 e 1330 nm) permitem manter o ONT existente e adicionar apenas mais três outras ONTs compatíveis com a banda de recepção dos OLTs e assim aumentar a capacidade de transmissão da rede de 2.5 Gb/s para 4 x 2.5 Gbit/s.

Estaproposta da rede PON inserindo 4canais *downstream* centrados na faixa de 1490 nm e 4canais *upstream* centrados na faixa de 1300 nm, é implementada experimentalmente utilizando-se a taxa de transmissão de 2.5 Gb/s em uma fibra de 20 km extensão com 32 ONTs.

A Figura 3.5 mostra a grade CWDM disponível para fazer a sobreposição do sistema CWDM PON. O espectro mostra as regiões reservadas para os sistemas GPON, XGPON e Vídeo Overlay. Também são apresentados comprimentos de onda alocados em alguns trabalhos já publicados [32][72] conforme mencionado anteriormente.

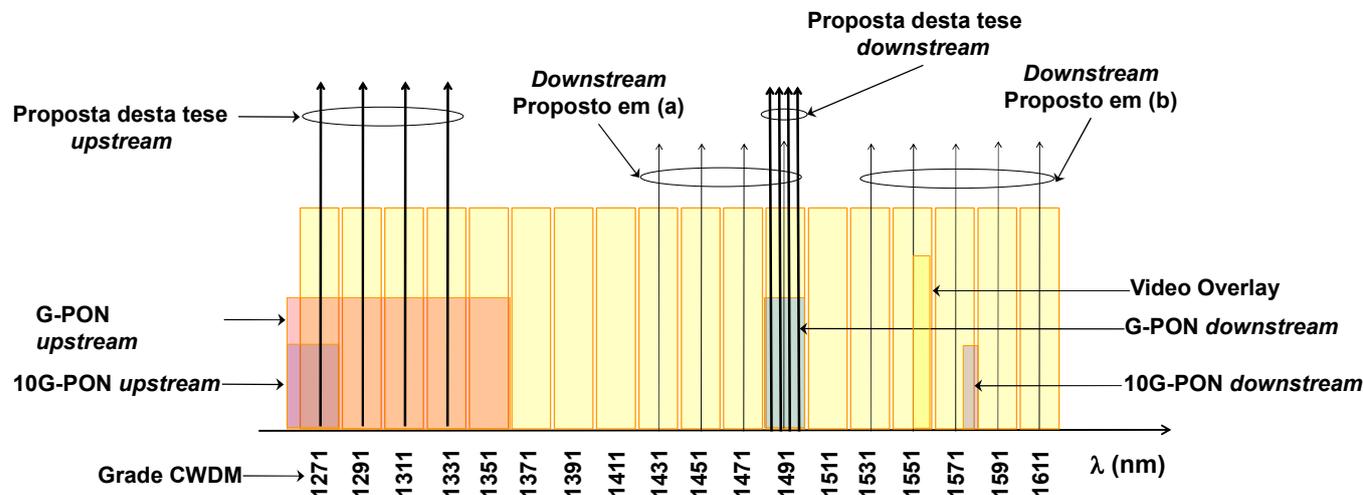


Figura3.5-Grade de espectro disponível para redes CWDM PON: Em (a) trabalho proposto utilizando 4 comprimentos de onda[32] e em (b) trabalho proposto usando 5 comprimentos de onda[73]ambos restrito ao sentido *downstream* e proposta da tese sentido *downstream* e *upstream*.

Em função das limitações de alocação de espectro dentro da banda de transmissão e recepção do GPON, esta técnica de aumento da capacidade de transmissão da rede GPON preserva o legado de equipamentos e aumenta a capacidade da rede em termos de largura de banda.

O diferencial deste estudo está em selecionar comprimentos de onda dentro da banda PON padronizada de *downstream* (1480 a 1500 nm) onde os comprimentos de ondas escolhidos no sentido *downstream* são 1482, 1487, 1492 e 1497nm e na banda PON padronizada de *upstream* (1260 a 1360 nm) foram escolhidos os comprimentos de ondas 1270, 1290, 1310 e 1330 nm.

A proposta de rede GPON com sobreposição WDM, também conhecida como Stacked-PON, é considerada uma tecnologia de evolução intermediária da rede PON, pois, mantém as faixas de transmissão (bandas) e a arquitetura estabelecida.

3.2 Proposta de rede GPON com sobreposição WDM

A Figura3.6, apresenta uma visão geral de múltiplas redes OLTs compartilhando uma mesma ODN através da técnica WDM. Como mencionado na seção anterior, a ODN

constitui a rede de distribuição passiva contendo a fibra, os divisores/combinadores e os conectores. Cada OLT funciona de forma independente em comprimentos de onda distintos. As OLT e ONT do sistema GPON são mantidas e OLTs e ONTs coloridas são adicionadas para os demais comprimentos de ondas escolhidos. As técnicas WDM e TDM podem ser combinadas quando um subconjunto de ONTs/ONUSs compartilharem a mesma fibra óptica [33] - [75]. Essa arquitetura mantém a escalabilidade já que novos usuários podem ser adicionados a cada grupo de ODN sem a necessária adição de um novo OLT. A Figura 3.6 apresenta a topologia de rede sobreposta, onde cada conjunto de OLTs e ONTs compartilhando a mesma ODN, múltiplos comprimentos de ondas levam e trazem informações de voz, dados, vídeo das OLTs para as ONTs utilizando uma única fibra óptica. Cada OLT, como mostra Figura 3.6, gera e recebe um específico par de comprimentos de onda. O mux/demux CWDM da estação central fica próximo do splitter e é responsável por rotear os comprimentos de onda de *downstream* e *upstream* para os respectivos grupos de OLTs e ONTs. O splitter é responsável por dividir os sinais de *downstream* para ONTs e receber as informações de *upstream* de cada ONTs e enviá-las para OLT.

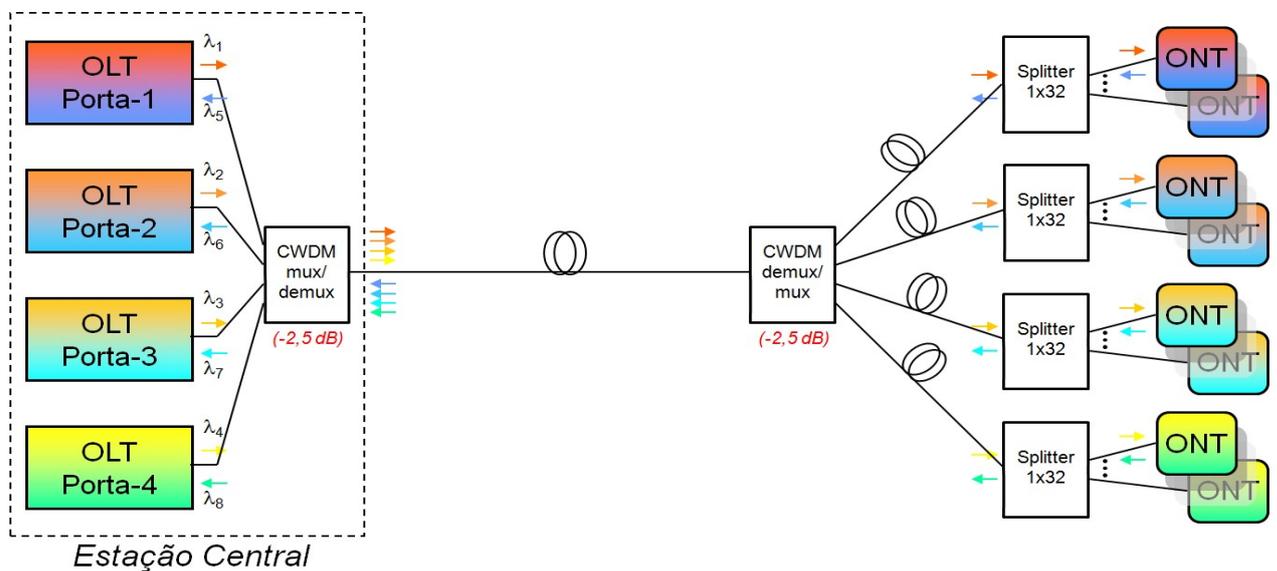


Figura 3.6 - Arquitetura Stacked-PON proposta visão geral

A Figura 3.7, mostra o esquema prático proposto para aumentar a quantidade de ODNs atendidas por uma única fibra. Este esquema difere da topologia de rede sobreposta da Figura 3.6, pelo fato de mostrar os dispositivos CWDM (mux/Demux) disponíveis comercialmente para o roteamento dos comprimentos de onda escolhidos.

A solução encontrada para o mux OLT foi utilizar três componentes distintos, um mux/demux WDM operando na banda O e outro para banda S e um acoplador de banda CWDM centrado em 1490 nm responsável por separar os dados de *downstream* e *upstream*. Quatro comprimentos de onda escolhidos dentro da faixa padronizada para tecnologia GPON de *downstream* na banda S são utilizados para transmitir os sinais a partir do OLT, para quatro diferentes ODN.

Nesta implementação utilizaram-se lasers DFB selecionados especialmente para atender os requisitos da rede PON, tais como: classes de transmissão e recepção, sensibilidade, distância máxima, recepção de comprimentos de onda dentro da faixa espectral de 1260 a 1360 *upstream* e transmissão de comprimentos de onda dentro da faixa espectral de 1480 a 1500 *downstream* [6]-[12].

O OLT da arquitetura proposta sofre modificações em relação ao OLT da tecnologia GPON e passa a transmitir quatro comprimentos de onda no sentido *downstream*, ao invés de um único como o GPON tradicional. O fato de colorir o OLT proporciona o aumento da capacidade de transmissão de 2.5 Gb/s para 4 x 2.5 Gbit/s *downstream*. Da mesma forma o ONT da tecnologia GPON, não sofre nenhuma alteração, entretanto, três novas ONT's são inseridas na rede, contribuindo assim com o aumento da capacidade de transmissão no sentido *upstream* de 1,25 Gb/s para 5 Gb/s.

Os comprimentos de onda definidos no sentido *downstream* mostrados na Figura 3.7, são 1482, 1487, 1492 e 1497 nm, sendo o espaçamento entre eles de 5 nm. Como a proposta deste trabalho é experimental, esses comprimentos de onda foram escolhidos para serem compatíveis com multiplexadores WDM comerciais disponíveis para testar essa aplicação. Os multiplexadores escolhidos são para uso em amplificadores Raman e que possuem canais compatíveis com comprimentos de onda escolhidos para banda S, se ajustando à banda PON padronizada de *downstream* (1480 a 1500 nm), conforme podemos ver no diagrama da Figura 3.7 e na Figura 3.8 de forma mais detalhada.

Já os comprimentos de onda definidos, no sentido *upstream* como mostra Figura 3.7, são 1270, 1290, 1310 e 1330 nm, sendo o espaçamento entre eles de 20 nm CWDM. Esses comprimentos foram escolhidos para serem compatíveis com as redes de multiplexadores WDM comerciais disponíveis no mercado, e que atendem a banda PON padronizada de *upstream* (1260 a 1360 nm), conforme mostrado no diagrama da Figura 3.10 de forma mais detalhada.

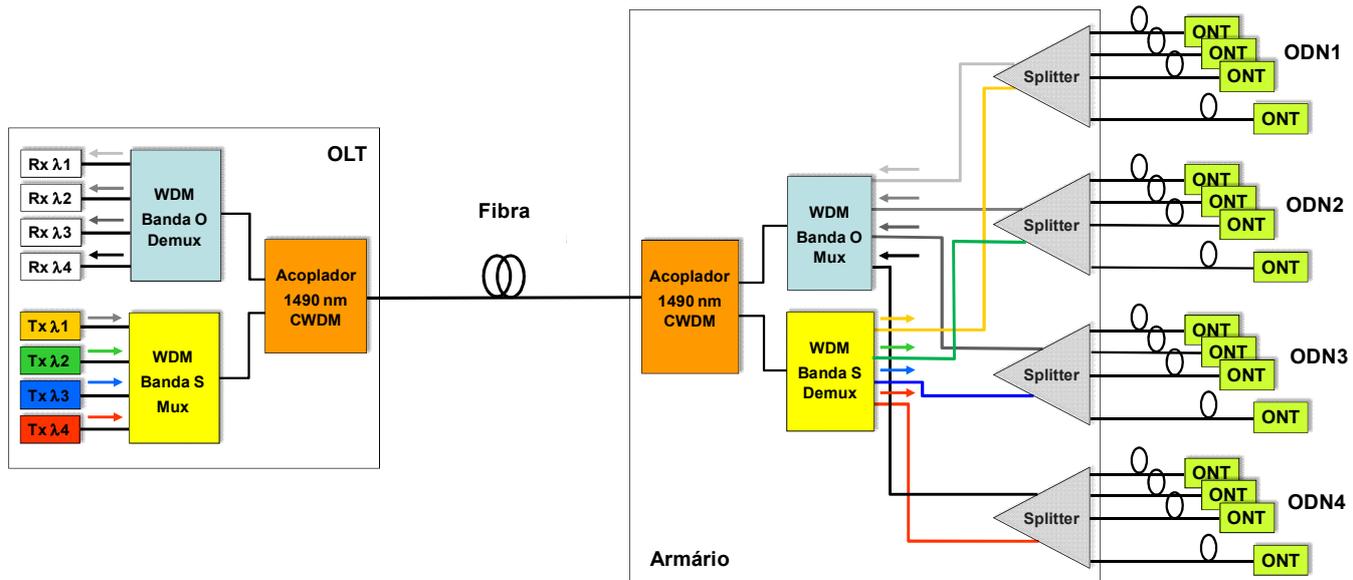


Figura3.7 -Arquitetura proposta de rede GPON com sobreposição WDM

No OLT os quatro comprimentos de onda são multiplexados pelo mux CWDM que opera na banda S. O sinal gerado passa por um acoplador de banda conhecido como filtro CWDM, que isola este sinal de transmissão dos canais da banda S dos canais da banda O. Em seguida o sinal é enviado pela fibra para o armário (hipoteticamente representado na Figura3.7).No armário o sinal passa pelo acoplador CWDM que separa os sinais da banda S da banda O. Em seguida os sinais de *downstream* são demultiplexados através do mux CWDM banda S. Cada sinal demultiplexado está associado a uma ODN que passa pelo *splitter* e chegando a ONT. Da mesma forma os quatro comprimentos de onda *upstream*, de cada grupo de ODN, são multiplexados e enviados para o OLT, onde passam por um acoplador - filtro CWDM, que separa os canais da banda S dos canais da banda O, para em seguida serem demultiplexados pelo mux CWDM e detectados pelo receptor da OLT.

3.3 Construindo a rede óptica experimental GPON com sobreposição WDM

A Figura 3.8e a Figura 3.10mostram respectivamente os diagramas de bloco detalhados do OLT e da ONT experimentais. Na Figura 3.8o OLT possui 4 lasers DFB operando em modo contínuo, espaçados de 5 nm, dentro da banda S de transmissão do sinal *downstream*. Esses lasers são multiplexados e modulados externamente por um modulador Mach Zehnder (Mach Zehnder Modulator- MZM). O modulador de MZM utiliza o princípio

de interferência que podem ser construtiva e destrutiva entre fases dos sinais que se propagam por cada braço do modulador. Todos os lasers DFB foram modulados com a mesma informação através de um único gerador de sequência pseudoaleatória. Este esquema de modulação foi adotado porque a modulação direta simultânea dos lasers DFB não se mostrou viável. O uso do esquema proposto não interfere na demonstração da idéia central aqui proposta. Em um sistema prático transceptores SFF (*Small Form-Factor* – SFF) podem ser utilizados e os comprimentos de onda dos lasers entre 1480 a 1500 nm podem ser escolhidos no lote de produção dos “chips” dos lasers. Controladores de polarização mostrados na Figura 3.8e na Figura 3.9 foram usados para manter a correta polarização dos sinais na entrada do modulador, uma vez que este dispositivo é sensível a polarização do sinal e apresenta uma fibra Panda em sua entrada. O sinal elétrico do gerador de sequência pseudoaleatória é amplificado antes de ser injetado no modulador MZM para se ter uma amplitude correta do sinal modulado. O desempenho do OLT e ONT é avaliado em termos de taxa de erro de bits (BER). A taxa de transmissão do sistema é de 2.5 Gb/s, enquanto a sequência binária pseudoaleatória (PRBS) possui comprimento igual a $2^{23}-1$. Para direcionar os sinais *upstream* para os respectivos receptores do OLT foi usado um filtro add-drop CWDM centrado em 1490 nm.

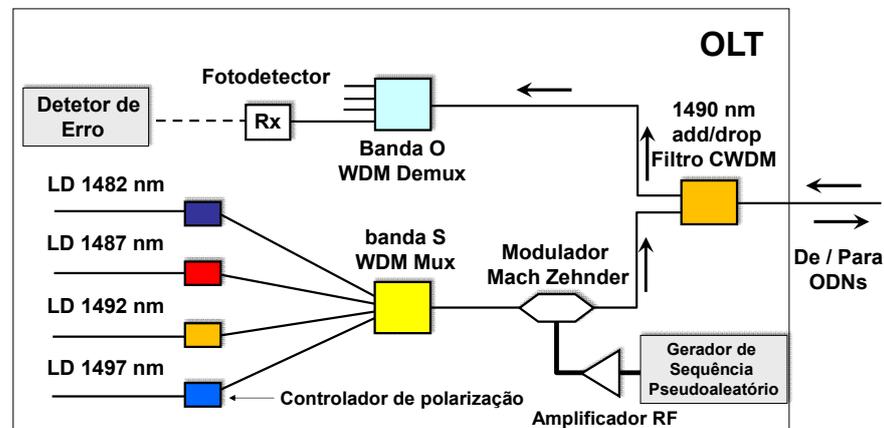


Figura 3.8 – Diagrama de bloco detalhado do OLT experimental.

A Figura 3.9 mostra o OLT experimental desenvolvido para o trabalho com os seguintes componentes ópticos/elétricos: (1) as placas eletrônicas com os lasers DFB de 1482, 1487, 1492 e 1497 nm utilizados para produzir os comprimentos de onda do sentido *downstream* dentro da banda espectral de transmissão da G984.2 [7]. Em (2) são mostrados os controladores de polarização utilizados para ajustar a correta polarização do sinal na entrada do modulador mostrado em (3) e por fim em (4) temos o amplificador de RF utilizado para

amplificar o sinal elétrico gerado que é utilizado na modulação dos lasers. O multiplexador CWDM que opera na banda S com portas de entradas compatíveis com os comprimentos de onda proposto neste trabalho não é mostrado por estar embaixo da placa suporte. Esse multiplexador é responsável por juntar as informações provenientes dos lasers e enviá-las para as ONTs.

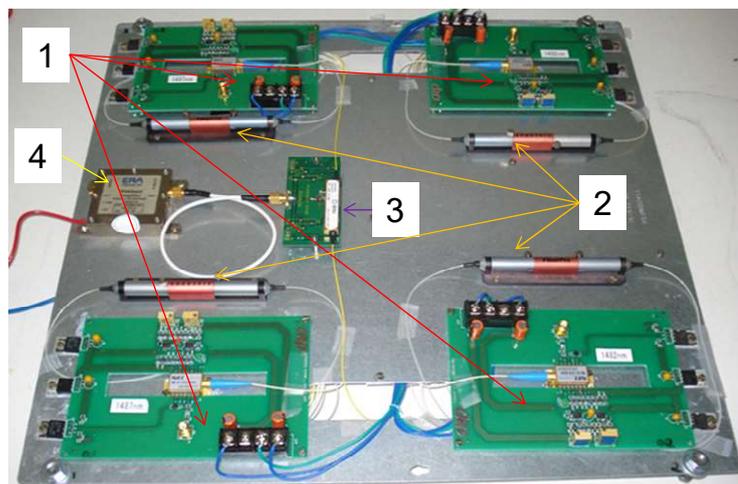


Figura 3.9 – Montagem do OLT experimental.

A Figura 3.10 mostra o diagrama do ONT experimental projetado para utilizar um transceptor SFP CWDM e um filtro CWDM 1x2 add/drop centrado em 1490 nm para separar os sinais *downstream* que vai para o receptor e o *upstream* que é transmitido pelo SFP para o splitter 2x32 que está no armário conforme mostrado na Figura 3.7. Os receptores da ONT e do OLT são projetados para usar fotodetectores APD com sensibilidade média de -31 dBm na ONT e -33,5 dBm no OLT. A potência óptica média transmitida por cada laser, na banda S, foi de 1,3 dBm *downstream* e na banda O foi de 0 dBm *upstream*. A saída elétrica do transceptor SFP CWDM usado como ONT permite também que o sinal elétrico recebido na saída da ONT possa ser re-injetado em sua entrada elétrica, sendo desta forma, também transmitido no sentido *upstream*. Assim é possível ter nas caracterizações a rede funcionando de forma bidirecional.

É importante comentar que foram usados transceptores SFP uma vez que os transceptores SFX que são realmente usados em GPON trariam grande complexidade aos testes. Tendo em vista que a análise sistêmica realizada focou nos aspectos de orçamento de potência e de interferência espectral, o uso do SFP não interfere nos resultados finais.

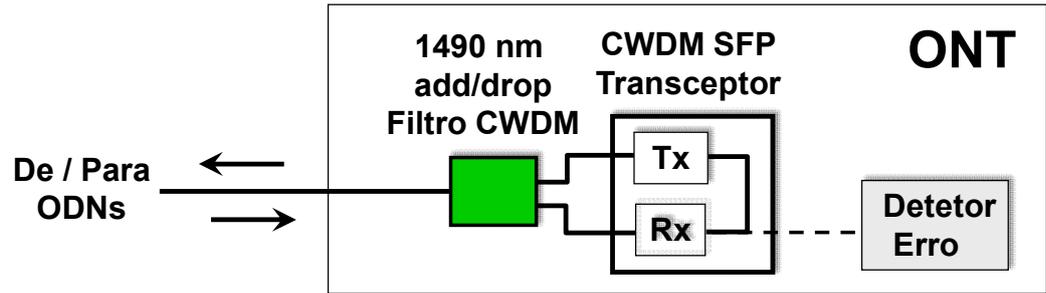


Figura 3.10 – Diagrama de bloco detalhado do ONT projetada.

O arranjo experimental em bancada do trabalho proposto é mostrado Figura 3.11. Os seguintes elementos são mostrados:

1. OLT projetada a qual foi descrita anteriormente e apresentada na Figura 3.9;
2. 20 km de fibra óptica utilizada para simular o comprimento da rede;
3. Fonte de alimentação utilizada para energizar a OLT e ONTs;
4. ONT desenvolvida para detectar um único comprimento de onda proveniente da OLT;
5. Laser sintonizável utilizado para caracterizar os componentes e dispositivos ópticos;
6. Filtro 1490 nm add-drop CWDM utilizado para separar os sinais da banda S e da banda O;
7. Mux/Demux utilizados para juntar/separar os comprimentos de ondas da banda O e da Banda S na ONT e OLT respectivamente.

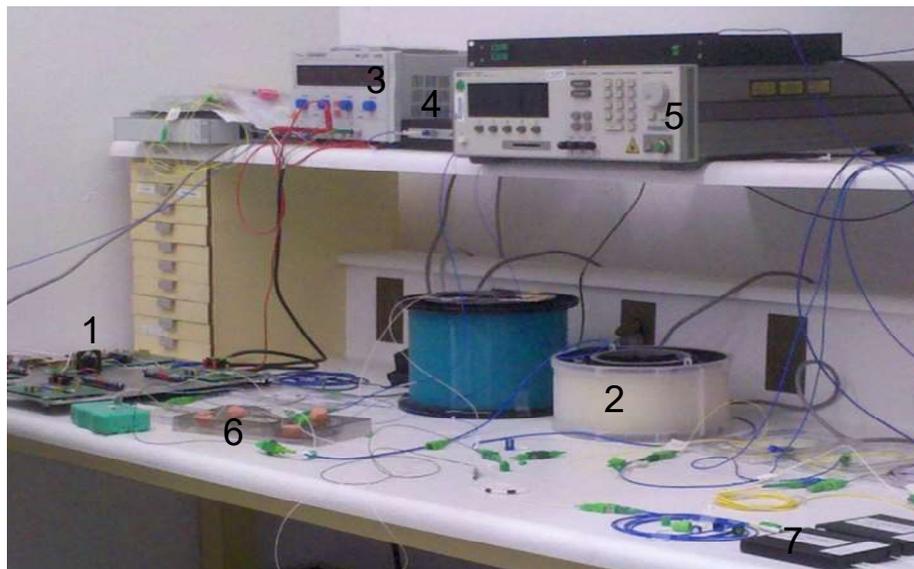


Figura 3.11 – Montagem experimental da rede proposta.

3.4 Resultados obtidos da proposta de evolução da GPON com sobreposição WDM

3.4.1 Caracterização dos elementos passivos

As caracterizações dos componentes e dispositivos ópticos é uma etapa fundamental para verificar se os dispositivos atendem os requisitos técnicos para a implementação experimental da arquitetura da rede GPON com sobreposição. Os componentes ópticos (filtros WDM e add-drops) foram caracterizados utilizando como fonte de luz o laser sintonizável modelo Hewlett Packard 8168C para a região da banda S e o laser sintonizável modelo 8167A para a região da banda O, além do analisador de espectro óptico (*Optical Spectrum Analyser* – OSA) modelo Anritsu MS9740A. O processo de caracterização é mostrado na Figura 3.12.

A fonte modelo 8167A gera um laser sintonizável na faixa espectral de 1280 nm a 1330nm e a fonte modelo 8168 C gera um espectro sintonizável na faixa espectral de 1470 nm a 1580 nm. Essas fontes lasers são conectadas aos componentes ópticos através de cordão óptico e cada saída dos componentes é conectada ao analisador de espectro óptico. O OSA é utilizado para analisar a banda espectral dos componentes analisados, por exemplo: janela de medição centrada no comprimento de onda de interesse, centrada em 1450 nm, com largura de 300nm. A varredura iniciando em 1300 nm e terminando em 1600 nm com resolução de 0.2 nm e largura de banda de vídeo de 10 Hz com 2001 pontos de amostra. A potência de saída de cada laser em cada comprimento de onda selecionado é medida para calcular a diferença entre as potências de saída e entrada no componente, ou seja, a perda de inserção. Neste processo de caracterização o atenuador mostrado na Figura 3.19 não foi utilizado.

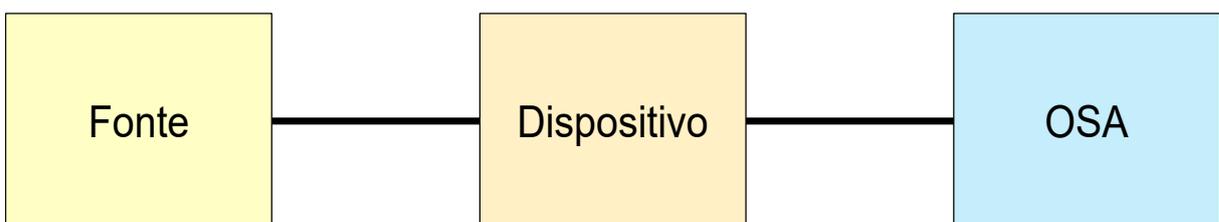


Figura 3.12 – Processo de caracterização dos elementos passivos.

As caracterizações dos Mux/Demuxes da banda O e banda S e os Add-drop CWDM são mostradas na sequência através das curvas de perda de inserção total e de isolamento entre os canais. Na Figura 3.13 são apresentadas as curvas para o demultiplexador na banda S, na Figura 3.14 para o add/drop CWDM 1490 nm e na Figura 3.15 para o demultiplexador da banda O.

A perda máxima de inserção para os multiplexadores/demultiplexadores na banda S é de 1,6 dB, na banda O é de 1,8 dB, no filtro add/drop CWDM 1490 nm é de 0,7 dB e para o Splitter 2x32 de 15,8 dB. A atenuação média da fibra óptica na banda O varia de 0,39 dB/km em 1270 nm até 0,31 dB/km em 1330 nm. Na banda S a atenuação da fibra é de 0,22 dB/km. A Figura 3.16 ilustra com as curvas obtidas posicionadas próximo dos componentes caracterizados.

A Figura 3.13 mostra a caracterização para as diversas portas de entrada do multiplexador banda S. pode-se observar que a perda de inserção é menor que 2 dB para o canal próprio desta porta e maior do que 20 dB para os canais de outras portas (isolamento).

A Tabela 3.1 mostra os valores de perda de inserção e de isolamento para os canais. A perda de inserção para o canal 1482 nm é de 0.60 dB, 0.47 dB para o canal de 1487 nm, 0.43 dB para o canal 1492 e 0.45 dB para o canal de 1497 nm. A isolamento entre os canais é também apresentada.

Tabela 3.1 -Perda de inserção por canal e isolamento entre canais para WDM1

Canal (nm)	Perda inserção (dB)	Isolação (dB) para o canal 1482 nm	Isolação (dB) para o canal 1487 nm	Isolação (dB) para o canal 1492 nm	Isolação (dB) para o canal 1497 nm
1482	0.60	X	21.58	20.35	21.53
1487	0.47	24.58	X	24.86	24.93
1492	0.43	19.40	24.99	X	25.25
1497	0.45	21,62	17.94	19.77	X

Para o canal de 1482 nm a isolação entre 1487 nm, 1492 nm e 1497 nm é de 24.58 dB, 19.40 dB e 21,62 dB, respectivamente. A isolação do canal de 1487 nm entre 1482 nm, 1492 nm e 1497 nm é de 21.58 dB, 24.99 dB e 17.94 dB, respectivamente. A isolação do

canal de 1492 nm entre 1482 nm, 1487 nm e 1497 nm é de 20.35dB, 24.86dB e 19.77 dB, respectivamente. Finalmente, a isolaçodo canal de 1497 nm entre 1482 nm, 1487 nm e 1492 nm é de 21.53dB, 24.93dB e 25.25 dB, respectivamente.

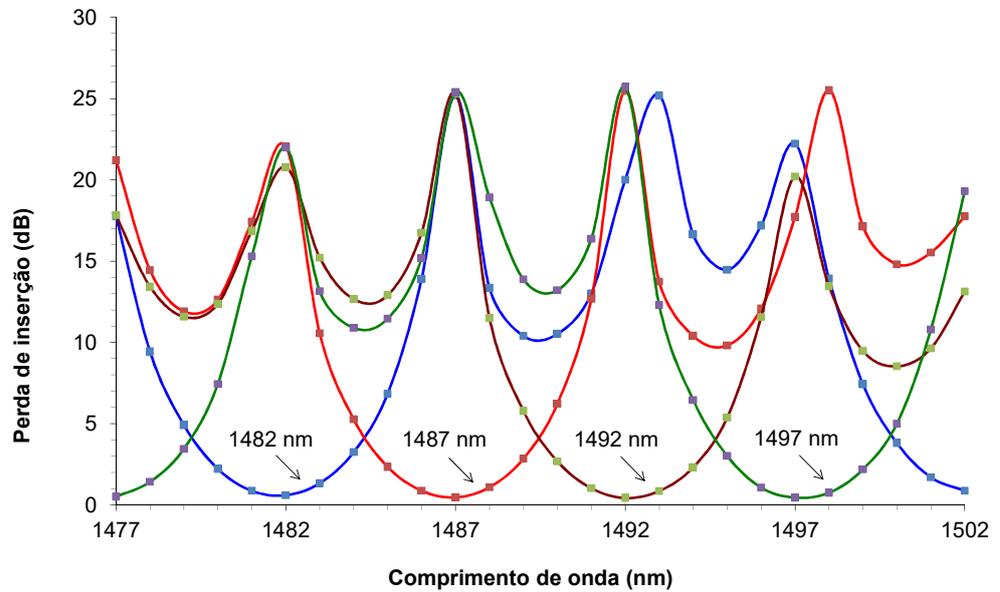


Figura 3.13 - Perda inserção e isolação entre canais do mux da banda S.

A perda de inserção no filtro add/drop CWDM 1490 nm é de 0,7 dB. A Figura 3.14 mostra a isolação entre os canais da banda O e da banda S. Nota-se que a isolação é da ordem de 20 dB.

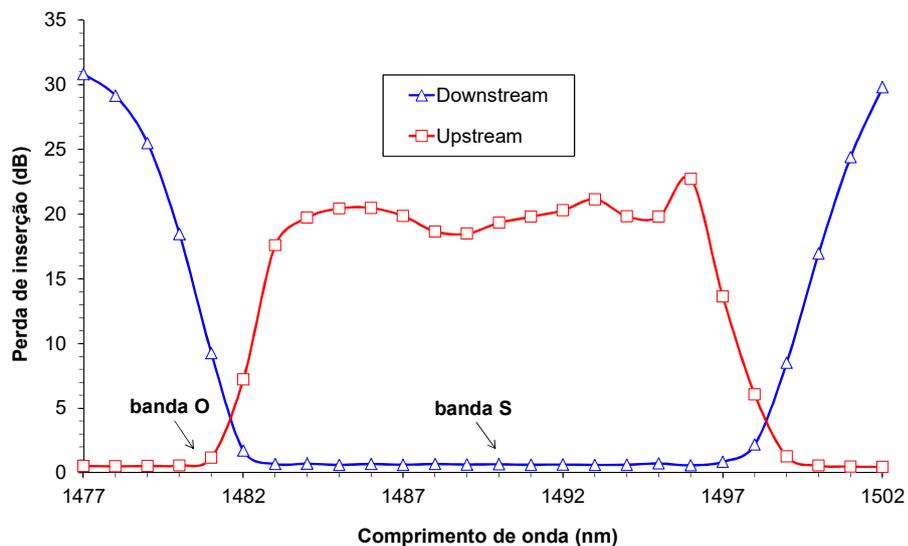


Figura 3.14 - Perda de inserção e isolação no filtro add/drop CWDM 1490 nm.

A perda de inserção do multiplexador da banda O foi de 1,8 dB. A Figura 3.15 mostra a isolamento entre os canais da banda O para o canal de 1270 nm. A isolamento entre 1290 nm, 1310 nm e 1330 nm é maior que 25 dB, para o canal de 1290 nm a isolamento entre 1270 nm, 1310 nm e 1330 nm é maior que 20 dB, para o canal de 1310 nm a isolamento entre 1270 nm, 1290 nm e 1330 nm é maior que 20 dB e para o canal de 1330nm a isolamento entre 1270 nm, 1290 nm e 1310 nm é maior que 30 dB.

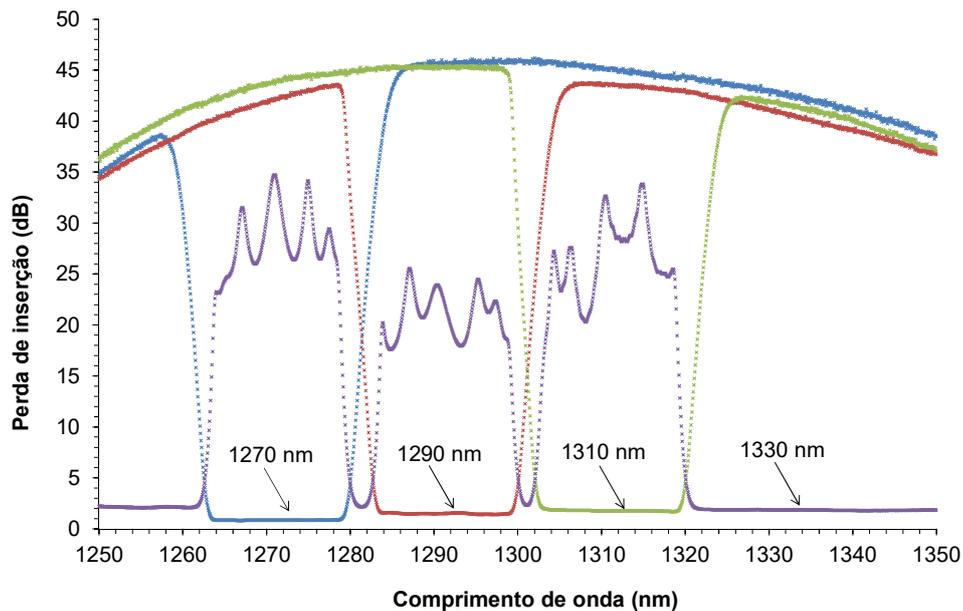


Figura 3.15 - Perda inserção e isolamento entre canais do mux da banda O.

A Figura 3.16 mostra para determinados pontos da rede proposta, as curvas obtidas. Tais medições foram determinantes para verificar o nível de isolamento entre os canais e verificar a compatibilidade dos comprimentos de onda dentro na banda de *downstream* e *upstream* tendo assim aderência com os padrões definidos para a rede GPON.

Os resultados de perdas de inserção na OLT demonstram haver uma boa isolamento entre os canais de *downstream* e *upstream*. Já os resultados do multiplexador da banda O garantem a isolamento entre a banda O e a banda S possibilitando assim que não haja interferências dos canais na ONTs de uma determinada ODN.

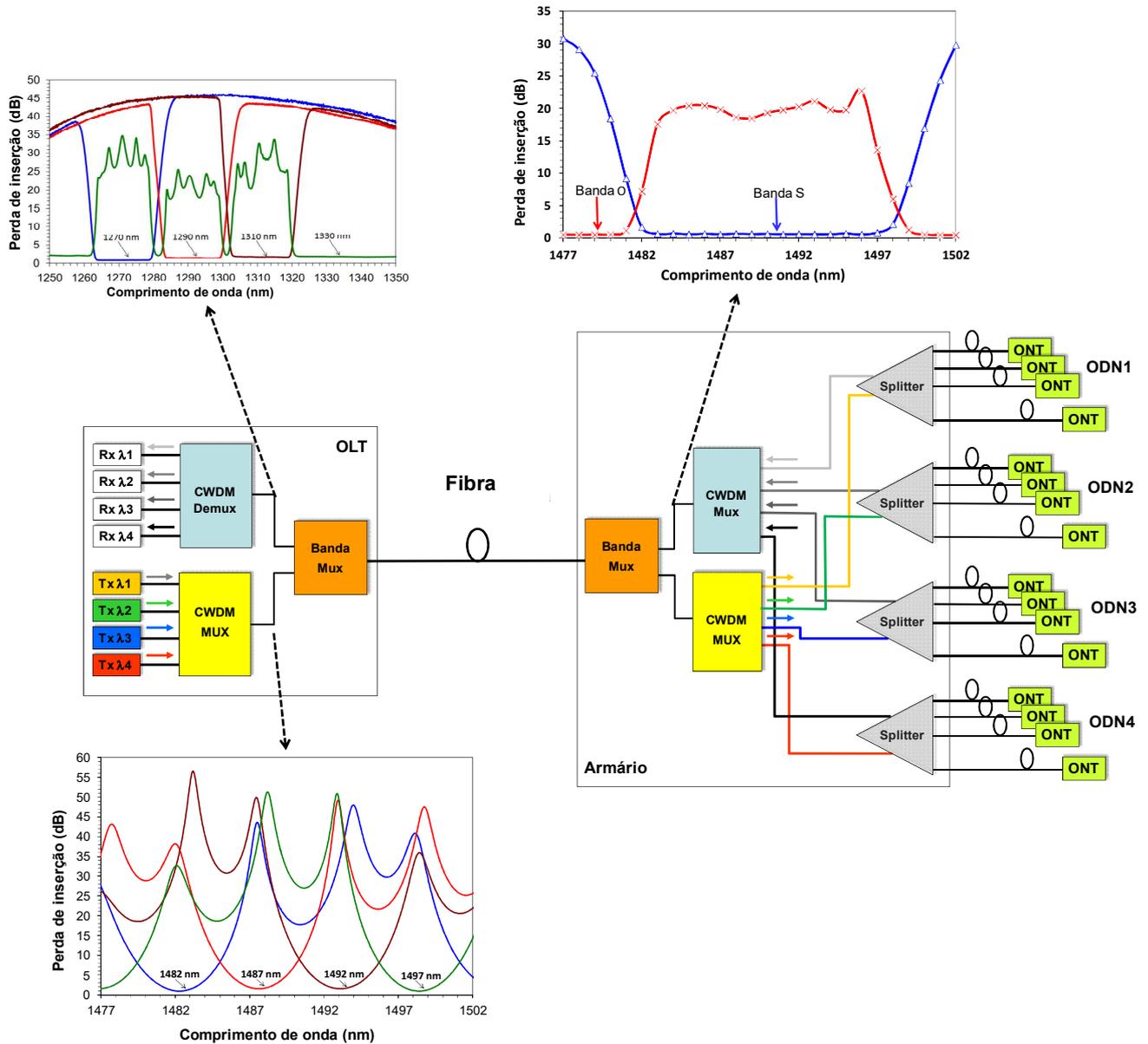


Figura 3.16 - Ponto selecionados na rede proposta para das caracterizações dos canais de *downstream* e *upstream*.

3.4.2 Caracterização dos elementos ativos

A Figura 3.17, mostra os sinais gerados e multiplexados a partir do OLT o espectro de emissão dos quatro lasers da OLT obtidos na saída do multiplexador banda S de acordo Figura 3.7 sendo transmitidos no sentido *downstream*, com os comprimentos de onda de 1482, 1487, 1492 e 1497 nm, respectivamente, os comprimentos de onda foram medidos utilizando o OSA.

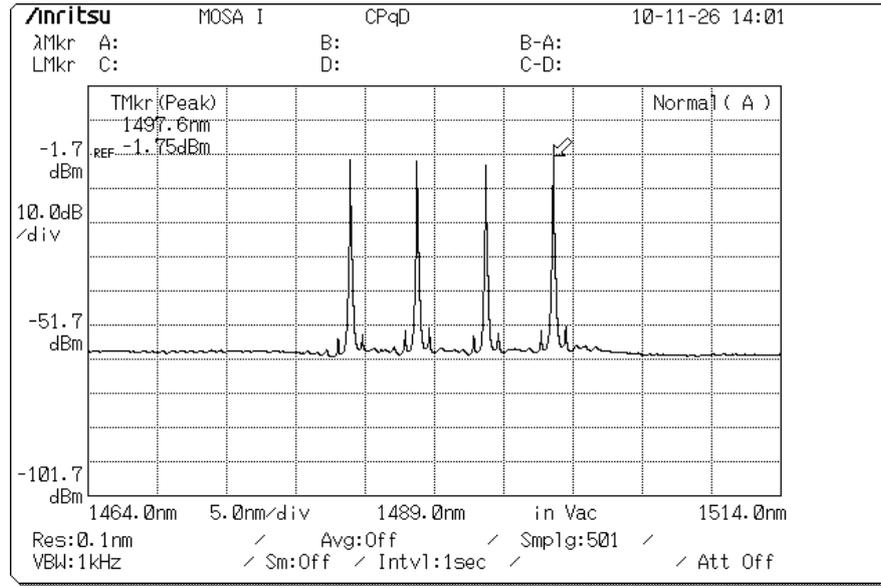


Figura 3.17 – Sinal *Downstream* multiplexado do OLT obtido no OSA.

Nota-se que os níveis dos sinais de *downstream* estão praticamente equalizados e a potência média de saída dos quatro canais é de aproximadamente -1,7 dBm.

Uma vez que os transceptores das ONTs, como mostrado na Figura 3.18, são especificados para operar na faixa entre 1490 nm +/- 10nm, foi caracterizada a banda óptica do receptor de um transceptor do tipo SFF usado em uma ONT. Na Figura 3.18 (a) é mostrado uma foto deste transceptor SFF e ao lado na Figura 3.18 (b) o seu circuito eletrônico de recepção.

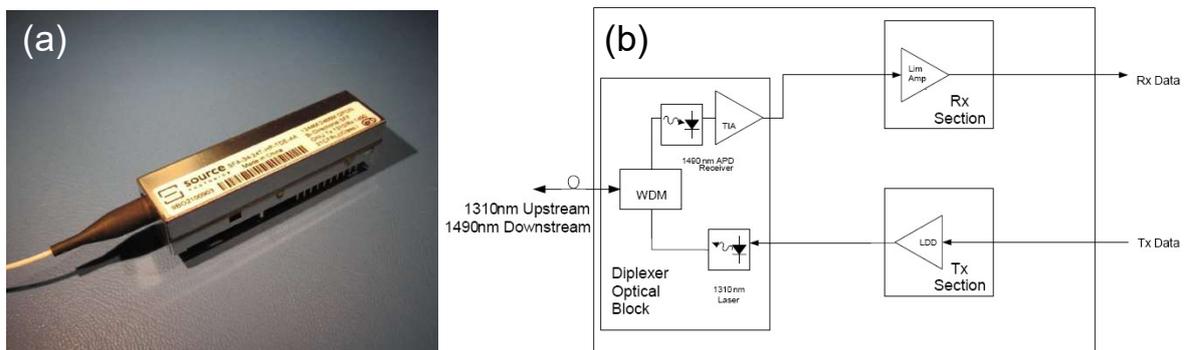


Figura 3.18 – ONT: (a) Foto de um transceptor do tipo SFF utilizado em ONTs e (b) Diagrama do circuito interno do transceptor.

O esquema mostrado na Figura 3.19 foi utilizado na caracterização da ONT. Desta vez o sinal do laser sintonizável modelo Hewlett Packard 8168C foi modulado e enviado para a ONT. Um atenuador monitor foi utilizado para controlar o nível de potência óptica na ONT para evitar a saturação do receptor do transceptor.

O laser foi modulado com frequência 80 kHz com onda quadrada e a varredura foi feita dentro da faixa de espectro de 1460 nm até 1540 nm. Utilizando um osciloscópio mediu-se a tensão pico-a-pico na saída do receptor óptico do transceptor mostrado na Figura 3.18 (b). O laser sintonizável deve ser modulado porque a ONT não aceita sinal contínuo, portanto, somente modulando o laser é possível passar o sinal pelo acoplamento capacitivo da ONT e assim medi-lo.



Figura 3.19 – Montagem experimental para avaliação da detecção dos comprimentos de onda nas ONTs.

A Figura 3.20 mostra a curva de saída do receptor do transceptor SFF versus comprimento de onda. Como pode ser observado ocorre um corte na banda para comprimentos de onda acima de 1512 nm. Isso se deve ao fato de haver um filtro óptico na recepção para evitar a interferência com o sinal de vídeo analógico que é especificado para operar em 1550 nm. Já para comprimentos de onda inferiores a 1465 nm o corte não pôde ser determinado devido à faixa espectral do laser.

O comprimento de onda de corte no limite superior encontra-se a 12 nm acima em relação à especificação da ITU-T. Já o comprimento de onda no limite inferior encontra-se pelo menos 25 nm abaixo da especificação ITU-T.

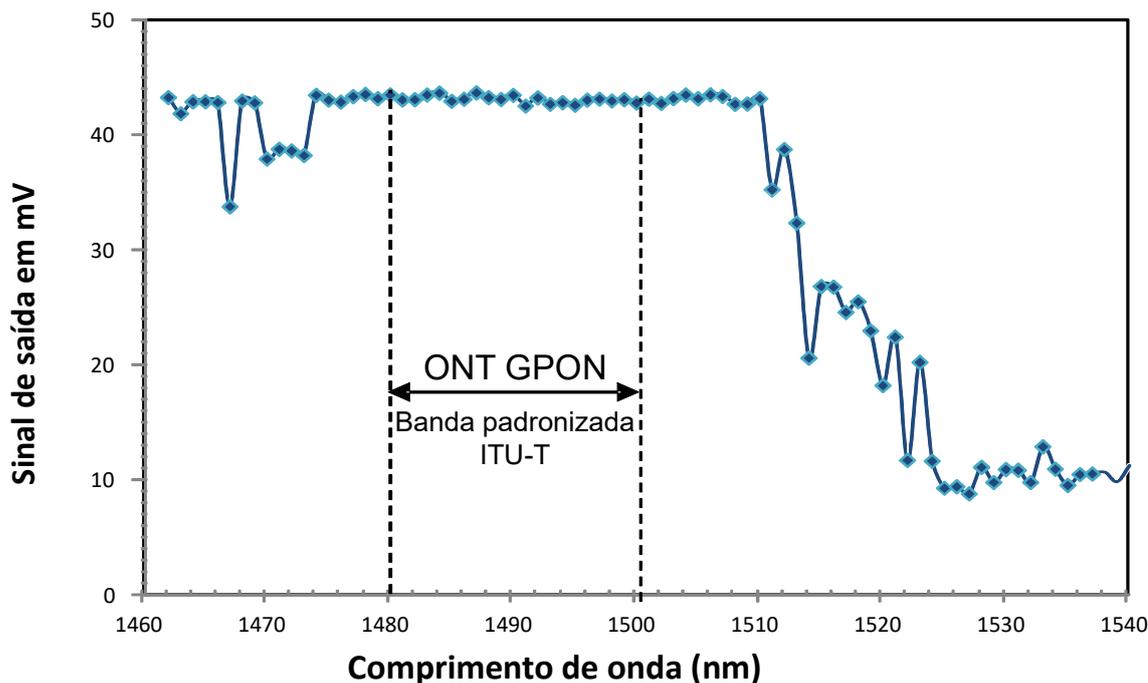


Figura 3.20 – Normalização do nível de tensão de saída do transceptor ONT.

Como mostrado na Figura 3.20, os comprimentos de onda de 1482, 1487, 1492 e 1497 nm especificados neste trabalho podem ser transmitidos detectados de forma homogênea dada a planicidade do filtro do transceptor na região espectral entre 1480 a 1500 nm.

Como observação final da caracterização do transceptor SFF deve-se frisar que a mesma foi feita para propósito informativo já que para o transceptor da recepção foi usado um transceptor CWDM SFP conforme previamente comentado.

3.4.3 Resultados experimentais de desempenho do receptor de ONT em função da variação térmica do laser.

Medições foram realizadas de modo a verificar o desempenho do receptor de ONT, devido à possibilidade de variação térmica do laser para um determinado comprimento de onda da banda S. Uma vez que a banda de transmissão do multiplexador/demultiplexador da banda S não é plana, conforme podemos observar na Figura 3.13, a variação espectral dos lasers da banda S, pode degradar a BER nas ONTs.

A Figura 3.21, apresenta o desempenho em termos de BER e potência recebida de um canal da banda S (1492 nm) escolhido para demonstração experimental, medido no

receptor da ONT quando o comprimento de onda do laser é alterado por $\Delta\lambda = \pm 2.5$ nm. Para obter esta variação de comprimento de onda a corrente de peltier do laser escolhido foi alterada esquentando ou esfriando o laser. Observa-se que o desempenho, em termos de BER, não é alterado para $\Delta\lambda = \pm 0,75$ nm, porque a potência do sinal recebido tem pouca variação nesta faixa. A máxima temperatura de operação, sem degradação BER, para os lasers da banda S, neste sistema proposto, é de 35 °C, pois o laser DFB muda seu comprimento de onda da ordem de 0.075 nm/°C. A multiplexação e demultiplexação na banda S, usando tecnologia de filtros dielétricos podem estender a faixa de temperatura de operação devido a sua maior largura de banda plana [44]. Entretanto, eles não estão disponíveis com espaçamento de 5 nm entre os comprimentos de onda utilizados na banda S.

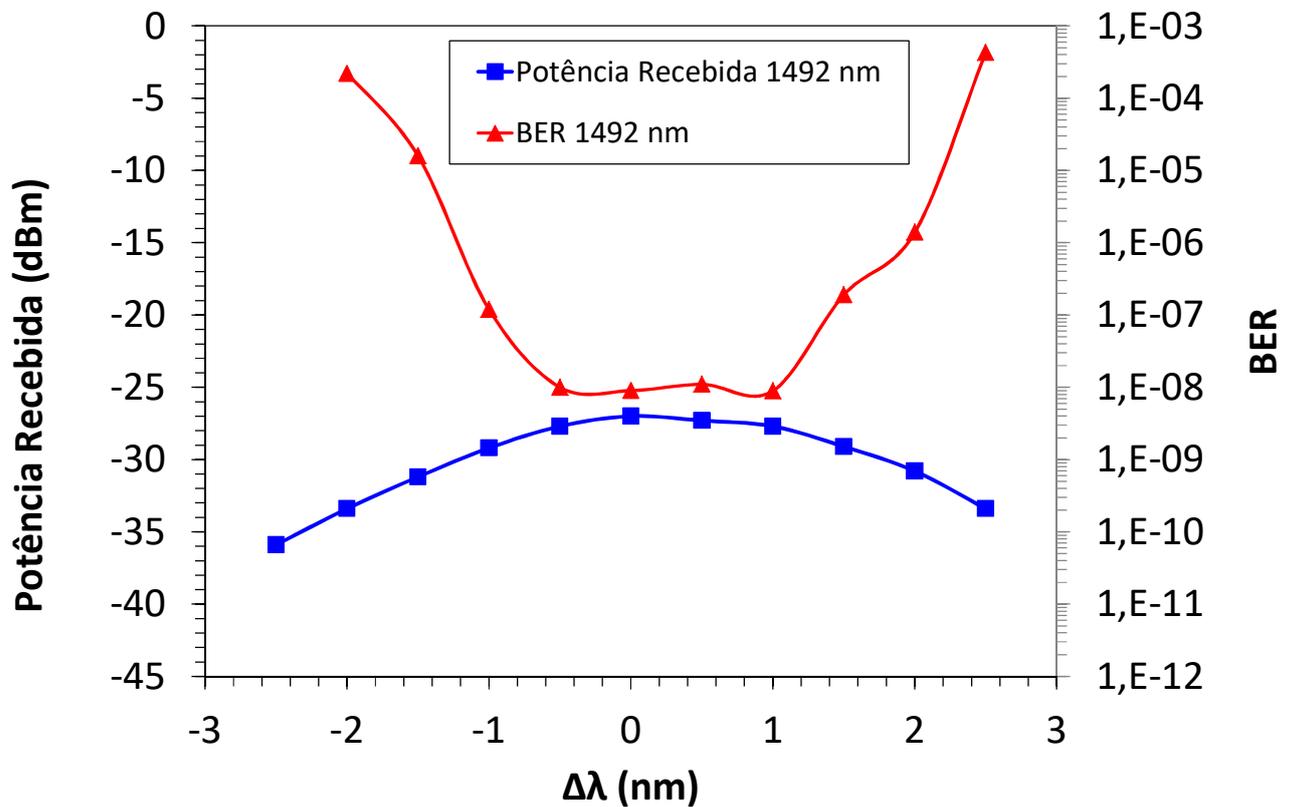


Figura 3.21– Variação de BER e da potência recebida de um canal da banda S (1492 nm) medido em um receptor de ONT quando o comprimento de onda do laser é variado de ± 2.5 nm.

Os resultados obtidos mostram que o extensor pode operar, sem comprometer a eficiência do sistema, em ambientes com temperatura ambiente menor que 35°C sem sofrer degradação da BER com potencia recebida nas ONTs variando entre -28 dBm a -25 dBm.

3.4.4 Caracterização sistêmica da rede

O próximo passo foi o de caracterizar a ONT e o OLT com os sinais de *downstream* e *upstream* respectivamente, em termos de taxa de erros de bit. Utilizamos a montagem mostrada na Figura 3.22 para realizar os testes sistêmicos. O sinal elétrico em 2.5 GB/s de um gerador de padrão é conectado ao amplificador de RF acoplado ao modulador eletro-óptico. O modulador eletro-óptico modula os sinais dos quatro lasers a partir deste sinal elétrico. Um multiplexador óptico banda S foi utilizado na saída da OLT para separar cada os canais *downstream* e *upstream*. Tanto antes do receptor da ONT como da OLT um atenuador óptico com monitoração de potência foi utilizado para obter cada potência óptica em uma dada taxa de erros.

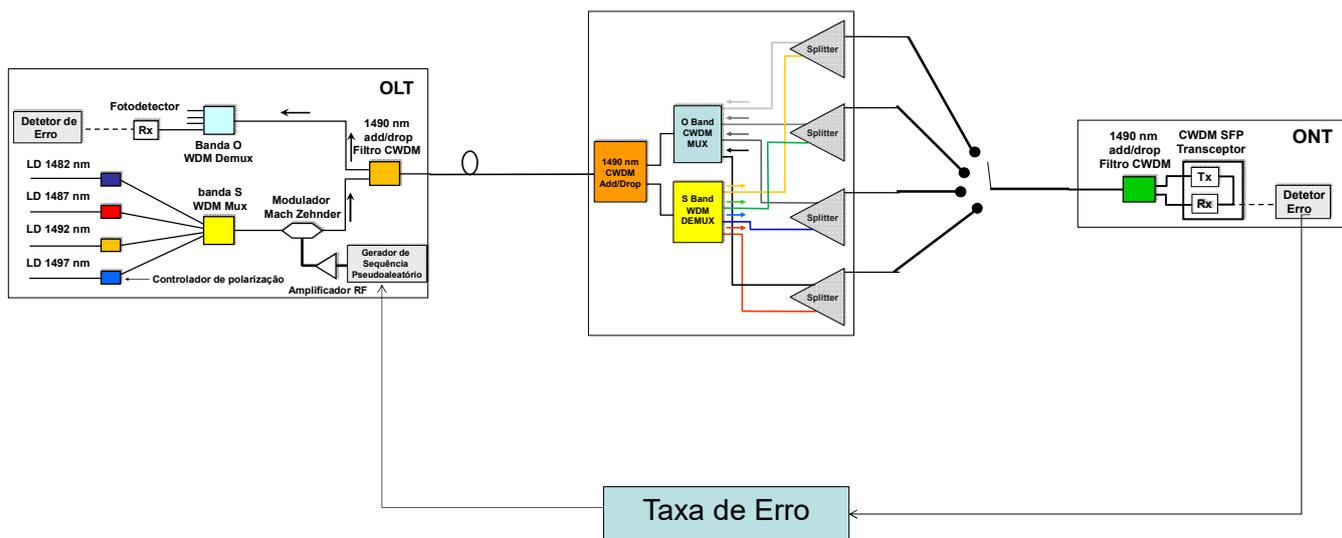


Figura 3.22 - Esquemático da montagem experimental para medição de taxa de erros. Na figura é ilustrada a medição na ONT.

A Figura 3.23 mostra a montagem em bancada da rede proposta, com os dispositivos e componentes sendo: (1) OLT, (2) carretel de fibra óptica de 20 km, (3) fonte de alimentação, (4) ONT, (5) laser sintonizável, (6) add-drop CWDM, (7) mux/demux, (8) gerador e medidor de taxa de erros Anritsu modelo Bert Modelo 3620A SONET e (9) Splitter.

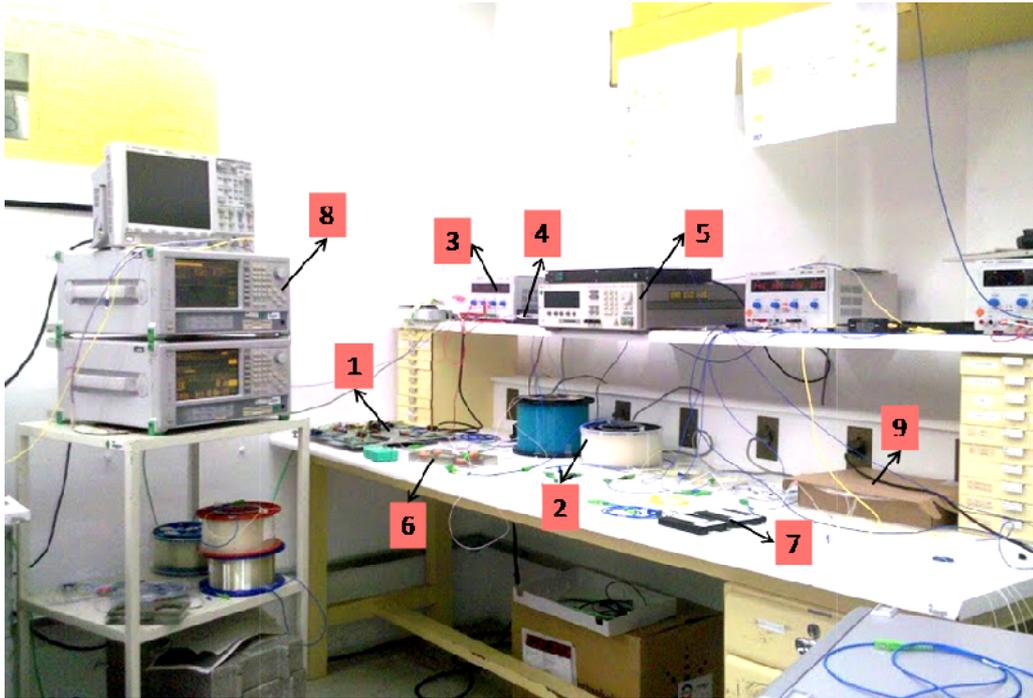


Figura 3.23 – Montagem setup rede Staked-PON

As curvas de BER versus Potência óptica recebida são mostras na Figura 3.24 e na Figura 3.25 e para a ONT foram obtidas seguindo o seguinte procedimento:

- Em (8) são gerados os sinais de sequência pseudoaleatória (PRBS) de 2.5 Gbits/s que são amplificadas através de um amplificador de RF.
- Em seguida, utilizando o modulador Mach-Zehnder os sinais dos lasers DFBS nos comprimentos de onda 1482, 1487, 1492 e 1497 nm são modulados com esta sequência pseudoaleatória. Em (1), os sinais modulados são multiplexados utilizando um mux/demux que opera na banda S.
- Os sinais provenientes do mux/demux passam pelo add-drop CWDM que tem a função de juntar ou separar os sinais provenientes da banda S e banda O que denominamos de sentido *downstream* e *upstream* respectivamente.
- O sinal *downstream* que sai do OLT é então transmitido por um carretel de fibra óptica de 20 km de extensão, como mostrado em (2).
- Esse sinal chega a ODN que é constituída de um add-drop CWDM (6) e um mux/demux (7) que tem a função de separar e/ou juntar os sinais provenientes da banda S e da banda O.

- Os sinais de *downstream* são então demultiplexados e encaminhados para os *splitters* (9), onde, uma de suas portas é selecionada para medição.
- O sinal selecionado é então encaminhado para o ONT (4);
- Na ONT o sinal *downstream* é detectado por um receptor óptico, seguindo para o detector de erros (8) para a obtenção da BER.

Para obter a BER no sentido *upstream* o procedimento é similar. A diferença é que o sinal é enviado a partir da ONT e na OLT os comprimentos de onda recebidos são separados utilizando um demultiplexador que opera na banda O e a BER é da mesma forma analisada individualmente para cada comprimento de onda.

A Figura 3.24 apresenta os resultados da avaliação de desempenho, em termos de BER, para os canais da banda S obtidos no ONT. Para efeito de avaliação do sistema proposto as curvas de BER são levantadas primeiramente sem fibras, procedimento este que se chama de *Back-to-Back* (BTB) e em seguida é inserido um carretel de fibra de 20 km de extensão e novamente as curvas de BER são obtidas.

De acordo com os resultados mostrados na Figura 3.24 ocorrem penalidades no sistema para 20 km de extensão. Estas penalidades são devidas a isolação não infinita dos multiplexadores, mas que são absorvidas pela margem existente no orçamento de potência óptica do sistema para canais de *downstream*. Pode-se observar que as penalidades para os canais de *downstream* são em torno de 2 dB para a $BER = 1 \times 10^{-11}$.

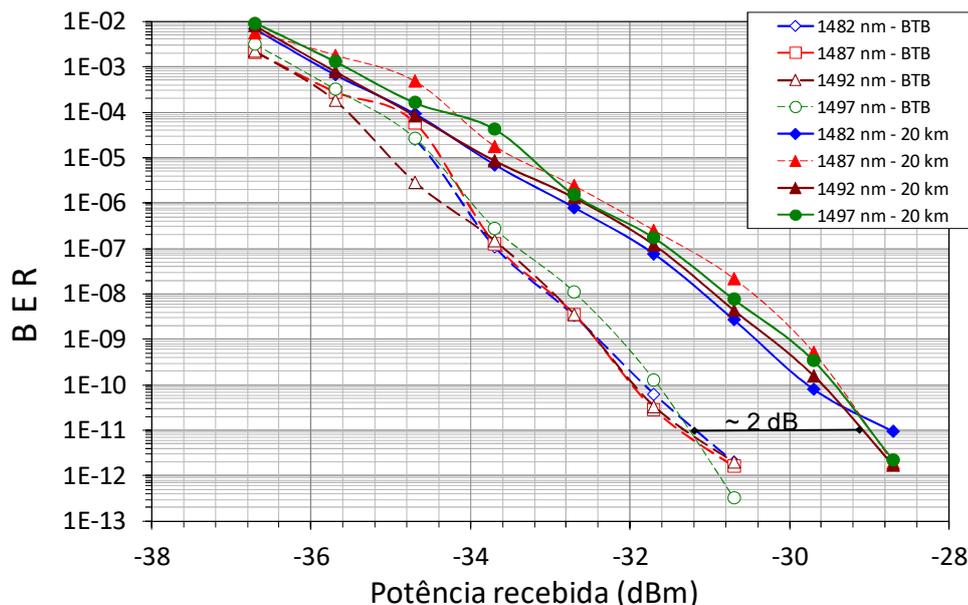


Figura 3.24 – Avaliação de desempenho sistêmico BER canais de banda S (*downstream*) medidos no ONT.

A Figura 3.25 apresenta os resultados obtidos da avaliação de desempenho, para os canais da banda O no OLT. Da mesma forma que para o sentido *downstream* as penalidades são da ordem de 2 dB, tem a mesma origem da isolamento não infinita dos multiplexadores e são totalmente absorvidas pelo orçamento de potência do sistema.

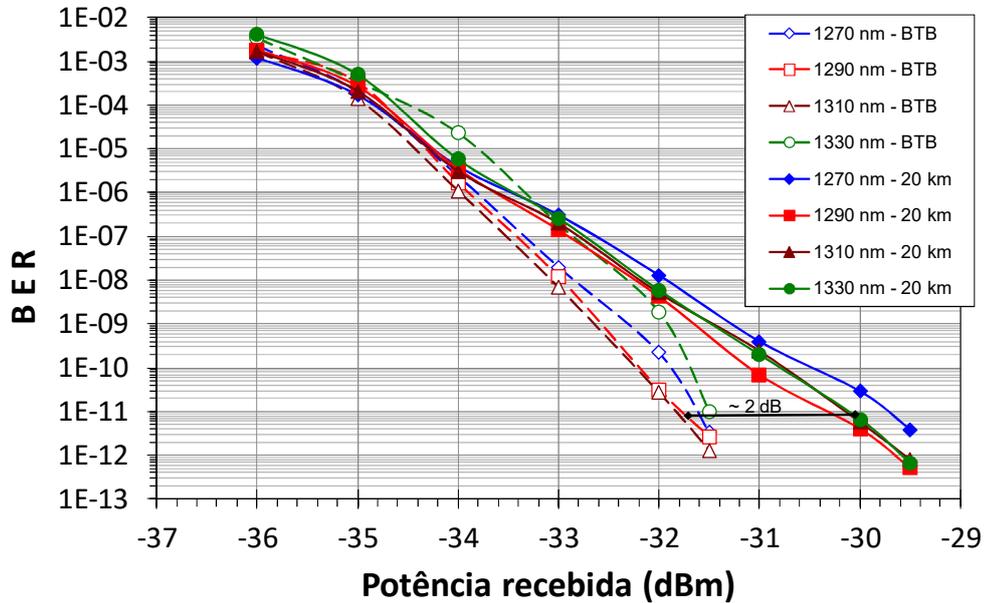


Figura 3.25 – Avaliação de desempenho sistêmico BER canais da banda O medidos no OLT.

A Figura 3.26 apresenta os espectros dos sinais de *downstream* e *upstream*, obtidos no ONT e no OLT, respectivamente nos extremos do enlace de fibra óptica. A figura dá uma visão geral da banda óptica ocupada desde 1270 até 1497 nm.

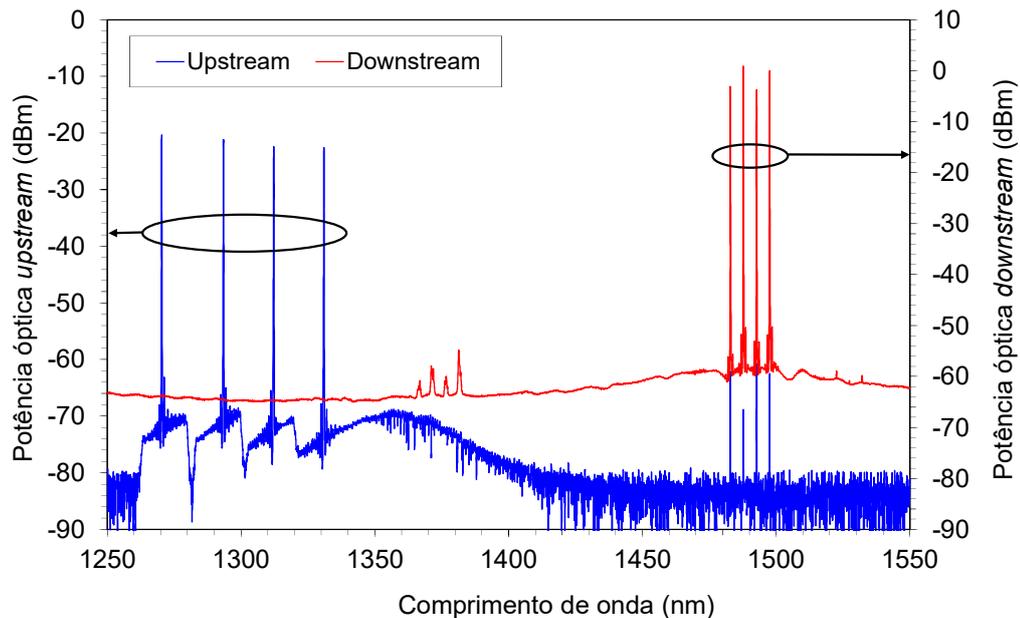


Figura 3.26 – Espectro óptico dos sinais de *downstream* e *upstream* no OLT para 20 km.

De acordo com os dados de desempenho apresentados na Figura 3.24 e Figura 3.25 conclui-se ser viável tecnicamente a sobreposição de redes GPON proposta neste trabalho. A rede pode ser expandida com algumas modificações não havendo a necessidade de substituições das ONT da rede estabelecida quando a nova proposta de expansão de transmissão é implementada, assim todo o legado de equipamentos poderá ser reaproveitado. Outra vantagem adicional do trabalho proposto dá-se pela capacidade de atender uma gama maior de usuários, visto que, tal solução equivale a ter em uma mesma área quatro sistemas GPON independentes, o que atualmente não é possível com a tecnologia GPON implantada.

3.5 Conclusão

Neste capítulo foi apresentado uma proposta intermediária de evolução da capacidade da rede GPON atual de 2.5 Gb/s para 4 x 2.5 Gbit/s baseado em sobreposição de comprimentos de onda o qual foi denominado de Stacked-PON. Quatro canais de comprimentos de onda são transmitidos a partir da OLT para quatro diferentes ODNs dentro do espectro padronizado que varia 1480-1500 nm. Os canais provenientes das quatro diferentes ODNs também são multiplexados dentro do espectro padronizado que varia de 1270-1330 nm e são transmitidos para os OLTs. A proposta preserva toda a infraestrutura de equipamentos instalada da tecnologia GPON. Em resumo foram apresentados neste capítulo:

- Uma nova proposta de evolução da rede GPON usando a padronização existente.
- Caracterização dos componentes e dispositivos utilizados na proposta do trabalho
- Detalhes da montagem da OLT e ONT.
- A transmissão de quatro comprimentos de onda multiplexados no sentido *downstream*, a partir do OLT para quatro distintos ODNs.
- A transmissão de quatro comprimentos de onda multiplexados no sentido *upstream*, provenientes de diferentes ODNs.
- Avaliação de desempenho do receptor de ONT em função da variação térmica do laser
- Avaliação de desempenho, em termos de BER, para os canais da banda S e da banda O, obtidos, no ONT e OLT, respectivamente.

CAPITULO 4

4 Extensor ativo para redes G-PON por sobreposição WDM

4.1 Introdução

Redes ópticas de acesso têm um alcance limitado a no máximo 20 km[29][30][35][37], devido ao orçamento de potência (*budget*) ser bastante restrito. Uma alternativa para contornar esta limitação é construir uma nova central nas imediações dos usuários não atendidos ou instalar o equipamento OLT da central em um armário de rua também próximo ao usuário. Entretanto, há um custo associado à construção de uma nova central e, também, não é conveniente instalar uma OLT longe da central em armário de rua. Assim, uma solução alternativa é o uso de extensores ópticos[43], em nós da rede, mantendo os OLTs nas centrais de grande porte. Isto reduz o custo fim a fim na extensão do alcance de uma rede GPON e também para uma rede Stacked-PON.

Um extensor é um dispositivo ativo que necessita de energia elétrica para alimentação dos circuitos eletrônicos de seu amplificador. A Figura 4.1 ilustra um exemplo do uso de extensores ópticos ativos a partir da estação (CO), que pode utilizar uma fonte de energia local ou remota. Geralmente extensores comerciais utilizam alimentação de -48 V ou 12Vdc. Na Figura 4.1 temos algumas formas típicas de alimentação, tais como, baterias, rede elétrica e painéis solares, que são utilizados para alimentação no local do extensor. O uso de alimentação local ou mesmo usando alimentação remota por cabos elétricos deixa o sistema mais susceptível a vandalismo e roubos[43].

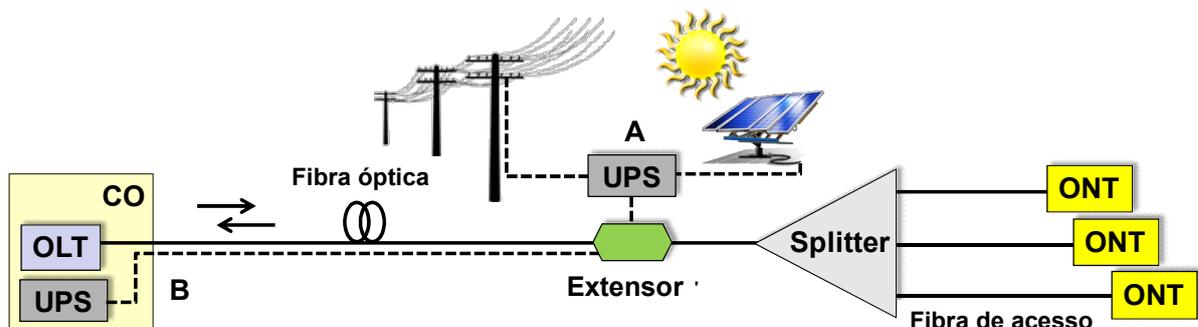


Figura 4.1-Extensor ativo da rede de acesso óptica utilizando SOA e suas formas de alimentação elétrica.

A utilização de extensores para as redes de acesso ópticas permite alcançar distâncias superiores a 20 km, além de consolidar alguns nós remotos estrategicamente posicionados.

O extensor deverá ser transparente as taxas de transmissão, e deve atuar somente no nível da camada física, devendo a camada de rede ser transparente ao extensor. O extensor GPON é uma alternativa de extensão das redes ópticas passivas, pois, é uma forma de garantir um orçamento de potência adequado à medida que o número de usuários e/ou a distâncias aumentam.

4.2 Proposta de extensão da rede GPON com sobreposição WDM

A Figura 4.2, mostra um esquema de extensão da rede que previamente denominamos de “*In-band WDM PON Overlay*”. Esta extensão permite aumentar o alcance da rede de acesso óptica, atendendo assim áreas remotas [74][75].

Para aumentar o alcance da rede óptica de acesso, utilizamos um extensor de PON ativo baseado na tecnologia de amplificadores ópticos a semicondutor – SOA que foi previamente discutido na 2.8.

Na montagem experimental da rede óptica em estudo antecipamos que estendemos a rede para aproximadamente 58 km de distância que é o limite superior para que a informação seja detectada ONT.

O posicionamento do extensor entre as distâncias de 20 km a 50 km resultará em resultados de BER equivalentes aos obtidos para o limite superior que corresponde ao primeiro trecho. Portanto optou-se por analisar a rede para o limite superior que corresponde ao primeiro trecho. O primeiro trecho do cabo óptico possui 50 km, que compreende a distância do OLT até o extensor, e o segundo trecho que está no armário é de 8 km, que faz o roteamento dos comprimentos de onda para os respectivos splitters.

Estes dois enlaces de fibra correspondem em termos de potência a uma rede GPON tradicional sem extensão que permite o atendimento até uma distância máxima de 20 km.

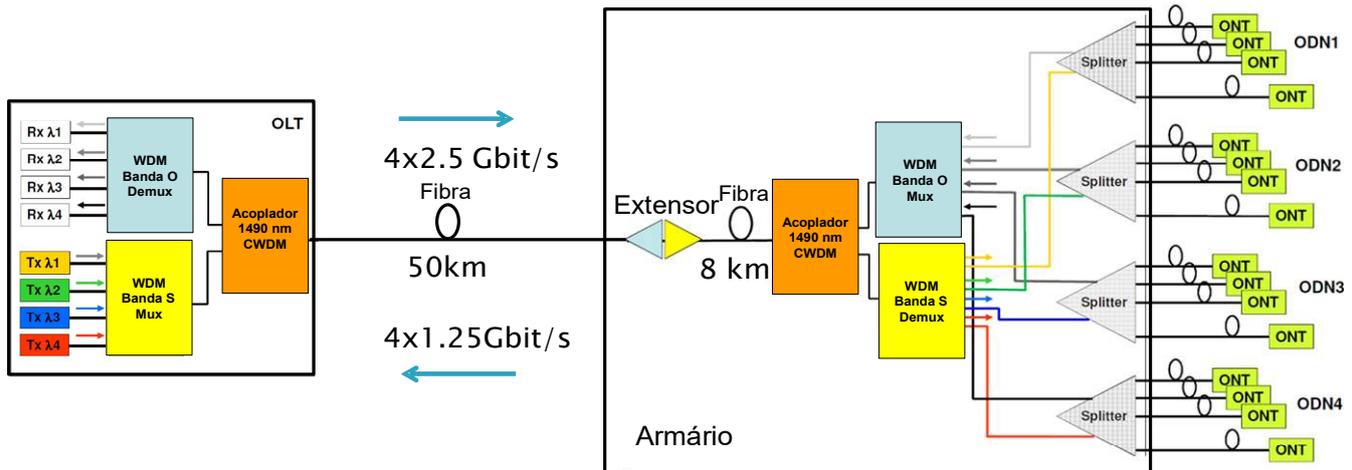


Figura4.2–Extensão da rede *In-band WDM PON Overlay*

O circuito do extensor SOA bidirecional é apresentado na Figura4.3. Este circuito é composto por um acoplador (mux) de banda 1310/1490 nm para conectar a entrada e a saída dos SOAs comerciais, sendo um para a banda espectral O de 1310 nm e outro para a banda espectral S de 1490 nm.

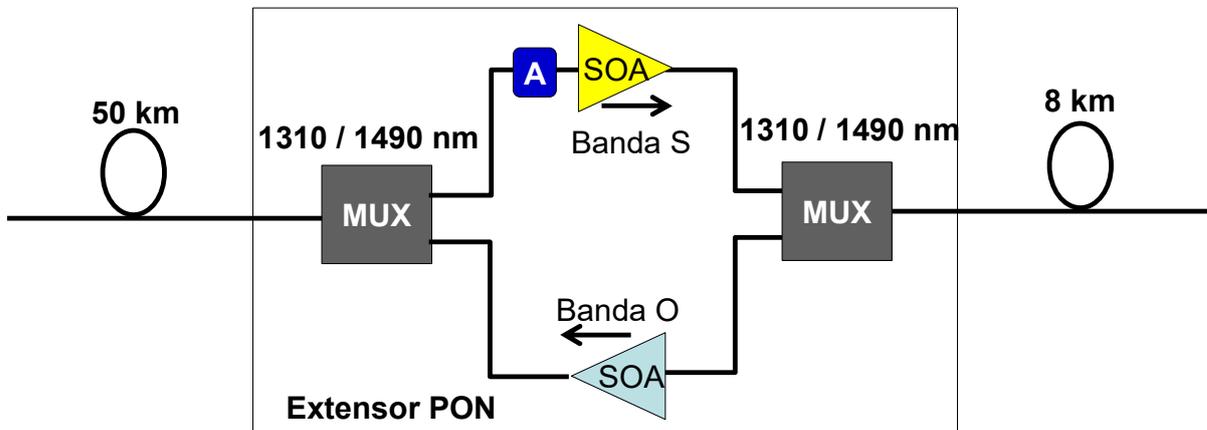


Figura4.3– Detalhes do extensor ativo bidirecional para rede *In-band WDM PON Overlay*.

Os parâmetros típicos dos SOAs utilizados na montagem são: ganho de sinal superior a 15 dB em ambos comprimentos de onda 1490 nm e 1310 nm, corrente de operação de 200 mA, e sensibilidade de polarização menor que 1,5 dB. É utilizado um atenuador óptico

na entrada do SOA de 1490 nm, para evitar a degradação da BER causada pela modulação cruzada de ganho em regime não linear do amplificador.

4.3 Resultados obtidos da caracterização do extensor óptico para rede PON

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos no estudo experimental da proposta de extensão da rede Stacked-PON. Como comentado anteriormente, a proposta deste trabalho foi o desenvolvimento de um extensor ativo, cuja alimentação se dará de forma convencional, ou seja, através do uso da rede elétrica ou baterias com painéis solares.

4.3.1 Descrição do extensor óptico

Na montagem experimental do extensor, como mostrado na Figura 4.4 utilizou-se um amplificador SOA operando na faixa de 1310 nm, sentido *upstream*, fornecido pela empresa InPhenix [86], e outro amplificador SOA operando na faixa de 1490 nm, sentido *downstream*, fornecido pela empresa Kamelian [87].

O objetivo desta montagem experimental é demonstrar a viabilidade do uso de amplificadores SOA como solução para extensão da rede óptica de acesso, pois com a inserção dos SOAs na rede é possível obter um orçamento de potência adequado à medida que o número de usuários e/ou a distância aumenta.

A Figura 4.4 ilustra a montagem do experimento para demonstração da proposta de extensão da rede Stacked-PON, onde temos em (1) e (2) as bobinas de fibra óptica com 50 km e 8 km de extensão respectivamente e em (3) o extensor ativo. Como mencionado anteriormente o extensor óptico foi colocado nesse ponto devido ao fato destes dois enlaces de fibra sofrerem a atenuação equivalente a de um enlace de 20 km, utilizado em uma rede GPON tradicional.

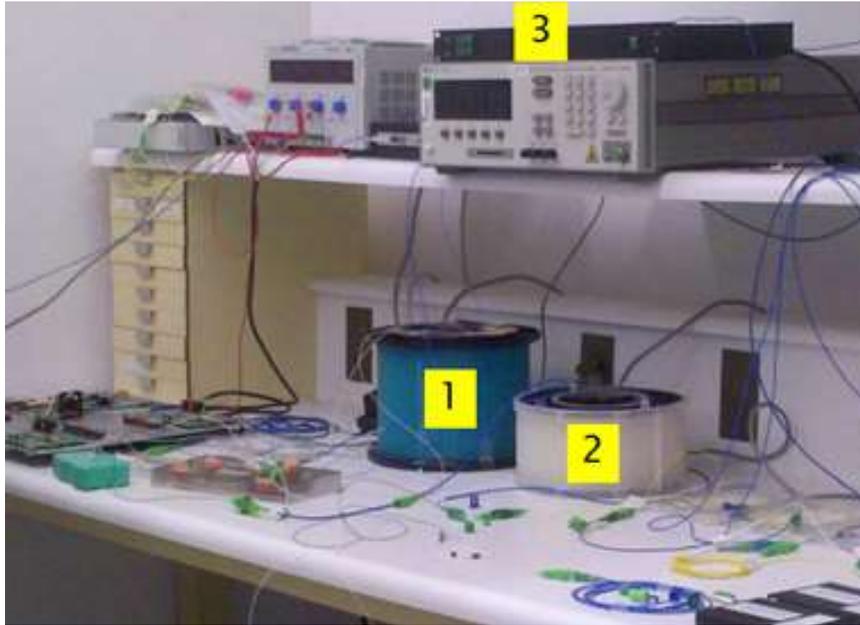


Figura 4.4– Montagem experimental do extensor ativo bidirecional para rede PON

Na Figura 4.5 é mostrada a vista superior do extensor proposto, onde:

- (1) e (4) são os amplificadores SOAs que operam em 1310 nm e 1490 nm, respectivamente,
- (2) é a matriz de conexão dos componentes ajustada para os ganhos de *downstream* e *upstream*,
- (3) são os acopladores de banda utilizados para separar e juntar os sinais de *downstream* e *upstream*.

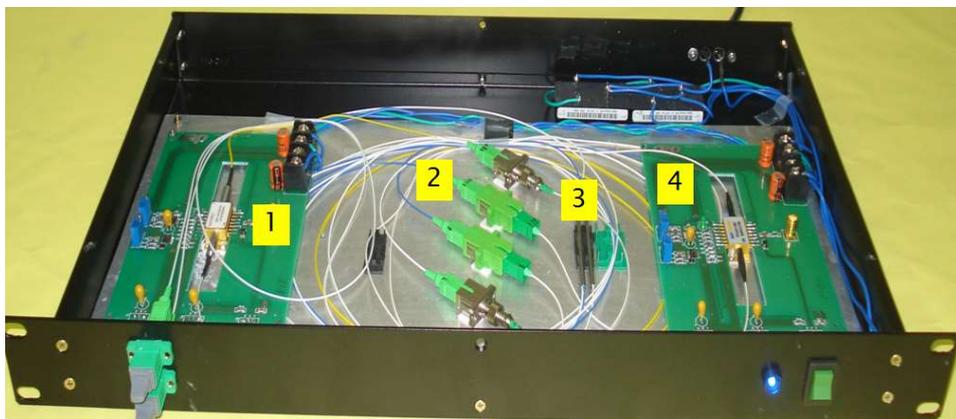


Figura 4.5– Protótipo do extensor ativo bidirecional para rede PON

4.3.2 Caracterização de ganho dos SOAs

Foram realizadas avaliações experimentais dos extensores através da caracterização do ganho em função da potência óptica na entrada do SOA e em função da corrente de alimentação do SOA.

Inicialmente, foram feitas caracterizações de ganho do SOA 1310 nm em função do comprimento de onda para diferentes potências de entrada cujos resultados são mostrados na Figura 4.6. Para o amplificador SOA em 1310 nm, o valor máximo de ganho ocorre em torno de 1295 nm e tem o valor de 16,41 dB de ganho para -25 dBm de potência de entrada.

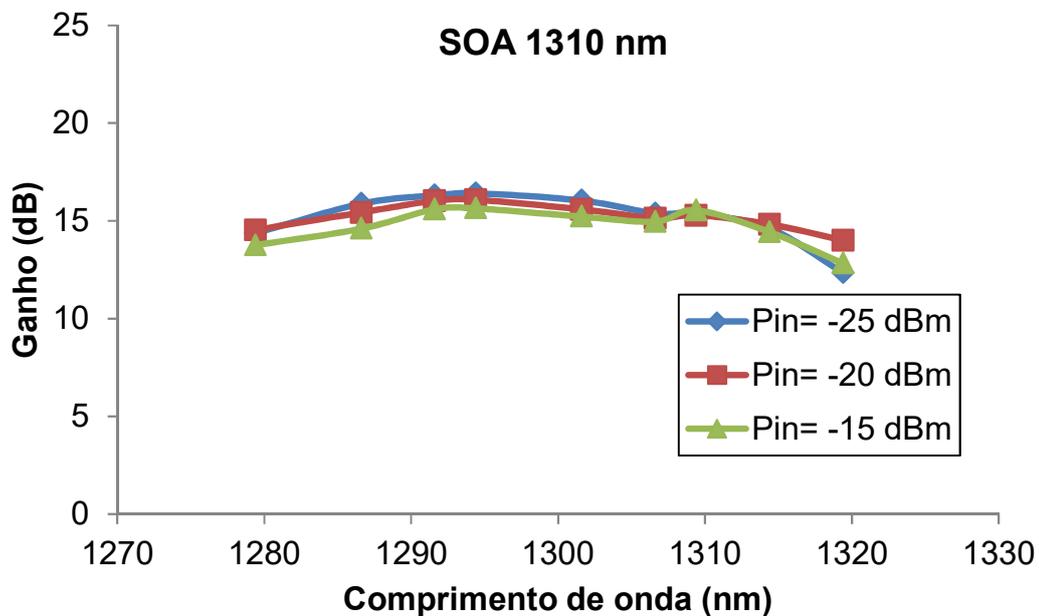


Figura 4.6 - Ganho SOA de 1310 nm, em função do comprimento de onda

Em seguida o SOA de 1310 nm foi caracterizado em função pela potência de saída em função da corrente de injeção. Considerou-se nesta análise duas potências de entrada, -20 dBm e -30 dBm. Na Figura 4.7 são apresentados os resultados obtidos para o SOA de 1310 nm em termos de potência de saída e na Figura 4.8 em termos de ganho.

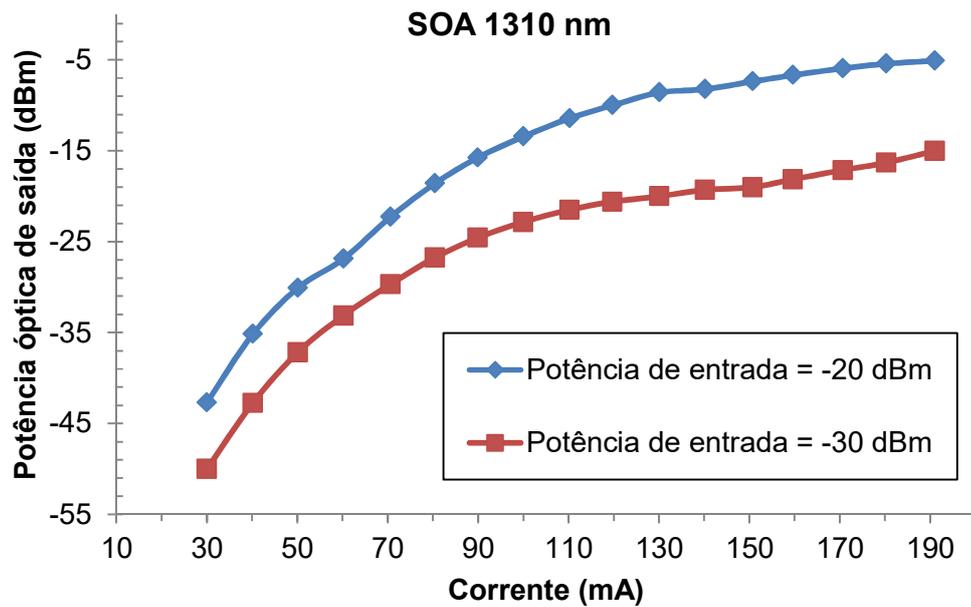


Figura 4.7 - Potência de saída do SOA de 1310 nm em função da corrente de injeção para potência de entrada no amplificador de P_{in} de -20 dBm e -30 dBm respectivamente.

Na Figura 4.8 é mostrado que o ganho óptico do amplificador SOA de 1310 nm ocorre para uma corrente de injeção acima da ordem de 70 mA.

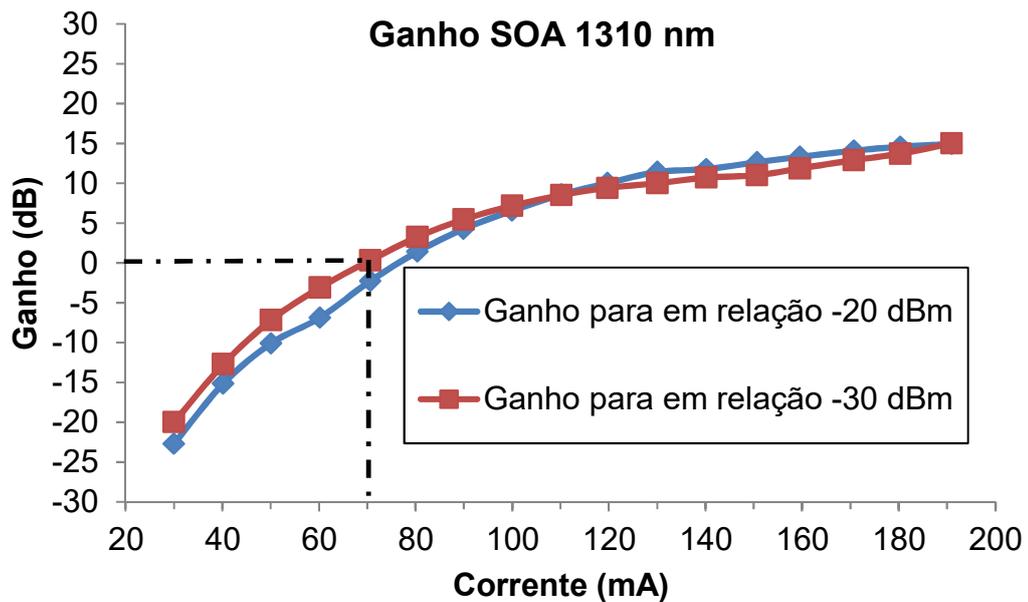


Figura 4.8 – Ganho SOA de 1310 nm em função da corrente de injeção.

Em seguida foi feita a caracterização do ganho do SOA 1490 nm em função do comprimento de onda para diferentes potências de entrada. Os resultados são mostrados na Figura 4.9.

Pode-se notar que para o amplificador SOA em 1490 nm, o valor máximo de ganho ocorre em torno de 1495 nm e tem o valor de 22.59 dB de ganho para -25 dBm de potência de entrada.

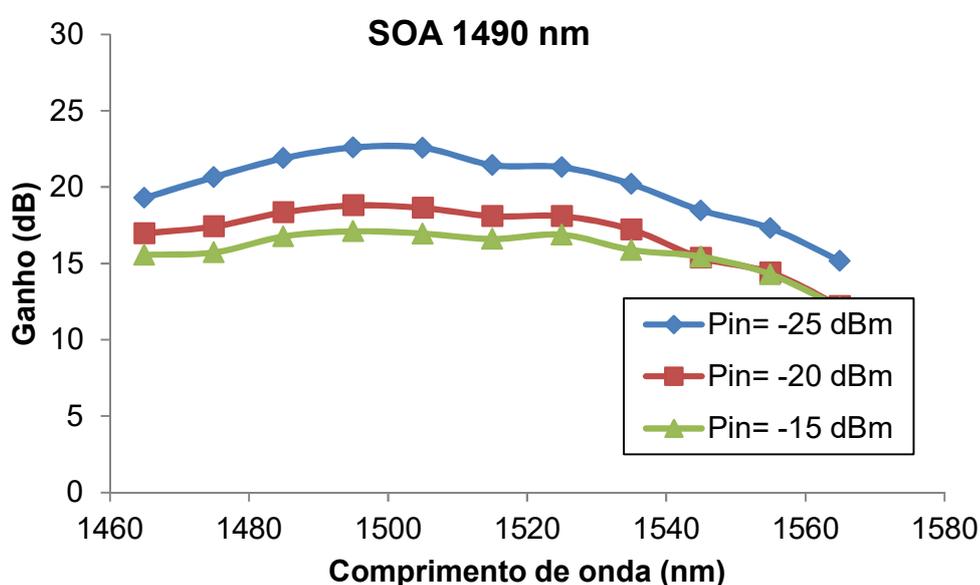


Figura 4.9 - Ganho SOA de 1490 nm, em função do comprimento de onda

Os mesmos procedimentos feitos para o SOA de 1310 nm foram repetidos para o para o SOA de 1490 nm. Realizou-se a caracterização da potência de saída em função da corrente de injeção. Considerou-se nesta análise duas potências de entrada, -20 dBm e -30 dBm.

Na Figura 4.10 são apresentados os resultados obtidos para o SOA de 1490 nm. Com esta caracterização foi possível determinar o limiar de ganho óptico do amplificador SOA 1490 nm que é de 40 mA conforme é mostrado na Figura 4.11.

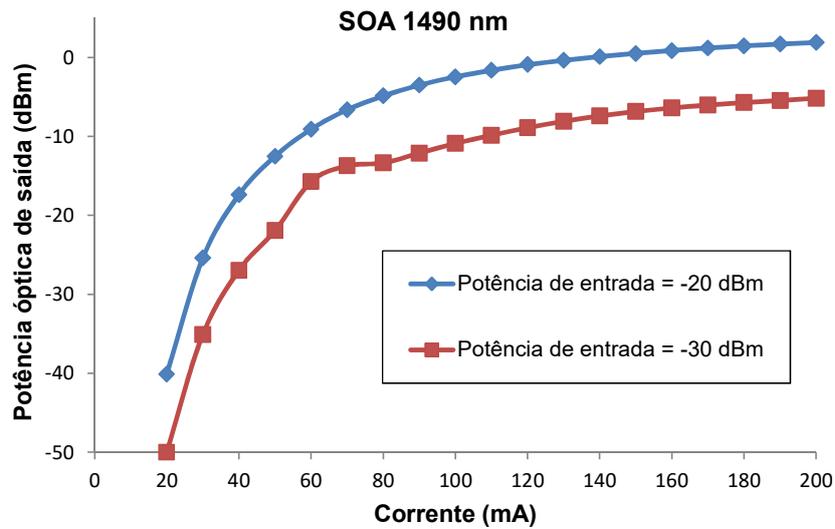


Figura 4.10 - Potência de saída do SOA de 1490 nm em função da corrente de injeção para potência de entrada no amplificador de P_{in} de -20 dBm e -30 dBm respectivamente.

A Figura 4.11 ilustra o ganho óptico do amplificador SOA de 1490 nm ocorre para uma corrente de injeção acima da ordem de 40 mA.

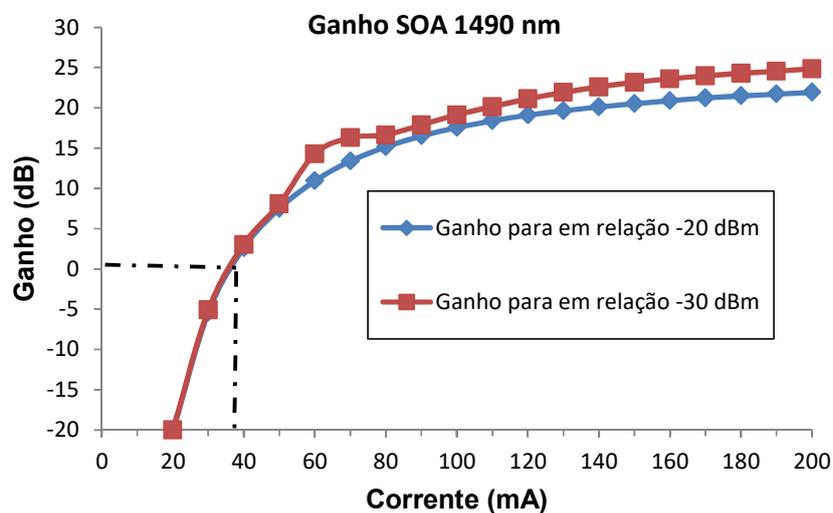


Figura 4.11 – Ganho SOA de 1490 nm em função da corrente de injeção.

Como apresentado tanto o SOA de 1310 nm utilizado sentido *upstream* como o SOA de 1490 nm utilizado no sentido *downstream* permitem a extensão da rede óptica Stacked-PON.

É mostrado que o maior ganho se dá para o comprimento de onda de 1295 nm sentido *upstream* e de 1495 nm sentido *downstream*, sendo que as correntes de injeção de limiar são de 70 e 40 mA respectivamente. A Figura 4.12 apresenta o espectro resultante na saída de cada extensor PON de acordo com a direção do sinal já com os quatro canais de *downstream* e quatro de *upstream*. Observar que a larga banda utilizada na banda O e a banda mais curta utilizada na banda S.

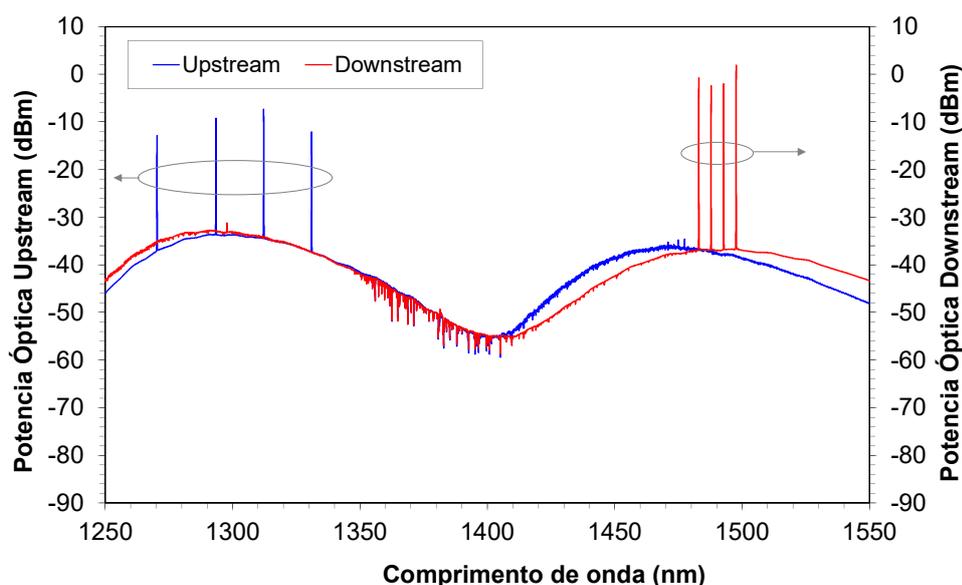


Figura 4.12– Espectro óptico nas saídas do extensor para os canais de *downstream* e *upstream*.

De acordo com Figura 4.12 a razão sinal/ruído de cada canal sentido *downstream* é de 17 dB para os canais de 1482 e 1487 nm, de 18 dB para canal de 1492 nm e 19 dB para canal de 1497 nm. Já para o sentido *upstream* a relação sinal/ruído é de 14 dB para os canais de 1270 e 1330 nm, de 16 dB para o canal 1290 nm e 12 dB para o canal de 1310 nm, o que pode ser utilizado para descrever a eficiência na qual o transporte da potência óptica transmitida é modulado sobre a fibra óptica o que possibilita a detecção eficiente dos bits 0 e 1 transmitidos na rede.

4.3.3 Resultados experimentais de desempenho sistêmico da rede

Nesta seção apresentamos os resultados do desempenho da rede Stacked-PON com alcance de 58 km. O desempenho é medido em termos BER em função da potência óptica recebida. Uma sequência binária pseudoaleatória (PRBS) com comprimento igual a 2^{23} é usada como informação, sendo gerada pelo equipamento Anritsu Bert Modelo

3620ASONET/ SDH Analyzer. Esse equipamento possui vários módulos e opera na banda de 1300 e 1550 nm, e gera diversas taxas de transmissão, tais como: 52, 156, 622 e 2.488 Mb/s.

A Figura 4.13 apresenta os resultados da avaliação de desempenho, em termos de BER, para os canais da banda S obtidos no ONT. Como descrito no capítulo 3 para efeito de avaliação do sistema proposto as curvas de BER são levantadas primeiramente sem fibras, procedimento este chamado de *Back-to-Back* (BTB) e em seguida é inserido um carretel de fibra de 50 km de extensão conectado ao extensor PON, e em seguida outro segmento de fibra com 8 km de extensão. O posicionamento do extensor neste ponto corresponde a máxima distância obtida para que o sistema funcione adequadamente. Podemos verificar que a penalidade de potência é de cerca de 7 dB para $BER = 1 \times 10^{-12}$ para os canais da banda S e de aproximadamente 4 dB para os canais da banda O.

Estas penalidades são atribuídas principalmente ao processo de batimento sinal com o ruído de *Amplified Spontaneous Emission* – ASE nos receptores ópticos.

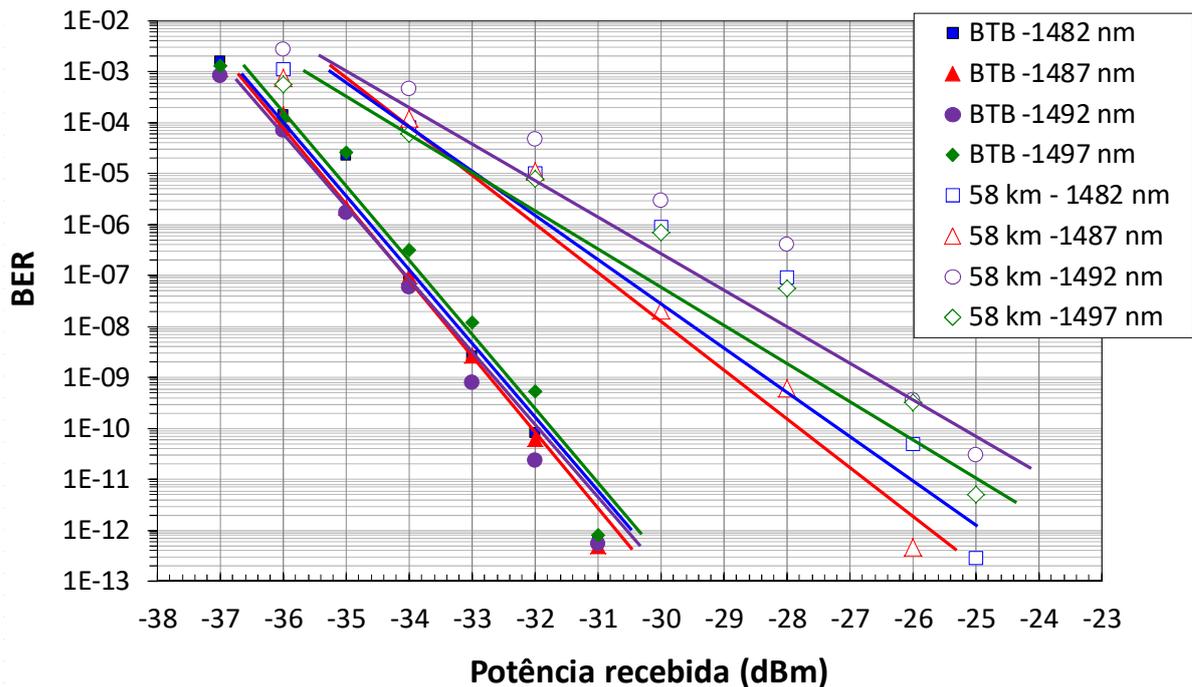


Figura 4.13 – Resultados da avaliação de desempenho BER do extensor PON para os canais da banda S *downstream* medidos no ONT.

A Figura 4.14 apresenta os resultados da avaliação de desempenho, em termos de BER, para os canais da banda O obtidas no OLT. Como comentado anteriormente, as curvas de BER são levantadas primeiramente sem as fibras ópticas e em seguida usando os de

carretéis de fibras. Pode-se verificar que a penalidade de potência é de aproximadamente 4 dB para os canais da banda O. Como mencionado anteriormente estas penalidades são atribuídas ao sinal devido ao processo de batimento sinal/ruído de ASE nos receptores ópticos.

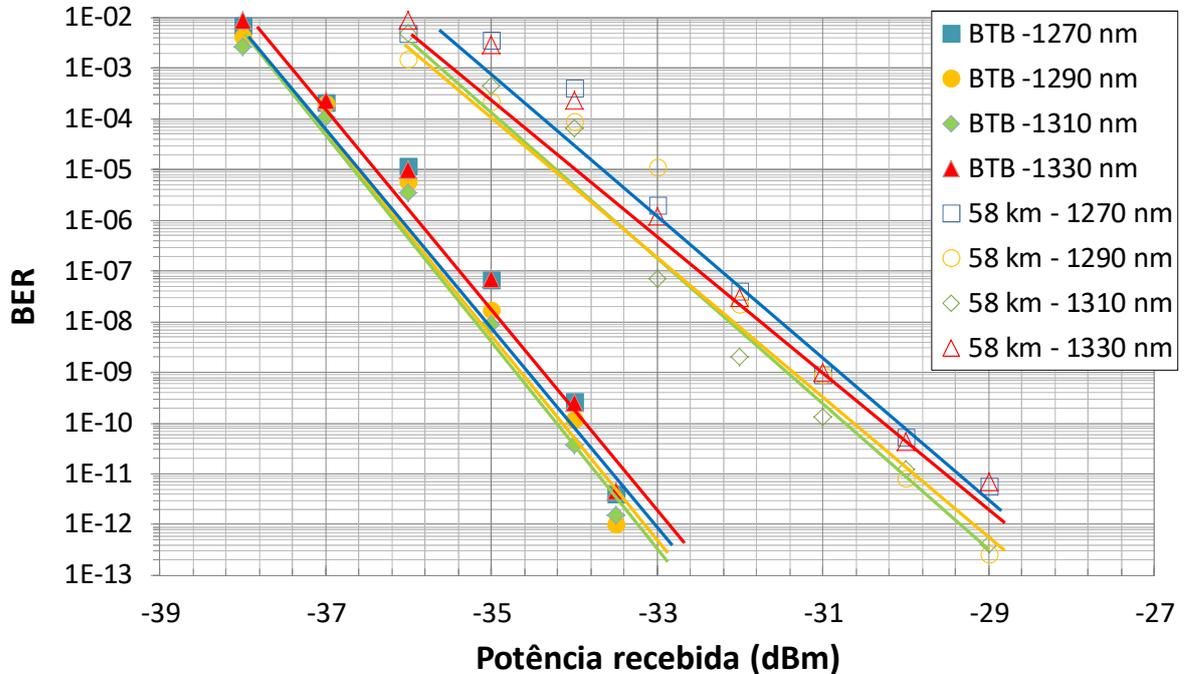


Figura 4.14 – Resultados da avaliação de desempenho BER do extensor PON para os canais da banda O *upstream* medido no OLT.

4.4 Conclusão

Esta seção apresentou os resultados da ampliação de distância das redes Stacked-PON através do uso de amplificadores SOA. Foram detalhados a montagem do extensor óptico, os resultados dos ganhos de sinal obtidos com uso de amplificadores SOAs, o espectro resultante na saída do extensor provenientes da OLT e ON, além dos resultados de desempenho sistêmico da rede e do receptor de ONT em função da variação térmica de um laser OLT.

O bom desempenho do sistema, apesar das penalidades apresentadas em termos de BER, demonstra que este tipo de solução pode ser aplicado para atender as aplicações da rede Stacked-PON até distâncias de 58 km. A viabilidade técnica do uso de extensor na rede externa de acesso, sem comprometer a eficiência do sistema pode ser mostrada e analisada.

CAPITULO 5

5 Extensor alimentado por fibra para redes G-PON/XG-PON sobreposta

5.1 Introdução

O uso de redes PON com maior alcance traz benefícios para as operadoras tais como economia e racionalização na utilização de equipamentos de rede comunicações[88]. As operadoras valorizam a natureza passiva das redes de acesso do tipo PON, entretanto, o modo como os extensores são alimentados acaba gerando problemas adicionais na rede, devido à falta de energia elétrica, roubos de cabos, vandalismo, aumento da manutenção de equipamentos entre outros. O uso de técnica de transmissão de energia na fibra óptica (*Power over Fiber* – PoF) pode ser uma boa alternativa para esta alimentação.

PoF consiste na transmissão de energia por fibra óptica para um local remoto, onde se encontra, por exemplo, o extensor. Neste local é usado um conversor fotovoltaico para converter a potência óptica em potência elétrica. Esta técnica possibilita eliminar o uso de baterias nos nós remotos melhorando a confiabilidade e a segurança da rede.

A alimentação óptica por fibra é uma aplicação relativamente antiga no mundo das comunicações ópticas. O conceito de PoF foi introduzido na década de 70, é uma forma alternativa de levar energia elétrica para circuitos eletrônicos em situações onde os sistemas tradicionais que usam cabos de alimentação metálicos são críticos, de alto custo ou com algum risco envolvido. Esta técnica possui aplicações em diferentes áreas, entretanto há um grande número de aplicações voltadas para alimentar sensores em áreas com grandes interferências eletromagnéticas, com risco a saúde e áreas de alta tensão, como subestações[65].

Em um sistema PoF, como mostra a Figura 5.1, os elementos básicos são: o laser de alta potência que é a fonte de energia para o sistema que será alimentado, a fibra óptica meio físico que levará a energia da fonte até o conversor, e por fim, o conversor fotovoltaico, responsável por converter a energia proveniente da fonte óptica em corrente elétrica para alimentar o circuito.



Figura 5.1 – Sistema PoF constituído de uma fonte de luz óptica- laser diodo (LD), fibra óptica e um fotoconversor

De acordo com o diagrama esquemático da Figura 5.1, a energia elétrica produzida pelo conversor fotovoltaico é utilizada para alimentação de uma carga que pode ser um sensor, ou um circuito, entre outros elementos de baixo consumo. Uma das principais limitações da tecnologia PoF está associada às características do conversor fotovoltaico, tais como, região espectral de operação, eficiência, tipo do material, além do diâmetro do núcleo da fibra óptica e da potência óptica entre outros parâmetros. Para a região espectral de 850 nm os conversores fotovoltaicos mais usados são os feitos de GaAs com eficiência de conversão de 35 a 50% e os conversores fotovoltaicos feitos de Si que apresentam eficiência da ordem de 15%.

Como mencionado anteriormente à técnica de transmissão de energia pela fibra tem uma vasta área de aplicações. Quando aplicado para alimentação de sensores, geralmente são utilizadas duas fibras ópticas, sendo que uma é utilizada para levar a energia ao sensor conectando à unidade de transmissão de energia ao sistema de sensoriamento e a outra é utilizada para recepção da informação proveniente da unidade de sensoriamento, entretanto, é possível utilizar apenas uma fibra óptica utilizando a técnica PoF, para isso é necessário o uso da técnica de multiplexação em comprimentos de onda. Para tanto, a alimentação óptica é escolhida, por exemplo, em 808 nm enquanto que os sinais da unidade remota são transmitidos, por exemplo, em 1300 nm. Filtros ópticos WDM multiplexam ou demultiplexam estes sinais adequadamente em cada extremidade da fibra óptica tornando a transmissão bidirecional. Nesta técnica podem ser utilizadas fibras monomodo ou fibras multimodo para ambas as configurações. Outro parâmetro relevante na transmissão de energia pela fibra óptica utilizando a técnica PoF é o diâmetro do núcleo da fibra óptica, pois o mesmo limita o valor da potência óptica a ser transmitida. Dependendo do núcleo da fibra óptica podem-se transmitir potências que variam de 1 até 30 W, com diâmetros da fibra variando entre 62.5 a 200 μm . Para aplicações com fibra multimodo encontram-se lasers

semicondutores operando na região espectral de 850 nm com potências que vão de 1 até 30 W. Para aumentar a potência disponível para alimentação de um dado sensor ou circuito eletrônico, outros conversores fotovoltaicos podem ser adicionados remotamente em um esquema de recepção em paralelo. Esse arranjo permite aumentar a corrente ou a tensão. Nesta configuração, uma ou mais fibras podem ser utilizadas para levar a energia óptica até os conversores fotovoltaicos.

A proposta de utilização desta técnica de transmissão de energia pela fibra óptica PoF para estender o alcance da rede, é uma alternativa para redes PON, pois, o alcance atual da rede GPON, EPON, XGPON é limitado à no máximo 20 km [11][88][89].

Neste capítulo é apresentada uma proposta de ampliação da distância de alcance de uma rede sobreposta que trabalha no sentido *downstream* (G-PON: 1480-1500 nm e XG-PON: 1575-1580 nm), e no sentido *upstream* (G-PON: 1290-1320 nm e XG-PON: 1260-1280) utilizando extensores PoF para alimentar remotamente os amplificadores SOAs. Amplificadores SOAs podem operar em uma ampla faixa de temperatura que pode chegar até 80°C, de modo que a refrigeração não se faz necessário[80]. A técnica de PoF proposta neste trabalho estende a rede óptica sobreposta a uma distância de 50km. A alimentação do amplificador se dá através de fotoconversão, sendo que a fonte de energia poderá ficar na estação principal ou em uma estação remota. Além disso, o circuito de amplificação pode ser acomodado em uma caixa de emenda óptica. O método convencional para alimentar o extensor também é apresentado do ponto de vista teórico para fins de comparação com a técnica PoF proposta.

Esta proposta difere da apresentada no capítulo 4. Naquela proposta a alimentação ocorreria através da rede de energia elétrica, painel solar e baterias. Já neste capítulo é feita uma proposta de ampliação da distância de uma rede sobreposta utilizando a técnica de transmissão de energia pela fibra óptica a partir de uma estação remota.

5.2 Método convencional para alimentação de extensores de rede óptica PON

Nesta seção detalharemos um dos métodos convencionais para alimentação de extensores PON. Os extensores de redes PON são tratados como um elemento remoto, implantado na última milha da rede FTTH[91]. A Figura 4.1 (opção A) mostra que o extensor pode ser instalado em um armário com ambiente controlado (temperatura constante, sistema

de energia, segurança), que pode ser montado em um terreno, calçada, ou em postes [91]-[94]. Nestes gabinetes ou armários encontram-se os dispositivos óptico-eletrônicos, organizador de fibras, baterias, painéis solares, e/ou a alimentação do sistema obtida da rede de energia local. Os extensores na rede óptica de acesso representam um aumento de 25% do custo de uma instalação segundo [91]. O armário deve ter um sistema de fluxo de ar contínuo com refrigeração, e deve evitar a entrada de água, neve e poeira. O gerenciamento térmico deve levar em conta a carga térmica total dos componentes ópticos e da fonte de alimentação, em condições de plena carga. Além disso, deve também haver o monitoramento do funcionamento dos dispositivos, aterramento e proteção contra picos de tensão geralmente causados por descargas atmosféricas.

A Figura 4.1 (opção B), mostra a alimentação de um nó remoto usando uma fonte de alimentação elétrica ininterrupta (*Uninterruptible Power Supply* - UPS). Neste caso um cabo metálico é usado para levar energia a partir da estação até o extensor instalado. Esse esquema é comumente referenciado como alimentação de linha [93]. É um sistema de energia confiável com *backup* por baterias, geralmente na estação CO, de $-48V_{dc}$ que serve como fonte de energia. O sistema de energia da linha converte na estação $-48V_{dc}$ para $\pm 190V_{dc}$, através de conversores DC - DC. A tensão de $\pm 190 V_{dc}$ injetada sobre o par metálico é levada para o destino, onde esta tensão é reconvertida novamente para $-48V_{dc}$ ou $-12V_{dc}$ por um conversor elétrico DC - DC. O tipo de cabo, a distância a partir da CO, e o consumo de energia são parâmetros cruciais no projeto da alimentação remota. A queda de tensão nos pares de cobre é um dos principais problemas neste método de alimentação.

5.3 Extensores alimentados por fibra óptica

Na Figura 5.2 é mostrada uma configuração simples de um sistema de alimentação por fibra óptica utilizada para alimentar um amplificador de forma a estender uma rede PON. Esse sistema consiste de: uma fonte de energia óptica (*Optical Power Supply* - OPS) com um circuito de alimentação do laser, e um laser de alta potência, uma fibra óptica que transporta a energia até o extensor, onde, um conversor fotovoltaico (*Photovoltaic* - PV) converte a energia óptica em energia elétrica, e alimenta um amplificador óptico que é utilizado para amplificar os sinais de *downstream* e *upstream* da PON. A Figura 5.2 apresenta apenas uma forma de alimentação, entretanto, é possível usar um diodo laser extra e outras fibras para

aumentar a energia transmitida a partir da OPS, sendo também possível conectar outras PVs para aumentar a energia convertida para alimentação do amplificador.



Figura5.2–Técnica *Power over Fiber* utilizada para alimentar um amplificador.

A Figura5.3 ilustra duas possibilidades de alimentação do extensor por fibra óptica, a partir da CO (opção A) ou a partir do nó remoto (opção B). A proposta apresentada na opção A é similar a técnica de alimentação por par metálico mostrado na Figura4.1. Entretanto, tal opção não apresenta vantagens, pois, o sistema GPON tem um alcance de 20 km e somente a partir desta distância é que faz sentido a instalação de extensores. Assim alimentar o extensor com fibra óptica a partir da CO não se mostra vantajoso, pois como será vista posteriormente os níveis de potência recebidos no ponto remoto a partir da CO seriam muito baixos. Na opção B a OPS geralmente está instalada em um ponto de presença, tais como: shopping, condomínios fechados e/ou salas alugadas[92].

Neste caso, o sinal transmitido a partir da CO através da fibra óptica já percorreu uma grande distância e, portanto o nível de sinal está baixo e não possui potência suficiente para serem detectados pelos equipamentos dos usuários. Além disso, a distância entre o ponto de presença e o extensor é bem menor quando comparado com a Figura4.1, o que se mostra viável, e bem mais atrativo.

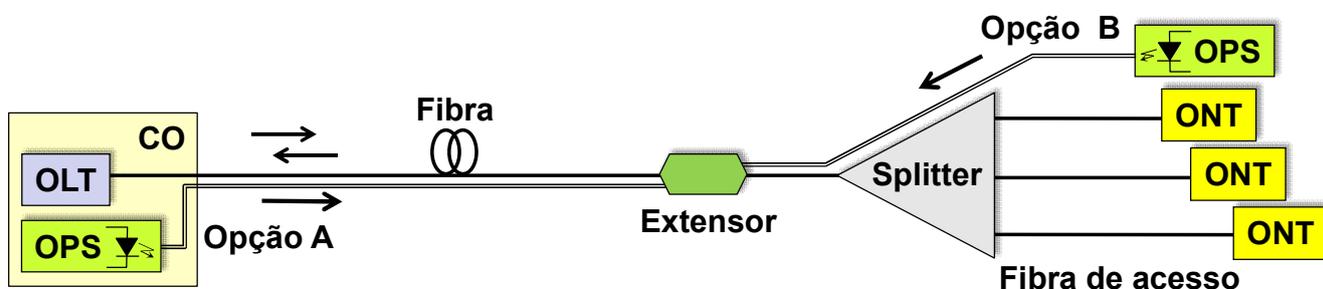


Figura5.3- Proposta de alimentação dos extensores utilizando SOA.

A potência entregue em um sistema PoF para o extensor é determinada através dos parâmetros de seus componentes: laser, fibra e PV. A potência fornecida a um extensor (P_{EXT}) é dada pela expressão:

$$P_{EXT} = P_{LD} \alpha_{Fiber} \eta_{PV} \quad [W], (1)$$

onde, P_{LD} é a potência do LD, α_{Fiber} é a perda total da fibra e η_{PV} a eficiência da PV e a perda total da fibra α_{Fiber} é dada pela expressão:

$$\alpha_{Fiber} = 10^{(-L\alpha_{dB}/10)}, (2)$$

onde, L é a distância do link em quilômetros e α_{dB} é a atenuação da fibra em dB/km. Assim, como os conversores fotovoltaicos possuem uma eficiência de conversão da ordem de 15% para silício e 35 a 50% para GaAs e a fibra óptica apresenta uma atenuação intrínseca do sinal enviado que depende da distância e do tipo de fibra óptica envolvida, a potência entregue para o extensor P_{EXT} é sempre menor que a potência óptica fornecida pelo laser.

$$P_{LD} \leq P_{MaxFiber} \quad (3)$$

5.4 Descrição da técnica de alimentação do extensor por fibra óptica.

Na técnica de alimentação de um extensor PON utilizando PoF utilizou-se uma fibra óptica multimodo de 62.5 μm de núcleo e 0,22 de abertura numérica. Esta fibra conduz um sinal com uma potência óptica inicial de 2 W operando em um comprimento de onda de 850 nm.

Na Figura 5.4, é mostrado um esquemático da técnica PoF utilizada para gerar a corrente elétrica necessária para alimentação dos amplificadores ópticos utilizados, tanto no sentido *downstream* como no *upstream*. O extensor PON tem como principal objetivo

obter ganho de sinal para propiciar a extensão da rede sobreposta utilizando a tecnologia XGPON e GPON usando o consumo de energia no extensor no mínimo. No circuito proposto na Figura 5.4 são utilizados dois amplificadores SOAs operando na banda de 1310 e 1550 nm, os dispositivos são eletricamente ligados em série. Os SOAs têm características elétricas semelhantes e são alimentados por uma única PV.

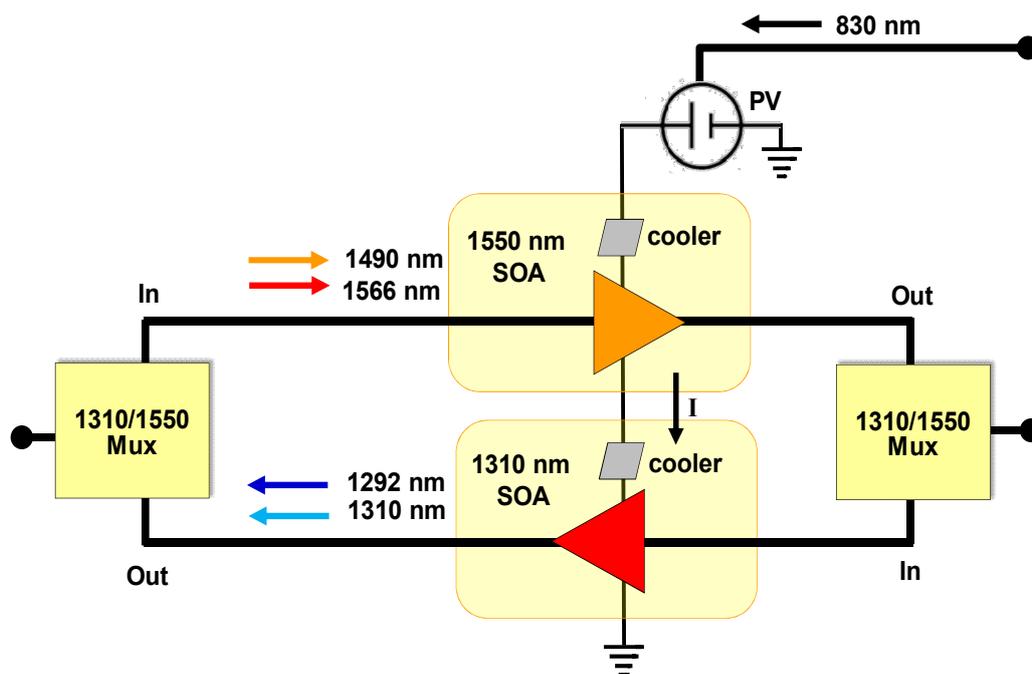


Figura 5.4 - Circuito óptico utilizado na alimentação dos SOAs

O consumo de energia do extensor é minimizado sem comprometer os sinais de *downstream* e *upstream*. A mesma corrente (I) fornecida pela PV passa por ambos amplificadores SOAs. Os amplificadores SOAs são resfriados pela mesma corrente em série com os SOAs passando pelos dispositivos que tem essa função conhecido como Peltier, que estão dentro da cápsula dos SOAs. Embora circuitos de monitoração e de controle não sejam utilizados na presente proposta, é possível controlar e monitorar o extensor usando, por exemplo, a técnica descrita em [65], onde é demonstrado que o controle de potência óptica dos lasers remoto pode ser realizado usando a técnica PoF com uma variação inferior a 0,2 dB, quando a temperatura varia de 23 – 100°C. Em [82] e [83] demonstra-se que cerca de 90% da energia em redes de cabos metálicos é consumida pelas redes de acesso, e que as redes ópticas têm um elevado potencial de redução no consumo de energia, devido à utilização de equipamentos ópticos que requerem menos energia. Desta forma, os amplificadores SOAs e

sua aplicação como extensores PON vão ao encontro de se conseguir redes de telecomunicações com maior economia de energia, ademais a utilização de SOAs em ambiente de temperatura não controlada, não é crítica.

5.5 Arranjo experimental de transmissão de energia na fibra óptica para alimentação do extensor proposto para rede sobreposta.

Na Figura 5.4, o PV utilizado é um conversor óptico – elétrico baseado em tecnologia GaAs para aplicação PoF. No experimento proposto foram utilizados os seguintes componentes:

- O modelo PV utilizado é o PPC-4E, fornecido pela empresa JDSU, seus parâmetros elétricos típicos são 4,3 V de tensão de circuito aberto (V_{oc}) e 140 mA de corrente de curto-circuito (I_{sc}) até 500 mW de potência elétrica.
- Amplificador SOA 1550 nm é OPB-11-15, fornecido pela Amphotonix, e o modelo de SOA 1310 nm é o IP-SAD 1304 fornecido pela Imphenix. As características típicas destes dispositivos são: potência máxima de saturação igual a 11 dBm, figura de ruído máximo 7 dB, dependência máxima polarização 0,5 dB, e *ripple* máximo de 0,3 dB.
- Multiplexador WDM 1310/1550 nm é o modelo WW1L3CS fornecido pela Cube Optics. As características típicas são: perda máxima de inserção de 1,0 dB, e comprimento de onda de 1260–1360 nm e 1460 – 1620 nm.
- O laser de potência utilizado é o 2486-L4, fornecido pela JDSU, cujas características típicas do comprimento de onda de 830 nm, potência máxima de saída igual a 2W, com fibra multimodo de 62.5 μm núcleo e 0,22 de abertura numérica.

A Figura 5.5 mostra o diagrama em bloco do trabalho proposto para verificar a viabilidade do uso de extensor alimentado por fibra em uma rede sobreposta utilizando GPON e XGPON [102].

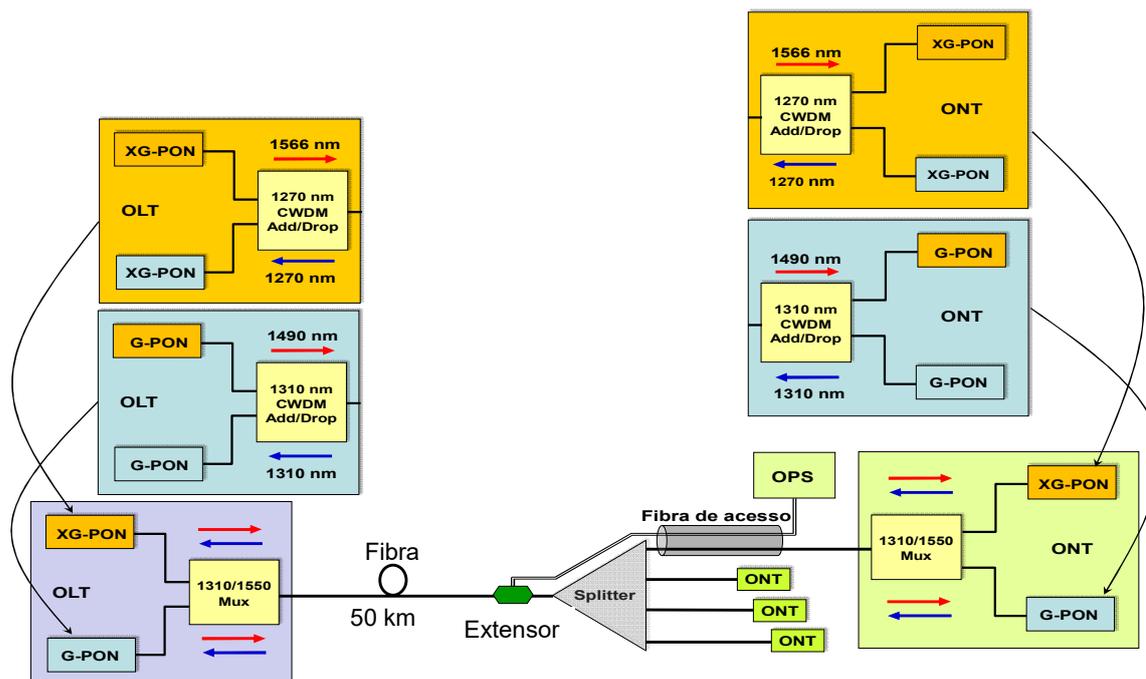


Figura5.5 - Montagem para teste do Extensor PON.

A rede é composta por Add/Drops, operando nas bandas de transmissão do GPON e XGPON que multiplexam e demultiplexam os sinais de *downstream* e *upstream*. Um acoplador de banda (1310/1550 mux) é utilizado para juntar os sinais das diferentes tecnologias de rede, além do extensor alimentado por fibra.

Na próxima seção será apresentada uma análise do consumo de energia elétrica dos SOAs (polarização direta de tensão x corrente de polarização direta) em função do ganho óptico para três níveis de potência de entrada (P_{in}) por comprimento de onda.

A extensão da rede óptica proposta neste trabalho é constituída de fibras ópticas, acopladores, add-drops e *splitters*, e do extensor alimentado por fibra óptica. A análise é realizada levando em consideração o compartilhamento de uma infraestrutura de rede do tipo GPON associada a uma rede do tipo XGPON.

A operação em uma única fibra óptica é possível através do uso de dois sinais distintos em comprimento de onda. A transmissão do sinal *upstream*, ou seja, do usuário para a central, é feita na banda espectral de 1.300 nm (de 1260 a 1360 nm) tanto na tecnologia GPON como para a XGPON, e a transmissão do sinal *downstream*, ou seja, da central para os usuários, é feita na banda espectral de 1.490 nm (de 1480 a 1500 nm) para o sinal GPON e na banda espectral de 1577 nm (de 1575 a 1578 nm) para XGPON.

O sinal XGPON utiliza um comprimento de onda de 1566 nm, conforme mostrado na Figura 5.5. Os comprimentos de ondas de *downstream* 1490 nm e 1566 nm das OLT's GPON e do XGPON, respectivamente, são multiplexados por WDM. Em seguida, eles são transmitidos no sentido *downstream*, e após percorrerem 50 km passam pelo amplificador SOA (operando na faixa de 1500 nm).

Este amplificador é alimentado eletricamente após a conversão de energia utilizando a técnica de PoF, conforme apresentado na Figura 5.4. Os sinais de *downstream* são amplificados e, na sequência, passam por um splitter 1x32 e em seguida são demultiplexados chegando às respectivas ONT's.

Os comprimentos de onda, no sentido *upstream* são gerados a partir das respectivas ONT's e multiplexados por um acoplador WDM. Em seguida esses sinais passam pelo splitter 1x32 e chegam ao amplificador SOA (operando na faixa de 1300 nm) que é alimentado remotamente por uma fonte de luz óptica (OPS) distante 1 km, conforme Figura 5.5. Os sinais de *upstream* amplificados pelo extensor percorrem os 50 km da fibra para em seguida serem demultiplexados e enviados às respectivas OLT's.

Podemos observar na Figura 5.6 que no arranjo de transceptores GPON e XGPON, a OPS localiza-se em uma estação remota a aproximadamente 1 km do ponto de amplificação.

A Figura 5.6(a) ilustra a montagem para testar o extensor alimentado por fibra óptica. Nesta montagem temos: (1) carretel de fibra óptica com 50 km, (2) *splitter* de 1x32, (3) OPS, (4) extensor alimentado por fibra, (5) acopladores de banda, (6) Add-Drops, (7) analisador de BER que gera uma sequência PRBS de comprimento $2^{31}-1$ bits em uma taxa de 10 Gb/s. Já a Figura 5.6 (b) ilustra fotos da montagem onde são detalhados: (7) analisador de BER para um sinal elétrico de PRBS de 2.5 Gb/s e 10 Gb/s, e (8) analisador de espectro óptico (OSA).

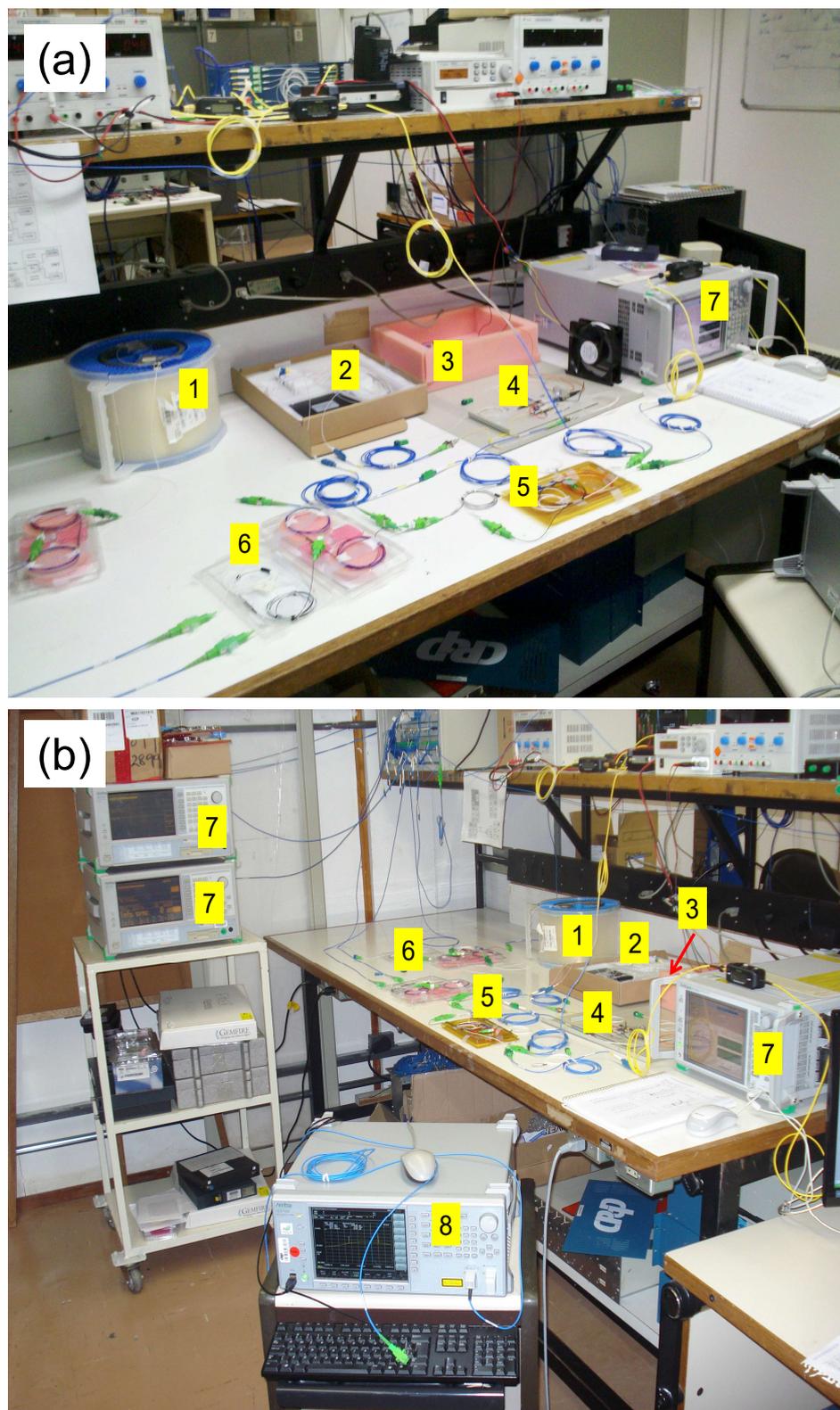


Figura5.6 - Montagem de testes do sistema de alimentação dos extensores usando PoF, em (a) temos a visão a partir do analisador de BER e em (b) temos a visão a partir do OSA.

A Figura 5.7 apresenta uma foto de extensor alimentado por PoF onde podem ser vistos em (1) a fonte óptica de energia OPS, (2) o fotoconversor, e (3) os amplificadores SOAs de 1300 nm e de 1500 nm. A fonte óptica de energia tem capacidade de gerar até 2W. O conversor fotovoltaico possui uma eficiência em torno de 39%, porém suficiente para alimentar eletricamente os amplificadores SOAs. O circuito extensor de rede PON construído pode ser acomodado em uma caixa de emenda óptica.

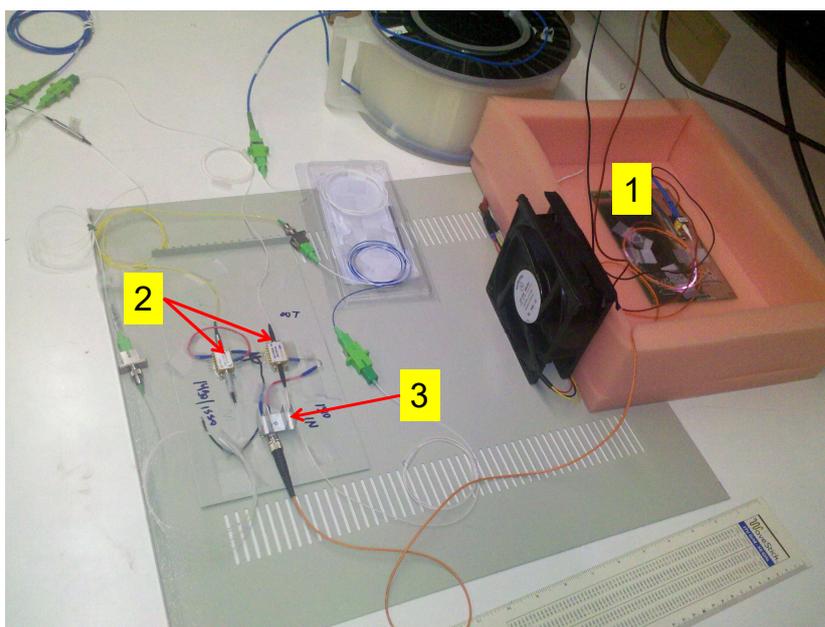


Figura 5.7 - Detalhe extensor alimentado por fibra óptica

5.6 Resultados obtidos do extensor óptico para rede sobreposta

Nesta seção é feita uma análise dos parâmetros da potência convertida no extensor em função da distância e do desempenho do extensor baseado em SOAs, em termos de taxa de erro de *bit* (BER) em função da potência óptica recebida. Ambos os sistemas XG-PON/G-PON operam de forma simultânea, em uma montagem usando um divisor de 1:64 e alcance de 50km. As características de ganhos SOAs são também apresentadas como uma função do comprimento de onda e de potência consumida.

5.6.1 Análise teórica da potência convertida em função da distância

A Figura 5.7 apresenta curva de desempenho teórico da potência convertida em função da distância “L” do enlace óptico para dispositivos optoeletrônicos e ópticos disponíveis. As curvas foram traçadas utilizando as equações (1), (2) e (3), levando-se em conta as seguintes configurações:

- Fibra monomodo com núcleo de diâmetro de $9\ \mu\text{m}$ em $1490\ \text{nm}$, $P_{LD} = 0.5\ \text{W}$, potência óptica máxima transmitida sem causar danos à fibra óptica ($P_{\text{MaxFiber}} = 1.0\ \text{W}$), $\alpha_{\text{dB}} = 0.25\ \text{dB/km}$, $(\eta_{\text{PV}}) = 0,2$.
- Fibra multimodo com núcleo de diâmetro de 62.5 , 105 e $200\ \mu\text{m}$ em $808\ \text{nm}$, $P_{LD} = 2$, 4 e $7\ \text{W}$ e potências óptica transmitidas sem causar danos à fibra óptica ($P_{\text{MaxFiber}} = 2$, 4 , $8\ \text{W}$), $\alpha_{\text{dB}} = 3.0\ \text{dB/km}$, $(\eta_{\text{PV}}) = 0,35$.

As fibras multimodo de maior diâmetro são mais adequadas para a transmissão de altos níveis de potência óptica do que as fibras monomodo. Em tese as fibras multimodo poderão ser incluídas no cabo óptico, juntamente com as fibras ópticas utilizadas no sistema de comunicação com um pequeno custo adicional segundo a proposta feita em [84], possibilitando a alimentação de extensores remotos usando a técnica PoF.

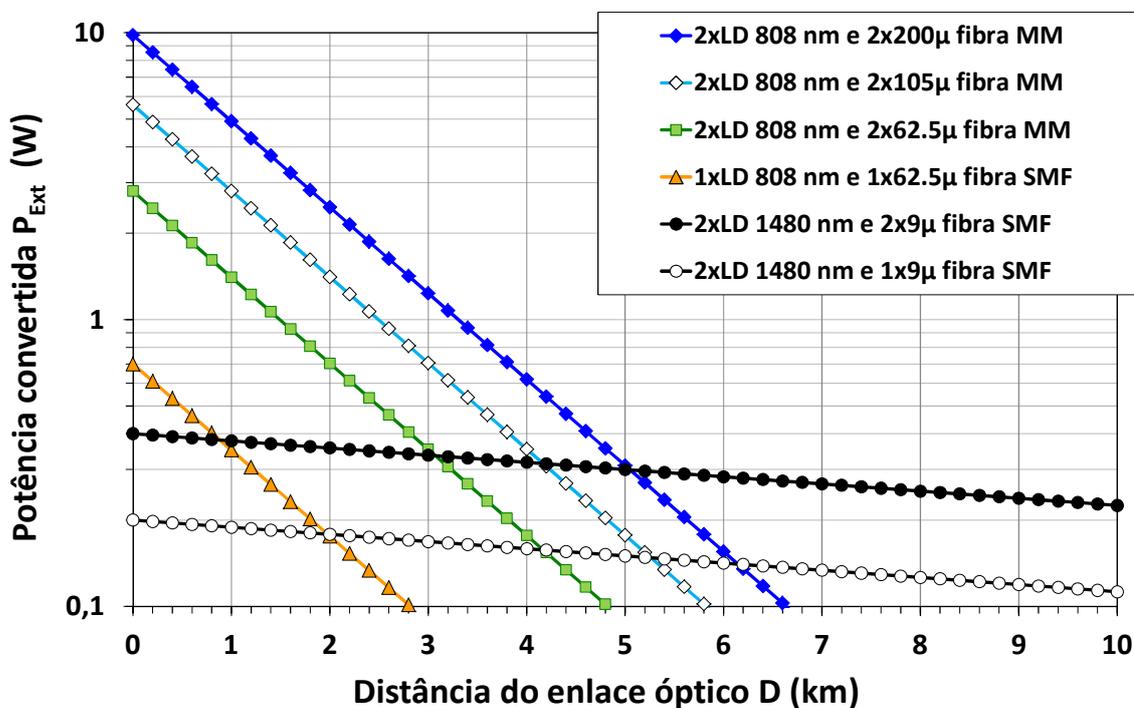


Figura 5.8 - Simulação da máxima potência elétrica convertida remotamente em função da distância de enlaces PoF e dos tipos de fibras utilizadas

Algumas observações sobre gerenciamento de energia são importantes. Um parâmetro crucial do extensor é o seu consumo de energia, além disso, a fonte principal precisa ter proteção contra falhas, então normalmente são usados com baterias como *nobreak*.

O consumo de energia do extensor deve ser minimizado, pois este deve suportar o gerenciamento completo de suas configurações, a monitoração de seu desempenho e produzir relatórios das falhas[105]. Por exemplo, um método simples para prover estes requisitos é permitir ao equipamento extensor ter as funções de monitoramento semelhante à de um ONT. Entretanto, tais funções requerem um circuito eletrônico mais complexo, o que aumenta o consumo de energia elétrica.

Tipicamente a potência consumida pelos extensores está entre 5 e 8 W[107][108]. Utilizando uma única fibra óptica para fornecer energia, o sistema não poderá ter função de backup quando comparado com os sistemas elétricos tradicionais para sites remotos.

De acordo com as curvas da Figura 5.8 é possível concluir que a potência convertida estará disponível para o extensor somente para curtas distâncias ≤ 1 km, ou seja, implica no uso da opção B do uso do extensor mostrado na Figura 5.3, já que a distância típica para uso do extensor é a partir de 20 km da CO conforme ilustra a Figura 5.3 opção A.

O uso de amplificadores ópticos semicondutores reflexivos (RSOAs) como extensores para amplificar simultaneamente os sinais de *downstream* do G-PON e XG-PON seria uma alternativa bem interessante, pois os RSOAs são dispositivos que apresentam custo atrativo e menor consumo de energia do que os SOAs tradicionais.

Os RSOAs são tradicionalmente utilizados como fontes *colorless* modulados em aplicações WDM – PON, entretanto em [85], eles foram utilizados como amplificadores de onda contínua.

A Figura 5.9 mostra em (a) a eficiência da fotoconversão para uma dada carga em função da potência óptica convertida, já em (b) temos a tensão V_{ext} e corrente I_{ext} gerada pela célula PV, em função da potência óptica P_{Sup} que é fornecida a partir de uma fibra multimodo e de um laser de potência. A potência máxima de saída do laser utilizado é de 2 W.

Para este nível de potência transmitida à tensão e a corrente direta do laser são 1.71 V e 2.46 A, respectivamente.

Os parâmetros da célula fotovoltaica, tais como, a eficiência η_{PV} em % da célula PV em função de uma dada carga Z_{ext} do circuito, é dada pela equação abaixo:

$$\eta_{PV} = \left(\frac{100V_{EXT}I_{EXT}}{P_{SUP}} \right) \%, (4)$$

$$Z_{EXT} = \frac{V_{EXT}}{I_{EXT}}, (5)$$

onde, V_{EXT} e I_{EXT} são, respectivamente, a tensão e a corrente no extensor fornecido pela PV. Z_{EXT} corresponde à carga associada do circuito.

A carga é dependente da potência de alimentação. Isto pode ser explicado devido ao comportamento físico da PV [106].

A corrente gerada pela PV possui uma resposta linear em relação ao fornecimento de potência óptica, enquanto que, a tensão tem resposta quase linear.

Como ilustra a Figura 5.9, supondo que a potência óptica P_{SUP} que chega à célula PV, utilizando fibra óptica, seja de 1W, o qual corresponde a um enlace de distância D de 1 km, onde, a potência do laser óptico é P_{LD} de 2 W, os parâmetros do extensor obtidos são: $V_{Ext} = 3.14V$, $I_{Ext} = 125 \text{ mA}$ e $\eta_{PV} = 39.25\%$.

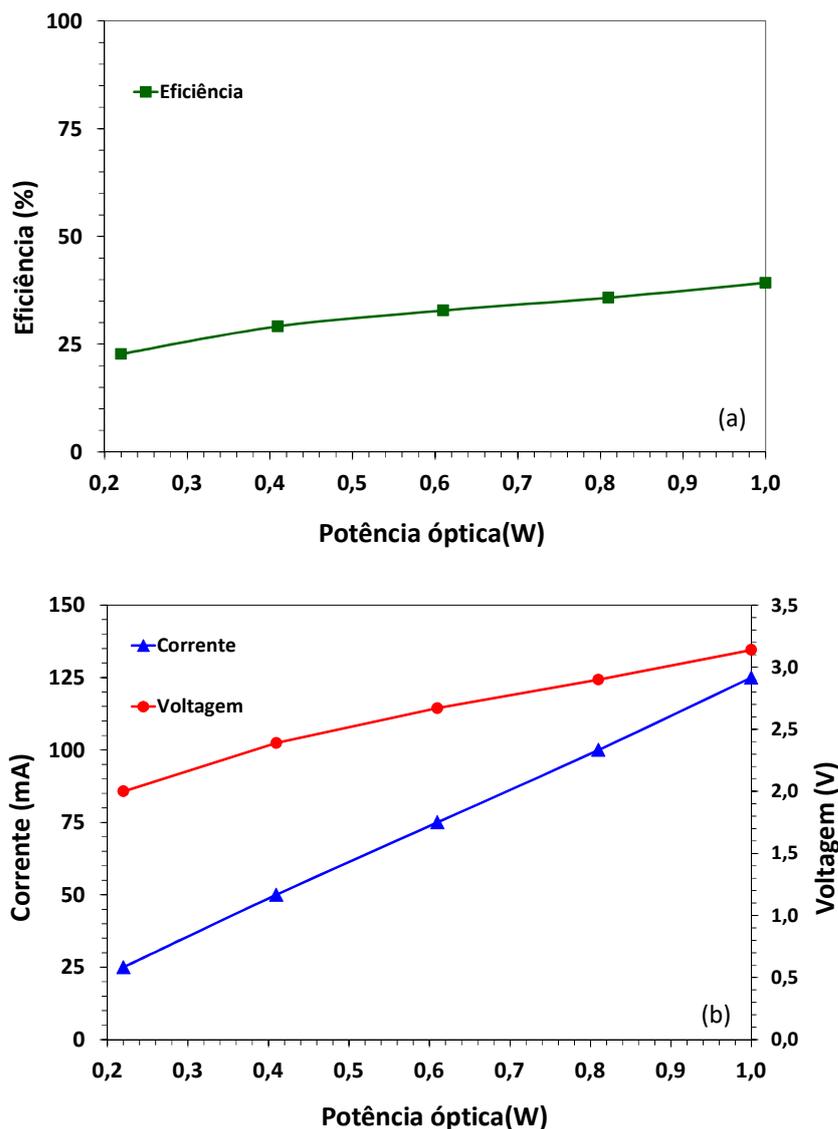


Figura 5.9—(a) Eficiência da fotoconversão em função da potência óptica e em (b) Corrente e tensão do extensor em função da potência óptica

É interessante comparar esses resultados com os de um sistema convencional, onde a alimentação é realizada via a rede elétrica para que se possa estabelecer uma comparação do alcance. De acordo com [93], a distância da ligação elétrica máxima utilizando par metálico, é dada pela equação abaixo:

$$D_{\max} = \frac{(P_{UPS} - P_{EXT})}{I^2 * CGR} \quad (6)$$

onde, P_{UPS} é a fonte de energia elétrica e CGR é a resistência da bitola ambos relacionados ao cabo metálico. Considerando os mesmos níveis de tensão e corrente

convertidos de $3.14\text{V} \times 0.125\text{ A}$, respectivamente, temos que para o cabo metálico a P_{EXT} é = 0.3925 W ($3.14\text{V} \times 0.125\text{ A}$). Para P_{SUP} de 1 W , $P_{\text{UPS}} = P_{\text{OPS}} = 4.2\text{ W}$ ($1.71\text{ V} \times 2.46\text{A}$) para $P_{\text{LD}} = 2\text{ W}$, e escolhendo um cabo de cobre 24 AWG com $\text{CGR} = 0.1684\Omega/\text{m}$, a distância máxima da ligação de acordo com a Eq. (6) é $1,447\text{ km}$, o que é um pouco maior que o valor da distância de 1 km previamente citada.

Deve-se salientar que a potência de uma placa de linha pode chegar a valores de até 100 W usando fontes de tensão para 380 V_{DC} através do par de cabos [93], no entanto a corrente máxima recomendada no cabo é de aproximadamente $0,255\text{ A}$, por razões de segurança o que torna o sistema de fornecimento de energia pelo par metálico mais complexo.

5.6.2 Caracterização de ganho do extensor alimentado por fibra.

A fim de investigar a viabilidade do extensor da rede G-PON/XG-PON, um conjunto de medições utilizando a fibra óptica para alimentação do amplificador óptico no nó remoto foram realizadas utilizando a configuração apresentada Figura 5.10. As medições realizadas foram feitas em termos de ganho nas faixas operacionais dos sistemas XG-PON e G-PON versus a potência óptica de alimentação para alguns níveis de potência de sinal de entrada (P_{in}).

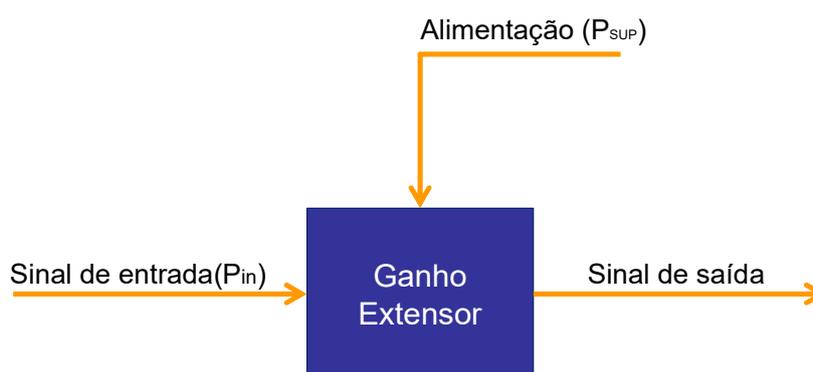
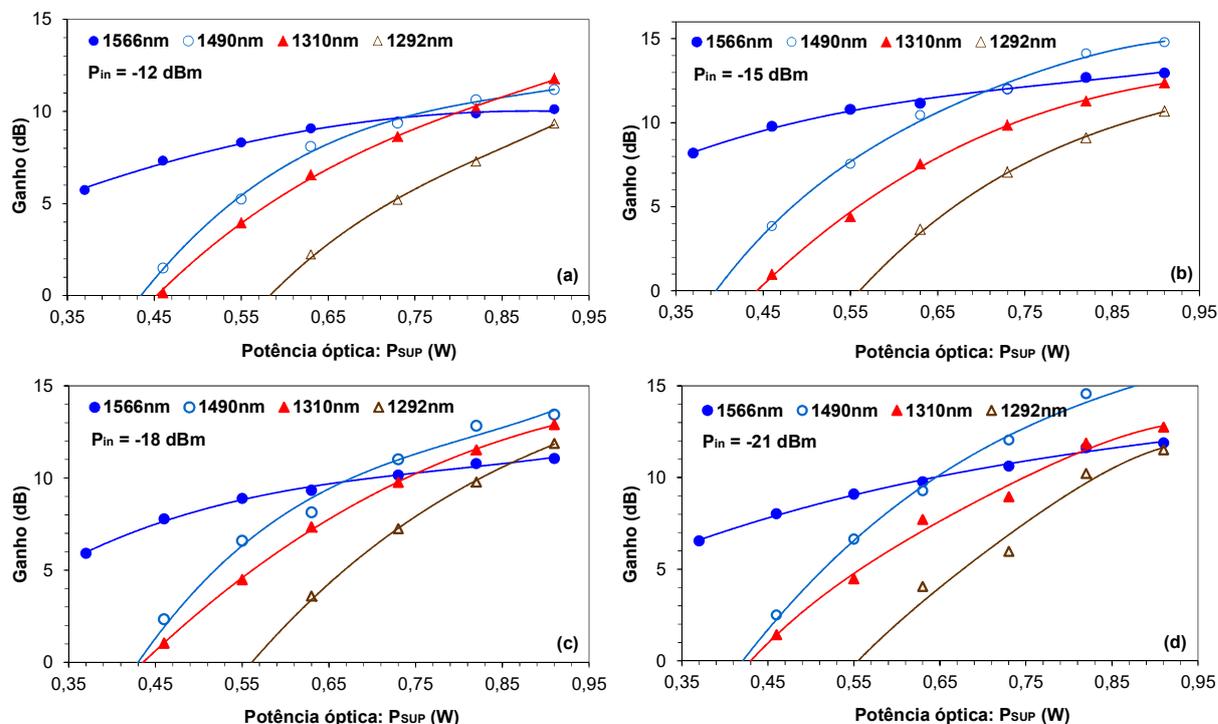


Figura 5.10 - Diagrama esquemático para análise de desempenho do extensor

Os valores escolhidos de potência de sinal de entrada P_{in} foram -12 dBm , -15 dBm , -18 dBm e -21 dBm para os sinais *downstream* e *upstream*. A variação da potência óptica de

alimentação (P_{SUP}) implica em alterar os níveis de corrente e tensão após a conversão fotovoltaica no extensor. Essa variação influencia diretamente no ganho do extensor, conforme mostrado nas Figuras 5.11 (a), (b), (c) e (d).

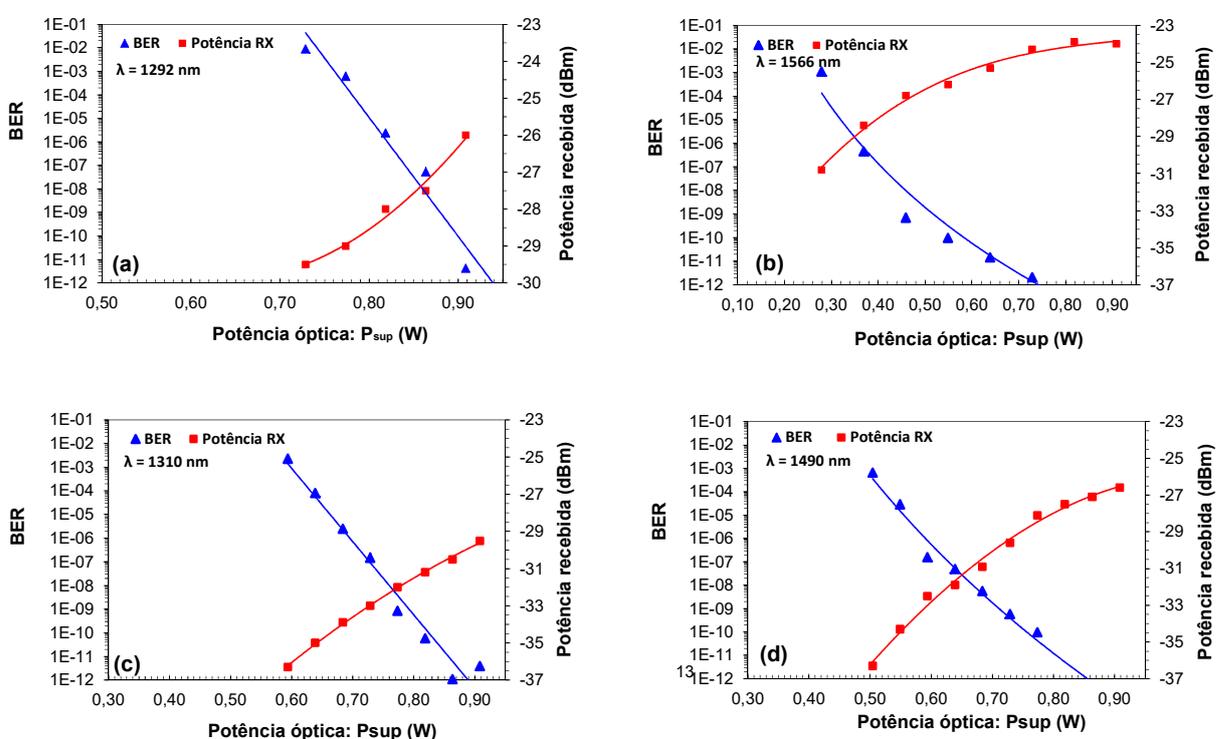


Figuras 5.11 - Ganho do sinal em função da potência óptica na entrada do extensor P_{SUP} , para os valores de potencial de sinal de entrada P_{in} : (a) $P_{in} = -12$ dBm, (b) $P_{in} = -15$ dBm, (c) $P_{in} = -18$ dBm, e (d) $P_{in} = -21$ dBm

De acordo com os resultados apresentados nas Figuras 5.11(a), (b), (c) e (d) para o valor de potência óptica de alimentação P_{Sup} de 0,70 W têm-se um ganho de aproximadamente 5 dB no extensor em relação a potência do sinal de entrada. Neste caso o extensor está a uma distância de aproximadamente 1 km da fonte de alimentação óptica para simular um enlace óptico entre a fonte de luz óptica e o extensor. Os dados obtidos são baseados no cenário ilustrado na Figura 5.3 opção B, onde a fonte de potência óptica (P_{SUP}) poderia estar instalada em um ponto de presença, tal como: shopping, condomínio fechado e/ou sala alugada.

Os valores de ganho dos extensores podem ser usados para calcular o orçamento de potência óptica na extensão da rede. A avaliação de desempenho foi dividida em duas partes.

A primeira em função da potência óptica da fonte P_{SUP} , tendo como parâmetro de BER igual a 10^{-12} . Enquanto que na segunda os resultados de BER são dados em função da variação da potencia óptica do sinal. As Figuras 5.12 (a) e (b) apresentam a variação da potência óptica nas ONT e OLT nos sentidos *downstream* e *upstream* para a XG-PON e as Figuras 5.12 (c) e (d) mostram a mesma variação para a GPON. Podemos notar nas Figuras 5.12 que há uma tolerância em torno de 10% quanto ao maior valor de P_{SUP} (em torno de 0,9W) na qual a BER é inferior a 10^{-10} nos receptores (exceto para sinal de *upstream* XG-PON), o qual é um valor aceitável para sistemas XG-PON e G-PON.



Figuras 5.12 - A avaliação do desempenho do sistema proposto para: (a) XG-PON *upstream*, (b) XG-PON *downstream*, (c) GPON *upstream* (d) GPON *downstream*

De acordo com os resultados apresentados na Figuras 5.12, o extensor deverá ser projetado de tal forma que potencia óptica fique dentro de uma faixa de operação que não comprometa a transmissão de informações até o usuário. Alterações na potência óptica P_{sup} influenciam no ganho do extensor tanto no sentido *downstream* como *upstream* comprometendo a BER.

5.6.3 Resultados experimentais do desempenho sistêmico da rede

Uma vez realizada a análise de ganho em função da variação da potência óptica P_{sup} , passou-se para a avaliação de desempenho do sistema GPON/XG-PON em termos de BER versus a variação de potência de entrada no receptor. A potência óptica P_{sup} que alimenta o extensor, foi ajustada e fixada de tal forma a ter 1 W de potência na PV (equivalente a uma distância da OPS de 1 km). A Figura 5.13 mostra o espectro de potência de saída do extensor colocado a 50 km do OLT no sentido *downstream* e *upstream*. Na obtenção deste espectro a potência do sinal de entrada no extensor foi de $P_{in} \approx -15$ dBm para os canais *downstream*, e de $P_{in} \approx -18$ dBm para os canais *upstream*. As potências de saída no espectro de 1310 variam entre -8 dBm e -5 dBm, e no espectro de 1550 nm variam entre -4 dBm e -3 dBm.

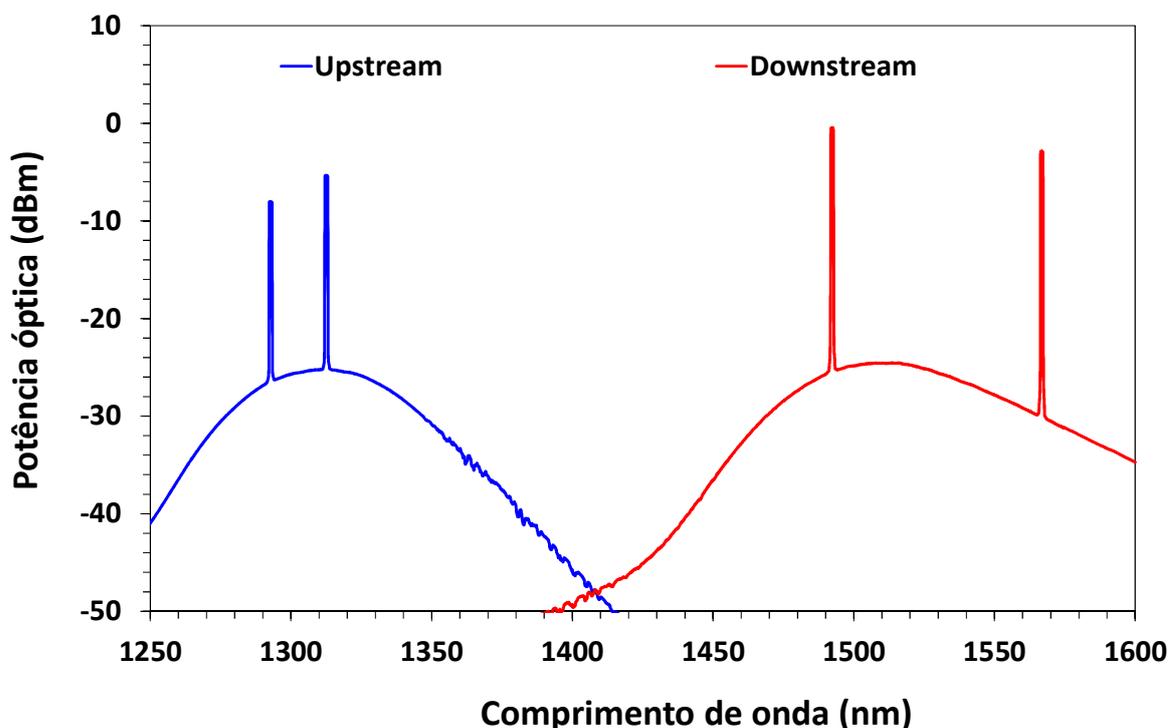


Figura 5.13 - Espectro da potência de saída do extensor a 50 km do OLT.

De acordo com a Figura 5.13, a razão sinal/ruído no sentido *downstream* é maior que 17 dB para os canais de 1290 e 1310 nm, e maior que 22 dB no sentido *upstream* para canais de 1492 nm e 1566 nm. A Figura 5.14 e Figura 5.15 apresentam curvas de taxa de erro de bit (BER) em função da potência óptica recebida para ambos os receptores dos sistemas GPON e XG-PON. Como mencionado anteriormente, para efeito de comparação da eficiência do sistema proposto, as curvas de BER são levantadas primeiramente sem fibra óptica, ou

seja, *Back-to-Back* (BTB), e em seguida é inserido um carretel de fibra de 50 km e a BER é obtida para tal distância.

A Figura 5.14 apresenta a avaliação de desempenho na direção *upstream* para os sistemas GPON e XGPON para uma taxa de transmissão de 2.5 Gb/s. Podemos observar uma penalidade de 3 dB para o sistema GPON e 7 dB para o sistema XGPON para uma BER de 10^{-11} . As penalidades observadas para os canais *upstream* e *downstream* são atribuídas à emissão espontânea amplificada (ASE), que gera ruídos de batimento de sinal – ASE nos receptores ópticos. A penalidade para o canal de XG-PON (1292 nm) é mais elevada do que do canal GPON devido à sua pior relação sinal/ruído conforme mostrado na Figura 5.13.

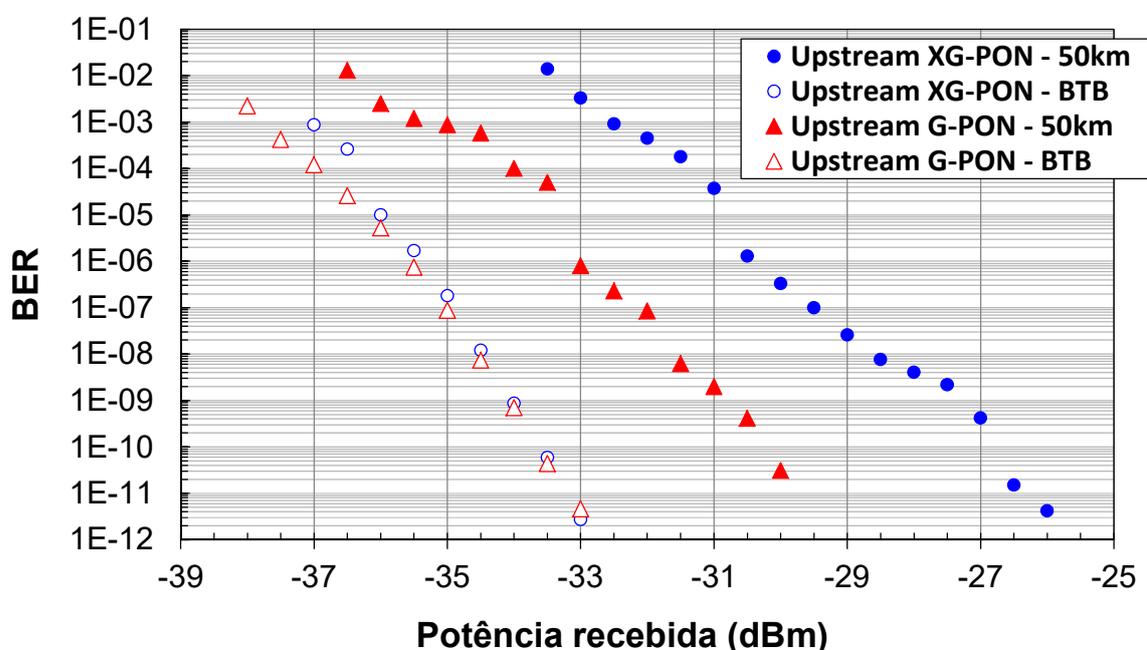


Figura 5.14- Avaliação de desempenho em termos de BER medidos na OLT

Já na Figura 5.15 temos os resultados obtidos de avaliação de desempenho na direção *downstream* para os sistemas GPON e XGPON para uma taxa de transmissão de 2.5 Gb/s e 10 Gb/s, respectivamente. Podemos observar uma penalidade de 0,5 dB para o sistema GPON e 2 dB para o sistema XGPON para uma BER de 10^{-12} . Da mesma forma como mencionado para o sinal *upstream*, as penalidades observadas nos canais de *downstream* são atribuídas ao processo de batimento de sinal com a emissão espontânea amplificada e possivelmente uma pequena contribuição de dispersão cromática para o canal de XG-PON (1566 nm) em 10 Gb/s.

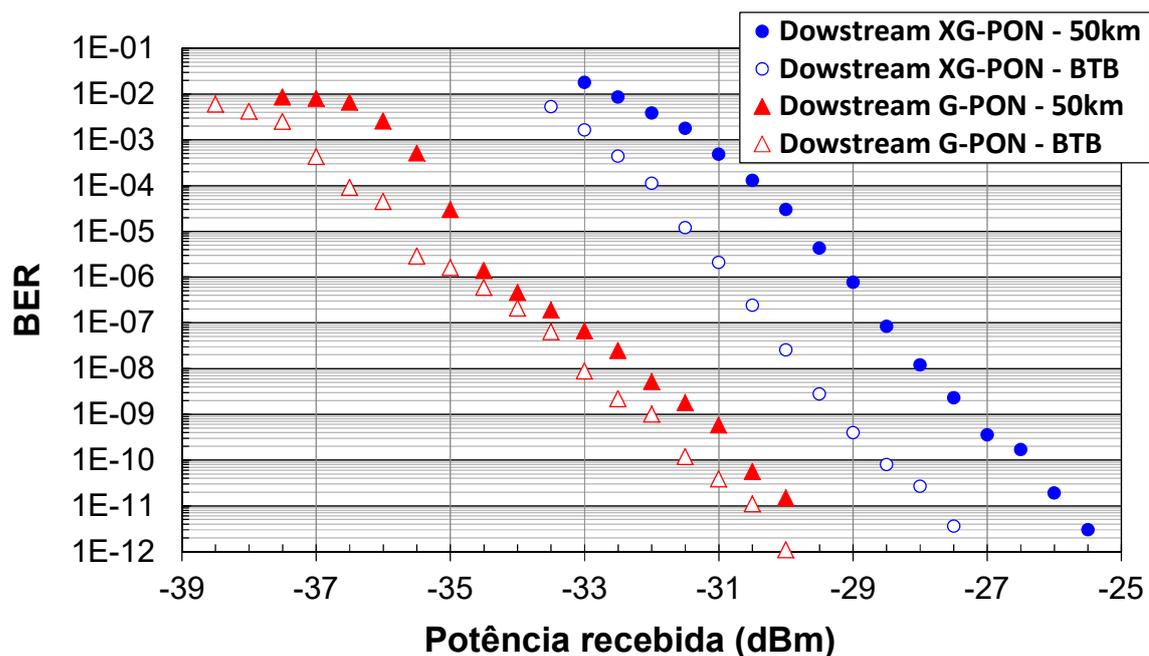


Figura 5.15 - Avaliação de desempenho em termos de BER medidos na ONT

5.7 Conclusões

Neste capítulo descrevemos extensores PON utilizando a técnica PoF. Os limites de uso para esta abordagem também foram discutidos, bem como, uma análise dos parâmetros da energia convertida no extensor em função da distância do desempenho do extensor baseado em SOA em termos de taxa de erro de *bit* (BER). O desempenho do extensor alimentado por fibra baseado em SOA foi testado utilizando sistemas XG-PON e G-PON compartilhando a mesma fibra em um alcance de 50 km. A técnica proposta é uma contribuição para melhorar a confiabilidade e a segurança dos sistemas PON, eliminando o uso das baterias e os cabos de cobre em locais remotos.

6 Conclusão final e contribuições da tese

Nesta tese de doutorado foram propostas e investigadas três técnicas para o aumento da capacidade de transmissão e extensão de redes ópticas passivas G-PON. A primeira técnica investigada consiste na sobreposição de quatro comprimentos de onda WDM selecionados na mesma janela dos canais *downstream* e também quatro comprimentos de onda WDM na mesma janela dos canais *upstream* da rede GPON convencional. A segunda técnica investigada consiste na utilização de um extensor óptico com amplificadores SOA para ampliar a distância da rede proposta na primeira técnica. A terceira técnica consiste na utilização do extensor da segunda técnica alimentado através da técnica PoF para aplicações em uma rede sobreposta (GPON/XG-PON). Os resultados obtidos mostram que as técnicas propostas e investigadas podem ser empregadas nas atuais redes ópticas passivas para aumentar a capacidade e aumentar a distância entre a central e os usuários.

Dentre os resultados obtidos podemos destacar:

- Contribuição para a evolução da rede PON que multiplica em quatro vezes sua capacidade usando técnicas WDM e que aproveita o legado de rede. Essa solução possibilita que a operadora aumente a capacidade em termos de usuários atendidos pela rede.
- Contribuição de extensão da rede GPON sobreposta usando amplificadores SOAs convencionalmente alimentados: essa solução possibilita atender usuário situados mais distantes na rede.
- Contribuição de extensão da rede GPON/XGPON usando amplificadores SOAs alimentados por fibra óptica. Demonstrou-se a viabilidade de se utilizar amplificadores remotamente alimentados por fibra o que pode reduzir problemas de vandalismo, roubos de baterias, bem como, além de permitir a construção de pontos remotos para atendimento à usuários localizados em áreas mais distantes dos pontos de atendimento.

Algumas desvantagens apresentadas:

- Na contribuição de evolução da rede apesar de notória a contribuição de aumento da capacidade em quatro vezes mais, a taxa líquida máxima de

transmissão por usuário continuará sendo a mesma oferecida pela tecnologia GPON.

- Na contribuição de extensão da rede GPON sobreposta utilizando amplificadores SOAs convencionalmente alimentados tira a característica de passividade da rede e uma falha do extensor pode tirar todos os usuários da rede.
- Na contribuição de extensão da rede GPON/XG-PON utilizando amplificadores SOAs alimentado por fibra também tira a característica de passividade da rede e uma falha do extensor pode tirar todos os usuários da rede.

As pesquisas desenvolvidas e apresentadas nesta tese permitiram a elaboração de publicações em revistas internacionais de alto fator de impacto e em congressos internacionais renomados, atestando, assim, a qualidade das contribuições da tese. Entre os vários trabalhos, podem ser destacados os artigos publicados no *International Microwave and Optoelectronics Conference* (IMOC2011), *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications* (JMOe) e, *Journal of Optical Communications and Networking* (JOCN).

7 Trabalhos futuros

Como propostas de trabalhos de pesquisa futuros podemos citar:

:

- Análise do uso de extensores SOAs e RSOAs aplicados à tecnologia de rede TWDM-PON;
- Análise, em termos de CAPEX/OPEX, do uso de extensor óptico em rede de acesso óptica.
- Desenvolvimento da tecnologia de fotoconversor com melhor eficiência e de baixo consumo de energia.
- Aumento da distância de alimentação por fibra utilizando fibras ópticas especiais.
- Estudo de técnicas para desenvolvimento de fibra óptica com maior capacidade de alimentação.

8 Publicações adicionais com tema correlato.

A seguir são listadas algumas publicações adicionais

- U. R. Duarte, R. S. Penze, F. R. Pereira, F. F. Padela, J. B. Rosolem, e M. A. Romero, “Combined self-seeding and carrier remodulation scheme for WDM-PON”, *Journal of Lightwave Technology*, 31, No. 8, pp 1323-1330, (2013).
- U. R. Duarte, J. B. Rosolem, R. S. Penze, e M. A. Romero, “Analysis of ASE-Related Impairments on Wavelength-Reuse WDM-PON Based on SelfSeeded Reflective-SOAs”, *Journal of Optical Communications and Networking*, 6, No. 9, pp. 773-781, (2014).
- U. R. Duarte, R. S. Penze, J. B. Rosolem, F. R. Pereira, F. F. Padela, e M. A. Romero, “Combined self-seeding and carrier remodulation method for reflective transmitters in WDM-PON”, *Optical Fiber Communications Conference, Anais do OFC 2013*, paper JTh2A.72, (2013).
- U. R. Duarte, J. B. Rosolem, R. S. Penze, A. A. Leonardi, e M. A. Romero, “Enhancement of Chromatic Dispersion and Post-Filtering Effects Tolerances on Spectrum-Sliced WDM-PONs Using Self-Seeded ReflectiveSOAs”, *International Telecommunications Symposium, Anais do ITS 2014*, pp. 1-5, (2014).

9 Referências Bibliográficas

- [1] J. C. Crimi, Next generation network services, Telcordia Technologies white paper. Disponível em: http://www.mobilein.com/NGN_Sves_WP.pdf, Acesso em: 16 mar. 2010.
- [2] G.694.2, “Spectral grids for WDM applications: CWDM frequency grid”, ITU-T, 2002.
- [3] Sonet / SDH blog: https://sonetsdh.files.wordpress.com/2009/04/wdm_janelas.gif, acesso 02/04/2014.
- [4] G.983.1, “Broadband optical access systems based on passive optical networks (PON): general characteristics”, disponível em <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.983.1/en>, acesso em 02/04/2014.
- [5] G.983.2, “ONT management and control interface specification for BPON”, disponível em <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.983.2-200507-I/en>, acesso em 02/04/2014.
- [6] G.984.1, “Gigabit-capable passive optical networks (GPON): General characteristics”, ITU-T, março, 2008.
- [7] G.984.2, “Gigabit-capable Passive Optical Networks (GPON): Physical Media Dependent (PMD) layer specification”, ITU-T, março, 2003.
- [8] G.984.3, "Gigabit-capable Passive Optical Networks (GPON): Transmission convergence layer specification", ITU-T, janeiro, 2014.
- [9] G.984.4, "Gigabit-capable passive optical networks (GPON): ONT management and control interface specification", ITU-T, fevereiro, 2008.
- [10] G.984.5, "Gigabit-capable Passive Optical Networks (GPON): Enhancement band", ITU-T, março, 2003.
- [11] G.984.6, “Gigabit-capable passive optical networks (GPON): Reach extension”, ITU-T, março, 2008.
- [12] G.984.7: Gigabit-capable passive optical networks (GPON) Long reach". ITU-T, julho, 2010.
- [13] Recomendação IEEE 802.3ah, “Part 3: Carrier sense multiple access with collision detection (CSMA/CD) access method and physical layer specifications”, disponível em http://www.ieee802.org/21/doctree/2006_Meeting_Docs/200611_meeting_docs/802.3ah-2004.pdf, acesso em 07/08/2014
- [14] F. Saliou, P. Chanclou, F. Laurent, N. Genay, J. A. Lazaro, F. Bonada e J. Prat, Reach Extension Strategies for Passive Optical Networks [Invited]. Journal of Optical Communication Networks, 1, 4, p. c51-c60, Setembro 2009.

- [15] João Batista Rosolem, Amplificadores Ópticos de Dupla Passagem Incorporando Fibras Compensadoras de Dispersão. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2005.
- [16] K. Ichi Suzuki, Youichi Fukada, Derek Nasset, Russell Davey, “Amplified gigabit PON systems”, Journal of Optical Networking, Vol. 6, No. 5, maio, 2007.
- [17] Elbers, J.-P.; Optical access solutions beyond 10G-EPON/XGPON, Optical Fiber Communication (OFC), National Fiber Optic Engineers Conference, 2010. pp. 1-3, 21-25 Março 2010.
- [18] Recomendação IEEE 802.3ah, “Part 3: Carrier sense multiple access with collision detection (CSMA/CD) access method and physical layer specifications”, disponível em http://www.ieee802.org/21/doctree/2006_Meeting_Docs/200611_meeting_docs/802.3ah-2004.pdf, acesso em 07/08/2014.
- [19] ITU-T Recommendation G.987.1 (2010), 10-Gigabit-capable passive optical networks (XGPON): General requirements.
- [20] ITU-T Recommendation G.987.2 (2010), 10-Gigabit-capable passive optical networks (XGPON): Physical media dependent (PMD) layer specification
- [21] ITU-T Recommendation G.987.2 (2010), 10-Gigabit-capable passive optical networks (XGPON): Transmission convergence (TC) layer specification.
- [22] Recomendação ITU-T G.989.1, “40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): General requirements”, disponível em <https://www.itu.int/rec/T-RECG.989.1/en>, acesso em 08/03/2016.
- [23] H. Yang. User migration in time and wavelength division multiplexed pon (twdm-pon). Optics Express, pages 651–666, 2013.
- [24] Cad. CPqD Tecnologia, Campinas, v. 6, n. 1, p. 65-76, jan/jun. 2010 “Arquiteturas baseadas em WDM para as próximas redes PON”.
- [25] R. Padjen. “CCNP: Building Cisco Remote Access Networks Study Guide”. Sybex, 2004. CableLabs, <http://www.cablemodem.com>. Acesso em: 27 de abril de 2009.
- [26] J.R. Stern, et al., “TPON-a passive optical network for telephony”, in Proc. ECOC 1988, Brighton, UK, pp. 203-206.
- [27] F. Effenberger, D. Cleary, O. Haran, G. Kramer et al., "An Introduction to PON Technologies", IEEE Communications Magazine, pp. S17-S25, março de 2007
- [28] K. I. Suzuki, T. Furukawa, K. Saito, H. Ueda, “B-PON repeater for enlarging transmission distance between OLT and ONT,” IEICE Trans. Commun. J86-B, p.2053–2064 2003.

- [29] F. An, K. S. Kim, D. Gutierrez, S. Yam, E. Hu, K. Shrikhande, and L. G. Kazovski, "SUCCESS: a next-generation hybrid WDM/TDM optical access network architecture", J. Lightwave Technology, Vol. 22, No 11, pp.2557–2569, November 2004.
- [30] K. M. Choi, S. M. Lee, M. H. Kim, and C. H. Lee, "An Efficient Evolution Method from TDM-PON to Next-Generation PON", IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 19, No. 9, pp. 647-649, May 2007.
- [31] H. Song, B. Mukherjee, Y. Park, S. Yang, "Shared-wavelength WDM-PON access network for supporting *downstream* traffic with QoS," OFC, 2006.
- [32] M. Bouda, P. Palacharla, Y. Akasaka, A. Umnov, C. Tian, T. Naito, "Cost-Effective Optical Access Upgrades using Wavelength Shared Hybrid Passive Optical Network Architecture", NFOEC, paper NThD5,2007.
- [33] P. Solina, "European PON Deployments: A Carrier View of the Technical, Regulatory, and Economic Challenges", Proceedings of European Congress in Optical Communication ECOC 2010, paper We.8.B.1, Torino, Italy, 2010.
- [34] N. Kashima, "Upgrade of passive optical subscriber network," J. Lightwave Technol., Vol.9, No. 1, p.113–119, 1991.
- [35] S. Ahsan, M. S. Lee, S. H. S. Newaz, and S. Asif, "Migration to the Next Generation Optical Access Networks Using Hybrid WDM/TDM-PON", Journal of Networks, Vol. 6, No. 1, pp.18-25, January 2011.
- [36] N. J. Frigo, P. D. Magill, T. E. Darcie, P. P. Iannone, M. M. Downs, B. N. Desai, U. Koren, T. L. Koch, C. Dragone, H. M. Presby, "RITENET: a passive optical network architecture based on the remote interrogation of terminal equipment," OFC'94, post-deadline paper 8, 1994.
- [37] F. J. Effenberger, J. Kani, and Y. Maeda, "Standardization Trends and Prospective Views on the Next Generation of Broadband Optical Access Systems", IEEE Journal on Selected Areas In Communications, Vol. 28, No. 6, August 2010.
- [38] Kani, J. ; Bourgart, F. ; McCammon, K., "Options for future optical access networks", Communications Magazine, IEEE Volume:44 ,Issue 10, Oct. 2006.
- [39] T. Pfeiffer, "Enhancing PON capabilities using the wavelength domain", Join ITU-T/IEEE Workshop on Next Generation Optical Access Systems, Geneva, Switzerland, 2008.
- [40] P. Solina, "European PON Deployments: A Carrier View of the Technical, Regulatory, and Economic Challenges", Proceedings of European Congress in Optical Communication ECOC 2010, paper We.8.B.1, Torino, Italy, 2010.

- [41] J. Kani, "Enabling Technologies for Future Scalable and Flexible WDM-PON and WDM/TDM-PON Systems", *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol. 16, No. 5, pp.1290-1297, September/October 2010.
- [42] D. Umeda, T. Ikagawa, K. Yamazaki, N. Hirakata, K. Yamagishi, "Bidirectional 3R repeater for GE-PON systems," Presented at the European Conference on Optical Communication, Cannes, France, 24–28 settembre, 2006.
- [43] R. P. Davey, P. Healey, I. Hope, P. Watkinson, D. B. Payne, O. Marmur, J. Ruhmann, Y. Zuiderveld, "DWDM reach extension of a GPON to 135km," *J. Lightwave Technol.*, Vol.24, No. 1, p.29–31, 2006
- [44] D. Iazikov, C. Greiner, Member and T.W. Mossberg, "Apodizable Integrated Filters for Coarse WDM and FTTH-Type Applications" *J. Lightwave Technol*, Vol. 22, No. 5, May 2004
- [45] J. B. Rosolem, A. A. Juriollo, R. Arradi, A. D. Coral, M. A. Romero, "All Silica S Band Double Pass Erbium Doped Fiber Amplifier", *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol.17, No. 7, p.1399–1401, 2005.
- [46] J. B. Rosolem, A. A. Juriollo, R. Arradi, A. D. Coral, J. C. R. Oliveira, "S-C-L Triple Band Double-Pass Erbium-Doped Silica Fiber Amplifier with an Embedded DCF Module for CWDM Applications", *Journal of Lightwave Technology*, v.24, No. 10, p.3691–3697, 2006.
- [47] J. Prat, D. Pla, "Remote Amplification in High-Density Passive Optical Networks", *Proceedings of 2005 7th International Conference ICTON 2005*, Vol. 2, Paper We.p.9, 2005.
- [48] S. Aozasa, M. Shimizu, "Novel gain spectrum control method for input power and temperature variations in S-band thulium doped fiber amplifier," 29th European Conference on Optical Communication, Rimini, Italy, p.21–25, settembre, 2003.
- [49] K.I. Suzuki, Y. Fukada, K. Saito, T. Nakanishi, Y. Maeda, "Burst-mode optical amplifier for PON application," 31st European Conference on Optical Communication, Glasgow, Scotland, settembre, 2005.
- [50] N. Suzuki, J. Nakagawa, "First demonstration of full burst optical amplified GE-PON uplink with extended systems budget of up to 128 ONU splits and 58km reach," 31st European Conference on Optical Communication, Glasgow, Scotland, settembre, 2005.
- [51] R. Davey, D. Payne, P. Barker, D. Nettet, S. Appathurai, T. Gilfedder, A. Rafel, P. Healey, "Next generation extended reach PON?", *Workshop OSuF Extended Reach PON and Central Office By-Pass, OFC/NFOEC 2008*, paper OThL1, 2008.
- [52] D. Nettet, D. Payne, R. Davey, T. Gilfedder, "Demonstration of enhanced reach and split of a GPON system using-semiconductor optical amplifier," 32nd European Conference on Optical Communication, Cannes, France, Settembre, 2006.

- [53] P. P. Iannone, K. C. Reichmann, "Hybrid SOA-Raman Amplifiers for Fiber-to-the-Home and Metro Networks", OFC/NFOEC 2008, Paper NTuC1, 2008.
- [54] 10-Gigabit-Capable Passive Optical Network (XGPON) Systems: Definitions, Abbreviations, and Acronyms, ITU-T G.987, 2009.
- [55] 10 Gigabit-Capable Passive Optical Network (XGPON): General Requirements, ITU-T G.987.1, 2009.
- [56] 10-Gigabit-Capable Passive Optical Networks (XGPON): Physical Media Dependent (PMD) Layer Specification, ITU-T G.987.2, 2009.
- [57] 10-Gigabit-Capable Passive Optical Network (XGPON) Systems: Transmission Convergence Layer Specification, ITU-T G.987.3
- [58] Y. Luo. Time- and wavelength-division multiplexed passive optical network (TWDM-PON) for next-generation pon stage 2 (NGPON2). JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY,2013.
- [59] Yiram Ma, Yinbo Qian, Guikai Peng, Xiaomu Wang, Jingwen Yu, Yuanqiu Luo, Xuejin Yan, Frank Effenberger, "Demonstration of a 40 Gb/s Time and Wavelength Division Multiplexed Passive Optical Network Prototype System", OFC/NFOEC 2012, Paper PDP5D.7, 2012.
- [60] Ning Cheng , Jianhe Gao, Chengzhi Xu, Bo Gao, Xuming Wu, Dekun Liu, Lei Wang, Xiaoping Zhou, Huafeng Lin, Frank Effenberger, "World's First Demonstration of Pluggable Optical Transceiver Modules for Flexible TWDM PONs", ECOC2013, Paper pd4-f-4,2013.
- [61] U. R. Duarte, R. S. Penze, F. J. B. Rosolem, F. R. Pereira, F. F. Padela, e M. A. Romero, "Combined self-seeding and carrier remodulation method for reflective transmitters in WDM-PON", Optical Fiber Communications Conference, OFC TechnicalDigest 2013, paper JTh2A.72 (2013).
- [62] U. R. Duarte, R. S. Penze, F. R. Pereira, F. F. Padela, J. B. Rosolem, e M. A. Romero, "Combined self-seeding and carrier remodulation scheme for WDM-PON", J. Lightw. Technol., 31, No. 8, pp 1323-1330. , (2013).
- [63] S. Ibrahim, X.Song, M.Sugiyama, Y.Nakano, "Static optical cross phase modulationin active multimode interference couplers", Opt. Quant. Electron., pp. 419-424, 2008.
- [64] G. P. Agrawal e N. K. Dutta, Semiconductors Lasers, 2a ed., Van Nostrand Reinhold, New York, 1993.
- [65] João Batista Rosolem and Claudio Florida, "Power control and temperature sensing for fiber-powered active sensors," Appl. Opt. 47, 6207-6211 (2008)
<http://www.opticsinfobase.org/ao/abstract.cfm?URI=ao-47-33-6207>

- [66] Gerd Keiser, *Optical Communications Essentials*. McGraw-Hill NETWORKING: New York, 2003.
- [67] A. Borghesani, *Semiconductor Optical Amplifiers for Advanced Optical Applications*. International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), p. 119-122, Novembro 2006.
- [68] Govind P. Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems*. John Wiley & Sons: New York, 2002.
- [69] Michael J. Connelly, *Semiconductor Optical Amplifiers*. Kluwer Academic Publishers: New York, 2004.
- [70] Ken-Ichi Suzuki, Youichi Fukada, Derek Nasset, Russell Davey, "Amplified gigabit PON systems", *Journal of Optical Networking*, Vol. 6, No. 5, May, 2007.
- [71] H. Ghafouri-Shiraz, *Fundamentals of Laser Diode Amplifiers*, John Wiley & Sons, Chichester, West Sussex, England, pp. 44-46, 1996.
- [72] M. Bouda, P. Palacharla, Y. Akasaka, A. Umnov, and T. Naito, "Extended-Reach Wavelength-Shared Hybrid PON", in *Optical Fiber Communication Conference and Exposition and The National Fiber Optic Engineers Conference, Technical Digest (CD)* (Optical Society of America, 2008, paper NThD5).
- [73] K. McCammon and S. Wong "Experimental Validation of an Access Evolution Strategy: Smooth FTTP Service Migration Path", in *National Fiber Optic Engineers Conference, OSA Technical Digest Series (CD)* (Optical Society of America, 2007, paper NThD5).
- [74] R. S. Penze, J. B. Rosolem, U. R. Duarte, e Baldini Filho, "Passive Optical Network Upgrading by Using In-Band WDM Overlay", *SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference, IMOC Technical Digest 2011*, (2011).
- [75] R. S. Penze, J. B. Rosolem, e R. B. Filho, "Upgrading and Extending PON by Using In-Band WDM Overlay", *J. Microw. Optoelectr. And Electromag. Appl.*, 11, No. 1, pp. 15 – 25, (2012).
- [76] Relatório 1 da meta 3 do Projeto GIGA Fase 2 número PD.50.GI.M03.AOBL-RT01AA, "Levantamento do estado da arte em Amplificadores de Banda larga e Amplificadores de Baixo Consumo", Agosto, 2009.
- [77] G.984.6, "Gigabit-capable passive optical networks (GPON): Reach extension", ITU-T, março, 2008.
- [78] F. Saliou, P. Chanclou, N. Genay, J. A. Lazaro, F. Bonada, A. Othmani, Y. Zhou, "Single SOA to Extend Simultaneously the Optical Budget of Coexisting G-PON and 10G-PON", *Proc. ECOC 2010*, paper Tu.5.B.5, Torino, Italy, 2010.

- [79] N. Cheng, L. Zhenxing, S. Liu, and F. Effenberger, "Gain-Clamped Semiconductor Optical Amplifiers for Reach Extension of Coexisted GPON and XG-PON," in National Fiber Optic Engineers Conference, Optical Society of America, paper NTuD7, 2011.
- [80] A. Borghesani, I. F. Lealman; A. Poustie, D. W. Smith, R. Wyatt, "High Temperature, Colourless Operation of a Reflective Semiconductor Optical Amplifier for 2.5 Gbit/s *upstream* transmission in a WDM-PON", Proc. ECOC 2007, Berlin, Germany, 2007.
- [81] S. Karagiannopoulos, A. E. Kelly, C. Michie, C. Tombling, W. I. Madden, and I. Andonovic, "S-Band RSOAs for WDM PONs," in Optical Fiber Communication Conference, Optical Society of America, paper OMN3, 2009.
- [82] J. Baliga, R. Ayre, W. V. Sorin, K. Hinton, and R. S. Tucker, "Energy Consumption in Access Networks," in Optical Fiber Communication Conference and Exposition and The National Fiber Optic Engineers Conference, Optical Society of America, paper OThT6, 2008.
- [83] R. S. Tucker, "Green Optical Communications—Part II: Energy Limitations in Networks", IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Vol.17, No. 2, pp. 261-274, 2011.
- [84] Balaban, Adrian; Pitts, Allen, "Powering the Emerging Full Service Access Networks (FSAN) - the last mile challenge," Telecommunications Conference, 2005. INTELEC '05. Twenty-Seventh International , vol., no., pp.137-143, Sept. 2005
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4134321&isnumber=4134292>
- [85] J. B. Rosolem, G. E. R. de Paiva, and U. R. Duarte, "R-SOA Based Extender for XG-PON/G-PON Applications," in Optical Fiber Communication Conference, OSA Technical Digest (Optical Society of America, 2012), paper OM3I.3.
- [86] Lista de amplificadores ópticos semicondutores, e respectivos datasheets, produzidos pela empresa InPhenix, disponível em http://www.inphenix.com/soa_devices.html, acesso em 12/12/2010.
- [87] Lista de amplificadores ópticos semicondutores, e respectivos datasheets, produzidos pela empresa Kamelian, disponível em <http://www.kamelian.com/products.html>, acesso em 12/12/2010.
- [88] R. P. Davey, D. B. Grossman, M. Rasztovits-Wiech, D. B. Payne, D. Nessel, A. E. Kelly, A. R., S. Appathurai, and S.-H. Yang, "Long-Reach Passive Optical Networks", J. Lightwave Technol. Vol.27, pp. 273-291, 2009.
- [89] Relatório 1 da meta 3 do Projeto GIGA Fase 2, código PD.50.GI.M03.AOBL-RT01AA, "Levantamento do estado da arte em Amplificadores de Banda larga e Amplificadores de Baixo Consumo", Agosto, 2009.

- [90] Paiva, G.E.R. Estudo de Esquemas de Amplificação para Redes PON de Longo Alcance. 2012. 111f. Dissertação mestrado— Departamento de Engenharia Elétrica, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2012.
- [91] S. Hopper, “Cost of FTTH powering,” Alpha White Paper [Online]. Available: <http://www.alpha.com/Media/Documents/FTTH%20Powering%20040817.pdf>.
- [92] J. P. Pereira and P. Ferreira, “Infrastructure sharing as an opportunity to promote competition in local access networks,” J. Comput. Networks Commun., vol. 2012, 409817, 2012.
- [93] K. Borders, “Designing line power networks for FTTH applications,” Alpha White Paper [Online]. Available: <http://www.alpha.ca/web2/download/whitepapers/WP-20120718%20Designing%20Line%20Power%20Networks.pdf>.
- [94] A. Balaban and A. Pitts, “Powering the emerging full service access networks (FSAN)—The last mile challenge,” in Proc. Int. Telecommunication Energy Conf., Berlin, Germany, Sept. 2005, pp. 137–143.
- [95] A. Borghesani, I. F. Lealman; A. Poustie, D. W. Smith, R. Wyatt, “High Temperature, Colourless Operation of a Reflective Semiconductor Optical Amplifier for 2.5 Gbit/s *upstream* transmission in a WDM-PON”, Proc. ECOC 2007, Berlin, Germany, 2007.
- [96] S. Karagiannopoulos, A. E. Kelly, C. Michie, C. Tombling, W. I. Madden, and I. Andonovic, “S-Band RSOAs for WDM PONs,” in Optical Fiber Communication Conference, Optical Society of America, paper OMN3, 2009.
- [97] João Batista Rosolem and Claudio Floridaia, “Power control and temperature sensing for fiber-powered active sensors,” Appl. Opt. 47, 6207-6211 (2008)
<http://www.opticsinfobase.org/ao/abstract.cfm?URI=ao-47-33-6207>
- [98] J. Baliga, R. Ayre, W. V. Sorin, K. Hinton, and R. S. Tucker, “Energy Consumption in Access Networks,” in Optical Fiber Communication Conference and Exposition and The National Fiber Optic Engineers Conference, Optical Society of America, paper OThT6, 2008.
- [99] R. S. Tucker, “Green Optical Communications—Part II: Energy Limitations in Networks”, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Vol.17, No. 2, pp. 261-274, 2011.
- [100] F. Saliou, P. Chanclou, N. Genay, J. A. Lazaro, F. Bonada, A. Othmani, Y. Zhou, “Single SOA to Extend Simultaneously the Optical Budget of Coexisting G-PON and 10G-PON”, Proc. ECOC 2010, paper Tu.5.B.5, Torino, Italy, 2010.
- [101] C. Holtmann, R. Dall'Ara, P. Besse, D. Sakellariou, W. Hunziker, and H. Melchior, “Reflective Semiconductor Optical Amplifier at 1.3 μ m Wavelengths for Customer Connection in Optical Access Networks,” in Optical

- [102] N. Cheng, L. Zhenxing, S. Liu, and F. Effenberger, "Gain-Clamped Semiconductor Optical Amplifiers for Reach Extension of Coexisted GPON and XG-PON," in National Fiber Optic Engineers Conference, Optical Society of America, paper NTuD7, 2011.
- [103] Balaban, Adrian; Pitts, Allen, "Powering the Emerging Full Service Access Networks (FSAN)- the last mile challenge," Telecommunications Conference, 2005. INTELEC '05. Twenty-Seventh International pp.137-143, Sept. 2005
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4134321&isnumber=4134292>
- [104] D. Kuhn, E. Lo, and T. Robbins, "Powering issues in an optical fibre customer access network," in Proc. Int. Telecommunication Energy Conf., Kyoto, Japan, Nov. 1991, pp. 51–58.
- [105] "Gigabit-capable passive optical networks (G-PON): Reach extension," ITU-T Recommendation G.984.6, 2008.
- [106] J. B. Rosolem and C. Florida, "Power control and temperature sensing for fiber-powered active sensors," Appl. Opt., vol. 47, no. 33, pp. 6207– 6211, Nov. 2008
- [107] K. Kim, J.-H. Lee, S. Lee, J. Lee, and Y. Jang, "Low-Cost, Low-Power, High-Capacity 3R OEO-Type Reach Extender for a Long-Reach TDMA-PON," ETRI J., vol.34, no.3, pp.352-360, Jun. 2012.
- [108] C. Lange, R. Hülsermann, D. Kosiankowski, F. Geilhardt, and A. Gladisch, "Effects of network node consolidation in optical access and aggregation networks on costs and power consumption," in Proc. SPIE 7621, Optical Metro Networks and Short-Haul Systems II, 76210F, Jan. 2010.