UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
COMPUTAÇÃO

**Proposta e Análise de redes WDM-PON Empregando Auto-
Alimentação e Dupla Cavidade Óptica**

Daniel Ricardo Celino

Dissertação de mestrado apresentada à
Escola de Engenharia de São Carlos,
Departamento de Engenharia Elétrica e de
Computação da Universidade de São
Paulo, como parte dos requisitos para
obtenção do título de Mestre em Ciências,
Programa de Engenharia Elétrica – Área de
concentração: Telecomunicações.

Orientador: Prof. Dr. Murilo Araujo
Romero

São Carlos

2017

Trata-se da versão corrigida da dissertação. A versão original se encontra disponível na
EESC/USP que aloja o Programa de Pós Graduação de Engenharia Elétrica.

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

C392p Celino, Daniel Ricardo
Proposta e Análise de redes WDM-PON Empregando Auto-Alimentação e Dupla Cavidade Óptica / Daniel Ricardo Celino; orientador Murilo Araujo Romero. São Carlos, 2017.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Área de Concentração em Telecomunicações -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2017.

1. redes de acesso óptico. 2. WDM-PON. 3. transmissores colorless. 4. topologias de auto-alimentação. 5. topologias de remodulação. 6. duplo apagamento óptico. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: **DANIEL RICARDO CELINO**

Título da dissertação: "Proposta e análise de redes WDM-PON empregando auto-alimentação e dupla cavidade óptica"

Data da defesa: 24.07.2017

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Titular **Murilo Araujo Romero**
(Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Prof. Dr. **Marcelo Luís Francisco Abbade**
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/Unesp – São João da Boa Vista)

Aprovado

Prof. Dr. **Jair Adriano Lima Silva**
(Universidade Federal do Espírito Santo/UFES)

Aprovado

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica:
Prof. Associado **Luís Fernando Costa Alberto**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Luís Fernando Costa Alberto**

*"Não tente ser uma pessoa de sucesso.
Tente ser uma pessoa de valor."*

Albert Einstein

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me concedido saúde, perseverança e dedicação para conclusão de mais esta etapa.

A CAPES, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pelo fomento ao projeto de pesquisa.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Murilo Araujo Romero, por ter me aceitado como seu orientando, pela paciência, pelas diretrizes, correções e conselhos que contribuirão muito para o meu futuro acadêmico.

Ao meu coorientador Ulysses Rondina Duarte, pela dedicação, paciência, disponibilidade, conselhos, diretrizes e correções, muito obrigado.

Aos meus pais Neilton e Ercília, por sempre me apoiarem, me amarem e ajudarem, por ser minha fortaleza quando mais preciso.

A minha princesa, minha razão de viver, minha companheira, minha esposa Daniela Matias Cerri Celino, pela compreensão, pelo amor e carinho, pela paciência, amizade, companheirismo, por sonhar junto, em fim, por tudo, minha metade.

Aos meus irmãos Danillo e Darlan, por sonharem comigo, por me amarem, por ser família, sempre.

Aos meus Tios Paulo e Rosilene, muitíssimo obrigado por tudo, por me acolherem na época de cursinho..., pelos conselhos, pela paciência, por tudo, muito obrigado.

Aos meus cunhados, Charles, Bruno e Paulo, pelo socorro prestado a minha esposa na minha ausência.

A toda minha família Ricardo e Celino.

Aos meus apadrinhados, Brother Thiago e Rayssa.

Ao meu colega do laboratório, Adelcio.

A Prof. Regiani Ragi, pelo projeto de doutorado.

Por fim, agradeço a todos os meus professores do mestrado, por todo conhecimento, experiência de vida e ensinados que levarei durante a minha carreira acadêmica.

Resumo

CELINO, D. R. **Proposta e Análise de redes WDM-PON Empregando Auto-Alimentação e Dupla Cavidade Óptica.** 2017. 198 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

Nas topologias de redes WDM-PON (*Wavelength Division Multiplexed Passive Optical Network*) baseadas em transmissores *colorless*, isto é, transmissores que possam operar em uma grande gama de comprimentos de onda, que empreguem técnica de auto-alimentação e reuso de comprimento de onda, tem despertado grande interesse devido a sua comprovada eficiência, granularidade e custo reduzido em relação às alternativas. Entretanto, o alcance destas redes é limitado pelo emprego de remodulação, devido a dependência existente com a qualidade dos sinais a serem remodulados. Neste cenário, mantendo-se uma melhor relação custo-benefício, taxas de operação típicas são da ordem de 1,25, e 2,5 Gb/s (20 quilômetros).

Neste trabalho é investigada uma nova topologia que combina as técnicas de auto-alimentação e reuso de comprimento de onda, bem como, utiliza um circuito de dupla cavidade óptica, possibilitando um reforço no apagamento óptico e manutenção do estado da polarização no percurso de recirculação da cavidade externa, objetivando uma melhora na qualidade dos sinais a serem remodulados, possibilitando altas taxas de transmissão e um maior alcance da rede.

Nesta topologia, amplificadores ópticos semicondutores refletivos são utilizados como transmissores *colorless*, por meio da emissão espontânea amplificada, garantido assim uma redução no custo da rede óptica de acesso. Como metodologia adotada, inicialmente foram realizadas caracterizações ópticas no ambiente de simulação, validação da palheta configurada no simulador com resultados experimentais e avaliações da topologia em taxas simétricas de 1,25 Gb/s. Ademais, são conduzidas análises comparativas entre a topologia proposta frente a topologias disponíveis na literatura no estado da arte. Com os resultados obtidos, acredita-se que essa proposta atende aos requisitos de capacidade agregada e custo reduzido, podendo alcançar taxas de transmissão de até 10 Gb/s utilizando transmissores de baixa complexidade, características essenciais para impulsionar a implementação de redes de acesso óptico.

Palavras chave: redes de acesso óptico, WDM-PON, transmissores *colorless*, topologias de auto-alimentação, topologias de remodulação, duplo apagamento óptico.

Abstract

CELINO, D. R. **Proposal and Analysis of WDM-PON Employing Self-Seeding and Double Optical Cavity**. 2017. 198 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

WDM-PON topologies based on colorless transmitters employing self-seeding and wavelength-reuse techniques have attracted a great deal of interest because of its well known efficiency, granularity and reduced cost, when compared to other alternatives in the literature. Nevertheless, the network reach is limited by the use of remodulation scheme. Maintaining an adequate cost-benefit relation requires typical operating rates of the order of 1.25 Gb/s to 2.5 Gb/s over 20 km of SSMF.

In the above framework, we investigate a new topology which combines self-seeding and wavelength-reuse techniques, but also employs a scheme to reinforce the data erasure in the optical carrier, simultaneously providing state of polarization (SOP) maintenance in the external cavity recirculation path. The proposed configuration improves the quality of the signals to be remodulated, thus allowing high rate and broader reach.

Specifically, in our work, reflective semiconductor optical amplifiers are employed as colorless transmitters, by using their own amplified spontaneous emission as a seed to provide the optical carrier. Optical analysis were performed in a simulation environment, including self-seeding layout validation by comparison to experimental results at the symmetric transmission rate of 1.25 Gb/s. Next, comparative analysis are conducted between the topology proposed in this work and topologies in the state of the art, found in the literature. According to the results, we believed that the proposal meets the requirements of aggregate capacity and reduced cost, being able to reach transmission rates of up to 10 Gb/s by using transmitters of low complexity, essential features to drive optical access networks implementation.

Key words: *optical access network, WDM-PON, colorless transmitters, wavelength-reuse, self-seeding, double optical carrier erasure.*

Sumário

RESUMO.....	IX
ABSTRACT	XI
SUMÁRIO	XIII
LISTA DE FIGURAS.....	XV
LISTA DE TABELAS.....	XIX
LISTA DE ACRÔNIMOS.....	XXI
1. INTRODUÇÃO	25
1.1 REDES ÓPTICAS.....	26
1.2 OBJETIVOS E METODOLOGIA	32
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	34
2. REDES PONS.....	35
2.1 REDES PONS PADRONIZADAS	35
2.1.1 GPON.....	35
2.1.2 XG(S)-PON.....	36
2.1.3 TWDM-PON.....	37
2.2 FUTURAS PONS	40
2.2.1 OFDM-PON.....	42
2.2.2 WDM-PON	44
3. REDES WDM-PON.....	47
3.1 REDES WDM-PON: ASPECTOS GERAIS	47
3.2 FONTES COLORLESS.....	49
3.2.1 FATIAMENTO ESPECTRAL DE FONTES BLS.....	50
3.2.2 TRANSMISSORES EM MODO DE REFLEXÃO	52
FP-LD.....	53
RSOA	54
3.3 PRINCIPAIS TOPOLOGIAS WDM-PON	54
3.3.1 TOPOLOGIA BIDIRECIONAL (BANDA C/BANDA L).....	55
3.3.2 TOPOLOGIA DE REMODULAÇÃO	57
3.3.3. TOPOLOGIA DE AUTO-ALIMENTAÇÃO	62

3.3.3	TOPOLOGIA COMBINADA	68
3.3.4	CIRCUITOS DE POLARIZAÇÃO PARA <i>SELF-SEEDING</i>	71
3.3.5	TOPOLOGIA PROPOSTA.....	74

4. REDES WDM-PON EMPREGANDO AUTO-ALIMENTAÇÃO E DUPLA POLARIZAÇÃO.....76

4.1	DESCRIÇÃO DETALHADA DA TOPOLOGIA PROPOSTA	76
4.2	CARACTERIZAÇÕES INICIAIS	83
4.2.1	GANHO ÓPTICO DO RSOA	84
4.2.2	ESPECTRO DOS SINAIS AUTO-ALIMENTADOS.....	86
4.2.3	NÍVEIS DE RAZÃO DE EXTINÇÃO.....	89
4.3	VALIDAÇÃO DA TOPOLOGIA PROPOSTA	91
4.3.1	PRIMEIRA ETAPA: AUTO-ALIMENTAÇÃO SEM EDFA NA CAVIDADE EXTERNA	92
4.3.2	SEGUNDA ETAPA AUTO-ALIMENTAÇÃO COM EDFA NA CAVIDADE EXTERNA	99
4.4	AVALIAÇÃO DA TOPOLOGIA PROPOSTA.....	105
4.4.1	AVALIAÇÃO DA DUPLA CAVIDADE ÓPTICA	107
4.4.2	AVALIAÇÃO <i>DOWNSTREAM</i> PARA DISTÂNCIAS DE 20 KM	111
4.4.3	AVALIAÇÃO <i>UPSTREAM</i> PARA DISTÂNCIAS DE 20 KM	116
4.4.4	AVALIAÇÃO <i>DOWNSTREAM</i> EM FUNÇÃO DO ALCANCE DA REDE	118
4.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	121

5. CONCLUSÕES124

APÊNDICE A - CARACTERÍSTICA OPERACIONAIS DOS ELEMENTOS DA REDE129

A.1.	PARÂMETROS DOS ELEMENTOS QUE COMPÕES A TOPOLOGIA.....	129
A.2.	CARACTERIZAÇÕES ÓPTICAS DO RSOA	131

APÊNDICE B - OPTISYSTEM 13.0137

REFERÊNCIAS.....139

Lista de Figuras

<i>Figura 1.1-Abrangência de cada uma das diferentes classificações de redes.</i>	25
<i>Figura 1.2- Esquema de uma rede de acessos genérica.</i>	26
<i>Figura 1.3 -Demanda requerida por aplicações de banda larga [5].</i>	27
<i>Figura 1.4- Evolução do SCM (Serviço de Comunicação Multimídia) nos últimos anos [15].</i>	28
<i>Figura 1.5 -Alguns esquemas FTTx de redes PON.</i>	29
<i>Figura 2.1 -Arquitetura física de uma rede GPON [11].</i>	36
<i>Figura 2.2 -Esquemático de uma rede XG-PON [12].</i>	37
<i>Figura 2.3 -Arquitetura física de uma rede TWDM-PON.</i>	38
<i>Figura 2.4 -Atenuação e dispersão cromática para fibras monomodo [14].</i>	41
<i>Figura 2.5 -Alocação espectral das bandas ópticas padronizadas pelo ITU-T[14,16].</i>	42
<i>Figura 2.6 -Sub-portadoras em tecnologia OFDM.</i>	43
<i>Figura 2.7-Alocação das subportadoras em um esquema OFDM-PON no tempo.</i>	44
<i>Figura 2.8 -Estrutura de uma rede WDM-PON coerente.</i>	45
<i>Figura 3.1 -Representação esquemática de uma rede WDM-PON.</i>	48
<i>Figura 3.2 -Ilustração da técnica de fatiamento espectral.</i>	51
<i>Figura 3.3 -Ilustração esquemática de transmissores em modo de reflexão utilizando fatiamento espectral.</i>	52
<i>Figura 3.4 -Esquemático da topologia bidirecional banda C/banda L.</i>	55
<i>Figura 3.5 -Ilustração esquemática da proposta original da RITENET [46].</i>	57
<i>Figura 3.6-(a) Definição de razão de extinção; (b) exemplo de remodulação utilizando SOA e modulador externo [47].</i>	59
<i>Figura 3.7 -Curva característica do SOA utilizado em remodulação.</i>	60
<i>Figura 3.8- Primeira proposta para self-seeding RSOA [57].</i>	63
<i>Figura 3.9 – Ilustração da topologia de auto-alimentação proposta em [60].</i>	66
<i>Figura 3.10- Topologia combinada: auto-alimentação na OLT e remodulação óptica na ONT [84].</i>	69
<i>Figura 3.11 -Ilustração esquemática da proposta [75].</i>	72
<i>Figura 3.12 -Ilustração esquemática da proposta [80].</i>	73
<i>Figura 3.13 -Esquemático da topologia de auto-alimentação e dupla polarização na cavidade externa no OLT.</i>	74
<i>Figura 4.1-Detalhamento da topologia proposta do ponto de vista de manutenção do SOP, no sentido RSOA para o FRM.</i>	78
<i>Figura 4.2 Detalhamento da topologia proposta do ponto de vista de manutenção do SOP, no sentido FRM para o RSOA.</i>	79
<i>Figura 4.3 -Ilustração do sinal óptico modulado em intensidade no início do processo de modulação no sentido RSOA Tx para o RSOA Aux.</i>	81
<i>Figura 4.4 -Ilustração do sinal óptico modulado em intensidade no sentido RSOA Tx para o RSOA Aux.</i>	82
<i>Figura 4.5 -Ganho óptico do RSOA Aux para os sinais ópticos previamente modulados pelo RSOA Tx.</i>	82
<i>Figura 4.6 -Ganho óptico do RSOA Tx para os sinais ópticos previamente amplificados pelo RSOA Aux.</i>	83
<i>Figura 4.7 Calibração das curvas de ganho óptico do RSOA com as curvas experimentais obtidas de [84], para correntes de polarização de 60 mA e 90 mA.</i>	84
<i>Figura 4.8 Curvas de ganho óptico do RSOA para dois valores de corrente de polarização 60 e 90 mA.</i>	85
<i>Figura 4.9 Espectro de sinais auto-alimentados e sinais provenientes de fatiamento de fontes ASE para perfil de filtro do AWG gaussiano e retangular. Foi utilizada uma resolução de 0,03 nm.</i>	87
<i>Figura 4.10 Níveis de razão de extinção para sinais downstream e upstream em função da corrente de pico-a-pico aplicada no dispositivo semiconductor.</i>	90

Figura 4.11-Ilustração esquemática da topologia self-seeding avaliada no OptiSystem para calibração com [1-2] utilizando apenas o RSOA.	92
Figura 4.12 Espectro do ruído ASE e do sinal auto-alimentado (self-seeding)	94
Figura 4.13 Sinal óptico downstream com razão de extinção igual a 5,0 dB.	95
Figura 4.14 Curvas de BER obtidas pela simulação e pelo experimento para $ER_D=5,0$ dB.	96
Figura 4.15 Curvas de BER obtidas pela simulação e pelo experimento para $ER_D=4,0$ dB.	97
Figura 4.16 Curvas de BER downstream para $ER_D=5,0$ dB e $ER_D=4,0$ dB geradas pela simulação.	98
Figura 4.17 Ilustração ampliada da OLT da topologia de cavidade única com a presença de um EDFA.	99
Figura 4.18 Curvas de BER downstream simulação e experimento, para uma razão de extinção de 5,0 dB.	100
Figura 4.19 Curvas de BER downstream da simulação e experimento, para uma razão de extinção de 4,0 dB.	101
Figura 4.20 Avaliação de desempenho de BER upstream para $ER_D=0,0$ dB. Em (a) tem-se avaliação feita para dois valores de potência de injeção -12 dBm e (b) avaliação feita para $P_{inj} = -22$ dBm.....	102
Figura 4.21 Avaliação de BER upstream para três valores de potência de injeção no RSOA ONT.	103
Figura 4.22 Comparação entre os diagramas de olho da simulação (a) e experimento (b) do sinal upstream.	104
Figura 4.23 Avaliação de desempenho de BER upstream para uma razão de extinção downstream de 3,5 dB e potência de self-seeding fixado em -27 dBm/0,2 nm.	105
Figura 4.24 Ilustração esquemática da topologia proposta configurada no OptiSystem.	106
Figura 4.25 Estado de polarização do RSOA Tx e do RSOA Aux no primeiro período de recirculação.	107
Figura 4.26 Estado de polarização dos RSOAs Aux e TX após a passagem pelo controlador de polarização.	108
Figura 4.27 Estado de polarização incidente no FRM e refletido pelo FRM.	108
Figura 4.28 Sinal óptico medido na saída do RSOA Aux após sofrer o primeiro apagamento óptico.	109
Figura 4.29 Sinal óptico no domínio do tempo monitorado na saída do RSOA Tx.	110
Figura 4.30 Avaliação de BER downstream para $ER_D=4,0$ dB da topologia combinada e topologia proposta.....	111
Figura 4.31 Avaliação de BER downstream para $ER_D=5,0$ dB da topologia combinada e topologia proposta.....	112
Figura 4.32 Avaliação dos sinais downstream em funções dos níveis do ER_D . A potência de autoalimentação é de -27 dBm/0,2nm e a razão de extinção do PBS foi de 45 dB.	113
Figura 4.33 Diagramas de olho para os sinais downstream em função do nível de razão de extinção.	114
Figura 4.34 Avaliação de BER downstream para um $ER_D = 7,0$ dB variando ER_{PBS}	115
Figura 4.35 Avaliação de BER downstream para valores de razão de extinção de 4,0, 5,0 e 7,0 dB e para valores de isolamento do PBS de 25, 35 e 45 dB.	116
Figura 4.36 Avaliação do desempenho de BER upstream para uma distância de 20 km em função do valor de razão de extinção downstream (ER_D).	117
Figura 4.37 Diagrama de olho para os sinais upstream em função de alguns valores de ER_D	118
Figura 4.38 Avaliação de BER para o sentido downstream para distâncias de até 140 km. (a) topologia de auto-alimentação de cavidade única, (b) topologia de auto-alimentação de cavidade dupla.....	119
Figura 4.39 Diagramas de olho para o esquema de auto-alimentação de cavidade única e cavidade dupla, para as distâncias de 20, 40, 60 e 80 km.	120
Figura 4.40 Análise comparativa entre o esquema de auto-alimentação de cavidade única e o esquema de cavidade dupla.....	121
Figura A.1- Espectro de ASE do bloco RSOA.....	132
Figura A.2- Ilustração esquemática da paleta montada no Software OptiSystem para investigação do ganho.....	132
Figura A.3- Curvas de ganho em função da corrente contínua para diversos valores de P_{inj}	133

<i>Figura A.4-Curvas de ganho em função da P_{inj} para três valores fixos de corrente de polarização.....</i>	<i>134</i>
<i>Figura A.5-Ganho óptico em função do comprimento de onda para alguns valores de potência de injeção, mantendo o valor de corrente contínua fixado em 100 mA.</i>	<i>135</i>
<i>Figura A.6-Ganho óptico em função do comprimento de onda para quatro valores de corrente contínua, mantendo o fixando o valor da potência de injeção em -15 dBm.....</i>	<i>136</i>
<i>Figura B.1-Janela de trabalho do OptiSystem.</i>	<i>138</i>

Lista de Tabelas

<i>Tabela 1.1-Principais padrões de redes PONs padronizadas pelo ITU-T [10]-[14].</i>	31
<i>Tabela 2.1 -Plano de comprimento de onda dos canais downstream para um espaçamento de 100 GHz [14].</i>	39
<i>Tabela 2.2 -Plano de comprimento de onda dos canais upstream [14].</i>	39
<i>Tabela 2.3 -Evolução da capacidade das redes PON.</i>	40
<i>Tabela 4.1-Parâmetros globais utilizados na simulação</i>	93
<i>Tabela 4.2 Comparação entre os parâmetros do fotodetector PIN configurado no OptiSystem.</i>	100
<i>Tabela A.1- Características configuradas no software OptiSystem para o RSOA utilizado na topologia self-seeding.</i>	129
<i>Tabela A.2- Características configuradas no software OptiSystem para o AWG com 8 canais utilizado na topologia self-seeding.</i>	130
<i>Tabela A.3- Características configuradas no software OptiSystem para o acoplador de potência utilizado na topologia self-seeding.</i>	130
<i>Tabela A.4- Características configuradas no software OptiSystem para o circulador óptico utilizado na topologia self-seeding.</i>	130
<i>Tabela A.5- Características configuradas no software OptiSystem para o FRM utilizado na topologia self-seeding.</i>	131
<i>Tabela A.6- Características configuradas no software OptiSystem para o fotodetector PIN utilizado na topologia self-seeding.</i>	131

Lista de Acrônimos

Acrônimo	Definição	Tradução
ADC	<i>Analog to Digital Converter</i>	Conversor Analógico Para Digital
ADSL	<i>Asymmetric Digital Subscriber Line</i>	Linha Digital Assimétrica do Assinante
APD	<i>Avalanche Photodiode</i>	Fotodiodo Avalanche
ASE	<i>Amplified Spontaneous Emission</i>	Emissão Espontânea Amplificada
AWG	<i>Arrayed Waveguide Grating</i>	Grades Ordenadas em Guias de Onda
BER	<i>Bit Error Rate</i>	Taxa de Erro de Bit
BLS	<i>Broadband Light Source</i>	Fonte Óptica de Banda Larga
BPF	<i>Band-Pass Filter</i>	Filtro Passa Banda
BPON	<i>Broadband Passive Optical Network</i>	Rede Óptica Passiva Banda Larga
BtB (B2B)	<i>Back-to-Back</i>	Condição Transmissor-Receptor Face a Face
CD	<i>Chromatic Dispersion</i>	Dispersão Cromática
CLS	<i>Centralized Light Source</i>	Fontes Ópticas Centralizadas
CO	<i>Central Office</i>	Central do Provedor de Serviço
CR	<i>Coherent Receiver</i>	Receptor Coerente
DAC	<i>Digital-to-Analog Converter</i>	Conversor Digital para Analógico
DEMUX	<i>Demultiplexer</i>	Demultiplexador em Comprimento de Onda
DFB	<i>Distributed Feedback Laser</i>	Laser de Realimentação Distribuída
DOCSIS	<i>Data over Cable Service Interface Specification</i>	Especificação de Interface de Serviços de Dados sobre Cabo
DSL	<i>Digital Subscriber Line</i>	Linha Digital de Assinante
DPSK	<i>Differential Phase Shift Keying</i>	Chaveamento de Deslocamento em Fase Diferencial
DSP	<i>Digital Signal Processing</i>	Processamento Digital de Sinais
DTLA	<i>Decision Threshold Level Adjustment</i>	Ajuste de Limiar de Nível de Decisão
EDFA	<i>Erbium Doped Fiber Amplifier</i>	Amplificador à Fibra Dopado com Érbio
EDF	<i>Erbium Doped Fiber</i>	Fibra Dopada com Érbio
E-PON	<i>Ethernet Passive Optical Network</i>	Rede Óptica Passiva Baseada no Protocolo Ethernet
ER	<i>Extinction Ratio</i>	Razão de Extinção
FFCI	<i>Feed Forward Current Injection</i>	Injeção de Corrente de Alimentação Adiante
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>	Transformada de Fourier Rápida
FP-LD	<i>Fabry-Pèrot Laser Diode</i>	Laser Diodo de Fabry-Pèrot
FR	<i>Faraday Rotator</i>	Rotacionador de Faraday
FRM	<i>Faraday Rotator Mirror</i>	Espelho Rotacionador de Faraday
FSR	<i>Free Spectral Range</i>	Região Espectral Livre

FTTB	<i>Fiber To The Building</i>	Fibra até o Prédio
FTTC	<i>Fiber To The Curb</i>	Fibra até o Meio-Fio
FTTH	<i>Fiber To The Home</i>	Fibra até a Residência
FTTx	<i>Fiber to the x</i>	Fibra até o x
GSM	<i>Global System for mobile communication</i>	Sistema global de comunicações moveis
G-PON	<i>Gigabit-Capable Passive Optical Network</i>	Rede Óptica Passiva Capaz de Atender Gigabit
HDTV	<i>High Definition Television</i>	Televisão em Alta Definição
HFC	<i>Hybrid Fiber-Coaxial Cab</i>	Rede Híbrida de Fibra e Cabo Coaxial
HPS	<i>Hierarclical Packet Scheduling</i>	Escala hierárquica de pacotes
HWP	<i>Half Wave Plate</i>	Placa de Meia Onda
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
IFFT	<i>Inverse Fast Fourier Transform</i>	Transformada Rápida de Fourier Inversa
IQ	<i>In Phase and Quadrature</i>	Em fase e em Quadratura
ISI	<i>Inter-Symbol Interference</i>	Interferência Inter Simbólica
ITU-T	<i>Telecommunication Standardization Sector of International Telecommunication Union</i>	Setor de Padronização da Telecomunicação da União Internacional de Telecomunicações
HPDG	<i>High Polarization Dependence Gain</i>	Ganho com Alta Dependência ao Estado de Polarização
LAN	<i>Local Area Network</i>	Redes locais
LD	<i>Laser Driver</i>	Conversor de sinais digital-analógicos
LED	<i>Light Emitting Diode</i>	Diodo Emissor de Luz
LPDG	<i>Low Polarization Dependence Gain</i>	Ganho com Baixa Dependência ao Estado de Polarização
LO	<i>Local Oscillator</i>	Oscilador Local
LTE	<i>Long Term Evolution</i>	Evolução de longo prazo
MAN	<i>Metro Area Network</i>	Redes metropolitanas
MUX	<i>Multiplexer</i>	Multiplexador em Comprimento de Onda
MPN	<i>Mode Partition Noise</i>	Repartição de Ruído Modal
NG-PON	<i>Next Generation Passive Optical Network</i>	Redes Ópticas Passivas de Próxima Geração
NRZ	<i>Non Return-to-Zero</i>	Não Retorno à Zero
OA	<i>Optical Amplifier</i>	Amplificador Óptico
OIL	<i>Optical Injection Locking</i>	Travamento por Injeção Óptica
OFDM	<i>Optical Frequency Division Multiplexing</i>	Divisão por Multiplexação em Frequência Óptica
OFDM-PON	<i>Optical Frequency Division Multiplexing Passive Optical</i>	Rede Óptica Passiva Baseada em Divisão por Multiplexação em Frequência Óptica
OFDMA	<i>Optical Frequency Division Multiplexing Access</i>	Acesso por Divisão por Multiplexação em Frequência

		Óptica
OLT	<i>Optical Line Terminal</i>	Terminal de Linha Óptica
ONT	<i>Optical Network Termination</i>	Terminação de Rede Óptica
ONU	<i>Optical Network Unit</i>	Unidade de Rede Óptica
OOK	<i>On/Off Keying</i>	Chaveamento Liga-Desliga
OSA	<i>Optical Spectrum Analyzer</i>	Analisador de Espectro Óptico
OSNR	<i>Optical Signal-To-Noise Ratio</i>	Razão Sinal-Ruído Óptica
PC	<i>Polarization Controller</i>	Controlador de Polarização
PDL	<i>Polarization Dependent Loss</i>	Perda Dependente da Polarização
PIN	<i>p-instrinc-n Diode</i>	Diodo p-intrínseco-n
PON	<i>Passive Optical Network</i>	Rede Óptica Passiva
PRBS	<i>Pseudo Random Bit Sequence</i>	Sequência Pseudo-Aleatória de Bits
PSSL	<i>Pre-Spectrum Sliced Light</i>	Fonte Óptica Pré-Fatiada
P2MP	<i>Point to Multi Point</i>	Ponto para Múltiplo ponto
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>	Modulação de amplitude em quadratura
QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>	Modulação de Desvio de Fase em Quadratura
RF	<i>Radiofrequency</i>	Rádio Frequência
RIN	<i>Relative Intensity Noise</i>	Intensidade Relativa de Ruído
RITENET	<i>Remote Interrogation of Terminal Network</i>	Interrogação Remota do Terminal de Rede
RN	<i>Remote Node</i>	Nó Remoto
RSOA	<i>Reflective Semiconductor Optical Amplifier</i>	Amplificador Óptico Semicondutor Refletivo
Rx	<i>Receiver</i>	Receptor
Rx Dw	<i>Downstream Receiver</i>	Receptor de Sinais <i>Downstream</i>
Rx Up	<i>Upstream Receiver</i>	Receptor de Sinais <i>Upstream</i>
SFF	<i>Small Form-Factor</i>	Transceptor Compacto e Soldável
SFP	<i>Small Form-Factor Pluggable</i>	Transceptor Compacto e Plugável
SOA	<i>Semiconductor Optical Amplifier</i>	Amplificador Óptico Semicondutor
SOP	<i>State of Polarization</i>	Estado de Polarização
SS	<i>Self-Seeding</i>	Auto-alimentação
SSMF	<i>Standard Single-Mode Fiber</i>	Fibra Padrão Monomodo
TDM	<i>Time Division Multiplexing</i>	Multiplexação por Divisão no Domínio do Tempo
TDM-PON	<i>Time Division Mutliplexing Passive Optical Network</i>	Rede Óptica Passiva Baseada em Multiplexação por Divisão no Domínio do Tempo
Tx	<i>Transmitter</i>	Transmissor
Tx Dw	<i>Downstream Transmitter</i>	Transmissor <i>Downstream</i>
Tx Up	<i>Upstream Transmitter</i>	Transmissor <i>Upstream</i>
TWDM-PON	<i>Time-Wavelength Division Mutliplexing Passive Optical Network</i>	Rede Óptica Passiva Baseada em Multiplexação por Divisão no Domínio do Tempo e em Comprimento de Onda
UHDTV	<i>Ultra-High Definition Television</i>	Televisão em Ultra-Alta Definição

UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunication System</i>	Sistema Universal de Telecomunicações Moveis
XG-PON	<i>10 Gigabit-Capable Passive Optical Network</i>	Rede Óptica Passiva Capaz de Atender 10 Gigabit
WAN	<i>Wide Area Network</i>	Redes Geograficamente Distribuída
WR	<i>Wavelength Reuse</i>	Reuso de Comprimento de Onda
WDM	<i>Wavelength Division Multiplexing</i>	Multiplexação por Divisão em Comprimento de Onda
WDM-PON	<i>Wavelength Division Multiplexing Passive Optical Network</i>	Rede Óptica Passiva Baseada em Multiplexação por Divisão em Comprimento de Onda

1. INTRODUÇÃO

As redes de telecomunicações podem ser classificadas em redes geograficamente distribuídas (*Wide Area Networks- WAN*), redes metropolitanas (*Metropolitan Area Networks-MAN*) e redes locais (*Local Area Networks-LAN*), de acordo com seu alcance geográfico como ilustrado na **Fig. 1.1**.

WANs são redes que englobam países ou continentes, tratam-se de redes que alcançam milhares de quilômetros. As taxas de dados nestas redes variam de dezenas de Gb/s a Tb/s. A WAN distingue-se da LAN pelo seu porte e estrutura de telecomunicações. As WANs normalmente são de caráter público, geridas por um operador de telecomunicações.

MANs são redes de caráter metropolitano, que interligam usuários numa área geográfica maior que as abrangidas pelas LANs, mas menor que as áreas abrangidas pelas WANs. Uma MAN normalmente resulta da interligação de várias LANs, cobrindo uma área geográfica de média dimensão, tipicamente um campus ou uma cidade. Podem ser redes de domínio privado ou público, podendo atingir taxa de transmissão da ordem de 40 Gb/s. Podem estar inclusivamente ligadas às redes WANs.

Figura 1.1-Abrangência de cada uma das diferentes classificações de redes.

As redes LANs são redes privadas contidas em um único edifício ou, por exemplo, em um campus universitário. Possuem um alcance de alguns quilômetros de extensão. Tais redes são amplamente utilizadas para conectar computadores pessoais ou

estações de trabalho em escritórios e instalações industriais. LANs modernas podem alcançar até 10 Gb/s, porém taxas típicas estão na ordem de 100 Mb/s [1].

Como parte da rede de telecomunicações, a rede de acesso é responsável por cobrir a última milha, até o assinante final, entre as redes MANs e LANs, fazendo a conexão entre o provedor de serviço (*Central Office-CO*) e os clientes. Essas redes atingem distâncias de cobertura da ordem de dezenas de quilômetros, oferecendo taxas de transmissão por usuário da ordem de dezenas ou centenas de Mb/s. A **Fig. 1.2** ilustra uma rede de acesso genérica, composta por rede tronco (*Backbone*), central de serviço, nó remoto (*Remote Node-RN*) e as interfaces do usuário.

As redes de acesso podem ser classificadas principalmente em redes wireless, esquemas redes digital do assinante (*Digital Subscriber Line - xDSL*), redes híbridas cabo co-axial e fibra óptica (*Hybrid Fiber Coax - HFC*) e redes de acesso ópticas [2-14]. A próxima seção descreve as redes de acesso óptica que serão abordadas neste trabalho.

Figura 1.2- Esquema de uma rede de acessos genérica.

1.1 Redes Ópticas

A demanda de largura de banda exigida pelos assinantes vem aumentando rapidamente devido ao surgimento de novos serviços, tais como UHDTV (*Ultra High Definition Television*), jogos online, aprendizado interativo, serviços médicos remotos e TV 3D, que requerem um aumento substancial na largura de banda, fazer aumentar a densidade de tráfego de dados em redes móveis. A **Fig. 1.3** mostra a demanda exigida por algumas aplicações mais comuns [15].

Dados divulgados pela Anatel (Agência Nacional de Telecomunicações) mostram que o Brasil teve cerca de 25 milhões de acessos de banda larga fixa em

fevereiro de 2016, e o SCM (Serviço de Comunicação Multimídia - SCM) esteve presente em 37,67% dos domicílios [15]. A quantidade de usuários de banda larga vem crescendo consideravelmente nos últimos anos e os requisitos de largura de banda mínima também têm aumentado. A **Fig. 1.4** ilustra a evolução do acesso em serviços nos últimos anos, onde a curva em vermelho ilustra a variação percentual no aumento de acessos de um ano para o outro [9].

Figura 1.3 -Demanda requerida por aplicações de banda larga [5].

Devido a este aumento, as redes de acesso empregadas atualmente no Brasil, majoritariamente redes baseadas na tecnologia de linha digital do assinante xDSL, que hoje representam em torno de 52% dentre as tecnologias de acesso de banda larga, em um futuro próximo, se tornarão ineficientes para atender demandas em larga escala [15].

Neste cenário, as redes ópticas surgem como uma alternativa capaz de atender as atuais demandas das redes de acesso. Devido à ampla largura de banda fornecida pela fibra óptica, as redes ópticas de acesso têm capacidade para transmissão em taxas de Gb/s, com alcance de dezenas de quilômetros entre o terminal de linha óptica OLT (*Optical Line Terminal*) localizado no CO, e as terminações de redes ópticas, (*Optical Network Termination* – ONT), ou seja, o usuário final. Para médio e longo prazo, a

solução para a limitação da capacidade das redes xDSL é estender a fibra o mais próximo possível do usuário final [6-8].

Figura 1.4- Evolução do SCM nos últimos anos [15].

Tendo como meta compartilhar a capacidade oferecida pela fibra óptica em grupos de usuários e oferecer aos provedores uma redução dos seus custos de instalação e operação, visando o ganho de escala para o atendimento de um grande número de assinantes de serviço, as redes de acesso que fornecem a melhor relação custo-benefício são as que dispensam ou minimizam o uso de equipamentos ativos, no percurso do seu alcance físico, reduzindo o consumo de energia e simplificando a rede com uma arquitetura passiva.

Devido a esta demanda por banda larga, redução de custos, aumento do número de usuários e simplicidade na instalação e operação, as redes ópticas passivas, PONs (*Passive Optical Network*) têm-se mostrado eficiente para redes de acesso [10-14].

Baseada em uma topologia ponto-multiponto (*point to multi-point* - P2MP), como ilustrado na **Fig. 1.5**, é possível ter uma rede de acesso utilizando fibra óptica como meio de transmissão de dados, eficiente e de alta capacidade.

Os principais elementos de uma rede PON são:

- Terminal OLT, como já mencionado fica localizado no CO, onde estão os equipamentos para transmissão de dados *downstream* e detecção de dados *upstream*.
- Terminais ONTs, ou unidade de redes ópticas (*Optical Network Unit*- ONU):

o termo ONU é usado quando ainda existe uma rede subsequente para chegada ao assinante, onde estão localizados os equipamentos para transmissão e detecção.

- Armários de rua, ou caixas de emenda, denominados nós remotos (RNs), contendo elementos passivos responsáveis por direcionar os dados de subida e de descida.
- Fibras alimentadoras na OLT e fibras distribuidoras no ONT ou RN.

As redes PONs podem ser diferenciadas a partir do posicionamento dos seus usuários finais, e são conhecidas como fibras até o ponto “x”: FTTx (*Fiber to the x* – FTTx) onde x referente ao destino, podendo se referir a um prédio, FTTB (*Fiber to the Building* – FTTB), a um armário de rua, FTTCab (*Fiber to the Cabinet* – FTTCab), até uma caixa de passagem no meio fio, FTTC (*Fiber to the Curb* – FTTC) ou até uma residência FTTH (*Fiber to the Home* – FTTH). A **Fig. 1.5** mostra uma ilustração esquemática dessas redes. Estes esquemas possuem um alcance superior aos xDSL, além de permitir um compartilhamento da estrutura física entre usuários [10-14].

Figura 1.5 -Alguns esquemas FTTx de redes PON.

As redes PONs mais utilizadas atualmente são as redes passivas baseadas em multiplexação por divisão no tempo, TDM (*Time Division Multiplexing*). Neste tipo de arquitetura, um único par de comprimentos de onda é compartilhado entre os usuários da rede através de divisor/combinador de potência no RN. Os dados nos sinais de descida sentido *downstream*, são enviados na forma de *broadcast*. Desta forma, cada

ONT recebe todos os pacotes enviados pela OLT, filtrando os dados que lhe forem destinados.

Para o sentido *upstream*, cada ONT possui um intervalo de tempo pré-definido para executar a solicitação de dados ao OLT. Assim, a taxa de transmissão máxima oferecida a cada ONT depende da quantidade de usuários conectados em cada OLT.

A padronização das redes PON foi iniciada em 1995 com o surgimento do APON ou ATM-PON (*Asynchronous Transfer Mode on Passive Optical Networks* – ATM-PON), considerado na época o melhor sistema de transporte que suportava simultaneamente a transmissão de voz, dados e vídeo. Em seguida, os padrões BPON (*Broadband-PON* – BPON), sendo o FSAN (*Full Service Access Network* - FSAN) responsável por essas atividades de padronização das novas tecnologias PON e posteriormente EPON (*Ethernet- PON* – EPON) em 2000 padronizado pelo IEEE. A BPON opera com taxas de 155 Mb/s ou 622 Mb/s para *downstream* e 155 Mb/s para *upstream*. Em 2007 foi padronizado XG-PON (10-Gigabit-PON) com capacidade 10 Gb/s para o sentido *downstream* e 2,5 Gb/p para o sentido *upstream*. Em 2015 foi concluído a padronização do ITU-t G.989.x baseada no esquema TWDM-PON (*Time-Wavelength Division Multiplex Passive Optical Network*) com capacidade agregada de 40 Gbps para o sentido *downstream* e 10 Gbps para o sentido *upstream* [10-14].

Em contrapartida, o padrão EPON IEEE 802.3ah opera com taxas simétricas de 30 Mb/s e 60Mb/s por ONT podendo alcançar 32 usuários por OLT. O padrão BPON já é considerado como uma tecnologia legada, enquanto o padrão EPON proporcionou um avanço tecnológico em relação ao BPON, tendo sido implementada largamente na Coreia do Sul e Japão [9].

Nos EUA e na Europa a tecnologia que obteve maior destaque é a GPON (*Gigabit Passive Optical Network* – GPON), padronizada pelo conjunto de normas G.984.x-ITU-T (*Telecommunication Standardization Sector of International Telecommunication Union* - ITU-T), tendo o processo de padronização iniciado em 2003. A **Tabela 1.1** sumariza os principais padrões da tecnologia PON.

Tabela 1.1-Principais padrões de redes PONs padronizadas pelo ITU-T [10]-[14].

	B-PON	GPON	XG-PON	TWDM-PON
Padronização	ITU-T G.983.x	ITU-T G.984.x	ITU-T G.987.x	ITU-T G.989.x
Comprimentos de onda <i>downstream</i> [nm]	1490	1480 a 1500	1575 a 1580	1596 a 1603
Comprimentos de onda <i>upstream</i> [nm]	1310	1290 a 1330	1260 a 1280	1524 a 1544
Típicas taxas de transmissão <i>downstream</i>	622.08 Mb/s	2.488 Gb/s	9.952 Gb/s	40 Gb/s
Típicas taxas de transmissão <i>downstream</i>	155.52 Mb/s	1.244 Gb/s	2.5 Gb/s	10 Gb/s

Embora as redes PONs baseadas em tecnologia TDM sejam um avanço significativo em comparação as redes xDSL, oferecendo banda larga, a diversos usuários da rede, e atualmente atingindo capacidade agregada de até 40 Gbps, estas tecnologias poderão não atender as necessidades das operadoras a longo prazo, devido característica intrínseca de acesso baseado em TDMA (*Time Division Multiplexing Access* – TDMA), onde a largura de banda disponível para cada usuário é limitada pelo número de usuários ONTs na rede. Um dos fatores limitantes destas arquiteturas baseadas em redes TDM-PON resulta do uso de divisores de potência, que limita o número de usuários na rede. Para demandas futuras das operadoras, em que sejam necessárias redes com capacidade da ordem de 400 Gbps podendo atender até 1024 usuários ONTs por OLT, com alcance de 20 km, as redes baseadas em tecnologia TDM não seriam viáveis.

Neste contexto, as redes ópticas baseadas em multiplexação por comprimento de onda WDM-PON (*Wavelength Division Multiplexed Passive Optical Network*) tornam-se uma opção para superar as limitações das redes TDM-PON. Em redes WDM-PON cada usuário ONT possui, em princípio, um par de comprimentos de ondas para o sentido *downstream* e *upstream*, distinto dos demais usuários. Desta forma, não há compartilhamento da banda entre os assinantes da rede. Sendo assim, cada usuário utiliza toda a largura de banda disponível na rede. Outra limitação superada ocorre pela substituição do divisor de potência pelo AWG (*Arrayed Waveguide Grating*) que apresenta uma perda de inserção independente do número de usuários na rede, ao contrário dos divisores de potência, que comprometem o orçamento de potência da rede

com o aumento do número de OLTs.

No entanto, do ponto de vista da operadora, a disponibilização de vários comprimentos de onda (dois para cada usuário ONT) torna-se um gargalo nesta tecnologia, pois a torna complexa e com custos excessivos, já que se faz necessário manter um grande número de transmissores com diferentes comprimentos de onda em estoque. Está é uma questão crucial para implantação de redes de acesso óptico, pois é necessário encontrar um compromisso entre a capacidade oferecida pela rede e a relação custo-benefício. Assim, surgiram os transmissores capazes de operar em qualquer comprimento de onda dentro de uma janela espectral pré-definida. Tais transmissores são conhecidos na literatura como transmissores *colorless*, ou ainda, *color-free*, e permitem que os custos de implementação e operação sejam minimizados devido ao uso de um único tipo de dispositivo de transmissão.

1.2 Objetivos e Metodologia

O objetivo deste trabalho é então analisar em um ambiente de simulação uma topologia que combina as técnicas de auto-alimentação e o reuso de comprimentos de onda, bem como utiliza uma estrutura com dupla polarização no circuito de recirculação localizado na OLT. Esta abordagem considera a preservação do estado de polarização (*State of Polarization-SOP*) dentro da cavidade externa por meio do circuito de manutenção do SOP proposto. Adicionalmente, permite um duplo apagamento óptico na portadora óptica antes da inserção de novos dados *downstream*.

Na técnica de auto-alimentação o próprio ruído de emissão espontânea amplificado do dispositivo semicondutor, é utilizado como semente óptica para um laser de cavidade externa formado entre o dispositivo semicondutor e um espelho de Faraday localizada no nó remoto. A técnica de reuso de comprimento de onda, utiliza um dispositivo semicondutor refletivo operando em regime de saturação, de forma que os dados são suprimidos da portadora óptica antes de serem inseridos novos dados, portanto reutilizando o mesmo comprimento de onda para ambos os sentidos de transmissão.

Desta forma, este esquema impacta diretamente o desempenho sistêmico da rede, propiciando redes de maior alcance devido à melhora no orçamento de potência e nas características mais flexíveis dos transmissores empregados. Conseqüentemente, esta topologia reduz os efeitos de modulação, retroespalhamento Rayleigh e reflexões de Fresnel, melhorando o desempenho na cavidade de auto-alimentação no OLT.

Como metodologia de estudo, vários parâmetros e grandezas foram medidas e monitoradas no ambiente de simulação, tais como caracterizações óptico-elétricas, avaliações de desempenho de taxa de erro de bit (*Bit Error Ratio* - BER), com função do comprimento de onda, como função dos níveis de razão extinção, diagramas de olhos ópticos e espectros ópticos, largura de ocupação espectral e avaliação de penalidades em potência (para valores de BER de 10^{-7} e de 10^{-12} como função do comprimento do enlace).

1.3 Organização do trabalho

No *Capítulo 2*, são apresentadas as principais redes PONs já padronizadas pelo ITU-T bem como sua evolução, com destaque para o aumento da taxa de transmissão efetiva oferecida ao usuário, alcance das redes e número de ONTs por OLT. Serão mostrados quais os desafios e requisitos que nortearam a proposição sucessiva dos novos padrões de redes PONs.

No *Capítulo 3*, são apresentadas as redes WDM-PON sendo dado enfoque nas técnicas de auto-alimentação e reutilização de comprimento de onda, pois acredita-se que tais técnicas poderão ser capazes de atender os requisitos mínimos do FSAN e ITU-T para as próximas gerações de redes PONs.

No *Capítulo 4*, é apresentada em detalhes a topologia proposta, e são destacadas as vantagens agregadas pela topologia frente às principais topologias encontradas na literatura técnica. São apresentados os resultados deste trabalho, comparando-os com os resultados experimentais relatados em [16], bem como são exploradas as limitações da topologia em termos de alcance e aumento da taxa de transmissão.

No *Capítulo 5*, são apresentadas as conclusões obtidas da investigação deste trabalho, bem como os trabalhos futuros relacionados a esta linha de pesquisa.

No apêndice A discute-se a ferramenta utilizada para análise desta topologia e caracterização dos elementos que compõem a rede. No apêndice B apresenta-se uma visão geral do ambiente de simulação OptiSystem 13.

2. REDES PONs

2.1 Redes PONs padronizadas

Neste capítulo são apresentadas as principais configurações de redes ópticas passivas já padronizadas pelo ITU-T e em uso atualmente, sendo expostas suas principais características: topologia e capacidade de transmissão, dentre outras. Será também feita uma avaliação dos padrões de redes PON em termos de evolução de sua tecnologia e capacidade agregada.

2.1.1 GPON

Neste padrão, o sistema tem capacidade de transmissão *downstream* de 2,5 Gbps e *upstream* de 1.25 Gbps, podendo ser segmentado em até 128 usuários por OLT, além de reservar uma banda dedicada para aplicações como vídeo analógico em 1550nm, conforme a norma G.984. Entretanto, as segmentações mais utilizadas pelos provedores são de 32 ou 64 ONTs por OLT atingindo uma distância máxima de 60 km [11]. A **Fig. 2.1** ilustra uma rede do tipo GPON.

Os principais elementos óptico-eletrônicos de uma tecnologia GPON são:

- OLTs GPON: transmissores modulados em intensidade e modo contínuo dentro da janela de operação especificado na **Tab. 1.1**; receptores capazes de detectar sinais modulados em intensidade e modo rajada e um acoplador WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) 1310/1490 nm, podendo todos esses elementos ser integrados em um transceptor compacto e plugável (*Small Form-Factor Pluggable* – SFP).
- ONTs GPON: contêm transmissores modulados em intensidade e modo rajada dentro da janela óptica da **Tab. 1.1**. Receptores para detecção de sinais ópticos modulados em intensidade e modo contínuo, acopladores WDM 1310/1490 nm, novamente, todos estes componentes podem ser encapsulados em SFP.

As redes GPONs foram um grande avanço para fornecer banda larga a um significativo número de usuários localizados a algumas dezenas de quilômetros dos COs. No entanto, este sistema ainda não é capaz de oferecer elevada capacidade de transmissão, já que no acesso múltiplo TDM tem-se taxas típicas da ordem de 40 Mbps por ONT.

Figura 2.1 -Arquitetura física de uma rede GPON [11].

Para que se tornem vantajosas em termos de custo de instalação para as operadoras as novas gerações de redes PON devem coexistir com a infra-estrutura de equipamentos das redes legadas. Assim, existem dois cenários para migração de novas tecnologias de acesso: *brown-field* onde a nova tecnologia deverá coexistir com as redes legadas e *green-field* onde não se encontram tecnologias ópticas legadas.

Uma desvantagem da tecnologia TDM-PON está na sua estrutura de compartilhamento da banda. As migrações para novas configurações de redes PON só deverá ser possível através de alocação espectral em janelas ópticas distintas das já padronizadas.

2.1.2 XG(S)-PON

A estrutura física e lógica do XG-PON são similares as da sua antecessora GPON, diferindo nos valores das taxas de transmissão, janela de comprimento de onda, nas bandas passante dos acopladores e nos transceptores. Esta configuração tem capacidade para 10 Gbps no sentido *downstream* e 2.5 Gbps no sentido *upstream*, dentro das janelas ópticas descritas na **Tab. 1.1**, com um mínimo de 64 ONTs por OLT, podendo ainda alcançar 256 ONTs em uma única estrutura PON [12].

Os elementos ativos geralmente utilizados na estrutura XG-PON e na sua predecessora são o laser DFB (*Distributed Feedback Laser*) e receptores APD (*Avalanche Photo Diode*) no OLT e, no lado do usuário, diodo laser de Fabry-Pérot (*Fabry-Pérot Laser Diode- FP-LD*) diretamente modulados e, como receptores diodos

PIN (p-*intrinsic*-n) como ilustrado na Fig. 2.2.

Figura 2.2 -Esquemático de uma rede XG-PON [12].

Essa tecnologia possibilitou quadruplicar a capacidade das redes GPON, atingindo 160 Mbps em uma estrutura com 64 usuários. Devido à utilização de diferentes janelas ópticas para GPON e XG-PON as duas tecnologias podem coexistir em uma mesma infraestrutura de fibra óptica [12].

Já em meados de 2016 o ITU-T padronizou o G.9870.1, denominado XGS-PON (*10-Gigabit capable symmetric passive optical network*). Esta tecnologia é largamente baseada na recomendação ITU-T G.987.1. A maior mudança em relação a XG-PON para possibilitar a transmissão de 10 Gbps simétrica é no aparato eletrônico da interface de rede do usuário. A arquitetura XGS-PON é capaz coexistir com as redes legadas GPON e XG-PON, por meio da sobreposição de comprimentos de onda, e/ou através de acesso múltiplo por divisão no tempo [13].

2.1.3 TWDM-PON

Em meados de 2011 o FSAN definiu os requisitos para a próxima geração PON chamada NG-PON2, a qual deveria atingir taxa mínima de 40 Gbps no sentido

downstream.

Dentre as tecnologias candidatas à padronização, a que atendia naquele momento os requisitos para a próxima geração de redes PON, confiabilidade, coexistência com tecnologias legadas e custo-benefício, foi a TWDM-PON. Sendo a tecnologia TWDM-PON escolhida para ser a NG-PON2 o ITU-T *Group Study 15/Q2* e o FSAN (*Next Generation PON Task Group*), finalizaram as extensões das recomendações G.989.3 no final de 2015 (*NG-PON Transmission Convergence Layer*) e G.989 (*NG-PON2 Definitions, abbreviations and acronyms*).

De forma geral, a TWDM-PON é uma rede constituída de 4 canais ópticos, podendo chegar até 8 conforme a norma G.989.x. Cada canal óptico possui um comprimento de onda específico e diferente dos demais, conforme ilustração na **Fig. 2.3**. Pode-se alcançar taxas de transmissão no sentido *downstream* de 10 Gbps por canal e no sentido *upstream* 2,5 Gbps.

Figura 2.3 -Arquitetura física de uma rede TWDM-PON.

Desta forma as redes TWDM-PON têm capacidade nominal de 40 Gbps para o sentido *downstream* e de 10 Gbps para o sentido *upstream*. Como nas redes TDM-PON o sentido *downstream* ocorre na forma de broadcast e o *upstream* no modo rajada, porém os elementos de rede são diferentes das PONs predecessoras. Nas ONTs é necessários transmissores *colorless* e filtros sintonizáveis capazes de operar em uma larga faixa de comprimentos de onda [14].

No OLT TWDM-PON tem-se um conjunto de fontes ópticas com oito comprimentos de onda fixados e espaçados em 100 GHz, ilustrado na **Tab. 2.1**. Caso o sistema seja expandido para dezesseis comprimentos de onda o espaçamento espectral entre eles seria de 50 GHz na OLT. É necessário também a utilização no OLT de um MUX (*Multiplexer*), um DEMUX (*Demultiplexer*) e um acoplador de sinais WDM, responsável por direcionar os tráfegos *downstream* e *upstream*.

Tabela 2.1 -Plano de comprimento de onda dos canais *downstream* para um espaçamento de 100 GHz [14].

Canal	Frequência [THz]	Comprimento de onda [nm]
1	187,8	1596,34
2	187,7	1597,19
3	187,6	1598,04
4	187,5	1598,89
5	187,4	1599,75
6	187,3	1600,60
7	187,2	1601,46
8	187,1	1602,31

O ONT TWDM-PON possui uma fonte óptica *colorless* e um receptor *colorless*, sendo necessário um filtro sintonizável ou alguma forma alternativa de seleção em comprimento de onda no RN ou na OLT. O filtro *colorless* precisa ter uma banda passante inferior a 100 GHz (para sinais *downstream* espaçados em 100 GHz). No ONT não se tem valores específicos de comprimento de onda para os sinais *upstream*. A recomendação da norma é alocação dos canais dentro das janelas ópticas definidas na **Tab. 2.2** [14].

Tabela 2.2 -Plano de comprimento de onda dos canais *upstream* [14].

Espaçamento Inter-canal (GHz)	Plano de comprimento de onda (nm)	Quantidade de canais
200	1524-1544	4
100	1528-1540	8

2.2 Futuras PONs

O FSAN tem como uma das suas missões delinear as características das NG-PONs, de forma a permitir uma coexistência com redes legadas ou uma migração suave para a nova arquitetura. A capacidade oferecida pelas gerações NG-PON obedece a uma tendência de aumento de capacidade por um fator de quatro, ou seja, a NG-PON_{n+1} tem uma capacidade quatro vezes maior do que a NG-PON_n projeção que se mantêm desde a padronização da G-PON, conforme mostra a **Tab. 2.3**.

No entanto, a expectativa do mesmo aumento da capacidade em relação à taxa efetiva *downstream* entregue ao terminal ONT não é observada, pois esta tem aumentado por um fator de dois a cada nova geração NG-PON, atingindo valores da ordem de 160 Mbps em uma configuração TWDM-PON com 256 ONTs por OLTs.

Tabela 2.3 -Evolução da capacidade das redes PON.

Tecnologia	Segmentação	Capacidade/ Distancia	<i>Downstream</i> (Mbps)	<i>Upstream</i> (Mbps)
G-PON	32/64/128	2,5 Gbps/ 20 km	80/40/20	40/20/10
XG-PON	64/128/256	10 Gbps/ [40-60] km	160/80/40	40/20/10
TWDM-PON	128/256/512	40 Gbps/ [40-60] km	320/160/80	80/40/20

Redes de acesso ópticas utilizam fibras monomodo (*Single Mode Fibers-SMFs*), as características de SMF são dependentes do comprimento de onda. A **Fig. 2.4** mostra a atenuação de fibras monomodo sobre a faixa de comprimento de onda de interesse para comunicações ópticas com as bandas definidas pelo ITU-T. Pode-se notar que a atenuação do sinal óptico é menor nas bandas C e L.

A **Fig. 2.4** também mostra a dispersão cromática, CD (*Chromatic Dispersion*), a qual pode limitar o alcance do sistema com o aumento da taxa de transmissão, que também é dependente do comprimento de onda, com valor zero em aproximadamente 1310 nm [14].

Outro aspecto preocupante ocorre em relação às opções de comprimento de onda e a disponibilidade de dispositivos opto-eletrônicos correspondentes. Por exemplo, os amplificadores à fibra dopada em Érbio, EDFA (*Erbium Doped Fibre Amplifier*) disponíveis geralmente trabalham nas bandas C e L, enquanto que os amplificadores

ópticos semicondutores SOAs (*Semiconductor Optical Amplifiers*) podem ser fabricados para trabalhar em qualquer banda de interesse. Contudo, dispositivos semicondutores opto-eletrônicos apresentam desempenho dependente do comprimento de onda de operação.

Figura 2.4 -Atenuação e dispersão cromática para fibras monomodo [14].

A **Fig. 2.5** mostra o plano de comprimento de onda de PONs *legadas*. Pode-se notar que existem problemas de alocação espectral para futuras gerações PONs. De fato, na **Fig. 2.5**, nota-se que a tecnologia G-PON tem a maior ocupação espectral (60 nm), no entanto oferecendo a menor capacidade (2,5 Gbps). Com a expectativa de que a próxima PON possa atingir uma capacidade de 160 Gb/s, a coexistência entre PONs de capacidade de 2,5 Gb/s, 10 Gb/s, 40 Gb/s e 160 Gb/s na mesma fibra torna-se uma dificuldade acentuada. Desta forma, uma opção para alocação espectral da futura NG-PON3 seria o uso parcial ou total da janela óptica utilizada na tecnologia G-PON. Desta forma pode-se notar que terminais *colorless* nas ONTs deverão ser mantidos, pois será necessário que operem em uma grande faixa de comprimentos de onda.

Outro fator limitante pode ser observado na **Fig. 2.5** em relação ao filtro RF-Vídeo, que requer banda de guarda ocupando grande parte da banda-C, onde a perda da fibra é menor e onde EDFAs podem ser utilizados.

Com base no que foi exposto pode-se levantar três questionamentos que são fundamentais para as próximas gerações PONs: qual deverá ser a capacidade oferecida pela próxima NG-PON? Será a próxima G-PON baseada em tecnologias de acesso híbridas TWDM? A próxima NG-PON será compatível com as redes G-PONs existentes ?

Figura 2.5 -Alocação espectral das bandas ópticas padronizadas pelo ITU-T[14,16].

Existem algumas possibilidades descritas na literatura técnica que são capazes de atender a esses requisitos de desafios das NG-PONs. Serão discutidas a seguir algumas delas: redes OFDM-PON (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing Passive Optical Network*), PONs coerentes e redes WDM-PON [17-18].

2.2.1 OFDM-PON

A multiplexação de sub-portadoras ortogonais no domínio da frequência (OFDM) tem sido empregado com sucesso em vários padrões de comunicações, tais como *broadcasting* de vídeo e áudio e comunicação sem fio. Embora o OFDM seja relativamente novo em comunicações ópticas, tem atraído grande interesse e tornou-se um tópico popular de pesquisa ao redor do mundo, desde a disponibilização no mercado de conversores analógico-digital e digital-analógico de altas taxas [19].

O conceito básico de OFDM é que altas taxas de transmissão são transmitidas por um número elevado de sub-portadoras ortogonais em frequência com taxas menores. O procedimento aproveita-se da eficiência do algoritmo IFFT (*Inverse Fast Fourier Transform*) para multiplexar subportadoras de dados. Devido a propriedade de ortogonalidade, as sub-portadoras OFDM são sobrepostas no domínio da frequência,

resultando em uma alta eficiência espectral. Por exemplo, taxas de transmissão agregadas de 40 Gbps com modulação em intensidade, podem ser alcançadas com o uso de 4 sub-portadoras moduladas a 10 Gbps cada, com espaçamento de 12,5 GHz entre elas. Como resultado, temos uma ocupação espectral de apenas 50 GHz (0,4 nm) [20].

Por outro lado a taxa de transmissão de cada sub-portadora OFDM é reduzida. Desta forma, o sistema torna-se mais robusto à efeitos de dispersão cromática para transmissão com taxas maiores que 10 Gbps. Resumindo, as vantagens do OFDM se concentram na menor complexidade computacional, alta eficiência espectral e menor impacto da dispersão da fibra [20].

Figura 2.6 –Espectro de um sinal OFDM com três sub-portadoras.

Como ilustrado na **Fig. 2.6**, um sinal OFDM contém 3 sub-portadoras sobrepostas no domínio da frequência e ortogonais entre si. A transmissão *downstream* de uma tecnologia OFDM-PON ocorre em broadcasting para todas as ONTs, as quais compartilham o meio de transmissão operando em TDM.

Portanto, a transmissão *downstream* de uma OFDM-PON é essencialmente uma técnica híbrida que combina OFDM e acesso múltiplo por divisão no tempo TDMA de forma que cada sub-portadora OFDM pode ser dividida para diferentes usuários em diferentes janelas de tempo (**Fig. 2.7**), para uma demanda específica da rede, de forma dinâmica [19-23].

Apesar das vantagens mencionadas nos parágrafos anteriores, a detecção de canais multiplexados em OFDM requer a utilização de dispositivos eletrônicos com resposta ultrarrápida. Desta forma a tecnologia OFDM-PON elevaria os custos para os terminais ONT, o que não seria atrativo para uma produção em larga escala [22].

Figura 2.7–Alocação das subportadoras em um esquema OFDM-PON no tempo.

2.2.2 WDM-PON

2.2.2.1 WDM-PONs Coerentes

A estrutura de uma rede WDM-PON coerente no sentido *downstream* está ilustrada na **Fig. 2.8** sendo o sentido *upstream* obtido de forma análoga. Nesta topologia existe um oscilador local LO (*local oscillator*) presente no ONT emitindo continuamente uma portadora sem dados, com comprimento de onda λ_{LO} próximo ao do sinal *downstream* λ_D .

Na detecção coerente tem-se o batimento óptico entre esses dois comprimentos de onda, em que o detector coerente CR (*Coherent Receiver*) é responsável por recuperar os parâmetros como a intensidade e fase da onda do sinal óptico recebido e fazer a conversão para o domínio elétrico. Faz-se ainda o uso de técnicas de processamento digital de sinais DSP (*Digital Signal Processing*) para mitigação dos efeitos deletérios impostos pela fibra.

Um ponto importante a se destacar das redes PONs coerentes é que se podem utilizar diferentes tipos de modulação digital [24]. Deve-se notar que a escolha por formatos de modulação de fase impõe o aumento de requisitos de relação sinal ruído óptico OSNR (*Optical Signal To Noise Ratio*), pureza e controle espectral do LO, aumentando assim o custo das fontes ópticas nesta tecnologia.

Figura 2.8 -Estrutura de uma rede WDM-PON coerente.

Por outro lado, esta topologia dispensa o uso de multiplexador/demultiplexador do tipo AWG (*Arrayed Waveguide Grating*) no nó remoto, já que a seletividade do comprimento de onda é feita pelo detector coerente, sendo condicionada ao batimento dos valores λ_D e λ_{LO} . Desta forma, esta tecnologia faz o uso de *splitter* no RN, podendo assim coexistir com PONs legadas.

Deve se destacar ainda o seu elevado orçamento de potência devido ao batimento óptico na detecção, podendo atingir valores superiores a 42 dB [25-29]. Para que as redes WDM-PON coerentes possam se tornar a próxima geração de redes PONs é necessário ainda melhorar a relação custo-benefício dos equipamentos de detecção coerente no ONT.

2.2.2.2 WDM-PON Sem Detecção Coerente

Tradicionalmente, redes PONs, em sua maioria TDM-PONs, combinam a alta capacidade de transmissão oferecida pela fibra óptica, com o baixo custo de instalação e manutenção que está associado a uma infraestrutura passiva. Em tais topologias, a portadora óptica é compartilhada entre os usuários por meio de um divisor de potência passivo. Como consequência, o número de ONUs é limitado pela alta perda no sinal causada pelo *splitter* e pela taxa de transmissão dos transceivers localizados na OLT e ONT.

Como solução para esta limitação, as redes WDM-PON são escaláveis, pois substitui-se os divisores de potência por AWGs. Esta topologia suporta vários comprimentos de onda em uma mesma infraestrutura. Outra vantagem das redes WDM-PON, é que estas topologias são transparentes às taxas de transmissão em bps do canal.

Assim, em uma rede baseada em multiplexação por divisão de comprimento de onda, há separação de um canal da OLT para cada ONU no sentido *downstream* e um canal para cada ONU realizar a transmissão *upstream*. Esta abordagem cria um enlace ponto-a-ponto entre CO e cada ONU, diferenciando-se da topologia ponto-multiponto das redes PONs baseadas em TDM. Desta forma, cada ONU pode operar com a capacidade total do canal a ela atribuído.

Na nossa visão, em algum momento da evolução das tecnologias de acesso óptico a inclusão de usuários por meio de divisores de potência sacrificará em demasia o orçamento de potência. Como exemplo, o orçamento de potência para uma distribuição contendo 256 usuários oferecida por um acoplador/divisor de potência é de no mínimo 24 dB, mesmo sem levar em consideração as perdas impostas pela fibra, filtros ópticos e demais elementos da rede óptica, tornando necessário o uso de amplificadores e/ou detecção coerente no nó remoto, desviando-se do objetivo de uma rede passiva. Por outro lado, as perdas impostas pelo AWG no RN são invariantes em relação ao número de portas no dispositivo, com valores entre 4 e 6 dB, sendo uma margem confortável para detecção direta. Outra vantagem oferecida pelo uso de AWG no RN é a redução na complexidade no ONT.

Uma desvantagem da estrutura TWDM-PON (onde existe a presença de um filtro sintonizável no terminal ONT) é que, com o aumento da quantidade de comprimentos de onda para as redes de acesso óptico, os elementos de filtragem no ONT tem seus custos elevados, devido ao estreitamento da largura espectral dos sinais das ONTs. Portanto, o uso de AWG no RN permite que a complexidade da seletividade em comprimento de onda seja feita por um único elemento, compartilhado entre os usuários da rede, e localizadas nos armários de rua (RN) ao invés de no terminal ONT, reduzindo o custo da rede [30-88].

No próximo capítulo, será mostrada a evolução das redes WDM-PON, onde serão abordadas as principais técnicas de geração e detecção encontradas na literatura. Desta forma, pode-se identificar as limitações das topologias encontradas no estado da arte, determinando-se como algumas destas limitações podem ser superadas ou como pode-se obter uma melhoria no desempenho de tais topologias, por meio da topologia com auto alimentação e dupla polarização. Por fim, será possível discutir os benefícios e limitações da topologia estudada neste trabalho.

3. Redes WDM-PON

Com o aumento do número de usuários de banda larga e a crescente demanda por serviços de vídeo de alta qualidade na internet, as PON baseadas em tecnologia TDM se tornarão insuficientes como alternativa para suprimento desta demanda. Com o intuito de superar as limitações de escalabilidade das PON baseadas em TDM, as WDM-PON surgem como uma evolução natural das redes de acesso, sendo estas capazes de atender as demandas futuras da rede.

A principal vantagem da topologia WDM é o fato de cada usuário ONU receber um comprimento de onda dedicado, o que permite criar um enlace lógico ponto-a-ponto com o terminal OLT. Por exemplo, enquanto uma rede TDM-PON poderia oferecer 2,5 Gbps através de um canal óptico para 32 usuários, uma rede WDM-PON pode oferecer 2,5 Gbps para cada usuário por meio de 32 comprimentos de onda.

Neste capítulo são apresentadas as principais redes WDM-PON encontradas na literatura técnica. A evolução nos últimos anos das topologias e técnicas de transmissão empregando formatos de modulação em amplitude são levantadas e as suas características discutidas. Por fim, a topologia tema deste trabalho será apresentada, suas vantagens serão discutidas, bem como os objetivos deste trabalho.

3.1 Redes WDM-PON: Aspectos Gerais

A **Fig. 3.1** mostra uma topologia esquemática de rede WDM-PON. De modo geral, uma rede WDM-PON emprega $2n$ comprimentos de onda em que n é a quantidade de usuários, sendo composta dos seguintes elementos:

Terminal OLT, contendo os dispositivos para transmissão dos n comprimentos de onda para o sentido *downstream* ($TxDw_1 \dots TxDw_n$), dispositivos para detecção dos dados *upstream* ($RxUp_1 \dots RxUp_n$), e também um multiplexador/demultiplexador, além de um circulador óptico.

Terminais ONTs, onde estão localizados os aparatos para transmissão *upstream* do comprimento de onda pré-definido ($TxUp_1 \dots TxUp_n$), e detecção dos dados *downstream* ($RxDw_1 \dots RxDw_n$).

Nó remoto onde existe um MUX/DEMUX passivo para direcionamento do tráfego de dados de *downstream* e *upstream*. Desta forma, em redes WDM-PON, cada terminal do cliente dispõe de um par de comprimentos de onda pré-estabelecido e

distinto, para comunicação com o OLT. Nesta tecnologia, cada usuário pode receber e enviar dados para o OLT em qualquer instante, não condicionado aos demais usuários.

Figura 3.1 -Representação esquemática de uma rede WDM-PON.

Na rede WDM-PON a largura de banda disponível por ONT é limitada apenas pela capacidade do transmissor utilizado. Esta topologia permite uma ampliação gradativa na capacidade da rede de acesso, já que não se faz necessário o compartilhamento da banda no domínio do tempo, característica indispensável no acesso com TDM.

Conforme ilustra a **Fig. 3.1**, a rede WDM-PON tem uma estrutura física ponto multi-ponto similar às das redes TDM-PON. Possui um enlace de fibra alimentadora de algumas dezenas de quilômetros e um elemento MUX/DEMUX de comprimento de onda no nó remoto, onde se conectam os usuários da rede ao OLT. No OLT, tem-se ainda a presença de um circulador óptico que garante a circulação óptica nos sentidos *downstream* e *upstream*.

Nesta tecnologia, é necessário o uso de AWGs no RN em substituição aos *splitters*. Portanto, os comprimentos de onda para cada ONTs são pré-definidos pelas portas do AWG. Assim, nesta topologia, o atendimento do requisito de coexistência com redes legadas pode se tornar complexo devido a substituição dos divisores de

potência por AWGs no RN, sugerindo então a implantação dessas topologias em cenários *green field*.

Como mencionado no capítulo anterior, as perdas de inserção dos dispositivos AWG estão compreendidas na faixa de 4 a 6 dB, sendo esta perda invariante ao número de usuários da rede, diferentemente do divisor de potência, que tem uma perda de inserção de 0,5 a 1,5 dB por acréscimo de usuário. Atualmente, é possível fabricar AWGs que são insensíveis a temperatura, portanto, não necessitando de controle térmico, e com alocação de canais na grade de até 100/50/25 GHz. Tais AWGs possuem uma função de transferência do tipo retangular ou gaussiano.

Em cada ONT do sistema está presente um transmissor com um comprimento de onda pré-definido, responsável pela transmissão dos dados *upstream*, e um receptor para detecção dos dados provenientes do OLT. Porém, uma topologia com uso de uma estrutura multi-comprimento de onda. Para cada ONT é atribuído um transmissor com comprimento de onda fixo, não é viável economicamente, devido aos custos operacionais em manter um número elevado de placas de transmissão distintas em estoque.

Em sistemas de acesso óptico, a capacidade oferecida pela rede não deve ser mais importante do que a relação custo-benefício. Ambas as características são simultaneamente essenciais em redes WDM-PON. No meio acadêmico e industrial, é necessário transmissores ópticos que possam ser usados em quaisquer ONTs/OLT do sistema, independentemente do(s) comprimento(s) de onda pré-estabelecido(s) para o terminal do usuário em questão. Assim, os custos operacionais são minimizados em virtude de um único tipo de hardware de transmissão em comprimento de onda para toda a rede. Tais transmissores que possam operar “em uma larga faixa de comprimento de onda” são conhecidas no estado da técnica como transmissores agnósticos ou *colorless* (ou *colorfree*).

Na próxima Seção serão apresentadas várias propostas de transmissores *colorless* e as respectivas topologias apresentadas ao longo da evolução das redes WDM-PON. Serão discutidas as suas vantagens, desvantagens e desafios tecnológicos para as próximas gerações de redes WDM-PON.

3.2 Fontes Colorless

Uma das soluções para produzir *tranceivers* de baixo custo para as ONUs, são as fontes *colorless*. Estes transmissores operam em uma larga faixa de comprimento de

onda, facilitando a operação e manutenção e reduzindo o custo de produção, já que é necessário produzir um único tipo de componente. Existem várias formas de implementação destes transmissores *colorless*. Serão discutidas nas próximas secções dois desses esquemas: o fatiamento espectral de fonte óptica de banda larga (*Broadband Light Source* – BLS) e transmissores em modo de reflexão.

3.2.1 Fatiamento Espectral de Fontes BLS

Utilizar lasers sintonizáveis em cada ONT do sistema é uma forma de se obter uma fonte óptica *colorless*. O laser é uma opção atraente caso possa operar em diferentes comprimentos de onda, caso contrário torna-se uma opção inviável, devido a necessidade de se ter um inventário com lasers que operem em diferentes comprimentos de onda, o que é custoso e de difícil manutenção. Para que seja uma opção viável, os lasers sintonizáveis devem ser capazes de oferecer potência óptica necessária, para que um sinal banda estreita possa ser transmitido a longas distâncias (até 20 km) em taxas de até 10 Gb/s. Dentre os lasers sintonizáveis, pode-se destacar dois tipos de laser: o de cavidade externa do tipo Fabri-Perot e laser DFB.

Devido a uma larga faixa de seletividade em comprimento de onda (da ordem de 500 nm) e precisão, lasers de cavidade externa são geralmente empregados com propósito de instrumentação. No entanto, lasers sintonizáveis de cavidade externa, requerem moduladores externos que possam operar em altas taxas de modulação. Adicionalmente, a falta de estabilidade para longos períodos de operação dificulta o uso de tais lasers em telecomunicações.

Outro ponto negativo é que as características espectrais de lasers sintonizáveis são ligeiramente diferentes de dispositivo para dispositivo, de forma inerente ao processo de fabricação.

Esta característica requer que cada laser seja testado individualmente, gerando sua própria informação de controle para o laser utilizado dentro de cada ONT. Para que o laser sintonizável possa ser usado de forma *plug-and-play*, sem informação sobre qual canal irá operar, há a necessidade de um protocolo nas ONTs, que identifique qual é o comprimento de onda correspondente ao braço do AWG, em que elas estejam conectadas [31]. Com as tecnologias disponíveis atualmente, o custo de tais elementos não os torna viáveis para aplicações em acesso óptico para o terminal de usuário.

O emprego da técnica de fatiamento espectral de uma fonte óptica BLS, configura-se como uma alternativa viável a utilização de lasers sintonizáveis. A **Fig. 3.2** mostra uma representação esquemática da técnica.

Figura 3.2 -Ilustração da técnica de fatiamento espectral.

O fatiamento espectral ocorre ao se encaminhar o espectro banda larga de uma fonte BLS, em operação contínua (*Continuous Wave- CW*), a uma porta específica do AWG. Em cada braço do AWG, o espectro banda larga da fonte BLS é fatiado em sinal de banda estreita, com a frequência central determinada pela filtragem óptica do AWG.

Cada braço do AWG possui um filtro com frequência central diferente dos demais. Desta forma, alterando o braço do AWG, é possível selecionar diferentes comprimentos de onda. Assim, um único tipo de fonte de banda larga pode ser usado para fornecer os diversos comprimentos de onda necessários ao sistema. Como exemplos de fontes BLS, tem-se os LEDs (*Light-Emitting Diode-LED*) ou o ruído de ASE (*Amplified Spontaneous Emission*) de um EDFA ou de um SOA.

Quanto ao custo das fontes ópticas, o LED é uma opção de baixo custo quando comparada com as demais fontes citadas. O LED é geralmente utilizado em sistemas que requerem taxa de transmissão entre 100 a 200 Mbps. Pode ser modulado diretamente, excluindo a necessidade de moduladores externos. Entretanto, a densidade de potência e a largura espectral oferecida por estes dispositivos semicondutores são insuficientes para alocação de vários canais, limitando o número de ONTs e alcance da rede [33].

3.2.2 Transmissores em Modo de Reflexão

Por meio da injeção de semente óptica de banda estreita é possível superar muitas das limitações encontradas na técnica de fatiamento espectral. A ilustração esquemática desta topologia é ilustrada na **Fig. 3.3**. Nessa topologia, a semente óptica, proveniente do fatiamento espectral, é injetada em um transmissor óptico, o qual passa a operar com a frequência central da portadora injetada.

Figura 3.3 -Ilustração esquemática de transmissores em modo de reflexão utilizando fatiamento espectral.

O fatiamento espectral de uma fonte ASE pode ser realizado por meio de um AWG. Desta forma, a frequência de operação dos transmissores será definida então pelo braço de saída do AWG. Ao contrário do fatiamento espectral com BLS, o transmissor tem como requisito operação em modo de reflexão. O sinal, inserido no meio ativo do dispositivo semiconductor, é então amplificado, refletido na face traseira de alta refletividade, modulado, amplificado novamente e encaminhado à porta comum do AWG. Pode se citar dois tipos de semente ópticas para estes sistemas:

- 1) Fontes ópticas monomodo, como o laser DFB;
- 2) Fatiamento espectral de uma fonte ASE de banda larga.

A opção 1) elevaria o custo de manutenção e de gerenciamento da rede, uma vez que seria necessário um estoque de lasers específicos para geração das sementes ópticas. A opção 2) é a que mais tem-se destacado na literatura técnica, pois uma única fonte BLS é capaz de prover a semente óptica para vários transmissores refletivos simultaneamente. Em virtude da redução dos custos operacionais, a segunda opção é mais utilizada.

Os principais transmissores de meio ativo semicondutor que operam nas condições de reflexão são FP-LDs e RSOAs (*Reflexive Semiconductor Optical Amplifiers*).

FP-LDs convencionais exibem perfil espectral multimodo, ou seja, vários modos ressonantes, devido a existência de faces clivadas e da condição de oscilação inerente ao dispositivo semicondutor, comportando-se como cavidade ressonante [34].

Pode-se conseguir que o dispositivo oscile praticamente em modo único, como um laser DFB, por meio da técnica de travamento por injeção óptica (*optical injection locking –OIL*). Esta técnica faz uso de uma semente óptica externa de banda estreita. Desta forma, é possível selecionar de acordo com a frequência, os modos de operação do FP-LD, através da injeção de uma semente óptica proveniente do fatiamento espectral de fontes BLS [34]. Assim, o desvio em frequência entre a frequência da semente óptica e da frequência do modo ressonante, o perfil espectral do FP-LD e a potência óptica, determinam o regime de OIL e o número de modos para travamento.

No caso de transmissores RSOAs, estes dispositivos operam basicamente como amplificadores ópticos semicondutores, no entanto, fornecendo níveis de ganho ópticos superiores aos SOAs, devido a dupla-passagem pelo meio ativo do transmissor refletivo. Diferente dos FP-LDs, o nível de potência do bombeio óptico e o perfil espectral da ASE do RSOA é que determinam o número de modos disponíveis para modulação [35].

FP-LD

Em 1981 iniciou-se o uso de FP-LD sob travamento por injeção de semente óptica [34], com o objetivo de ser utilizado em redes ópticas coerentes, funcionando como um oscilador local. Já em 1990, com o surgimento da técnica de fatiamento espectral, o FP-LD foi também utilizado como fonte BLS com modulação direta [35].

Pode-se destacar alguns avanços no uso de FP-LD como fonte BLS em [36-39], porém, o uso de FP-LD como fonte banda larga adiciona grandes dificuldades práticas, como o alinhamento entre a banda espectral dos modos ressonantes do laser semicondutor e da banda passante do AWG, a largura da banda espectral disponível e o ruído de partição modal (*Mode Partition Noise - MPN*), devido as flutuações de potência entre os modos ressonantes do FP-LD, limitando a taxa de transmissão.

RSOA

O RSOA é um amplificador óptico semicondutor, em que uma das faces possui alto coeficiente de refletividade, desta forma funcionando como um dispositivo refletor. Estes dispositivos datam de 1986 [40], e como já mencionado tem uma das faces com um alto valor de refletividade ($\sim 99\%$), permitindo assim que este dispositivo possa operar em modo refletivo. Desta forma, obtém-se uma dupla passagem pelo meio ativo do semicondutor e conseqüentemente uma dupla amplificação. Portanto, obtém-se maiores níveis de ganho quando comparado com SOAs.

De modo geral, em amplificadores ópticos semicondutores o ganho óptico é devido ao processo de recombinação de pares de portadores eletrônicos elétrons e lacunas. Na ausência de qualquer sinal óptico para amplificação, a densidade de carga líquida no meio ativo do dispositivo mantém-se fixa e seu valor é proporcional ao nível de tensão contínua aplicado aos terminais do dispositivo semicondutor. Já com um sinal óptico para amplificação, os pares elétron-lacuna são convertidos em amplificação estimulada, reduzindo a densidade de portadores eletrônicos na cavidade do dispositivo.

No início da utilização de RSOAs, taxas de modulação de apenas 50 Mb/s eram alcançadas em distâncias de, no máximo de 3,3 km, devido a operação espectral do dispositivo na região de 980 nm, diferentemente das bandas C e L utilizadas atualmente [41]. O projeto de dispositivos com operação na banda C surgiu apenas em 1996 [41]. Devido à região de baixa atenuação da fibra na banda C ($\sim 0,2$ dB/Km), e à melhoria no desempenho dos dispositivos RSOAs, na época da proposta [41] foi possível alcançar taxas de transmissão de 155 Mb/s em um alcance de 18 km.

3.3 Principais Topologias WDM-PON

A fim de reduzir os custos, uma das primeiras metas em redes WDM-PON, era desenvolver sistemas para a geração dos sinais *upstream*, mantendo a configuração *colorless* dos terminais ONTs.

Devido à operação dos transmissores FP-LD em modo de reflexão, a portadora óptica *upstream* se propaga duas vezes por toda a topologia. Esta estrutura ficou conhecida como “recirculação”, ou *loopback*. Este sentido sofre de maiores efeitos degradantes como os efeitos de retroespalhamento Rayleigh e maior perda em potência. Ademais, o alcance da rede fica dependente dos níveis de potência da semente *upstream* injetado nas ONTs. Desta forma, a opção viável para alocação dos sinais *upstream* é na

banda C, onde encontram-se as menores perdas por atenuação oferecida pela fibra SSMF.

Inicialmente utilizou-se um EDFA localizado no OLT para fornecer o sinal de BLS na banda C, o qual seria usado como semente óptica para os FP-LDs localizados na OLT. Após ser fatiada pelo AWG, cada fração do espectro da BLS é direcionado às ONTs, travando os diversos FP-LDs. Na ONT, os FP-LDs são modulados diretamente, e após a modulação direta, os sinais travados dos FP-LDs são enviados de volta ao OLT para detecção dos dados *upstream* [34].

Estas topologias são denominadas de redes de fontes ópticas centralizadas (*Centralized Light Sources – CLS*), pois, embora a geração dos dados do usuário seja realizada em cada ONT, todos os transmissores refletivos *upstream* presentes na rede tem suas sementes ópticas provenientes do OLT. Atualmente, pesquisas em WDM-PON com uso de topologias CLS para geração do sentido *upstream* são encontradas na literatura, especialmente redes em WDM-PONs coerentes [27,29-30].

3.3.1 Topologia Bidirecional (Banda C/Banda L)

Figura 3.4 -Esquemático da topologia bidirecional banda C/banda L

Em 2005 surgiu a primeira proposta de rede bidirecional [42] que solucionava as limitações relatadas na topologia unidirecional de 2003 [43], alcançou-se 100 Mb/s utilizando FP-LDs sob OIL para transmissão nos dois sentidos. Utilizava-se, porém, uma fibra para cada sentido de tráfego, necessitando assim de dois AWGs na OLT e no

nó remoto. A **Fig. 3.4** mostra uma representação esquemática desta topologia, conforme proposto em [42].

Nesta topologia, duas fontes BLS com operação espectral distintas, localizadas no OLT, fornecem as sementes óptica para os FP-LDs. Nesta rede está presente um EDFA que gera a semente óptica com operação espectral banda C, para o tráfego *upstream*, e um segundo EDFA, com operação espectral na banda L, responsável pela semente óptica do tráfego *downstream*. Acopladores WDM banda L/banda C e circuladores ópticos garantem a transmissão bidirecional em uma única fibra alimentadora. Esta topologia tornou-se mais atrativa que a topologia unidirecional com arranjo de duas fibras; alimentadora e distribuidora.

Nesta proposta os efeitos de dispersão pela fibra e *crosstalk* induzido pelo AWG foram desprezados devido ao pouco impacto no orçamento de potência da rede proposta. Na época da implementação desta topologia, a potência de saída dos FP-LD era em torno de -11 dBm, e a sensibilidade dos fotodetectores para uma BER de 10^{-10} era de -34 dBm/0,2nm, para uma taxa de 155 Mbps (considerando o canal com pior desempenho). Desta forma, tinha-se um orçamento de potência de 23 dB, sendo a maior parte deste (13,5 dB) consumida pelos elementos AWG, filtro WDM e circulador. O restante potência disponível é consumida pela atenuação na fibra.

Esta proposta oferecia uma capacidade entre 2,5 Gbps (16x155 Mbps) e 12,4 Gbps (80x155 Mbps), e teve um alcance total de 30 km (20 km fibra alimentadora e 10 km de fibra distribuidora), obteve-se valores de BER inferiores a 10^{-10} [42]. Uma rede comercial WDM-PON deste tipo, foi implantada na Coreia do Sul, em 2007 (pela Korea Telecom- KT) [44]. Nesta rede comercial utilizou-se de uma rede bidirecional com estrutura similar à ilustrada na **Fig. 3.4**, porém com alocação espectral na banda C e na banda E para os canais *upstream* e *downstream*.

Estudos mais recentes sobre a tecnologia do transmissor *colorless* apontam montagens experimentais para o sentido *upstream* de redes com capacidade de até 100 Gbps [45].

Após esta proposta, a pesquisa voltou-se para configuração bidirecional com o uso de duas bandas ópticas. Apesar das vantagens citadas, uma dificuldade prática encontrada em topologias “banda C/banda L” reside no fato de se ter disponível em estoque dois tipos de componentes ativos.

Outra limitação desta topologia está na alocação espectral da rede, exigindo a ocupação de duas das três bandas ópticas viáveis para operação do WDM-PON (C+L).

3.3.2 Topologia de Remodulação

Neste contexto de limitações de capacidade identificadas nas propostas nas bandas C/L, bem como da necessidade de redução de custos operacionais para topologia banda C/L, uma maneira de amenizar os custos de gerenciamento espectral seria alocar um único comprimento de onda para os sentidos *downstream* e *upstream* eliminando a necessidade do uso de duas bandas ópticas. Desta forma, o mesmo comprimento de onda é compartilhado entre o sinal de descida e o sinal de subida. Esta topologia é conhecida como reuso de portadora óptica (*Wavelength Carrier Reuse*), ou esquema de remodulação óptica (*Optical Remodulation Scheme*) [46-54].

Dentre os principais esquemas de remodulação/reuso de portadora óptica destaca-se: ganho em regime de saturação, dissintonia em comprimento de onda e a técnica de injeção de corrente de alimentação adiante (*Feed Forward Current Injection* – FFCI). Neste trabalho é feito reuso da portadora óptica por meio de ganho em regime de saturação. A técnica é detalhada nas próximas Seções.

Interrogação Remota do Terminal de Rede - RITENET

Figura 3.5 -Ilustração esquemática da proposta original da RITENET [46].

Em 1994 surgiu a primeira proposta de reuso de portadora óptica [46]. Esta proposta foi realizada em uma rede WDM-PON denominada RITENET (*Remote Interrogation Network*). Com objetivo de reduzir os custos da rede, a proposta substituiu as fontes ópticas nas ONTs, por dispositivos moduladores externos, assim, as

ONTs operavam de forma *colorless*. A **Fig. 3.5** mostra uma ilustração esquemática da proposta.

Fontes ópticas no OLT geram os sinais *downstream* para os respectivos usuários. Nesta configuração, os sinais no sentido *downstream* não utilizam toda a banda disponível, uma fração da janela temporal da portadora destinados ao usuário não contém dados, pois será utilizada para modulação dos sinais *upstream*. Cada sinal *downstream* alcança a respectiva ONT do usuário, onde um acoplador de potência divide o nível do sinal óptico em duas frações.

Nesta topologia, a maior fração da potência óptica do sinal descendente que atinge a ONT não contém dados, funcionando como semente óptica ao modulador externo, que insere os dados do usuário na fração CW da portadora *downstream* e envia os dados *upstream* ao OLT do sistema.

A fração de potência restante da portadora de descida é destinada aos receptores da ONT para detecção e leitura dos dados *downstream*. A maior vantagem deste esquema é a utilização de apenas uma única banda óptica para ambos os sentidos de tráfego, o que simplifica o gerenciamento dos dispositivos optoeletrônicos, bem como o gerenciamento espectral de canais ópticos do sistema, uma vez que se utiliza do compartilhamento de um mesmo comprimento de onda para os sinais de subida e descida por enlace OLT-ONT.

No entanto, uma dificuldade prática desta abordagem está na divisão da potência óptica entre os sinais de semente *downstream* para reuso óptico e os sinais de descida para detecção, o que limita o alcance da rede. Adicionalmente, devido a operação de recirculação do sentido *upstream* e ao uso de um mesmo comprimento de onda para ambos os sentidos de tráfego, o sinal de subida está sujeito a degradações, devido a interferência de sinais ópticos provenientes de retroespalhamento Rayleigh e reflexões de Fresnel. Estes efeitos de retroespalhamento são minimizados em configurações de duas fibras alimentadoras e distribuidoras, conforme ilustrada na **Fig. 3.5**.

Embora a configuração original de duas fibras (uma para cada sentido de transmissão), moduladores externos, sinais *downstream* alternadamente modulados tenha sido substituído por técnicas mais sofisticadas devido aos custos operacionais de se manter duas fibras para cada sentido, a proposta da topologia *RITENET* de forma pioneira o reuso em comprimento de onda, que impulsionou o desenvolvimento de sistemas WDM-PON.

Apagamento e Reuso de portadora óptica

Uma alternativa para a topologia *RITENET* consiste no uso da multiplexação WDM, empregando sinais modulados continuamente com todas as janelas temporais preenchidas com dados. Ressalta-se que para esta topologia opere de maneira eficiente no domínio da intensidade, é necessário que o nível de razão extinção óptica (*Extinction Ratio* – ER) da semente *upstream* que atinge a ONT atinja valores próximos de 0 dB (caso ideal), utilizando alguma técnica adicional. Desta forma, é possível reutilizar a semente óptica *upstream* como portadora para os dados do usuário. A **Fig. 3.6-a** mostra a definição da razão de extinção.

Figura 3.6-(a) Definição de razão de extinção; **(b)** exemplo de remodulação utilizando SOA [47]

A técnica mencionada é denominada apagamento de portadora óptica, e foi proposta por K. C. Reichmann *et al* (2001 [47]). Esta técnica se baseava no uso de dois moduladores ópticos: um responsável por suprimir o nível de razão extinção do sinal *downstream* modulado em intensidade à valores próximos a zero, e outro modulador responsável por gear os sinais *upstream*.

No entanto, a proposta original dessa técnica exigia o uso de um modulador externo dedicado por ONT para o apagamento dos dados da portadora óptica, aumentando o custo da topologia. Adicionalmente, as perdas em potência impostas pelo modulador penaliza o orçamento de potência da rede ou a margem dinâmica, limitando seu alcance.

Uma técnica adicional foi proposta por Conforti *et al* em 2002 [48], em que explorava as características de SOAs em regime de saturação em conjunto com um circuito eletrônico de injeção de corrente de alimentação adiante FFCI, para auxílio na supressão dos dados da portadora.

Com base na técnica proposta por Conforti *et al*, surgiram várias topologias que utilizavam as características de SOAs operando em regime de saturação, como por exemplo a topologia sugerida por H. Takesue *et al* [49] em 2002, em que se utiliza-se o SOA em regime de saturação e modulação direta para geração dos dados *upstream*. A **Fig. 3.6-b** mostra uma ilustração esquemática desta topologia.

A **Fig. 3.7** mostra a curva de ganho do SOA operando em regime de saturação. Nesta configuração, o ganho dado ao nível lógico “1” do sinal óptico é inferior ao ganho do nível “0”, em virtude da característica de compressão de ganho intrínseca a amplificadores semicondutores operando na região de saturação. Assim, é possível apagar a informação no domínio óptico.

Figura 3.7 -Curva característica do SOA utilizado em remodulação.

Na proposta de K. C. Reichmann *et al* a eficiência do apagamento é proporcional ao nível da potência de injeção no SOA e inversamente proporcional ao valor da ER do sinal de entrada. Portanto, existe um compromisso entre a potência de injeção e a razão de extinção, para garantir a eficiência do apagamento da portadora óptica.

Na **Fig. 3.7**, observa-se que o apagamento de portadora óptica com o uso de SOA produz também aumento do nível de potência óptica, uma vez que o mecanismo de apagamento óptico desta técnica é o ganho do dispositivo semiconductor. Entretanto, para essas topologias que modulam diretamente o amplificador semiconductor, a eficiência do apagamento é também diretamente proporcional ao nível de razão de extinção dos dados *upstream* [49-54].

Com esse técnica foi possível à redução no nível de complexidade tecnológica exigida para a implementação de ONTs refletivas, pois é reduzido o aparato necessário: apenas a um divisor de potência e um SOA em modo de reflexão para geração dos dados *upstream*.

Com o avanço nas técnicas de fabricação dos RSOAs a partir de 2006, tornou-se possível o desenvolvimento de topologias bidirecionais que sugeriram o uso desses dispositivos na OLT e no lado do cliente, combinando as técnicas de apagamento de portadora óptica e fatiamento espectral [55], como ilustrado na **Fig. 3.8**.

Uma fonte ASE banda larga fornece a semente óptica para os RSOAs do OLT para geração dos sinais *downstream*, os quais são enviados às respectivas ONTs do sistema via o AWG do nó remoto, conforme ocorre nas topologias de transmissores refletivos descritas até então. A geração dos sinais *upstream* se dá por meio da reutilização de uma fração do nível de potência óptica do sinal de descida que atinge a ONT, o qual é direcionado para os RSOAs por meio de um *splitter* de potência. Nesta topologia o apagamento da portadora é dependente das características de ganho do RSOA.

Uma fonte ASE banda larga ainda é necessária para provimento da semente óptica aos RSOAs, assim como ocorre na proposta banda C/L, porém apenas para os transmissores do OLT. Uma vez que cada sinal *upstream* é gerado por meio da reutilização dos sinais *downstream* dos RSOAs na OLT, não há necessidade de sementes ópticas de banda larga para os RSOAs da ONT. Com esta topologia obteve-se uma melhor relação custo-benefício do que nas demais tecnologias de transmissores refletivos apresentadas até o momento, devido ao emprego de apenas uma fonte BLS para o toda a topologia.

Porém, uma contrapartida é que os sinais *downstream* e *upstream* gerados nessa configuração estão sujeitos à maiores penalidades de potência do que nas topologias de dois comprimentos de onda distintos. Essas degradações no sinal limitam o alcance e capacidade da rede.

3.3.3. Topologia de Auto-alimentação

Como discutido anteriormente, devido às limitações das arquiteturas CLS, para o desempenho de transmissão *upstream*, topologias WDM-PON foram propostas na literatura técnica. Um dos objetivos de pesquisa na época era a elaboração de técnicas e aparatos que reduzissem o impacto dos efeitos degradantes das estruturas CLSs na geração dos sinais *upstream*.

Em 2005, S. Hann *et al* [56] propuseram uma topologia em que não era necessário o uso de uma fonte CLS. Nesta topologia, cada transmissor *upstream* refletivo gera sua própria semente óptica localmente, a partir de um circuito de recirculação óptica localizado no nó remoto. Esta topologia elimina a necessidade de alimentação óptica fornecida pelo OLT, tornando a geração do sinal *upstream* independente do terminal de linha óptica.

Esta topologia foi denominada de “auto-alimentação” (*self-seeding*) [57-74], pois os transmissores *upstream* utilizam o seu próprio ruído ASE banda larga para geração contínua dos sinais das ONTs. A seguir serão apresentados os princípios de funcionamento da topologia *self-seeding*.

Self-seeding: princípio de funcionamento

A proposta de S. Hann *et al* de 2005 [56], utilizava o FP-LD como fonte óptica (*self-seeding* FP-LD). Em 2006 E. Wong *et al* utilizaram dispositivos RSOAs, demonstrando que é possível modular diretamente a ASE amplificada de um RSOA para transmissão dos sinais *upstream* [57]. A **Fig. 3.8** mostra a configuração implementada por E. Wong *et al* para transmissores RSOAs [57-59].

Em cada ONT tem-se um acoplador WDM, um elemento para detecção dos dados *downstream* e um RSOA para transmissão dos dados *upstream*. O circuito de recirculação óptica é formado entre o nó remoto e os transmissores refletivos da ONT. No nó remoto, está presente um AWG, um divisor de potência (3 dB) e um circulador óptico. Adicionalmente estão presentes um amplificador e um filtro passa baixas.

Figura 3.8- Primeira proposta para *self-seeding* RSOA [57].

Em cada ONT, o RSOA gera, inicialmente, o sinal óptico com espectro banda larga, que é direcionado a um determinado braço do AWG. Cada sinal banda larga é fatiado em uma semente banda estreita, com frequência central dita pelo braço do AWG associado.

Tendo o sinal banda larga passado pelo AWG, tem-se então um sinal banda estreita direcionado a porta comum do AWG. Os sinais passam pela porta comum do divisor de potência (3 dB), em que em uma das portas de saída do divisor, 50% de potência óptica é direcionado ao OLT para detecção dos dados *upstream*.

Os 50% do nível de potência restante, agora em sinal de banda estreita, são direcionados a um circulador óptico. Devido às características do RSOA e às altas perdas dos componentes do nó remoto no sinal *upstream*, era necessário a utilização de um amplificador no nó remoto para compensar as perdas na cavidade externa (em torno de 29 dB), já que o nível de potência que chegava no RSOA no primeiro *roundtrip* era insuficiente, devido ao baixo ganho do RSOA utilizado na proposta. Os sinais fatiados após serem refletidos são enviados à porta comum do AWG. O filtro passa baixas, localizados no RN e na ONU, garantem que somente a semente originária de cada ONU é refletida para o seu respectivo RSOA [57].

Adicionalmente, cada sinal banda estreita, centrado em uma frequência específica, é direcionado a cada RSOA por meio do braço do AWG associado, provendo então a portadora óptica para os transmissores refletivos. O nível de potência

da semente óptica que atinge o RSOA no primeiro *roundtrip* é denominado como potência de *self-seeding*.

Atingido o equilíbrio dinâmico do processo *self-seeding*, a geração dos dados *upstream* é então iniciada de forma contínua. A geração de cada comprimento de onda dos sinais de subida depende das características de ganho, potência de saturação e perfil de ASE dos RSOAs ONT, bem como das perdas de fatiamento e inserção induzidas pelos elementos presentes no caminho de recirculação.

O caminho de recirculação óptica estabelecido pode ser entendido como uma cavidade externa, onde o RSOA provê o meio ativo para compensação das perdas ópticas sofridas no caminho de recirculação, perdas essas causadas pela fibra de distribuição e perdas de inserção dos elementos que compõem o caminho de recirculação.

Devido ao fato de o sinal ser filtrado e amplificado diversas vezes, os sinais provenientes de arquiteturas auto-alimentação possuem largura espectral ultra-estreita e baixa razão de extinção. Valores típicos de razão extinção e largura espectral, nas melhores condições de operação do dispositivo, são da ordem de 6 dB e 0,05 nm, respectivamente. Ressalta-se que a largura de linha dos sinais ópticos *upstream* provenientes da técnica de auto-alimentação é da ordem de um décimo da técnica de fatiamento de uma fonte BLS, o que permite uma maior tolerância à dispersão cromática.

Requisitos de operação self-seeding

Para que a técnica *self-seeding* tenha um desempenho satisfatório, dois critérios cruciais devem ser atendidos.

- 1) Operação em regime de saturação dos transmissores refletivos;
- 2) Nível de potência adequado para o bombeio de auto-alimentação;

Para atendimento destes critérios o dispositivo RSOA deve ser polarizado com altos de níveis de corrente DC, de forma que consiga apagar, de forma apenas óptica, os dados *upstream* refletidos bem como remodelar os novos dados *upstream* inseridos pelo usuário. Adicionalmente, o balanço entre as perdas de inserção e ganho óptico do RSOA deve ser levado em conta para garantir um nível adequado do bombeio óptico de auto-alimentação. Níveis de bombeio óptico no primeiro *roundtrip* são da ordem de -37

dBm, níveis de potência muito inferiores quando comparados aos valores de bombeio óptico usados em técnicas de remodulação.

A maior parte da perda óptica na cavidade está concentrada no fatiamento espectral e nas perdas de inserção oriundas do AWG (em média, 10 dB de perda de inserção por *roundtrip* e 20 dB de perda de potência de ASE pela primeira passagem pelo AWG).

Alternativas de formas de multiplexação e demultiplexação no RN foram propostas ao longo dos anos, de forma a minimizar as perdas impostas pelo AWG. Entretanto, a substituição deste elemento por combinações de outros elementos de multiplexagem acabam aumentando a complexidade na rede e a penalidade em potência.

Na topologia ilustrada na **Fig. 3.8**, um amplificador EDFA no nó remoto caracteriza a topologia como uma rede ativa, aumentando os custos da rede de acesso óptica. O orçamento de potência disponível tornou-se satisfatória em 2010, com o desenvolvimento de projetos de RSOA com altos valores de potência de saturação (10 dBm) e ganho óptico (30 dB), bem como a melhoria na fabricação de AWGs com perdas de inserção em torno de 4 dB.

Em 2006, quando foi proposta a técnica self-seeding foi utilizado um RSOA com característica de ganho dependente do estado de polarização (*Polarization Dependence Gain* – PDG), ou seja, o ganho óptico provido pelo dispositivo semiconductor, depende do estado de polarização do sinal de entrada. Portanto, foi necessário um controle do estado de polarização dentro da cavidade externa para que a técnica de auto-alimentação atingisse a estabilidade dinâmica. Este controle foi feito por meio de um controlador de polarização (*Polarization Controller-PC*).

A técnica auto-alimentação consiste também de um processo de apagamento de portadora, sendo assim a operação em regime de saturação uma condição essencial para que se tenha um desempenho satisfatório. Qualquer variação no estado de polarização do bombeio óptico no caminho de recirculação óptica afetará o ganho óptico do dispositivo, e por consequência, o regime de operação do RSOA, causando instabilidade no processo de remodulação.

Na técnica auto-alimentação, em virtude do uso de sinais provenientes de sinais ASE, o estado de polarização do bombeio óptico de auto-alimentação possui uma distribuição aleatória de componentes de polarização.

Faraday (*Faraday Rotator Mirror* -FRM) acoplado ao divisor de potência no RN, para trechos de fibra distribuidora curtos (~ 1 km) garante a ortogonalidade e estabilidade entre o estado de polarização do bombeio óptico que chega ao RSOA e o estado de polarização do sinal de *upstream*.

Para garantir o estado de polarização era necessário o uso de RSOAs com baixa PDG (até 2 dB), e comprimentos do enlace de fibras distribuidoras de poucos quilômetros (até 5 km), assegurando que o tempo levado no circuito de recirculação (~ 1 μ s) fosse muito menor que o tempo de manifestação dos efeitos de alteração de polarização induzidas pela fibra, que são da ordem de ms. Nesta topologia, a cada dois *roundtrips* o sinal retorna ao RSOA com o estado de polarização original, ou seja, o uso de FRM no nó remoto dobra o tamanho da cavidade quando comparado com a proposta em [57]. Assim, as mudanças do estado de polarização ocasionadas pela fibra podem ser consideradas desprezíveis, e o estado de ortogonalidade entre os sinais é preservado [75-77].

A proposta [60] garantiu a estabilidade dinâmica do processo de *self-seeding* de forma satisfatória, preservando a simplicidade da topologia pelo compartilhamento de um único AWG e FRM entre todas as ONTs do sistema, diferente de todas as propostas em *self-seeding* até então.

Após essa proposta, a partir de 2011 muitos trabalhos utilizando FRM no RN, surgiram para redes de acesso WDM [78-85]. Técnicas de controle de polarização têm sido aprimoradas, garantindo uma maior flexibilidade quando ao uso de dispositivos com um alto valor de PDG [79-80]. Esta abordagem permitiu uma maior estabilidade, permitiu o uso desta técnica para aplicações em transmissores FP-LD que exigem um maior controle de polarização que os RSOAs [80].

Comparando-se RSOAs e FP-LDs em regime *self-seeding*, embora as características de sinais provenientes da auto-alimentação de FP-LD ofereçam muitas vantagens tais como largura de linha reduzida, altos valores de potência de saída, e invariância com a temperatura, um controle muito mais rigoroso do estado de polarização é exigido de forma a garantir a estabilidade dinâmica nestes dispositivos, diferentemente dos RSOAs, os quais conseguem operar em equilíbrio estável com condições mais flexíveis.

A principal desvantagem do FP-LD em relação ao RSOA é a presença das relaxações de oscilação, característica intrínseca ao laser semiconductor multimodo. Esta característica limita a taxa de modulação direta nos FP-LD à 2,5 Gb/s, impondo

barreiras tecnológicas para evolução de cenários em 1,25 Gb/s para 10 Gb/s por ONT. Desta forma, embora os FP-LDs tenham ressurgido como tema de pesquisa em WDM-PON, trabalhos utilizando RSOAs tem se mostrado mais promissores [81-85].

A melhora na técnica *self-seeding* permitiu projetos mais robustos de acesso em WDM-PON, porém uma desvantagem da técnica em relação a técnica de remodulação é a necessidade de duas bandas ópticas (banda L *downstream* e banda C *upstream*). Essa configuração, não atende as necessidades de evolução, capacidade e gerenciamento de custos operacionais, embora ofereça como vantagem principal a eliminação da estrutura CLS para o sentido *upstream* e uma maior tolerância ao impacto dos efeitos degradantes, como CD, e efeitos pós-filtragem.

3.3.3 Topologia Combinada

A topologia combinada foi proposta em 2013 por Duarte *et al* [83-84]. Esta topologia é denominada “combinada”, pois combina as duas principais topologias descritas até o momento, remodulação no domínio da intensidade e topologia de auto-alimentação. A proposta é uma topologia que combina as vantagens e minimize as desvantagens oferecidas pelas técnicas de auto-alimentação e reuso de portadora óptica. A topologia combinada está ilustrada na **Fig. 3.10**. [11, 83-84].

Esta topologia utiliza a técnica de auto-alimentação, para os RSOAs no OLT. Desta forma, a fonte BLS compartilhada do tipo ASE não se faz mais necessária, já que cada RSOA OLT gera sua própria semente óptica. Gerados os sinais *downstream*, a técnica de remodulação é empregada para geração dos sinais *upstream*, pois cada RSOA das ONTs recebe a semente óptica do respectivo RSOA da OLT auto-alimentado; os sinais são então remodulados enviados de volta ao OLT.

Nesta topologia, cada RSOA do OLT gera, de forma independente dos demais RSOAs presentes no OLT, o sinal *downstream* e a semente óptica para o respectivo RSOA do ONT. Portanto, essa topologia permite a exclusão de fontes BLS de alta potência compartilhadas no OLT, reduzindo o custo operacional bem como consumo de potência no OLT.

O sistema torna-se mais robusto a falhas, e devido à eliminação da estrutura de fontes de banda larga compartilhada, esta topologia permite maior proteção quanto a falha de fontes BLS, a qual pode interromper a operação de toda a topologia de remodulação convencional por mal uso e/ou eventual falha.

Figura 3.10- Topologia combinada: auto-alimentação na OLT e remodulação óptica na ONT [84].

Algumas características dos sinais *downstream* autoalimentados, tais como baixos valores de razão de extinção e largura espectral, permitem melhorar o desempenho em relação à dispersão cromática e a outros efeitos degradantes provenientes do uso de ASE como semente óptica, garantindo uma maior flexibilidade nos requisitos de remodulação.

Para que o RSOA no lado do usuário consiga efetuar uma remodulação dos sinais *downstream* de forma eficiente, é necessário que os sinais *downstream* estejam dentro dos limites de capacidade de remodulação. Portanto, a geração dos sinais *upstream* torna-se dependente da qualidade dos sinais *downstream*. Essa dependência limita então o alcance da topologia combinada. A topologia combinada propicia também um aumento significativo de orçamento de potência para os sinais *upstream* em cenários de remodulação, oferecendo uma melhor relação custo-benefício para transmissores refletivos em remodulação óptica, devido à exclusão de qualquer mecanismo adicional de apagamento de portadora óptica.

As principais contribuições da topologia combinada às redes de acesso baseadas em WDM-PON, quando comparada com a topologia de remodulação encontrada na literatura (aqui denominada “topologia convencional”) podem ser resumidas nos pontos abaixo, resultados obtidos por [84] em 2013.

As vantagens da topologia combinada:

- 1) Reduzida largura espectral óptica e menor impacto da dispersão cromática
- 2) Estabilidade e desempenho da técnica *self-seeding*.
- 3) Tolerância sistêmica dos sinais *downstream* em relação ao nível de razão de extinção
- 4) Utilização do mesmo transmissor refletivo em toda a topologia.
- 5) Custo operacional e viabilidade de migração gradativa para ocupação das bandas S+C+L e taxas de até 10 Gb/s com uso de modulação direta

A principal desvantagem da topologia combinada é:

- 1) Os sinais *upstream* são dependentes das características dos sinais *downstream*.

Com base em todas as características e vantagens relatadas, a topologia combinada é uma alternativa viável em termos de requisitos técnicos e de custos operacionais para sistema WDM-PON baseados no reuso de portadora óptica, fontes ASE banda larga, modulação em intensidade e detecção direta para taxas de até 10 Gb/s com alcance maior que 20 km.

Foi verificado que a topologia combinada oferece uma maior tolerância aos efeitos degradantes provenientes do conteúdo espectral de sementes ASE, pois, em transmissões de até 20 km, não houve penalidades excessivas, comparando-se com os trabalhos encontrados na literatura até então [83-84].

No entanto, almejando o projeto de redes WDM-PON de longo alcance, o compromisso entre os níveis de razão de extinção *downstream* e *upstream* exigida para o reuso de portadora óptica pode degradar o desempenho sistêmico dos sinais de descida na ausência de auxílio de dispositivos eletrônicos de apagamento de portadora óptica.

Com a intenção de melhorar o desempenho sistêmico da rede e não mais necessitar de mecanismos eletrônicos no auxílio ao apagamento de portadora óptica surgiram na literatura, circuitos para manutenção do estado de polarização dentro da cavidade *self-seeding*.

No cenário exposto até o momento, tem-se que a proposta deste trabalho contempla, além de um circuito de manutenção da polarização na cavidade, um reforço no apagamento óptico do RSOA da OLT, impactando diretamente no desempenho de

remodulação do RSOA da ONT e, contribuindo assim para melhora de dois dos principais fatores degradantes no cenário de topologias de auto-alimentação.

Na próxima seção serão apresentados os circuitos de manutenção da polarização encontrados na literatura técnica, que servirão de base para topologia proposta.

3.3.4 Circuitos de Polarização para *Self-Seeding*

Dentre as topologias expostas até o momento, a topologia combinada é a que obteve o melhor desempenho sistêmico. Para a topologia combinada não foi necessário o controle da polarização, pois foi utilizado um RSOAs de baixa PDG. Adicionalmente, a cavidade possuía apenas alguns metros de comprimento, pois está localizada no OLT. Porém, visando uma melhor relação custo-benefício, é preferível o uso de RSOAs com alto PDG, devido ao seu custo reduzido em relação aos dispositivos de baixo PDG. No entanto, na presença de um RSOA de alta PDG, faz-se necessário a manutenção do estado de polarização no percurso de recirculação óptica.

A dependência da qualidade do sinal *downstream* para geração do sinal *upstream* é um fator limitante no desempenho sistêmico da rede. Muitas propostas apareceram na literatura [75-78], com o objetivo de diminuir a degradação que ocorre no sinal durante os *roundtrips* na cavidade externa, em grande parte devido aos efeitos de birrefringência que afetam o estado de polarização do sinal.

L. Marazzi *et al*, demonstraram que a evolução do estado de polarização do sinal, dentro da cavidade externa, causa degradações ao sinal até mesmo para os RSOAs com baixo PDG (~2dB) [79]. Devido ao fato dos RSOAs geralmente possuírem altos valores de PDG (~20dB), nas topologias convencionais, em que a cavidade externa pode variar de centenas de metros até poucos quilômetros, o efeito de birrefringência da fibra afetam o sinal de auto-alimentação, fazendo com que o estado de polarização do sinal na cavidade externa seja alterado de forma aleatória. Assim, a não manutenção do estado de polarização, causa uma redução no ganho do RSOA, após muitos *roundtrips*, reduzindo a eficiência do sistema.

A **Fig. 3.11** mostra uma ilustração esquemática do circuito de manutenção do SOP, proposto em 2012 por M. Martinelli *et al* [75]. Esta topologia mantém o estado de polarização com a adição de um rotacionador de Faraday (*Faraday Rotator*-FR) posicionado na face de baixa refletividade do RSOA. O FR defasa o sinal em 45°. Como o sinal tem dupla passagem pelo FR, o sinal é então alinhado ao modo transversal de alto ganho do RSOA, mantendo assim altos valores de ganho.

Figura 3.11 - Ilustração esquemática da proposta [75]

No entanto, as propostas encontradas no estado da arte na literatura [78-79], para circuitos de manutenção do SOP, avaliam topologias em que a auto-alimentação é realizado no lado do usuário. Adicionalmente, no circuito proposto em [75], para que se tenha um controle eficiente do estado de polarização, é requerido que as variações no estado de polarização ocorram de forma mais lenta do que o tempo de *roundtrip*.

Em 2015, Paola Parolari *et al* [80] propuseram uma topologia com modulação multinível, empregando o uso de dois HPDG RSOAs no terminal do cliente. Esta proposta se beneficia de uma única cavidade externa que sustenta dois modos ortogonais de polarização. Com o uso da modulação multinível, pode-se alcançar taxas de transmissão de 20 Gb/s (2x 10 Gb/s) em 50 km de fibra. O elemento chave nesta topologia é o divisor de feixe de polarização (*Polarization Beam Splitter- PBS*), localizado na unidade de rede óptica (*optical network unit- ONU*), posicionada entre a face de baixa refletividade dos RSOAs e o AWG. O PBS possui seus eixos alinhados com os modos transversais de alto ganho dos HPDG RSOAs.

Os RSOAs utilizados possuem as mesmas características, portanto possuem o mesmo modo de alto ganho. Desta forma, nesta topologia é necessário colocar na saída de um dos RSOAs uma placa de meio comprimento de onda (*Half-Wave-Plate-HWP*). Desta forma, um dos RSOAs terá o estado de polarização rotacionado em 90°. Assim, as portadoras óptica circulam ortogonalmente dentro da cavidade externa.

Figura 3.12 -Ilustração esquemática da proposta [80].

A **Fig. 3.12** mostra uma ilustração esquemática da proposta em [80]. Nota-se que os modos estão ortogonais e alinhados com o PBS. O RSOA₁ é responsável por apagar os dados do RSOA₂ e vice e versa já que na cavidade a polarização é rotacionada em 90° e refletida de volta para o PBS. No entanto, apesar do circuito garantir que os sinais refletidos pelo FRM, voltem para os RSOAs alinhados com os modos transversais de alto ganho, o desempenho sistêmico desta topologia é prejudicado pelo tamanho da cavidade, já que o esquema de auto-alimentação é realizado no lado do usuário. Ademais, o fato de os dois RSOAs estarem sendo modulados diretamente dificulta o apagamento da portadora óptica dos sinais pelos RSOAs.

Por meio de uma análise das vantagens e limitações dos circuitos para manutenção do estado de polarização e da eficiência no processo de remodulação encontrados na literatura até o momento, a topologia proposta tenta superar tais limitações, fazendo uso de um segundo RSOA, como um reforço para o apagamento do RSOA transmissor. Diferentemente da proposta em [80], o segundo RSOA não é modulado com dados, o que melhora substancialmente o desempenho do processo de apagamento óptico e de modulação. O RSOA auxiliar torna-se uma fonte de semente óptica CW para o RSOA Tx.

Adicionalmente, a cavidade externa está localizada no OLT, diferentemente das propostas encontradas na literatura técnica no estado da arte. Tal abordagem permite que se possa fazer uso de RSOAs com características de ganhos e potência de saturação mais modestas, impactando diretamente na relação custo-benefício da topologia. A **Fig.**

3.13 mostra uma ilustração esquemática da topologia aqui proposta, que será analisada em detalhes no próximo capítulo.

3.3.5 Topologia Proposta

Figura 3.13 -Esquemático da topologia de auto-alimentação e dupla polarização na cavidade externa no OLT.

Na topologia combinada, foi necessário o uso de um EDFA para suprir as deficiências de características ópticas do RSOA Tx de baixo PDG utilizado em 2013 [83-84]. Com o uso do circuito de dupla polarização proposto neste trabalho o uso de EDFA não é mais necessário, para RSOAs com as mesmas características do utilizado na topologia combinada (devido ao duplo apagamento óptico) e para RSOAs com alto PDG (devido à manutenção do estado de polarização).

O controle da polarização na topologia proposta é fundamental, pois permite que a cavidade tenha sinais simultâneos circulantes na cavidade em polarizações ortogonais, possibilitando que um sinal emitido pelo RSOA na polarização horizontal, é direcionado primeiro pelo RSOA de polarização vertical antes de retornar para o RSOA de polarização horizontal novamente e vice e versa. Desta forma, obtém-se um duplo

apagamento óptico da portadora, antes da inserção de novos dados. Ressalta-se, ainda, que este esquema está localizado no OLT, onde é possível controlar de forma apropriada as condições do ambiente assegurando a manutenção das características ópticas do RSOA com mais rigor, tornando a proposta viável.

Em resumo, a topologia proposta traz como benefícios, frente as técnicas de auto-alimentação convencionais, as características da topologia combinada somadas as vantagens da manutenção do SOP na cavidade:

- 1) Possibilidade de uso de RSOAs com características de ganho mais modestos.
- 2) Melhora na qualidade do sinal a ser remodulado pelo ONT.
- 3) Redução do nível de retroespalhamento Rayleigh e reflexões de Fresnel.
- 4) Maior tolerância aos efeitos de birrefringência.
- 5) Aumento no orçamento de potência da rede.

As desvantagens desta topologia são:

- 1) Uso adicional de um RSOA por enlace OLT-ONT.
- 2) Geração do sinal de *upstream* é dependente das características do sinal de descida.

No **Cap. 4**, é apresentado em detalhes o circuito da cavidade externa proposto, ao qual emprega dupla polarização, bem como auto-alimentação na OLT. Inicialmente, é feita a validação da topologia no ambiente de simulação para ambos os sentidos de transmissão. Em seguida, são apresentados os resultados da investigação da topologia proposta para o sentido *downstream* e *upstream* em redes de alcance de 20 km, bem como são explorados os limites da rede em termos de alcance. A topologia proposta é comparada com a topologia combinada em termos de espectros ópticos, formas de onda, diagramas de olho, orçamento de potência e taxas de erro de bit.

4. Redes WDM-PON empregando Auto-Alimentação e Dupla Polarização

Neste capítulo, é apresentado em detalhes a proposta de rede WDM-PON o circuito de dupla polarização e duplo apagamento óptico na cavidade externa da topologia proposta nessa dissertação. Adicionalmente, é feita a validação da palheta de simulação de auto-alimentação no ambiente de simulação com os resultados experimentais obtidos em [84]. É feita uma comparação dos resultados obtidos pela topologia proposta com os resultados experimentais relatados em [84].

Adicionalmente, é conduzida uma avaliação da topologia para diferentes valores de razão de extinção *downstream* e *upstream*, bem como uma comparação com a topologia combinada em termos de alcance.

4.1 Descrição detalhada da topologia proposta

Para esta proposta utiliza-se a técnica de auto-alimentação para os RSOAs da OLT. Cada transmissor *downstream* gera localmente sua semente óptica a partir do circuito de recirculação óptica presente no OLT, sendo que a semente óptica é gerada a partir da ASE do amplificador semiconductor. Portanto, exclui-se a necessidade de fontes ASE compartilhadas, o que torna a topologia proposta tolerante às falhas em comparação com fontes BLS, embora a topologia ainda esteja condicionada à operação dos elementos do circuito de manutenção da polarização: FRM, PBS e HWP.

As características espectrais dos sinais *downstream* autoalimentados, como largura de linha ultra-reduzida devido às muitas passagens pelo AWG, permitem uma maior tolerância deste esquema quanto à dispersão cromática e outros efeitos degradantes advindos do uso de ASE como semente óptica.

Com a proposta pretende-se melhorar a qualidade do sinal *downstream* que será remodulado na OLT por meio do esquema de duplo apagamento óptico. Tal esquema permite que se tenha-se, circulando na cavidade externa, dois sinais com polarização ortogonais, permitindo assim o duplo apagamento óptico e a manutenção do estado de polarização. O circuito proposto pode ser utilizado para RSOAs com baixo ou alto PDG. No caso de alto PDG, além do duplo apagamento óptico o objetivo é também garantir que o sinal incidente no RSOA esteja alinhado com o modo de alto ganho do dispositivo, conforme demonstrado em [80].

Diferente dos trabalhos que empregam circuitos de manutenção de polarização encontrados na literatura [78-80], o esquema ilustrado nas **Figs. 4.1** e **4.2**, quando comparado com o esquema montado por Martinelli *et al* [75], substitui o uso de FR por um PBS para manutenção do SOP. Essa substituição é feita com a intenção de garantir que os sinais circulantes na cavidade de recirculação sejam ortogonais entre si, bem como garantir que apenas um sentido de polarização retorne aos RSOAs.

A principal vantagem de se utilizar o PBS ao invés de um FR para garantir o alinhamento dos modos, é uma maior estabilidade quanto à variação no alinhamento do eixo do PBS com os modos de alto ganho dos RSOAs (caso a topologia faça uso de PDG RSOAs). Em caso de se usar FRs, se o sinal sofrer uma alteração no estado de polarização, devido ao efeito de birrefringência, o FR apenas rotacionará o modo incidente em 45° , não garantindo assim que o sinal incidente no RSOA esteja alinhado com o modo de alto ganho do mesmo. Essa abordagem diminui a chance da ocorrência de altos valores de ondulação nos ganhos dos HPDG RSOAs, impactando positivamente o desempenho no processo de remodelação.

A técnica auto-alimentação com dupla polarização no OLT ocorre da seguinte forma. Na **Figs. 4.1** e **4.2**, pode-se definir duas cavidades: no sentido OLT para ONT tem-se RSOA Tx do OLT, PBS, AWG da OLT, acoplador de potência da OLT (com uma configuração 10/90), e FRM. No sentido de retorno do RFM para a OLT têm-se: AWG do OLT, acoplador de potência 10/90, PBS e finalmente RSOA Tx. A segunda cavidade é análoga à primeira, porém, substitui-se nos elementos do circuito o RSOA Tx pelo RSOA Aux do OLT. Com a utilização do RSOA Tx, elimina-se a necessidade do uso de uma fonte óptica de banda larga compartilhada, pois o RSOA Tx do OLT gera sua própria semente óptica.

O circuito proposto pode ser explicado em duas etapas: primeiro do ponto de vista da polarização dos sinais na dupla cavidade, sendo isto ilustrado nas **Figs. 4.1** e **4.2**. A segunda etapa é analisada do ponto de vista do duplo apagamento óptico realizado pela topologia e ilustrado pelas **Figs. 4.3** e **4.4**.

Na **Fig. 4.1**, tem-se inicialmente que o estado de polarização do ruído ASE dos RSOAs é aleatório devido à natureza do ruído óptico. Devido à aleatoriedade inicial do SOP, para que seja possível uma cavidade externa com dupla polarização circulante, é necessária a utilização de controladores de polarização, PCs. Desta forma, o estado de polarização dos RSOAs Tx e Cw é alinhado a um dos eixos do PBS, no caso da **Fig. 4.1**, ao eixo vertical. O RSOA Aux tem a sua polarização rotacionada em 90° pela placa

de meio comprimento de onda (HWP), desta forma o SOP do mesmo é horizontal e alinhado a uma das portas do PBS, como ilustrado na **Fig. 4.1**.

Figura 4.1-Detalhamento da topologia proposta do ponto de vista de manutenção do SOP, no sentido RSOA para o FRM.

Após o alinhamento dos SOPs dos RSOAs, a semente óptica proveniente do RSOA Tx segue com polarização vertical passando pelo AWG, pelo acoplador de potência onde 90% da potência do sinal é direcionada para o FRM localizado na OLT e 10% da potência segue no sentido *upstream*. Ao atingir o FRM, a semente óptica do RSOA Aux é rotacionada em 90° . O sinal do RSOA Aux, analogamente ao RSOA Tx, segue com polarização horizontal após a passagem pelo PBS sendo filtrado pelo AWG e tendo a semente óptica também rotacionada em 90° .

A **Fig. 4.2** ilustra o retorno das sementes óptica provenientes dos RSOAs. Após a semente ter a seu estado de polarização rotacionada em 90° , o sinal do RSOA Tx tem agora o estado de polarização horizontal e, ao incidir no PBS, o sinal do RSOA Tx será agora encaminhado ao RSOA Aux. Da mesma forma, a semente do RSOA Aux será agora direcionada ao RSOA Tx devido ao estado de polarização estar alinhado ao eixo vertical do PBS. Desta forma, está completo o período de recirculação, obtendo-se uma cavidade com sinais circulando com duas polarizações ortogonais. Desta forma possibilitando uma topologia com duplo apagamento óptico da portadora com dados, já que o sinal do proveniente do RSOA Tx é direcionado primeiramente pelo RSOA Aux .

Figura 4.2 Detalhamento da topologia proposta do ponto de vista de manutenção do SOP, no sentido FRM para o RSOA.

Em caso de uso de PDG RSOAs, é necessário, para manutenção do estado de polarização do sinal, que os eixos ortogonais do PBS estejam alinhados aos eixos de alto ganho dos PDG RSOAs. Desta forma, o funcionamento eficiente da topologia é garantido. Caso contrário, tem-se projeções ortogonais de polarização de um RSOA para outro por meio do caminho RSOA Tx, PBS e RSOA Aux, dificultando o processo de apagamento óptico na cavidade. Como inicialmente os RSOAs emitem um ruído ASE com uma polarização aleatória, somente após a estabilização dinâmica do processo as componentes de alto ganho do RSOA circularão na cavidade.

Após a estabilização do processo self-seeding, é iniciado o processo de transmissão, sendo modulada diretamente em intensidade a portadora óptica do RSOA Tx. O sinal modulado incide no PBS em um dos eixos ortogonais. Em seguida o sinal é direcionado para o AWG da OLT. Após incidir no AWG, 90% do sinal é direcionado ao FRM para remodulação e 10% é direcionado para a ONT associada, por meio do acoplador de potência 10/90. Finalmente, 10% do sinal modulado é conduzido para o filtro de polarização. O filtro garante que apenas os sinais do RSOA Tx seguirão para nó remoto.

Devido ao fato de o RSOA Aux estar polarizado com um nível de corrente contínua, sua portadora óptica não carrega informação. O sinal incidente no RSOA Aux será amplificado, através da dupla passagem pelo meio ativo do RSOA e refletido pela

face de alta refletividade do RSOA (refletividade aproximadamente 99%). Desta forma ocorre o primeiro apagamento óptico realizado pela cavidade.

Na cavidade composta por RSOA Aux do OLT, PBS, AWG, acoplador de potência, FRM, e novamente AWG, acoplador de potência, PBS e RSOA Aux, o RSOA Aux tem o sinal fatiado pelo AWG. Posteriormente o sinal passa pelo acoplador de potência do OLT. Ao passar pelo acoplador de potência, 10% da potência do sinal incidente segue no sentido *downstream*, e 90% da potência segue em direção ao FRM. Os 10% de potência que seguem em direção a ONT passam antes por um filtro de polarização, que está configurado para passagem de sinais com a mesma polarização dos sinais emitidos pelo RSOA Tx. Portanto, os sinais emitidos pelo RSOA Aux não são encaminhados para ONT.

Após o sinal do RSOA Aux, ser refletido pelo FRM, passa novamente pelo acoplador de potência, entra pela porta comum do AWG, e sai por uma das portas do AWG. Observa-se que agora o sinal do RSOA Aux teve sua polarização rotacionada em 90°. Portanto ao incidir o PBS, o sinal será direcionado para o RSOA Tx.

Esta abordagem permite que o RSOA Aux funcione como um reforço, na operação de apagamento da portadora óptica para o RSOA Tx. Portanto, o sinal modulado no *roundtrip* anterior será amplificado pelo RSOA Aux antes de retornar para remodulação no RSOA Tx. A **Fig. 4.3** mostra o sinal modulado em intensidade pelo RSOA Tx no início do processo de modulação, após a estabilização da operação self-seeding, ou seja, quando a P_{SS} já se encontra dentro dos limites de saturação definidos na curva de ganho característica do dispositivo semiconductor.

Sendo assim, a **Fig. 4.3** ilustra a portadora óptica modulada em intensidade no primeiro *roundtrip*, ou seja, quando o RSOA Tx começa o processo de modulação, mostrando então o que acontece na cavidade quando o sinal modulado segue no sentido, RSOA Tx, PBS, AWG, acoplador de potência e FRM. Após o sinal ser refletido pelo FRM, é direcionado ao PBS passando através dos seguintes elementos da cavidade de recirculação: acoplador de potência, AWG do OLT, PBS e seguindo em direção ao RSOA Aux. O sinal incidente no RSOA Aux é penalizado em potência, devido à dupla passagem pelos elementos da cavidade.

Figura 4.3 -Ilustração do sinal óptico modulado em intensidade no início do processo de modulação no sentido RSOA Tx para o RSOA Aux.

O sinal óptico modulado em intensidade é amplificado pelo RSOA Aux e segue em direção ao FRM, passando pelos elementos da cavidade: PBS, AWG da OLT, acoplador de potência. Ao passar pelo acoplador de potência, 10% da potência incidente segue no sentido *downstream*. Porém, o sinal está com a polarização horizontal. Portanto, será filtrado pelo filtro de polarização localizado antes do circulador óptico, como ilustrado na **Fig. 4.2**.

O sinal proveniente do RSOA Aux é refletido pelo FRM, e tem sua polarização alinhada com polarização do RSOA Tx. Já no sentido ao RSOA Tx, o sinal passa novamente pelo acoplador de potência, AWG da OLT e finalmente pelo PBS antes de atingir o RSOA Tx. A **Fig. 4.4** ilustra o sinal saindo do RSOA Aux em direção ao RSOA Tx, completando assim o processo de recirculação na cavidade óptica.

Em suma, o RSOA Aux funciona como um reforço no apagamento da portadora óptica, fazendo com que o sinal incidente no RSOA Tx, tenha uma razão de extinção mínima (*Quasi-CW*), facilitando o processo de apagamento da portadora óptica, que será remodulada com novos dados *downstream*. Desta forma, há uma melhora na

A **Fig. 4.5** ilustra o ganho dado pelo RSOA Aux, quando o sinal incidente já foi previamente modulado com dados *downstream* pelo RSOA Tx.

Após o sinal ter sido pré-amplificado pelo RSOA Aux, o sinal será novamente amplificado antes de ser remodulado pelo RSOA Tx como ilustrado pela **Fig. 4.6**.

Figura 4.6 -Ganho óptico do RSOA Tx para os sinais ópticos previamente amplificados pelo RSOA Aux.

A **Fig. 4.6** exibe a amplificação do sinal pelo RSOA Tx. Nota-se que a razão de extinção do sinal será agora reduzida a valores residuais, tornando essa uma das grandes vantagens da topologia proposta.

4.2 Caracterizações iniciais

Inicialmente, foi realizada a calibração das características de ganho dos RSOAs configurados no simulador, com os RSOAs utilizados na investigação experimental realizada por Duarte *et al* [16, 83-84]. Em seguida foi realizada a caracterização do perfil espectral dos sinais auto-alimentados, bem como análise dos níveis de razão de extinção para os sentidos de transmissão *downstream* e *upstream*. As características ópticas do RSOA, bem como, os parâmetros operacionais dos elementos utilizados no ambiente de simulação, configurados em concordância com os elementos relatados em [11], encontram-se no **Apêndice A**.

4.2.1 Ganho óptico do RSOA

Para o RSOA utilizado nas simulações, foi necessário o ajuste de alguns parâmetros físicos e operacionais do dispositivo semiconductor em relação aos parâmetros nominais do simulador: fator de confinamento e o comprimento da área ativa do semiconductor. Estes parâmetros foram ajustados para que as características operacionais tais como ganho, corrente de polarização DC, potência de saturação e banda de modulação, fossem aproximadamente as mesmas utilizadas nos experimentos em [84].

Figura 4.7 Calibração das curvas de ganho óptico do RSOA com as curvas experimentais obtidas de [84], para correntes de polarização de 60 mA e 90 mA.

A **Fig. 4.7** mostra as curvas de ganho do RSOA obtidas através da simulação no OptiSystem 13.0 e as curvas experimentais obtidas da referência Duarte *et al* [84]. As curvas foram geradas para uma corrente de polarização de 90 mA e 60 mA.

Para um mesmo valor de fator de confinamento do dispositivo semiconductor, a curva de ganho óptico do RSOA do simulador desloca-se em relação à curva experimental retirada da referencia [84], conforme se aumenta a área ativa do semiconductor ou diminui a área ativa do semiconductor, respectivamente.

Os ajustes dos parâmetros do RSOA foram feitos para que a curva de 60 mA se aproximasse da curva obtida pelo experimento, com uma diferença não superior a 1,0 dB em toda região analisada. A confirmação da calibração pode ser verificada pelo gráfico da curva de 90 mA, a qual foi registrado uma diferença máxima de 0,3 dB em toda região analisada.

Feito então o ajuste das curvas de ganho óptico, para fins de comparação dos resultados entre topologia investigada no ambiente de simulação e os resultados obtidos a partir do experimento, é possível determinar as regiões de saturação dos RSOAs para polarização DC de 60 mA e 90 mA. A operação em regime de saturação dos RSOAs da OLT e ONT é necessária para que ocorra o apagamento óptico das portadoras, propiciando desta forma um cenário de auto-alimentação e de remodulação eficientes.

Figura 4.8 Curvas de ganho óptico do RSOA para dois valores de corrente de polarização 60 e 90 mA.

Neste contexto, pode-se destacar três variáveis que devem ser observadas para que haja uma supressão do ganho óptico de maneira satisfatória, são elas: ganho óptico do RSOA para um certo valor de corrente de polarização, razão de extinção do sinal modulado e potência óptica de injeção no dispositivo.

Desta forma, fixado o valor de corrente contínua de polarização do RSOA, é possível gerar a curva de ganho óptico para portadora óptica sem dados, e determinar a região de saturação do dispositivo. A **Fig. 4.8** mostra as curvas de ganho do RSOA caracterizado no OptiSystem para valores de corrente de polarização de 60mA e 90mA.

Para o RSOA localizado na OLT o nível de corrente DC foi fixado em 90 mA e para o RSOA da ONT este valor foi fixado em 60 mA. Estes valores estão em concordância com os reportados em [84]. Na **Fig. 4.8** pode-se observar que os valores mínimos de potência de injeção nos dispositivos semicondutores para que os mesmos operem em regime de saturação são -13 dBm para uma corrente de polarização de 60 mA e -16 dBm para uma corrente de polarização de 90mA.

É requerido que o RSOA da OLT opere com alto ganho e com elevada potência de saturação, devido principalmente ao esquema de auto-alimentação apresentar altas perdas no caminho de recirculação. Desta forma, uma maior corrente de polarização propicia um ganho maior e uma potência de saturação maior, permitindo que o dispositivo consiga apresentar um ganho superior às elevadas perdas no circuito de recirculação.

O RSOA da ONT deve operar em regime de saturação e desta forma realizar o apagamento da portadora óptica de maneira eficiente. No entanto, a corrente de polarização é menor do que a utilizada no RSOA da OLT, devido à necessidade de se ter valores de razão de extinção superiores a 10 dB para uma transmissão bidirecional satisfatória [84-87].

Estes valores de 60 e 90 mA para os RSOAs da ONT e OLT respectivamente, são os valores ótimos para o cenário experimental descrito em [84]. Altos valores de corrente contínua tendem a aumentar a contribuição do ruído balístico no sistema, fazendo-se necessário algum controle de temperatura do dispositivo semicondutor para aumentar a eficiência sistêmica no cenário de auto-alimentação [84].

4.2.2 Espectro dos sinais auto-alimentados

Para o sentido *upstream*, a qualidade da semente óptica disponível para a remodulação tem grande impacto no desempenho da topologia. A largura de linha dos sinais *self-seeding* está relacionada ao perfil da banda passante do AWG da OLT. Desta forma, efeitos degradantes como dispersão cromática e efeitos de pós-filtragem podem limitar o orçamento de potência da rede.

Assim, inicialmente é feita uma comparação entre os espectros de sinais ASE fatiadas e sinais ópticos auto-alimentados. Estes sinais são obtidos na saída do RSOA da ONT. O sinal auto-alimentado é obtido após a estabilização dinâmica do sinal no circuito de recirculação óptica e o sinal ASE-fatiada é obtido retirando-se o FRM da cavidade. A comparação é realizada para dois perfis de filtros do AWG da ONT: gaussiano e retangular.

O espectro obtido do fatiamento de fontes BLS e de sinais auto-alimentados para dois diferentes perfis de filtro do AWG, são mostrado na **Fig. 4.9**. Comparando-se os sinais auto-alimentados com os sinais ASE-fatiada, observa-se um desvio na frequência central do sinal auto-alimentado em relação à frequência central do filtro óptico do AWG.

Figura 4.9 Espectro de sinais auto-alimentados e sinais provenientes de fatiamento de fontes ASE para perfil de filtro do AWG gaussiano (a) e retangular (b). Foi utilizada uma resolução de 0,03 nm.

Este deslocamento no comprimento de onda de pico dos sinais auto-alimentados é devido à auto-modulação de fase, provocada por mudanças no índice de refração de grupo da região ativa do semiconductor operando em regime de saturação, também conhecido como efeito Bogatov [88]. O deslocamento no comprimento de onda de pico ocorre até o limite da banda passante do filtro do AWG [85, 89-91].

Na **Fig. 4.9** pode-se observar que, para um AWG com perfil de filtro gaussiano, a largura de linha do sinal auto-alimentado é de 0,06 nm. Para um AWG com perfil retangular, a largura de linha do sinal proveniente do processo de auto-alimentação é de 0,021 nm. No entanto, a largura de linha do sinal proveniente do fatiamento de uma fonte BLS do tipo ASE é de 0,5 nm.

Observou-se que, para os sinais auto-alimentados, além do deslocamento do pico de comprimento de onda para comprimentos de onda longos (*Red-Shift*), ocorre também um estreitamento da largura de linha do sinal, em comparação com a banda passante do AWG. Esta redução espectral da envoltória do sinal é devida às várias passagens do sinal pelo AWG, pois o sinal fatiado inúmeras vezes e à cada passagem tem o seu conteúdo espectral reduzido.

Estas características garantem o destaque de apenas um modo da envoltória do sinal dentro da banda passante, devido ao ganho propiciado pelo RSOA a um modo específico da envoltória. Portanto, em relação ao sinal ASE fatiado, o sinal auto-alimentado possui uma tolerância maior aos efeitos de dispersão cromática, dispensando o uso de compensadores de dispersão para taxas de transmissão de 1,25 Gbps em alcances de 20 km.

A geração de sinais ópticos por meio da técnica de auto-alimentação, pode ser considerada como um laser de cavidade externa, onde o ganho propiciado aos modos longitudinais da envoltória pelo RSOA supera as perdas da cavidade óptica. Desta forma, a quantidade de modos oscilantes na cavidade depende do tamanho físico da cavidade. Na topologia estudada neste trabalho, este comprimento está relacionado às conexões entre os elementos do laser de cavidade externa (RSOA, AWG, acoplador e FRM) [91].

Portanto, ao se realizar a técnica auto-alimentação na OLT, o comprimento da cavidade é a soma dos comprimentos das conexões dos elementos da cavidade ressonante, a qual é da ordem de poucos metros. Para os sinais auto-alimentados gerados no lado do usuário, o tamanho da cavidade pode variar de centenas de metros a quilômetros, dependendo do comprimento da fibra distribuidora. Desta forma, a região espectral livre (*Free Spectral Region*-FSR), ou seja, o espaçamento modal, diminui com o aumento do comprimento da cavidade, variando de poucos MHz para cavidades com comprimento de poucos metros a espaçamento modal da ordem de kHz para cavidades com algumas dezenas de quilômetros [90-91]. Com o aumento no número de modos oscilantes dentro do envelope, aumenta a contribuição do ruído de partição modal, bem

como as perturbações no estado de polarização do sinal, desta forma impactando o desempenho sistêmico da rede [90-91].

Portanto, os sinais auto-alimentados gerados na OLT possuem uma maior tolerância quanto aos efeitos de PDL e do ruído de partição modal, em relação aos sinais auto-alimentados gerados no lado do usuário.

Outro fator impactante no desempenho sistêmico da rede é o perfil do filtro do AWG da OLT. Como mostrado na **Fig. 4.9** a semente óptica resultante da técnica *self-seeding* com a utilização de um AWG com perfil de filtro retangular resultou em um sinal óptico com uma largura de linha mais estreita que a semente gerada pelo AWG com perfil gaussiano. Desta forma, tem-se um melhor desempenho sistêmico, com a utilização de AWG com perfil retangular, mais robusto a dispersão cromática como demonstrado em [89]. No entanto, a fim de se ter uma comparação dos resultados obtidos a partir da simulação neste trabalho com os resultados experimentais obtidos por [84], considerou-se um AWG com perfil gaussiano.

4.2.3 Níveis de razão de extinção

Em sistemas de remodulação é necessário um compromisso entre os níveis de razão de extinção *downstream* e *upstream*, para que se tenha um melhor desempenho sistêmico da rede, diferentemente de sistemas de detecção direta sem remodulação, em que níveis de razão de extinção elevados melhoram o desempenho sistêmico da rede.

Na topologia combinada, se tem a técnica de auto-alimentação na OLT e remodulação na ONT, níveis de razão de extinção *downstream* elevados prejudicam o apagamento óptico pela remodulação. Por outro lado, níveis de razão de extinção baixos penalizam a detecção dos sinais *downstream*.

Conforme **Fig. 4.8**, o nível de potência de injeção entregue ao RSOA da ONT deve ser superior a -13 dBm para que se garanta a operação em regime de saturação do dispositivo permitindo um apagamento óptico eficiente.

Neste contexto, os níveis de razão de extinção *downstream* e *upstream* foram determinados separadamente, variando-se a amplitude de corrente aplicada aos terminais do dispositivo semiconductor. No ambiente de simulação OptiSystem a variação da razão de extinção do sinal óptico de saída do elemento RSOA, é definida pela corrente de pico-a-pico e o valor de corrente contínua aplicados no terminal do dispositivo. No entanto, nos RSOAs físicos utilizados por [84] a razão de extinção do sinal óptico de saída é definida variando-se a tensão de pico-a-pico e o nível de corrente

continua aplicada no dispositivo semiconductor. As duas formas de polarização são equivalentes, pois pode se fazer a conversão tensão-corrente sabendo-se a impedância do dispositivo.

Neste cenário, o nível de potência de auto-alimentação, P_{ss} foi fixado em -27 dBm/0,2 nm. A potência de injeção, P_{inj} *upstream* no RSOA da ONT foi fixada em -12 dBm, sendo este valor o máximo de potência disponível, de acordo com o orçamento de potência a ser entregue ao RSOA da ONT. Este valor P_{inj} garante a operação do RSOA ONT em regime de saturação. Os níveis de razão de extinção *upstream* foram obtidos mantendo-se a $ER_D = 0,0$ dB, ou seja o melhor cenário possível para remodulação, pois a portadora injetada no RSOA da ONT não possui dados, ou seja apagamento perfeito.

Figura 4.10 Níveis de razão de extinção para sinais *downstream* e *upstream* em função da corrente de pico-a-pico aplicada no dispositivo semiconductor.

Conforme mostrado na **Fig. 4.10** para uma amplitude de corrente I_{pp} de aproximadamente 0,18 mA tem-se uma ER_D de 7,0 dB. Tal valor de razão de extinção está em concordância com os valores alcançados na literatura técnica [80-85, 89-91]. Níveis de razão de extinção baixos são características do processo de auto-alimentação, decorrentes da operação do dispositivo em regime não linear, e das muitas passagens

pelo circuito de recirculação RSOA-AWG-FRM. Valores típicos de razão de extinção para sinais auto-alimentados estão compreendidos entre 5,0 e 6,0 dB [84,89,91].

Para o sentido de subida (*upstream*) níveis mais altos de razão de extinção são alcançados, pois nesse sentido, os dados são inseridos no esquema de remodulação, ou seja, a semente *upstream* percorre o caminho apenas uma vez. Na **Fig. 4.10** para uma amplitude de corrente I_{pp} de aproximadamente 0,18 mA tem-se uma ER_{UP} de aproximadamente 12,0 dB.

Neste contexto, uma diferença de 5,0 dB entre os níveis de razão de extinção de decida e subida dos sinais, somada à potência de injeção no RSOA da ONT dentro da região de saturação do dispositivo, garantem uma transmissão bidirecional com qualidade [84].

4.3 Validação da topologia proposta

A topologia combinada proposta por Duarte *et al* 2013 [84] utilizou RSOAs com ganho com baixa dependência do estado de polarização e com características operacionais modestas de ganho e potência. Portanto, foi necessário a utilização de um EDFA como reforço ao RSOA, emulando assim um RSOA com características mais robustas para a configuração de auto-alimentação na OLT e remodulação na ONT.

Inicialmente, foi feita a calibração da palheta montada no OptiSystem para avaliação da topologia combinada utilizando-se apenas um RSOA para geração do sinal auto-alimentado, sendo que a palheta foi calibrada apenas para o sentido *downstream*.

Da mesma forma que em [84], observou-se que o nível de potência do sinal entregue ao usuário ONT não foi suficiente para que o RSOA da ONT pudesse realizar o processo de remodulação. Neste caso, a potência injetada no RSOA da ONT não se encontra na região de saturação do mesmo. Portanto, não ocorre o apagamento óptico de forma eficiente para um RSOA com as mesmas características de ganho e potência.

Como segunda etapa, foi feito então a caracterização de um EDFA no ambiente de simulação com as mesmas características do EDFA utilizado em [84]. Desta forma, pode-se simular um RSOA com alto ganho e potência de saturação, permitindo assim que o nível de potência entregue ao RSOA da ONT fosse suficiente para que ocorresse a remodulação do sinal por parte do usuário ONT.

Para todas as avaliações realizadas neste capítulo o comprimento de onda do canal utilizado foi o 1550,91 nm, o mesmo canal utilizado em [84].

4.3.1 Primeira etapa: auto-alimentação sem EDFA na cavidade externa

Para o primeiro teste de calibração realizado no ambiente de simulação não foi utilizado um amplificador EDFA como forma de emular um RSOA de alta potência de saturação e ganho. Esta abordagem só foi possível, pois no ambiente de simulação o RSOA empregado foi capaz de entrar em modo de operação com uma P_{ss} igual a -31 dBm/0,2 nm. No entanto para o RSOA utilizado em [84] foi necessário o auxílio de um amplificador EDFA para realização da técnica *self-seeding* na OLT.

A **Fig. 4.11** mostra uma ilustração esquemática do *test-bed* configurado no OptiSystem, para análise de desempenho da topologia *self-seeding* realizada na OLT no sentido *downstream*. Para esta análise, utilizou-se um RSOA com corrente de polarização de 90 mA, obtendo-se ganho de aproximadamente 20 dB para pequenos sinais (-25 dBm) e potência de saturação em torno de 6 dBm, em concordância com as características dos RSOAs utilizados por [84], como pode ser observado pela **Fig. 4.11**. Neste teste, a fibra alimentadora tem um comprimento total de 15 km e a fibra distribuidora possui um comprimento de 5 km.

Figura 4.11-Ilustração esquemática da topologia *self-seeding* avaliada no OptiSystem para calibração com [1-2] utilizando apenas o RSOA.

Neste esquema, primeiramente o RSOA é polarizado apenas com nível de corrente contínua, até que o sinal banda larga ASE fatiado atinja a potência de saturação do RSOA. Para as características configuradas neste RSOA, observou-se que 10 *roundtrips* em nível de corrente AC foram suficientes para que o sistema atingisse a potência de saturação. No entanto, para a estabilização da BER é necessário um número

superior a 100 *roundtrips*, como também observado no experimento realizado em [89-91].

Após atingir o equilíbrio dinâmico da cavidade do self-seeding, inicia-se então a modulação direta do dispositivo semiconductor da OLT. O RSOA emprega modulação direta OOK, (*on-off-keying-OOK*) com pulsos do tipo não retorno à zero (*Non Return-to-Zero – NRZ*), em sequências pseudo-aleatórias de bits de comprimentos iguais a $2^{31}-1$ para o sentido *downstream* e $2^{23}-1$ para o sentido *upstream*. Esta diferença no tamanho das seqüências dos dados de ascendente e descendente evita correlação entre os dois sentidos de transmissão. Adicionalmente, no esquema de remodulação, sequências maiores sofrem maior penalidade [89]. A **Tabela 4.1**, contém os parâmetros globais configurados para simulações da topologia *self-seeding*.

Tabela 4.1-Parâmetros globais utilizados na simulação

Parâmetros	Valores configurados
Taxa de bit	1,25 Gb/s
Tamanho da janela temporal	102,4 ns
Taxa de amostragem	40 G amostras/s
Tamanho da sequência de bits	128 bits
Amostras por bit	32 amostras
Bits de guarda	0 bits
Taxa de símbolos	$2,5 \cdot 10^9$ amostras/s
Número de amostras	4096 amostras

Os dados foram recuperados pelo bloco regenerador-3R (*Re-shaping, Re-timing e Re-amplification 3R-regenerator*), e o diagrama de olho pode ser então analisado por um bloco de análise de BER.

Na configuração ilustrada pela **Fig. 4.11**, pode-se monitorar os principais parâmetros da topologia de auto-alimentação. Nos pontos A, B e C, avaliou-se o sinal modulado no tempo e na frequência, medindo-se também a potência do sinal nestes pontos. No ponto C é colocado um atenuador variável de potência óptica. Desta forma é possível levantar as curvas de BER, diagramas de olho etc. Cada ponto de monitoramento tem um propósito específico descrito abaixo:

- **Ponto A** - Nível de potência da semente óptica de auto-alimentação (Pss).
- **Ponto B** – Potência óptica lançada na fibra e medições de espectro óptico
- **Ponto C** - Diagramas de olho óptico, nível de razão de extinção óptico *downstream*, potência de injeção nos RSOAs da ONT.

Figura 4.12 Espectro do ruído ASE e do sinal auto-alimentado (self-seeding) resolução de 2 nm.

A **Fig. 4.12** mostra o espectro do ruído ASE e do sinal *self-seeding*. Os parâmetros do RSOA foram configurados de forma que o espectro do ruído ASE do semiconductor tenha o comprimento de onda central em 1545 nm e uma banda óptica de aproximadamente 32 nm, tomada a 3 dB.

A **Fig. 4.13** mostra o sinal auto-alimentado modulado com dados *downstream* e uma razão de extinção de 5,0 dB medida no ponto C. No entanto, a potência de auto-alimentação é de aproximadamente -6 dBm, devido às altas perdas na cavidade de recirculação. Devido às características de ganho e potência de saturação do semiconductor, para uma razão de extinção de 5,0 dB a supressão de dados na portadora não ocorre completamente. Desta forma é possível observar *undershoots* e *overshoots* na **Fig. 4.13**.

A diferença entre o valor máximo de um sinal com nível lógico '1' e o valor mínimo de um sinal com nível lógico '1', ou seja, o valor de *undershoot* observado na simulação é de aproximadamente 0,5 dB, o mesmo para os *overshoot* dos sinais com nível lógico '0'. Esta diferença pode prejudicar o desempenho da rede para baixos valores de razão de extinção *downstream* e longas distâncias de transmissão. Neste contexto, este impacto no desempenho sistêmico da topologia é causado pela baixa

qualidade do sinal *downstream* no momento de decisão de níveis altos e baixos, por parte do aparato de detecção.

Figura 4.13 Sinal óptico *downstream* com razão de extinção igual a 5,0 dB.

Espera-se que, para RSOAs com características de ganho e potência melhores que os utilizados nessa etapa, ocorra a eliminação, ou ao menos, uma diminuição desses *undershoots* e *overshoots*. Esta expectativa deve-se ao fato de que maiores valores de potência de auto-alimentação posicionam a operação do semiconductor em uma região mais saturada da curva de ganho. Desta forma, a supressão da portadora se torna mais eficiente.

A metodologia utilizada para validação da topologia no ambiente de simulação foi primeiramente a caracterização de todos os elementos da rede conforme as especificações obtidas a partir dos anexos da referência [16]. Em seguida, os parâmetros globais como taxa de transmissão, tamanho das seqüências de dados, razão de extinção etc. foram ajustados de acordo com o experimento. Desta forma, o ajuste das curvas de BER foi feito alterando-se os parâmetros do fotodetector PIN da ONT. Os principais parâmetros ajustados nesta etapa foram a responsividade, a corrente de escuro e o nível do ruído térmico.

No entanto, além de ajustar o parâmetro de responsividade do dispositivo foi necessário aumentar a contribuição de ruído na rede para que a inclinação da curva de BER produzida a partir da simulação fosse aproximadamente igual a da curva obtida pelo experimento. A necessidade de aumentar a contribuição do ruído ao sistema para ajustar as curvas, deve-se ao fato de que no experimento foi utilizado um amplificador EDFA para simular um RSOA com características de alto ganho e alta potência de saturação [83-84]. Ao se utilizar um EDFA na cavidade de recirculação dos sinais auto-alimentados, tem-se também a contribuição do ruído ASE pelo EDFA ao sinal óptico, o que impacta no desempenho sistêmico da topologia. Como este ruído estava ausente na palheta de simulação, esta ausência é emulada pelo incremento no ruído térmico do fotodetector.

Figura 4.14 Curvas de BER obtidas pela simulação e pelo experimento para $ER_D=5,0$ dB.

Neste contexto, a curva de BER obtida pela simulação foi ajustada para uma razão de extinção *downstream* igual a 5,0 dB. Considera-se que a curva de BER teve um ajuste satisfatório quando as extremidades da curva diferem de no máximo 1,0 dB entre a curva de referência e a curva a ser ajustada. Um destes extremos é o valor máximo de BER (10^{-4}), em que os algoritmos de FEC são capazes de recuperar a informação com

patamar livre de erros, enquanto o outro extremo da reta de BER é o valor considerado transmissão livre de erros 10^{-12} .

Na **Fig. 4.14** tem-se as curvas de BER obtidas do experimento [84] e extraída da simulação para uma razão de extinção de 5,0 dB. A curva foi ajustada no ponto de BER igual a 10^{-8} . Como resultado tem-se uma diferença no limiar de FEC igual a 0,6 dB e no patamar livre de erro 0,1 dB. Desta forma, garante-se que os resultados obtidos a partir do ambiente de simulação estejam compatíveis com os resultados experimentais.

O próximo passo é verificar a calibração da palheta no simulador nesta primeira etapa, para um valor de razão de extinção diferente do ajustado. No entanto, os parâmetros do fotodetector não são mais alterados, ou seja, permanecem com os valores já ajustados para a curva da **Fig. 4.14**. Sendo esta a metodologia utilizada para validação de uma palheta de simulação.

A **Fig. 4.15** mostra as curvas de BER *downstream* do experimento e da simulação para uma razão de extinção de 4,0 dB. Na **Fig. 4.15** nota-se uma mínima diferença (menor que 0,1 dB em toda a região) entre as curvas obtidas dos resultados experimentais (curva verde) e a curva de BER gerada pela simulação no OptiSystem.

Figura 4.15 Curvas de BER obtidas pela simulação e pelo experimento para $ER_D=4,0$ dB.

Figura 4.16 Curvas de BER *downstream* para $ER_D=5,0$ dB e $ER_D=4,0$ dB geradas pela simulação.

Outro fator que deve ser levado em consideração, é orçamento de potência nesta topologia, pois determina o alcance da rede e a qualidade dos sinais remodulados por parte dos usuários. A **Fig. 4.16** mostra as curvas de BER para dois valores de razão de extinção *downstream* geradas a partir da simulação.

Para que se tenha um cenário de auto-alimentação na OLT e remodulação na OLT é necessário que os RSOAs operem em regime de saturação. Para o RSOA da ONT operar em regime não linear é requerido um nível de potência de injeção maior que -13 dBm. No entanto devido às características modestas dos RSOAs utilizados em [84] e configurados no ambiente de simulação, não é possível a realização da remodulação dos sinais por parte dos usuários ONTs neste primeira etapa. Desta forma, foi necessária a caracterização de um amplificador EDFA conforme descrito em [84]. Desta maneira, a de P_{inj} do RSOA da ONT garante que o semiconductor opere em regime de saturação e, portanto propiciando um apagamento eficiente da portadora modulada antes da inserção dos dados *upstream*.

A próxima seção mostra os resultados obtidos na simulação para topologia combinada com a utilização de um amplificador EDFA na cavidade ressonante, conforme relatado em [84].

4.3.2 Segunda etapa auto-alimentação com EDFA na cavidade externa

Nesta etapa, a validação da topologia é realizada para ambos os sentidos de transmissão: *downstream* e *upstream*. A transmissão bidirecional, só se tornou possível nesta etapa devido ao aumento na potência óptica do sinal lançado na fibra no sentido *downstream*. Desta forma, o nível de potência de injeção no RSOA da ONT, é suficiente para que ocorra o apagamento óptico da portadora e a inserção dos dados *upstream* de forma eficiente.

Figura 4.17 Ilustração ampliada da OLT da topologia de cavidade única com a presença de um EDFA.

Adicionalmente, com a utilização de um EDFA na cavidade externa (**Fig. 4.17**), os parâmetros de ruído do fotodetector da ONT foram mantidos com os valores nominais do software. Desta forma, apenas a responsividade do fotodetector PIN foi alterada para o ajuste da curva de BER da simulação com a curva de BER experimental (**Tabela 4.2**). Novamente, para um dado valor de razão de extinção a curva de BER é ajustada para um valor intermediário do intervalo da curva de BER de referência, ou seja, para um valor entre o patamar livre de erros e o valor mínimo em que é possível recuperar a informação através da utilização de FEC. O valor de razão *downstream* utilizado para o ajuste foi 5,0 dB, e para validação da calibração o valor utilizado foi de 4,0 dB.

A **Fig. 4.18** mostra o resultado obtido para o ajuste da curva para uma razão de extinção de 5,0 dB e uma distância de 20 km, sendo 15 km de fibra distribuidora e 5 km de fibra alimentadora. Neste cenário, a potência de auto-alimentação no primeiro período de recirculação foi fixada em -27 dBm/0,2 nm conforme relatado em [84].

Figura 4.18 Curvas de BER *downstream* simulação e experimento, para uma razão de extinção de 5,0 dB.

Tabela 4.2 Comparação entre os parâmetros do fotodetector PIN configurado no OptiSystem.

Parâmetros	Default	Cavidade única	Dupla cavidade
Responsividade [A/W]	1,0	0,4	0,5
Corrente de escuro [nA]	10	70	10
Densidade de potência térmica [W/Hz]	10^{-22}	$5 \cdot 10^{-20}$	10^{-22}

Neste contexto, a potência óptica lançada na fibra foi fixada em 0.0 dBm, a fim de evitar a degradação dos sinais de descendentes por meio de efeitos não lineares, em concordância com o nível de potência relatado em [84]. Desta forma, o ajuste da curva BER da simulação em relação à curva experimental se deu apenas pelo ajuste do parâmetro de responsividade do fotodetector PIN da ONT. Este ajuste na responsividade é justificado para que a palheta de simulação possa representar a realidade, tendo em vista a inexistência de responsividade igual a um. Uma comparação

entre os parâmetros ajustados para o fotodetector PIN da cavidade única e da dupla cavidade encontra-se na **Tabela 4.2**. Para cavidade única, a corrente de escuro foi multiplicada por sete e densidade de potência térmica foi aumentada em 50 vezes para alcançar a calibração das curvas de BER.

A **Fig. 4.18** mostra que para o valor de BER considerado livre de erro, tem-se uma diferença de aproximadamente 0,2 dB, já para o valor mínimo em que a FEC consegue recuperar o sinal livre de erros, temos uma diferença menor que 0,1 dB. Assim, para verificar a robustez da calibração feita no OptiSystem foi gerada a curva de BER para $ER_D = 4,0$ dB, sem contudo alterar os parâmetros do fotodetector.

Figura 4.19 Curvas de BER *downstream* da simulação e experimento, para uma razão de extinção de 4,0 dB.

A **Fig. 4.19** mostra as curvas de BER para uma razão de extinção de 4,0 dB, geradas a partir da simulação e obtidas através da referencia [84]. Pode-se observar que para uma BER de $10^{-3,5}$, a diferença entre a curva experimental e a obtida pela simulação é de 0,6 dB, já para o patamar livre de erros, tem-se um valor de aproximadamente 0,05 dB de diferença.

Desta forma, para o sentido de transmissão *downstream*, a palheta montada no simulador, está ajustada de forma que os resultados obtidos possam ser considerados

condizentes com os resultados experimentais. Adicionalmente, constatou-se que a inclusão do amplificador EDFA na cavidade externa, eliminou a necessidade de aumentar as características de ruído do detector ONT, bem como possibilitou um nível de potência de injeção suficiente para que o RSOA da ONT possa remodular a portadora óptica *downstream* como reportado no experimento conduzido em [84].

Figura 4.20 Avaliação de desempenho de BER upstream para $ER_D=0,0 \text{ dB}$. Em (a) tem-se avaliação feita para dois valores de potência de injeção -12 dBm e (b) avaliação feita para $P_{\text{inj}} = -22 \text{ dBm}$.

Neste contexto, o próximo passo nesta etapa, é o ajuste da curva de BER para o sentido de transmissão de subida. Este ajuste foi realizado para uma potência de injeção no RSOA da ONT igual a -12 dBm (sendo este o valor máximo de potência de injeção disponível pelo orçamento de potência da rede), e com uma potência self-seeding fixada em $-27 \text{ dBm}/0,2 \text{ nm}$ a curva é mostrada na **Fig. 4.20-a**. Na **Fig. 4.20-a** nota-se uma diferença entre as curvas experimentais e de simulação inferior a $0,2 \text{ dB}$ em toda a faixa analisada.

Sem alterar o valor da responsividade previamente ajustado, a **Fig. 4.20-b**, mostra a avaliação de BER no sentido *upstream* para um valor de potência de injeção de -22 dBm . A avaliação de BER para uma potência de injeção de -22 dBm foi realizada com o intuito investigativo, pois na ausência do EDFA na cavidade externa este é o valor máximo de potência disponível no RSOA da ONT, sendo este o valor próximo ao valor de ganho para pequenos sinais, operando na região linear do dispositivo. Na **Fig.**

4.20-b obteve-se uma diferença entre as curvas experimentais e de simulação inferior a 0,1 dB em toda a região analisada.

A **Fig. 4.21** mostra a avaliação de BER *upstream* para uma razão de extinção *downstream* de 0,0 dB e para três valores de potência de injeção no RSOA da ONT: -12, -17 e -22 dBm.

Figura 4.21 Avaliação de BER *upstream* para três valores de potência de injeção no RSOA ONT.

Na **Fig. 4.21** nota-se uma diferença máxima entre as curvas de BER de aproximadamente 0,7 dB para região considerada livre de erros e uma diferença máxima de 0,4 dB para região de patamar de FEC.

Como verificação da validação do ajuste feito para curva de BER no sentido *upstream*, é realizada uma avaliação da curva de BER com uma razão de extinção *downstream* igual a 3,5 dB. Nesta verificação a potência de injeção no RSOA da ONT foi fixada em -17 dBm, a potência de self-seeding foi mantida em -27 dBm/0,2 nm.

Neste teste, a potência lançada na fibra no sentido *downstream* foi mantida em 0,0 dBm para reduzir o impacto do retroespalhamento Rayleigh, e adicionalmente mitigar os efeitos não lineares como espalhamento Raman e espalhamento Brillouin na transmissão *downstream*. Desta forma, o tempo de simulação no cenário bidirecional foi

reduzido, pois no simulador tem-se a opção de não incluir no modelo da fibra bidirecional os efeitos não lineares.

Figura 4.22 Comparação entre os diagramas de olho da simulação (a) e experimento (b) do sinal *upstream*.

A **Fig. 4.22-a** mostra o diagrama de olho obtido pela simulação, e a **Fig. 4.22-b** ilustra o diagrama de olho obtido através do experimento, para três valores de potência de injeção no RSOA da ONT. Nota-se uma degradação no diagrama de olho com a diminuição da potência de injeção no RSOA da ONT, tanto para o resultado experimental, quanto para o resultado de simulação. Isto ocorre porque, com o aumento da potência injetada no RSOA, o dispositivo opera em região mais saturada da curva de ganho e, portanto, ocorre uma maior supressão do ruído.

A **Fig. 4.23** mostra as curvas de BER *upstream* do experimento e a da simulação para $ER_D = 3,5$ dB. A razão de extinção *upstream* foi mantida em 11 dB como realizado em [84]. Na **Fig. 4.23** nota-se que tanto para o patamar de FEC, quanto para o patamar considerado livre de erros, a diferença entre a curva de BER experimental e a curva de BER da simulação é de aproximadamente 0,1 dB.

Neste contexto, considera-se que a palheta de simulação configurada no OptiSystem, é capaz de reproduzir de forma coerente os resultados experimentais para ambos os sentidos de transmissão de forma satisfatória. A pequena diferença observada entre as curvas geradas pelo simulador e as curvas de BER obtidas pela referência [84], foi possível graças à informação detalhada dos elementos que compõem a rede e das medições de potência óptica realizada nos pontos cruciais da rede relatados em [84]. Desta forma, os resultados obtidos por meio das avaliações realizadas para topologia

proposta neste trabalho, devem estar dentro da margem aceitável em comparação com validações experimentais a serem futuramente realizadas.

Figura 4.23 Avaliação de desempenho de BER *upstream* para uma razão de extinção *downstream* de 3,5 dB e potência de *self-seeding* fixado em -27 dBm/0,2 nm..

Com estes resultados de calibração, conclui-se a etapa de validação da palheta de modulação de *self-seeding*. Na próxima seção são apresentados os resultados da avaliação da topologia proposta conduzida no ambiente de simulação.

4.4 Avaliação da Topologia Proposta

Após a validação realizada na **Seção 4.3.2**, o próximo passo consiste em configurar o esquema proposto no ambiente de simulação. Nesta etapa, os RSOAs da OLT foram alimentados com uma corrente de polarização de 90 mA, o que resulta em uma potência de saturação de aproximadamente 6 dBm. Como ilustrado no esquemático da **Fig. 4.24**, o RSOA Tx responsável pela transmissão dos dados no sentido *downstream* é modulado em intensidade com pulsos no formato NRZ, com sequências pseudo-aleatórias de bits de comprimentos iguais a $2^{11}-1$. Já o RSOA Aux é apenas polarizado com corrente contínua.

Na configuração ilustrada pela **Fig. 4.24**, pode-se monitorar os principais parâmetros da topologia proposta. Nos pontos A e B, monitorou-se o sinal modulado no

domínio do tempo, estado de polarização, espectro do sinal e nível de potência óptica. Nos pontos C, D e E, avaliou-se o sinal modulado no tempo e na frequência, medindo-se também a potência do sinal nestes pontos. No ponto E, é colocado um atenuador variável de potência óptica. Desta forma, é possível levantar as curvas de BER, diagramas de olho etc. cada ponto de monitoramento tem um propósito específico descrito abaixo:

- **Ponto A** – Sinal modulado no domínio do tempo, nível de potência da semente óptica de auto-alimentação (Pss), estado de polarização do sinal modulado e espectro do sinal *downstream*.
- **Ponto B** - Nível de potência injetado no RSOA Aux, estado de polarização após o primeiro apagamento óptico, espectro do sinal *downstream* do sinal no domínio do tempo.
- **Ponto C** - Nível de potência da semente óptica de auto-alimentação (Pss).
- **Ponto D** – Potência óptica lançada na fibra e medições de espectro óptico
- **Ponto E** - Diagramas de olho óptico, nível de razão de extinção óptico *downstream*, potência de injeção nos RSOAs da ONT.

Figura 4.24 Ilustração esquemática da topologia proposta configurada no OptiSystem.

Para o sentido *upstream* o ponto de monitoramento é na entrada do fotodetector PIN da OLT, é monitorada a razão de extinção dos sinais de subida, o sinal no domínio do tempo e da frequência e o nível de potência entregue ao detector.

4.4.1 Avaliação da dupla cavidade óptica

Figura 4.25 Estado de polarização do RSOA Tx e do RSOA Aux no primeiro período de recirculação.

Com a palheta montada no ambiente de simulação, a avaliação inicial foi então monitorar o funcionamento da dupla cavidade na OLT. Para tanto, foi monitorado inicialmente o estado de polarização dentro da cavidade externa.

A **Fig. 4.25** mostra o estado de polarização do RSOA Tx e do RSOA Aux medidos após o primeiro período de recirculação. Como pode ser observado na **Fig. 4.25** o estado de polarização do ruído ASE no primeiro período de recirculação é aleatório. Para o funcionamento do esquema proposto, como já mencionado anteriormente, é inserido na saída do RSOA Tx e RSOA Aux um controlador de polarização. Desta forma, alinha-se o estado de polarização dos RSOAs com os eixos ortogonais do PBS.

A **Fig. 4.26** mostra o estado de polarização dos RSOAs TX e Aux após a passagem pelo controlador de polarização. O estado de polarização do RSOA Tx foi mantido na polarização horizontal e o estado de polarização do RSOA auxiliar foi mantido na polarização vertical.

Figura 4.26 Estado de polarização dos RSOAs Aux e TX após a passagem pelo controlador de polarização.

Figura 4.27 Estado de polarização incidente no FRM e refletido pelo FRM.

Após a passagem pelo controlador de polarização, os sinais ópticos provenientes dos RSOAs Tx e Aux são então combinados pelo PBS. Após a passagem pelo PBS, pelo AWG da OLT e pelo o acoplador de potência, o sinal é refletido pelo FRM, e tem seu estado de polarização rotacionado em 90° , como mostrado na **Fig. 4.27**.

Com os resultados mostrados nas **Figs. 4.25, 4.26, e 4.27**, conclui-se que o circuito de manutenção do estado de polarização na dupla cavidade, funcionou como o esperado. Como consequência disto, espera-se que o duplo apagamento óptico proposto por esta topologia ocorra de forma eficiente.

Desta forma, o próximo passo na análise do funcionamento do esquema proposto, é então verificar que os sinais provenientes do RSOA Tx, ou seja, os sinais com modulação incidem primeiro pelo RSOA Aux onde ocorrerá o primeiro apagamento óptico, antes de retornarem ao RSOA Tx para o segundo apagamento da portadora óptica e, posteriormente, a inserção de novos dados *downstream*, completando assim um período de recirculação.

Figura 4.28 Sinal óptico medido na saída do RSOA Aux após sofrer o primeiro apagamento óptico.

A **Fig. 4.28** mostra o sinal óptico no domínio do tempo medido no ponto **B**, ou seja, na saída do RSOA Aux e após sofrer o primeiro apagamento óptico. O sinal injetado no RSOA Aux, é modulado em intensidade com uma razão de extinção

downstream de 6,0 dB e a potência óptica de injeção no RSOA Aux após a estabilização dinâmica do self-seeding foi de -4,26 dBm. Nestas condições, como pode ser observado na **Fig. 4.28**, a supressão da portadora óptica não foi completa, resultando em um sinal óptico com uma razão de extinção residual de aproximadamente 0,4 dB.

Após o sinal óptico sofrer seu primeiro apagamento, o sinal é direcionado à porta do PBS com filtro de polarização vertical, emerge na porta comum do PBS, é direcionado a um dos braços do AWG, passa pelo acoplador de potência conectado a porta comum do AWG da OLT, é refletido pelo FRM com o estado de polarização horizontal, após a passagem novamente pelo PBS e retorna ao RSOA Tx, onde a portadora óptica é completamente apagada para inserção de novos dados de decida.

A potência de injeção monitorada na entrada do RSOA Tx após a estabilização do processo foi de - 5,08 dBm e potência de saída do RSOA Tx para uma razão de extinção de 6,0 dB foi de 7,51 dBm. O sinal óptico modulado em intensidade é mostrado na **Fig. 4.29**.

Figura 4.29 Sinal óptico no domínio do tempo monitorado na saída do RSOA Tx.

Observa-se que o sinal modulado em intensidade mostrado na **Fig. 4.29**, não possui os *overshoots* e *undershoots* observados no sinal óptico mostrado na **Fig. 4.13** provenientes da avaliação da topologia *self-seeding* de cavidade única. Desta forma,

espera-se que as avaliações de BER para o sentido *downstream* tenham um desempenho melhor para a mesma razão de extinção.

Neste contexto, tendo verificado o funcionamento da dupla cavidade óptica no ambiente de simulação, a próxima seção apresenta os resultados obtidos das avaliações de BER realizadas para o sentido *downstream*, para distâncias de 20 km.

4.4.2 Avaliação *Downstream* para distâncias de 20 km

As comparações são feitas entre a topologia proposta neste trabalho e a topologia combinada proposta em [84]. Inicialmente, é feito uma comparação entre as curvas de BER para uma razão de extinção de 4,0 dB e 5,0 dB. Nesta avaliação, o nível de isolamento do PBS foi mantido em 45 dB, ou seja, a perda de inserção para um sinal com polarização horizontal sofre ao ser inserido na porta do PBS com eixo vertical ou vice e versa.

Figura 4.30 Avaliação de BER *downstream* para ER_D=4,0 dB da topologia combinada e topologia proposta.

Na topologia proposta, o valor de potência de auto-alimentação no primeiro período de recirculação foi de -27 dBm/0,2nm e o valor de potência de injeção no RSOA Tx após a estabilização do processo de auto-alimentação é de -5,9 dBm. A

potência óptica integrada lançada na fibra alimentadora após a passagem do filtro de polarização horizontal foi de -12 dBm.

Nestas condições, a **Fig. 4.30** mostra a avaliação de BER *downstream* para topologia *self-seeding* com cavidade única e a topologia proposta com dupla cavidade. Para o valor de razão de extinção de 4,0 dB, pode-se observar um ganho da topologia proposta em relação a topologia de auto-alimentação de 0,6 dB para o patamar livre de erros de 10^{-12} e para o patamar de FEC de 10^{-4} .

Figura 4.31 Avaliação de BER *downstream* para $ER_D=5,0$ dB da topologia combinada e topologia proposta.

A **Fig. 4.31** mostra a avaliação de BER *downstream* obtida pela simulação da topologia de auto-alimentação, e da topologia com dupla polarização para uma razão de extinção *downstream* de 5,0 dB. Neste caso, a potência de injeção no RSOA Tx após a estabilização do processo de auto-alimentação foi de -5,6 dBm e a potência do sinal óptico após a passagem pelo filtro de polarização horizontal, ou seja, a potência lançada na fibra, foi de -11 dBm. Para este cenário, observa-se um ganho de aproximadamente 0,8 dB em relação a topologia de auto-alimentação de cavidade única realizada na OLT.

O próximo procedimento consiste na avaliação de BER *downstream* em função da razão de extinção dos sinais de descendentes. O objetivo é definir os níveis de razão de extinção *downstream* que ainda produzem valores de BER inferiores a 10^{-4} [94-96].

Para sinais gerados pelo processo de auto-alimentação, à medida que a ER_D diminui, o processo de supressão da portadora torna-se mais eficiente, devido ao RSOA operar em modo de saturação.

Figura 4.32 Avaliação dos sinais *downstream* em funções dos níveis do ER_D . A potência de autoalimentação é de -27 dBm/0,2nm e a razão de extinção do PBS foi de 45 dB.

Para os sinais *downstream* gerados pelo esquema de auto-alimentação de cavidade única, foi observada a presença de *floor* para valores de razão de extinção de 6,5 dB e 3,0 dB. Para os sinais gerados pelo esquema proposto, foram observados patamares de ruído para razão de extinção *downstream* de 3,5 dB e valor de razão de extinção máxima de 10,5 dB sem a presença de *floor*. O valor máximo de razão de extinção da topologia proposta foi superior ao da topologia de cavidade única, devido ao processo de duplo apagamento óptico, porém, o valor mínimo de razão de extinção sem a presença de *floor* para valores de BER de 10^{-12} foi superior ao esquema de auto-alimentação de cavidade única, devido ao acréscimo de ruído ASE proveniente de um segundo RSOA inserido na cavidade externa, o que aumenta o ruído de intensidade, devido ao batimento ASE-ASE.

Estes resultados da avaliação da topologia em função da razão de extinção *downstream* encontram-se na **Fig. 4.32**. Para esta análise, manteve-se a razão de

extinção do PBS e do filtro de polarização horizontal em 45 dB a potência de auto-alimentação foi mantida em -27 dBm/0,2nm.

Figura 4.33 Diagramas de olho para os sinais *downstream* em função do nível de razão de extinção.

Na **Fig. 4.33** pode-se constatar que a abertura do diagrama de olho diminui com a diminuição do valor da razão de extinção dos sinais de descendentes, dificultando a correta recepção dos dados, devido à imprecisão no limiar de decisão do receptor da ONT. Para o patamar de BER considerado livre de erros (10^{-12}), tem-se o valor mínimo de razão de extinção de 4,0 dB conforme mostrado na **Fig. 4.32** e, para o patamar de 10^{-4} , tem-se o valor mínimo de 3,5 dB.

O próximo passo consiste na avaliação dos sinais *downstream*, variando-se o nível de isolamento do PBS e do filtro de polarização horizontal. O objetivo é determinar a influência da isolamento do PBS nas avaliações de BER para os sinais *downstream* com os patamares de 10^{-4} e 10^{-12} . Valores típicos de razão de extinção de PBSs comerciais estão na ordem de 25 dB. Neste trabalho considera-se ideal um PBS com isolamento superior à 45 dB.

Avaliação dos sinais Downstream em função da isolamento do PBS

Na **Fig. 4.34** tem-se a avaliação dos sinais *downstream* para um valor de razão de extinção de 7,0 dB. Valores de extinção maiores são menos sensíveis a variação do nível de isolamento do PBS, devido à faixa menos restritiva de limiar de decisão. Na **Fig. 4.34** nota-se uma diferença ínfima entre as curvas de BER para razão de extinção do

PBS de 35 e 45 dB. Para ER_{PBS} de 25 dB nota-se uma penalidade de 0,8 dB para o patamar de BER de 10^{-12} . No entanto para o patamar de 10^{-4} não houve penalidade.

Figura 4.34 Avaliação de BER *downstream* para um $ER_D = 7,0$ dB variando ER_{PBS} .

Na **Fig. 4.35** tem-se as curvas de BER para os sinais *downstream*, para os valores de razão de extinção de 4,0, 5,0 e 7,0 dB, variando-se o nível de isolamento do PBS entre os valores de 25, 35, 45 dB. Para o valor de ER_D de 4,0 dB é observado uma variação máxima de 0,4 dB para uma BER de 10^{-12} , compreende-se entre as curvas de BER geradas pela variação da razão de extinção do PBS. Para o valor de ER_D de 5,0 dB é observado uma variação de 0,7 dB para uma BER de 10^{-12} e de 0,4 dB para uma BER de 10^{-4} .

No esquema de cavidade com dupla polarização proposto neste trabalho o nível de isolamento do PBS é determinante para o desempenho da topologia, devido ao fato de que níveis de ER_{PBS} muito baixos permitem uma maior interferência entre os sinais provenientes do RSOA Tx e do RSOA Aux na dupla cavidade, portanto uma penalidade em potência para patamar de BER considerado livre de erros. Contudo, verifica-se que para estes valores de isolamento do PBS empregados nesta análise, o esquema proposto neste trabalho pode ser considerado robusto quanto a variação da isolamento do PBS.

Figura 4.35 Avaliação de BER *downstream* para valores de razão de extinção de 4,0, 5,0 e 7,0 dB e para valores de isolamento do PBS de 25, 35 e 45 dB.

4.4.3 Avaliação *Upstream* para distâncias de 20 km

A potência de saturação dos RSOAs utilizados é da ordem de 6 dBm, sendo maior parte desta potência destinada ao processo de auto-alimentação a potência lançada na fibra foi da ordem de -11 dBm. Desta forma, o sentido de transmissão *upstream* foi penalizado, pois devido às perdas de potência provenientes da fibra óptica, perda inserção do AWG da ONT e do acoplador óptico da ONT a potência de injeção no RSOA da ONT máxima monitorada na simulação foi de aproximadamente -22 dBm valor este fora da região mais saturada do dispositivo semiconductor e, portanto, não dificultando o apagamento completo da portadora óptica, gerando ruídos de intensidade de remodulação.

Apesar do valor de potência de injeção disponível para o RSOA da ONT estar na região linear de ganho dos RSOAs como demonstrado na **Seção 4.2.1**, para o caso ideal de remodulação, ou seja para uma ER_D igual a 0,0 dB, o RSOA da ONT capaz de produzir valores de BER inferiores a 10^{-12} .

Neste contexto, é feita uma análise para os sinais *upstream* provenientes da remodulação dos sinais *downstream* da topologia proposta. A avaliação é feita com

intuito de identificar de valores BER menores que 10^{-4} . Desta forma, os sinais de subida podem ser recuperados com auxílio de recurso de FEC na OLT.

Figura 4.36 Avaliação do desempenho de BER *upstream* para uma distância de 20 km em função do valor de razão de extinção downstream (ER_D).

A **Fig. 4.36** mostra as curvas de BER *upstream* em função da razão de extinção *downstream*. Para esta análise, a potência de injeção no RSOA da OLT foi mantida em -27 dBm/0,2nm e a razão de extinção *upstream* foi fixada em 11 dB.

Para uma razão de extinção *downstream* de 0,0 dB tem-se uma BER de 10^{-12} para uma sensibilidade de -27 dBm, aproximadamente o mesmo valor de potência registrado para a cavidade única nestas condições. Como pode ser observado na **Fig. 4.36** para ER_D igual a 3,0 dB tem-se um *floor* de BER em 10^{-5} .

Neste contexto, para um melhor desempenho dos sinais *upstream* é necessário o uso de RSOAs com potência de saturação e ganho maiores dos que aqueles utilizados neste trabalho. Desta forma, garante-se que os RSOAs da ONT opere na região de saturação do dispositivo semiconductor, possibilitando uma supressão da portadora óptica de forma mais eficiente.

A **Fig. 4.37** ilustra os diagramas de olho dos sinais *upstream* em função de alguns valores de razão de extinção *downstream*. Nota-se um fechamento do olho com o aumento da ER_D . Observa-se que à medida que o nível de razão de extinção aumenta, o nível de distorção no topo do diagrama de olho aumenta, ou seja, aumenta a distorção para os bits '1'. Além disso, observa-se também um estreitamento da abertura vertical do olho, dificultando a correta detecção dos sinais *upstream*. Isto se deve ao fato de a potência de injeção no RSOA da ONT não estar em uma região de saturação (P_{inj} maiores que -13 dBm, ver **Fig. 4.8**) do dispositivo, e portanto, não permitir uma supressão completa da portadora óptica para níveis de razão de extinção maiores.

Figura 4.37 Diagrama de olho para os sinais *upstream* em função de alguns valores de ER_D .

4.4.4 Avaliação *Downstream* em função do alcance da rede

Um dos principais objetivos de redes ópticas passivas é a capacidade de oferecer um maior alcance de cobertura possível, sem utilizar quaisquer elementos na rede de amplificação e/ou compensação de dispersão cromática. Desta forma, mantêm-se a rede com o nível de complexidade físico e de custos de implementação e operação baixos.

O último procedimento realizado neste trabalho foi verificar os limites da rede em função do alcance da rede. Neste procedimento, não foi utilizada compensação para reduzir os efeitos limitantes da dispersão cromática na fibra.

O objetivo deste procedimento consiste em determinar o alcance máximo da rede que ainda seja capaz de produzir valores de BER de 10^{-4} . Desta forma, uma comparação entre a topologia de cavidade única e a topologia de cavidade dupla proposta é realizada.

Figura 4.38 Avaliação de BER para o sentido *downstream* para distâncias de até 140 km . (a) topologia de auto-alimentação de cavidade única, (b) topologia de auto-alimentação de cavidade dupla.

Nesta avaliação, a potência óptica de auto-alimentação foi mantida em -27 dBm/0,2nm e o comprimento de onda do canal utilizado foi de 1550,91 nm com uma largura de linha de aproximadamente 0,06 nm. Para este teste, os sinais *downstream* auto-alimentados foram gerados a partir de 200 períodos de recirculação, tanto para cavidade única, quanto para cavidade dupla. Utilizou-se um AWG da OLT com perfil de filtro gaussiano de quarta ordem, com uma largura de banda passante de 0,6 nm. Para geração das curvas de BER, um atenuador variável foi inserido após a fibra

distribuidora na entrada do fotodetector PIN. A razão de extinção dos sinais *downstream* foi de 6,0 dB.

A **Fig. 4.38-a** mostra as curvas BER dentro do limite de FEC e da condição livre de erros, desde condição BtB (*Back-to-Back*- BtB) até a distância de 120 km, para topologia com cavidade única. A **Fig. 4.38-b** mostra as curvas de BER desde a condição BtB até a distância de 140 km para topologia proposta. A **Fig. 4.38-b** mostra as curvas obtidas pela simulação da topologia proposta, onde foi detectada a presença de *floor* (BER de 10^{-11}) para distância 80 km. No entanto, para os sinais auto-alimentados provenientes do esquema de cavidade única (**Fig.4.38-a**), foi observada a presença de *floor* para distâncias a partir de 60 km.

Figura 4.39 Diagramas de olho para o esquema de auto-alimentação de cavidade única e cavidade dupla, para as distâncias de 20, 40, 60 e 80 km.

Para distância de 40 km o esquema proposto apresentou uma penalidade de 1,1 dB, enquanto que a topologia de auto-alimentação de cavidade única, apresentou uma penalidade em potência de aproximadamente 2,0 dB para o mesmo patamar de BER de 10^{-12} .

Os diagramas de olho obtidos a partir da simulação para as distâncias de 20, 40, 60 e 80 km, estão mostrados na **Fig. 4.39**. Nota-se o efeito da dispersão cromática na degradação do diagrama de olho com o aumento do comprimento da fibra.

As medições de penalidade em potência estão ilustradas na **Fig. 4.40**, para uma BER de 10^{-7} cobrindo distâncias de até 90 km. Observa-se que a topologia proposta neste trabalho obteve um desempenho melhor em relação à topologia de cavidade única para as mesmas distâncias de cobertura. Adicionalmente, foi possível alcançar uma distância de cobertura de até 140 km dentro do limite de FEC de 10^{-4} .

Figura 4.40 Análise comparativa entre o esquema de auto-alimentação de cavidade única e o esquema de cavidade dupla.

A avaliação de BER para o sentido de transmissão *upstream* não foi realizado para distâncias de cobertura maiores que 20 km, devido ao nível de potência de injeção disponível para o RSOA da ONT (-22 dBm), estar no limiar operacional para o cenário de remodulação. Em caso de utilização de RSOAs com maior potência de saturação como os reportados em [91-93], esta topologia pode apresentar valores de BER inferiores a 10^{-12} para transmissão bidirecional, como os relatados em [84].

4.5 Considerações finais

Neste capítulo, foi apresentado detalhadamente o esquema de auto-alimentação com dupla cavidade externa, o que possibilita um duplo apagamento óptico, almejando projetos de redes WDM-PON de curto alcance.

Inicialmente foi feita a validação da palheta montada no ambiente de simulação com os resultados experimentais obtidos de [84] para os sentidos *downstream* e *upstream*. A validação foi conduzida em relação a diversos parâmetros, tais como potência de auto-alimentação, razão de extinção *downstream*, diagramas de olho,

potência de injeção *upstream*, espectros, sinal óptico no domínio do tempo e desempenho em relação a BER.

De posse da validação dos elementos configurados no ambiente de simulação em relação ao experimento, foi feita uma comparação em termos de desempenho com a topologia de auto-alimentação de cavidade única em relação aos sinais ópticos de decida no domínio do tempo, razão de extinção *downstream*, espectro, razão de extinção *upstream* e taxa de erro de bits para coberturas de 20 km. Uma análise da influência da razão de extinção do PBS na dupla cavidade externa foi também conduzida neste capítulo.

Para transmissão bidirecional simultânea, existe um compromisso entre a razão de extinção *downstream* e o desempenho para o sentido de transmissão *upstream*. Para o esquema de auto-alimentação, a topologia combinada apresenta *floor* para uma razão de extinção de 7,0 dB, enquanto que a topologia proposta, devido ao esquema de duplo apagamento, obteve uma razão de extinção máxima de 10,5 dB sem a presença de *floor* (para uma potência de injeção de -5 dBm após a estabilização do *self-seeding*). Desta forma, a topologia proposta torna-se mais robusta para este sentido de transmissão, pois permite que sinais possam ser modulados com valores maiores de razão de extinção frente a topologia combinada, facilitando desta forma a detecção na ONT.

Por outro lado, para os sinais de subida, devido ao ruído de remodulação da portadora óptica, valores maiores de razão de extinção *upstream* são requeridos para este sentido de transmissão. Portanto para os sinais de subida utilizou-se um valor de razão de extinção de 11 dB em concordância com [16, 83-84].

Ainda para o sentido de transmissão *upstream*, valores altos de razão de extinção *downstream* dificultam o apagamento óptico da portadora, penalizando este sentido de transmissão. Com base nas avaliações conduzidas neste capítulo, para os RSOAs utilizados para investigação da topologia proposta no cenário de transmissão bidirecional, o valor ótimo ER_D , para que ambos os sentidos de transmissão produzam níveis de BER dentro do limite FEC, é de 3,5 dB (para uma rede de 20 km).

Para alcançar nível ótimo de razão de extinção *downstream* que produzam valores de BER inferiores a 10^{-12} em ambos os sentidos, é necessário à utilização de RSOAs com característica de ganho e potência melhores que os utilizados neste trabalho, como por exemplo, os reportados em [91-93]. Nestas condições, as investigações conduzidas nesta dissertação servem como prova de conceito para topologia proposta.

Finalmente, os limites da topologia proposta foram testados em termos de alcance da rede para o sentido de transmissão *downstream*. Os resultados obtidos foram comparados com os da topologia combinada.

De modo geral, a topologia de dupla cavidade óptica e duplo apagamento óptico, obteve um melhor desempenho em relação à topologia de cavidade única para o sentido de transmissão *downstream* para valores de razão de extinção superiores a 4,0 dB. Adicionalmente, a topologia proposta obteve um alcance de rede superior ao da topologia de cavidade única para o sentido de transmissão *downstream*, além de sofrer uma menor penalidade em potência com o aumento do comprimento da fibra. No entanto, devido à potência de saturação modesta dos RSOAs utilizados neste trabalho, o sentido de transmissão *upstream* é prejudicado devido ao orçamento de potência óptica permitir que a potência máxima de injeção disponível para o RSOA da ONT seja de aproximadamente -22 dBm, valor este, fora da região de saturação do dispositivo, o que conseqüentemente impacta negativamente no desempenho para este sentido de transmissão.

5. Conclusões

Nesta dissertação, foi investigada uma nova topologia rede WDM-PON, empregando auto-alimentação na OLT e reuso de comprimento de onda na ONT. Inicialmente, foi realizada uma revisão bibliográfica de redes de acesso, dando enfoque às redes de acesso WDM-PON. Dentre as redes de WDM-PON, topologias que empregam auto-alimentação e remodulação com o uso de RSOAs foram estudadas detalhadamente, bem como topologias que empregam circuitos de manutenção do estado de polarização no laser de cavidade externa.

A partir da revisão bibliográfica inicial, foi possível identificar as limitações das topologias WDM no estado da arte. Muito dos fatores identificados, que limitam o alcance e a capacidade de redes que empreguem auto-alimentação estão ligados a eficiência do apagamento óptico no circuito de recirculação óptica da técnica auto-alimentação. Ademais, questões ligadas à manutenção do estado de polarização na cavidade têm sido estudadas recentemente na literatura, sendo demonstrado o impacto negativo da não manutenção do estado de polarização na cavidade externa de tais topologias.

Neste cenário, a topologia deste projeto, propôs um circuito de auto-alimentação localizado na OLT, em que se utiliza um segundo RSOA sem modulação de dados, funcionando como um reforço óptico no apagamento dos dados *downstream* no processo de remodulação. Além do duplo apagamento óptico proporcionado pela topologia proposta, tem-se também uma manutenção do estado de polarização na cavidade, manutenção esta proporcionada pela inserção de um PBS e HWP no circuito de recirculação. O controle no estado de polarização é essencial quando se utiliza RSOAs com características de alta dependência da polarização, garantindo assim uma estabilidade no processo de auto-alimentação.

Estas duas principais melhorias advindas da topologia proposta impactam diretamente no desempenho sistêmico da rede, devido à diminuição do ruído de remodulação na semente óptica enviada ao transmissor *upstream*.

Adicionalmente, os resultados obtidos neste trabalho são comparados com os resultados da simulação da topologia proposta em [84]. Devido às características modestas dos RSOAs utilizadas na topologia, foi necessário um reforço na potência de saída por meio da inserção de um amplificador EDFA. Na topologia estudada neste trabalho, devido ao circuito de duplo apagamento óptico, não foi necessária a utilização

de um amplificador na cavidade externa. Desta forma, além da qualidade do sinal enviada para a remodulação ter sido melhorada pelo esquema de duplo apagamento óptico, adicionalmente, obteve-se um ganho sistêmico na rede em termos de custos de implementação e operação, pois substitui-se um amplificador EDFA por um RSOA, cujo preço gira em torno de um vigésimo de um EDFA.

O funcionamento da topologia proposta foi detalhado neste trabalho, ressaltando-se o funcionamento do esquema de duplo apagamento e o estado de polarização da portadora óptica dentro da cavidade externa.

Em seguida, foi realizada a validação da topologia proposta no ambiente de simulação OptiSystem 13.0 (**Apêndice B**). Para este propósito, as características dos elementos da topologia estudada por Duarte *et al* [84] foram utilizadas para configuração dos elementos da rede no ambiente de simulação. Posteriormente, foi realizada a calibração da topologia pelo ajuste das curvas de BER produzidas pela avaliação no simulador em relação às relatadas em [84].

De posse da validação realizada, iniciou-se a avaliação da topologia proposta, para taxa de transmissão de 1,25 Gbps modulando diretamente o RSOA com pulsos no formato NRZ em redes com alcance de 20 km. A topologia proposta de cavidade dupla foi comparada com a topologia de cavidade única [84], em termos de diagramas de olho, sinais no domínio do tempo, espectro e taxa de erro de bits.

De acordo com os resultados relatados para o sentido de transmissão *downstream*, obteve-se um ganho de 0,6 dB em relação à topologia combinada para uma razão de extinção de 4,0 dB e um ganho de aproximadamente 0,8 dB para uma razão de extinção de 5,0 dB, sendo estes valores de razão de extinção valores típicos para o esquema de auto-alimentação [57-64]. Para o sentido de transmissão *upstream* a topologia proposta obteve valores de BER inferiores ao limite de FEC de 10^{-4} , para valores de razão de extinção *downstream* inferiores a 4,0 dB.

Na ausência de qualquer compensação para o efeito de dispersão cromática, foi realizada uma investigação dos limites do alcance da rede para sentido *downstream* e comparados com a topologia combinada. Para este teste, foram utilizados sinais *downstream* com razão de extinção de 6,0 dB e taxa de transmissão de 1,25 Gbps. Com uma penalidade de apenas 2,0 dB, a topologia proposta alcançou uma coberturas de 60 km, para um patamar de BER de 10^{-12} . Em contraste, a topologia combinada para este mesmo patamar de BER, alcançou a distância máxima de 40 km. Desta forma, obteve-se um ganho sistêmico de 20 km frente à topologia combinada de cavidade única.

Dentro do limite de FEC de BER de 10^{-4} o esquema proposto alcançou uma distância máxima de 140 km enquanto que, para a topologia combinada foi registrado um alcance máximo de 120 km. Neste caso, novamente, obteve-se um ganho de 20 km para topologia proposta frente à topologia combinada.

Finalmente foi verificado que para distâncias de 20 a 90 km a topologia proposta obteve uma menor penalidade em potência frente a topologia combinada.

Em suma as vantagens da topologia proposta são:

1. Permite o uso do mesmo comprimento de onda para os sinais *downstream* e *upstream* em uma topologia bidirecional;
2. Utiliza o esquema de remodulação para o ONT;
3. Reduz o impacto do efeito de remodulação;
4. Reduz o nível de retroespalhamento Rayleigh e reflexões de Fresnel;
5. Aumento do desempenho de transmissão da cavidade de auto-alimentação no OLT por meio do duplo apagamento óptico;
6. Substituição de um EDFA na cavidade externa por um RSOA melhorando a relação custo-benefício frente a topologia combinada;
7. Aumento no alcance da rede para o sentido *downstream* frente a topologia combinada;

Ressalta-se que as vantagens citadas acima permitem que se possa utilizar RSOAs com características mais modestas, impactando a relação custo-benefício da rede, condição fundamental para impulsionar o uso de redes de acesso óptico WDM.

Como trabalhos futuros para esta topologia, a investigação no ambiente de simulação com o uso de RSOAs com maior potência de saturação e maior ganho permitira que a topologia tenha um desempenho melhor tanto para o cenário de remodulação quanto para o de auto-alimentação. Adicionalmente, a investigação da topologia, para valores de taxa de transmissão de 5 e 10 Gb/s para ambos os sentidos de transmissão, bem como uma avaliação dos limites da rede para o sentido de transmissão *upstream* e *downstream*.

Também como trabalho futuro, a investigação de um esquema em que se aproveite a semente CW com polarização vertical gerada pelo RSOA Aux, como semente óptica para os sinais *upstream*. Desta forma, tem-se um ganho sistêmico na rede, pois a portadora óptica que seria eliminada pelo filtro de polarização horizontal servira como semente óptica para o cenário de remodulação da ONT. Adicionalmente, reduz-se o ruído de remodulação, já que a semente não está modulada. Neste cenário,

avaliações quanto ao impacto da dispersão cromática, birrefringência e PMD serão conduzidas.

Apêndice A - Característica operacionais dos elementos da rede

A.1. Parâmetros dos elementos que compões a topologia

As tabelas contendo os principais parâmetros dos elementos utilizados na análise desta topologia serão apresentadas nesta seção. Os parâmetros dos elementos passivos, foram configurados no software OptiSystem 13.0, em concordância com os elementos passivos utilizados na referencia [16, 83-84].

Os principais elementos que compões a topologia self-seeding analisada nesta etapa do projeto são:

1. RSOA
2. AWG
3. Acoplador de potência
4. Circulador óptico
5. FRM
6. Fotodetector PIN

RSOA

Tabela A.1- Características configuradas no software OptiSystem para o RSOA utilizado na topologia self-seeding.

Características	Valores configurados
Ganho do material	Lorentiziano
Ganho óptico para baixos sinais ($I = 90$ ma)	20 dB
Frequência central ruído ASE	1545 nm
Largura de banda do ruído ASE	30 nm
Coeficiente de confinamento óptico	0.40
Temperatura de operação	300K
Potência óptica de saturação	6 dBm
Refletividade da face frontal	$5 \cdot 10^{-5}$
Refletividade da face traseira	0,99

AWG 8 canais**Tabela A.2-** Características configuradas no software OptiSystem para o AWG com 8 canais utilizado na topologia self-seeding.

Características	Valores configurados
Comprimento de onda de operação	#
Perda de inserção	5.5
Espaçamento intercanais	100 GHz
Banda passante à 3 dB de perda	0,55 nm
Perda de retorno óptica	65dB
Tipo do filtro	Gausiano
Ordem do filtro	2

Acoplador de Potência**Tabela A.3-** Características configuradas no software OptiSystem para o acoplador de potência utilizado na topologia self-seeding.

Características	Valores configurados
Comprimento de onda de operação	1550 nm
Perda de inserção 10/90	11.3/0.65 dB
Deslocamento de fase	0 graus
configuração	10/90
Perda de retorno óptica	65 dB

Circulador óptico**Tabela A.4-** Características configuradas no software OptiSystem para o circulador óptico utilizado na topologia self-seeding.

Características	Valores configurados
Comprimento de onda de operação	1550nm
Perda de inserção	0.8 dB
Isolação	40 dB
Perda de retorno óptica	65 dB

Faraday Rotator Mirror – FRM

Tabela A.5- Características configuradas no software OptiSystem para o FRM utilizado na topologia self-seeding.

Características	Valores configurados
Comprimento de onda de operação	1550nm
Perda de inserção	0.5 dB
Deslocamento de fase	90 graus
Refletividade	99%
Perda de retorno óptica	65 dB

Fotodetector PIN

Tabela A.6- Características configuradas no software OptiSystem para o fotodetector PIN utilizado na topologia self-seeding.

Características	Valores configurados
Responsividade	0,65 A/W
Corrente de escuro	10 nA
Densidade de potência térmica	10^{-22} W/ Hz
Largura de banda efetiva de ruído	1 GHz
Largura de banda de modulação	2 GHz

A.2. Caracterizações ópticas do RSOA

Inicialmente, foi feito o estudo do modelo numérico do bloco RSOA do OptiSystem, que é baseado nas referências [97-98]. Com uma análise das equações de taxa e ganho do RSOA, foi então possível alterar os parâmetros de ganho para que o bloco RSOA obtivesse a resposta esperada de ganho óptico e potência de saturação.

Com os ajustes dos parâmetros do RSOA, foi possível obter o espectro ASE como ilustrado na **Fig. A.1**, o ruído ASE possui uma banda de 30 nm e frequência central de 1545 nm. O perfil de ganho obtido, as frequências extremas da banda diferem em aproximadamente 3 dB do ganho obtido pela frequência central.

Figura A.1- Espectro de ASE do bloco RSOA

Figura A.2- Ilustração esquemática da paleta montada no Software OptiSystem para investigação do ganho.

A **Fig. A.2** mostra uma ilustração esquemática da paleta configurada no OptiSystem 13.0, utilizado para medições de ganho do RSOA. Utilizou-se uma fonte óptica CW, com o comprimento de onda centrado em 1545 nm, sendo este também o pico de maior ganho do RSOA previamente configurado. A fonte óptica CW, foi configurada modo *sweep* onde é possível variar a potência óptica do sinal em passos.

A potência de saída do RSOA é medida com o auxílio do bloco *Power Meter*. Para esta simulação o AWG configurado não insere perdas no sinal. Portanto, o cálculo do ganho foi feito mediante a diferença entre a potência de saída da fonte óptica e a potência lida no bloco medidor de potência. Utilizando esse *test-bed* foi possível investigar o comportamento do ganho óptico do RSOA em relação à potência de injeção, comprimento de onda e corrente de polarização.

Ganho em função da corrente contínua

Para caracterização do ganho em função da corrente, o comprimento de onda foi fixado em 1545 nm pelo braço do AWG. Esta caracterização foi realizada para três valores de P_{inj} : -10 dBm, -15 dBm e -20 dBm, variando-se o nível de corrente de polarização DC no RSOA.

Figura A.3- Curvas de ganho em função da corrente contínua para diversos valores de P_{inj} .

Foi fixado o nível de P_{inj} , variou-se o valor de nível de corrente contínua aplicado aos terminais do RSOA, com o bloco *Power Meter* registou-se a potência de saída no OSA. Calcula-se o ganho óptico que é a diferença entre a potência injetada e a potência de saída do RSOA. A **Fig. A.3** mostra as curvas de ganho óptico em função da corrente de polarização para valores fixos de potência de injeção.

Para os valores de potência de injeção avaliados, nota-se, que para valores de corrente superior a 120 mA, o ganho óptico do RSOA está na região de saturação de ganho. O limiar de operação desses dispositivos está ligeiramente abaixo de 50 mA. É possível atingir um ganho óptico próximo a 20 dB em regime de pequenos sinais com potência de injeção de -20 dBm.

Ganho em função da potência de injeção

Novamente, o comprimento de onda de operação foi mantido em 1545 nm. Esta caracterização foi realizada para três níveis de corrente de polarização DC: 60, 80 e 100 mA. A caracterização foi feita para valores de P_{inj} de -10 dBm a -20 dBm dentro da faixa de operação de potência de injeção para maioria dos sistemas WDM-PON. O gráfico resumando estes resultados é mostrado na **Figura A.4**.

Figura A.4-Curvas de ganho em função da P_{inj} para três valores fixos de corrente de polarização.

Para determinar o ganho óptico em função do valor de nível DC, a potência de injeção no RSOA foi variada colocando-se a fonte de ASE em modo *sweep*. Registra-se os valores de potência de saída em função da potência de entrada e calcula-se o ganho. Nota-se que para estes valores de corrente contínua avaliados, o RSOA possui um comportamento linear de ganho óptico dentro da faixa de potência de injeção de -10 a -20 dBm. Sendo esta uma característica útil dos RSOAs para o cenário de auto-alimentação e remodulação.

Ganho óptico em função do comprimento de onda da banda C

A fim de se obter o perfil de ganho óptico do RSOA no plano de comprimentos de onda da banda C, duas simulações foram realizadas. A primeira medição do espectro de ganho óptico para três níveis de potência de injeção (-20 dBm, -15 dBm e -10 dBm) e um valor de corrente de polarização fixo em 100 mA, os resultados estão ilustrados na **Fig A.5**.

Figura A.5-Ganho óptico em função do comprimento de onda para alguns valores de potência de injeção, mantendo o valor de corrente contínua fixado em 100 mA.

O segundo teste foi do espectro de ganho óptico para quatro níveis de corrente de polarização (65 mA, 75 mA, 85 mA e 95 mA), com um valor de potência de injeção fixo em -15 dBm. Os resultados obtidos estão ilustrados nas **Fig. A.6**.

Nota-se que o perfil de ganho óptico RSOAs, varia em torno de 1 dB no máximo para banda de operação. Para valores de corrente de polarização de 95 mA, é possível obter um ganho de pelo menos 17 dB, na região entre 1530 e 1560 nm, para uma potência de injeção de -15 dBm, resultando em uma potência de saída de 2 dBm. Conclui-se a partir deste teste que os RSOA caracterizados, são capazes de oferecer uma alta potência óptica de saída e um espectro equalizado na banda C.

Figura A.6-Ganho óptico em função do comprimento de onda para quatro valores de corrente contínua, mantendo o fixando o valor da potência de injeção em -15 dBm.

Apêndice B - OptiSystem 13.0

O OptiSystem é uma ferramenta que permite aos usuários planejar, testar e simular diversos tipos de enlaces ópticos na camada física. Permite o projeto de sistemas de comunicação óptica, além de apresentar visualmente análises e cenários. O usuário pode também planejar os seus próprios blocos por meio da interação com Matlab ou fazer os seus blocos em C++. O software foi desenvolvido pela empresa canadense Optiwave e encontra-se na versão 14.0. A versão utilizada para esse trabalho foi a 13.0 de 64 bits.

O software possui uma janela de trabalho que é composta por três partes principais (**Figura B.1**). À esquerda, tem-se a *Component Library* responsável pela interface com os todos os componentes que poderão ser utilizados para o desenvolvimento de um projeto, inclusive os criados pelo usuário. Os componentes são divididos entre os *Default* e os componentes desenvolvidos pelo usuário. Dentro da classificação de componentes *Default*, o usuário pode escolher entre componentes que operam no domínio óptico ou elétrico. Na área central, encontra-se *Layout Project*, é nesta aba que o projeto é desenvolvido com os componentes disponíveis na *Component Library*. Na lateral direita está o *Layout Tools* com ferramentas para auxiliar o desenvolvimento (junção de componentes, zoom, tipos de visualização, junção automática etc.).

Além dos componentes principais, existem as abas *Report* e *Scripts*, que são exibidas na área central. O *Report* permite ao usuário a confecção de relatórios a partir do sistema montado no *Layout Project*, enquanto que a aba *Scripts* contém o script em linguagem *Visual Basic* que representa esse sistema. Dispondo dessas ferramentas é possível elaborar e analisar diversos tipos de topologias.

Neste trabalho foi utilizado o modelo de RSOA do OptiSystem que é baseado na solução numérica das equações diferenciais que descrevem a interação entre a densidade de portadores elétricos e a taxa de fótons ao longo da região ativa [87-88]. O usuário tem acesso aos parâmetros físico do semicondutor e aos termos das equações de taxa e de propagação do RSOA.

Para analisar o comportamento de um sistema conforme determinado parâmetro, o OptiSystem oferece o *sweep mode* (modo varredura). É definido o número de iterações para serem executadas para o parâmetro selecionado e o valor do parâmetro se altera a

cada iteração de varredura, o que produz uma série de resultados baseados em cada mudança.

Figura B.1-Janela de trabalho do OptiSystem.

Na topologia proposta, para simulação do funcionamento do RSOA é necessário também definir um número de interações nos parâmetros gerais do projeto, já que o sinal deve incidir no RSOA e ser refletido. Para tanto, é necessário no mínimo duas interações para que programa compute o código gerado para sinal incidente e mais uma para o sinal refletido, além da inserção de um *optical delay* (atraso óptico) para que o software possa computar também o sinal refletido pelo RSOA. Nas simulações foi estabelecido um número de interações na aba de parâmetros globais para que o self-seeding atinja a estabilidade dinâmica.

O software também faz distinção entre sinal e ruído, portanto foi necessário utilizar um bloco de processamento de sinais encontrado na biblioteca *Signal Processing Library* (biblioteca de processamento de sinal), para que o software computar o ruído ASE como sinal óptico. Caso contrário, o software não atribuiria ganho ao ASE e, portanto o esquema de auto-alimentação não seria possível.

REFERÊNCIAS

- [1] Andrews S. Tenenbaum, *Computer Networks*, 4ª edição, Prentice Hall, Vrije University, Amsterdam, 2003.
- [2] Recomendação IEEE 802.11, “Wireless LANs”, disponível em <http://standards.ieee.org/about/get/802/802.11.html>, acesso em 21/08/2016.
- [3] Recomendação IEEE 802.16, “Broadband Wireless Metropolitan Area Networks (MANs)”, disponível em <http://standards.ieee.org/about/get/802/802.16.html>, acesso em 21/08/2016.
- [4] Recomendação IEEE 802.16, “Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications--Amendment 4: Enhancements for Very High Throughput for Operation in Bands below 6 GHz” disponível em <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.11ac-2013.pdf>, acesso em 21/08/2016.
- [5] Tutorial: “Wi-Fi e WiMAX II: Conceitos do WiMAX” disponível em: http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialww2/pagina_2.asp acesso em 21/08/2016.
- [6] Tutorial “xDSL” disponível em: http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialdsl/pagina_4.asp acesso em 21/08/2016.
- [7] Recomendação ITU-T G.991.1 “High bit rate digital subscriber line (HDSL) transceivers” disponível em: <http://www.itu.int/itu-t/recommendations/rec.aspx?rec=4524> acesso em 21/08/2016.
- [8] Cisco System “Introduction to DSL Technology” disponível em: http://www.cisco.com/networkers/nw99_pres/203.pdf
- [9] S. Weinstein, Y. Luo, T. Wang, “The Comsoc Guide to Passive Optical Network: Enhancing The last Mile Access” New Jersey: IEEE Press, pp1-100 (2012).
- [10] Broadband optical access systems based on passive optical networks (BPON): General requirements, ITU-T G.983.1, (1998).
- [11] Gigabit-capable passive optical networks (G-PON): General requirements, ITUT G.984.1,(2003).
- [12] 10-Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): General requirements, ITU-T G.987.1, (2010).
- [13] 10-Gigabit capable symmetric passive optical network (XGS-PON): General requirements, ITU-T G.9870.1, (2016).
- [14] 40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): General requirements, ITU-T G.989.1, (2015).

- [15] Anatel Institucional indicadores acesso Banda larga disponível em <http://www.anatel.gov.br/institucional/index.php/component/content/article?id=1280> acesso em 02/08/2016.
- [16] U. R. Duarte, “*Técnica de Autoalimentação e Reuso de Comprimento de Onda Combinadas em Transmissores Refletivos para Redes WDM-PON*”, Tese de doutorado apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação – Escolha de Engenharia de São Carlos, USP Brazil, (2015).
- [17] T. Pfeiffer, “*Enhancing PON capabilities using the wavelength domain*”, Join ITU-T/IEEE Workshop on Next Generation Optical Access Systems, Geneva, Switzerland, (2008).
- [18] T. Muciacci, F. Gargano, V. M. N. Passaro, “*A TWDM-PON With Advanced Modulation Techniques and a Multi-Pump Raman Amplifier for Cost-Effective Migration to Future UDWDM-PONs*” Journal of Lightwave Technology Vol **33**, No 14, pp. 2986-2996, (2015).
- [19] J. Shi, X. Zhou, K. Ioung “*40 Gbps Double-sided Multiband OFDM-PON Based on Polarization Interleaving and Direct Detection*” The 12th International Conference on Optical Internet Proceedings, (2014).
- [20] C. Lei, M. Chen, H. Chen, S. Yang, and S. Xie, "A Colorless ONU Scheme for WDM-OFDM-PON with Symmetric Bitrate and Low-cost Direct-detection Receivers," in CLEO: 2015, OSA Technical Digest, Optical Society of America, paper **JTh2A.69**, (2015).
- [21] C. Guo, L. Dai; “*A Long reach IM/DD OFDM-PON using super-Nyquist image induced aliasing and code-division multiplexing*”, Optical Fiber Conference, OFC 2014, paper **Tu2F.3**, (2014).
- [22] Zhu Songlin ; ZTE Corp., Shanghai, China ; Guo Yong ; Yin Yongjia; “*ZTE’s perspective on applying OFDM-PON in next converged optical and wireless networks*” China Communications, Vol. **12**, No 4 pp. 50-57, (2015).
- [23] Y. Fei K. Shibao Wu ; F. Hu “*A Novel Survivable Scheme for OFDM-PON Based on Ring Topology*”, 2015 2nd International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE), annals, pp. 50-53, (2015).
- [24] Y. C. Chung ; “*High-speed coherent WDM PON for next-generation access network*” 2013 15th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), anais, pp. 1-4, (2013).
- [25] S. Straullu, S. Abrate, F. Forghieri, V. Ferrero, R. Gaudino, “*Optimization of self-coherent reflective PON to achieve a new record 42 dB ODN power budget after 100 km at 1.25 Gbps*”, European Conference on Optical Communications, ECOC 2012, paper **Th.3.D.6**, (2012).
- [26] K. Y. Cho et. al, “*Long-reach (80km) 10-Gb/s RSOA-based WDM PON employing QPSK signal and coherent receiver*” Opt. Express, Vol **20**, No. 14, pp. 15353-15358, (2012).

- [27] S. P. Jung, Y. Takushima, e Y. C. Chung, “*Generation of 5-Gbps QPSK signal using directly modulated RSOA for 100-km coherent WDM PON*”, Optical Fiber Communication Conference, OFC Technical Digest 2011, paper **OTuB**, (2011).
- [28] J. M. Buset, Z. A. El-Sahn, e D. Plant, “*Demonstration of a symmetric 10 Gb/s QPSK subcarrier multiplexed WDM PON with IM/DD transceivers and a bandwidth-limited RSOA*”, Optical Fiber Communications Conference, OFC 2013, paper **NTh4F.1**, (2013).
- [29] H. Shim, K. Y.Cho, U. H. Hong, Y. C. Chung “*Demonstration of 40-Gb/s QPSK upstream transmission in long-reach RSOA-based coherent WDM PON using offset PDM technique*”, Optical Fiber Communications Conference, OFC 2013, paper **OW1A.6**, (2013).
- [30] S. Pachnicke et al, “*First demonstration of a full C-band tunable WDM-PON system with novel high-temperature DS-DBR lasers*”, Optical Fiber Conference, Anais do OFC 2014, paper **W3G.2**, (2014).
- [31] M. Zirngibl, C. R. Doerr, e L. W. Stulz, “*Study of spectral slicing for local access applications*,” IEEE *Photonics Technology Letters*, Vol. **8**, No. 5, pp.721–723, (1996).
- [32] D. K. Jung, S. K. Shin, C.-H. Lee, e Y. C. Chung, “*Wavelength-di-vision-multiplexed passive optical network based on spectrum-slicing techniques*,” IEEE *Photonics Technology Letters*, Vol. **10**, No. 9, pp. 1334–1336, (1996).
- [33] R. D. Feldman, E. E. Harstead, S. Jiang, T. H. Wood, e M. Zirngibl, “*An evaluation of architectures incorporating wavelength division multiplexing for broad-band fiber access*,” *Journal of Lightwave Technology*, Vol. **16**, No. 9, pp. 1546–1559, (1998).
- [34] S. Kobayashi e T. Kimura, “*Injection locking in AlGaAs semiconductor laser*,” IEEE *Journal of Quantum Electronics*, Vol. **17**, no. 5, pp. 681–689, (1981).
- [35] S. L. Woodward, P. P. Iannone, K. C. Reichmann, e N. J. Frigo, “*A spectrally sliced PON employing Fabry-Perot lasers*,” IEEE *Photonics Technology Letters*, Vol. **10**, No. 9, pp. 1337–1339, (1998).
- [36] H. D. Kim, S.-G. Kang, e C.-H. Lee, “*A low-cost WDM source with an ASE injected Faby-Perot semiconductor laser*,” IEEE *Photonics Technology Letters*, Vol. **12**, No. 8, pp. 1067–1069, (2000).
- [37] L. Y. Chan, C. K. Chan, D. T. K. Tong, F. Tong and L. K. Chen, “*Upstream traffic transmitter using injection-locked Fabry-Perot laser diode as modulator for WDM access networks*,” in *Electronics Letters*, Vol. **38**, no. 1, pp. 43-45, (2002).
- [38] S.-M. Lee; K.-M. Choi; S.-G. Mun; J.-H. Moon; C.-H. Lee “*Dense WDM-PON based on wavelength locked Fabry-Perot lasers*” IEEE *Photon. Technol. Lett* Vol. **17**, No. **7**, pp. 1579 - 1581, (2005).
- [39] H.-K. Lee, H.-J. Lee, e C.-H. Lee, “*A simple and color-free WDM-passive optical network using spectrum-sliced Fabry-Pérot laser diodes*,” IEEE *Photonics Technology Letters*, Vol. **20**, No. 3, pp. 220–222, (2008).

- [40] T. H. Wood, E. C. Carr, B. L. Kasper, R. A. Linke, e C. A. Burrus, “*Bidirectional fibre-optical transmission using a multiple-quantum-well (MQW) modulator/detector*,” *Electronics Letters*, Vol. 22, No. **10**, pp. 528–529, (1986).
- [41] Ch. Holtmann, R. Dall’Ara, P.-A. Besse, D. Sakellariou, W. Hunziker, e H. Melchior, “*Reflective semiconductor optical amplifier at 1.3 μm wavelengths for customer connection in optical access networks*,” *Optical Amplifiers and their Applications*, Anais do OPAA, Paper **SD3**, (1996).
- [42] W. Lee et al., “*Bidirectional WDM-PON based on gain-saturated reflective semiconductor optical amplifiers*,” *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. **17**, No. 11, pp. 2460–2462, (2005).
- [43] D. J. Shin et al., “*Transmission of HDTV and Ethernet data over a WDM-PON employing ASE-injected Fabry-Perot laser diodes*”, *Optical Fiber Communications Conference, OFC Technical Digest 2004*, paper **WO3**, (2003).
- [44] C.-H. Lee et al., “*WDM-PON experiences in Korea [Invited]*”, *Journal of Optical Networking*, Vol. **6**, No. 5, pp. 451-464, (2007).
- [45] S.-H. Cho, J. H. Lee, H. H. Lee, S. II. Myong, J. H. Lee, and S. S. Lee, “*Loop-Back WDM-PON with 100 Gb/s capacity using spectrally sliced ASE injected RSOA*,” *Journal of Optical Communication Networking*, No. **5**, pp. 447 – 456, (2013).
- [46] N. J. Frigo et al., “*A Wavelength-Division multiplexed passive optical network with cost-shared components*”, *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. **6** No. 11, pp. 1365-1367, (1994).
- [47] K. C. Reichmann, N. J. Frigo, e P. P. Iannone, “*Wavelength registration in WDM ring networks by reconstitution of dropped optical carriers*”, *European Conference on Optical Communications*, Anais do ECOC 1999, pp. I-136–137, (1999).
- [48] E. Conforti, C. M. Gallep, S. H. Ho, A. C. Bordonalli, e S. M. Kang, “*Carrier reuse with gain compression and feed-forward semiconductor optical amplifiers*”, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. **50**, No. 1, pp. 77–81, (2002).
- [49] H. Takesue, and T. Sugie, “*Data rewrite of wavelength channel using saturated SOA modulator for WDM metro/access networks with centralized light sources*” *European Conference on Optical Communications*, Anais do ECOC 2002, pp. 1-2, (2002).
- [50] H. Takesue, e T. Sugie, “*Wavelength channel data rewrite using saturated SOA modulator for WDM networks with centralized light sources*,” *IEEE Journal of Lightwave Technology*, Vol. **21**, No. 11, pp. 2546-2556, (2003).
- [51] W. Hung, C.K. Chan, L.K. Chen, e F. Tong, “*An optical network unit for WDM access networks with downstream DPSK and upstream re-modulated OOK data using injection-locked FP laser*”, *Optical Fiber Communications Conference, OFC Technical Digest 2003*, paper **TuR2**, pp. 281 – 282, (2003).

- [52] J.-H. Yu, N. Kim, e B. W Kim, “*Remodulation schemes with reflective SOA for colorless DWDM PON*”, J. Opt. Netw., Vol. **6**, No. 8, pp. 1041-1054, (2007).
- [53] N. Deb, e H. Anis, “*Wavelength remodulation scheme using DPSK downstream and upstream for DWDM-PONs*”, Opt. Express, Vol. **19**, No. 17, pp. 16418-16422 (2010).
- [54] D. Z. J. Liu, “*Demonstration of a data remodulation scheme with downstream ASK-DPSK signals and upstream OOK signal using RSOA for WDM-PONs*”, Asia Communications and Photonics Conference, ACP 2010, pp. 523-524, (2010).
- [55] M. Fujiwara ,H. Suzuki ; K. Iwatsuki “*Reducing the back reflection impact by using gain-saturated SOA in WDM single-fiber loopback access networks*” 2006 Optical Fiber Communication Conference and the National Fiber Optic Engineers Conference, paper **OTuC2**, (2006).
- [56] S. Hann, T.-Y. Kim, e C.-S. Park, “*Direct-Modulated upstream signal transmission using a self-injection locked F-P LD for WDM-PON*”, European Conference on Optical Communications, ECOC Technical Digest 2005, paper **We3.3.3**, (2005).
- [57] E. Wong, K.-L. Lee e T. Anderson, “*Low-cost WDM passive optical network with directly-modulated self-seeding reflective SOA*”, Electron. Lett., Vol. **42**, No. 5, pp. 299 - 301, (2006).
- [58] E. Wong, K. L. Lee, e T. Anderson, “*Directly-modulated self-seeding reflective SOAs as colorless transmitters for WDM passive optical networks*”, Optical Fiber Communications Conference, OFC Technical Digest 2006, paper **PDP49** (2006).
- [59] E. Wong, K. L. Lee, e T. B. Anderson, “*Directly modulated self-seeding reflective semiconductor optical amplifiers as colorless transmitters in wavelength division multiplexed passive optical networks*”, J. Lightwave Technol. Vol **25**, No. 1, pp. 67–74 (2007).
- [60] M. Presi, e E. Ciaramella, “*Stable self-seeding RSOAs for WDM-PONs*”, Optical Fiber Communications Conference, (OFC) Technical Digest 2011, paper **OMP4** (2011).
- [61] Y. Ma, D. Liu, J. Yu, e X. Wang “*System evaluation of economic 16/32chs 1.25 Gbps WDM-PON with self-seeded RSOA*”, Opt. Express, Vol. **20**, No. 20, pp. 22523–22530, (2012).
- [62] R. Brenot A. Maho ; S. Barbet ; L. Marazzi ; P. Parolari ; M. Martinelli ; S. Gebrewold ;J.Leuthold ; G. Simon ; F. Saliou ; P. Chanclou “*Demystification of self-seeded WDM access*” Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), 2015, paper **W1J1**, (2015).

- [63] S.A. Gebrewold, L. Marazzi, P. Parolari, R. Brenot, S.P.O. D, R. Bonjour, D. Hillerkuss, C. Hafner and J. Leuthold, "*Reflective-SOA Fiber Cavity Laser as Directly Modulated WDM-PON Colorless Transmitter*", Journal Of Select. Topics in Quant. Elec., Vol. **20**, pp. 503-511, (2014).
- [64] G. Simon, F. Saliou, P. Chanclou, Q. Deniel, D. Erasme and R. Brenot, "*70 km external cavity DWDM sources based on O-band self seeded RSOAs for transmissions at 2.5Gbit/s*", Proc. Opt. Fiber Commun. Conf. Exhib., pp. 1-3, (2014).
- [65] Q. Deniel, F. Saliou, S. D. Le, P. Chanclou, D. Erasme and R. Brenot, "*Amplified RSOA self-tuning laser for WDM PON using saturated SOA for noise reduction and data cancellation*", Proc. 39th Eur. Conf. Exhib. Opt. Commun., pp. 1-3, (2013)
- [66] S. D. Le, Q. Deniel, F. Saliou, A. Lebreton and P. Chanclou, "*16 × 2.5 Gb/s and 5 Gb/s WDM PON based on self-seeded RSOA*", Proc. 15th Int. Conf. Transparent Opt. Netw., pp. 1-4, (2013).
- [67] S. P. Jung, Y. Takushima, e Y. C. Chung, "*Transmission of 1.25-Gb/s PSK signal generated by using RSOA in 110-km coherent WDM PON*" Opt. Express Vol. **18**, No. 14, pp. 14871-14877, (2010).
- [68] Z. Al-Qazwini and H. Kim, "*Bidirectional WDM PON using directly modulated lasers for downlink and RSOAs for uplink*," Photonics Global Conference (PGC), Singapore, 2010, pp. 1-5. (2010).
- [69] S. H. Cho, S.-S Lee, e D. W. Shin, "*Improving upstream transmission performance using a receiver with decision threshold level adjustment in a loopback WDM-PON*", Opt. Fiber Tech., Vol. **16**, No. 3, pp. 129 -134, (2010).
- [70] W. Lee et al., "*Optical transceiver employing an RSOA with feed-forward current injection*" Optical Fiber Communications Conference, OFC Technical Digest 2007, paper **OTuH1**, (2007).
- [71] S.-H. Cho et al., "*Improving transmission performance in EIN limited 2.5 Gb/s spectral slicing loop-back WDM-PON based on RSOA employing the dispersion management*", International Conference on Optical Internet, COIN 2010, (2010).
- [72] S.-H Cho, S.S Lee, e D.W. Shin. "*Transmission performance enhancement for EIN limited 2.5 Gbit/s RSOA-based WDM-PON by using dispersion management*" Electron. Lett., Vol. **46**, No. 9, 636 – 639, (2010).
- [73] H. H. Lee, S.-H. Cho, e S. S. Lee, "*Efficient excess intensity noise suppression of 100-GHz spectrum-sliced WDM-PON with a narrow-bandwidth seed light source*", IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. **22**, No. 20, pp. 1542 - 1544, (2010).
- [74] B. Skubic, A. Bianchi, S. Dahlfors, and F. Cavaliere , "*Cost, power and performance analysis of WDM-PON systems based on reflective transmitters for next-generation optical access*", Optical Fiber Communications Conference, OFC Technical Digest 2012, paper **JTh2A.28** (2012).

- [75] M. Martinelli, L. Marazzi, P. Parolari, M. Brunero, e G. Gavioli, “*Polarization in retracing circuits for WDM-PON*”, IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. **24**, No. 14, pp. 1191–1193 (2012).
- [76] P. M. Krummrich , E.-D. Schmidt , W. Weiershausen and A. Mattheus, “*Field trial results on statistics of fast polarization changes in long haul WDM transmission systems*”, Proc. OFC, pp. 1-3, (2005).
- [77] M. Martinelli, “*Time reversal for the polarization state in optical systems*”, J. Modern Opt., Vol. **39**, No. 3, pp. 451-455, (1992).
- [78] P. Parolari, “*C-and O-Band Operation of RSOA WDM PON Self-Seeded Transmitters up to 10 Gb/s [Invited]*”, J. Opt. Commun. Netw., Vol. **7**, pp. A249-A255, (2015)
- [79] L. Marazzi, “*Up to 10.7-Gb/s High-PDG RSOA-based Colorless Transmitter for WDM Networks*”, IEEE Photon. Technol. Lett, Vol. **25**, pp. 637-640, 2013.
- [80] P. Parolari, M. Brunero, R. Brenot and M. Martinelli, “*Up to 20-Gb/s multilevel WDM PON transmitter based on self-seeded RSOAs*,” Optical Communication (ECOC), 2015 European Conference on, Valencia, pp. 1-3 (2015).
- [81] M. Presi, A. Chiuchiarelli, R. Corsini, e E. Ciaramella, “*Uncooled and polarization independent operation of self-seeded Fabry-Pérot lasers for WDM-PONs*”, IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. **24**, No. 17, pp. 1523-1526, (2012).
- [82] A. Chiuchiarelli, M. Presi, e E. Ciaramella “*Effective architecture for 10 Gb/s upstream WDM-PONs exploiting self-seeding and external modulation*” Optical Fiber Communications Conference, OFC Technical Digest 2012, paper **JTh2A**, (2012).
- [83] U. R. Duarte *et al.*, “*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).
- [84] U. R. Duarte *et al.*, “*Combined self-seeding and carrier remodulation scheme for WDM-PON*”, Journal of Lightwave Technology, Vol **31**, No.8, pp. 1323-1330, (2013).
- [85] L. Marazzi , P. Parolari , R. Brenot , G. de Valicourt and M. Martinelli, “*Network-embedded self-tuning cavity for WDM-PON transmitter*”, Opt. Express, Vol. **20**, No. 4, pp. 3781-3786, (2012)
- [86] M. Brunero, L. Marazzi, P. Parolari, A. Maho, R. Brenot and M. Martinelli, “*Experimental evaluation of burst-mode operation of a RSOA-based self-seeded transmitter*,” 2014 The European Conference on Optical Communication (ECOC), Cannes, 2014, pp. 1-3.
- [87] J. H. Lee, S.-H. Cho, Y. S. Jang, e S.-S. Lee, “*Enhancement of power budget in RSOA based-loopback type WDM-PON by using cascade RSOAs*”, International Conference on Transparent Optical Networks, ICTON Technnical Digest 2010, paper **Tu.B1.5**, (2010).

- [88] A. Bogatov, P. Eliseev and B. Sverdlov, "Anomalous interaction of spectral modes in a semiconductor laser," in *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Vol. **11**, No. **7**, pp. 510-515, (1975).
- [89] F. Xiong, W. D. Zhong, M. Zhu, H. Kim, Z. Xu and D. Liu, "Characterization of Directly Modulated Self-Seeded Reflective Semiconductor Optical Amplifiers Utilized as Colorless Transmitters in WDM-PONs," in *Journal of Lightwave Technology*, Vol. **31**, No. 11, pp. 1727-1733, (2013).
- [90] S. A. Gebrewold *et al.*, "Reflective-SOA Fiber Cavity Laser as Directly Modulated WDM-PON Colorless Transmitter," in *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol. **20**, No. 5, pp. 503-511, (2014).
- [91] A. Maho *et al.*, "Demystification of the Self-Seeded WDM Access," in *Journal of Lightwave Technology*, Vol. **34**, No. 2, pp. 776-782, (2016).
- [92] Thierry Rampone, Hong-Wu Li, and Ammar Sharaiha. "Semiconductor Optical Amplifier Used as an In-Line Detector with the Signal DC-Component Conservation". *IEEE Journal of Lightwave Technology*, Vol. **16**, No. 7, (1998).
- [93] G. de Valicourt, D. Make, M. Lamponi, G. Duan, P. Chanclou and R. Brenot, "High Gain (30 dB) and High Saturation Power (11dBm) RSOA Devices as Colourless ONU Sources in Long Reach Hybrid WDM/TDM-PON Architecture", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. **22**, pp. 191-193, (2010).
- [94] B. S. G. Pillai, N. P. Anthapadmanabhan, D. Suvakovic and H. Chow, "Multi-user encoding for forward error correction in passive optical networks," 2016 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), Montreal, QC, pp. 2467-2470, (2016).
- [95] L. Schmalen, A. J. de Lind van Wijngaarden and S. Ten Brink, "Forward error correction in optical core and optical access networks," in *Bell Labs Technical Journal*, Vol. **18**, No. 3, pp. 39-66, (2013).
- [96] M. Presi, A. Chiuchiarelli, R. Proietti, G. Contestabile and E. Ciaramella, "Remodulation of a subcarrier modulated signal by feed-forward current injection in a reflective SOA," 2009 International Conference on Photonics in Switching, Pisa, pp. 1-2, (2009).
- [97] Michael J. Connelly, "Wideband Semiconductor Optical Amplifier Steady-State Numerical Model". *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Vol. **37**, No. 3. (2001).
- [98] G. Biczók, Y. Chen, K. Kravetska and H. Øverby, "Combining forward error correction and network coding in bufferless networks: A case study for optical packet switching," 2016 IEEE 17th International Conference on High Performance Switching and Routing (HPSR), Yokohama, pp. 61-68 (2016).