UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA

**Técnicas Combinadas de Autoalimentação e Reuso de
Comprimento de Onda em Transmissores Refletivos para
Redes WDM-PON**

Autor: Ulysses Rondina Duarte

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciências, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – Área de concentração: Telecomunicações.

Orientador: Prof. Dr. Murilo Araujo Romero.

Coorientador: Dr. João Batista Rosolem.

São Carlos
2015

Trata-se da versão corrigida da tese. 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.

D812t Duarte, Ulysses Rondina
Técnicas combinadas de autoalimentação e reuso de
comprimento de onda em transmissores refletivos para
redes WDM-PON / Ulysses Rondina Duarte; orientador
Murilo Araujo Romero; coorientador João Batista
Rosolem. São Carlos, 2015.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica e Área de Concentração em
Telecomunicações -- Escola de Engenharia de São Carlos
da Universidade de São Paulo, 2015.

1. WDM-PON. 2. Transmissores refletivos. 3. Reuso
de comprimento de onda. 4. Autoalimentação. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Bacharel **ULYSSES RONDINA DUARTE**.

Título da tese: "Técnicas combinadas de autoalimentação e reuso de comprimento de onda em transmissores refletivos para redes WDM-PON".

Data da defesa: 06/03/2015

Comissão Julgadora:

Resultado:

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

APROVADO

Prof. Dr. **Darli Augusto de Arruda Mello**
(Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)

APROVADO

Prof. Dr. **Evandro Conforti**
(Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)

APROVADO

Dr. **Jacklyn Dias Reis**
(Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações/CPqD)

APROVADO

Prof. Dr. **Marcelo Eduardo Vieira Segatto**
(Universidade Federal do Espírito Santo/UFES)

APROVADO

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

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Paulo César Lima Segantine**

*“Tudo na vida pode ser começado
denovo, para que as leis do progresso e
do aperfeiçoamento se cumpram em
todas as direções”.*

Emmanuel

Agradecimentos

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

À Fundação CPqD, Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações de Campinas, pelos recursos fornecidos no âmbito dos projetos GIGA FASE 2 e 100 GETH.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Murilo Araujo Romero, por conduzir as orientações de Mestrado e Doutorado com maestria e excelência e pelas imensas contribuições em minhas formações pessoal e profissional. Muito Obrigado!

Ao meu coorientador, supervisor de estágio, coordenador técnico de projeto e amigo, João Batista Rosolem, pelo exemplo de profissionalismo, sabedoria, humanidade e todo o amparo concedido nos anos de CPqD. Muito Obrigado!

Ao Julio Oliveira, pela oportunidade profissional no CPqD. Muito obrigado!

Aos meus Tios, Leonardo Rondina e Rosemeiri Zozoro, por terem me acolhido durante meu estágio no CPqD em Campinas, e por não medirem esforços em me ajudar. Acolhimento que permitiu a conclusão do meu Mestrado, de meu Doutorado e minha contratação no CPqD. Muito Obrigado!

À minha sobrinha Marina, pela alegria e esperança que traz à minha vida.

À toda minha família Duarte e Rondina.

Aos amigos do LSMO e do CPqD: Roso e Fatima, Bibael, G-mon, Carol, Gordassa's King, Craudio, AriOSvaldo, Fretado Magalhães e Helena, Bruno Angeli e Lorenzo, Fernando Rocha, Padela, Livia, João Fracaroli, Fábio Maçã, Edson Porto, Chicken, Felipe, Marcelão, Sereia, Ney, Trosa, Felipe, Donati, Foguinho, Diniz, Rosa, Stenio, Flavio, Vitão, Coiva, Adolfo, Regisnaldo, Antonio Coral, Borin, Fernanda, Amauri, Roberto, César, Turco, Alexandre, Sandro Rossi e João Cresmasco. Muito Obrigado!

Aos amigos de FEDERAL E USP: Big e Família, G e LILA, Rizolhos e Família, Pumbati e Família, Zini e Família, Fafa, Rodrigão, Mariama, Niiii..., Ed, Ex-Mufasa, Oreia, Driele, Amarelo-queimado, César, James, H, Pedrão, Cazuza, Dengo, Indião, Guilherme, Valdemir, Mariana, Thiago, Arturo, Tio Luizinho, Dudu gavião e Helvecio codorna.

Aos amigos Barretenses e São-Carlenses: Nany Gol e Família, Renato e Família, Dona Célia, Josés Carlos, Dú Pezão e Família, Nanais, João Miguel, Nelsim, Miguelon

e Família, Craudete, Guidão-Buda-Dick, Cidão, Seu Claudinei, Luan, Ganso, Lukeba, Eloisa Nogueira e Família, Ana Maria e Família, Japa e Família, Milena, Renan, Marcelo, Franscisco, Mario, Zé Vitor, Jeromão da Cultrale, Guerra, Macedo, Vitim, Godoy, Jovas, Jorge Chafei, Fabricio, Luis Jaspion, Biel e Família, +100 e Família, Lulu Malandri e Família, Xicão e Família, Paty e Família, Kelly Japonesa Bandeirante e Laís, Braz Menezes, Ricardo (Pirídio), Simone, Dr. Roberto, Thalita, Livia, Dani, Tia Inês, Tio Ademir, Joyce, Dani, Nê e Família, Junia, Anna Claudía, Anna Cristina e Família, Flavia e Família, Wanda e Cursinho ONG-Fênix.

À todos os amigos do Nosso Lar e Bezerra de Menezes de Barretos e GEAE de Barão Geraldo.

À todos que colaboraram em minha jornada.

Há onze anos iniciei minha carreira acadêmica na Física, em São Carlos, com o objetivo de tornar-me professor. No meio do caminho descobri o sabor pela pesquisa. Redirecionei, então, minha jornada à pesquisa aplicada em Engenharia Elétrica por meio do Mestrado e Doutorado.

Durante o Mestrado fui agraciado com a oportunidade de trabalho em minha área de especialidade como pesquisador, onde fiquei por quatro anos no CPqD de Campinas. Sem dúvida, foram experiências valorosas e só tenho a agradecer!

Entretanto, nada foi gratuito: a vida exigiu-me a privação de horas de sono, momentos de lazer, o contato mais próximo à família, distanciando-me de meus relacionamentos, de quem amamos e de quem nos ama.

Muitas vezes minha fé foi testada, e dúvidas invadiam meu coração quanto às escolhas que fazia em meu caminho. Em algumas vezes mantive-me forte e sóbrio, mas, por outras tantas, tive medo e desviei-me do percurso...

Ao longo dos anos, embebedei-me de vaidade, egoísmo e orgulho, pois esses eram os principais combustíveis da minha vida. Deixei de lado os alimentos essenciais ao coração e à alma...

Contudo, a solidão, a dor e a desilusão visitaram-me, convidando-me ao recolhimento interno. Ofereceram-me, também, a oportunidade de reprogramar minha meta e buscar o bem. Eu tive um trabalho, um serviço, mas percebi que talvez não estivesse pronto para servir, pois me preocupei mais em receber do que em me doar...

E Longos são os caminhos que percorremos dentro de nós mesmos;

E Inesperadas são as reviravoltas/oportunidades que a vida nos apresenta;

Justos e Misericordiosos são os retornos que nos encontram e sempre nos encontrarão, decorrentes das ações que praticamos, lapidando nossas vidas;

E sofremos. E observamos. E nos modificamos;

Após onze anos, então, a oportunidade de retomar meu caminho surge, um mês após minha defesa de Doutorado...

Agradeço ao amparo e dedicação de:

minha Mãe, exemplo de renúncia e carinho;

meu Pai, exemplo de caridade e bondade;

minha Irmã, exemplo de tolerância, paciência e justiça, e;

meu Irmão, exemplo de trabalho, excelência e intelectualidade.

FAMÍLIA, base e direito essencial na formação de qualquer indivíduo. Se sou quem me tornei hoje, e se alcancei a posição pessoal/profissional em que me encontro, é porque tive um LAR onde cresci e fui amado, LAR que recorri e sempre recorro quando preciso de forças e LAR onde parte do meu coração sempre estará!

Agradeço a minha namorada, Ana Carolina Barbosa Scarmato, exemplo do companheirismo e amor, por sempre despertar-me a alegria em viver com um simples sorriso. Agradeço também por encorajar-me em tantas vezes que quis desistir, por ser minha força quando não consegui mais lutar, por me amar mesmo quando não mereci.

Aos amigos, que supriram meu coração de energias, e tornaram meus ombros mais fortes para suportar os fardos que eu mesmo criei.

E por último, e mais importante, eu agradeço à espiritualidade, meus irmãos e meu PAI, meu DEUS, pelo amparo, pelo corpo físico, pela família, pelos amigos, pelo trabalho e por todas as vibrações de amor e esperança pelo nosso mundo.

A titulação não nos torna diferentes dos demais, nem mesmo qualquer profissão em si, embora o trabalho e os proventos sejam, sim, essenciais para as nossas lutas diárias. A ocupação útil de qualquer natureza é, no fundo, oportunidade sagrada de desenvolver nossa inteligência, de fazer o bem e de nos TRANSFORMARMOS INTERNAMENTE, retribuindo ao mundo em justiça, amor e caridade por todos os recursos usufruídos pelo milagre e manutenção da vida, bênção eterna.

Atenciosamente,

Professor, Ulysses Rondina Duarte

Resumo

Duarte, U. R. **Técnicas Combinadas de Autoalimentação e Reuso de Comprimento de Onda em Transmissores Refletivos para Redes WDM-PON**. 2015. 231 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo – USP, 2015.

Transmissores agnósticos em comprimento de onda (*colorless*) [1], isto é, transmissores que não estão restritos à operação em um único comprimento de onda, são considerados como um dos pré-requisitos para os projetos de redes ópticas passivas baseadas na multiplexação por divisão em comprimento de onda (*Wavelength Division Multiplexing Passive Optical Network* – WDM-PON). Esta configuração reduz consideravelmente os custos operacionais e de instalação da rede WDM-PON, uma vez que um único tipo de transmissor pode ser usado em qualquer terminal de assinante, independentemente dos comprimentos de onda pré-estabelecidos para os usuários em questão. Entretanto, a possibilidade de aumento do número de usuários e da capacidade de transmissão agregada, com poucas modificações na estrutura da rede WDM-PON, garantindo uma melhor relação custo-benefício, são questões também essenciais no projeto de sistemas multi-comprimento de onda. Tendo em vista o panorama exposto, neste trabalho é proposta uma nova topologia de reuso de portadora óptica para redes WDM-PON, a qual combina sinais autoalimentados e modulação óptica no domínio da intensidade, visando o atendimento das premissas tecnológicas para cenários de nova geração. Como metodologia, investigações experimentais são conduzidas em termos de caracterizações ópticas em função de vários parâmetros e avaliações sistêmicas em taxas simétricas de 1,25 Gb/s, no âmbito de redes de acesso e acesso estendido. Utilizam-se transmissores *colorless* do tipo amplificadores ópticos semicondutores refletivos e fontes ópticas banda larga baseadas em emissão espontânea amplificada, de forma a garantir a simplificação dos terminais dos usuários. Adicionalmente, são realizadas análises comparativas entre essa proposta frente aos trabalhos encontrados na literatura técnica, quando possível, em termos de custos operacionais, desempenho sistêmico e viabilidade de expansão para cenários a taxas simétricas de 10 Gb/s. De acordo com os resultados obtidos, acredita-se que essa topologia possa ser expandida para cenários de até 10 Gb/s

com o uso de técnicas apropriadas de apagamento de portadora, mantendo a melhor relação custo-benefício para sistemas de remodulação no domínio da intensidade.

Palavras-chave: WDM-PON, transmissores refletivos, reuso de comprimento de onda, autoalimentação.

Abstract

Duarte, U. R. **Combined Self-Seeding and Wavelength Reuse for Reflective Transmitters in WDM-PON**. 2015. 231 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo – USP, 2015.

Wavelength agnostic (colorless) transmitters [1], i.e, transmitters which are not fixed to a specific wavelength operation, are regarded as one of the essential keys for the designing of wavelength division multiplexing passive optical networks (WDM-PONs). The use of colorless transceiver leads to a reduction in the maintenance cost of the network, once the same basic optoelectronic hardware can be employed to provide any wavelength required by a specific optical network termination (ONT). However, the possibility of a graceful increase on the number of ONTs and transmission capacity offered by the network, with no disruptive changes in the WDM-PON infrastructure, while keeping a cost-effective topology, are also attractive features in the design of future access networks. In this context, a novel wavelength-reuse topology for WDM-PON is proposed in this work. The wavelength-sharing technique is based on combined self-seeded and remodulated signals in the intensity domain, in order to comply with the technology requirements for next generation networks. Experimental analysis are carried out in respect to optical characterization and system evaluation on symmetric rates of 1.25 Gb/s, aiming both short reach and extended reach scenarios. Reflective semiconductor optical amplifiers and broadband light sources based on amplified spontaneous emission are used as colorless transceivers in order to guarantee a cost-effective ONT configuration. Also, comparative analyses between this proposal and works found in the technical literature are established in terms of maintenance costs, system performance and feasibility of expansion to symmetric 10 Gb/s scenario. According to the results, we believe that network could be expanded to symmetric 10 Gb/s scenario with the development of proper erasure technique, while keeping the best cost-effective configuration of intensity-remodulated systems.

Keywords: WDM-PON, *reflective transmitters*, *wavelength-reuse*, *self-seeding*.

Sumário

RESUMO	XI
ABSTRACT	XIII
LISTA DE FIGURAS	XIX
LISTA DE TABELAS	XXII
LISTA DE ACRÔNIMOS	XXIII
LISTA DE SÍMBOLOS	XXVII
1. INTRODUÇÃO	29
1.1 PROPOSTA E OBJETIVOS	35
1.2 METODOLOGIA	36
1.3 RESULTADOS E CONTRIBUIÇÕES ORIGINAIS	37
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	37
1.5 PRODUÇÃO CIENTÍFICA VINCULADA AO TRABALHO	38
2. REDES ÓPTICAS PASSIVAS	41
2.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS DE REDES PON	42
2.2 REDES TDM	44
2.3 G-PON	46
2.4 XG-PON (NG-PON ₁)	49
2.5 TWDM-PON (NG-PON ₂)	51
2.6 PRÓXIMAS NG-PON: REQUISITOS E DESAFIOS	55
2.7 PRÓXIMAS NG-PONS: ALTERNATIVAS	58
2.7.1 OFDM-PON	58
2.7.2 XLG-PON	58
2.7.3 PONS COERENTES	59
2.7.4 WDM-PON	60
3. REDES WDM-PON	63
3.1 ASPECTOS GERAIS DE REDES WDM-PON	63
3.2 ONTs COLORLESS	67
3.2.1 FATIAMENTO ESPECTRAL	67
3.2.2 TRANSMISSORES EM MODO DE REFLEXÃO	68

3.3	EVOLUÇÃO TOPOLOGIAS WDM-PON	70
3.3.1	FP-LD	70
3.3.2	TOPOLOGIA UNIDIRECIONAL	70
3.3.3	BANDA C/BANDA L (C/L BANDS)	73
3.3.4	RSOA	75
3.3.5	BANDA C COMPARTILHADA (C-BAND <i>SPLITTING</i>)	75
3.3.6	REUSO DE COMPRIMENTO DE ONDA	78
	Interrogação Remota do Terminal de Rede	79
	Apagamento e Reuso de Portadora Óptica	80
3.3.7	APAGAMENTO E REUSO DE PORTADORA ÓPTICA: EFEITOS DEGRADANTES	83
3.3.8	APAGAMENTO E REUSO DE PORTADORA ÓPTICA: TÉCNICAS PARA MITIGAÇÃO DOS EFEITOS DEGRADANTES	83
3.3.9	APAGAMENTO E REUSO DE PORTADORA ÓPTICA: COMENTÁRIOS FINAIS	84
3.3.10	TÉCNICA DE AUTOALIMENTAÇÃO PARA ONTS REFLETIVAS	85
3.3.11	TÉCNICA DE AUTOALIMENTAÇÃO: PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO E CARACTERÍSTICAS GERAIS	86
3.3.12	TÉCNICA DE AUTOALIMENTAÇÃO: REQUISITOS DE OPERAÇÃO	88
	Operação em Regime de Saturação dos Transmissores Refletivos	88
	Estabilidade do Estado de Polarização na Porta de Saída/Entrada do RSOA	89
3.3.13	TÉCNICA DE AUTOALIMENTAÇÃO: TOPOLOGIA BASE	90
3.3.14	TÉCNICA DE AUTOALIMENTAÇÃO: COMENTÁRIOS FINAIS	92
3.4	PROPOSTA DA TESE	93

4. TÉCNICAS COMBINADAS DE AUTOALIMENTAÇÃO E REUSO DE COMPRIMENTO DE ONDA

99

4.1	INTRODUÇÃO	99
4.2	CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL	102
4.3	MATERIAIS UTILIZADOS	105
4.4	PROVAS DE CONCEITO	106
4.4.1	GANHO ÓPTICO DOS RSOAS	106
4.4.2	ESPECTRO ÓPTICO DE SINAIS AUTOALIMENTADOS	108
4.4.3	NÍVEIS DE RAZÃO DE EXTINÇÃO	111
4.4.4	SINAIS <i>DOWNSTREAM</i> AUTOALIMENTADOS EM FUNÇÃO DE PSS	114
4.4.5	SINAIS <i>DOWNSTREAM</i> AUTOALIMENTADOS EM FUNÇÃO DE ER_D	115
4.4.6	CASO IDEAL PARA <i>UPSTREAM</i> NO CENÁRIO DE REMODULAÇÃO – ER_D IGUAL A ZERO	117
4.5	TRANSMISSÃO BIDIRECIONAL	119
4.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	124

5. TÉCNICAS COMBINADAS DE AUTOALIMENTAÇÃO E REUSO DE COMPRIMENTO DE ONDA, APOIADAS EM REMODULAÇÃO OPTOELETRÔNICA

129

5.1	INTRODUÇÃO	129
5.2	CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL	133
5.3	MATERIAIS UTILIZADOS	134

5.4 REMODULAÇÃO CONVENCIONAL	135
5.4.1 TRANSMISSÃO <i>DOWNSTREAM</i>	135
5.4.2 TRANSMISSÃO <i>UPSTREAM</i>	139
5.5 IMPACTO DOS EFEITOS DE PÓS-FILTRAGEM, DISPERSÃO CROMÁTICA E REFLEXÕES ESPÚRIAS	142
5.5.1 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO SISTÊMICO DA TRANSMISSÃO <i>DOWNSTREAM</i>	145
Impacto do Efeito de Pós-Filtragem nos Sinais <i>Downstream</i>	145
Impacto do Efeito de Dispersão Cromática nos Sinais <i>Downstream</i>	148
5.5.2 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO SISTÊMICO PARA A TRANSMISSÃO <i>UPSTREAM</i>	150
Impacto do Efeito de Pós-Filtragem nos Sinais <i>Upstream</i>	150
Impacto do Efeito de Dispersão Cromática nos Sinais <i>Upstream</i>	153
5.5.3 ESTUDO COMPARATIVO DO IMPACTO DE REFLEXÕES ESPÚRIAS	155
ANÁLISE ESPECTRAL ÓPTICA DE REFLEXÕES ESPÚRIAS	155
ANÁLISE DE PENALIDADE EM POTÊNCIA EM FUNÇÃO DA RAZÃO DE REFLEXÃO	158
5.6 ANÁLISES DE RELAÇÃO CUSTO-BENEFÍCIO EM TOPOLOGIAS DE REUSO DE PORTADORA ÓPTICA NO DOMÍNIO DA INTENSIDADE	160
5.6.1 BANDA S, C OU L	161
5.6.2 BANDAS S E C, C E L OU S E L	161
5.6.3 BANDAS S, C E L	162
5.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	163
 6. CONCLUSÕES	 167
 6.1 TRABALHOS FUTUROS	 171
 A. TÉCNICAS DE APAGAMENTO ÓPTICO	 173
 B. EFEITOS DEGRADANTES EM TOPOLOGIAS DE REUSO E APAGAMENTO DE PORTADORA ÓPTICA	 177
 B.1 RUÍDO DE SOBREMODULAÇÃO	 177
B.2 BATIMENTO ASE-ASE	178
B.3 DISPERSÃO CROMÁTICA (CD)	179
B.4 EFEITOS DE PÓS-FILTRAGEM (PFE)	179
B.5 REFLEXÕES ESPÚRIAS	180
 C. TÉCNICAS PARA MITIGAÇÃO DOS EFEITOS DEGRADANTES DE TOPOLOGIAS DE REUSO E APAGAMENTO DE PORTADORA ÓPTICA	 183
 C.1 BALANÇO DOS NÍVEIS DE RAZÃO DE EXTINÇÃO	 183
C.2 USO DE FORMATOS DE MODULAÇÃO EM DOMÍNIOS DE MODULAÇÃO ORTOGONAIS	183
C.3 SEMENTES ÓPTICAS DE ALTA POTÊNCIA	184
C.4 INJEÇÃO DE CORRENTE DE ALIMENTAÇÃO ADIANTE (FFCI)	184
C.5 AJUSTE DE LIMAR DE NÍVEL DE DECISÃO (DTLA)	186
C.6 FONTES ÓPTICAS PRÉ-FATIADAS (PSSL)	187

D. TOPOLOGIA BASEADA NO COMPARTILHAMENTO DA BANDA C	189
D.1 – CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL	190
D.2 MATERIAIS UTILIZADOS	191
D.2.1 PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO COM RSOA DE ALTA PDG	192
D.2.2 FONTE BLS BASEADA EM EDFA	193
D.3 CARACTERIZAÇÕES ÓPTICAS	194
D.3.1 GANHO EM FUNÇÃO DA CORRENTE DE POLARIZAÇÃO	195
D.3.2 GANHO EM FUNÇÃO DA POTÊNCIA DE INJEÇÃO	196
D.3.3 GANHO ÓPTICO EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO DE ONDA DA BANDA C	197
D.4 AVALIAÇÕES SISTÊMICAS	199
D.4.1 CONDIÇÃO TRANSMISSOR-RECEPTOR FACE A FACE (<i>BACK-TO-BACK</i>)	199
D.4.2 TRANSMISSÃO UNIDIRECIONAL	200
D.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	204
E. DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NAS AVALIAÇÕES EXPERIMENTAIS	207
E.1 COMPARTILHAMENTO DA BANDA C	209
E.2 TÉCNICAS COMBINADAS DE AUTOALIMENTAÇÃO E REUSO DE COMPRIMENTO DE ONDA	211
E.2.1 PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO COM RSOA DE BAIXA PDG	212
E.2.2 ESPELHO DE FARADAY	214
E.3 TÉCNICAS COMBINADAS DE AUTOALIMENTAÇÃO E REUSO DE COMPRIMENTO DE ONDA, APOIADAS EM REMODULAÇÃO OPTOELETRÔNICA	214
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	219

Lista de Figuras

<i>Figura 1.1 - Ilustração esquemática da camada física de uma rede TDM-PON: (a) sinais downstream em broadcast e; (b) sinais upstream multiplexados em TDM.</i>	30
<i>Figura 1.2 – Principais tecnologias de acesso TDM já padronizadas. Os valores das abscissas representam taxa de transmissão downstream oferecido por cada topologia, considerando segmentações de 64 usuários por OLT.</i>	31
<i>Figura 1.3 – Ilustração esquemática da camada física uma rede WDM-PON: (a) sinais downstream multiplexados em WDM e; (b) sinais upstream multiplexados em WDM.</i>	33
<i>Figura 2.1 - Ilustração da camada física de alguns esquemas FTTx encontrados em redes PON.</i>	43
<i>Figura 2.2 - Ilustração esquemática da camada física de redes TDM. λ_1 e λ_2 referem-se aos comprimento de onda dos sentidos downstream e upstream, respectivamente.</i>	44
<i>Figura 2.3 - Ilustração esquemática da camada física uma rede G-PON.</i>	46
<i>Figura 2.4 - Ilustração esquemática da camada física uma rede XG-PON.</i>	50
<i>Figura 2.5 - Ilustração esquemática da camada física de uma rede TWDM-PON.</i>	53
<i>Figura 2.6 - Evolução da capacidade das redes PON em função de Gb/s, distância de cobertura, segmentação oferecida pelas principais tecnologias TDM e período decorrido nas atividades de padronização.</i>	56
<i>Figura 2.7- Alocação espectral das bandas ópticas padronizadas para as tecnologias G-PON, XG-PON e TWDM-PON. Na figura, radiofrequência (Radiofrequency - RF).</i>	57
<i>Figura 2.8 – Ilustração esquemática de uma rede WDM-PON coerente.</i>	59
<i>Figura 3.1 - Ilustração esquemática de uma topologia WDM-PON convencional.</i>	64
<i>Figura 3.2 - Ilustração esquemática da técnica de fatiamento espectral.</i>	67
<i>Figura 3.3 - Ilustração esquemática da técnica de semente óptica para transmissores em modo de reflexão utilizando-se do fatiamento espectral de fontes banda larga.</i>	69
<i>Figura 3.4 - Ilustração esquemática da topologia unidirecional para geração dos sinais upstream conforme empregado em [51].</i>	72
<i>Figura 3.5 - Ilustração esquemática da topologia bidirecional banda C/banda L, proposta em [56].</i>	73
Figura 3.6 - Ilustração esquemática da topologia C-band splitting, de acordo com [67].	76
<i>Figura 3.7 - Ilustração esquemática da topologia de reuso de portadora óptica.</i>	78
<i>Figura 3.8 - Ilustração esquemática da proposta original da RITENET [1]. Mod refere-se ao modulador externo presente na ONT para inserção dos dados upstream.</i>	80
<i>Figura 3.9 - Ilustração esquemática da topologia de remodulação com RSOAs, proposta em [73].</i>	82
<i>Figura 3.10 - Primeira proposta para self-seeding RSOA encontrada no estado da arte [112].</i>	86
<i>Figura 3.11- Ilustração esquemática da topologia proposta em [119].</i>	92
<i>Figura 3.12 - Proposta central de estudo: autoalimentação OLT e remodulação óptica ONT combinadas.</i>	95
<i>Figura 3.13 - Linha cronológica apontando os destaques tecnológicos, técnicas de transmissão/detecção, topologias e taxas de transmissão em WDM-PON nos últimos 30 anos.</i>	98
<i>Figura 4.1 – Topologia combinada de autoalimentação e remodulação óptica, para distância de 20 km. Os parâmetros estudados estão descritos na tabela associada à figura.</i>	102
<i>Figura 4.2 - Foto da montagem experimental utilizada na avaliação dos cenários de autoalimentação proposto.</i>	105
<i>Figura 4.3 - Curvas de ganho para o RSOA LDPG com dois valores de corrente DC: 60 mA para o RSOA da ONT e 90 mA para o RSOA do OLT.</i>	107
<i>Figura 4.4 – Comparação de perfil espectral entre sinais autoalimentados e sinais provenientes do fatiamento espectral de fontes BLS do tipo ASE. Foi utilizada uma resolução de 0.03 nm e largura de vídeo de 100 Hz.</i>	110
<i>Figura 4.5 - Níveis de razão de extinção para os sinais downstream e upstream.</i>	113
<i>Figura 4.6 – Avaliação de BER dos sinais downstream em função dos níveis Pss.</i>	115

Figura 4.7 - Avaliação de BER dos sinais downstream em função dos níveis ER_D . O valor de P_{ss} foi mantido em -27 dBm/0,2 nm.	116
Figura 4.8 – Diagramas de olho para os sinais downstream autoalimentados em função do nível de ER_D . A escala vertical foi mantida 142 mW/div.	116
Figura 4.9 – Avaliação de desempenho de BER upstream na melhor condição de remodulação ($ER_D = 0$): (a) BER upstream para diversos valores de P_{inj} e P_{ss} ; (b) diagramas de olho dos sinais upstream em função de P_{inj} , mantendo P_{ss} fixo em -22 dBm/0,2 nm.	118
Figura 4.10 – Avaliações de BER para os sinais upstream e downstream para alguns valores de ER_D . Os níveis de P_{inj} , P_{ss} e ER_{UP} foram fixados em -17 dBm, -27 dB/0,2 nm e 11 dB, respectivamente.	120
Figura 4.11 – Penalidades em potência para o sentido upstream e downstream em função do nível ER_D . A linha vermelha pontilhada estabelece a região de patamar de erros para o sentido de descida (ver Fig. 4.7). Os valores de P_{ss} e ER_{UP} foram fixados em -27 dBm/0,2 nm e 11 dB, respectivamente.	121
Figura 4.12 - Diagramas de olho para os sinais upstream para alguns valores de ER_D , mantendo o nível P_{inj} em -12 dBm.	122
Figura 4.13 - Penalidades em potência para o sentido upstream em função do nível ER_D para alguns valores de ER_{UP} . As penalidades em potência para o sentido downstream também foram calculadas. As linhas vermelhas pontilhada e tracejadas estabelecem, respectivamente, a região de patamar de erros para ambos os sentidos de descida (ver Fig. 4.7) e subida (ver Fig. 4.10). Os valores de P_{inj} e P_{ss} foram fixados em -17 dBm/ e -27 dBm/0,2 nm, respectivamente.	122
Figura 5.1- Topologia de remodulação convencional (ou topologia PSSL).	133
Figura 5.2 - Foto da montagem experimental utilizada na avaliação dos cenários de remodulação convencional.	134
Figura 5.3 - Avaliação sistêmica do sentido downstream em condição B2B para alguns valores de potência de injeção.	136
Figura 5.4 - Avaliação sistêmica do sentido downstream em condição B2B e 20 km para valores de P_{injD} iguais a -1 dBm e -6 dBm.	137
Figura 5.5 - Avaliação de desempenho sistêmico para o sentido downstream em função do enlace de fibra óptica.	138
Figura 5.6 - Diagramas de olho para o sentido downstream em função do comprimento da fibra. As medições foram realizadas no ponto C da Fig. 5.1. O valor da razão de extinção ER_D registrada foi de 5,3 dB.	139
Figura 5.7 - Caracterizações de ganho óptico para o RSOA da ONT.	140
Figura 5.8- Avaliação de desempenho sistêmico para o sentido upstream na condição B2B para alguns valores de potência de injeção. O nível de razão de extinção medido para o sentido upstream foi de 11 dB.	140
Figura 5.9 - Avaliação de desempenho sistêmico para o sentido upstream em função de alguns comprimentos da fibra. A potência de injeção upstream foi mantida em -18,5 dBm. Os diagramas de olho foram medidos no ponto D da Fig. 5.1.	141
Figura 5.10 - Topologias de reuso de comprimento de onda: (a) topologia de fonte óptica pré-fatiada (PSSL) e; (b) sinais downstream autoalimentados (SS). As medições de espectro óptico dos sentidos downstream e upstream para análise de efeitos de pós-filtragem foram tomadas, respectivamente, no conjunto de pontos: A-B-C e C-D-E. A resolução do OSA foi mantida em 0,03 nm. Os emuladores de reflexão foram inseridos nos pontos R_1 e R_2 .	143
Figura 5.11 – Análise dos efeitos de pós-filtragem para os sinais downstream da topologia convencional (PSSL) e da proposta da tese (SS): (a) espectro óptico; (b) largura espectral óptica no ponto A e; (c) conteúdo espectral óptico entre os pontos C e A.	146
Figura 5.12 - Diagramas de olho do sentido downstream para avaliação dos efeitos de pós-filtragem das topologias de fonte óptica com pré-fatiamento espectral (PSSL) e sinais autoalimentados (SS).	148
Figura 5.13 – Avaliações de desempenho de BER para o sentido downstream para distâncias de até 100 km: (a) topologia de fonte óptica pré-fatiada (PSSL) e; (b) proposta da tese (SS).	149

Figura 5.14 – Análise comparativa entre a topologia convencional (PSSL) e a topologia combinada (SS) de penalidade em potência em função do comprimento do enlace para o sentido downstream.	150
Figura 5.15 - Análise dos efeitos de pós-filtragem para os sinais upstream das topologias de fonte óptica pré-fatiada (PSSL) e topologia combinada (SS): (a) espectro óptico; (b) largura espectral óptica no ponto C e; (c) conteúdo espectral óptico entre os pontos E e C.	151
Figura 5.16 - Avaliações de desempenho de BER para o sentido upstream para distâncias de até 60 km: (a) topologia de fonte óptica pré-fatiada (PSSL) e; (b) topologia combinada (SS). A potência de injeção nos RSOAs ONTs foi fixada em -18,5 dBm.	153
Figura 5.17 - Diagramas de olho para o sentido upstream em função do comprimento da fibra para a topologia convencional (PSSL) e da proposta da tese (SS). As medições foram realizadas no ponto E da Fig. 5.10.	154
Figura 5.18 - Penalidade em potência em função do comprimento de onda em 60 km de transmissão para os sinais downstream e upstream. A BER foi mantida em valores próximos a 10^{-12} .	154
Figura 5.19 – Ilustração esquemática do emuladores de reflexão R-I inserido no ponto R_1 da Fig. 5.10	156
Figura 5.20 - Ilustração esquemática do emuladores de reflexão R-II inserido no ponto R_2 da Fig. 5.10	156
Figura 5.21 – Medições de espectros ópticos para análise de reflexões discretas: (a) topologia convencional e; (b) topologia combinada.	157
Figura 5.22 – Penalidade em potência para em função do parâmetro R para a topologia PSSL.	159
Figura 5.23 - Penalidade em potência para em função do parâmetro R para a topologia combinada.	159
Figura A.1 - Princípios básicos de operação da técnica de apagamento de portadora óptica: (a) definição do nível de razão de extinção óptico; (b) apagamento de portadora óptica e; (c) reutilização da portadora óptica para geração de dados upstream.	173
Figura A.2 - Apagamento de portadora empregando SOAs em regime de saturação.	174
Figura B.1 -Diagramas de olho para os sinais upstream para alguns valores de ER_D , mantendo o nível P_{inj} e ER_{UP} em -12 dBm e 11 dB, respectivamente . Resultados obtidos em [75] pelo o autor.	177
Figura B.2 – Ilustração esquemática das contribuições de fontes de ruído em diferentes esquemas de amplificação: (a) sistemas convencionais e; (b) ASE fatiada e transmissores refletivos.	178
Figura B.3- Ilustração esquemática dos efeitos de pós-filtragem presentes em sistemas de fatiamento espectral.	180
Figura B.4 - Ilustração esquemática das fontes de reflexões espúrias presentes em sistemas de reuso de portadora óptica.	181
Figura C.1 - Ilustração esquemática do diagrama de blocos da técnica FFCI, proposta em [95].	185
Figura C.2 - Ilustração esquemática do diagrama de blocos do receptor com DTLA, proposta em [102]. Amp refere-se à um amplificador linear.	187
Figura C.3- Ilustração esquemática do diagrama de blocos da fonte PSSL, redesenhada da Ref [85].	188
Figura D.1 - Ilustração esquemática da topologia C-band splitting usada como investigação.	190
Figura D.2 – Foto da montagem experimental utilizada na avaliação na topologia banda C compartilhada.	191
Figura D.3 - Foto da placa PCI contendo o RSOA com alta dependência de ganho em relação a polarização.	193
Figura D.4 - Perfil de ASE extraído do EDFA utilizado como fonte BLS.	194
Figura D.5 - Ilustração esquemática do cenário utilizado nos ensaios de ganho óptico do R-SOA.	195
Figura D.6 - Curvas de ganho em função da corrente contínua para diversos valores de P_{inj} .	196
Figura D.7 - Curvas de ganho vs P_{inj} para diversos valores fixos de corrente.	196
Figura D.8 - Ganho óptico em função do comprimento de onda para alguns valores de potência de injeção, mantendo o valor de corrente contínua fixado em 25 mA.	197
Figura D.9 - Ganho óptico em função do comprimento de onda para alguns valores de corrente contínua, mantendo o valor de potencia de injeção fixado em -15 dBm.	198
Figura D.10 - Cenário usado na configuração back-to-back.	200

<i>Figura D.11 - Avaliação de desempenho para os canais do sentido downstream em 20 km de enlace de fibra alimentadora.</i>	201
<i>Figura D.12 - Comparação de BER para o canal 1558,92 nm sem compensação e após compensação de dispersão.</i>	202
<i>Figura D.13 - Desempenho de BER após compensação de dispersão para os 4 canais downstream.</i>	203
<i>Figura D.14 - Desempenho de BER após compensação de dispersão para os 4 canais upstream.</i>	204
<i>Figura E.1 - Foto do AWG com 40 canais e espaçamento de 100 GHz.</i>	207
<i>Figura E.2- Foto do circulador óptico 3 portas bandas C+L.</i>	208
<i>Figura E.3 - Alguns dos elementos eletrônicos utilizados no cenário de teste banda C compartilhada: (a) fontes BLS do tipo EDFA compacto, projetados no CPqD; (b) gerador de sinais MP 1800-A; (c) placa de circuito impresso com interface SFP para detecção dos sinais ópticos e; d) OSA Anritsu MS9740A.</i>	209
<i>Figura E.4 - Foto do filtro Azul/Vermelho banda C. Número de série: MWDMGCR/CB. Fornecedor: Oplink.</i>	210
<i>Figura E.5 – Foto do módulo DCM para compensação de dispersão em enlaces de 20 km (340 ps/nm).</i>	210
<i>Figura E.6 - Alguns dos elementos eletrônicos e passivos utilizados no sistema de autoalimentação proposto: (a) AWG Pointek; (b) bastidor com placas PCIs; (c) placa PCI com interface SFP para detecção; (d) EDFA com controle automático de ganho; (e) circulador óptico e; (f) acoplador de potência 10/90 e FRM.</i>	211
<i>Figura E.7 - Foto da placa PCI contendo o RSOA com baixa dependência de ganho em relação a polarização.</i>	212
<i>Figura E.8 - Espectros ópticos de emissão dos RSOAs LPDG obtidos na tela do OSA para dois valores de corrente contínua: (a) 60 mA e; (b) 90 mA. A resolução foi mantida em 0,03 nm.</i>	213
<i>Figura E.9 - Foto do espelho de Faraday utilizado no circuito de autoalimentação.</i>	214
<i>Figura E.10 - Alguns dos elementos eletrônicos e passivos utilizados no cenário de teste de remodulação: (a) placa de avaliação SFP Fujitsu; (b) placa de avaliação SFP desenvolvida no CPqD; (c) EDFA com controle automático de ganho; (d) acoplador de potência 10/90 e FRM e; e) circulador óptico.</i>	215
<i>Figura E.11 - Imagem do SFP ONT com FFCI e espectro óptico de emissão obtido na tela do OSA. A resolução foi mantida em 0,03 nm.</i>	216
<i>Figura E.12 - Imagem do SFP OLT com DTLA e espectro óptico de emissão obtido na tela do OSA. A resolução foi mantida em 0,03 nm.</i>	216
<i>Figura E.13 - Imagem da estrutura interna da fonte PSSL e espectro óptico de emissão obtido na tela do OSA. A resolução foi mantida em 0,03 nm.</i>	217
<i>Figura E.14 - Imagem do acoplador 80x20 usado juntamente com o SFP ONT. Os cordões vermelho (terminação em ângulo) e azul conectam, respectivamente, o transmissor RSOA e o receptor do SFP ONT ao acoplador 80/20.</i>	218

Lista de Tabelas

<i>Tabela 2.1- Plano de comprimento de onda dos canais downstream para a tecnologia TWDM-PON.</i>	<i>54</i>
<i>Tabela 2.2 - Plano de comprimento de onda dos canais upstream para tecnologia TWDM-PON.....</i>	<i>54</i>
<i>Tabela 5.1 - Lista dos principais acrônimos utilizados no Cap.5.</i>	<i>131</i>
<i>Tabela 5.2 - Lista dos principais símbolos utilizados no Cap. 5.</i>	<i>132</i>
<i>Tabela 5.3 – Levantamento de custo dos principais componentes da rede WDM-PON em 2012.....</i>	<i>160</i>
<i>Tabela 5.4 - Levantamento de custo de uma unidade de rede WDM-PON, agregando 100 usuários por OLT.</i>	<i>161</i>
<i>Tabela 5.5 - Levantamento de custo de uma unidade de rede WDM-PON, agregando 200 usuários por OLT.</i>	<i>162</i>
<i>Tabela 5.6 – Levantamento de custo de uma unidade de rede WDM-PON, agregando 300 usuários por OLT.</i>	<i>163</i>
<i>Tabela D.1 - Características de operação do RSOA de alta PDG. Série: SOA-R-C-CO-FCA. Fornecedor: Fornecedor: CIP Technologies.</i>	<i>193</i>
<i>Tabela E.1 - Características de operação do AWG 40 canais. Número de série: AWG-F-100G-40-002-C-D-JH. Fornecedor: Pointek.</i>	<i>208</i>
<i>Tabela E.2 - Características de operação circulador óptico 3 portas bandas C+L. Número de série: PIOC-3-CL-A-2-1-6. Fornecedor: AC Photonics.</i>	<i>208</i>
<i>Tabela E.3 - Características de operação filtro Azul/Vermelho banda C. Numero de série: MWDMG – C – R – O – O – O – O – 22 – 1 – 9. Fornecedor: Oplink.</i>	<i>210</i>
<i>Tabela E.4 - Características de operação Módulo DCM. Numero de Série: SMFDK-S-020-06-10. Fornecedor: OFS, A Furukawa Company.....</i>	<i>211</i>
<i>Tabela E.5 - Características de operação do RSOA com baixa PDG. Número de série: SOA-RL-C-CO-FCA. Fornecedor: CIP Technologies.....</i>	<i>213</i>
<i>Tabela E.6 – Características de operação do espelho de Faraday. Número de série: FMR – 1550-1-0-5. 5x 35mm – SC/APCx1. Fornecedor: Optosun.....</i>	<i>214</i>
<i>Tabela E.7 - Características de operação do RSOA da ONT, incorporando o mecanismo FFCI. Número de série: MR0P0C0G12S2OTF4. Fornecedor: Mel Inc.....</i>	<i>215</i>
<i>Tabela E.8 - Características de operação do RSOA do OLT, incorporando o mecanismo DTLA. Número de serie: MR0P0C0G12S2BTS4. Fornecedor: Mel Inc.....</i>	<i>217</i>
<i>Tabela E.9 - Características de operação da fonte pré-fatiada. Número de serie: MEDF0C1G3220BTX1. Fornecedor: Mel Inc.</i>	<i>218</i>
<i>Tabela E.10 - Características de operação do acoplador 80/20. Número de serie: M-MPS30-PL30-L. Fornecedor: Mel Inc.</i>	<i>218</i>

Lista de Acrônimos

Acrônimo	Definição	Tradução
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
CDR	<i>Clock and Data Recover</i>	Recuperador de Sincronismo
CLS	<i>Centralized Light Sources</i>	Fontes Ópticas Centralizadas
CO	<i>Central Office</i>	Central do Provedor de Serviço
CR	<i>Coherent Receiver</i>	Receptor Coerente
CW	<i>Continuous Wave</i>	Onda Contínua
DCM	<i>Dispersion Compensating Module</i>	Módulo de Compensação de Dispersão
DEMUX	<i>Demultiplexer</i>	Demultiplexador em Comprimento de Onda
DFB	<i>Distributed Feedback Laser</i>	Laser de Realimentação Distribuída
DSL	<i>Digital Subscriber Line</i>	Linha Digital de Assinante
DSP	<i>Digital Signal Processing</i>	Processamento Digital de Sinais
DTLA	<i>Decision Threshold Level Adjustment</i>	Ajuste de Limiar de Nível de Decisão
DWDM	<i>Dense WDM</i>	WDM Denso
EAM	<i>Electro-Absorption Modulator</i>	Modulador de Eletro-Absorção
EDFA	<i>Erbium Doped Fiber Amplifier</i>	Amplificador à Fibra Dopado com Érbio
EDF	<i>Erbium Doped Fiber</i>	Fibra Dopada com Érbio
EIN	<i>Excess Intensity Noise</i>	Excesso de Ruído de Intensidade
E-PON	<i>Ethernet Passive Optical Network</i>	Rede Óptica Passiva Baseada no Protocolo Ethernet
ER	<i>Extinction Ratio</i>	Razão de Extinção
FEC	<i>Forward Error Correction</i>	Correção de Erros Adiante
FFCI	<i>Feed Forward Current Injection</i>	Injeção de Corrente de Alimentação Adiante
FP-LD	<i>Fabry-Pérot Laser Diode</i>	Laser Diodo de Fabry-Pérot
FR	<i>Faraday Rotator</i>	Rotacionador de Faraday
FRM	<i>Faraday Rotator Mirror</i>	Espelho Rotacionador de Faraday

FSAN	<i>Full Service Access Network</i>	Rede de Acesso de Serviço Completo
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 ponto x
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
ISI	<i>Inter-Symbol Interference</i>	Interferência Inter Simbólica
ITU-T	<i>Telecommunication Standardization Sector of International Telecommunication Union</i>	Setor de Padronização de Telecomunicações da União Internacional de Telecomunicações
HPDG	<i>High Polarization Dependence Gain</i>	Ganho com Alta Dependência ao Estado de Polarização
LD	<i>Laser Driver</i>	Conversor de sinais digital-analógicos
LED	<i>Light Emitting Diode</i>	Diodo Emissor de Luz
LIA	<i>Limiting Amplifier</i>	Amplificador Limitador
LPDG	<i>Low Polarization Dependence Gain</i>	Ganho com Baixa Dependência ao Estado de Polarização
LO	<i>Local Oscillator</i>	Oscilador Local
MUX	<i>Multiplexer</i>	Multiplexador em Comprimento de Onda
MPN	<i>Mode Partition Noise</i>	Ruído de Partição 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
ODN	<i>Optical Distribution Network</i>	Rede de Distribuição Óptica
OIL	<i>Optical Injection Locking</i>	Travamento por Injeção Óptica
OFDM	<i>Optical Frequency Division</i>	Divisão por Multiplexação em

	<i>Multiplexing</i>	Frequência Óptica
OFDM-PON	<i>Optical Frequency Division Multiplexing Passive Optical Network</i>	Rede Óptica Passiva Baseada em 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>	Analizador de Espectro Óptico
OSNR	<i>Optical Signal-To-Noise Ratio</i>	Razão Sinal-Ruído Óptica
PC	<i>Polarization Controller</i>	Controlador de Polarização
PFE	<i>Post-Filtering Effects</i>	Efeitos de Pós-Filtragem
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 de Bits Pseudo-Aleatória
PSSL	<i>Pre-Spectrum Sliced Light</i>	Fonte Óptica Pré-Fatiada
QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>	Chaveamento de Fase e 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>
R ₁	<i>Reflection Point 1</i>	Ponto de Reflexão 1
R ₂	<i>Reflection Point 2</i>	Ponto de Reflexão 2
R-I	<i>Reflection-I</i>	Reflexões Tipo-I
R-II	<i>Reflection-II</i>	Reflexões Tipo-II
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
SS	<i>Self-Seeding</i>	Autoalimentação
SSMF	<i>Standard Single-Mode Fiber</i>	Fibra Padrão Monomodo
TIA	<i>Transimpedance Amplifier</i>	Amplificador de Transimpedância
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</i>	Rede Óptica Passiva Baseada em

	<i>Multiplexing Passive Optical Network</i>	Multiplexação por Divisão no Domínio do Tempo e em Comprimento de Onda
UHDTV	<i>Ultra High Definition Television</i>	Televisão em Ultra-Alta Definição
UDWDM	<i>Ultra Dense WDM</i>	WDM Ultra-Denso
VOA	<i>Variable Optical Attenuator</i>	Atenuador Óptico Variável
XFP	<i>10 Gigabit Small-Form Factor Pluggable</i>	Transceptor 10 Gigabit Compacto e Plugável
XG-PON	<i>10 Gigabit-Capable Passive Optical Network</i>	Rede Óptica Passiva Capaz de Atender 10 Gigabit
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
WSS	<i>Wavelength Selective Switch</i>	Roteador de Comprimento de Onda

Lista de Símbolos

Siglas /Símbolo	Definição	Tradução	Unidade
I	<i>Current Injection</i>	Injeção de Corrente	(mA)
D _D	<i>Downstream Data</i>	Dados <i>Downstream</i>	#
D _{D-}	<i>Inverted Downstream Data</i>	Dados <i>Downstream</i> Invertidos	#
D _u	<i>Upstream Data</i>	Dados de <i>Upstream</i>	#
ER	<i>Extinction Ratio</i>	Razão de Extinção	(dB)
ER _D	<i>Downstream Extinction Ratio</i>	Razão de Extinção <i>Downstream</i>	(dB)
ER _{UP}	<i>Upstream Extinction Ratio</i>	Razão de Extinção <i>Upstream</i>	(dB)
P _{inj}	<i>Injection Power</i>	Potência de Injeção	(dBm)
P _{injD}	<i>Downstream Injection Power</i>	Potência de Injeção no RSOA da OLT	(dBm)
P _{injUP}	<i>Upstream Injection Power</i>	Potência de Injeção no RSOA da ONT	(dBm)
P _{SS}	<i>Self-Seeding Power</i>	Potência de Autoalimentação	(dBm)
R	<i>Reflection Ratio</i>	Razão de Reflexão	(dB)
R _I	<i>Reflection Ratio I</i>	Razão de Reflexão Tipo-I	(dB)
R _{II}	<i>Reflection Ratio II</i>	Razão de Reflexão Tipo-II	(dB)
V _{pp}	<i>Voltage Peak-to-Peak</i>	Tensão de Pico a Pico	(V)
λ	<i>Wavelength</i>	Comprimento de onda	(nm)
$\Delta\lambda$	<i>Optical Spectral Width</i>	Largura Espectral Óptica	(nm)
$\Delta\lambda_i - \Delta\lambda_j$	<i>Optical Spectral Content</i>	Conteúdo Espectral Óptico	(nm)

1. Introdução

A demanda por largura de banda e por serviços de alta qualidade, por um número crescente de usuários residenciais ou corporativos, vem aumentando rapidamente nos últimos anos, em virtude do surgimento de novos serviços de vídeo em alta definição (*High Definition Television* - HDTV) ou vídeos em ultra-alta definição (*Ultra High Definition Television* – UHD TV), os jogos interativos e a explosão na densidade de tráfego de dados em redes móveis.

Desta forma, as tecnologias de acesso empregadas atualmente no Brasil, em sua maioria baseadas na tecnologia de linha digital de assinante (*Digital Subscriber Line* - DSL), logo se tornarão insuficientes para atender requisitos de taxas de transmissão de Gb/s, em larga escala. A implantação das redes ópticas surge, então, naturalmente como alternativa a fim de atender a todos os critérios exigidos pelo panorama atual das redes de acesso.

Em decorrência da ampla largura de banda propiciada pela fibra óptica, as redes ópticas de acesso são capazes de prover capacidades de transmissão de Gb/s em alcances de dezenas de quilômetros entre o terminal de linha óptica (*Optical Line Terminal* – OLT) e as terminações de rede ópticas (*Optical Network Termination* - ONT), superando sobremaneira as limitações impostas pelas redes xDSL.

Topologias ponto a multiponto em alta segmentação, no qual o nó remoto (*Remote Node* - RN) e as redes de distribuição óptica (*Optical Distribution Network* – ODN) dispensam qualquer forma de alimentação elétrica, são as tecnologias preferenciais para esta aplicação. Essas estruturas são denominadas redes ópticas passivas (*Passive Optical Networks* - PON). A ausência de alimentação elétrica na camada física do sistema dispensa o uso de amplificadores e/ou regeneradores, permitindo um melhor gerenciamento dos custos operacionais da rede, tornando-se então uma alternativa atraente para provedoras de serviços de telecomunicações.

Entre as diversas redes PON existentes, uma estrutura de acesso ao meio, bem conhecida na literatura técnica, emprega a multiplexação por divisão no domínio do tempo (*Time Division Multiplexing* - TDM). Basicamente, a técnica consiste na divisão temporal da largura de banda disponível para o acesso dos usuários, alocando-se janelas temporais distintas para cada assinante. A **Fig.1.1** mostra uma ilustração esquemática do acesso TDM.

Nesta configuração, um único par de comprimentos de onda é compartilhado entre todas as ONTs do sistema, por meio da utilização em cascata de divisores/combinadores ópticos passivos (*splitters*). O sentido de tráfego de dados do OLT para as ONTs (*downstream*) ocorre na forma *broadcast*, ou seja, cada ONT recebe toda informação provida pelo OLT e filtra os dados que lhe são destinados por meio de um decodificador devidamente instalado.

Para o sentido de tráfego de dados dos terminais dos usuários para o OLT (*upstream*), cada ONT possui uma janela pré-temporal estabelecida para transmissão de dados destinados ao OLT, o qual é responsável por assegurar o sincronismo temporal no sistema, evitando a colisão entre os pacotes das diferentes ONTs.

Figura 1.1 - Ilustração esquemática da camada física de uma rede TDM-PON: (a) sinais *downstream* em broadcast e; (b) sinais *upstream* multiplexados em TDM.

A rede óptica passiva banda larga (*Broadband Passive Optical Network* - BPON) foi uma das primeiras estruturas de acesso TDM a surgir, padronizada pelo Setor de Padronização de Telecomunicações da União Internacional de

Telecomunicações (*Telecommunication Standardization Sector of International Telecommunication Union - ITU-T*) [2]. A rede BPON, padronizada pelo conjunto de normas da série G.983.x [3-7], tem como características básicas capacidade agregada de 622 Mb/s em 20 km de cobertura com segmentações de 64 usuários por terminal OLT. Nestas configurações, era possível entregar taxas *downstream* de 2,4 Mb/s por usuário.

Entre as tecnologias de acesso mais em uso atualmente no mundo, bem como as já padronizadas, podem-se destacar os seguintes padrões: rede óptica passiva baseada no protocolo Ethernet (*Ethernet Passive Optical Network – E-PON*) [8], rede óptica passiva capaz de atender gigabit (*Gigabit-Capable Passive Optical Network – G-PON*) [9] e rede óptica passiva capaz de atender 10 gigabit (*10-Gigabit-Capable Passive Optical Network – XG-PON*) [10].

Após a padronização da BPON, a taxa de transmissão e capacidade agregada oferecida pelas tecnologias TDM de nova geração tem evoluído de forma significativa como mostrado na **Fig. 1.2**, atingindo valores de taxas de dados *downstream* (em uma visão otimista) de até 160 Mb/s por usuário ONT.

Figura 1.2 – Principais tecnologias de acesso TDM já padronizadas. Os valores das abscissas representam taxa de transmissão *downstream* oferecido por cada topologia, considerando segmentações de 64 usuários por OLT.

Embora as tecnologias TDM-PON representem um passo significativo em oferecer banda larga a diversos usuários finais, provendo, atualmente, sistemas com capacidades agregadas entre 1,25 Gb/s à 10 Gb/s, tais arquiteturas podem não permitir o grau de ampliação eventualmente desejado pelas operadoras de telecomunicações em uma visão de longo prazo. Isso ocorre porque, em sua forma mais

básica, a largura de banda disponível para cada usuário é limitada pelo número de ONTs presentes na rede, em virtude da estrutura de compartilhamento do acesso TDM.

Adicionalmente, questões de orçamento de potência associados ao uso de *splitters* limitam o alcance físico, capacidade e máxima segmentação oferecidas pelas redes TDM. Desta forma, em um cenário futuro, onde redes de supercapacidade, da ordem de 100 Gb/s, 200 Gb/s e 400 Gb/s sejam necessárias a fim de atender a demanda no acesso óptico de segmentações da ordem de 512, 1024 ONTs por OLT em distâncias de cobertura superiores a 20 km, as técnicas em acesso TDM tornar-se-ão laboriosas ou insuficientes para aplicação em larga escala, pois demandariam o desenvolvimento de eletrônica com respostas ultrarrápidas (da ordem de 100 GHz), exigindo custos operacionais excessivos.

Neste contexto, uma alternativa abordada na literatura técnica [11] com o intuito de elevar a capacidade, número de usuários atendidos e a largura de banda destinada a cada assinante, com simplificação nos protocolos de gerenciamento da rede, se dá por meio do emprego de redes ópticas passivas baseadas na multiplexação por divisão em comprimento de onda (*Wavelength Division Multiplexing Passive Optical Network* – WDM-PON). A **Fig 1.3** ilustra esquematicamente uma topologia WDM-PON convencional [11].

Em redes WDM-PON, cada ONT recebe comprimentos de onda permanentes e distintos dos demais assinantes em ambos os sentidos de tráfego, para comunicação com o OLT. Desta forma, não há qualquer interação e/ou compartilhamento de banda entre os usuários da rede, o que permite uma simplificação nos protocolos de acesso ao meio e nos circuitos eletrônicos para os terminais ONTs.

Um elemento combinador (*Multiplexer* – Mux) e separador (*Demultiplexer* – Demux) de comprimentos de onda é responsável por multiplexar/demultiplexar os comprimentos de onda do sistema, permitindo o emprego de uma topologia física ponto-a-multiponto, embora cada usuário possua um enlace virtual ponto-a-ponto com o terminal.

Comparando-se às tecnologias TDM, a taxa de dados por assinante oferecida pelos sistemas WDM-PON é limitada apenas pela capacidade do transmissor associado, e não pelo número de usuários por OLT, o que faz com a banda por usuário seja muito ampla (da ordem de Gb/s). Desta forma, uma gama de serviços distintos, em diferentes taxas, pode ser oferecida na rede, o que permite uma flexibilidade muito grande em evolução na capacidade de banda.

Analisando-se a Fig. 1.3, pode-se dizer que a questão fundamental do acesso WDM é a disponibilização dos vários comprimentos de onda requisitados na rede. Em linhas gerais, a cada usuário é atribuído um transmissor que opera em um comprimento de onda específico, tanto para o lado *downstream* como para o *upstream*. Desta forma, uma quantidade de $2n$ elementos ativos distintos é necessária para alocação dos n usuários na rede.

Figura 1.3 – Ilustração esquemática da camada física uma rede WDM-PON: (a) sinais *downstream* multiplexados em WDM e; (b) sinais *upstream* multiplexados em WDM.

Esta configuração de dois tipos de transmissores de onda por enlace ONT-OLT leva a custos excessivos de gerenciamento, o que torna essa topologia dispendiosa para instalação em massa. Essa é a principal barreira para implantação de sistemas WDM-PON, e foi identificada desde os primórdios da pesquisa na área.

Definindo-se uma janela de ocupação espectral da rede, o caso ideal no acesso WDM seria o desenvolvimento de um único tipo de transmissor que pudesse prover qualquer um dos comprimentos de onda dentro da faixa de alocação da rede, bem como

ser usado em qualquer terminal de usuário do sistema, e não restrito à operação em único comprimento de onda específico como na **Fig. 1.3**. Desta forma, ter-se-iam ONTs agnósticas em comprimento de onda, o que levaria a uma relação custo-benefício atrativa.

Para tal, uma opção consagrada na literatura técnica [1] é o emprego de fontes ópticas que possam ser usadas em quaisquer transmissores do OLT e em quaisquer ONTs do sistema, independentemente do(s) comprimento(s) de onda pré-estabelecido(s) para o terminal do usuário em questão.

Essa alternativa é conhecida na literatura como transmissor agnóstico em comprimento de onda (transmissor *colorless* ou ainda ONT *colorless*), e vem sendo empregada vastamente na pesquisa em redes WDM-PON desde 1994 [1]. Desta forma, os custos operacionais são minimizados, em virtude do emprego/desenvolvimento de um único tipo de circuito eletrônico de transmissão em comprimento de onda para toda a rede.

De fato, o emprego de transmissores *colorless* simplifica sobremaneira o inventário de circuitos de transmissão para os terminais do usuário, permitindo uma melhor forma de gerenciamento de custos para as operadoras de telecomunicações. Entretanto, embora o uso de ONTs *colorless* seja uma característica essencial em redes WDM-PON, esta não é a única questão a ser atendida nos projetos de sistemas multi-comprimento de onda.

Aliada ao requisito *colorless*, buscam-se topologias de acesso WDM que permitam, em longo prazo, o aumento do número de usuários conectados na rede, bem como da capacidade oferecida pelo sistema WDM-PON, mantendo o nível de modificações na estrutura da rede o menor possível.

Neste contexto, um dos aspectos importantes em redes WDM-PON é a alocação espectral da rede. Uma vez que se busca a agregação de diversos usuários no sistema a fim de amortizar o custo operacional, as configurações usuais conhecidas do estado da técnica são segmentações de 44 ou 88 canais por OLT, espaçados nas grades de 100 GHz e 50 GHz, respectivamente. Uma vez que se emprega comumente um par de comprimentos de onda pré-estabelecido por enlace OLT-ONT, duas bandas ópticas (~ 70 nm) são ocupadas para alocação dos canais nos dois sentidos de tráfego.

Essa configuração de ocupação de duas janelas ópticas não permite um uso eficiente do espectro óptico disponível, restringe a capacidade de evolução da rede e reflete diretamente no aumento dos custos operacionais do sistema, em virtude da

manutenção de elementos ativos em duas bandas distintas. Além disso, questões relativas a faixa de operação espectral dos elementos de roteamento de comprimento de onda e dos $2n$ transmissores presentes na rede, bem como o respectivo alinhamento espectral entre eles, devem ser levados em conta no projeto WDM-PON.

Finalmente, a última observação se refere à taxa dos transmissores e formatos de modulação empregados. No acesso óptico, especificamente, aplicações em que a fibra chega o mais próximo possível aos usuários finais, alto desempenho não pode ser alcançado à custa de equipamentos e sistemas de alta complexidade tecnológica.

O entendimento que ambas as características, alto desempenho e baixa complexidade, são simultaneamente essenciais, leva à busca de alternativas que explorem técnicas simplificadas para transmissão/detecção e ao mesmo tempo garantam longo, alcance e elevado número de usuários por OLT. Desta forma, os formatos de modulação em intensidade são uma das preferências para WDM-PON.

Somada a todas as características descritas, a configuração escolhida deve ser capaz de propiciar uma migração suave e gradativa de capacidade de taxas de 622 Mb/s a 2,5 Gb/s (10 Gb/s, cenário otimista) oferecidas por ONT, bem como permitir o aumento do número de usuários ONTs/comprimentos de onda no sistema, com poucas alterações na estrutura física da rede e/ou nos equipamentos dos terminais do usuário.

1.1 Proposta e Objetivos

Desta forma, o objetivo central deste trabalho é propor uma nova topologia WDM-PON que possa atender aos requisitos de alocação espectral, capacidade de migração gradativa e custos operacionais descritos, preservando alta capacidade, elevada segmentação e distâncias de cobertura.

A originalidade desta pesquisa reside, então, na proposta de uma nova topologia de reuso de portadora óptica, a qual combina sinais autoalimentados no OLT e remodulação óptica na ONT. Tendo em vista o panorama exposto, neste trabalho, são estudadas e analisadas, por meio de investigações experimentais, redes do tipo WDM-PON para cenários de nova geração, no âmbito acesso (20 km) e acesso estendido (100 km) em taxas simétricas de 1,25 Gb/s com uso de modulação em intensidade.

1.2 Metodologia

Para este fim, transmissores do tipo amplificadores ópticos semicondutores refletivos (*Reflective Semiconductor Optical Amplifiers* – RSOAs) e fontes ópticas banda larga baseadas em emissão espontânea amplificada (*Amplified Spontaneous Emission* - ASE) são utilizados como fontes *colorless*. Em termos de alocação espectral, explora-se a técnica de reuso de portadora óptica, a qual permite o compartilhamento do mesmo comprimento de onda por enlace OLT-ONT, garantindo a forma mais eficiente de se utilizar o espectro óptico.

Como metodologia de estudo, vários parâmetros e grandezas foram medidos e monitorados, tais como caracterizações óptico-elétricas, avaliações de desempenho de taxa de erro de bit (*Bit Error Rate* - BER), penalidades em potência (para valores de BER de 10^{-10}) como função do comprimento do enlace, de parâmetros tais como comprimento de onda, níveis de razão de extinção *downstream* e *upstream*, bem como diagramas de olhos ópticos e espectros ópticos e, finalmente, largura de ocupação espectral e conteúdo espectral óptico.

No que se refere à proposta original da tese, as investigações experimentais são conduzidas sob três perspectivas:

- i) Ausência de circuitos eletrônicos de remodulação óptica, visando cenários de curto alcance (até 20 km). Nessa primeira configuração, a topologia proposta é apresentada em detalhes e é investigada a tolerância sistêmica em relação aos níveis de razão de extinção, potência de autoalimentação e potência de injeção;
- ii) Topologia proposta apoiada em técnicas de remodulação optoeletrônica, visando cenário de longo alcance (100 km). Aqui, o interesse reside nos estudos de tolerância sistêmica ao impacto de dispersão cromática, efeitos de pós-filtragem e reflexões diretas;
- iii) São apresentadas análises comparativas de desempenho sistêmico, custos operacionais (quando possível) e viabilidade de expansão para o cenário de até 10 Gb/s simétricos por enlace ONT-OLT entre a topologia combinada e as técnicas mais robustas de apagamento e reuso de portadora óptica no domínio da intensidade, com o intuito de destacar com clareza o ganho e melhorias decorrentes da proposta da tese.

1.3 Resultados e Contribuições Originais

Como contribuições originais, para o cenário de curto alcance, a topologia proposta apresenta um ganho de 7 dB em orçamento de potência para os níveis de potência de injeção dos RSOAs da ONT, uma margem de 2,5 dB no nível de razão de extinção *downstream*, oferecendo a melhor configuração relação custo-benefício em comparação aos trabalhos de apagamento e reuso de portadora óptica encontrados na literatura, na ausência de mecanismos adicionais de apagamento (eletrônico ou óptico).

No segundo cenário, análises sobre o impacto dos efeitos degradantes de ASE no desempenho sistêmico da topologia combinada revelam um aumento da tolerância ao impacto dos efeitos de pós-filtragem e dispersão cromática, ultrapassando o alcance dos sistemas convencionais em 40 km tanto no sentido *downstream* como na configuração bidirecional.

Estas características resultam em uma nova topologia e sistema de operação para ONTs refletivas em redes WDM-PON, a qual proporciona maior alcance, maior tolerância ao impacto de dispersão cromática (*Chromatic Dispersion* – CD), efeitos de pós-filtragem (*Post-Filtering Effects* – PFE) e redução na complexidade da rede e melhor relação custo-benefício frente aos sistemas de reuso de portadora óptica no domínio da intensidade de ASE-fatiada conhecidos na literatura.

Finalmente, a topologia combinada mostra-se como a alternativa mais viável para sistemas de reuso de portadora óptica no domínio da intensidade, no quesito expansão gradativa em taxas de até 10 Gb/s simétricos por enlace ONT-OLT

Acredita-se que esse cenário possa ser expandido para capacidades de 80 x 1,25 Gb/s (100 Gb/s) na grade WDM de 50 GHz, ou até mesmo para transmissões bidirecionais a 10 Gb /s, com o desenvolvimento de técnicas eletrônicas de apagamento ópticas e equalização eletrônica apropriadas.

1.4 Organização do Trabalho

No *Capítulo 2, Redes Ópticas Passivas*, são descritas as principais topologias de acesso óptico encontradas na literatura técnica, bem como discussões sobre a evolução das redes PON.

No *Capítulo 3, Redes WDM-PON*, são apresentadas as principais topologias de acesso óptico em WDM baseadas em transmissão em intensidade e detecção direta encontradas na literatura técnica, situando a proposta central deste trabalho.

No *Capítulo 4, Técnicas Combinadas de Autoalimentação e Reuso de Comprimento de Onda*, estão descritos os procedimentos experimentais e resultados obtidos desta configuração em distâncias de cobertura no âmbito acesso (20 km). Contribuições originais desta pesquisa estão destacadas nesse capítulo.

No *Capítulo 5, Técnicas Combinadas de Autoalimentação e Reuso de Comprimento de Onda, Apoiadas em Remodulação Optoeletrônica*, estão apresentados os procedimentos experimentais e resultados obtidos desta configuração em distâncias de cobertura no âmbito acesso de longo alcance (até 100 km). Contribuições originais desta pesquisa estão destacadas nesse capítulo.

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

Por fim, nos *Apêndices A,B,C,D e E* estão apresentados, respectivamente, as técnicas de apagamento óptico, os principais efeitos degradantes encontrados em sistemas de reuso de portadora óptica, as principais técnicas de mitigação desses efeitos degradantes, avaliação de transmissão e caracterizações ópticas da Topologia banda C compartilhada e os principais materiais de consumo e equipamentos utilizados nos procedimentos experimentais. Adicionalmente, no início do *Apêndice D* está descrito, cronologicamente, os principais eventos que levaram ao desenvolvimento das técnicas combinadas de autoalimentação e reuso de portadora óptica.

1.5 Produção Científica Vinculada ao Trabalho

Foram elaboradas publicações, diretamente ligadas ao tema central dessa proposta, em revistas internacionais de alto fator de impacto e congressos internacionais renomados, atestando, então, as contribuições originais provenientes desta proposta de tese. Entre os vários trabalhos obtidos, podem ser destacados os artigos publicados no *Journal of Lightwave Technology (JLT)*, *Optical Fiber Conference (OFC 2013)*, *Journal of Optical Communications and Networking (JOCN)*.

Abaixo estão listados os 10 artigos publicados em coautoria com o orientador e coorientador durante o desenvolvido deste trabalho de doutorado.

- Publicações de Trabalhos Completos em Periódicos Indexados

1. U. R. Duarte; J. B. Rosolem, e. M. A. Romero, “Sistemas de acesso WDM-PON com taxas de 1,25 Gb/s por usuário: vantagens e desafios”, *Cadernos CPQD Tecnologia*, 7, No. 2, pp. 125-138, (2011);
2. U. R. Duarte, R. S. Penze, F. R. Pereira, F. F. Padela, J. B. Rosolem, e M. A. Romero, “*Combined self-seeding and carrier remodulation scheme for WDM-PON*”, *Journal of Lightwave Technology*, 31, No. 8, pp 1323-1330, (2013);
3. U. R. Duarte, J. B. Rosolem, R. S. Penze, e M. A. Romero, “*Analysis of ASE-Related Impairments on Wavelength-Reuse WDM-PON Based on Self-Seeded Reflective-SOAs*”, *Journal of Optical Communications and Networking*, 6, No. 9, pp. 773-781, (2014).

- Publicações de Trabalhos Completos em Congressos

1. U. R. Duarte, G.E.R de Paiva, F. R. Pereira, E. W. Bezerra, J. B. Rosolem, e M. A. Romero, “*A WDM-PON Implementation Employing Spectrum Sliced ASE Source, Dispersion Management and PIN Receivers*”, **SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference**, Anais do IMOC 2011, pp. 89-91, (2011).
2. G. E. R. de Paiva, M. M. Freire, U. R. Duarte, A. B.. Sassi, A. C. Bizetti, J. F. Pozzuto, J. B. Rosolem, e M. A. Romero, “*80 km Extended Gigabit Passive Optical Network*”, **SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference**, Anais do IMOC 2011, pp. 35-39, (2011).
3. U. R. Duarte, J. B. Rosolem, and M. A. Romero, “*A Long-Reach WDM-PON Feeder Employing EDFA-Raman Amplification and ASE Injected R-SOAs for Optical-Wireless Access Networks*”, *International Topical Meeting on Microwave Photonics*, Anais do MWP 2012, 1, pp. 248-251, (2012).
4. U. R. Duarte, J. B. Rosolem, and M. A. Romero, “*Extended WDM-PON Employing High Polarization Dependence R-SOAs and Hybrid EDFA/Raman*”, *Access Networks and In-house Communications*, Anais do ANIC 2012, paper **JTu5A.3**, (2012).
5. U. R. Duarte, J. B. Rosolem, e M. A. Romero, “*Configurações de Longo Alcance para Redes de Acesso WDM-PON*”, **XV Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica**, Anais do Momag 2012, pp. 1-5, (2012).

6. U. R. Duarte, R. S. Penze, J. B. Rosolem, F. R. Pereira, F. F. Padela, e M. A. Romero, “*Combined self-seeding and carrier remodulation method for reflective transmitters in WDM-PON*”, ***Optical Fiber Communications Conference***, Anais do OFC 2013, paper **JTh2A.72**, (2013).
7. U. R. Duarte, J. B. Rosolem, R. S. Penze, A. A. Leonardi, e M. A. Romero, “*Enhancement of Chromatic Dispersion and Post-Filtering Effects Tolerances on Spectrum-Sliced WDM-PONs Using Self-Seeded Reflective-SOAs*”, ***International Telecommunications Symposium***, Anais do ITS 2014, **pp. 1-5**, (2014).

2. Redes Ópticas Passivas

Conforme discutido no **Cap. 1**, o surgimento de novos serviços e a crescente demanda por banda larga vem impulsionando cada vez mais as modificações no panorama das redes de acesso para adequação da capacidade oferecida pelos provedores de telecomunicações.

Pode-se dizer que os esquemas baseados em redes xDSL e redes híbridas fibra-coaxial (*Hybrid Fiber-Coaxial Cab* - HFC) têm, momentaneamente, atendido aos requisitos mínimos de demanda no acesso residencial, para taxas de transmissão de até 10 Mb/s em cenários de média escala.

Entretanto, o panorama atual das redes de acesso, em termos de diversidade de serviços e volume de assinantes, tem exigido a migração de sistemas com capacidade de alguns Mb/s para sistemas de dezenas de Gb/s, afastando-se daquelas tecnologias que utilizam da estrutura das redes de fio cobre empregadas massivamente anos atrás. As características almejadas para as redes de acesso de nova geração estão muito além dos limites impostos pelas redes HFC e xDSL em termos de distância de cobertura, segmentação e taxas de transmissão.

Conforme será apresentado no **Cap. 3**, sistemas de acesso capazes de oferecer taxas de 1 Gb/s a 10 Gb/s por usuário podem ser identificados na literatura e em portfólios comerciais, embora a maturidade tecnológica, as atividades de padronização e a disponibilização comercial desses sistemas necessitem ainda de alguns anos para atingir o limiar e/ou a adequação necessária para produção em larga escala.

Em linhas gerais, a médio/longo prazo, a solução para a limitação de capacidade imposta pelas redes de acesso de cobre legadas é estender a fibra óptica o mais próximo possível do usuário final. Busca-se o compartilhamento da enorme capacidade oferecida pela fibra óptica em grupos ou subgrupos de usuários, oferecendo aos provedores de acesso a amortização de seus custos de instalação e operação, tendo em vista o ganho de escala para o atendimento de um grande número de assinantes de serviços.

Aliado a todas as características já descritas, as redes de acesso à fibra óptica que proveem a melhor relação custo-benefício são aquelas que dispensam qualquer equipamento ativo ao longo do seu alcance físico, mantendo a simplicidade da arquitetura passiva, bem como propiciando a redução do consumo de energia requerido. Desta forma, as redes ópticas passivas, PON, desempenham, então, um papel fundamental em tecnologias de acesso de nova geração.

Tendo em vista o panorama exposto, neste capítulo são apresentadas, e analisadas em detalhes, as redes PON convencionais, já padronizadas (a partir de 2003), e a sua evolução histórica, bem como as alternativas para as redes passivas de próxima geração (*Next Generation Passive Optical Network* – NG-PON). Características, vantagens e limitações técnicas, de cada PON levantada, são também avaliadas.

O **Capítulo** está organizado da seguinte forma: na **Seção 2.1** apresentam-se as características gerais de redes PON. Na **Seção 2.2** são descritos os sistemas baseado no acesso TDM, seguido das tecnologias G-PON (**Seção 2.3**), NG-PON₁ (**Seção 2.4**) e NG-PON₂ (**Seção 2.5**). Em **2.6** são levantados os desafios e possíveis requisitos para as próximas redes NG-PON, finalizando em **2.7** com as algumas alternativas para as redes PON de nova geração e a motivação para a pesquisa em redes de acesso WDM-PON.

2.1 Características Gerais de Redes PON

A introdução da fibra óptica como meio de transmissão de dados oferece uma maneira mais eficiente e flexível de desenvolver tecnologias de acesso óptico de alta capacidade por meio de uma topologia em tronco ponto-multiponto, como mostrado na **Fig. 2.1**.

Em linhas gerais, uma rede PON é composta dos seguintes elementos:

- terminal OLT, localizado no escritório do provedor de serviço (*Central Office* – CO), onde estão os aparatos para transmissão dos dados *downstream* (*Downstream Transmitter* – Tx Dw) e detecção dos dados *upstream* (*Upstream Receiver* – Rx Up);
- vários terminais ONTs, ou unidades de redes ópticas (*Optical Network Unit* – ONU), onde em cada ONT estão localizados os aparatos para transmissão (*Upstream Transmitter* – Tx Up) e detecção dos dados (*Downstream Receiver* – Rx Dw) *upstream* e *downstream*, respectivamente, e;
- um, ou vários, armários de rua, ou caixa de emenda, denominados nós remotos, onde estão localizados elementos passivos para direcionamento dos tráfegos *downstream* (para as ONTs) e *upstream* (para o OLT);
- fibra alimentadora, a qual conecta o chassis OLT até o armário de rua e;
- fibras distribuidoras, conectando a ONT ao armário de rua.

As estruturas comumente empregadas em redes PONs são aquelas onde a maior parte do trecho físico para transmissão de dados se dá pelo enlace de fibra óptica, chegando o mais próximo possível dos terminais dos usuários. Esses esquemas são conhecidos como fibra até o ponto “x” (*Fiber to the x* – FTTx), onde o “x” refere-se a um local de terminação da rede óptica.

Dependendo da localização da terminação de rede óptica e do comprimento do enlace das fibras distribuidoras, o “x” pode se referir a um prédio, ou fibra até o prédio (*Fiber to the Building* – FTTB), a um armário de rua, ou fibra até o meio fio (*Fiber to the Curb* – FTTC), ou até o estabelecimento de um usuário, ou fibra até a residência (*Fiber to the Home* – FTTH).

Figura 2.1 - Ilustração da camada física de alguns esquemas FTTx encontrados em redes PON.

Essa topologia passiva permite o oferecimento de uma variedade de serviços de altas taxas (ordem de Gb/s) para uma diversidade de usuários em uma mesma rede, FTTB, FTTC, FTTH, etc, em algumas dezenas de quilômetros, atendendo a uma capilaridade muito superior do que as redes xDSL. Adicionalmente, essa configuração provê uma clara redução nos custos de operação, em virtude da metragem reduzida de fibras ópticas requeridas pelo sistema ponto-a-ponto, bem como pelo compartilhamento de uma estrutura física comum a diversos usuários.

Entre as redes PONs existentes, redes ópticas passivas baseadas em multiplexação por divisão no tempo são as tecnologias mais utilizadas atualmente, sendo assunto da **Seção 2.2**.

2.2 Redes TDM

Uma ilustração esquemática de uma rede TDM-PON está mostrada na **Fig. 2.2**.

Figura 2.2 - Ilustração esquemática da camada física de redes TDM. λ_1 e λ_2 referem-se aos comprimentos de onda dos sentidos *downstream* e *upstream*, respectivamente.

Neste tipo de arquitetura passiva, um único par de comprimentos de onda é compartilhado entre um conjunto de ONTs, por meio do emprego de divisores/combinadores de potência presentes no nó remoto. A característica de relativa invariância das propriedades ópticas destes elementos em uma larga faixa de comprimento de onda (1260 a 1600 nm) e temperatura permite dispensar quaisquer formas de componentes ativos, como câmaras de climatização, por exemplo, para controle e estabilidade de suas funcionalidades.

Nestes sistemas, o tráfego de dados nos sinais de descida, *downstream*, ocorre na forma de *broadcast*, ou seja, cada terminal ONT recebe todos os pacotes *downstream* da

rede provenientes do terminal OLT, filtrando os dados que lhe são destinados por meio de um codificador devidamente instalado em cada aparato ONT.

Já no sentido de tráfego de dados dos sinais de subida, *upstream*, em virtude do compartilhamento do mesmo comprimento de onda, cada ONT possui uma janela temporal pré-estabelecida (acesso em TDM) para fazer a solicitação de dados ao terminal OLT, o qual é responsável por assegurar o sincronismo no sistema, evitando, assim, a colisão dos pacotes.

Finalmente, um acoplador de sinais WDM está presente nas placas de transmissão (*front-end*) do OLT e ONT, com o intuito de separar os sinais de descida e subida.

Como consequência da estrutura de acesso em TDM, a taxa de transmissão *downstream/upstream* entregue por ONT é dividida e limitada pela quantidade de usuários conectados por OLT.

Entretanto, devido à relativamente baixa complexidade tecnológica exigida para implementação de topologias TDM-PON, bem como a alta capacidade e capilaridade oferecidas pelo acesso TDM frente às configurações xDSL, essas redes de acesso óptico vêm sendo usadas como as tecnologias preferenciais para implantação dos sistemas FTTx de primeira geração, ou seja, sistemas com capacidades agregadas de até 10 Gb/s.

As atividades de padronização dessas tecnologias PON surgiram em 1995 com a criação da BPON e da EPON em 2000, sendo o grupo rede de acesso de serviço completo (*Full Service Access Network – FSAN*) responsável por essas atividades. A tecnologia BPON opera em taxas de 155 Mb/s ou 622 Mb/s para o sentido *downstream* e 155 Mb/s para o *upstream*, e pode ser considerada já uma tecnologia óptica legada, visto que poucos provedores de serviço a utilizam.

Para o padrão EPON, capacidade agregada de 1 Gb/s é oferecida nos dois sentidos de tráfego, usando o canal de 1490 nm para *downstream* e 1310 para o *upstream*. Serviços adicionais, como transmissão de vídeo sob demanda, por exemplo, também estão disponíveis por meio da alocação do canal de 1550 nm. Taxas simétricas de 30 Mbs e 60 Mbs por ONT, respectivamente, podem ser alcançado em segmentações de 16 e 32 usuários por OLT.

Embora o padrão EPON tenha propiciado um avanço significativo em termos de taxas de transmissão frente ao BPON, uma das tecnologias ópticas da primeira geração PON que ganhou muito destaque entre as redes TDM-PON, reconhecida atualmente como uma das líderes em acesso óptico, são as redes do tipo G-PON, as quais estão

padronizadas pelo conjunto de normas da série G.984.x [8, 12-17] cujo processo foi iniciado em 2003. Nas próximas seções será dado enfoque nas tecnologias já padronizadas por estes grupos a partir do G-PON.

2.3 G-PON

A **Fig. 2.3** ilustra esquematicamente uma rede do tipo G-PON. Tais sistemas são capazes de oferecer uma capacidade agregada de 2,5 Gb/s e 1,25 Gb/s, respectivamente, para os sentidos *downstream* e *upstream*, atendendo segmentações de até 128 usuários por OLT (1:128) previstas pela norma [8], embora as configurações usuais sejam de 1:32 e 1:64, em distâncias de até 20 km, ou 60 km com emprego de amplificadores ou repetidores [16].

Figura 2.3 - Ilustração esquemática da camada física uma rede G-PON.

Em linhas gerais, uma rede G-PON, capaz de fornecer serviços de dados e voz, é composta dos seguintes elementos óptico-eletrônicos:

- OLT G-PON: transmissores modulados em intensidade e modo contínuo, com comprimentos de onda de operação na janela óptica de 1480 a 1500 nm. Receptores habilitados para detecção de sinais ópticos modulados em intensidade e modo rajada, com faixa ampla de comprimento de onda de operação (1260 a 1600 nm). Acoplador WDM nas bandas 1310/1490 nm para

direcionamento dos tráfegos *downstream* e *upstream*. Todos esses elementos podem ser integrados em um único módulo, permitindo a implementação de um transceptor compacto plugável (*Small Form-Factor Pluggable* – SFP);

- ONTs G-PON: transmissores modulados em intensidade e modo rajada, com comprimentos de onda de operação na janela óptica de 1290 a 1330 nm [15]. Receptores habilitados para detecção de sinais ópticos modulados em intensidade e modo contínuo, com faixa ampla de operação em comprimento de onda (1260 a 1600 nm). Acoplador WDM nas bandas 1310/1490 nm para direcionamento dos tráfegos *downstream* e *upstream*. Todos esses elementos podem ser integrados em um único módulo, permitindo a confecção de um SFP ou um transceptor compacto soldável (*Small Form-Factor* – SFF);
- Armário de rua: divisores, combinadores ópticos.

Em termos de componentes ópticos e eletrônicos, nas ONTs são usados, preferencialmente, diodo *laser* de Fabry-Pérot (*Fabry-Pérot Laser Diode* – FP-LD) diretamente modulados como fontes ópticas, para transmissão *upstream*, e receptores baseados em diodos p-intrínseco-n (*p-intrinsc-n* - PIN), para detecção dos sinais *downstream*. Ambos os dispositivos operam, de preferência, com controladores de temperatura simplificados (placas para dissipação de calor).

Deve-se notar que, embora lasers de FP-LD convencionais exibam perfil espectral multimodo, a janela óptica disponível para transmissão *upstream* (~ 40 nm) [15] é maior que a largura de banda de operação do dispositivo, bem como a banda de passagem do acoplador de sinais WDM, mesmo com eventuais desvios em frequência em decorrência das mudanças de temperatura no ambiente que a ONT se encontra.

A escolha dos lasers e receptores nos terminais do usuário é definida, basicamente, pelo custo total por unidade, em virtude da quantidade de assinantes da rede, exigindo o uso de componentes de baixo custo. Receptores PIN e fontes ópticas FP-LD oferecem um custo atrativo, e suas características de operação são “quase invariantes” em uma larga faixa de temperatura, sendo, portanto, uma das escolhas preferências nos projetos de ONTs.

Para o lado OLT utilizam-se, comumente, lasers de realimentação distribuída (*Distributed Feedback Laser* – DFB) como fonte óptica, embora FP-LDs com um controle automático de temperatura sejam também uma opção, e receptores baseados em fotodiodos avalanche (*Avanlanche Photo-Diode* – APD).

Para o terminal de linha óptica o custo da unidade não é o fator limitante, mas sim as dimensões físicas e a relação custo-benefício oferecida pela tecnologia em termos de capacidade dos equipamentos, pois um único transmissor e receptor é compartilhado entre todos os usuários da rede, levando a critérios mais flexíveis na escolha dos elementos ópticos e eletrônicos para o terminal. Desta forma, existe margem de custo para o uso de controladores de temperatura e lasers mais robustos, embora os ambientes em que os OLT se localizam já sejam, em parte, climatizados.

Receptores do tipo APD são a preferência para elementos de detecção dos dados *upstream*, em virtude das altas perdas impostas pela janela óptica de 1300 nm, propiciando a uma margem em orçamento de potência confortável para este sentido de tráfego.

Finalmente, para os combinadores de sinais WDM, as únicas exigências são projetos que resultem em elementos passivos com alto nível de isolamento inter-bandas (superior a 40 dB), com o intuito de minimizar efeitos de diafonia óptica (*optical cross-talk*), e banda passante em comprimentos de onda dentro das janelas definidas para os sentidos de tráfego.

Embora a tecnologia G-PON tenha se apresentado como um passo significativo para prover banda larga a diversos usuários situados a algumas dezenas de km dos terminais OLT em sistemas FTTx, tal sistema não é ainda capaz de oferecer um grau elevado de capacidade de transmissão, em virtude da sua estrutura de acesso múltiplo ao meio em TDM, a qual permite fornecer, no máximo, taxas (otimistas) de 40 Mb/s por ONT (2,50 Gb/s compartilhados entre 64 usuários por terminal OLT).

Em termos de evolução do G-PON, a menos que a capacidade em Gb/s oferecida pelo OLT aumente (ou o número de ONTs decresça, o que é inviável do ponto de vista de custo operacional), é impossível oferecer taxas maiores às ONTs ou, até mesmo, alocar um número maior de usuários na rede, sem comprometer em demasiado o orçamento de potência e/ou a qualidade de serviços que demandem altas taxas.

Adicionalmente, é indispensável que as características da nova geração de OLTs, ou das novas tecnologias TDM de maiores capacidades, permita o compartilhamento, se necessário, da mesma infraestrutura de fibras já instaladas e em uso pelas redes ópticas legadas por questões de custos, coexistindo com o Gigabit-PON. Desta forma, caso as operadoras optem pela evolução dos sistemas G-PON, os usuários da rede legada podem ainda ser mantidos, e os componentes passivos, presentes nos armários de rua, preservados.

Existem duas opções de topologias de migração para as novas tecnologias de acesso: cenário de coexistência com as redes legadas, onde já existe uma rede óptica de geração anterior operando, também conhecido como *brown field* e; cenário onde não existem fibras instaladas e nem tecnologias ópticas legadas, conhecido como *green field*.

Entretanto, devido à estrutura de compartilhamento de banda e canal óptico das redes TDM-PON, as migrações para novas tecnologias de acesso TDM, bem como a coexistência com as redes legadas, só são possíveis por meio da alocação espectral de janelas ópticas distintas daquelas já definidas para o G-PON.

As próximas seções têm por objetivo apresentar as tecnologias PON em acesso TDM posteriores a padronização do G-PON, denominadas redes NG-PON, identificando suas principais características, vantagens e limitações.

2.4 XG-PON (NG-PON₁)

Após a padronização do G-PON, a evolução da capacidade dos sistemas de acesso óptico convergiu para o padrão XG-PON, embora alternativas de sistemas com capacidade agregadas de 10 Gb/s tenham surgido na época [18-21]. A estrutura física e lógica da rede XG-PON é muito parecida com a dos sistemas G-PON, conforme pode ser notado pela **Fig. 2.4**, diferindo-se apenas nos valores das taxas nominais, plano de comprimento de onda, banda passante dos acopladores de sinais WDM e na forma do empacotamento mecânico dos transceptores.

Nesse novo padrão, utilizam-se elementos OLT XG-PON e ONT XG-PON, respectivamente, os quais transmitem e detectam sinais modulados em intensidade à taxas de 10 Gb/s (2,5 Gb/s) e 2,5 Gb/s (10 Gb/s). O empacotamento mecânico dessas unidades, disponibilizados comercialmente, pode ser encontrado na forma de transceptor 10 gigabit compacto e plugável (10 *Gigabit Small Form Factor Pluggable* - XFP).

Esta arquitetura é capaz de oferecer uma capacidade de 10 Gb/s e 2,5 Gb/s para os tráfegos *downstream* (janela de 1575 a 1581 nm) e *upstream* (janela de 1260 a 1280 nm [9]), respectivamente, em segmentações de no mínimo 64 ONTs por OLT, embora seja possível atingir até 256 usuários por PON, sendo este o desejo da maioria das operadoras de telecomunicações, como forma de aproveitar a relação custo-benefício

oferecida pela topologia. Esta tecnologia está padronizada pelo conjunto de normas da série G.987.x [9, 22-24], processo iniciado em 2009.

Figura 2.4 - Ilustração esquemática da camada física uma rede XG-PON.

Em termos de elementos ativos, utilizam-se lasers DFB com controle automático de temperatura como fontes ópticas, em virtude da estreita largura espectral disponível nas bandas definidas para alocação dos canais *upstream* e *downstream* e do impacto da dispersão cromática em altas taxas, principalmente para os sinais *downstream*. Os receptores são baseados em PIN e APD, para os lados cliente e OLT, respectivamente.

Com essa nova tecnologia é possível fornecer (em cenários otimistas) taxas de 160 Mb/s por terminal ONT, quatro vezes a capacidade oferecida pelo G-PON em uma segmentação de 1:64. Adicionalmente, é possível a sobreposição (*overlay*) de redes G-PON e XG-PON em uma mesma infraestrutura de fibra, em virtude da alocação espectral de diferentes janelas ópticas para ambas as tecnologias.

Embora estudos intensivos venham sendo realizados em topologias XG-PON, XG-PON estendida em redes G-PON/XG-PON *overlay* [25, 26], em longo prazo, a tecnologia XG-PON apresenta as mesmas limitações tecnológicas encontradas na rede G-PON e *stacked* G-PON em termos de banda oferecida por usuário, superando apenas em quantidade de assinantes por terminal OLT.

Novamente, em termos de migração para tecnologias de acesso com capacidades superiores, caso as operadoras optem pela evolução dos sistemas XG-PON, é desejável que o padrão PON de nova geração (NG-PON₂) atenda aos critérios de coexistência

com a rede legada (G-PON e XG-PON, nesse caso), por questões de custo, e alocação espectral em janelas ópticas distintas.

2.5 TWDM-PON (NG-PON₂)

Após a consolidação do padrão XG-PON em meados de 2011, a taxa nominal alvo definida pelo FSAN para a geração posterior (NG-PON₂) era de, no mínimo, 40 Gb/s para o sentido *downstream*. A capacidade agregada oferecida pela NG-PON₂ poderia ser alcançada por meio de duas vertentes:

- aumento das taxas individuais dos canais ópticos *downstream* (de 10 Gb/s para 40 Gb/s);
- empilhamento (*stacking*) de sistemas XG-PON, com comprimentos de onda distintos, na mesma fibra óptica, ocupando a mesma janela óptica já definida para o XG-PON. Esses sistemas são conhecidos como *stacked* XG-PON, sendo sua estrutura originada pelo seu predecessor, o *stacked* G-PON [20,21].

Esses eram os candidatos naturais para a escolha da nova tecnologia de acesso óptico. Entretanto, sistemas TDM-PON a 40 Gb/s empregando sinais ópticos modulados em intensidade eram inviáveis em termos de requisitos técnicos, em virtude do impacto da dispersão cromática no desempenho sistêmico e da necessidade de circuitos eletrônicos com resposta em frequência de 40 GHz para as ONTs.

Como forma de superar essa limitação, alguns trabalhos encontrados na literatura [27-29] sugeriram o uso de modulação em intensidade duo-binária para a geração de sinais *downstream* a taxa de 40 Gb/s. Essa proposta ficou conhecida como redes ópticas passivas de 40 Gigabit TDM (40 *Gigabit* TDM - XLG-PON) [27,28], e propiciou a redução do impacto degradante da CD no desempenho sistêmico.

Entretanto, os requisitos eletrônicos para o desenvolvimento da demultiplexação dos dados *downstream* eram ainda laboriosos, tornando o custo agregado das ONTs proibitivo e de alto risco para comercialização.

Para os sistemas *stacked* XG-PON, embora, aparentemente, essa fosse a opção mais viável na época, uma das principais barreiras comerciais para implantação desta tecnologia era o emprego de terminais usuários distintos: caso a estrutura dos sistemas

XG-PON fossem fielmente mantidas para o projeto da NG-PON₂, ter-se-iam quatro tipos de ONTs distintas na rede, refletindo em custos operacionais elevados.

Neste contexto, outros candidatos à NG-PON₂ surgiram no início das atividades da padronização da NG-PON₂ [29] capazes de atender a esses requisitos. Entre eles, podem ser destacados:

- redes baseadas em WDM-PON com modulação em intensidade. Esse foi o primeiro momento que redes WDM-PON foram selecionadas como candidatas a padronização em redes de acesso.
- redes baseadas em WDM-PON com detecção coerente e espaçamento ultra denso (*Ultra Dense WDM-PON – UDWDM-PON*);
- redes ópticas passivas baseadas em divisão por multiplexação em frequências ortogonais (*Orthogonal Frequency-Division Multiplexing Passive Optical Network - OFDM-PON*), e;
- redes ópticas passivas baseadas em multiplexação por divisão no domínio do tempo e em comprimento de onda (*Time-Wavelength Division Multiplexing Passive Optical Network – TWDM-PON*).

Entretanto, em virtude do emprego de recursos eletrônicos com resposta ultra-rápida e formatos de modulação multi-níveis exigidos para a implementação da OFDM-PON, essa alternativa foi descartada. Adicionalmente, a possível incompatibilidade coexistência de redes WDM-PON com as redes legadas TDM em decorrência de necessidade da substituição dos *splitters* por um MUX/DEMUX trazia riscos significativos para escolha desta topologia.

Neste contexto, a segunda etapa da evolução dos sistemas de acesso TDM caminhou então para a estrutura combinada de acesso WDM e TDM denominada rede óptica passiva baseada em multiplexação por divisão no domínio do tempo e em comprimento de onda (*Time-Wavelength Division Mutlplexing Passive Optical Network - TWDM-PON*).

Entretanto, diferentemente das estruturas *stacked* convencionais, a TWDM-PON contava com o uso de terminais ONTs *colorless*. A Fig. 2.5 mostra uma ilustração esquemática desta tecnologia.

Em linhas gerais, a TWDM-PON é uma rede constituída de quatro pares de canais ópticos (previsto até 16) com comprimentos de onda distintos entre si, cada qual modulado em intensidade a 10 Gb/s e 2,5 Gb/s, respectivamente, para o sentido

downstream e *upstream*. As janelas ópticas disponíveis para os sinais de descida e subida estão localizadas, respectivamente, nas faixas de comprimento de onda de 1596 a 1603 nm e 1524 a 1544 nm.

Figura 2.5 - Ilustração esquemática da camada física de uma rede TWDM-PON.

Esta configuração é capaz de oferecer uma capacidade de 40 Gb/s, expansível até 160 Gb/s, *downstream* e de 10 Gb/s para os tráfegos *upstream*, expansível até 80 Gb/s. A estrutura lógica da TWDM-PON é semelhante ao dos sistemas *stacked* TDM-PON: o *downstream* ocorre na forma de *broadcast* enquanto o *upstream* é enviado em modo rajada. Entretanto, nota-se, pela análise da **Fig. 2.5**, que os elementos da rede TWDM-PON são ligeiramente diferentes do que aqueles encontrados nas tecnologias XG-PON e G-PON nos seguintes aspectos:

OLT TWDM-PON: conjunto de fontes ópticas, com oito comprimentos de onda fixados e espaçados na grade de 100 GHz, de acordo com os valores encontrados na **Tabela 2.1**. Caso esse sistema seja expandido para dezesseis comprimentos de onda, os canais seriam espaçados na grade de 50 GHz (ainda não definidos). Presença de MUX e DEMUX no OLT, além de um combinador de sinais WDM, para direcionamento dos tráfegos *upstream* e *downstream*;

ONT TWDM-PON: Em cada terminal ONT está presente uma fonte óptica *colorless* e um receptor *colorless*, o qual pode estar associado a um filtro

sintonizável ou qualquer outra forma eficiente de seleção em comprimento de onda. A banda passante do filtro *colorless* deve ser inferior a 100 GHz (para sinais *downstream* espaçados em 100 GHz). Diferentemente dos sinais *downstream*, não existem valores específicos de comprimentos definidos para os sinais *upstream*. A única recomendação da norma é a alocação dos canais de subida dentro das janelas ópticas definidos na **Tabela 2.2**, de acordo com o espaçamento inter-canais empregado.

Em termos de elementos ativos, ainda não existe nenhuma comercialização expressiva ou definição precisa. Contudo, os alcances e segmentações mínimas são de, respectivamente, 40 km e 128 ONTs por OLT, embora seja possível atingir até 1024 usuários por PON, sendo este o desejo da maioria das operadoras de telecomunicações, de forma a aproveitar a relação custo-benefício oferecida pela tecnologia. O emprego de amplificação de potência e pré-amplificação no OLT está previsto também.

Tabela 2.1- Plano de comprimento de onda dos canais *downstream* para a tecnologia TWDM-PON.

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

Tabela 2.2 - Plano de comprimento de onda dos canais *upstream* para tecnologia TWDM-PON.

Espaçamento inter-canal	Plano de comprimento de onda (nm)	Quantidade de canais
200 GHz	1524-1544	4
100 GHz	1528-1540	8
50 GHz	1532-1540	16

A tecnologia está ainda em processo de padronização, sendo definida pelo conjunto de normas contidas na série G.989.x [30], processo iniciado em 2012 com expectativa de término para meados de 2015.

Neste ponto de retrospectiva histórica deve-se notar que, embora as redes PON baseadas em TDM sempre tenham sido as preferenciais para padronização das redes de acesso, a implantação dos sistemas de acesso futuro sem o apoio de técnicas WDM tem

se mostrado improvável, gerando a seguinte indagação: qual será a configuração da geração seguinte à NG-PON₂?

Até este ponto, foram revistas e apresentadas as principais tecnologias padronizadas (ou em processo de padronização) pelo ITUT-T em colaboração pelo FSAN. Para responder essa questão, a próxima seção tem por objetivo a discussão das alternativas, projeções de capacidade e técnicas de acesso ao meio para as próximas redes NG-PON.

2.6 Próximas NG-PON: Requisitos e Desafios

Conforme apresentado até o presente momento, as questões levantadas pelo grupo FSAN vinculadas às atividades de padronizações na área de acesso óptico, tem sempre como foco delinear as características das NG-PON de forma a permitir a coexistência com as redes legadas.

Em termos de projeções de capacidades de transmissão oferecida pelas gerações NG-PON, nota-se por meio da análise da **Fig.2.6** um aumento de um fator quatro da capacidade nas NG-PON_N em relação a proposta anterior NG-PON_{N-1}, projeção que se mantém desde a padronização do G-PON. Outra característica típica das propostas NG-PON refere-se ao tempo demandando para as atividades de padronização das tecnologias de acesso em TDM.

Após a longa trajetória percorrida na padronização do “Gigabit PON” (quase 8 anos), a duração das discussões pertinentes as NG-PON tem se reduzido de forma considerável, tomando apenas 3,5 anos para a definição do NG-PON₁ e 3 anos (estimativa) para NG-PON₂.

Este dinamismo tem, por um lado, impulsionado o horizonte da pesquisa e desenvolvimento tecnológico na área de acesso à elaboração de sistemas de super capacidade, a fim de atender as expectativas das próximas NG-PON (NG-PON₃, NG-PON₄ ...).

Por outro lado, essa fluidez nos processos de padronização, bem como o aumento da capacidade das NG-PONs, levantam questionamentos se as técnicas de acesso TDM, mesmo apoiadas no amadurecimento tecnológico WDM para o acesso, serão capazes de atender desafios cada vez mais crescentes em termos de capacidade: 100 Gb/s (quarenta vezes o G-PON); 160 Gb/s (quatro vezes a NG-PON₂); ou ainda 320 Gb/s (oito vezes a NG-PON₂).

Outro aspecto importante está relacionado à taxa efetiva (*downstream*), em Mb/s, entregue ao terminal ONT, a qual tem, no melhor dos cenários, aumentado por um fator dois a cada proposta de NG-PON, atingindo valores (otimistas) da ordem de 160 Mb/s em segmentações de 256 usuários por OLT para a tecnologia TWDM-PON.

Figura 2.6 - Evolução da capacidade das redes PON em função de Gb/s, distância de cobertura, segmentação oferecida pelas principais tecnologias TDM e período decorrido nas atividades de padronização.

Essa é uma característica intrínseca da configuração TDM, a qual restringe a banda disponibilizada por usuário em virtude da alta segmentação da rede, almejada pelas operadoras. Adicionalmente, essa configuração leva a uma subutilização das funcionalidades do aparato no lado cliente, o qual é projetado para operar em taxas da ordem de Gb/s, enquanto fornece apenas algumas dezenas de Mb/s por assinante.

Em algum momento, quando taxas simétricas superiores aos 160 Mb/s forem necessárias em cenários de alta segmentação com distâncias de cobertura em torno de 40 km, certamente o acesso em TDM será insuficiente para atender a essa demanda, devido aos altos custos da eletrônica de alta velocidade necessária.

Finalmente, a última observação refere-se ao plano de comprimentos de onda disponível para a próxima PON de nova geração. Uma rápida análise na **Fig. 2.7** revela problemas de alocação espectral para a NG-PON₃, em virtude da ocupação das janelas ópticas pelas tecnologias já padronizadas e as respectivas bandas de guarda.

Ainda no que se refere a **Fig. 2.7**, nota-se que o G-PON é a tecnologia com a maior ocupação espectral (60 nm), enquanto oferece a menor capacidade (2,5 Gb/s). Levando-se em conta que a capacidade da próxima PON atinja valores 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 levaria a uma discrepância muito grande. Desta forma, uma alternativa para a alocação espectral da NG-PON₃ seria por meio do uso da janela óptica (ou parte dela) usada no G-PON. Pode-se afirmar, de outro lado, que o uso de terminais *colorless* será mantido para as ONTs caso utilize-se técnicas de acesso WDM.

Figura 2.7- Alocação espectral das bandas ópticas padronizadas para as tecnologias G-PON, XG-PON e TWDM-PON. Na figura, radiofrequência (*Radiofrequency* - RF).

Com base no acima exposto, alguns questionamentos cruciais sobre as próximas NG-PON (NG-PON₃, NG-PON₄) são trazidos à tona:

- Qual será a capacidade oferecida pela próxima NG-PON?
- Será a próxima NG-PON baseada em tecnologias de acesso híbridas TWDM?
- Será a próxima NG-PON compatível com as redes G-PON?

De fato, a resposta imediata a todas essas questões é difícil no contexto atual. A expectativa do início das atividades de padronização da NG-PON₃ está prevista para 2015.

Existem algumas possibilidades descritas na literatura técnica, capazes de atender a esses requisitos e desafios das PONs de nova geração, dentre elas destaque para as redes OFDM-PON, *stacked* XLG-PON, redes PONs coerentes (*Coherent* PON) e redes WDM-PON, a serem discutidas a seguir.

2.7 Próximas NG-PONs: Alternativas

2.7.1 OFDM-PON

Em linhas gerais, um canal OFDM é o resultado da multiplexação de várias sub-portadoras ópticas estreitamente espaçadas em comprimento de onda e ortogonais no domínio da frequência. Cada sub-portadora carrega uma fração de um enésimo da taxa de transmissão total do canal OFDM, onde n é o número de sub-portadoras.

Com a técnica de multiplexação em OFDM, taxas de transmissão agregadas de 40 Gb/s com modulação em intensidade, por exemplo, podem ser alcançadas com o uso de 4 sub-portadoras moduladas a 10 Gb/s cada e com espaçamento de 12,5 GHz entre elas, resultando em uma ocupação espectral de apenas 50 GHz (0,4 nm).

Adicionalmente, a técnica propicia uma maior tolerância ao impacto dos efeitos dispersivos impostos pela fibra, em virtude do baixo valor relativo da taxa nominal de cada sub-portadora em relação a uma única portadora como capacidade equivalente ao canal OFDM.

Entretanto, a detecção de canais multiplexados em OFDM requer a utilização de recursos eletrônicos com respostas ultra-rápidas, e, em geral, demasiadamente complexos para aplicações em sistemas de acesso. Assim, essa alternativa refletiria em custos relativamente elevados para os terminais ONT, o que não é atrativo para produção em larga escala. O conjunto de referências [31-35] permite estudos mais aprofundados.

2.7.2 XLG-PON

Uma segunda alternativa seria o empilhamento de quatro sistemas XLG-PON em uma mesma infraestrutura, resultando em uma tecnologia de 160 Gb/s de capacidade, 60 nm de ocupação espectral, com uma estrutura física semelhante ao TWDM-PON. Entretanto, são escassos os trabalhos encontrados na literatura técnica [28-29] em redes de acesso com o uso de modulação em intensidade a 40 Gb/s, sendo, portanto, uma opção pouco provável até o presente momento.

2.7.3 PONs Coerentes

A estrutura de uma rede WDM-PON coerente está esquematicamente ilustrada na **Fig. 2.8**. Por conveniência, optou-se por mostrar apenas um dos sentidos de tráfego, no caso o *downstream*, sendo o *upstream* obtido de forma análoga.

Em linhas gerais, nessas topologias está presente na ONT uma fonte óptica denominada oscilador local (*Local Oscillator* – LO), emitindo continuamente uma onda óptica sem dados, cujo comprimento de onda, λ_{LO} , está próximo ao do sinal *downstream*, λ_D .

A detecção coerente implica no batimento óptico entre estes dois comprimentos de onda, no qual o detector coerente (*Coherent Receiver* – CR) é responsável por recuperar todos os parâmetros da onda óptica recebida e transferi-los para o domínio elétrico, tais como a intensidade e a fase da onda. Em linhas gerais, tais CRs estão apoiados em processamento digital de sinais (*Digital Signal Processing* – DSP) para mitigação de efeitos lineares ou não-lineares impostos pela fibra.

Figura 2.8 – Ilustração esquemática de uma rede WDM-PON coerente.

Com o uso de redes PONs coerente existe, então, a flexibilidade para uso de diferentes formatos de modulação, como, por exemplo, o chaveamento de fase e quadratura (*Quadrature Phase Shift Keying* - QPSK). O uso dessas técnicas propicia a redução da taxa de operação eletrônica dos dispositivos. Entretanto, a escolha por formatos de modulação em fase impõe o aumento de requisitos da relação sinal-ruído óptica (*Optical Signal-To-Noise Ratio* – OSNR), pureza e controle espectral do LO, de forma a garantir a qualidade de transmissão, traduzindo em fontes ópticas de alto custo.

Esses esquemas dispensam o uso de AWGs no nó remoto, uma vez que a seletividade em comprimento de onda na detecção pelo receptor coerente está

condicionada à sintonia entre os valores de λ_{LO} e λ_D . Desta forma, essa topologia pode ser compatível com o uso de *splitters* de potência no nó remoto, permitindo a coexistência com as PONs legadas.

Outra vantagem decorrente da WDM-PON coerente é o elevado orçamento de potência propiciado pelo batimento óptico na detecção, o qual pode atingir valores superiores a 42 dB [36-42], favorecendo a implantação de cenários de alta segmentação.

Embora avanços significativos venham sendo realizados na área, sendo as redes PON coerente um possível candidato a NG-PON₃, existem ainda desafios tecnológicos à serem superados, tais como adequação da relação custo-benefício oferecida pelos CRx para atender as exigências de baixo-custo relativo em sistemas de acesso, bem como a proposta de uma topologia que possa excluir a necessidade de LOs nas ONTs e preservar altas distâncias de cobertura e elevada segmentação.

2.7.4 WDM-PON

Uma alternativa capaz de cobrir em grande parte das características listadas para as próximas NG-PONs são as redes do tipo WDM-PON, ilustradas pela **Fig. 1.3**.

Nessas topologias, utilizam-se, necessariamente, AWGs no nó remoto ao invés de *splitters*, sendo, então, os comprimentos de onda para os usuários pré-estabelecidos pelas portas do AWG. Essa estrutura sugere que o atendimento ao requisito de coexistência com as redes legadas pode se tornar laborioso, propiciando a implantação dessas topologias em *green fields*.

Entretanto, em algum ponto do desenvolvimento de tecnologias de acesso óptico a agregação de usuários exclusivamente por meio do uso de *splitters* será insustentável no quesito orçamento de potência. Em termos práticos, o orçamento de potência em uma segmentação de 256 usuários oferecida por um combinador/divisor de potência é de no mínimo 24 dB, sem levar em conta as perdas impostas pela fibra, filtros ópticos e outros elementos da rede, exigindo o uso de amplificadores e /ou detecção coerente.

Em contrapartida, as perdas impostas por AWGs são independentes da quantidade de portas do dispositivo, com valores médios entre 4 a 6 dB, configurando uma margem confortável para detecção direta. Essa é uma das vantagens do emprego de AWGs. Outra vantagem oferecida pelo uso de AWGs no nó remoto é a redução na complexidade no terminal do usuário em termos de filtragem em comprimento de onda.

Caso a estrutura da TWDM-PON seja preservada para as próximas PONs, onde um filtro sintonizável está presente na ONT, à medida que o aumento da quantidade de comprimentos de onda para as tecnologias de acesso óptico (16, 32, 64, 128) seja um requisito mandatório, as características dos elementos de filtragem nas ONTs serão cada vez mais críticas em termos de custos e complexidade tecnológica. Desta forma, o uso de AWGs no nó remoto permite que as funções mais complexas de seletividade em comprimento de onda fiquem condicionadas à um único elemento, de forma compartilhada, presente no armário de rua ao invés de no aparato do usuário residencial.

O aumento do número de comprimentos de onda na rede implica também na banda espectral de operação dos transmissores da rede. Avanços significativos têm sido realizados em lasers sintonizáveis nos quesitos banda de ocupação espectral e relação custo-benefício, apresentando-se como uma opção em potencial para redes PON de nova geração.

Somado a todos esses requisitos, comparadas às redes OFDM e PON coerente, a simplicidade na geração e detecção dos sinais oferecida pela estrutura WDM-PON torna esta tecnologia uma escolha atrativa para atender essa alta demanda de capacidade das PONs de nova geração. Esses são os motivos pela escolha da pesquisa em redes WDM-PON.

Em linhas gerais, o estado da arte em redes de acesso em WDM pode ser dividido em duas vertentes: de um lado, sistemas de acesso de curto alcance (~40 km) com taxas de 1,25 Gb/s até 10 Gb/s por ONT empregando modulação em intensidade e detecção direta [43-107] e, de outro, topologias de supercapacidade e longo alcance, apoiadas por detecção coerente, processamento digital de sinais em taxas superiores a 10 Gb/s por ONT [36-42].

Independente da aplicação final, as características cruciais para impulsionar a tecnologias WDM-PON a proposta de próxima NG-PON são tecnologias que atendam os seguintes critérios:

- melhor relação custo-benefício na gerência e custo de dispositivos ativos/passivos;
- maior simplicidade possível na geração, detecção e tipos de transmissores a serem utilizados;
- forma mais eficiente de alocação espectral do sistema multi comprimento de onda;

- migração suave e gradativa de sistemas com taxas de 622 Mb/s até 2,5 Gb/s /s (10 Gb/s cenário otimista) por ONT com alterações diminutas na estrutura da rede;
- capacidade de ampliação para segmentações de até 256 ONTs por OLT.

No próximo capítulo, será discutida a evolução das topologias WDM-PON e principais técnicas de geração/detecção encontradas no estado da arte, permitindo destacar com clareza as vantagens e inovações oferecidas pela proposta central desse tema de doutorado.

3. Redes WDM-PON

A introdução da fibra óptica nas redes de acesso e, conseqüentemente, a implantação das topologias do tipo redes PON propiciaram um aumento significativo na capacidade agregada das redes de acesso, permitindo o oferecimento de serviços banda larga em estruturas com grandes números de ONTs e alcance da ordem de dezenas de quilômetros.

Aliado a esses avanços, a introdução do conceito PON permitiu uma segunda evolução natural do seu mais significativo desdobramento: redes ópticas passivas baseadas em multiplexação por divisão em comprimento de onda, denominada redes WDM-PON.

Neste capítulo, são apresentadas as principais redes WDM-PON descritas na literatura técnica. É levantada a evolução das topologias e técnicas de transmissão empregando formatos de modulação em intensidade nos últimos 25 anos, e as suas características discutidas. Por fim, a topologia central deste tema de doutorado é apresentada. As vantagens e originalidade da proposta do autor são confrontadas, de forma qualitativa, com os trabalhos encontrados na literatura técnica, baseadas nas premissas definidas para este tema de pesquisa: relação custo-benefício atrativa, alocação espectral eficiente e alta capacidade agregada.

O capítulo está organizado da seguinte forma: nas **Seções 3.1 e 3.2** são apresentadas, respectivamente, as características gerais encontradas em redes WDM-PON e as diversas formas de implementação de ONTs *colorless*. Na **Seção 3.3** é realizado um levantamento aprofundado da evolução das topologias WDM-PON ao longo das últimas 3 décadas de forma a contextualizar a proposta da tese, esta última descrita na **Seção 3.4**.

A seguir são descritos os aspectos gerais encontrados em redes WDM-PON.

3.1 Aspectos Gerais de Redes WDM-PON

A **Fig. 3.1** mostra uma representação esquemática de uma topologia WDM-PON convencional, comumente encontrada na literatura. Em linhas gerais, uma rede WDM-PON com o emprego de uma quantidade de $2n$ comprimentos de onda, em que “ n ” é a quantidade de ONTs presentes na topologia, é composta dos seguintes elementos:

- terminal OLT, onde está presente o aparato para transmissão dos n comprimentos de onda para o sentido *downstream* ($Tx Dw_1 \dots Tx Dw_N$) e detecção dos dados *upstream* ($Rx Up_{N+1} \dots Rx Up_{2N}$). Um arranjo óptico formado por um MUX, DEMUX e um circulador óptico é responsável pelo direcionamento dos sinais *downstream* e *upstream* pela rede;
- vários terminais ONTs, onde está localizado o aparato para transmissão *upstream* do comprimento de onda pré-estabelecido (um dos elementos entre $Tx Up_{N+1} \dots Tx Up_{2N}$) e detecção dos dados *downstream* (um dos elementos entre $Rx Dw_1 \dots Rx Dw_N$);
- um MUX/DEMUX passivo, localizado no nó remoto, para direcionamento dos tráfegos *downstream* (para as ONTs) e *upstream* (para o OLT).

Figura 3.1 - Ilustração esquemática de uma topologia WDM-PON convencional.

Em linhas gerais, em redes WDM-PON, cada terminal usuário dispõe de um par de comprimentos de onda pré-estabelecidos (e distintos entre as demais ONTs) para comunicação com o OLT do sistema. Nesta configuração, cada assinante pode enviar e receber dados do OLT em qualquer instante, independentemente da condição dos outros usuários.

Consequentemente, em redes WDM-PON a largura de banda disponível por ONT é limitada apenas pela capacidade do transmissor utilizado. Ademais, essa configuração permite uma ampliação gradativa na capacidade da rede, em decorrência

da eliminação da estrutura de compartilhamento de banda em alocação temporal, característica essa essencial no acesso TDM.

As características de alta capacidade, bem como alta escalabilidade, oferecidas pelas redes WDM-PON impulsionaram a pesquisa ao desenvolvimento de cenários multi-comprimento de onda capazes de oferecer taxas superiores a 2,5 Gb/s por terminal ONT em estruturas PON de alta segmentação e longo alcance. Desta forma, é possível explorar, de maneira mais proveitosa, toda a capacidade banda larga proporcionada pela fibra óptica.

Conforme mostra a **Fig. 3.1**, basicamente, uma rede WDM-PON apresenta uma estrutura física muito semelhante à redes TDM-PON, ou seja, ponto-multiponto. Um enlace de fibra alimentadora, de algumas dezenas de quilômetros, e um elemento multiplexador/demultiplexador de comprimento de onda, localizado no nó remoto (RN), conectam os diversos usuários na rede ao OLT do sistema. Na interface de transmissão (*front-end*) do OLT, um circulador óptico garante a circulação óptica entre os sentidos de tráfego pela rede.

No OLT, estão presentes os n -transmissores (Tx) e receptores (Rx) necessários para a geração e detecção dos dados *downstream* e *upstream*, respectivamente, de cada usuário do sistema. Um guia ordenado de ondas (*Arrayed Waveguide Grating* - AWG), totalmente passivo e com funcionalidade bidirecional, multiplexa/demultiplexa os diversos pares de comprimentos presentes no sistema.

A perda de inserção de dispositivos AWG (aproximadamente, 5 dB) é muito menor que aquelas produzidas pelo cascadeamento de *splitters* nas redes TDM, e independe do número de usuários da rede (ou do número de canais), o que reflete diretamente no alcance da rede por relaxar os requisitos de orçamento de potência. Com as tecnologias atuais, é possível fabricar AWGs insensíveis à temperatura, i.e, que não necessitam de controle térmico, com capacidade de 44/88 canais na grade de 100/50 GHz, e filtros com funções de transferência do tipo retangular (*wideband*) e gaussiano.

Em virtude da propriedade cíclica do AWG determinada pela região espectral livre (*Free Spectral Range* - FSR), a alocação espectral das redes WDM-PON pode ser realizada ainda nas bandas S (1492,25 – 1529,16 nm), C (1529,94 – 1569,18 nm) ou L (1570,01 – 1611,35 nm), reservando-se diferentes bandas ópticas para os comprimentos de onda da subida e descida. Finalmente, em cada ONT do sistema está presente um Tx com um comprimento de onda pré-estabelecido, responsável pela transmissão dos dados *upstream*, e um Rx para detecção dos dados provenientes do OLT.

Analisando-se ainda a **Fig. 3.1**, pode-se afirmar que o aspecto mais crucial para implantação dessa topologia é a disponibilização dos múltiplos comprimentos de onda requeridos pelo OLT/ONTs e do elemento multiplexador/demultiplexador de comprimentos de onda, o qual está muito bem consolidado com as tecnologias AWG disponíveis comercialmente.

Entretanto, o estabelecimento de uma topologia multi-comprimento de onda, conforme sugerida pela **Fig. 3.1**, onde a cada ONT é atribuído um transmissor com comprimento de onda fixo, não é adequada em termos de custos operacionais, pela necessidade de se manter um número elevado de transmissores de comprimentos de onda em estoque. Essa questão de gerenciamento operacional de dispositivos optoeletrônicos foi identificada desde os primórdios do WDM-PON, tornando-se a motivação inicial de grande pesquisa na área.

Conforme já exposto, em sistemas de acesso óptico, a relação custo-benefício não pode ser sacrificada em troca de alta capacidade oferecida pela rede. O entendimento que ambas as características são simultaneamente essenciais em redes WDM-PON motivou vários grupos de pesquisa à busca de soluções para 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. Desta forma, as questões de custos operacionais são minimizadas, em virtude do emprego/desenvolvimento de único tipo de interface de transmissão para toda a rede.

Estas configurações de transmissores que possam operar “em uma larga faixa de comprimento de onda” são conhecidas comumente na literatura como transmissores *colorless* (ou *colorfree*), ou ainda ONT *colorless*. Esse pode ser destacado como o primeiro marco em redes WDM-PON (desde 1988 [43]), característica que vem sendo empregada tanto na pesquisa acadêmica, como em portfólios de produtos comerciais encontrados na atualidade.

A seguir, serão discutidas várias propostas de transmissores/ONT *colorless* e as respectivas topologias apresentadas ao longo da evolução das redes WDM-PON, identificando os desafios, inovações, marcos e características, a fim de contextualizar a proposta central desta tese de doutorado e destacar os ganhos oferecidos pela configuração proposta pelo autor.

3.2 ONTs Colorless

3.2.1 Fatiamento Espectral

A maneira mais elementar de se obter a requerida fonte óptica *colorless* seria por meio da utilização de lasers sintonizáveis em cada ONT do sistema [44-46]. No longo prazo, as tecnologias de laser sintonizáveis se apresentam como uma alternativa muito promissora. Entretanto, com as tecnologias disponíveis atualmente, o custo de tais elementos é ainda excessivo para aplicações em acesso óptico do lado do terminal de usuário, embora progressos recentes possam ser destacados na literatura [46].

Uma alternativa à utilização de lasers sintonizáveis é o emprego da técnica de fatiamento espectral de uma fonte óptica de banda larga (*Broadband Light Source* - BLS). A Fig. 3.2 mostra uma representação esquemática da técnica [43].

Figura 3.2 - Ilustração esquemática da técnica de fatiamento espectral.

O espectro banda larga de uma fonte BLS é encaminhado a um braço específico do AWG, onde ocorre o fatiamento espectral. Em cada braço do AWG, o espectro banda larga da BLS é fatiado, gerando um sinal de banda estreita cuja frequência central está associada a banda passante do multiplexador/demultiplexador. Acessando diferentes braços do AWG é possível, então, selecionar diferentes comprimentos de onda. Desta forma, um único tipo de BLS pode ser usada para prover os diversos comprimentos de onda requeridos pelo sistema.

Como exemplos de fontes BLS, podem ser citados os espectros ópticos provenientes de diodos emissores de luz (*Light-Emitting Diodes* - LEDs) ou o ruído

proveniente de ASE de um amplificador à fibra dopado com Érbio (*Erbium Doped Fiber Amplifier* – EDFA), ou de um amplificador óptico semiconductor (*Semiconductor Optical Amplifier* - SOA).

O LED é uma fonte óptica de baixo custo, se comparado aos amplificadores ópticos citados, e pode ser modulado diretamente, eliminando a necessidade de moduladores externos. Entretanto, a densidade de potência e largura espectral oferecidas pelo dispositivo semiconductor são insuficientes para alocação de um elevado número de canais [47,48], limitando o número de ONTs e alcance da rede.

O espectro de ASE, gerado por um dos amplificadores citados, possui densidade espectral de potência e largura de banda óptica superior às dos LEDs [49]. Entretanto, a utilização de ASE requer o uso de moduladores externos, além de ainda sacrificar o orçamento de potência da rede em decorrência das altas perdas ocasionadas pelo fatiamento espectral de fontes banda larga, dificultando a instalação e a manutenção desse tipo de sistema. Desta forma, a técnica de fatiamento espectral por si só é insuficiente para atender as necessidades de alta capacidade e grande número de usuários.

3.2.2 Transmissores em Modo de Reflexão

As limitações encontradas nas propostas de fatiamento espectral podem ser superadas utilizando-se a técnica de injeção de semente óptica de banda estreita, como mostra a **Fig. 3.3**.

Neste esquema, o sinal de uma fonte BLS, em operação de onda contínua (*Continuous Wave* - CW) é encaminhado a porta comum do AWG. Os sinais de banda estreita resultantes são, então, utilizados como sementes ópticas, pois são direcionados e injetados no meio ativo de um transmissor óptico cujo meio ativo é adequado a esta aplicação. Utilizando um AWG para realizar o fatiamento espectral de uma BLS do tipo ASE, a frequência de operação dos transmissores será definida então pelo braço de saída do MUX/DEMUX, assim como descrito na **Seção 3.2.1**.

Diferentemente do fatiamento espectral, para que esta técnica funcione, o transmissor deve operar em um regime de reflexão: a semente óptica, após injetada na face frontal do transmissor, é amplificada, refletida na face traseira, modulada, amplificada novamente e encaminhada a face frontal, onde retorna à porta comum do AWG.

Em seguida ao fatiamento espectral, este pode ser considerado como o segundo marco em redes WDM-PON puro. Embora tenha sofrido algumas variações, a técnica permanece frequente em sistemas de acesso óptico atuais.

Figura 3.3 - Ilustração esquemática da técnica de semente óptica para transmissores em modo de reflexão utilizando-se do fatiamento espectral de fontes banda larga.

Podem ser citados dois transmissores de meio ativo semicondutor que operam nas condições de reflexão: FP-LD e RSOAs.

Em linhas gerais, FP-LDs convencionais exibem perfil espectral multimodo (coexistência de vários modos ressonantes), em decorrência da existência de faces clivadas e da condição de oscilação inerente ao dispositivo semicondutor, comportando-se como cavidade ressonante.

Entretanto, a utilização de uma semente óptica externa de banda estreita, cuja frequência central esteja próxima a de um dos modos ressonantes do FP-LD, ocasiona em uma supressão dos modos laterais dos dispositivos em razões superiores à 30 dB e o *laser* passa a operar praticamente em modo único, como um laser DFB. Injetando-se diferentes fatias do espectro da BLS, é possível selecionar, de acordo com a frequência, os modos de operação do FP-LD. Essa técnica de operação é denominada travamento por injeção óptica (*Optical Injection Locking – OIL*) [50].

O nível de razão de injeção, o perfil espectral do FP-LD e, principalmente, o valor de dissintonia em frequência entre a frequência da semente óptica e da frequência do modo ressonante ditam o regime de estabilidade do OIL e número de modos disponíveis para o travamento.

Já para os transmissores RSOAs, pode-se dizer que estes dispositivos operam basicamente como amplificadores ópticos semicondutores, entretanto, provendo níveis de ganho ópticos muito superiores aos dos SOAs, em virtude da dupla-passagem pelo

meio ativo do transmissor refletivo. Diferentemente dos FP-LDs, o nível de potência da semente óptica e o perfil espectral da ASE do RSOA ditam o número de modos disponíveis para modulação. Esses são os dois principais transmissores refletivos usados na pesquisa WDM-PON atual.

Cronologicamente, aplicações de transmissores FP-LD alimentados com ASE de banda estreita foram as primeiras a serem registradas na literatura (em torno do ano 2000 [51]), uma vez que o uso de RSOAs nessa configuração data de 2001 [52].

Nas próximas seções serão apresentadas as principais evoluções das topologias WDM-PON encontradas na literatura. Inicialmente, serão reportadas as topologias com o uso de FP-LD como fontes *colorless* pelas razões cronológicas já citadas.

3.3 Evolução Topologias WDM-PON

3.3.1 FP-LD

O uso de FP-LD sob OIL surge em 1981 [50], para aplicações em redes ópticas coerentes, atuando com oscilador local. Na década de 1990, com o recente surgimento da técnica de fatiamento espectral, o dispositivo foi também utilizado como fonte BLS diretamente modulada [53]. As características espectrais do F-P exibem maior pureza espectral, densidade de potência e banda elétrica de modulação em comparação ao LED.

Entretanto, embora avanços tenham sido realizados nesta vertente [54], o uso de FP-LD como fonte banda larga impõe grandes dificuldades experimentais práticas, tais como o alinhamento entre a banda espectral dos modos ressonantes do *laser* semiconductor e da banda passante do AWG e a largura da banda espectral de emissão do dispositivo, o que restringe a quantidade de canais disponíveis. Somado à esses fatores, o impacto do ruído de partição modal (*Mode Partition Noise* - MPN) no desempenho sistêmico, em virtude das flutuações de potência entre os modos ressonantes, limita a taxa de transmissão oferecida pelo FP.

Finalmente, a aplicação de transmissor refletivo sob OIL com o uso de fontes ASE de banda estreita foi alcançada somente em 2000 [51], resultando na primeira topologia unidirecional combinando as duas técnicas, descrita a seguir.

3.3.2 Topologia Unidirecional

Um dos primeiros trabalhos encontrados na literatura sugerindo a utilização de FP-LD sob OIL alimentados por ASE de banda estreita data de meados dos anos 2000

[51]. A **Fig. 3.4** mostra uma representação esquemática da topologia unidirecional proposta, de acordo com [51].

Um dos primeiros objetivos na pesquisa em WDM-PON era prover sistemas para a geração dos sinais *upstream*, mantendo a configuração *colorless* dos terminais ONTs, uma vez que esta era um dos principais desafios identificados para implantação da rede no início dos anos 2000.

Neste cenário [51], um EDFA localizado no OLT provê o sinal de BLS na banda C, o qual é encaminhado ao AWG do RN via portas 1 e 2 do circulador óptico. Após o fatiamento espectral, cada fração do espectro da BLS é destinada às ONTs, onde irá travar, em frequência óptica, os diversos FP-LDs

Nas ONTs, os FP-LDs são modulados diretamente em taxas de 155 Mb/s [51]. Após a modulação direta, os sinais ópticos são enviados de volta ao OLT para detecção dos dados *upstream*, via AWG do RN, os enlaces de fibra óptica, porta 2 e 3 do circulador óptico e braço do AWG no OLT.

Em virtude da operação dos transmissores FP-LD em modo de reflexão, nota-se que os sinais *upstream* se propagam duas vezes por toda a topologia, embora os dados de modulação do usuário sejam gerados localmente na ONT. Esta configuração é denominada “operação de recirculação”, ou *loopback*.

Em decorrência do percurso de ida e volta (*roundtrip*) executado pelos sinais de subida, esse sentido de tráfego sofre de maiores penalidades (efeitos de retroespalhamento, redução do orçamento de potência). Adicionalmente, o alcance da rede fica condicionado aos níveis de potência da semente *upstream* injetada nas ONTs, para os quais seja possível garantir um desempenho sistêmico satisfatório. Consequentemente, a opção preferencial para alocação espectral dos sinais *upstream* é a banda C, permitindo aproveitar as menores perdas por atenuação oferecida pela fibra monomodo (*Single-Mode Fiber* - SMF).

Estas topologias, conforme mostra a representação da **Fig. 3.4**, são conhecidas comumente na literatura técnica como “redes de fontes ópticas centralizadas” (*Centralized Light Sources* – CLS). Neste tipo de rede, embora a geração dos dados do usuário seja realizada localmente em cada ONT, todos os transmissores refletivos *upstream* presentes na rede são alimentados remotamente a partir do OLT, o qual concentra a semente óptica de *upstream*.

Figura 3.4 - Ilustração esquemática da topologia unidirecional para geração dos sinais *upstream* conforme empregado em [51].

Nas pesquisas atuais em WDM-PON, variações das topologias CLS para geração do sentido *upstream* são comumente empregadas, inclusive em WDM-PON coerente [36-42], sendo, portanto, um dos principais sistemas estudados em acesso WDM.

Essa primeira topologia, **Fig. 3.4**, foi capaz de produzir valores de BER inferiores a 10^{-10} em distâncias de 120 km entre OLT e ONT, o que hoje caracterizaria distâncias relativas a PONs de longo alcance. Entretanto, a rede era limitada a taxas de 155 Mb/s por canal, permitindo, no máximo, a agregação de 16 canais, correspondendo a uma capacidade de 2,5 Gb/s.

Posteriormente a este trabalho, o interesse na literatura técnica direcionou-se a pesquisa de topologias bidirecionais, buscando provas de conceito em alto desempenho. Em 2004, surgiu a primeira topologia usando FP-LDs para geração de ambos os sentidos de tráfego *downstream* e *upstream* com alocação espectral apenas na banda C [55]. Entretanto, esta topologia não era adequada, por necessitar de uma fibra alimentadora e distribuidora dedicada por sentido de tráfego, o que não é desejável no acesso óptico.

3.3.3 Banda C/Banda L (C/L bands)

Após a proposta da topologia unidirecional em 2000, os trabalhos correlatos sobre redes WDM-PON com o uso de FP-LD sob OIL basearam-se em variações desta primeira arquitetura para configurações bidirecionais em uma mesma fibra. A **Fig. 3.5** mostra uma representação esquemática desta topologia conforme proposto em [56].

Nesta nova arquitetura, duas fontes BLS com faixas espectrais de operações distintas, localizadas no OLT, fornecem a semente óptica para os FP-LDs presentes na rede: um EDFA, com operação espectral na banda C, gera a semente óptica para o tráfego *upstream*, enquanto um segundo EDFA, com operação espectral na banda L, gera a semente óptica para o tráfego *downstream*.

Um arranjo de acopladores WDM banda L/banda C e circuladores ópticos garante a transmissão bidirecional em uma única fibra alimentadora, favorecendo o emprego desta topologia.

O sistema descrito em [56] oferecia uma capacidade entre 2,5 Gb/s (16 x 155 Mb/s) e 12,5 Gb/s (80 x 155 Mb/s). Distâncias máximas entre OLT e ONTs em torno de 30 km, para BER inferiores a 10^{-10} , foram alcançadas.

Figura 3.5 - Ilustração esquemática da topologia bidirecional banda C/banda L, proposta em [56].

Na Coreia do Sul, onde foi implantada pioneiramente uma rede WDM-PON comercial em 2007 [57], utilizou-se de uma rede bidirecional com estrutura idêntica à

da **Fig. 3.5**, entretanto, com alocação espectral na banda C e banda E para os canais *upstream* e *downstream*, respectivamente. Taxas de 155 Mb/s a 1,25 Gb/s eram oferecidos em distâncias de cobertura de 20 km.

Essa implementação marcou o auge dos trabalhos de FP-LD sob OIL. Estudos mais recentes sobre a tecnologia do transmissor *colorless* apontam montagens experimentais para o sentido *upstream* de redes com capacidade de 40 Gb/s em 2008 [58] e 80 Gb/s em 2010 [59].

O amadurecimento nas técnicas de fabricação dos FP-LD, amparadas pelas publicações teóricas e experimentais ao longo dos anos 1999-2008, propiciaram um melhor controle de estabilidade dinâmica do dispositivo sob OIL. Desta forma, foi possível projetar tais dispositivos para aplicações a taxas de 2,5 Gb/s e segmentações de, até, 32 usuários. Esses são os limites do FP-LD nos cenários atuais. É neste ponto, entre 2007 e 2008, que o FP-LD começa a perder espaço para os dispositivos RSOAs, conforme será comentado nas próximas seções.

No que se refere à topologias banda C/banda L, portfólios comerciais WDM-PON podem ser encontrados com o uso de FP-LDs. Na literatura técnica, a pesquisa caminhou também para configuração bidirecional, com o uso de duas bandas ópticas distintas. Especificamente para aplicações em modulação em intensidade e detecção direta, trabalhos atuais demonstram redes com capacidades de 400 Gb/s [60] e 800 Gb/s [61], embora empregando SOAs acoplados a moduladores de eletro-absorção (*Electro-Absorption Modulator* – EAM).

Entretanto, conforme já discorrido na introdução, a grande dificuldade prática encontrada em topologias “banda C/banda L” reside no fato de manter em estoque dois tipos de componentes ativos (transmissores, BLS). Adicionalmente, esta topologia é limitada pela alocação espectral da rede, exigindo a ocupação de duas das três bandas ópticas viáveis para operação do WDM-PON (S+C+L). Finalmente, questões relacionadas ao alinhamento e faixa espectral de operação dos MUX/DEMUX presentes e os transmissores *colorless* deve ser levada em conta.

Como alternativa a seguir, serão apresentadas as topologias banda C baseadas em dispositivos RSOAs.

3.3.4 RSOA

Os dispositivos RSOAs surgiram em meados de 1986 [62], um ano antes da proposta de redes PON, para aplicação em transmissores *colorless* para redes de acesso óptica WDM. Pode-se dizer então que este trabalho estabelece o primeiro marco das redes de acesso WDM empregando transmissores *refletivos colorless*.

Naquela época, taxas de modulação de, no máximo, 50 Mb/s eram alcançadas em distâncias de até 3,3 km, em virtude da operação espectral do dispositivo na região de 980 nm, banda óptica bem distante para as configurações atuais.

O projeto de dispositivos com operação na banda C surgirá apenas 10 anos depois [63], e estes eram capazes de transmitir taxas de 155 Mb/s em distâncias de até 18 km. Paralelamente, em 1996, RSOAs com operação na banda O foram anunciados [64], entretanto, a maturidade tecnológica no desenvolvimento desses moduladores estava muito longe ainda de ser atingida (apenas em 2013).

O uso combinado do fatiamento espectral de fontes sementes ASE e transmissores refletivos RSOAs surgiu apenas em 2001 [52] e 2002 [65], sendo as características do dispositivo aprimoradas para operação em taxas de 1,25 Gb/s em 2004 [66].

3.3.5 Banda C Compartilhada (C-band *splitting*)

Uma opção atrativa para sistemas de acesso WDM-PON, no que se refere ao quesito gerenciamento de custos operacionais, pode ser alcançada com a alocação espectral dos canais *downstream* e *upstream* em uma única banda óptica, ao invés da utilização de bandas ópticas distintas (C para o *upstream* e L para o *downstream*, por exemplo), como já descrito na **Seção 3.3.3**.

Esta topologia é conhecida como “compartilhamento da banda C” (*C-band splitting*) [67] e surgiu em 2006. Esta foi a primeira topologia bidirecional utilizando apenas RSOAs como fontes *colorless* em ambos OLT e ONT do sistema, operando em 1,25 Gb/s simétrico em alcances de 20 km. A **Fig. 3.6** mostra uma representação esquemática da topologia *C-band splitting* para sistemas de acesso.

De fato, a definição da grade de comprimento de onda de ambos os sentidos de tráfego em uma única banda óptica (a banda C, neste caso) possibilita redução do custo na manutenção e de gerenciamento de componentes optoeletrônicos, uma vez que o mesmo tipo de transmissor RSOA é utilizado em toda rede. Adicionalmente, esta

alternativa propicia uma redução no orçamento de potência requerido, em decorrência das baixas perdas por atenuação óptica na região espectral de 1.550 nm.

Figura 3.6 - Ilustração esquemática da topologia *C-band splitting*, de acordo com [67].

Finalmente, uma vez que a maioria dos dispositivos fotônicos e optoeletrônicos, tanto no âmbito acesso e redes metropolitanas, têm sido projetados para operação espectral nas grades de 100 GHz e 50 GHz da banda C (e banda L), essa topologia permitiria uma gama de aplicações diversificadas.

Nessa configuração, uma única BLS com operação espectral na banda C gera a semente óptica para ambos os RSOAs da ONT e do OLT. Um isolador óptico é utilizado entre a fonte BLS e o filtro azul/vermelho, o qual impede o retroespalhamento da semente óptica para a porta de saída da fonte banda larga. Em linhas gerais, o filtro azul/vermelho é um elemento passivo constituído de uma porta comum e duas portas de saída (ou porta canal), o qual tem como função dividir simetricamente o espectro óptico da banda C em duas partes: banda vermelha (*red band*), denominada comumente como banda C+ e; banda azul (*blue band*), denominada comumente como C-.

A região C+ corresponde aos comprimentos de onda utilizados para o tráfego *upstream*, localizados na parte superior da banda C (1.547 a 1.561 nm), enquanto a banda C- corresponde aos comprimentos de onda dos sinais *downstream*, localizados na parte inferior da banda C (1.530 a 1.543 nm).

Ainda na **Fig. 3.6**, um acoplador óptico 2x2 é utilizado para encaminhar os sinais das bandas azul e vermelho para lados opostos da fibra alimentadora. Ambos os espectros ópticos são fatiados pelos AWGs localizados no OLT, para os sinais *downstream*, e no RN, para os sinais *upstream*.

Os sinais *downstream* são gerados por meio de modulação direta dos RSOAs no OLT, após a injeção da semente óptica fatiada na banda C-. Os sinais de descida são enviados às ONTs e detectados pelo Rx, após passagem pelo AWG, acoplador óptico 2x2, circulador óptico, por um trecho de fibra monomodo padrão, pelo AWG no RN e pelo filtro azul/vermelho da ONT, o qual combina/separa o sinal *downstream* e a semente óptica para geração dos sinais *upstream*.

Nas ONTs, a semente óptica da banda C+, gerada remotamente do OLT, é injetada nos RSOAs, amplificada, modulada diretamente com os dados de *upstream* do usuário, refletida, amplificada e enviada de volta ao Rx do OLT, em esquema *loopback*, como descrito nas seções anteriores.

Apesar da topologia C-band *splitting* oferecer uma configuração atrativa para sistemas de acesso WDM, o número máximo de usuários agregados por OLT nesta proposta fica condicionado a duas características: divisão simétrica do espectro óptico da banda C, o que leva a utilização de, no máximo, da metade da capacidade de canais dos AWGs e; banda de guarda óptica do filtro azul/vermelho entre os canais da banda C+ e da banda C-, reduzindo a capacidade do sistema para menos da metade do número de canais dos AWGs.

Atualmente, com o desenvolvimento de filtros de bandas azul e vermelha com larguras reduzidas de banda de guarda (azul: 1.525 a 1.545 nm; vermelha: 1.547 a 1.563 nm) e AWGs de 96 canais (grade de 50 GHz) com características de operação insensíveis a temperatura (1.529 a 1.563 nm), é possível desenvolver uma rede WDM-PON com capacidade de até 55 Gb/s (44 x 1,25 Gb/s). Ainda assim, esta topologia WDM-PON, em uma visão de evolução em longo prazo, não é capaz de oferecer um grau elevado de capacidade e/ou número de usuários, muito menos atender aos requisitos estimados de banda (superior a 100 Gb/s), para as projeções das próximas NG-PONs, mantendo características de relação custo-benefício adequadas.

3.3.6 Reuso de Comprimento de Onda

Uma proposta para superar as barreiras de custo e gerenciamento espectral encontradas nas topologias banda C/L e C-band *splitting* utiliza-se da alocação de um único comprimento de onda por enlace OLT-ONT. A **Fig. 3.7** mostra uma representação esquemática desta topologia denominada “reuso de portadora óptica”, ou “reuso de comprimento de onda” (*Wavelength Reuse – WR*), ou ainda “esquema de remodulação óptica” (*Optical Remodulation Scheme*) [68-110].

Nestes esquemas, o nível de potência óptica do sinal *downstream* que atinge o *front-end* da ONT é dividido em duas frações por um acoplador de potência: a primeira, de menor intensidade, é destinada ao receptor para leitura dos sinais de descida, enquanto a fração restante é direcionada ao transmissor *upstream*, atuando como uma semente óptica. A semente óptica *upstream* é, então, remodulada com os dados do usuário e enviada de volta ao OLT.

Figura 3.7 - Ilustração esquemática da topologia de reuso de portadora óptica.

Através da análise da **Fig. 3.7** nota-se que a operação das topologias WCR só é possível por meio do emprego de ONTs em modo de reflexão. Essa configuração traz vários benefícios em relação a configuração banda C/banda L, tais como:

- 1) o mesmo comprimento de onda é usado tanto para o sinal de descida, quanto para o sinal de subida, propiciando um melhor aproveitamento da alocação espectral;

- 2) os sinais *downstream* atuam também como semente ópticas para os transmissores refletivos *upstream*, dispensando fontes banda larga compartilhadas para geração da semente óptica para os sinais de subida;
- 3) são eliminadas questões de alinhamento espectral existentes entre os AWGs, acopladores de banda WDM e banda de operação dos transmissores, uma vez que apenas uma banda óptica é necessária para alocação dos canais ópticos;
- 4) é possível uma melhor relação custo-benefício, em virtude da manutenção de elementos ativos na mesma banda óptica e;
- 5) permite-se a expansão gradativa para cenários de supercapacidade S+C+L, em virtude dos itens 1, 2 e 3.

De acordo com alguns trabalhos encontrados na literatura, o conteúdo óptico dos sinais *downstream* que atuam como sementes ópticas podem ser implementados da seguinte forma: alternadamente modulados [1]; modulação contínua [73-79] ou; modulação contínua em um formato ortogonal ao sinal de subida [88-91]. A seguir será apresentada brevemente a evolução histórica dessa topologia.

Interrogação Remota do Terminal de Rede

A primeira configuração de reuso de portadora óptica encontrada na literatura data de 1994 e foi proposta por Frigo *et al.* [1]. Esta rede WDM-PON foi denominada interrogação remota do terminal de rede (*Remote Interrogation Network* - RITENET).

O objetivo principal da topologia visava a eliminação de fontes ópticas nas ONTs, substituindo estes dispositivos por moduladores externos. Desta forma, a configuração *colorless* dos terminais usuário era consequentemente garantida. A Fig. 3.8 mostra uma ilustração esquemática da proposta de 1994 [1].

Um conjunto de fontes ópticas no OLT gera os sinais *downstream* para os respectivos usuários. Entretanto, os sinais de descida são alternadamente modulados: uma fração do quadro temporal do sinal *downstream* é desprovida de dados, atuando como uma portadora óptica para os sinais *upstream*.

O sincronismo óptico para geração dos sinais *upstream* neste sistema é assegurado pela multiplexação em TDM para ambos os sentidos de tráfego e por um sincronismo elétrico entre o receptor e o modulador da ONT.

Em linhas gerais, uma das grandes dificuldades práticas de topologias de reuso de portadora óptica reside no balanço de potência óptica entre os sinais semente *upstream* e os sinais de descida para detecção, o que limita o alcance da rede. Além disso, especificamente para esta topologia, o emprego de multiplexação em TDM impede a entrega de transmissão bidirecional simétrica, comprometendo a capacidade oferecida pela rede.

A proposta de reuso em comprimento de onda oferecida pela RITENET foi um marco importante em sistemas WDM-PON, pois permitiu uma forma mais eficiente de alocação espectral em ONTs refletivas, embora a configuração original de duas fibras alimentadoras e distribuidoras, moduladores externos e sinais *downstream* alternadamente modulados não tenha se mantido. A técnica de reuso de portadora óptica sofreu varias modificações ao longo dos últimos 20 anos, sendo adaptada para diversas aplicações em transmissores refletivos na pesquisa atual, especificamente, para transmissores RSOAs, como será discutido a seguir.

Figura 3.8 - Ilustração esquemática da proposta original da RITENET [1]. Mod refere-se ao modulador externo presente na ONT para inserção dos dados *upstream*.

Apagamento e Reuso de Portadora Óptica

A maneira mais elementar de se aproveitar toda a banda disponível no cenário de reuso de portadora óptica e superar as limitações impostas pela topologia RITENET

seria por meio do uso da multiplexação em WDM, empregando sinais modulados continuamente com todos os quadros temporais preenchidos com dados.

Entretanto, para que esta topologia opere de maneira adequada no domínio da intensidade, é necessário que a razão de extinção óptica (*Extinction Ratio* – ER) do sinal *downstream* que atinge a ONT, seja suprimida ou apagada, utilizando alguma técnica adicional. Só assim é possível reutilizar a semente *upstream* como portadora óptica para inserção de dados do usuário.

Neste contexto, a técnica descrita é denominada apagamento de portadora óptica, e foi proposta pioneiramente por K. C. Reichmann *et al.* [68] no início dos anos 2001, sendo aprimorada por Conforti *et al* [69], a qual explorava as características de SOAs em regime de saturação. A ideia básica consiste em suprimir o nível de razão de extinção do sinal modulado em intensidade a valores próximos a zero de tal forma que seja possível reaproveitá-lo como portadora óptica para inserção de outra sequência de dados, no caso os sinais *upstream*. As técnicas de apagamento estão detalhadas no **Apêndice A**.

A técnica de apagamento impulsionou a pesquisa e desenvolvimento na área de reuso de portadora óptica no domínio da intensidade com o uso de SOAs. Entretanto, ainda utilizavam-se lasers DFBs como transmissores *downstream* [70-72], o que não era desejável em virtude da necessidade de componentes específicos, mesmo para o lado OLT.

Já em 2007, o processo de fabricação RSOAs atingira um nível de maturidade tecnológica propício para o uso desses dispositivos em ambos os lados OLT e ONT do sistema em estruturas bidirecionais [73], combinando-os à técnica apagamento de portadora óptica e fatiamento espectral, como mostrado na **Fig. 3.9**.

Nesta configuração, RSOAs são empregados como transmissores refletivos no OLT e ONTs do sistema, o que permite o uso de modulação direta. Uma fonte ASE banda larga provê a semente óptica para os RSOAs do OLT para geração dos sinais *downstream*, os quais são enviados às respectivas ONTs do sistema via 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 acoplador de potência com razão 50x50, por exemplo. Aqui, o apagamento de portadora é ditado pelas características de compressão de ganho dos RSOAs.

Analisando-se a **Fig. 3.9**, uma fonte ASE banda larga ainda é necessária de forma a prover a semente óptica para os RSOAs, assim como ocorre nas propostas *C-band splitting* e *C/L-bands*. Entretanto, esta fonte ainda é necessária para os transmissores do OLT.

Figura 3.9 - Ilustração esquemática da topologia de remodulação com RSOAs, proposta em [73].

Uma vez que cada sinal *upstream* é gerado por meio da reutilização dos sinais de descida por parte dos RSOAs do OLTs, este esquema dispensa quaisquer tipos de sementes ópticas de banda larga para os RSOAs da ONT, diferentemente dos cenários anteriormente descritos.

Desta forma, esta topologia oferece uma melhor relação custo-benefício do que as demais tecnologias de transmissores refletivos apresentadas até o momento, pois emprega apenas uma BLS para o sistema todo além de preservar todos os benefícios listados na **Seção 3.3.6**.

Entretanto, os sinais *downstream* e *upstream* gerados nessa configuração estão sujeitos a maiores degradações sistêmicas do que nas topologias de dois comprimentos de onda distintos alocados por ONT, limitando o alcance e capacidade da rede, conforme exposto a seguir.

3.3.7 Apagamento e Reuso de Portadora Óptica: Efeitos Degradantes

Em linhas gerais, os principais efeitos degradantes presentes em sistema de reuso de portadora óptica são o ruído de sobremodulação [72-75], batimento ASE-ASE [76], dispersão cromática [77-79], efeitos de pós-filtragem [80-85], reflexões espúrias [86,87] e retroespalhamento Rayleigh. Esses efeitos são originados, basicamente, pela operação *loopback* dos sinais *upstream*, do uso de fontes ASE como sementes ópticas e do emprego da técnica de apagamento e reuso de portadora.

Alternativamente, para os sistemas banda C/banda L os efeitos degradantes seriam causados apenas pela operação *loopback* dos sinais *upstream* e do uso de fontes ASE como sementes ópticas, entretanto, com um menor impacto sistêmico do que em sistemas de reuso de portadora óptica, conforme melhor descrito no **Apêndice B**.

Algumas técnicas, ópticas e eletrônicas, foram propostas ao longo dos anos com o intuito de mitigar o impacto desses efeitos degradantes, sendo o assunto da **Seção 3.3.8**

3.3.8 Apagamento e Reuso de Portadora Óptica: Técnicas para Mitigação dos Efeitos Degradantes

Conforme exposto, pode-se afirmar que os efeitos encontrados em topologias de remodulação óptica são originados da combinação de três fatores: conteúdo espectral de sinais ASE de banda estreita (CD, PFE e batimento ASE-ASE); eficiência de apagamento dos RSOAs (ruído de sobremodulação); e operação em *loopback* (reflexões espúrias e retroespalhamento Rayleigh).

Várias técnicas foram propostas ao longo dos anos com o intuito de mitigar o impacto destes efeitos, entre as quais balanço dos níveis de razão de extinção [74], uso de formatos de modulação em domínios ortogonais [88-93], sementes ópticas de alta potência [94], injeção de corrente de alimentação adiante (*Feed Forward Current Injection* – FFCI) [95-101], ajuste de limiar de nível de decisão (*Decision Threshold Level Adjustment* – DTLA) [102-105] e fontes ópticas pré-fatiadas (*Pre-Spectrum-Sliced Light* - PSSSL) [84-85]. Estes métodos estão melhores descritos no **Apêndice C**.

3.3.9 Apagamento e Reuso de Portadora Óptica: Comentários Finais

A combinação das técnicas de PSSL, FFCI e DTLA atingiram o auge em 2010 dos sistemas de remodulação em intensidade para sistemas a 1,25 Gb/s e 2,5 Gb/s, resultando em produtos comerciais WDM-PON e implementações comerciais na Coreia do Sul [99-101]. No momento de redação desta tese, o trabalho mais atual em reuso de portadora óptica no domínio da intensidade encontrado na literatura técnica data de 2013 [96]. A rede é limitada a 20 km de transmissão bidirecional e a 100 Gb/s de capacidade (80 x 1,25 Gb/s).

De fato, o compartilhamento de uma única fonte BLS no OLT permite uma simplificação significativa no aparato dos usuários bem como proporciona a melhor relação custo-benefício, devido ao gerenciamento de alocação espectral empregado.

Entretanto, o uso de uma única BLS cria um problema de vulnerabilidade muito significativo, pois uma eventual falha da fonte banda larga desconectaria todos os usuários da rede. Uma segunda BLS poderia ser usada no OLT como fonte óptica redundante de forma a garantir o funcionamento contínuo da rede contra falhas eventuais da fonte de banda larga primária. Entretanto, essa opção reflete em custos operacionais excessivos no projeto de uma rede de acesso.

Adicionalmente, o esquema centralizado estabelece uma dependência muito forte entre o desempenho sistêmico dos sinais *upstream* e as características da fonte BLS, tais como perfil espectral, potência da semente, batimento ASE-ASE, etc, limitando o orçamento de potência da rede e o número de canais disponíveis.

Em termos de evolução de longo prazo, tal rede poderia oferecer o triplo da capacidade que as propostas já discutidas (C/L, C-band splitting) por meio da sobreposição das bandas S+C+L, evidentemente apoiada na disponibilização comercial de RSOAs nas bandas S e L, utilizando de uma única infraestrutura de fibra alimentadora conforme descrito em [106]. Redes da ordem de 320 Gb/s podem ser projetadas com essa configuração. Outros trabalhos referentes a remodulação óptica podem ser encontrados em [107-110]

Até o presente momento, foram retratadas algumas variações das redes CLS, um dos pilares em topologias de acesso WDM e transmissores refletivos. Limitações, vantagens, desafios e principais características dessas topologias propostas ao longo dos anos foram listados, culminando na técnica de remodulação óptica como uma das

propostas que cobre, em grande parte, os objetivos almejados em projetos de redes WDM-PON: alocação espectral eficiente, estrutura simplificada, alta capacidade, possibilidade de ampliação da capacidade da rede em longo prazo e custos operacionais reduzidos.

Entretanto, o quesito alcance da rede é severamente limitado em virtude das características espectrais dos sinais fatiados, bem como pela dependência da geração dos sinais *upstream* para com os elementos localizados no OLT (rede CLS), o que reflete no alto orçamento de potência demandado para esta implementação.

A **Seção 3.3.10** descreve uma topologia WDM-PON totalmente diferente da estrutura CLS estudada até então, embora empregando, ainda, transmissores refletivos na ONT, a qual tem chamado muito atenção dos pesquisadores nos últimos 2 anos. Esta é a última configuração a ser apresentada e discutida nesse capítulo, permitindo, assim, contextualizar com clareza a proposta da tese, assunto da **Seção 3.4**.

3.3.10 Técnica de Autoalimentação para ONTs Refletivas

Conforme mencionado, em virtude das limitações impostas pelas arquiteturas centralizadas, principalmente, para a geração e desempenho sistêmico dos sinais *upstream*, várias topologias WDM-PON foram propostas ao longo dos anos, com o intuito de maximizar o desempenho sistêmico nestes cenários.

Neste contexto, uma das linhas de pesquisas tinha como foco principal a elaboração de técnicas e aparatos que propiciassem a redução do impacto dos efeitos degradantes decorrentes da estrutura CLS para os sentidos de subida, mantendo o nível de complexidade o mais baixo possível.

Por outro lado, em 2005, surgiu uma topologia que modificou complementarmente o cenário de pesquisa de transmissores refletivos em WDM-PON, o qual era fortemente apoiado nas redes CLS até então. O interesse dessa segunda linha de pesquisa era a eliminação completa das estruturas de redes centralizadas para o sentido de subida.

Nesta nova topologia, cada transmissor *upstream* refletivo gera localmente sua própria semente óptica, a partir de um circuito de recirculação óptica presente no nó remoto. Desta forma, exclui-se a necessidade de alimentação óptica remotamente do OLT, tornando a geração do sinal *upstream* independente de qualquer aparato presente no terminal de linha óptica, característica essencial das redes CLS.

formação do circuito de recirculação óptica, estabelecido entre o nó remoto e os transmissores refletivos da ONT.

Ainda nessa primeira configuração ilustrada pela **Fig. 3.10**, um EDFA era necessário para compensar as perdas impostas pelos AWGs, emulando um RSOA de alta potência, pois as características de ganho dos SOA refletivo em 2006 ainda não eram propícias para atender aos requisitos de operação dessa técnica. Um filtro passa-banda (*Band-Pass Filter* – BPF) era utilizado com o intuito de eliminar o conteúdo espectral de ASE excessivo gerado pela EDFA.

O princípio de operação dos transmissores (*upstream*) autoalimentados é descrito da seguinte forma: em cada ONT, a ASE do RSOA (ou FP-LD) gera, inicialmente, o sinal óptico com espectro banda larga, o qual é encaminhado a um determinado braço do AWG. Cada sinal banda larga é fatiado em um sinal banda estreita cuja frequência central é determinada pelo braço do AWG.

Após o primeiro fatiamento espectral, cada sinal banda estreita emerge na porta comum do AWG. Os sinais são encaminhados à porta comum do acoplador de potência onde, em uma das portas de saída do divisor, uma fração de potência óptica é direcionado ao OLT para detecção dos dados *upstream*. O nível de potência restante, agora em sinal de banda estreita, é direcionado a um circulador óptico, o qual reenvia os sinais fatiados a porta comum do AWG.

Finalmente, cada sinal banda estreita, centrado em uma frequência específica, é direcionado a cada RSOA por meio do braço do AWG associado, provendo então a semente óptica para o transmissor refletivo. Esse nível de potência da semente óptica que atinge o RSOA no primeiro circuito de recirculação é denominado como “semente óptica de autoalimentação” e é um parâmetro essencial nessa técnica.

Uma vez estabelecido o equilíbrio dinâmico, a geração dos dados *upstream* dá-se de forma contínua. Nota-se que a geração de cada comprimento de onda dos sinais de subida depende exclusivamente das características de ganho, potência e perfil de ASE dos RSOAs ONT, bem como das perdas de fatiamento e inserção induzidas pelos elementos presentes no circuito: RSOA da ONT- fibra distribuidora - elementos de recirculação óptica – fibra distribuidora - RSOA da ONT.

Em linhas gerais, o circuito de recirculação óptica estabelecido pode ser entendido como uma cavidade de ganhos e perdas, onde o RSOA provê o meio ativo para amplificação. As perdas ópticas estão associadas às perdas de inserção de fatiamento causadas pelos elementos de multiplexação/demultiplexação, bem como pela

perda de atenuação do trecho de fibra de distribuição, e os demais elementos atuam como as “interfaces refletivas”.

Duas características intrínsecas a sinais ópticos provenientes do uso da técnica de autoalimentação podem ser destacadas: largura espectral ultra-estreita e baixa razão de extinção. Essas duas características decorrem do processo de recirculação óptica formada entre transmissor – AWG - elementos refletivos – AWG - transmissor, pois o sinal é filtrado e amplificado muitas vezes. Valores típicos de razão de extinção e largura espectral, nas melhores condições de operação do dispositivo, são da ordem de 6 dB e 0,05 nm, respectivamente.

Comparado-se às redes CLS, onde a técnica de fatiamento espectral de BLS é utilizada, a largura de linha dos sinais ópticos *upstream* provenientes da técnica *self-seeding* é aproximadamente dez vezes menor, o que permite uma maior tolerância aos efeitos de pós-filtragem e dispersão cromática, diferentemente do cenário remodulação descrito na seção 3.3.7.

3.3.12 Técnica de Autoalimentação: Requisitos de Operação

Em linhas gerais, pode-se dizer que a técnica *self-seeding* consiste também de um processo de apagamento de portadora, pois é necessário que a semente óptica com conteúdo de dados, gerada pela própria ASE que emerge do RSOA, seja sobremodulada com a nova sequência de bits requisitada pelo assinante (*upstream*), como pode ser notado pela análise da **Fig. 3.10**. Desta forma, a operação em regime de saturação é uma condição essencial para propiciar um desempenho sistêmico satisfatório, somada ao atendimento da condição de compromisso existente entre P_{inj} , ER_D e ER_{UP} .

Assim, para que a técnica *self-seeding* proporcione um desempenho sistêmico satisfatório, duas condições/critérios devem ser satisfeitos: operação em regime de saturação dos transmissores refletivos e; manutenção e estabilidade do estado de polarização do sinal óptico na porta de saída/entrada do RSOA.

Operação em Regime de Saturação dos Transmissores Refletivos

Para operação em regime de saturação, o dispositivo RSOA deve ser polarizado com altos níveis de corrente, de forma que consiga apagar, por mecanismos apenas

ópticos, os dados *upstream* refletidos (semente óptica) e sobremodular a nova sequência de bits requisitada pelo assinante (*upstream*).

Na técnica *self-seeding*, uma fração de potência do próprio sinal *upstream* gera a semente óptica, o qual retorna ao RSOA. Nesta configuração, a eficiência de apagamento é inversamente proporcional ao valor da razão extinção *upstream*, enquanto o desempenho sistêmico na detecção *upstream* é diretamente proporcional a esse valor. Logo, existe um valor ótimo de corrente alternada, o qual produz o nível de ER_{UP} , para garantir uma operação satisfatória da técnica.

Somado a esses requisitos, o balanço entre as perdas de inserção e ganho óptico do RSOA deve ser levado em conta para garantir um nível adequado da semente óptica de autoalimentação.

Em 2006, RSOAs produziam níveis de semente óptica no primeiro *roundtrip* da ordem de -28 dBm, níveis de potência muito inferiores quando comparados aos valores de semente óptica usados nas redes CLS, o que exigia, então, a presença dos EDFA para sustentar as perdas ópticas da cavidade.

A maior parte da perda óptica nessa “cavidade” está concentrada no fatiamento espectral e nas perdas de inserção ocasionadas pelo 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). Então, o orçamento de potência demandado no percurso de recirculação é um dos maiores limitantes de desempenho.

Alternativas de multiplexação/demultiplexação no RN foram propostas ao longo dos anos de forma a minimizar as perdas impostas pelo AWG [115-118]. Entretanto, a substituição deste elemento por combinações de outros elementos de multiplexagem, sem que resultem em alta complexidade na rede e/ou alta perda, torna-se um desafio muito grande.

Os problemas de orçamento de potência só foram resolvidos de forma satisfatória anos mais tarde (2011), com o amadurecimento no desenvolvimento de projetos de RSOA com altos valores de potência de saturação (10 dBm) e ganho óptico (30 dB).

Estabilidade do Estado de Polarização na Porta de Saída/Entrada do RSOA

O atendimento ao requisito de estabilidade de polarização é ditado pelas características de dependência de ganho dos RSOAs em relação ao estado de polarização (*Polarization Dependence Gain* – PDG) dos sinais de entrada, ou seja, o ganho óptico provido pelo dispositivo semiconductor depende do estado de polarização do sinal de entrada. Esta é uma característica intrínseca a qualquer amplificador óptico semiconductor.

Para a configuração *self-seeding*, as perturbações no estado de polarização induzidas pelo trecho de fibra alimentadora presente entre o RSOA e o braço do AWG alteram de forma aleatória o estado de polarização da semente óptica de autoalimentação no caminho de recirculação óptica.

Essas alterações no estado de polarização da semente óptica de autoalimentação afetam o ganho óptico do dispositivo e, por consequência, a dinâmica de apagamento óptico do RSOA, causando instabilidade no processo de sobremodulação.

A probabilidade de ocorrência de instabilidade dinâmica nesta técnica era muito grande para as características dos dispositivos projetados em 2006 cujos valores de semente óptica de autoalimentação e de PDG eram de -25 dBm e de 24 dB, respectivamente [112-114].

Entre os anos 2005 e 2010 a técnica *self-seeding* não teve tanto impacto na literatura técnica [112-118], devido às questões de estabilidade dinâmicas ainda pendentes, embora o amadurecimento tecnológico em dispositivos RSOAs tenha permitido a uma redução dos valores de PDG à 2 dB [119].

Entretanto, devido a ausência de técnicas robustas e de baixa complexidade de controle do estado de polarização para aplicações em acesso, essa opção ainda não era compatível com as características necessárias para ONTs *colorless*.

3.3.13 Técnica de Autoalimentação: Topologia Base

A questão de estabilidade em relação à PDG só foi resolvida em 2011 [119], com a proposta de Presi *et al.*, ilustrada pela **Fig. 3.11**. A inserção de um espelho rotacionador de Faraday (*Faraday Rotator Mirror* – FRM) em conjunto com o acoplador de potência no nó remoto, para trechos curtos de fibras alimentadoras (1 km), garante a estabilidade e a manutenção entre o estado de polarização da semente óptica que chega ao RSOA e o estado de polarização do sinal de *upstream* que emerge do RSOA.

Esta propriedade é válida em duas condições: i) RSOAs com baixa PDG (até 2 dB), ii) sistemas cujo comprimento do enlace de fibras distribuidoras seja de poucos quilômetros (até 5 km no melhor cenário), garantindo que o tempo de propagação no percurso de recirculação ($\sim 1 \mu\text{s}$) seja muito menor que o tempo de manifestação dos efeitos de polarização induzidas pela fibra ($\sim 1 \text{ ms}$). Assim, as mudanças do estado de polarização ocasionadas pela fibra podem ser consideradas desprezíveis, e a ortogonalidade entre os sinais é preservada.

A proposta [119] 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, diferentemente de todas as topologias de autoalimentação até então. A topologia [119] é considerada como cenário base para técnica *self-seeding* na pesquisa atual.

Como nota, uma vez que os RSOA produzidos a partir de 2011 exibem características de ganho e potencia de saturação óptica suficiente para suprir as perdas no caminho de recirculação óptica, dispensa-se o uso de EDFAs acoplados ao nó remoto, conforme exposto na **Fig. 3.10**.

Após essa proposta, uma quantidade volumosa de trabalhos correlatos surgiu na área de acesso WDM entre o final de 2011 até meados de 2014 [120-140]. Técnicas de controle de polarização têm sido aprimoradas com o uso combinado de FRM compartilhado no nó remoto e um rotacionador de Faraday (*Faraday Rotator* – FR) acoplado ao transmissor refletivo, garantindo uma maior flexibilidade quanto aos valores de PDG (valores superiores a 20 dB [123]). Essa técnica permitiu aplicações em transmissores FP-LD em 2012 [124-126], transmissores que exigem um controle de polarização muito mais rígido que os RSOAs.

Comparando-se RSOAs a FP-LD, os sinais provenientes da autoalimentação de FP-LD oferecem muitas vantagens frente ao dispositivo RSOA, tais como largura de linha reduzida, altos valores de potência de saída e insensibilidade à temperatura.

Entretanto, um controle muito mais rigoroso do estado de polarização é exigido de forma a garantir a estabilidade dinâmica nas cavidades de F-P, diferentemente dos RSOAs, os quais conseguem operar em equilíbrio estável com critérios mais flexíveis.

Contudo, a desvantagem crucial do FP-LD frente aos RSOA é a presença das oscilações de relaxações, característica intrínseca ao laser semiconductor multimodo. Tal característica limita a taxa de modulação direta nos FP à 2,5 Gb/s, impondo barreiras tecnológicas muito desafiadoras para evolução de cenários em 1,25 Gb/s para 10 Gb/s

por ONT. Desta forma, embora os FP-LDs tenham ressurgido na pesquisa em WDM-PON, ainda não têm tanta expressividade como os RSOAs.

Figura 3.11- Ilustração esquemática da topologia proposta em [119].

Ademais, embora a banda de modulação elétrica do RSOA seja limitada também a valores em torno de 2 GHz, a curva de resposta em frequência do dispositivo exibe um perfil de atenuação suave, comportamento clássico de filtros passa baixa.

Essa característica permite a operação do dispositivo em taxas de modulação direta de até 10 Gb/s, apoiadas em técnicas de equalização eletrônica, ou óptica, para detecção dos sinais [141-152]. Progressos têm sido feitos na área de DSP para aplicações em RSOA a 10 Gb/s e além, desde 2008 [153].

3.3.14 Técnica de Autoalimentação: Comentários Finais

Trabalhos recentes encontrados na literatura reportam o domínio da técnica *self-seeded* RSOAs em taxas de 1,25 Gb/s (modulação direta) em alcances de 50 km [131]. Avanços significativos em 10 Gb/s têm sido reportados também [128, 133-136] na área, com recordes de transmissão por distâncias de 70 km em virtude da maturidade tecnológica atingida no desenvolvimento de R-SOAs na banda O [134].

Configurações comerciais ainda não estão disponíveis, embora exista uma plataforma WDM-PON 40 Gb/s (32 x 1,25 Gb/s) proposta por [122].

Embora o amadurecimento da técnica *self-seeding* tenha permitido a projetos mais robustos de acesso em WDM-PON, uma rápida análise das **Figs. 3.19 e 3.20** revela a principal desvantagem da técnica frente ao cenário de remodulação: duas bandas ópticas são requeridas (banda L *downstream* e banda C *upstream*).

A configuração banda L/banda C não atende às necessidades de evolução, capacidade e gerenciamento de custos operacionais já muito discutidas, embora ofereça como vantagem principal a eliminação da estrutura CLS para o sentido *upstream* e tolerância sistêmica ao impacto dos efeitos de CD, batimento ASE-ASE, efeitos pós-filtragem, etc, em virtude das características ópticas decorrentes de sinais autoalimentados.

3.4 Proposta da Tese

Conforme discutido até o momento, duas topologias WDM-PON podem ser destacadas, tais quais remodulação no domínio da intensidade (apoiada na estrutura CLS) e ONTs autoalimentadas.

A configuração remodulação óptica traz como benefícios frente à técnica de autoalimentação as seguintes características:

- 1) Alocação espectral mais eficiente;
- 2) Compartilhamento de um único comprimento de onda por enlace OLT-ONT;
- 3) Necessidade de uma única banda óptica;
- 4) Utilização do mesmo transmissor refletivo em toda a topologia (por banda óptica);
- 5) Viabilidade de expansão para o cenário S+C+L.

As desvantagens do cenário de remodulação óptica são:

- 1) Necessidade de BLS compartilhada para *downstream* e *upstream*;
- 2) Efeitos degradantes em virtude do uso de ASE;
- 3) Sistema não é imune à falha da BLS;
- 4) Estrutura CLS;
- 5) Geração do sinal de *upstream* é dependente das características dos sinais de descida e da BLS.

A configuração autoalimentação (topologia base) traz como benefícios frente ao cenário de remodulação óptica as seguintes características:

- 1) Eliminação de BLS compartilhada para o *upstream*;
- 2) Aumento da tolerância aos efeitos degradantes em virtude das características ópticas dos sinais autoalimentados;
- 3) *Upstream* é imune à falha da BLS;
- 4) Eliminação da estrutura CLS;
- 5) Geração do *upstream* dependente apenas das características do transmissor refletivo da ONT e das perdas do circuito de recirculação óptica.

As desvantagens da configuração de autoalimentação são:

- 1) Utilização espectral excessiva;
- 2) Não existe compartilhamento de comprimento de onda;
- 3) Exigência de duas bandas ópticas;
- 4) Utilização de dois tipos de elementos ativos na rede;
- 5) Não é possível expandir para o cenário S+C+L mantendo a relação custo-benefício atrativa.

Tendo em vista o panorama exposto, o objetivo central dessa tese é uma proposta de uma nova topologia WDM-PON e uma nova técnica para geração dos sinais *downstream*, as quais combinem e minimizem, respectivamente, as vantagens e desvantagens oferecidas pelas técnicas de autoalimentação e reuso de portadora óptica, atendendo as premissas tecnológicas expostas na introdução.

A topologia original proposta na tese está ilustrada na **Fig. 3.12** e é denominada técnicas combinadas de autoalimentação e reuso de portadora óptica para cenários de remodulação.

A proposta da tese emprega a técnica de autoalimentação, entretanto, para os RSOAs no OLT. Uma vez gerados os sinais *downstream*, utiliza-se a técnica de remodulação para geração dos sinais *upstream*: cada RSOA na ONT recebe a semente óptica do respectivo RSOA autoalimentado no OLT, remodula esse sinais e os envia de volta ao OLT.

Embora a estrutura CLS seja ainda mantida, deve-se observar que nesta nova configuração, cada RSOA do OLT gera de forma independente (dos demais elementos ativos presentes no OLT) o sinal *downstream* e a semente óptica para o respectivo

RSOA do ONT. Desta forma, esse cenário permite a exclusão de fontes BLS de alta potência compartilhadas no OLT, o que reduz o custo de instalação da rede, o consumo de potência enquanto minimiza a questão de vulnerabilidade física da rede.

Figura 3.12 - Proposta central de estudo: autoalimentação OLT e remodulação óptica ONT combinadas.

Ainda com referência à **Fig. 3.12**, deve ser notado que a operação da topologia proposta é ainda condicionada à presença de um elemento compartilhado no OLT: o FRM. Contudo, a probabilidade de uma falha eventual de um elemento passivo (FRM) é muito inferior do que de um elemento ativo (BLS). Além disso, conforme será exposto no **Cap. 5**, o custo de um FRM é apenas 4% do valor de uma fonte óptica pré-fatiada (PSSL), o que reduz consideravelmente (17,5% aproximadamente) o custo de instalação da topologia combinada frente à topologia convencional.

As características espectrais de largura ultra-reduzida de sinais *downstream* autoalimentados, permitem uma maior tolerância do desempenho de transmissão em relação a dispersão cromática e a outros efeitos degradantes provenientes do uso de ASE de banda estreita como semente óptica, garantindo uma maior flexibilidade nos critérios de remodulação.

Ademais, tal topologia propicia um aumento significativo de orçamento de potência para os sinais *upstream* em cenários de remodulação, mantendo a melhor relação custo-benefício também para equipamentos de transmissores refletivos em cenários de remodulação óptica devido a exclusão de qualquer mecanismo adicional de apagamento de portadora óptica e/ou técnicas adicionais.

Em suma, a configuração proposta traz como benefícios as seguintes características:

- 1) Alocação espectral mais eficiente;

- 2) Compartilhamento de um único comprimento de onda por enlace OLT-ONT;
- 3) Exigência de uma única banda óptica;
- 4) Utilização do mesmo transmissor refletivo em toda a topologia (por banda óptica);
- 5) Viabilidade de expansão para o cenário S+C+L;
- 6) Eliminação de BLS compartilhada para o *upstream*;
- 7) Aumento da tolerância aos efeitos degradantes provenientes de sinais ASE, em virtude das características ópticas dos sinais autoalimentados;
- 8) Geração dos sinais *upstream* é independente e imune, respectivamente, as características e falha da BLS;
- 9) Redução do consumo de energia no OLT (eliminação de BLS de alta potência);
- 10) Redução no custo de gerenciamento operacional frente a estrutura autoalimentação e modulação óptica.

As desvantagens desta topologia são:

- 1) Estrutura CLS;
- 2) Geração do sinal de *upstream* é dependente das características do sinal de descida;
- 3) Sistema não é imune à falha do FRM.

Finalizando este capítulo, a **Fig. 3.13** apresenta a linha cronológica do acesso WDM e ONTs *colorless* nos últimos 30 anos, destacando os principais marcos discutidos nesse capítulo, tais como topologias, técnicas de transmissão e detecção, de forma a situar a proposta do autor.

Nos capítulos seguintes serão apresentados os resultados obtidos e as topologias investigadas por meio de montagem, avaliação e caracterização experimental. Para este fim, foram utilizados recursos provenientes do Projeto 100 GETH (2011-2014), fomentados pelo FUNTTEL/FINEP, bem como a infraestrutura do Laboratório de Sensoriamento e Monitoração Óptica (LSMO) da Diretoria de Redes Convergentes (DRC) da Fundação Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações (CPqD), Campinas, SP.

No Capítulo 4 são estudadas as redes combinadas de autoalimentação e remodulação óptica, apresentando os resultados obtidos em [75, 154] em redes de acesso convencionais (20 km).

No Capítulo 5 são estudadas as redes combinadas de autoalimentação e remodulação óptica, apoiadas em remodulação optoeletrônica, apresentando os resultados obtidos em [155-156] em redes de acesso estendido (60 km).

No **Apêndice D** estão apresentadas as avaliações experimentais das redes com compartilhamento da banda C. Embora a topologia mencionada apresente diversas limitações, cronologicamente, essa foi à primeira rede de acesso estudada pelo autor em virtude dos recursos experimentais disponíveis na época de realização. Ademais, a análise dessa primeira configuração foi essencial, pois permitiu a familiaridade com os procedimentos experimentais, bem como identificar com clareza as limitações impostas pelo cenário ASE como fonte BLS. Contribuições deste estudo podem ser encontradas nas Refs [157-159].

Linha Cronológica

Figura 3.13 - Linha cronológica apontando os destaques tecnológicos, técnicas de transmissão/detecção, topologias e taxas de transmissão em WDM-PON nos últimos 30 anos.

4. Técnicas Combinadas de Autoalimentação e Reuso de Comprimento de Onda

Os objetivos desse **Capítulo** são:

- Apresentar a topologia original da Tese;
- Descrever as provas de conceito realizadas com o intuito de validar o cenário base de testes;
- Avaliar o desempenho de transmissão dos sinais de subida e descida por meio da obtenção de diagramas de olho, caracterizações ópticas espectrais, curvas de BER e de penalidade em potência em termos da razão de extinção *downstream* (ER_D), razão de extinção *upstream* (ER_{UP}), potência de injeção no RSOA da ONT (P_{inj}) e potência da semente de autoalimentação (P_{ss}) no RSOA do OLT em enlaces de 20 km;
- Comparar, qualitativamente, os ganhos de desempenho de transmissão oferecidos pela topologia combinada frente aos trabalhos de remodulação convencional encontrados na literatura, na ausência de qualquer mecanismo eletrônico ou óptico adicional para apagamento de portadora óptica.

4.1 Introdução

Conforme descrito no **Cap. 3**, a topologia de reuso de portadora óptica baseada em detecção direta, fontes ASE pré-fatiada e modulação em intensidade com a utilização de RSOAs é a configuração que atende, em grande parte, às premissas tecnológicas adotadas no **Cap. 1**: relação custo-benefício atrativa, transmissores *colorless*, alocação espectral eficiente, capacidade agregada elevada e possibilidade de evolução gradativa com alterações mínimas no nível físico da rede.

Embora a topologia apresente várias das características acima, o desempenho sistêmico da rede é severamente afetado pelo impacto dos vários efeitos degradantes ocasionados pela estrutura bidirecional, do uso do mesmo comprimento de onda por enlace ONT-OLT e pelas características de sinais ASE de banda estreita.

Pode-se destacar como os principais limitantes sistêmicos o ruído residual de sobremodulação [72-75], o espalhamento Rayleigh e as reflexões espúrias [86-87], somado aos efeitos provenientes do conteúdo espectral de sinais de ASE de banda estreita, tais como dispersão cromática [77-79], efeitos de pós-filtragem [80-85] e batimento ASE-ASE [76].

Várias técnicas foram propostas na literatura para mitigar o impacto desses efeitos, incluindo o compromisso entre os níveis de razão de extinção *downstream* e *upstream* [74], injeção de corrente de alimentação adiante para os RSOAs na ONT [95-101], ajuste de limiar de nível de decisão para o receptor do OLT [102-105], compensação de dispersão bidirecional [77-79] e sementes ópticas pré-fatiadas e de alta potência [84-85]. Ainda assim, o alcance da rede é limitado tipicamente a 20 km, mesmo para os sinais *downstream*, impedindo a implantação de arquiteturas de acesso estendido.

Além do emprego de técnicas de apagamento de portadora, em redes centralizadas, o desempenho de todos os transmissores refletivos da rede fica condicionado à operação e características da fonte ASE semente, tais como planicidade, potência de injeção por canal, intensidade relativa de ruído (*Relative Intensity Noise* – RIN), banda espectral, etc, que podem limitar o número de canais disponíveis na rede.

Em virtude dessa dependência, uma segunda BLS deve ser usada no OLT como fonte óptica redundante de forma a garantir o funcionamento contínuo da rede contra falhas eventuais da fonte de banda larga primária, o que reflete em custos operacionais excessivos no projeto de uma rede de acesso.

Finalmente, no longo prazo, o projeto de migração gradativa da capacidade oferecida pela rede WDM-PON, visando a alocação espectral das bandas S+C+L na mesma fibra alimentadora, começa a se tornar muito complexo, pois exige-se o desenvolvimento de fontes BLS que possam operar nas três bandas descritas, ocasionando custos operacionais excessivos.

Essas características passam a se tornar proibitivas para aplicações em sistemas de acesso, onde se busca a maior simplicidade e a melhor relação custo-benefício possível.

Tendo em vista o cenário exposto, neste **Capítulo** é apresentada, em detalhes, a proposta original da tese, a qual consiste de uma topologia de remodulação óptica no domínio da intensidade, propiciando melhorias, tanto no quesito gerenciamento de custos quanto em aspectos sistêmicos, frente aos sistemas encontrados na literatura técnica.

Utiliza-se também a técnica de autoalimentação, entretanto, para os RSOAs no OLT. Nesta nova topologia, cada transmissor *downstream* refletivo gera localmente sua própria semente óptica, a partir de um circuito de recirculação óptica presente no OLT, pois a semente óptica para os transmissores *downstream* é gerada a partir do próprio

sinal ASE banda larga que emerge do dispositivo semiconductor. Desta forma, é possível excluir a necessidade do esquema de compartilhamento de fontes ASE presentes em esquemas de remodulação convencionais, tornando a topologia proposta imune e independente, respectivamente, às falhas e às características da fonte BLS, embora a proposta esteja ainda condicionada à operação do FRM, entretanto, em um nível de vulnerabilidade física menor.

Ademais, as características espectrais dos sinais *downstream* autoalimentados permitem uma maior tolerância do desempenho sistêmico em relação à dispersão cromática e a outros efeitos degradantes provenientes do uso de ASE semente, garantindo uma maior flexibilidade nos requisitos de remodulação.

Desta forma, são estudados neste **Capítulo** cenários de curto alcance (20 km) em taxas simétricas de 1,25 Gb/s, na ausência de qualquer técnica eletrônica de apagamento de portadora óptica. Apresentam-se os resultados experimentais referentes as publicações obtidas pelo autor [75, 154]. Uma série de provas de conceito é realizada, com o intuito de validar a proposta da tese e dar sustentação às argumentações levantadas sobre os ganhos oferecidos pelos métodos propostos.

Como metodologia de estudo, são avaliadas caracterizações ópticas dos sinais autoalimentados, bem como investigações sistêmicas de BER e penalidade de potência para ambos os sentidos de tráfego, em relação a vários parâmetros, tais como razão de extinção óptica, potência de injeção óptica nos RSOAs da ONT e potência da semente óptica de autoalimentação.

De acordo com os resultados, transmissão bidirecional satisfatória para valores de BER de 10^{-12} foram obtidas com uma penalidade máxima de 2,5 dB para uma potência de injeção de -22 dBm no RSOA da ONT, permitindo um aumento de 7 dB de margem de potência em comparação com trabalhos na literatura técnica [74], na ausência de qualquer mecanismo adicional para apagamento de portadora óptica.

O **Capítulo** está dividido da seguinte forma: Na Seção 4.2 é discutida em detalhes a topologia proposta. Na Seção 4.3 estão apresentados, de forma sucinta, os principais componentes utilizados nas avaliações experimentais. Na Seção 4.4 apresentam-se os estudos de provas de conceito, a fim de validar a topologia proposta e, finalmente, na Seção 4.5 testes de transmissão bidirecional para enlace de curto alcance. A Seção 4.6 encerra o capítulo com as considerações finais.

4.2 Configuração Experimental

A **Fig. 4.1** ilustra, esquematicamente, o arranjo experimental utilizado na configuração combinada de autoalimentação do OLT e remodulação óptica na ONT, em taxas simétricas de 1,25 Gb/s.

Diferentemente dos trabalhos de autoalimentação encontrados na literatura [111-128, 130-151], no cenário ilustrado pela **Fig. 4.1**, a técnica de autoalimentação é gerada no OLT, da seguinte forma: o esquema de recirculação óptica (cavidade) é estabelecido por meio da sequência formada pelo RSOA do OLT, AWG do OLT, acoplador de potência 10/90, FRM, acoplador de potência 10/90, AWG do OLT e RSOA do OLT. Assim, exclui-se a necessidade de uma fonte BLS compartilhada para geração dos sinais de descida, uma vez que cada RSOA gera a própria semente óptica.

Figura 4.1 – Topologia combinada de autoalimentação e remodulação óptica, para distância de 20 km. Os parâmetros estudados estão descritos na tabela associada à figura.

Nesta topologia, o sinal *downstream* autoalimentado por cada RSOA do OLT é enviado às ONTs após propagar pela fibra alimentadora, onde um acoplador de potência com razão 10/90 está presente. Dez por cento do nível de potência do sinal *downstream* é destinado ao Rx para detecção dos dados de descida. O nível de potência restante (90%) é direcionado ao RSOA da ONT para geração do sinal *upstream*.

Assim, cada RSOA do OLT gera, além da própria semente óptica, o sinal *downstream* e a semente óptica para o respectivo RSOA da ONT, de forma

independente dos demais elementos ativos no OLT, eliminando completamente o uso de fontes BLS externas e compartilhadas.

Analisando-se a **Fig. 4.1**, são indicados os vários parâmetros monitorados (representados pelos pontos B, C, E e F). Cada ponto de monitoração da topologia tem um significado particular:

- **Ponto B** – Potência óptica lançada na fibra, medições de espectro óptico e nível de razão de extinção *downstream*;
- **Ponto C** - Diagramas de olho, nível de razão de extinção *downstream*, potência de injeção nos RSOAs da ONT e avaliação sistêmica dos sinais *downstream* autoalimentandos, em função do nível de potência óptica de autoalimentação e razão de extinção *downstream*.
- **Ponto E** - Diagramas de olho, nível de razão de extinção *upstream* e avaliação dos sinais *upstream*, em função do nível de semente óptica de autoalimentação, razão de extinção (*downstream* e *upstream*) e potência de injeção no RSOA da ONT;
- **Ponto F** - Nível de potência da semente óptica de autoalimentação (Pss).

Diferentemente da configuração banda C compartilhada descrita no **Apêndice D**, utilizou-se um RSOA com baixa dependência de ganho em relação a polarização, em virtude dos baixos níveis de PDG exigida para o cenário autoalimentação. As principais características de operação do RSOA de baixa PDG estão descritas no **Apêndice E**.

Ainda com referência à **Fig. 4.1**, um EDFA com controle automático de ganho e um conjunto de circuladores ópticos foram acoplados ao RSOA da OLT. Na ausência desses elementos, a potência de autoalimentação é de somente -35 dBm/0,2 nm, a qual é muito baixa para iniciar o processo de autoalimentação. Além disso, o ganho óptico provido pelos RSOAs é insuficiente por si só para compensar as perdas encontradas no caminho de recirculação, como para garantir a supressão dos dados *downstream* no caminho de recirculação.

Entretanto, esta limitação pode ser superada com o uso de RSOAs projetados para valores de alta potência, já reportados na literatura [121]. Assim, a configuração experimental da **Fig. 4.1** foi projetada de forma a simular as características de um RSOA com maiores valores de ganho e potência de saída e o uso do EDFA deve ser encarado apenas como um artifício experimental para produzir esta configuração.

Adicionalmente, embora um EDFA de alta potência seja acoplado ao RSOA, o nível de semente óptica de autoalimentação (Pss) foi monitorado e controlado no ponto F (ver **Fig. 4.1**) com o uso de atenuadores monitores, de forma a produzir valores próximos daqueles usados em [113], estabelecendo uma situação experimental condizente com valores encontrados na literatura técnica.

Uma última observação deve ser feita em relação ao conjunto EDFA, RSOA do OLT e circuladores, tratando-se do impacto de mais ASE e o nível de isolamento dos circuladores. De fato, o uso de um amplificador a fibra dopada à Érbio insere uma quantidade adicional de ASE no sinal autoalimentado. Entretanto, como se trata de uma amplificação monocanal, adicionado a dupla filtragem imposta pelo AWG em cada circuito de realimentação, o acréscimo de ruído para o sinal autoalimentado não é tão agravante.

Contudo, embora os circuladores ópticos exibam um alto grau de isolamento (superior a 35 dB), pode-se dizer que estes têm certa influência no desempenho sistêmico do RSOA autoalimentando do OLT, devido aos valores não nulos de isolamento. Desta forma, em um cenário onde o RSOA do OLT fosse capaz por si só de suprir as perdas na cavidade, a qualidade dos sinais seria superior, na ausência desse conjunto de elementos.

O nível de potência lançada na fibra (ponto B **Fig. 4.1**) foi fixado em 0 dBm com o intuito de mitigar o impacto do retroespalhamento Rayleigh e reflexões espúrias na detecção do sinal *upstream*. Assim, o valor máximo de potência de injeção entregue aos RSOA da ONT é de -12 dBm, levando-se em conta as perdas por atenuação de 4,5 dB (20 km de SMF) somadas a 5,5 dB de perda inserção do AWG do nó remoto e de 0,6 dB do acoplador de potência 10/90 da ONT.

Os RSOAs foram modulados diretamente em taxas de 1,25 Gb/s com pulsos NRZ em sequência de bits pseudo-aleatória (*Pseudo Random Bit Sequence* – PRBS) com comprimentos de $2^{31}-1$ e $2^{23}-1$, respectivamente, para os sinais *downstream* e *upstream*, permitindo assim a decorrelação entre os dados de subida e descida. Ambos os RSOAs utilizados na ONT e OLT apresentam empacotamento coaxial e foram montados em uma placa de circuito impresso, mostrados no **Apêndice E**.

Os receptores (Rx empacotados em SFP) e geradores de sinais (MP1800A) são os mesmos que aqueles usados no experimento banda C compartilhada. Nenhum tipo de controle de temperatura e de circuito eletrônico de apagamento de portadora óptica (tais como FFCI ou DTLA) foi utilizado na configuração da **Fig. 4.1**. O objetivo inicial dessa

proposta é demonstrar o conceito da topologia e investigar a tolerância sistêmica a efeitos degradantes em decorrência do uso do fatiamento espectral de BLS baseadas em ASE, tais como CD e sobremodulação óptica.

Adicionalmente, procura-se comparar qualitativamente o ganho oferecido por essa proposta frente aos sistemas de remodulação convencional [74] para distâncias de até 20 km, na ausência de qualquer mecanismo adicional para apagamento de portadora óptica ou de gerenciamento de dispersão cromática.

Até este ponto, a análise destes experimentos restringiu-se a enlaces de curto alcance (20 km) devido a indisponibilidade de circuitos eletrônicos propícios para o apagamento de portadora óptica na data dessas medições. Adicionalmente, apenas um canal óptico bidirecional foi transmitido na rede, procedimento experimental que será justificado na Seção 4.4.2. O comprimento de onda de operação foi fixado em 1550,91 nm em todas as análises.

4.3 Materiais Utilizados

A **Fig. 4.2** mostra uma foto de alguns dos equipamentos e elementos utilizados na topologia de reuso de comprimento de onda proposta, disponíveis no LSMO.

Figura 4.2 - Foto da montagem experimental utilizada na avaliação dos cenários de autoalimentação proposto.

Dentre os principais materiais de consumo, podem ser destacados:

1. RSOAs com baixa dependência de ganho em relação a polarização (*Low Polarization Dependence Gain* – LPDG), montados em empacotamento TOSA;
2. Espelho de Faraday;
3. EDFA com controle automático de ganho;
4. AWG de 40 canais, com espaçamento de 100 GHz intercanais;
5. Circuladores Ópticos para as bandas C+L.

A descrição e fotos dos demais elementos encontram-se no **Apêndice E**. A topologia de reuso de comprimento de onda comumente encontrada na literatura técnica é denominada “topologia convencional”. A topologia original apresentada nesse trabalho é denominada como “topologia combinada” ou “proposta da tese”.

4.4 Provas de Conceito

Conforme apresentado na **Seção 4.1**, o objetivo destas avaliações é investigar a tolerância aos efeitos degradantes encontrados no cenário de remodulação convencional na ausência de qualquer mecanismo de apagamento de portadora óptica, comparando-se qualitativamente a trabalhos encontrados no estado da arte. Adicionalmente, procurou-se validar o arranjo da **Fig. 4.1**, em contraste com trabalhos encontrados na literatura [113].

De forma a investigar a viabilidade da topologia proposta nas condições descritas, foi conduzido um conjunto de medições iniciais denominadas “prova de conceito”. A metodologia consistiu em investigações das características ópticas de sinais autoalimentados e desempenho sistêmico em função dos níveis de razão de extinção, nível de semente óptica de autoalimentação e nível de potência de injeção, conforme descrito a seguir.

4.4.1 Ganho Óptico dos RSOAs

Na topologia combinada ambos os RSOAs, localizados na ONT e no OLT, devem operar em regime de saturação, de forma a propiciar um apagamento de portadora e sobremodulação de dados eficaz, favorecendo a uma maior fração de ganho ao nível zero do sinal modulado.

Há três variáveis independentes que ditam a dinâmica de supressão de ganho dos RSOAs: nível de razão de extinção da portadora óptica, nível de potência de injeção e ganho óptico do RSOA (associado a um determinado nível de corrente contínua).

Em linhas gerais, uma vez fixado o valor da corrente, o conhecimento da curva de ganho óptico do RSOA em função dos níveis de potência de injeção, para portadoras sem dados, é um bom indicador da faixa de saturação do dispositivo semiconductor.

Tem em vista o panorama exposto, foi realizado o levantamento do perfil de ganho óptico dos RSOAs em função da potência de injeção (sem dados). Os resultados estão mostrados na **Fig. 4.3**.

Figura 4.3 - Curvas de ganho para o RSOA LDPG com dois valores de corrente DC: 60 mA para o RSOA da ONT e 90 mA para o RSOA do OLT.

Os valores de corrente DC para o RSOA do OLT e RSOA da ONT foram fixados em 90 mA e 60 mA, respectivamente. Nota-se que os níveis mínimos de potência de injeção para garantir a operação do dispositivo semiconductor em regime de saturação são de -15,5 dBm e -13,5 dBm, respectivamente, para os valores de corrente de 90 mA e 60 mA.

A escolha desses valores decorre das seguintes considerações:

- Para os RSOAs do OLT, operando em regime de autoalimentação, a exigência de ganho óptico é muito maior, pois a margem de potência de autoalimentação é muito pequena, devido as perdas elevadas no circuito de alimentação. Assim, quanto maior o nível de corrente, maior o ganho óptico, menor o nível de potência de injeção requisitado e maior a chance do dispositivo operar próximo ao regime de saturação;
- Para a os RSOAs da ONT, embora estes também precisem operar em modo de saturação, o valor de corrente de polarização de 60 mA é o valor ótimo para que os sinais upstream exibam níveis de razão de extinção superior à 10 dB, requisito necessário para o apagamento óptico.

Pela observação experimental, na ausência de um controle de temperatura mais robusto para as placas PCI, altos valores de corrente contínua tendem a causar distorções nos sinais ópticos, em virtude do acréscimo de ruído balístico. Como suporte a essas argumentações, trabalhos encontrados na literatura técnica reportam o emprego de algum tipo de controle de temperatura e de isolamento adiabático para operação apropriada da técnica *self-seeding* [119, 121, 124-126]. Assim, os valores de 60 mA e 90 mA referem-se a uma otimização sistêmica para este cenário em particular. Certamente, as condições de autoalimentação, bem como de reuso de portadora da ONT, seriam mais favoráveis com um controle de temperatura mais robusto nas placas PCI.

4.4.2 Espectro Óptico de Sinais Autoalimentados

Conforme discutido no **Cap. 3**, o uso de sementes ópticas baseadas em fontes BLS do tipo ASE impõe diversas barreiras na transmissão sistêmica para os sinais *upstream*, uma vez que este sentido de tráfego sofre as maiores penalidades. Especificamente, dependendo do perfil da banda passante dos canais do AWG, efeitos degradantes associados à largura espectral da semente óptica, tais como dispersão cromática e efeitos de pós-filtragem, podem limitar significativamente o orçamento de potência na rede e impedir uma transmissão livre de erros.

Neste contexto, o procedimento inicial refere-se a caracterizações de espectros ópticos. O objetivo inicial é estabelecer uma comparação qualitativa entre o perfil espectral fornecido por sinais autoalimentados e sinais de ASE fatiada de banda estreita.

Para tal, mediu-se o espectro óptico na saída dos RSOAs do OLT (ponto B da **Fig. 4.1**) em duas condições: sinais autoalimentados e sinais provenientes do fatiamento espectral de BLS (este último obtido quando o circuito de recirculação óptica é desfeito, simulando o bem conhecido espectro de ASE de banda estreita). A **Fig. 4.4** mostra tais resultados.

Comparando-se a posição espectral dos sinais autoalimentado em relação aos sinais provenientes do fatiamento espectral de ASE, nota-se que há um desvio para os comprimentos de onda mais longos.

Este fenômeno pode ser explicado pela automodulação de fase causada pela mudança do índice de refração na região ativa do RSOA, efeito este induzido pela perturbação na dinâmica dos portadores eletrônicos da cavidade semicondutora. O valor de pico em comprimento de onda de pico é deslocado até o valor onde a perda de inserção da banda passante do AWG deixa de ser simétrica [120].

De acordo com os resultados, o valor da largura de linha tomada a 3 dB dos sinais autoalimentados (9,37 GHz) é aproximadamente um sexto daquela proveniente de sinais ASE de banda estreita (57,5 GHz).

Esta redução na largura de linha de sinais ópticos autoalimentados pode ser explicada da seguinte forma: o envelope espectral do sinal autoalimentado pode ser considerado como um conjunto de modos oscilantes de larguras infinitesimais (em comparação com a banda passante do AWG).

A redução espectral do envelope é resultado das várias passagens do sinal pelo AWG, sendo o sinal fatiado “infinitas” vezes e seu conteúdo espectral reduzido a cada passagem, somado ao deslocamento em frequência do envelope pela automodulação de fase.

Essas características reforçam a concentração de ganho proporcionado pelo RSOA à um modo do envelope, o qual se localiza na região de longos comprimentos de onda (na extremidade de filtragem do AWG), garantindo o destaque de apenas um modo do envelope. Desta forma, essa técnica propicia um aumento na tolerância sistêmica a efeitos de CD, eliminando a necessidade de compensação de dispersão cromática.

Em adição as características espectrais favoráveis de sinais autoalimentados, a localização do circuito de recirculação óptica no OLT, conforme escolhido para este trabalho, traz também vantagens sistêmicas em comparação com a topologia de autoalimentação convencional (ou seja, nas ONTs).

Conforme já exposto, a combinação dos elementos RSOA, AWG, divisor de potência e FRM resultam em uma cavidade óptica de perdas e ganhos cujo comprimento é determinado pelo tamanho físico destes elementos e suas respectivas conexões.

Figura 4.4 – Comparação de perfil espectral entre sinais autoalimentados e sinais provenientes do fatiamento espectral de fontes BLS do tipo ASE. Foi utilizada uma resolução de 0.03 nm e largura de vídeo de 100 Hz.

Entretanto, para a técnica *self-seeding* ONT [119] a cavidade pode variar de centenas de metros a alguns quilômetros, uma vez que o enlace de fibra alimentadora dita o comprimento desta extensão. Por outro lado, para a técnica *self-seeding* no OLT a cavidade possui apenas alguns poucos metros de comprimento, pois o tamanho da mesma é definido apenas pelas conexões físicas entre elementos passivos e o RSOA.

À medida que o comprimento da cavidade aumenta, o espaçamento modal decresce proporcionalmente, propiciando um aumento no número de modos que podem oscilar dentro da faixa em comprimento de onda de conteúdo espectral do sinal.

Estes números de modos oscilantes podem estar compreendidos na faixa de centenas a alguns milhares, se o comprimento da cavidade variar de metros para quilômetros. Como consequência, a intensidade de ruído de partição modal aumenta à medida que o número de modos é acrescido, bem como a perturbação do estado de

polarização do sinal propagando nesse circuito de realimentação óptica, degradando a qualidade sistêmica do sinal [120, 122, 134].

Nesse contexto, uma vez que configuração de RSOAs autoalimentados no OLT proposta estabelece uma cavidade de poucos metros de comprimento, o efeito da PDG e a intensidade de MPN sobre os sinais é mínima, oferecendo, assim, ganhos sistêmicos frente as topologias de autoalimentação convencionais citadas.

Finalmente, uma vez que os RSOAs em regime de autoalimentação localizam-se no OLT, o controle de temperatura pode ser realizado de uma forma mais robusta, diferentemente de RSOAs localizados na ONT, onde se preza o custo final do conjunto de transmissão e recepção. . Essa é mais uma vantagem sistêmica da proposta da tese frente aos sistemas de autoalimentação convencionais.

Como nota final, uma vez que a ocupação espectral de sinais autoalimentados é muito menor do que aqueles de ASE fatiada, o impacto dos efeitos não-lineares provenientes de interferência inter-canais (vizinhos mais próximos) são bem menores no cenário de autoalimentação e devem resultar numa reduzida penalidade em transmissão sistêmica na presença destes. Esta é a razão de porque se julgou desnecessária a avaliação sistêmica de uma transmissão WDM na topologia combinada, ou seja, transmissão onde o sinal modulado propaga na mesma fibra com um conjunto de canais vizinhos simetricamente espaçados em comprimento de onda.

4.4.3 Níveis de Razão de Extinção

Em linhas gerais, em sistemas de detecção direta, quanto maior o nível de razão de extinção (ER) do sinal óptico, melhor será o desempenho sistêmico associado. Entretanto, em sistemas de remodulação, o balanço entre os níveis ER dos sinais *upstream* e *downstream* é um importante parâmetro a ser levado em conta.

Níveis elevados de ER para os sinais *downstream* prejudicam a eficiência da supressão da portadora, ocasionando em uma degradação na qualidade dos sinais *upstream* em virtude do acúmulo de ruído residual dos dados de descida presentes nos sinais de subida. Por outro lado, níveis muito baixos de ER para os sinais de descida (inferior a 6 dB) podem penalizar severamente esse sentido de tráfego, embora propiciem à um apagamento de portadora eficaz para os RSOAs da ONT.

Desta forma, busca-se um condição de compromisso entre tais valores, com o propósito de otimizar o desempenho sistêmico em ambos os sentidos de tráfego.

Na ausência de circuitos eletrônicos para apagamento de portadora óptica em sistemas de BLS do tipo ASE para transmissão simétrica em 1,25 Gb/s, é sugerida na literatura técnica uma diferença de 7 dB entre os valores de extinção para os sinais de descida e subida (tipicamente, 3 dB e 10 dB, respectivamente [74]).

Adicionalmente, o nível de potência de injeção (P_{inj}) entregue aos RSOAs da ONT deve ser mantido acima de -15 dBm, de forma a garantir a operação em regime de saturação e suprimir os ruídos residuais provenientes da remodulação dos sinais *downstream*, reduzindo, assim, o impacto deste efeito degradante no desempenho sistêmico.

Por outro lado, deve ser notado que valores de razão de extinção *downstream* (ER_D) inferiores a 3 dB podem limitar severamente o desempenho sistêmico para esse sentido de tráfego em sistemas de remodulação convencional. Valores mínimos de ER_D de 6 dB são usados no sentido *downstream* de acordo com a literatura, mesmo na presença das técnicas FFCI e DTLA [95-99].

Tendo em vista o panorama exposto, o primeiro procedimento experimental consistiu na extração dos níveis de ER oferecidos por sinais *downstream* autoalimentados e os sinais *upstream* (ER_{UP}). A **Fig. 4.5** mostra as medições de ER realizadas, separadamente, para os sinais de descida (ponto B) e subida (ponto E) em função do nível de tensão de pico a pico (*Voltage Peak-to-Peak* - V_{pp}) aplicado na linha de transmissão da PCI.

Nestas medições, o valor de P_{ss} foi fixado em -27 dBm/0.2 nm. Dois valores de potência de injeção *upstream* foram escolhidos: -12 dBm e -22 dBm, pois:

- -12 dBm é o máximo de potência disponível, de acordo com orçamento de potência, entregue ao RSOA da ONT. Este nível de potência garante operação do RSOA na região de saturação (ver **Fig. 4.3**) e;
- -22 dBm, sendo este nível próximo ao valor para ganho de pequenos sinais (região de ganho linear). Este valor foi escolhido de forma a investigar a máxima tolerância de apagamento de portadora óptica em relação a potência de injeção óptica.

Finalmente, o nível ER_{UP} foi obtido mantendo os sinais *downstream* em operação contínua, ou seja, na ausência de qualquer modulação para os sinais de descida.

De acordo com os resultados da **Fig. 4.5**, o nível máximo de ER extraído para os sinais *downstream* autoalimentados é de 5,5 dB (para V_{pp} igual a 2 V). Os baixos valores de ER para sinais *downstream* constituem uma característica intrínseca de sinais autoalimentados, e decorrem do circuito de recirculação óptica RSOA – AWG – FRM e da operação em regime de saturação do RSOA. Desta forma, o sinal que emerge do RSOA é injetado no próprio dispositivo, em regime de saturação, várias vezes. Valores de ER para sinais autoalimentados entre 5,5 dB e 6 dB são reportados na literatura [120-121].

Figura 4.5 - Níveis de razão de extinção para os sinais *downstream* e *upstream*.

Por outro lado, para o *upstream* pode-se obter valores de ER_{UP} de até 11 dB (para V_{pp} igual a 2 V), pois, diferentemente da operação em regime de autoalimentação, o sinal semente que atinge o RSOA da ONT (e é posteriormente enviado ao OLT) percorre esse sentido apenas uma vez. Adicionalmente, tal valor representa o nível máximo de operação dos RSOAs projetados para utilização em questão.

Assim, uma diferença de 5 dB é estabelecida entre os valores de ER_{UP} e ER_D , mesmo na melhor condição de operação elétrica dos dispositivos. Esta diferença de

níveis, somada a valores de P_{inj} superiores a -15 dBm deve garantir a qualidade da transmissão bidirecional.

Isto implica que o orçamento de potência da rede pode ser acrescido, reduzindo-se os valores de ER_D de poucos dBs, sem limitar drasticamente o desempenho sistêmico dos sinais de descida, em virtude ao acréscimo a tolerância desses sinais ao impacto de dispersão cromática, resultado das características de conteúdo espectral (largura espectral reduzida, comparando-se aos sinais ASE fatiados).

Uma vez estabelecidos estes primeiros procedimentos, iniciam-se as avaliações sistêmicas em 20 km.

4.4.4 Sinais *Downstream* Autoalimentados em Função de Pss

Em termos de desempenho sistêmico do sistema de autoalimentação, a primeira prova de conceito refere-se a avaliação das curvas de BER em função do nível Pss. Procurou-se confrontar os resultados obtidos neste trabalho com aqueles encontrados na literatura técnica [113], validando, assim, o arranjo proposto na **Fig. 4.1**. O objetivo é atingir valores de BER menores do que 10^{-12} (na ausência de tendência de *floor*), mantendo-se o nível de Pss o menor possível.

Neste contexto, a **Fig. 4.6** mostra os resultados de BER para os sinais *downstream* autoalimentados em função do nível de semente óptica Pss (-22, -27 e -32 dBm/0,2 nm) de potência de pico medidos no ponto F em uma resolução de 0,2 nm, conforme realizado em [113].

Para valores de Pss tão baixos quanto -27 dBm/0,2 nm é possível obter um desempenho sistêmico satisfatório, produzindo valores de BER de 10^{-12} , para uma sensibilidade de -26 dBm. Esses valores de Pss são condizentes com aqueles encontrados na literatura [113] (aproximadamente -30 dBm/0,2 nm), validando o arranjo proposto (**Fig. 4.1**). Em todas as análises a seguir, o valor de Pss foi mantendo em -27 dBm/0,2 nm.

Deve ser notado que o desempenho sistêmico para os sinais autoalimentados pode ser otimizado com o apoio de um controle de temperatura mais robusto, assim como conduzido nas investigações [119, 121].

Figura 4.6 – Avaliação de BER dos sinais *downstream* em função dos níveis P_{ss} .

4.4.5 Sinais *Downstream* Autoalimentados em Função de ER_D

Tomando como referência a discussão da Seção 4.4.3, o terceiro procedimento constituiu na avaliação do desempenho dos sinais *downstream* em função dos valores de ER_D . O objetivo foi o de definir o nível mínimo de razão de extinção dos sinais de descida que ainda produzem valores de BER inferiores a 10^{-12} . Assim, pode-se estabelecer o limite inferior de ER_D usado neste esquema. Tais resultados estão apresentados na Fig. 4.7.

A análise da Fig. 4.7 indica que é possível atingir valores de BER de 10^{-12} (penalidade de 2,4 dB) na ausência de *floor* para valores de ER_D tão baixos quanto 3,5 dB, o que resulta em um ganho de 2,5 dB de tolerância sistêmica em termos de razão de extinção frente aos sistemas de remodulação convencionais [95-99].

Na configuração da Fig. 4.1, à medida que o valor de ER_D decresce, o processo de apagamento de portadora óptica presente no regime de autoalimentação torna-se mais eficiente, devido ao regime de saturação a qual o RSOA é forçado a operar.

Entretanto, a abertura do diagrama de olho decresce à medida que o nível de ER_D diminui, dificultando a leitura do nível de limiar pelo receptor. Desta forma, um

nível inferior de ER_D é estabelecido para condição de BER de 10^{-12} na ausência de *floor*. Os diagramas de olho em função de ER_D podem ser encontrados na **Fig. 4.8**.

Figura 4.7 - Avaliação de BER dos sinais *downstream* em função dos níveis ER_D . O valor de P_{ss} foi mantido em -27 dBm/0,2 nm.

Neste ponto de desenvolvimento da pesquisa, ainda não se contava com os recursos eletrônicos de apagamento de portadora óptica. Nos resultados do **Cap. 5** essas análises foram estendidas por meio do uso de recursos eletrônicos para apagamento de portadora óptica, tais como FFCI e DTLA.

Figura 4.8 – Diagramas de olho para os sinais *downstream* autoalimentados em função do nível de ER_D . A escala vertical foi mantida 142 mW/div.

Entretanto, pode-se estimar o caso limite em termos de orçamento de potência oferecido pela topologia levando em consideração os argumentos descritos em termos de FFCI e DTLA. A melhor condição de desempenho sistêmico para os sinais *upstream* é quando o nível de ER_D está completamente apagado pelo RSOA da ONT, ou seja, quando o nível de razão de extinção *downstream* é nulo. Esse caso equivale à supressão total da portadora por meio da atualização de recursos eletrônicos para remodulação óptica para o cenário combinado.

Esse é o primeiro procedimento a ser investigado para transmissão bidirecional, descrito na **Seção 4.4.6**.

4.4.6 Caso Ideal para *Upstream* no Cenário de Remodulação – ER_D Igual a Zero

Com o intuito de identificar a condição limite para o desempenho de transmissão dos sinais *upstream* em termos de orçamento de potência, o quarto procedimento baseou-se na medição do desempenho de BER (buscando a região livre de erros para valores de BER de 10^{-12}) para os sinais de subida, mantendo os sinais *downstream* autoalimentados em operação CW. Em outras palavras, o nível ER_D foi fixado em zero.

Este cenário, na verdade, corresponde a situação ideal de apagamento perfeito de portadora, na presença de técnicas de apagamento tais como FFCI e DTLA, como discutido na **Seção 4.4.5**.

Baseado nos argumentos expostos, a **Fig. 4.9** mostra os diversos valores de BER obtidos em função de P_{inj} e P_{ss} . O nível de razão de extinção *upstream* foi mantido no valor máximo, ou seja, ER_{UP} igual a 11 dB.

Analisando-se os resultados da **Fig. 4.9-a**, observa-se uma variação ínfima de sensibilidade entre -28 dBm e -27 dBm para valores de BER de 10^{-12} . Desta forma, não há qualquer diferença significativa de desempenho sistêmico para os sinais de subida nos pontos de testes.

Baseando-se apenas na análise de P_{inj} , há uma margem de, pelo menos, 10 dB para aumentar o alcance da topologia para valores de 60 km, se as técnicas de apagamento forem empregadas. Essas conclusões são apoiadas pelos diagramas de olho da **Fig. 4.9-b**.

Comparando-se qualitativamente os resultados obtidos na topologia baseada no compartilhamento da banda C (**Apêndice D**) com topologias de autoalimentação e

remodulação combinadas, nota-se que o impacto dos efeitos de dispersão cromática em enlaces de 20 km pode ser praticamente desprezado, pois não foi constatada qualquer presença de *floor* em grande parte das medições de BER, a não ser no caso extremo ($ER_D = 3,0$ dB). Desta forma, é possível excluir qualquer técnica de gerenciamento de dispersão cromática para até 20 km de enlace, sendo, portanto, um dos ganhos oferecidos pela topologia combinada frente aos sistemas de remodulação convencionais.

Figura 4.9 – Avaliação de desempenho de BER *upstream* na melhor condição de remodulação ($ER_D = 0$): (a) BER *upstream* para diversos valores de P_{inj} e P_{ss} ; (b) diagramas de olho dos sinais *upstream* em função de P_{inj} , mantendo P_{ss} fixo em -22 dBm/0,2 nm.

Visando atingir distâncias de coberturas em até 80 km para implantação de PON estendidas, um estudo mais profundo sobre impacto de efeitos de dispersão cromática será descrito no **Cap 5**.

O conjunto de medições propostos e os resultados obtidos na **Seção 4.4** validam, então, o cenário exposto na **Fig. 4.1**, bem como destacam os diversos ganhos oferecidas pela topologia de autoalimentação e remodulação óptica combinadas. Entretanto, até

este ponto, as avaliações sistêmicas para o sentido *upstream* foram realizadas em condições limitadas de valores de extinção para o *downstream* ($ER_D = 0$), simulando o caso ideal de apagamento de portadora óptica.

Na Seção 4.5 são analisadas as penalidades induzidas pelos valores de ER_D no tráfego *upstream* de forma a avaliar de maneira mais precisa os limites e ganhos provenientes desta configuração frente aos cenários de remodulação convencional.

4.5 Transmissão Bidirecional

Uma vez demonstrada a prova de conceito da topologia proposta, as avaliações realizadas nesta seção referem-se a transmissão bidirecional, com o intuito de avaliar o verdadeiro potencial da proposta.

Desta forma, como próximo procedimento experimental, o desempenho sistêmico do *upstream* foi avaliado em função do nível de razão de extinção dos sinais *downstream*. O objetivo é averiguar a degradação sistêmica sofrida pelos sinais de subida quando o valor de ER_D é não nulo.

Para esta avaliação, os valores de P_{inj} , ER_{UP} e P_{ss} foram mantidos em -17 dBm, 11 dB e -27 dBm/0,2 nm, respectivamente. Na **Fig. 4.10** estão apresentadas as medições de BER *upstream* em função do nível de razão extinção ER_D . Adicionalmente, estão também mostrados na **Fig. 4.10** os valores de BER *downstream* correspondentes das **Fig. 4.7** e **4.9**, de forma a permitir maior clareza na análise.

Como esperado, existe um valor de ER_D que otimiza simultaneamente o desempenho de transmissão dos sinais de descida e subida. Para um nível de ER_D de 5,5 dB, o qual produz o melhor resultado para o *downstream*, ocorre *floor* para um valor de BER de 10^{-8} no receptor do OLT. Em contrapartida, um valor de ER_D igual a 3,5 dB permite resultados de BER *upstream* próximo à condição de completo apagamento de portadora (penalidade inferior a 0,2 dB é observada).

Por outro lado, uma penalidade de 2,5 dB é observada para o sentido *downstream* mantendo o valor de ER_D em 3,5 dB. Um valor intermediário de ER_D igual a 4,5 dB se aproxima da condição de otimização sistêmica, com penalidades moderadas comparando a condição de melhor desempenho de cada caso: penalidades de 1,0 dB e 1,5 dB para BER de 10^{-12} são obtidos para os sinais *downstream* e *upstream*, respectivamente.

Os resultados obtidos da **Fig. 4.10** indicam que os valores de P_{inj} e ER_D podem ser reduzidas ainda mais sem comprometer consideravelmente o desempenho, permitindo o aumento da margem de potência para os sinais *upstream*.

Figura 4.10 – Avaliações de BER para os sinais *upstream* e *downstream* para alguns valores de ER_D . Os níveis de P_{inj} , P_{ss} e ER_{UP} foram fixados em -17 dBm, -27 dBm/0,2 nm e 11 dB, respectivamente.

Desta forma, com o intuito de investigar o máximo orçamento de potência oferecido pela topologia e atingir os limites sistêmicos, o próximo procedimento baseia-se nas medições de penalidade em potência para valores de BER de 10^{-10} , para ambos os sentidos de tráfego em função de ER_D , para alguns valores de P_{inj} . Novamente, o valor de ER_{UP} foi fixado em 11 dB. As penalidades em potência foram calculadas tomando os valores obtidos no melhor caso (**Figs. 4.7, 4.9 e 4.10**). Estes resultados estão mostrados na **Fig. 4.11**.

Deve-se observar que a obtenção dos resultados da **Fig. 4.11** baseou-se no seguinte procedimento: uma vez definido o nível de potência de injeção de -12, -17 ou -22 dBm, foi realizado o mesmo levantamento de curvas de BER (até o valor de 10^{-12}) equivalente aos dos obtidos das **Figs. 4.9 e 4.10**. A comparação de penalidade em potência foi fixada em valores de BER de 10^{-10} , pois o desempenho das condições mais degradantes ficou limitado a esses valores (região de patamar de erro). Julgou-se mais

informativo os resultados contidos na **Fig. 4.11** do que a apresentação de diversas curvas de BER.

Figura 4.11 – Penalidades em potência para o sentido *upstream* e *downstream* em função do nível ER_D . A linha vermelha pontilhada estabelece a região de patamar de erros para o sentido de descida (ver **Fig. 4.7**). Os valores de P_{ss} e ER_{UP} foram fixados em -27 dBm/0,2 nm e 11 dB, respectivamente.

Definindo-se um valor de penalidade máxima de 3 dB, ou seja, excluindo-se a região de patamar de erros, é possível estabelecer uma margem de potência de 10 dB (um aumento de 7 dB em comparação com trabalhos na literatura técnica [74]) com uma penalidade máxima de 2,5 dB, na ausência de comportamento de *floor* para ambos os sentidos de tráfego. Na condição de máximo valor de P_{injD} disponível (-12 dBm) foi possível obter transmissão livre de erros para o *upstream*, mesmo para valores de ER_D tão altos quanto 5 dB. A **Fig. 4.12** mostra os diagramas de olho em função do nível ER_D , mantendo P_{inj} igual a -12 dBm.

Como último procedimento experimental descrito neste capítulo, foi avaliada a penalidade em potência (BER de 10^{-10}) para os sinais *upstream* em função de ER_D para alguns valores de ER_{UP} , mantendo o nível de P_{inj} igual a -17 dBm. O objetivo foi investigar a tolerância de desempenho dos sinais *upstream* em função do nível ER_{UP} e da respectiva diferença entre ER_{UP} e ER_D . A **Fig. 4.13** mostra os resultados.

Definindo-se um valor de penalidade de 3 dB (excluindo a região de *floor* em BER), uma diferença de aproximadamente 6 dB entre os níveis de ER é necessária para

garantir operação livre de erros para ambos os sentidos de tráfego, sendo consistente com valores reportados na literatura [74].

Figura 4.12 - Diagramas de olho para os sinais *upstream* para alguns valores de ER_D , mantendo o nível P_{inj} em -12 dBm.

Figura 4.13 - Penalidades em potência para o sentido *upstream* em função do nível ER_D para alguns valores de ER_{UP} . As penalidades em potência para o sentido *downstream* também foram calculadas. As linhas vermelhas pontilhada e tracejadas estabelecem, respectivamente, a região de patamar de erros para ambos os sentidos de descida (ver Fig. 4.7) e subida (ver Fig. 4.10). Os valores de P_{inj} e P_{ss} foram fixados em -17 dBm/ e -27 dBm/0,2 nm, respectivamente.

Deve ser observado que, na topologia proposta (**Fig. 4.1**), a técnica de autoalimentação é implementada no OLT, permitindo a remodelação dos RSOAs no ONT. Desta forma, a estrutura CLS é ainda mantida. Entretanto, nesta nova configuração cada RSOA do OLT gera, de forma independente dos demais elementos ativos presentes no OLT, o sinal *downstream* e a semente óptica para o respectivo RSOA do ONT. Assim, é possível a exclusão de fontes BLS de alta potência no OLT, reduzindo o custo de gerenciamento dos dispositivos optoeletrônicos, bem como consumo de potência no OLT.

Adicionalmente, devido a eliminação da estrutura de fontes de banda larga compartilhada, esta configuração propicia um alto nível de proteção física contra falha da BLS, a qual pode derrubar toda a topologia de remodelação convencional, embora o funcionamento da rede ainda esteja condicionado à operação do FRM.

As características espectrais de sinais *downstream* autoalimentados permitem uma maior tolerância em relação à dispersão cromática e outros efeitos degradantes provenientes do uso de ASE como semente óptica, permitindo uma maior flexibilidade nos requisitos de remodelação.

Ademais, esta topologia propicia um aumento significativo de orçamento de potência para os sinais *upstream* em cenários de remodelação, mantendo a melhor relação custo-benefício também para equipamentos de transmissores refletivos em remodelação óptica, devido a exclusão de qualquer mecanismo adicional de apagamento de portadora óptica.

Por outro lado, comparando-se os trabalhos de *self-seeding* RSOAs e de *self-seeding* FP-LDs encontrados na literatura, a segunda vertente exige técnicas mais robustas de controle de polarização para garantir a estabilidade da técnica [124-126], embora ofereça como vantagens largura de linhas reduzidas (2,5 MHz), maior potência e menor relação sinal-ruído (predominância de sinal ao invés de ASE) do que os dispositivos RSOAs.

Entretanto, visando projetos de altas taxas de transmissão em longo prazo mantendo a relação custo-benefício atrativa, de 1,25 Gb/s para 10 Gb/s, FP autoalimentados e diretamente modulados são inadequados devido à presença de oscilações de relaxação, efeito intrínseco de lasers semicondutores, o que limita a taxa de transmissão em algumas unidades de Gb/s.

Por outro lado, embora a banda elétrica do RSOA seja limitada também a alguns poucos GHz, o perfil de resposta em frequência do dispositivo é suave, sem nenhum

pico de oscilação de relaxação, comportamento clássico de filtros passa-baixa. Desta forma, é possível operar RSOAs modulados diretamente a taxas de 10 Gb/s, apoiados em equalização eletrônica para o receptor de forma a recuperar as componentes de alta frequência do sinal suprimidas pelo RSOA [153].

Finalmente, de acordo com trabalhos encontrados na literatura até o presente momento [38-42, 108, 132-136, 142-153, 160], técnicas de equalização eletrônica para taxas de 10 Gb/s nunca foram reportadas para a configuração ASE de banda estreita e modulação direta de RSOAs com banda elétrica limitada.

Por outro lado, a técnica de RSOAs autoalimentados com modulação direta a 10 Gb/s tem sido aprimorada nos últimos anos [133-135], propiciando a uma relação custo-benefício atrativa para sistemas de super-capacidade. Esta é mais uma vantagem oferecida pela proposta da tese, viabilidade de expansão gradativa para taxas de transmissão elevadas sem alterações significativas na rede física.

4.6 Considerações Finais

Neste capítulo foi apresentada em detalhes a topologia combinada proposta nesta tese, visando o projeto de redes WDM-PON de curto alcance. Adicionalmente, procurou-se estabelecer uma comparação qualitativa em termos de desempenho e custo operacional com a topologia de remodulação convencional, na ausência de qualquer mecanismo de apagamento adicional (eletrônico ou óptico), de forma a evidenciar os ganhos e limitações decorrentes da proposta da tese.

Foram estudadas as características ópticas dos sinais autoalimentados, uma série de provas de conceito foi conduzida de forma a validar a proposta da tese em relação a diversos parâmetros, tais como potência de autoalimentação, razão de extinção *downstream*, diagramas de olho, espectros ópticos, potência de injeção nos RSOAs ONT e taxas de erro de bit.

Finalmente, avaliações bidirecionais foram conduzidas em termos de potência de injeção, razão de extinção *downstream*, razão de extinção *upstream*, penalidades em potência e taxas de erro de bit, com o intuito de explorar o real ganho oferecido pela proposta frente aos cenários de remodulação convencionais.

Em suma, os resultados quantitativos, qualitativos e as respectivas conclusões associadas obtidos neste capítulo podem ser enunciados da seguinte forma:

A) Largura espectral óptica e impacto da dispersão cromática

- Topologia convencional: largura de ocupação espectral do canal de 0,460 nm (tomada a 3 dB);
- Topologia combinada: largura de ocupação espectral do cana de 0,075 nm (tomada a 3 dB).

Conclusão A: A razão entre os valores de largura espectral óptica à 3 dB oferecidos pela topologia convencional e a topologia combinada é de 6,13. Desta forma, a proposta da tese propicia um aumento de tolerância ao impacto dos efeitos de dispersão cromática devido as características de sinais espectrais ultra-estritas. Para 20 km, nenhum gerenciamento de dispersão foi necessário para topologia combinada, diferentemente dos trabalhos encontrados em modulação convencional.

B) Estabilidade e desempenho da técnica *self-seeding*

- Topologia *self-seeding* convencional – Cavity com quilômetros de comprimento, produzindo elevado número de modos oscilantes contidos no envelope do sinal. Presença da fibra alimentadora leva a mudanças significativas no estado de polarização do sinal ao longo do circuito de alimentação óptica, afetando o desempenho sistêmico. A técnica *self-seeding* exige que o RSOA opere em altos níveis de corrente contínua (regime de saturação). Entretanto um controle térmico mais robusto não pode ser empregado por questões de custos excessivos.
- Topologia combinada - Cavity com metros de comprimento, reduzindo significativamente a quantidade de modos oscilantes contidos no envelope do sinal. A ausência da fibra alimentadora garante a ocorrência de apenas pequenas perturbações no estado de polarização do sinal que propaga no caminho de recirculação óptica. Controle de temperatura mais robusto pode ser usado, pois os RSOAs encontram-se no OLT, propiciando melhorias de desempenho consideráveis.

Conclusão B: A estabilidade e desempenho da técnica *self-seeding* para o OLT é superior aos dos sistemas convencionais (*self-seeding* na ONT).

C) Potência de injeção na ausência de mecanismos eletrônicos de apagamento de portadora

- Topologia convencional: -12 dBm;
- Topologia combinada: -22 dBm.

Conclusão C: A topologia combinada permite um aumento de 10 dB na margem de potência de injeção em comparação com a topologia convencional.

D) Tolerância sistêmica dos sinais *downstream* ao nível de razão de extinção

- Topologia convencional: 6 dB;
- Topologia combinada: 3,5 dB.

Conclusão D: A topologia combinada propicia a um aumento de 2,5 dB na margem de razão de extinção para os sinais *downstream* frente aos sistemas convencionais.

E) Tecnologias para transmissão ONT e OLT em distâncias de cobertura de 20 km

- Topologia convencional: Necessidade de emprego de FFCI no RSOA da ONT, uso de DTLA no receptor do OLT e fonte pré-fatiada banda larga;
- Topologia combinada: Não há necessidades dessas técnicas.

Conclusão E: A topologia combinada permite a utilização de tecnologias mais simplificadas do que aquelas utilizadas em esquemas de remodulação convencional, para distâncias de cobertura de até 20 km.

F) Custo operacional e viabilidade de migração gradativa para o cenário S+C+L e taxas de até 10 Gb/s com uso de modulação direta

- Topologia PSSSL – Necessário o projeto de fontes BLS com ocupação espectral nas bandas S+C+L. Adicionalmente, os efeitos degradantes relacionados a sementes ASE de banda estreita exigem o projeto de fontes BLS de grande complexidade (alta potência e baixos valores de RIN) para a operação em 10 Gb/s, bem como SOAs integrados com moduladores externos. [60-61, 160]. Além disso, todos os transmissores refletivos da rede ficam dependentes do funcionamento da fonte BLS, exigindo uma fonte óptica de banda larga redundante (reserva) a fim de garantir a proteção da rede. Finalmente, de acordo com trabalhos encontrados na literatura até o presente momento [38-42, 108, 132-136, 142-153, 160], técnicas de equalização

eletrônica para taxas de 10 Gb/s nunca foram reportadas para a configuração ASE de banda estreita e modulação direta.

➤ Topologia combinada – Não requer fontes BLS. Cada RSOA do OLT gera, por meio da técnica de autoalimentação, a própria semente óptica para sua operação continua bem como a semente óptica para o RSOA da ONT associada. Assim, os transmissores refletivos da rede não estão mais condicionados ao funcionamento de fonte BLS centralizada, o que permite a elaboração de uma rede mais simplificada em termos de gerenciamento de custos operacionais e mais robusta em termos de proteção, embora a rede esteja condicionada à operação do FRM. Trabalhos recentes tem reportado a operação de RSOAs autoalimentados e modulados diretamente à 10 Gb/s [133-135], apoiados em equalização eletrônica na detecção, comprovando a viabilidade de expansão gradativa para transmissão de dados em altas taxas.

Conclusão F: Com base em todas as características e vantagens listadas, a topologia combinada mostra-se como a alternativa mais viável em termos de requisitos técnicos e de custos operacionais para sistemas WDM-PON baseado no reuso de portadora óptica, fontes ASE banda larga, modulação em intensidade e detecção direta para taxas de até 10 Gb/s em 20 km de cobertura.

Como última consideração, 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 quilômetros, nenhuma penalidade excessiva foi verificada, diferentemente para os trabalhos sobre sistemas convencionais.

Entretanto, visando o projeto de redes WDM-PON de longo alcance, o compromisso entre os níveis de razão de extinção *downstream* (3,5 dB) e *upstream* (11 dB) necessários para reuso de portadora óptica na topologia combinada pode degradar severamente o desempenho de transmissão dos sinais de descida na ausência de mecanismos eletrônicos de apagamento de portadora óptica.

5. Técnicas Combinadas de Autoalimentação e Reuso de Comprimento de Onda, Apoiadas em Remodulação Optoeletrônica

Os objetivos desse capítulo são:

- Avaliar o desempenho de transmissão da topologia combinada referente ao impacto de dispersão cromática (CD) em enlaces de até 100 km, efeitos de pós-filtragem (PFE) e reflexões espúrias em condição transmissor-receptor face à face (Back-to-Back - BtB);
- Comparar quantitativamente o ganho sistêmico oferecido pela topologia combinada frente à topologia de fonte óptica pré-fatiada (PSSL) avaliando-se o desempenho de transmissão bidirecional dos sinais por meio da obtenção de diagramas de olho óptico, caracterizações espectrais ópticas, curvas de BER e penalidade em potência em função do comprimento do enlace, potência de injeção no RSOA da ONT (P_{inj}) e razão de reflexão (R), e;
- Analisar qualitativamente a viabilidade de expansão para cenários de 10 Gb/s simétricos e quantitativamente as relações de custo-benefício oferecido por ambas as topologias em taxas simétricas de 1,25 Gb/s.

5.1 Introdução

Conforme exposto no **Cap. 1**, uma das premissas tecnológicas almejadas em projetos de redes WDM-PON é a capacidade de oferecer a maior distância de cobertura possível, na ausência de qualquer elemento de amplificação e/ou compensação de dispersão, mantendo o nível de complexidade físico da rede e dos terminais dos usuários o menor possível.

De acordo com os resultados e conclusões obtidos no **Cap. 4**, a topologia de reuso de comprimento de onda baseada nas técnicas combinadas de autoalimentação e apagamento de portadora exibe várias vantagens sistêmicas e operacionais frente aos sistemas convencionais para distâncias de cobertura em até 20 km, mesmo na ausência de qualquer mecanismo eletro-óptico adicional para remodulação.

Entretanto, a qualidade da transmissão *downstream* pode ser afetada significativamente pelos baixos níveis de razão de extinção utilizados (4 dB

downstream contra 11 dB para o sentido *upstream*), limitando a distância de cobertura da rede em algumas dezenas de quilômetros.

Tendo em vista o cenário exposto, neste **Capítulo** são apresentadas, por meio de investigações experimentais, as vantagens oferecidas pela topologia combinada, agora apoiada no uso de técnicas eletrônicas propícias para o apagamento de portadora óptica, tais como FFCI e DTLA, visando a obtenção de redes WDM-PON estendidas.

As maiores contribuições da tese encontradas neste capítulo são as caracterizações ópticas e análises de desempenho sistêmico referentes ao impacto dos efeitos de pós-filtragem, dispersão cromática e reflexões discretas para taxas de transmissão bidirecional de 1,25 Gb/s, empregando RSOAs autoalimentados como portadoras *downstream*.

Adicionalmente, critérios de medições experimentais foram adotados de forma a estabelecer uma comparação direta entre a topologia combinada e a topologia de fonte óptica pré-fatiada. Desta forma, foi possível identificar as vantagens e desvantagens sistêmicas, de forma quantitativa e qualitativa, da proposta da tese frente a topologia convencional, confirmando as provas de conceito realizadas no **Cap. 4**.

Como nota adicional, deve-se observar que os recursos eletrônicos utilizados nas avaliações experimentais, desse capítulo, para apagamento de portadora são projetados para atender especificamente aos requisitos da topologia PSSSL [84-85]. Não obstante, procurou-se identificar as possíveis melhorias de desempenho oferecidas pela topologia combinada, mesmo com o emprego de equipamentos eletrônicos não otimizados para esse propósito. Finalmente, são realizadas também discussões qualitativas sobre requisitos técnicos e viabilidade de expansão da proposta da tese para cenários bidirecionais a 10 Gb/s.

Em relação à metodologia do estudo comparativo, foram avaliadas curvas de penalidades em potência em função do alcance da rede e da razão de reflexão espúria, medições de espectro óptico, diagramas de olho, largura espectral óptica, conteúdo espectral óptico e taxa de erro de bit para distâncias de até 100 km. Apresentam-se, nesse capítulo, os resultados experimentais referentes as publicações efetivadas pelo autor [155-156].

De acordo com os resultados obtidos na topologia proposta, penalidades máximas de 2,0 dB (BER de 10^{-12}) foram obtidas para alcances de 80 km e 60 km, respectivamente, na configuração *downstream* e bidirecional. A topologia combinada propicia aumento da tolerância sistêmica ao impacto dos efeitos de pós-filtragem e

dispersão cromática, ultrapassando o alcance oferecido pelos sistemas convencionais em 40 km, tanto no sentido *downstream* como na configuração bidirecional.

Entretanto, no que se refere a análise de reflexões discretas, a topologia convencional exibe uma tolerância adicional de 5 dB ao impacto da razão de reflexão frente a topologia combinada, sendo esta uma das desvantagens da proposta da tese.

O capítulo está dividido da seguinte forma: Na **Seção 5.2** é apresentada, em detalhes, a topologia de remodulação convencional utilizada nos testes preliminares. Em **5.3** estão descritos, sucintamente, os principais materiais de consumo utilizados nas experimentações. Na **Seção 5.4** são apresentados os testes preliminares para o cenário de remodulação convencional, a fim de identificar os limites desta topologia e, finalmente, na **Seção 5.5** apresentam-se os estudos comparativos sobre o impacto dos efeitos de pós-filtragem, dispersão cromática e reflexões discretas entre a proposta da tese e a topologia convencional, visando destacar explicitamente o ganho oferecido pela arquitetura proposta neste trabalho. Na **Seção 5.6** está apresentada uma análise quantitativa da relação custo-benefício oferecida por cada topologia e, finalmente, a **Seção 5.7** traz as considerações finais sobre esse estudo.

Em virtude da quantidade e repetição de acrônimos e símbolos utilizados no desenvolvimento deste estudo comparativo, optou-se por repetir a lista com os principais acrônimos (**Tabela 5.1**) e símbolos (**Tabela 5.2**) encontrados neste capítulo, a fim de facilitar a leitura, permitindo familiarização do leitor com as definições particulares de redes WDM-PON baseadas em fatiamento espectral e reuso de comprimento de onda.

Tabela 5.1 - Lista dos principais acrônimos utilizados no **Cap.5**.

Acrônimo	Definição	Tradução
ASE	<i>Amplified Spontaneous Emission</i>	Emissão Espontânea Amplificada
BtB (B2B)	<i>Back-to-Back</i>	Condição Transmissor-Receptor Face a Face
BLS	<i>Broadband Light Source</i>	Fonte Óptica de Banda Larga
CD	<i>Chromatic Dispersion</i>	Dispersão Cromática
DTLA	<i>Decision Threshold Level Adjustment</i>	Ajuste de Limiar de Nível de Decisão
EDFA	<i>Erbium Doped Fiber Amplifier</i>	Amplificador à Fibra Dopada com Érbio
ER	<i>Extinction Ratio</i>	Razão de Extinção
FFCI	<i>Feed-Forward Current Injection</i>	Injeção de Correção de Alimentação

		Adiante
FRM	<i>Faraday Rotator Mirror</i>	Espelho Rotacionador de Faraday
PC	<i>Polarization Controller</i>	Controlador de Polarização
PFE	<i>Post-Filtering Effects</i>	Efeitos de Pós-Filtragem
PSSL	<i>Pre-Spectrum Sliced Light</i>	Fonte Óptica Pré-Fatiada
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>
R ₁	<i>Reflection Point 1</i>	Ponto de Reflexão 1
R ₂	<i>Reflection Point 2</i>	Ponto de Reflexão 2
R-I	<i>Reflection-I</i>	Reflexões Tipo-I
R-II	<i>Reflection-II</i>	Reflexões Tipo-II
SFP	<i>Small Form-Factor Pluggable</i>	Transceptor Compacto Plugável
SS	<i>Self-Seeding</i>	Autoalimentação
VOA	<i>Variable Optical Attenuator</i>	Atenuador Óptico Variável
TD	<i>Transmitted Downstream</i>	Sinal <i>Downstream</i> Transmitido
TU	<i>Transmitted Upstream</i>	Sinal <i>Upstream</i> Transmitido

Tabela 5.2 - Lista dos principais símbolos utilizados no **Cap. 5**.

Siglas/ Símbolos	Definição	Tradução	Unidade
ER _D	<i>Downstream Extinction Ratio</i>	Razão de Extinção <i>Downstream</i>	(dB)
ER _{UP}	<i>Upstream Extinction Ratio</i>	Razão de Extinção <i>Upstream</i>	(dB)
P _{inj}	<i>Injection Power</i>	Potência de injeção	(dBm)
P _{injD}	<i>Downstream Injection Power</i>	Potência de injeção no RSOA do OLT	(dBm)
P _{injUP}	<i>Upstream Injection Power</i>	Potência de injeção no RSOA da ONT	(dBm)
P _{ss}	<i>Self-Seeding Power</i>	Potência de Autoalimentação	(dBm)
R	<i>Reflection Ratio</i>	Razão de Reflexão	(dB)
R _I	<i>Reflection Ratio I</i>	Razão de Reflexão Tipo-I	(dB)
R _{II}	<i>Reflection Ratio II</i>	Razão de Reflexão Tipo-II	(dB)
λ	<i>Wavelength</i>	Comprimento de onda	(nm)
$\Delta\lambda$	<i>Optical Spectral Width</i>	Largura Espectral Óptica	(nm)
$\Delta\lambda_i - \Delta\lambda_j$	<i>Optical Spectral Content</i>	Conteúdo Espectral Óptico	(nm)

5.2 Configuração Experimental

Conforme descrito nos capítulos anteriores, em esquemas de reuso de portadora óptica uma fração do sinal *downstream* que chega à ONT é direcionado ao RSOA de forma a prover a semente óptica para a transmissão *upstream*. Em seguida, a semente óptica *upstream* é amplificada pelo RSOA da ONT, reescrita com os dados do usuário com modulação direta e enviada de volta ao OLT.

A **Fig. 5.1** mostra uma ilustração esquemática da montagem experimental da topologia de remodulação convencional baseada em fontes PSSL [84-85]. Nestes procedimentos foram avaliadas a taxa de erro de bit para ambos os sentidos de tráfego em função do valor da potência de injeção nos RSOAs e do comprimento da fibra alimentadora. Abaixo estão descritos os principais pontos de medição e respectivos parâmetros de monitoração de interesse nessa topologia:

- **Ponto A** - Potência de injeção *downstream*;
- **Ponto B** - Potência óptica lançada na SMF,
- **Ponto C** - Potência de injeção *upstream*, nível de razão de extinção *downstream*, diagramas de olho e taxas de erro de bit *downstream*;
- **Ponto D** - Nível de razão de extinção *upstream*, diagramas de olho e taxa de erro de bits *upstream*.

Figura 5.1- Topologia de remodulação convencional (ou topologia PSSL).

Deve-se notar que não foi possível controlar os níveis de correntes de polarização contínua e alternada do transmissor RSOA, em virtude ausência de pinos elétricos de controle e monitoração do empacotamento SFP disponível. Desta forma, o único parâmetro avaliado de fato foi o nível de potência de injeção. Os níveis de razão de extinção *downstream* e *upstream* medidos foram de 5,3 dB e 11 dB, respectivamente. Os transmissores *colorless* foram modulados diretamente com pulsos NRZ em sequências PRBS de $2^{31}-1$ no OLT e $2^{23}-1$ na ONT em taxas simétricas de 1,25 Gb/s. Em todas as medições, comprimento de onda central do canal do AWG foi mantido em 1546 nm.

5.3 Materiais Utilizados

A **Fig. 5.2** mostra parte dos equipamentos e elementos presentes, utilizados nas medições da topologia de remodulação convencional.

Figura 5.2 - Foto da montagem experimental utilizada na avaliação dos cenários de remodulação convencional.

Dentre os principais materiais de consumo, podem ser listados:

1. RSOA da ONT com FFCI;
2. RSOA do OLT com DTLA;

3. Fonte óptica pré-fatiada (PSSL);
4. Acoplador óptico 80/20;
5. AWGs de 40 canais, com espaçamento de 100 GHz internacais, e;
6. Circuladores ópticos para as bandas C+L.

Os itens 1., 2., 3. e 4. foram fornecidos pela empresa Mel Inc. A descrição e fotos dos elementos encontram-se no **Apêndice E**.

Como observação, a topologia de reuso de comprimento de onda comumente encontrada na literatura técnica é denominada “topologia convencional”, “topologia de fonte pré-fatiada”, ou ainda, particularmente para este estudo, “topologia PSSL”. A topologia original apresentada neste trabalho é denominada como “topologia combinada” ou “proposta da tese”.

5.4 Remodulação Convencional

O estudo nesse capítulo foi dividido em duas vertentes. Inicialmente, foram conduzidas avaliações preliminares de taxa de erro de bit no cenário de remodulação convencional, a fim de validar as características sistêmicas de operação dos transmissores *colorless* disponibilizados pelo fornecedor, bem como investigar o alcance máximo permitido por essa topologia. Esses resultados estão apresentados na **Seção 5.4**.

Uma vez levantados esses limites sistêmicos, foi possível avaliar, de uma forma aprofundada, as vantagens oferecidas pela proposta da tese referentes ao impacto da dispersão cromática, efeitos de pós-filtragem e refelexões espúrias na segunda parte desse estudo, descrito na **Seção 5.5**. A seguir, é descrita em detalhes a topologia utilizada nas avaliações experimentais do cenário de remodulação convencional (topologia PSSL).

5.4.1 Transmissão *Downstream*

O primeiro conjunto de medições baseou-se nas avaliações de desempenho sistêmico e características de operação dos transmissores RSOA do OLT em função dos valores de potência de injeção (P_{injD}), a fim de confirmar os dados disponibilizados pelo fornecedor. Adicionalmente, procurou-se investigar os limites de desempenho sistêmico para o sentido *downstream* em termos de alcance da rede.

A metodologia adotada para as avaliações sistêmicas em termos de taxa de erro de bit consiste em encontrar o menor nível de potência de injeção nos RSOAs do OLT que produzam valores de BER inferiores a 10^{-12} na ausência de comportamento de patamar de erro.

Neste contexto, o primeiro cenário estudado foi a condição B2B. Os valores de P_{injD} usados foram de -1 dBm, -6 dBm e -11 dBm. Nesta configuração, o comprimento de onda foi fixado em 1546 nm. A **Fig. 5.3** mostra as avaliações sistêmicas de BER em função da potência óptica recebida no receptor da ONT para alguns valores de potência de injeção nos RSOA do OLT.

De acordo com os resultados, é possível obter taxa de erro de bit inferiores a 10^{-12} para uma sensibilidade de -27 dBm em potências de injeção superiores a -6 dBm. Esses valores estão em boa concordância com aqueles disponibilizados pelo fornecedor (como mostrado na **Tabela E.8**).

Figura 5.3 - Avaliação sistêmica do sentido *downstream* em condição B2B para alguns valores de potência de injeção.

Entretanto, a fim de verificar com precisão a sensibilidade em potência de injeção para operação apropriada dos RSOAs do OLT, o próximo passo foi conduzir a avaliação sistêmica para 20 km. A **Fig. 5.4** mostra estes resultados.

Observa-se uma penalidade em potência de apenas 0,5 dB (BER de 10^{-12}) para níveis de P_{injD} de -1 dBm. Entretanto, para valores inferiores a -6 dBm há uma forte presença de patamar de erros para a curva de BER, limitando a taxa de erro de bit em 10^{-11} .

Este comportamento sugere que o RSOA do OLT foi projetado para operar em altos valores de P_{injD} , a fim de suprimir o excesso de ruído de intensidade (*Excess*

Intensity Noise - EIN) proveniente do batimento ASE-ASE, como sugerido em [84-85]. Desta forma, os valores de potência de injeção sugeridos pelo fornecedor (entre - 3 dBm e 0 dBm) estão de acordo com aqueles encontrados nas avaliações sistêmicas.

Em virtude da margem limitada em potência de injeção para operação dos RSOAs da OLT, julgou-se desnecessário o levantamento das curvas de ganho óptico. A partir desse ponto, a potência de injeção no RSOA do OLT foi mantida em - 1dBm para todos os cenários *downstream* da topologia convencional.

Finalmente, a potência óptica de saída registrada para o RSOA do OLT no ponto A (para valores de potência de injeção de - 1 dBm) foi de 6 dBm. Assim, a potência máxima lançada na fibra (ponto B) disponível é de +0,5 dBm, levando-se em contas as perdas do AWG (4,5 dB) e de cada circulador óptico (1 dB).

Figura 5.4 - Avaliação sistêmica do sentido *downstream* em condição B2B e 20 km para valores de P_{injD} iguais a -1 dBm e -6 dBm.

Uma vez validadas as características de operação do RSOA do OLT, o último teste para o cenário *downstream* consistiu na investigação de distância máxima permitida por essa topologia. A metodologia baseia-se em encontrar a maior distância oferecida pelo sentido *downstream*, sem uso de qualquer tipo de técnica de compensação de dispersão cromática, a qual produza valores de BER inferior a 10^{-12} na ausência de comportamento de patamar de erro.

Desta forma, foram levantados os valores de BER em função da potência recebida no receptor da ONT variando-se o enlace de fibra alimentadora desde a condição B2B até 100 km com um incremento de 20 km. Estes resultados estão ilustrados na **Fig. 5.5**.

Uma penalidade de 2 dB (BER de 10^{-12}) foi registrada para distâncias de 40 km, entretanto, com a presença de uma leve tendência de patamar de erro para a curva de BER. Para distâncias de 60 km e 80, respectivamente, nota-se explicitamente o comportamento de patamar de erro para valores de BER superiores a 10^{-10} e 10^{-5} . Em 100 km de transmissão houve a perda total de sincronismo entre o sinal gerado e o sinal detectado.

A quantidade de dispersão cromática acumulada em cenários de longo alcance, somada às características espectrais de sinais provenientes de injeção de ASE de banda estreita e os baixos níveis de razão de extinção *downstream* (5,3 dB) utilizados em sistemas de remodulação, limita severamente o desempenho sistêmico nesse sentido de tráfego, impedindo o alcance em distâncias superiores a 30 km.

Figura 5.5 - Avaliação de desempenho sistêmico para o sentido *downstream* em função do enlace de fibra óptica.

Esses argumentos estão de acordo com as medições de diagrama de olho do sentido *downstream* mostrados na **Fig. 5.6**. Nota-se uma degradação significativa no nível de cruzamento superior entre a condição B2B e 20 km. Para distâncias de 40 km o nível de cruzamento superior está completamente deteriorado, levando à perda total da informação para distâncias de 60 e 80 km em virtude da interferência inter-simbólica.

Assim, pode-se concluir que para o sentido *downstream*, esta topologia está limitada a alcances de no máximo de 30 km, como era de se esperar de com os trabalhos encontrados na literatura técnica [74,76-85, 98-103].

Uma vez avaliadas as características de operação para o SFP do OLT bem como os limites de desempenho para o sentido *downstream*, o próximo procedimento foi

investigar as limitações sistêmicas encontradas no sentido *upstream*. Essas análises estão descritas na Seção 5.4.2.

Figura 5.6 - Diagramas de olho para o sentido *downstream* em função do comprimento da fibra. As medições foram realizadas no ponto C da Fig. 5.1. O valor da razão de extinção ER_D registrada foi de 5,3 dB.

5.4.2 Transmissão *Upstream*

Da mesma forma como conduzido na Seção 5.4.1, procurou-se confrontar as características medidas de operação do RSOA da ONT com aquelas disponibilizadas pelo fornecedor. A análise foi conduzida em duas frentes: caracterização de ganho óptico e avaliação de desempenho sistêmico.

Diferentemente do sentido *downstream*, a caracterização de ganho óptico para os RSOAs da ONT em função de potência de injeção faz-se necessária a fim de se identificar a região de ganho linear, característica esta essencial para o funcionamento da técnica FFCI.

A Fig. 5.7 mostra a curva de ganho óptico em função dos valores de potência do sinal de entrada. Os resultados sugerem que o ponto de potência de injeção em torno de -15 dBm delimita as regiões de saturação de ganho e ganho linear, sendo, portanto, o limite superior de potência de injeção óptica para operação dos RSOAs da ONT.

Entretanto, a fim de verificar com precisão o valor mínimo de potência de injeção *upstream*, um conjunto de avaliações sistêmicas foi realizado, adotando-se uma metodologia similar ao daquela utilizada para o sentido *downstream*. A Fig. 5.8 mostra o primeiro conjunto de avaliações para a condição B2B e os respectivos diagramas de

olho (obtidos no ponto E da **Fig. 5.1**). Os valores de potência de injeção foram mantidos em -10,5 dBm, -14,5 dBm e -18,5 dBm.

Figura 5.7 - Caracterizações de ganho óptico para o RSOA da ONT.

Figura 5.8- Avaliação de desempenho sistêmico para o sentido *upstream* na condição B2B para alguns valores de potência de injeção. O nível de razão de extinção medido para o sentido *upstream* foi de 11 dB.

De acordo com os resultados da **Fig. 5.8**, valores de BER de 10^{-12} foram obtidos para uma sensibilidade de -29 dBm, mesmo para nível de potência de injeção de -18,5 dBm. Adicionalmente, nota-se que o diagrama de olho correspondente (-18,5 dBm) apresenta um acúmulo de ruído residual de sobremodulação. Entretanto, devido aos altos níveis de razão de extinção *upstream* (11 dB), essa fração de ruído residual não apresenta um impacto significativo na condição B2B.

Os resultados da **Fig. 5.8** sugerem que o nível de potência de injeção de -18,5 dBm estabelece o nível inferior de injeção para os RSOAs ONT, garantindo assim um orçamento de potência máximo de 17,5 dB, o que equivale a 60 km de alcance de fibra (12 dB) alimentadora, somada as perdas dos componentes passivos (6 dB).

Desta forma, o último procedimento baseou-se na investigação do alcance máximo oferecido por esse sentindo, mantendo o nível de potência de injeção *upstream* em -18,5 dBm.

Foram levantadas as curvas de BER em função da potência recebida no receptor do OLT variando-se o enlace de fibra alimentadora desde a condição B2B até 60 km com um incremento de 20 km. Adicionalmente, foram obtidos os diagramas de olho para as distâncias de 20, 40 e 60 km. A **Fig. 5.9** mostra esses resultados.

Figura 5.9 - Avaliação de desempenho sistêmico para o sentido *upstream* em função de alguns comprimentos da fibra. A potência de injeção *upstream* foi mantida em -18,5 dBm. Os diagramas de olho foram medidos no ponto D da **Fig. 5.1**.

Registrou-se uma penalidade de apenas 0,5 dB para 20 km de alcance. Entretanto, o acúmulo de ruído residual de remodulação, somado ao impacto da dispersão cromática, limita o alcance da topologia a distâncias inferiores a 40 km, como pode ser observado pelo comportamento de patamar de erro das curvas de BER e os diagramas de olho associados.

Assim, a topologia de remodulação convencional permite um alcance de no máximo 20 km, mesmo apoiada nas técnicas eletrônicas propícias para o apagamento de portadora óptica.

Uma vez identificados os limites sistêmicos da topologia de remodulação convencional, são avaliados nas próximas seções, de uma forma aprofundada, as vantagens oferecidas pela proposta da tese apoiada nas técnicas de apagamento de portadora bem como as suas limitações sistêmicas.

5.5 Impacto dos Efeitos de Pós-Filtragem, Dispersão Cromática e Reflexões Espúrias

Na **Fig. 5.10** estão ilustrados esquematicamente os cenários de testes utilizados na investigação comparativa das topologias de reuso de portadora óptica baseadas em remodulação de intensidade: topologia de fonte óptica com pré-fatiamiento espectral (PSSL) na **Fig. 5.10-a**; e técnicas de autoalimentação e reuso de portadora óptica combinadas na **Fig. 5.10-b**.

Abaixo estão descritos os principais pontos de medição e respectivos parâmetros de monitoração de interesse nessas topologias:

- 1) Topologia PSSL
 - **Ponto A** - Potência de injeção nos RSOAs do OLT, espectros ópticos e diagramas de olho;
 - **Ponto B** – Potência óptica lançada na fibra SMF e espectros ópticos;
 - **Ponto R₁** – Razão de reflexão tipo-I e espectros ópticos;
 - **Ponto C** – Razão de extinção *downstream*, potência de injeção no RSOA da ONT, razão de reflexão tipo-II, diagramas de olho e taxa de erro de bit *downstream*;
 - **Ponto R₂** – Razão de reflexão tipo-II e espectros ópticos;
 - **Ponto D** – Espectros ópticos, e;

- **Ponto E** – Razão de extinção *upstream*, espectros ópticos, diagramas de olho e taxa de erro de bit *upstream*.

Ponto	Simbolo	Parâmetro Medido
A	Pinj_D	Potência de Injeção no RSOA OLT
B	#	Potência Óptica Lançada na SMF
R_1	R_I	Razão de Reflexão Tipo-I
C	ER_D	Razão Extinção <i>Downstream</i>
C	Pinj_{UP}	Potência de Injeção no RSOA ONT
R_2	R_{II}	Razão de Reflexão Tipo-II
E	ER_{UP}	Razão de Extinção <i>Upstream</i>

Ponto	Símbolo	Parâmetro Medido
B	#	Potência Óptica Lançada na SMF
R ₁	R _I	Razão de Reflexão Tipo-I
C	ER _D	Razão Extinção <i>Downstream</i>
C	Pinj _{UP}	Potência de Injeção no RSOA ONT
R ₂	R _{II}	Razão de Reflexão Tipo-II
E	ER _{UP}	Razão Extinção <i>Upstream</i>
F	Pss	Potência de Auto-Alimentação

Figura 5.10 - Topologias de reuso de comprimento de onda: (a) topologia de fonte óptica pré-fatiada (PSSL) e; (b) sinais *downstream* autoalimentados (SS). As medições de espectro óptico dos sentidos *downstream* e *upstream* para análise de efeitos de pós-filtragem foram tomadas, respectivamente, no conjunto de pontos: A-B-C e C-D-E. A resolução do OSA foi mantida em 0,03 nm. Os emuladores de reflexão foram inseridos nos pontos R_1 e R_2 .

- 2) Topologia SS:
- **Ponto A** – Espectros ópticos e diagramas de olho;
 - **Ponto B** – Potência óptica lançada na fibra SMF e espectros ópticos;
 - **Ponto R₁** – Razão de reflexão tipo-I e espectros ópticos;

- **Ponto C** – Razão de extinção *downstream*, potência de injeção no RSOA da ONT, diagramas de olho, espectros ópticos e taxa de erro de bit *downstream*;
- **Ponto R₂** – Razão de reflexão tipo-II e espectros ópticos;
- **Ponto D** – Espectros ópticos;
- **Ponto E** – Razão de extinção upstream, espectros ópticos, diagramas de olho e taxa de erro de bit *upstream*, e;
- **Ponto F** – Potência de autoalimentação.

Assim como efetuado nas avaliações apresentadas na **Seção 5.4**, utilizou-se a fonte pré-fatiada para a topologia PSSL bem como os RSOA do OLT com DTLA e RSOAS da ONT com FFCI para ambas as topologias. Os transmissores *colorless* foram modulados diretamente com sequências PRBS de $2^{31}-1$ (OLT) e $2^{23}-1$ (ONT). Em todas as avaliações sistêmicas do sentido *downstream*, da topologia de remodulação convencional, a potência óptica de injeção no RSOA do OLT foi mantida fixa em -1 dBm.

Por outro lado, na proposta de remodulação referente a **Fig. 5.10-b** cada RSOA gera o próprio sinal *downstream*, assim como a semente óptica para o RSOA da ONT correspondente, por meio da técnica de autoalimentação já descrita [75]: o esquema de recirculação óptica é estabelecida por meio da sequência formada pelo RSOA do OLT, AWG do OLT, acoplador de potência 10/90, FRM, acoplador de potência 10/90, AWG OLT e RSOA do OLT. Os valores de razões de extinção medidos nos pontos B e E da **Fig. 5.10**, respectivamente, para os sinais *downstream* e *upstream* provenientes da topologia combinada foram de 5,3 dB e 11 dB. Em ambas as topologias o comprimento de onda central do canal do AWG foi mantido em 1546 nm.

Ainda no cenário da **Fig. 5.10-b**, um EDFA com controle automático de ganho e um conjunto de circuladores ópticos foram acoplados ao RSOA da OLT. Na ausência desses elementos, a potência de autoalimentação é de -11 dBm, a qual é muito baixa frente aos -3 dBm necessários para a operação apropriada do SFP do OLT, conforme comprovado pelos resultados da **Fig. 5.3**. Assim, essa configuração foi necessária de forma a suprir as perdas associadas ao caminho de recirculação óptica, como realizado no **Cap. 4**.

Neste novo ensaio, a condição de autoalimentação foi alcançada para valores de P_{ss} a partir de -4 dBm (-15 dBm/0.2 nm). Novamente, as questões relativas a filtragem

óptica, espectro de ASE dos EDFAs e isolamento dos circuladores discutidas no **Cap.4** são também pertinentes nesse cenário.

Deve ser notado que a otimização de desempenho da técnica de *self-seeding* é alcançada mediante a condição de compromisso entre os níveis de razão de extinção (ER) e potência de autoalimentação [120]. Entretanto, em virtude do empacotamento SFP, não foi possível modificar aos níveis de corrente alternada e corrente contínua dos RSOAs do OLT de forma a relaxar os valores de Pss.

Em decorrência, a configuração experimental da Fig. 5.10-b, na qual o EDFA é acoplado ao RSOA, foi projetada de forma a simular as características de operação de RSOAs de alta potência de saída demonstrados na literatura [121]. Assim os valores de ER e Pss utilizados nas avaliações sistêmicas desta proposta são condizentes com aqueles encontrados na literatura [120].

Em todas as análises descritas a partir desse ponto de desenvolvimento do capítulo, a potência óptica lançada na fibra alimentadora (ponto B) e a potência óptica de injeção nos RSOAs ONT foram fixadas em -1 dBm e -18,5 dBm, respectivamente. Os principais parâmetros e correspondentes pontos de medições podem ser encontrados também na tabela incluída na Fig. 5.10.

A seguir são descritos os procedimentos experimentais, os resultados e análises de tolerâncias sistêmicas obtidas para ambas as topologias (PSSL e SS) em relação aos efeitos de pós-filtragem, dispersão cromática e reflexões discretas.

5.5.1 Avaliação de Desempenho Sistêmico da Transmissão *Downstream*

Inicialmente a análise foi conduzida para o sentido *downstream*. O objetivo é analisar o impacto dos efeitos pós-filtragem e dispersão cromática nesse sentido de tráfego, uma vez que a qualidade dos sinais *upstream* baseados em FFCI está diretamente reacionado ao desempenho sistêmico dos sinais de descida.

Impacto do Efeito de Pós-Filtragem nos Sinais *Downstream*

O foco no estudo dos efeitos de pós-filtragem são as avaliações de distorções espectrais e atenuação das componentes de alta frequência contidas nos sinais ópticos após as várias passagens (três passagens para cada sentido de tráfego) pelos AWGs da rede, conforme mostrado no **Apêndice B**.

Com o intuito de estabelecer uma análise comparativa dos efeitos de pós-filtragem para ambas as configurações, PSSL e SS, foram realizadas as seguintes medições: espectros ópticos, largura espectral óptica, conteúdo espectral óptico e diagramas de olho, conforme mostrados na **Fig. 5.11** e **5.12**.

Figura 5.11 – Análise dos efeitos de pós-filtragem para os sinais *downstream* da topologia convencional (PSSL) e da proposta da tese (SS): (a) espectro óptico; (b) largura espectral óptica no ponto A e; (c) conteúdo espectral óptico entre os pontos C e A.

As medições espectrais do sentido *downstream* foram tomadas no ponto A (antes do AWG OLT), ponto B (após AWG do OLT) e ponto C (após AWG do RN) da **Fig. 5.10**. A largura espectral óptica do sinal nos pontos C e A são definidas, respectivamente, como $\Delta\lambda_C$ e $\Delta\lambda_A$. Adicionalmente, a referência espectral, ou atenuação de potência espectral, é definida como a queda de potência (para um dado valor de largura espectral) tomando como referência a potência óptica de pico normalizada da

Fig. 5.11-a. Finalmente, o conteúdo espectral óptico, o qual se refere à variação das componentes de frequência espectral contidas no sinal após as várias passagens pelos AWGs, é definido como a diferença entre a largura espectral óptica dos pontos C e A, ou seja, a diferença entre $\Delta\lambda_C$ e $\Delta\lambda_A$.

Como pode ser observado pelos resultados da **Fig. 5.11-b**, a largura espectral óptica dos sinais provenientes da topologia PSSL (0,142 nm à 3 dB de atenuação em relação ao pico) é maior do que a dos sinais auto-alimentados (0,069 nm à 3 dB de queda). Em virtude dessa ocupação espectral excessiva para a topologia PSSL e do ganho espectral assimétrico dos RSOAs, as várias passagens do sinal óptico pelos AWGs levam a uma supressão significativa das componentes de alta frequência do sinal na topologia convencional, evidenciada pela análise de conteúdo óptico espectral entre os pontos A e C. (ver **Figs. 5.11-a e 5.11-c**).

Em decorrência, essa redução das componentes de alta frequência dos sinais é então percebida no domínio do tempo como a degradação do nível de cruzamento entre os níveis 1 e 0, levando a um acúmulo de intensidade de ruído após o sinal atingir o ponto C, como mostra as medições de diagrama de olho da **Fig. 5.12**. Este efeito é muito bem conhecido, sendo reportado por trabalhos técnicos na área [80-85].

Por outro lado, as características espectrais de sinais autoalimentados (0,069 nm de largura espectral a 3 dB) permite uma melhor tolerância aos efeitos de pós-filtragem com leve distorções no espectro óptico como pode ser observado na **Fig. 5.11-a**, mas ainda preservando as componentes de alta frequência em um intervalo maior (ver **Fig. 5.11-c**). Desta forma, o excesso de intensidade de ruído para os sinais autoalimentados é menor do que a topologia PSSL, propiciando a uma maior tolerância à degradação no domínio do tempo, como mostra a **Fig. 5.12**. Essa característica pode ser destacada como umas das melhorias propiciada pela técnica combinada frente a topologia PSSL.

Em transmissão a altas taxas (10 Gb/s, por exemplo), os efeitos de pós-filtragem poderiam limitar severamente a qualidade sistêmica da topologia PSSL em virtude da supressão excessiva das componentes de alta frequência do sinal óptico, a qual é minimizada utilizando-se a técnica de autoalimentação.

Finalmente, vale observar que novamente o valor do comprimento de onda central de sinais autoalimentados em relação aos sinais provenientes da topologia PSSL são desviados para os comprimentos de onda mais longos (ver **Fig. 5.11-a**) em virtude da automodulação de fase causada pela mudança do índice eletrônico na região ativa do

RSOA, efeito este induzido pela dinâmica dos portadores na cavidade do semiconductor no regime de autoalimentação óptica [120].

Figura 5.12 - Diagramas de olho do sentido *downstream* para avaliação dos efeitos de pós-filtragem das topologias de fonte óptica com pré-fatiamento espectral (PSSL) e sinais autoalimentados (SS).

Impacto do Efeito de Dispersão Cromática nos Sinais *Downstream*

O próximo passo foi avaliar a tolerância sistêmica aos efeitos de dispersão cromática, de forma a comparar o alcance máximo oferecido por cada topologia, ainda fornecendo valor de BER inferior a 10^{-12} . As curvas de BER foram obtidas desde a condição B2B até 100 km de fibra alimentadora em intervalos de 20 km. A **Fig. 5.13** mostra os resultados dessas avaliações. Para uma melhor comparação, as curvas obtidas na **Fig. 5.5** foram também inseridas nesses resultados.

Pode-se notar claramente o ganho em distância de cobertura propiciado pela proposta da tese (**Fig. 5.13-a**) frente ao cenário de remodulação convencional (**Fig. 5.13-b**). Os sinais autoalimentados exibem uma maior tolerância aos efeitos de dispersão cromática em virtude do seu conteúdo espectral mais estreito, permitindo assim o alcance de distâncias em até 80 km com uma penalidade em potência de 2 dB, embora na presença de *floor*. Assim, a proposta da tese oferece um ganho de pelo menos 40 km em alcance frente as topologias PSSL para o sentido *downstream*.

Estes argumentos estão apoiados nas medições de penalidade em potência, mostrados na **Fig. 5.14**. Aqui, o valor de BER foi mantido em 10^{-10} de forma a estabelecer uma comparação direta entre as topologias para distâncias de até 90 km. Os

diagramas de olho capturados para condição B2B, 20 km, 40 km, 60 km e 80 km estão na imagem adjunta à **Fig. 5.14**. Uma discussão qualitativa sobre o máximo orçamento de potência permitido para o sentido *downstream* pode ser conduzida assumindo-se a presença de códigos corretos de erro (*Forward Error Correction* – FEC) na ONT com um limiar de BER de 10^{-4} . De acordo com os resultados da **Fig. 5.13**, uma penalidade em potência de 0,5 dB (ver Fig. 5.13-b) poderia ser obtida para uma transmissão por 100 km de sinais *downstream* autoalimentados.

Figura 5.13 – Avaliações de desempenho de BER para o sentido *downstream* para distâncias de até 100 km: (a) topologia de fonte óptica pré-fatiada (PSSL) e; (b) proposta da tese (SS).

Assim, esta proposta permite um orçamento de potência de 28 dB para cenários de longo alcance, com uma penalidade de potência desprezível. Por outro lado, para a topologia PSSL o sincronismo para detecção não foi possível de ser obtido nem para 100 km de transmissão, provendo no máximo uma distância de 80 km com uma penalidade em potência de 2 dB para um limite de FEC de 10^{-4} . Essa é uma das vantagens oferecida pela topologia combinada frente a topologia PSSL.

Figura 5.14 – Análise comparativa entre a topologia convencional (PSSL) e a topologia combinada (SS) de penalidade em potência em função do comprimento do enlace para o sentido *downstream*.

5.5.2 Avaliação de Desempenho Sistêmico para a Transmissão *Upstream*

Impacto do Efeito de Pós-Filtragem nos Sinais *Upstream*

Assim como conduzido na Seção 5.5.1, os estudos comparativos para o sentido *upstream* iniciam com a avaliação dos efeitos de pós-filtragem, mostrados na Fig. 5.15. As medições de espectro óptico foram realizadas no ponto C (saída do RSOA da ONT), ponto D (após AWG do RN) e ponto E (após AWG do OLT) da Fig. 5.10.

A largura espectral óptica do sinal nos pontos E e A é definida, respectivamente, como $\Delta\lambda_E$ e $\Delta\lambda_C$. Adicionalmente, a referência espectral, ou atenuação de potência espectral, é definida como a queda de potência (para um dado valor de largura espectral óptica) tomando como referência a potência óptica de pico normalizada da Fig. 5.15-a. Finalmente, o conteúdo espectral óptico, o qual mede a variação das componentes de alta frequência do sinal, é definido como a diferença entre a ocupação espectral dos pontos E e C, ou seja, a diferença entre $\Delta\lambda_E$ e $\Delta\lambda_C$. Desta forma, foi mantida a mesma metodologia de análise que na Seção 5.5.1.

De acordo com os resultados obtidos nas [Figs. 5.15-a e 5.15-b](#), os espectros ópticos dos sinais *upstream* exibem uma ocupação espectral maior do que aqueles provenientes dos sinais *downstream* (ver [Fig. 5.11-a](#)).

Este comportamento espectral de ONTs refletivas baseadas em FFCI pode ser explicado devido aos altos valores de corrente alternada no qual o dispositivo RSOA é projetado para operar, de forma a suprimir o conteúdo residual da portadora *downstream* para remodulação dos dados. Entretanto mesmo nessa condição, os sinais autoalimentados oferecem uma maior resistência aos efeitos de pós-filtragem, quando comparados a topologia PSSL, pela análise de conteúdo espectral óptico na [Fig. 5.15-c](#). Esta é outra vantagem decorrente da proposta da tese.

Figura 5.15 - Análise dos efeitos de pós-filtragem para os sinais *upstream* das topologias de fonte óptica pré-fatiada (PSSL) e topologia combinada (SS): (a) espectro óptico; (b) largura espectral óptica no ponto C e; (c) conteúdo espectral óptico entre os pontos E e C.

Considerando uma possível expansão gradativa (premissa tecnológica adotada na introdução) da topologia combinada de cenários de taxas de 1,25 Gb/para 10 Gb/s mantendo o nível de alteração da rede física o menor possível, o uso formatos de chaveamento liga-desliga (*On-Off Keying* – OOK) e detecção direta, uma análise qualitativa mais aprofundada sobre questões de desempenho sistêmico e viabilidade técnica pode ser elaborada.

Neste contexto, há três pontos que devem ser considerados: banda elétrica dos RSOAs, largura espectral óptica e técnicas de equalização eletrônica.

Tipicamente, a banda elétrica dos RSOAs disponíveis comercialmente é de poucos GHz, 3 GHz no melhor caso [147]. Além disso, o perfil de resposta em frequência dos RSOAs exibe características de filtro passa-baixa. Em decorrência, a resposta em frequência do RSOA irá causar redução espectral das componentes de alta frequência do sinal em taxas de transmissão elevada (10 Gb/s). Como consequência dessa supressão espectral, a largura espectral óptica da saída do RSOA operando a 10 Gb/s é limitada a poucos GHz ao invés dos 20 GHz esperados, mesmo sob regime de modulação direta, minimizando o alargamento do pulso.

Esses argumentos estão apoiados nas medições de largura espectral óptica a 3 dB encontrados em trabalhos recentes na literatura sobre sinais *upstream* autoalimentados a 10 Gb/s [128, 133], onde foram reportados valores na faixa de 8 a 10 GHz. Assim, o efeito da dispersão cromática e efeitos de pós-filtragem é menor do que seria esperado à taxas de 10 Gb/s.

Não obstante, em virtude da mesma característica de banda elétrica limitada, técnicas de equalização eletrônica são necessárias de forma a recuperar as componentes de alta frequência do sinal. Entretanto, essas técnicas estão muito bem estabelecidas na literatura técnica, como já descrito. Desta forma, acredita-se que a topologia combinada possa ser expandida para um cenário bidirecional a taxas simétricas de 10 Gb/s, com o desenvolvimento apropriado de técnicas eletrônicas de apagamento de portadora óptica e equalização eletrônica.

Finalmente, de acordo com trabalhos encontrados na literatura até o presente momento [38-42, 108, 132-136, 142-153, 160], técnicas de equalização eletrônica para taxas de 10 Gb/s nunca foram reportadas para a configuração ASE de banda estreita e modulação direta de RSOAs com banda elétrica limitada. Esta é mais uma vantagem oferecida pela proposta da tese, viabilidade de expansão gradativa para taxas de transmissão elevadas com poucas modificações na rede física.

Impacto do Efeito de Dispersão Cromática nos Sinais *Upstream*

De forma a avaliar o ganho bidirecional em termos de distância de cobertura, oferecida pela topologia combinada, o próximo passo consistiu no estudo sobre o impacto da dispersão cromática no desempenho sistêmico do sentido *upstream*.

Conforme pode ser observado pelos resultados ilustrados na **Fig. 5.16**, a técnica combinada permite o alcance em até 60 km com uma penalidade de apenas 1,5 dB (BER de 10^{-12}). O nível excessivo de ruído residual de remodulação contido no nível 1 dos sinais *upstream*, somado aos baixos valores de potência de injeção, efeitos de pós-filtragem para ambos sinais de descida e subida leva a uma degradação significativa da qualidade dos sinais da topologia PSSL.

Por outro lado, o desempenho sistêmico dos sinais autoalimentados exhibe uma maior tolerância ao acúmulo desses efeitos. Esses argumentos estão apoiados nos diagramas de olho da **Fig. 5.17**. Assim, a topologia de autoalimentação oferece um ganho de 40 km em configuração bidirecional comparado a topologia convencional. Esta é outra vantagem oferecida pela proposta da tese.

Figura 5.16 - Avaliações de desempenho de BER para o sentido *upstream* para distâncias de até 60 km: (a) topologia de fonte óptica pré-fatiada (PSSL) e; (b) topologia combinada (SS). A potência de injeção nos RSOAs ONTs foi fixada em -18,5 dBm.

Como forma de validar e expandir o cenário de autoalimentação e reuso de comprimento de onda para os demais canais da banda C, foram obtidas curvas de penalidade em potência em função do comprimento de onda de alguns canais, espaçados simetricamente na região de 1530 a 1560 nm e os respectivos diagramas de

olho. A **Fig. 5.18** mostra esses resultados. Uma penalidade máxima de 1,8 dB e 1,0 dB, respectivamente, foi alcançada para os canais *downstream* e *upstream*, mostrando a viabilidade da técnica de autoalimentação.

Figura 5.17 - Diagramas de olho para o sentido *upstream* em função do comprimento da fibra para a topologia convencional (PSSL) e da proposta da tese (SS). As medições foram realizadas no ponto E da Fig. 5.10.

Figura 5.18 - Penalidade em potência em função do comprimento de onda em 60 km de transmissão para os sinais *downstream* e *upstream*. A BER foi mantida em valores próximos a 10^{-12} .

Uma última observação a respeito da distância de cobertura oferecida pela proposta da tese é necessária. Os circuitos eletrônicos de apagamento de portadora utilizados tinham como limitação sistêmica os valores de razão de extinção *downstream*, de até 6 dB, e potência de injeção *upstream*, de -15 dBm, sendo desenvolvidos para a topologia de remodulação convencional.

Entretanto, uma vez que o desenvolvimento de técnicas DTLA com uma maior tolerância a níveis de potência de injeção no RSOA da ONT (- 24 dBm) e de razão de

extinção *downstream* (9 dB) foi demonstrado na literatura [103], esta proposta pode permitir um incremento adicional na distância de cobertura da rede com o uso do correção de nível de limiar mais robusto, adicionado ao desenvolvimento apropriado de técnicas FFCI para sinais autoalimentados.

5.5.3 Estudo Comparativo do Impacto de Reflexões Espúrias

Como conjunto final de medições, de forma a destacar todas as vantagens e desvantagens oferecidas por ambas as topologias de reuso em comprimento de onda (convencional e proposta), foram investigadas a tolerância dos sinais *downstream* e *upstream* (em condição B2B) aos efeitos de reflexões espúrias. A análise foi conduzida sob duas perspectivas: i) qualitativa, em termos de medições de espectro óptico; ii) quantitativa, em termos de penalidade em potência e desempenho sistêmico.

Análise Espectral Óptica de Reflexões Espúrias

Conforme mencionado no **Cap. 3**, há dois principais tipos de reflexões discretas em sistemas de reuso de portadora óptica, as quais interferem com os fluxos de dados em virtude da transmissão bidirecional no mesmo comprimento de onda e na mesma fibra alimentadora, levando à degradação do desempenho sistêmico: reflexões R-I e R-II. Os pontos críticos de reflexões discretas estão ilustrados na **Fig. 5.19**: ponto de reflexão 1 (R_1), no *front-end* OLT e; ponto de reflexão 2 (R_2), no *front-end* da ONT

Conforme mostrado em detalhes no **Apêndice B**, as ocorrências de reflexões R-I referem-se a uma fração do sinal óptico *downstream* refletido em direção ao receptor do OLT, a qual interfere com os dados de subida, afetando o desempenho sistêmico *upstream*. As reflexões do tipo R-II referem-se a uma fração do sinal óptico *upstream* refletido em direção a ONT. A Reflexão II pode ser ainda dividida em dois tipos: Reflexão II-A ou Reflexão II-B.

Reflexões do tipo II-A referem-se a uma fração do sinal *upstream* refletida em direção ao receptor da ONT, as quais interferem com os sinais de descida, afetando o desempenho sistêmico *downstream*, enquanto as reflexões II-B são refletidas em direção ao transmissor RSOA, interferindo na qualidade da geração dos sinais *upstream*.

De forma a estabelecer uma discussão qualitativa sobre o impacto das reflexões discretas em ambas as topologias, foram conduzidas análises espectrais nos pontos R_1 e R_2 da **Fig. 5.10** por meio da introdução de emuladores de reflexões, ilustrados,

respectivamente, nas **Figs. 5.19 e 5.20**. Os emuladores de reflexão são compostos por acopladores ópticos 2x2 com razão de divisão de 50:50, um atenuador óptico variável (Variable Optical Attenuator – VOA), um controlador de polarização (*Polarization Controller* - PC). Um quilometro de fibra SMF foi utilizada de forma a descorrelacionar os sinais refletidos e transmitidos.

Figura 5.19 – Ilustração esquemática do emuladores de reflexão R-I inserido no ponto R_1 da Fig. 5.10

O parâmetro de interesse quantitativo nas análises de reflexões discretas é a razão de reflexão, R , a qual é definida como a razão entre a potência óptica do sinal refletido (interferência) e potência óptica do sinal transmitido (*downstream* ou *upstream*).

Figura 5.20 - Ilustração esquemática do emuladores de reflexão R-II inserido no ponto R_2 da Fig. 5.10

Para a análise de medições espectrais, o coeficiente de reflexão R foi mantido

em -30 dB. Aqui, define-se TD_C , TU_C , TU_E , λ_D e λ_U como sinal *downstream* transmitido chegando ao ponto C, sinal *upstream* transmitido emergindo do ponto C, sinal *upstream* transmitido atingindo o ponto E, comprimento de onda de pico do sinal *downstream* e comprimento de onda de pico do sinal *upstream*, respectivamente. A **Fig. 5.21** mostra os resultados das medições de espectro óptico.

Figura 5.21 – Medições de espectros ópticos para análise de reflexões discretas: (a) topologia convencional e; (b) topologia combinada.

Os resultados da **Fig. 5.21** sugerem que o impacto das reflexões discretas no

desempenho sistêmico dos sinais *downstream* e *upstream* na topologia convencional (**Fig. 5.20-a**) devem exibir uma maior tolerância a esses efeitos degradantes do que a topologia combinada.

Em virtude da estreita largura de linha dos sinais autoalimentados, o perfil de espectro óptico dos sinais transmitidos e dos sinais provenientes das reflexões discretas exibem características similares. Adicionalmente, nota-se que a dissintonia em comprimento de onda dos sinais *upstream* e *downstream* (transmitidos e refletidos) é próxima a zero.

Essas características ópticas indicam que existe uma maior probabilidade de interferência e degradação sistêmica na topologia combinada do que a topologia convencional se os estados de polarização dos sinais transmitidos e refletidos estiverem alinhados.

Análise de Penalidade em Potência em Função da Razão de Reflexão

Como forma de verificar a argumentação desenvolvida para análise do impacto das reflexões discretas em ambas as topologias, foram investigadas as penalidades em potência (mantendo os valores de BER em 10^{-10}) para os dois sentidos de tráfego, em função da razão de reflexão. As **Figs. 5.22 e 5.23** mostram essas análises.

De acordo com os resultados da **Fig. 5.22**, observa-se uma penalidade máxima de 1 dB para uma razão de reflexão de -25 dB para a topologia PSSL. Para valores superiores a -20 dB, o impacto da interferência proveniente do batimento óptico entre sinal transmitido e sinal refletido afeta significativamente o desempenho sistêmico, levando ao comportamento de patamar de ruído. Os valores de tolerância sistêmica da topologia PSSL ao impacto do parâmetro R estão de acordo com aqueles encontrados na literatura [96].

Entretanto, como pode ser observado pelos resultados da **Fig. 5.23**, a tolerância sistêmica da topologia PSSL ao parâmetro R é superior do que a topologia de autoalimentação, a qual exibe comportamento de patamar em BER para valores do parâmetro R em torno de -25 dB. Assim, uma das principais desvantagens/limitações da topologia proposta nesse trabalho refere-se a baixa tolerância ao impacto de reflexões discretas, o que está de acordo com os ensaios de espectros ópticos mostrados na **Fig. 5.21**.

Figura 5.22 – Penalidade em potência para em função do parâmetro R para a topologia PSSL.

Figura 5.23 - Penalidade em potência para em função do parâmetro R para a topologia combinada.

5.6 Análises de Relação Custo-Benefício em Topologias de Reuso de Portadora Óptica no Domínio da Intensidade

Conforme exposto no **Cap. 1**, no acesso óptico a questão “custo para o usuário final da rede” é muito sutil, inclusive muito mais do que em redes metropolitanas ou redes de transmissão, tanto no valor de assinatura do serviço contratado como no valor para instalação do aparato ONT. Desta forma, a relação custo-benefício desempenha um requisito mandatório em projetos de redes de acesso óptico.

Tendo em vista o panorama exposto, o objetivo desta seção é apresentar uma análise comparativa de forma quantitativa da relação custo-benefício oferecida pela topologia combinada e a topologia PSSL. A análise limitou-se ao cálculo de custo de instalação de uma unidade WDM-PON contendo 100 (uma banda óptica), 200 (duas bandas ópticas) ou 300 (bandas S+C+L) usuários por OLT em estruturas análogas encontradas na literatura [106], entretanto, desconsiderando-se o uso de esquemas de amplificação, o custo de instalação de fibras e das plataformas físicas de empacotamento mecânico e alocação dos elementos do OLT ou da ONT.

Como referência, foram utilizados os valores de custo, levantados em 2012, dos seguintes componentes: fonte óptica pré-fatiada (PSSL), SFP OLT (DTLA), SFP ONT (FFCI), circulador óptico, AWG de 100 canaiss, acoplador de potência, FRM e filtro WDM de bandas, descritos na **Tabela 5.3**. Esses valores foram normalizados pelo custo da fonte PSSL, o qual é o item mais caro da rede.

As indicações “sem volume” e “com volume” correspondem, respectivamente, ao custo da aquisição de uma única unidade do item e o custo de aquisição por unidade de uma centena. Há um desconto de 15% por unidade na aquisição da centena comparando-se à aquisição de uma única unidade.

Tabela 5.3 – Levantamento de custo dos principais componentes da rede WDM-PON em 2012.

Item	Custo (US\$)	Custo Relativo (UA)
Fonte PSSL	2.500	1,0000
AWGs de 100 canais	1.500	0,6000
Circulador Óptico	500	0,2000
Acoplador de Potência	75	0,0300
Filtro WDM de Bandas	100	0,0400

FRM	100	0,0400
SFP OLT (sem volume)	110	0,0440
SFP OLT (com volume)	93,5	0,0374
SFP ONT (sem volume)	120	0,0480
SFP ONT (com volume)	102	0,0408

5.6.1 Banda S, C ou L

É possível alocar até 100 usuários espaçados na grade de 50 GHz por banda óptica, isto é, S, C ou L. Assim, cada topologia é composta dos seguintes elementos:

1) Topologia PSSL

Elementos: 1 fonte BLS primária, 1 fonte BLS redundante, 3 AWGs, 2 circuladores ópticos, 1 acoplador de potência, 100 SFPs OLT e 100 SFPs ONT.

2) Topologia Combinada

Elementos: 1 FRM primário, 1 FRM secundário, 3 AWGs, 1 circulador óptico, 1 acoplador de potência, 100 SFPs OLT e 100 SFPs ONT.

Tabela 5.4 - Levantamento de custo de uma unidade de rede WDM-PON, agregando 100 usuários por OLT.

Topologia	Custo Total	Custo Total por Gb/s
PSSL	12,05 UA	0,0964 UA/Gb/s
Combinada	9,93 UA	0,0794 UA/Gbs

De acordo com os resultados da **Tabela 5.4**, o valor unitário de uma rede WDM com capacidade de 125 Gb/s (100x1,25 Gb/s) baseada na topologia combinada propicia uma redução de 17,63% do custo total por Gb/s em comparação à topologia convencional.

5.6.2 Bandas S e C, C e L ou S e L

É possível alocar até 200 usuários espaçados na grade de 50 GHz alocando-se duas das três bandas ópticas, isto é, S e C, C e L ou S e L. Assim, cada topologia é composta dos seguintes elementos:

1) Topologia PSSL

Elementos das duas bandas ópticas: 2 fontes BLS primárias, 2 fontes BLS redundantes, 6 AWGs, 2 circuladores ópticos, 2 acopladores de potência, 4 filtros WDM de bandas, 200 SFPs OLT e 200 SFPs ONT.

2) Topologia Combinada

Elementos das duas bandas ópticas: 1 FRM primário, 1 FRM redundante, 6 AWGs, 1 circulador óptico, 1 acoplador de potência, 3 filtros WDM de bandas, 200 SFPs OLT e 200 SFPs ONT.

Tabela 5.5 - Levantamento de custo de uma unidade de rede WDM-PON, agregando 200 usuários por OLT.

Topologia	Custo Total	Custo Total por Gb/s
PSSL	23,86 UA	0,0954 UA/Gbs
Combinada	19,67 UA	0,0787 UA/Gbs

De acordo com os resultados da **Tabela 5.5**, o valor unitário de uma rede WDM com capacidade de 250 Gb/s (200x1,25 Gb/s) baseada na topologia combinada propicia uma redução de 17,5 % do custo total por Gb/s em comparação à topologia convencional.

5.6.3 Bandas S, C e L

É possível alocar até 300 usuários espaçados na grade de 50 GHz alocando-se as três bandas ópticas, isto é, S, C e L. Assim, cada topologia é composta dos seguintes elementos:

1) Topologia PSSL

Elementos das três bandas ópticas: 3 fontes BLS primárias, 3 fontes BLS redundantes, 9 AWGs, 2 circuladores ópticos, 3 acopladores de potência, 8 filtros WDM, 300 SFPs OLT e 300 SFPs ONT.

2) Topologia Combinada

Elementos das duas bandas ópticas: 1 FRM primário, 1 FRM redundante, 9 AWGs, 1 circulador óptico, 1 acoplador de potência, 6 filtros WDM de bandas, 300 SFPs OLT e 300 SFPs ONT.

Tabela 5.6 – Levantamento de custo de uma unidade de rede WDM-PON, agregando 300 usuários por OLT.

Topologia	Custo Total	Custo Total por Gb/s
PSSL	35,67 UA	0,0951 UA/Gbs
Combinada	29,41 UA	0,0784 UA/Gbs

De acordo com os resultados da **Tabela 5.6**, o valor unitário de uma rede WDM com capacidade de 375 Gb/s (300x1,25 Gb/s) baseada na topologia combinada propicia uma redução de 17,56 % do custo total por Gb/s em comparação à topologia convencional.

Como base em todos os resultados expostos, a topologia combinada propicia uma redução média de 17,5% nos custos de instalação de uma unidade de rede WDM-PON.

5.7 Considerações Finais

Neste capítulo foram exploradas, de forma aprofundada, as vantagens e desvantagens oferecidas pela topologia de remodulação combinada, apoiadas nas técnicas de remodulação eletrônica, visando o projeto de redes WDM-PON de longo alcance. Adicionalmente, procurou-se estabelecer uma comparação experimental direta com a topologia convencional (PSSL), de forma a evidenciar os ganhos e limitações decorrentes da proposta da tese.

Foi estudado o impacto dos principais efeitos degradantes no desempenho sistêmico das topologias de remodulação, entre eles efeitos de pós-filtragem, dispersão cromática e reflexões discretas em função de vários parâmetros, tais como conteúdo óptico espectral, comprimento do enlace, razão de reflexão, espectros ópticos, diagrama de olhos, taxa de erro de bit e penalidades em potência.

Em suma, os resultados quantitativos, qualitativos e as respectivas conclusões associadas obtidos neste capítulo podem ser resumidos da seguinte forma:

A) Largura espectral óptica e impacto da dispersão cromática

- Topologia PSSL: largura de ocupação espectral do canal de 0,142 nm para *downstream* e de 0,190 nm para *upstream* (tomada a 3 dB);
- Topologia combinada: largura de ocupação espectral do canal de 0,069 nm para *downstream* e de 0,081 nm para *upstream* (tomada a 3 dB).

Conclusão A: A razão entre os valores de largura espectral óptica a 3 dB oferecidos pela topologia convencional e a topologia combinada é de 2,06 vezes para o *downstream* e 2,34 vezes para os sentido *upstream*. Desta forma, a proposta da tese propicia um aumento de tolerância ao impacto dos efeitos de dispersão cromática, devido as características de consteúdos espectrais mais estreitos.

B) Redução de conteúdo espectral e efeitos de pós-filtragem

- Topologia PSSL - Redução de conteúdo espectral à 20 dB do valor de pico de - 0,220 nm para *downstream* e - 0,204 nm para *upstream*.
- Topologia combinada - Redução de conteúdo espectral à 20 dB do valor de pico de - 0,01 nm para *downstream* e - 0,03 nm para *upstream*.

Conclusão B: A razão entre os valores de redução de conteúdo espectral a 20 dB do valor de pico entre a topologia convencional e a topologia combinada é de 20 vezes para o sentido *downstream* e 6 vezes para os sinais *upstream*. Dessa forma, a proposta da tese permite à uma maior tolerância sistêmica ao impacto dos efeitos de pós-filtragem.

C) Alcance

- Topologia PSSL: 40 km para *downstream* e 20 km bidirecional (penalidade máxima de 2 dB para BER de 10^{-12});
- Topologia combinada: 80 km para *downstream* e 60 km bidirecional (penalidade máxima de 2 dB para BER de 10^{-12}).
- Topologia PSSL admitindo-se o uso de FEC (10^{-4}) na ONT: 80 km para *downstream* (penalidade de 2 dB);
- Topologia combinada admitindo-se o uso de FEC (10^{-4}) na ONT: 100 km *downstream* (penalidade de 0,5 dB).

Conclusão C: Sem o uso de FEC, o alcance propiciado pela topologia combinada é superior em 40 km frente a topologia PSSL, com penalidade de 2 dB para ambas. Na presença de FEC, o alcance propiciado à topologia combinada é superior em 20 km de extensão frente a topologia PSSL com uma penalidade de apenas 0,5 dB para proposta da tese.

D) Reflexões discretas

- Tolerância ao impacto de reflexões discretas para a topologia PSSL (para BER de 10^{-10}): - 20 dB.
- Tolerância ao impacto de reflexões discretas para a topologia de autoalimentação (para BER de 10^{-10}): - 25 dB.

Conclusão D: A topologia PSSL oferece uma tolerância sistêmica superior em 5 dB ao impacto das reflexões discretas, em comparação a topologia combinada.

E) Custo operacional e viabilidade de migração gradativa para o cenário S+C+L e taxas de até 10 Gb/s com uso de modulação direta

- Topologia PSSL – Necessário o projeto de fontes BLS com ocupação espectral nas bandas S+C+L. Adicionalmente, os efeitos degradantes relacionados às sementes ASE de banda estreita exigem o projeto de fontes BLS de grande complexidade (alta potência e baixos valores de RIN) para a operação em 10 Gb/s bem como SOAs integrados com moduladores externos. [60-61, 160]. Além disso, todos os transmissores refletivos da rede ficam dependentes do funcionamento da fonte BLS, exigindo uma fonte óptica de banda larga redundante (reserva) a fim de garantir a proteção da rede. Além disso, de acordo com trabalhos encontrados na literatura até o presente momento [38-42, 108, 132-136, 142-153, 160], técnicas de equalização eletrônica para taxas de 10 Gb/s nunca foram reportadas para a configuração ASE de banda estreita e modulação direta.
- Topologia combinada – Elimina a necessidade de fontes BLS. Cada RSOA do OLT, por meio da técnica de autoalimentação, gera o seu próprio semente óptica, bem como a semente óptica para o RSOA da ONT associada. Assim, os transmissores refletivos da rede não estão mais dependentes do funcionamento de fonte BLS centralizada, o que permite a implementação de uma rede mais simplificada em termos de gerenciamento de custos operacionais e mais robusta em termos de proteção, embora o funcionamento da rede esteja condicionado à operação do FRM. Trabalhos recentes tem reportado a operação de RSOAs autoalimentados e modulados diretamente à 10 Gb/s [133-135], apoiados em equalização eletrônica na detecção, comprovando a viabilidade de expansão gradativa para transmissão de dados em altas taxas.

Conclusão E: Com base em todas as características e vantagens listadas, a topologia combinada mostra-se como a alternativa mais viável em termos de requisitos técnicos e de custos operacionais para sistemas WDM-PON baseado no reuso de portadora óptica, fontes ASE banda larga, modulação em intensidade e detecção direta para taxas de até 10 Gb/s.

Acredita-se que esse cenário possa ser expandido para capacidades de 80 x 1,25 Gb/s (100 Gb/s) na grade DWDM da banda C (50 GHz), ou até mesmo para transmissões bidirecionais a 10 Gb/s, com o desenvolvimento de técnicas eletrônicas de apagamento ópticas e equalização eletrônica apropriadas.

6. Conclusões

Nesta Tese de Doutorado foi proposta e investigada uma nova topologia de reuso de comprimento de onda para redes WDM-PON, explorando a combinação das técnicas de autoalimentação no OLT e apagamento de portadora óptica na ONT, por meio de avaliações experimentais e análises qualitativas e quantitativas dos resultados obtidos.

O trabalho iniciou-se com a revisão bibliográfica aprofundada em redes WDM-PON baseadas em técnicas de fatiamento espectral e transmissores refletivos, visando o projeto de topologias de acesso óptico para as próximas gerações de redes PON. Estas são as configurações vastamente empregadas na literatura técnica em virtude do atrativo custo operacional oferecido pela configuração *colorless* e sementes ópticas de banda larga. Evoluções e marcos tecnológico registrados na área nos últimos 25 anos foram destacados, bem como os principais desafios técnicos e operacionais encontrados para implantação destes tipos de redes ópticas.

As premissas tecnológicas identificadas para projetos de redes multi-comprimento de onda, adotadas para este trabalho, podem ser descritas da seguinte forma:

- Emprego de transmissores *colorless* em toda a rede (desejável);
- Redes com distâncias de cobertura de longo alcance, sem custo adicional de esquemas de amplificação ou técnicas de gerenciamento de dispersão;
- Uso do mesmo comprimento de onda por enlace OLT-ONT, o qual permite a forma mais eficiente de alocação espectral;
- Utilização de formatos de codificação e formas de detecção o mais simplificado possível, e;
- Viabilidade de migração gradativa (com poucas ou nenhuma modificação na camada física) para cenários de super-capacidade (alocação das bandas S+C+L e taxas de transmissão de dados de até 10 Gb/s).

Todas as características técnicas listadas devem atender ao requisito essencial buscado em redes de acesso óptico: oferecimento de serviços de altas taxas de transmissão mantendo custo reduzido para o terminal do usuário e relação custo-benefício atrativa para as operadoras.

Neste contexto, a topologia de reuso de comprimento de onda e apagamento de portadora óptica no domínio da intensidade, com o uso de ASE fatiada e transmissores RSOA modulados diretamente, pode ser destacada como uma das topologias capazes de atender, em grande parte, aos requisitos para implantação de redes WDM-PON adotados para este trabalho.

Entretanto, no quesito alcance, a estrutura de remodulação convencional é limitada entre 20 e 30 quilômetros, em virtude das características espectrais de sinais provenientes do fatiamento espectral de fontes ASE.

O efeito de dispersão cromática é considerado como um dos principais efeitos degradantes no desempenho sistêmico deste tipo de cenário (ASE fatiada), como mostrado nos resultados preliminares apresentados no **Cap. 4.**, exigindo técnicas de compensação de dispersão cromática (mesmo para o sentido *downstream*) a fim de mitigar o impacto desses efeitos.

Em suma, os desafios técnicos encontrados no cenário fatiamento espectral de fontes BLS externas do tipo ASE e remodulação óptica no domínio da intensidade podem resumidos da seguinte forma:

1. O projeto da topologia é exclusivamente dependente das características da fonte BLS;
2. Os projetos de fontes ASE devem resultar em elementos cujas características ofereçam alta potência e espectro equalizado;
3. A necessidade de BLS compartilhada cria uma dependência para a transmissão *downstream* e *upstream*;
4. A topologia centralizada convencional não é imune à falha da BLS;
5. O uso de ASE como fonte semente propicia o impacto de vários efeitos degradantes na transmissão dos sinais (batimento ASE-ASE, efeitos de pós-filtragem e dispersão cromática);
6. O impacto do efeito dispersão cromática afeta significativamente o desempenho sistêmico na rede;
7. Torna-se necessário o uso de técnicas de compensação de dispersão, mesmo para cenários de curto alcance;
8. O alcance da rede é severamente limitado a 20 km, em virtude das características espectrais dos sinais fatiados, bem como pela dependência da geração dos sinais *upstream* para com os elementos localizados no OLT (rede

CLS), o que reflete no alto orçamento de potência demandado para esta implementação.

Tendo em vista o panorama exposto, apresentou-se nesse trabalho uma proposta original de topologia de reuso de portadora óptica, a qual combina sinais autoalimentados no OLT e remodulação óptica na ONT.

Estas características resultaram em uma nova topologia e sistema de operação para transmissores refletivos em redes WDM-PON, a qual proporciona maior alcance, maior tolerância ao impacto de dispersão cromática, efeitos de pós-filtragem, batimento ASE-ASE e redução na complexidade da rede, oferecendo uma melhor relação custo-benefício frente as topologias convencionais de reuso de portadora óptica no domínio da intensidade.

As contribuições desta tese podem ser divididas da seguinte maneira: provas de conceito e proposta da topologia para enlaces de curto alcance na ausência de remodulação optoeletrônica [75, 154], e; análises à tolerância dos impactos degradantes de sinal ASE e melhorias propiciadas pela topologia combinada frente aos sistemas convencionais apoiadas na remodulação optoeletrônica, visando topologias de longo alcance [155-156].

No quesito prova de conceito, caracterizações ópticas, caracterizações elétricas, avaliações sistêmicas unidirecionais e transmissão bidirecional em taxas simétricas de 1,25 Gb/s em alcances de 20 km foram realizadas em relação a diversos parâmetros, tais como razão de extinção *downstream*, razão de extinção *upstream*, potência de autoalimentação, potência de injeção, penalidades em potência, taxa de erro de bit, espectros ópticos e diagramas de olho.

Transmissão bidirecional, com valores de BER de 10^{-12} , foi demonstrada, permitindo um aumento de 7 dB de margem de potência em comparação com trabalhos no estado da técnica com uma penalidade máxima de 2.5 dB, sem o uso de mecanismo adicional para apagamento de portadora óptica. Adicionalmente, foi possível transmitir sinais *downstream* com razão de extinção tão baixas quanto 3,5 dB, superando em 2,5 dB de trabalhos encontrados na literatura.

Finalmente, várias discussões qualitativas foram realizadas em relação ao desempenho da topologia combinada frente as topologias de remodulação e de autoalimentação convencionais, atestando as vantagens sistêmicas e operacionais obtidas pela proposta da tese.

Na segunda parte deste estudo, foram exploradas de forma aprofundada as vantagens e desvantagens oferecidas pela topologia de remodulação combinada apoiadas nas técnicas de remodulação eletrônica, visando o projeto de redes WDM-PON de longo alcance. Adicionalmente, procurou-se estabelecer uma comparação experimental direta em termos de desempenho sistêmico com a topologia convencional (PSSL) de forma a evidenciar os ganhos e limitações decorrentes da proposta da tese.

Foi estudado o impacto dos principais efeitos degradantes no desempenho sistêmico das topologias de remodulação, entre eles efeitos de pós-filtragem, dispersão cromática e reflexões discretas em função de vários parâmetros, tais como conteúdo óptico espectral, comprimento do enlace, razão de reflexão, espectros ópticos, diagrama de olhos óptico, taxa de erro de bit e penalidades em potência

De acordo com os resultados obtidos, penalidades máxima de 2,0 dB (BER de 10^{-12}) para alcances *downstream* e bidirecional, respectivamente, de 80 km e 60 km foram obtidas pela proposta da tese, aumentando em 40 km o alcance da rede como previsto pelas provas de conceito.

Adicionalmente, análises sobre os efeitos degradantes de sinais ASE no desempenho sistêmico da topologia combinada mostram um aumento à tolerância ao impacto dos efeitos de pós-filtragem e dispersão cromática, ultrapassando o alcance dos sistemas convencionais em 40 km tanto no sentido *downstream* como na configuração bidirecional.

Em suma, as vantagens oferecidas pela proposta da tese frente aos sistemas de remodulação convencionais podem ser resumidas da seguinte forma:

1. Eliminação de BLS compartilhada;
2. Alocação espectral mais eficiente (elimina a necessidade de BLS);
3. Viabilidade de expansão para o cenário S+C+L e taxas de 10 Gb/s de forma gradativa;
4. Aumento da tolerância sistêmica ao impacto dos efeitos de pós-filtragem e dispersão cromática em virtude das características ópticas dos sinais autoalimentados;
5. RSOA da ONT depende apenas do RSOA do OLT associado;
6. Aumento da proteção da rede contra falhas;
7. Redução do consumo de energia no OLT (eliminação de BLS de alta potência);

8. Redução no custo de gerenciamento operacional.

As desvantagens oferecida pela topologia combinada são:

- 1) Estrutura CLS;
- 2) Geração do sinal de *upstream* é dependente das características do sinal de descida;
- 3) Sistema não é imune à falha do FRM.

6.1 Trabalhos Futuros

Como continuidade dessa linha de pesquisa pode-se identificar os seguintes passos:

1. Projeto de circuito eletrônico de apagamento optoeletrônico para sinais autoalimentados em intensidade: desenvolvimento de um projeto de eletrônica discreta para transmissores RSOAs OLT autoalimentados com suporte da técnica FFCI, de forma a aumentar a margem de potência de autoalimentação, garantindo a condição de compromisso entre os valores de razão de extinção e potência de autoalimentação - configuração inédita na literatura;
2. Transmissão bidirecional a 10 Gb/s: é necessário o desenvolvimento de algoritmos de processamento digital de sinais para o emprego de equalização eletrônica, levando-se em conta os efeitos de interferência intra-canal e reuso de portadora óptica. O item 1 pode ser também contemplado nessa linha de pesquisa - configuração inédita no estado da arte;
3. Geração de sinais *downstream* a partir da remodulação de sinais *upstream* no OLT – configuração inédita na literatura;
4. Reuso de portadora óptica apenas no domínio da fase - configuração inédita na literatura;
5. Projeto de circuitos eletrônicos de apagamento optoeletrônico para sinais modulados em fase - configuração inédita na literatura.

A. Técnicas de Apagamento Óptico

A Fig. A.1 ilustra esquematicamente os princípios básicos da técnica de apagamento óptico.

Figura A.1 - Princípios básicos de operação da técnica de apagamento de portadora óptica: (a) definição do nível de razão de extinção óptico; (b) apagamento de portadora óptica e; (c) reutilização da portadora óptica para geração de dados *upstream*.

A proposta original dessa técnica [68] exigia o uso de um modulador externo dedicado por ONT para o apagamento de portadora óptica, o que ocasionava custos excessivos. Adicionalmente, as perdas impostas pelo modulador sacrificavam o orçamento de potência da rede, limitando a distancia de cobêrtura.

Em 2002, uma nova técnica foi proposta por Conforti *et al.* [69] a qual explorava as características de SOAs em regime de saturação, em conjunto com um circuito eletrônico baseado em FFCI, para o apagamento de portadora. No **Apêndice A** será dado enfoque apenas nas características ópticas do SOA, sendo a técnica FFCI descrita em detalhes no **Apêndice B**.

A **Fig. A.2** mostra uma ilustração esquemática da técnica de apagamento de portadora óptica empregando SOAs em regime de saturação. Nesta configuração, o

ganho experimentado pelo nível 1 óptico do sinal é inferior ao ganho do nível zero, em virtude da propriedade de compressão de ganho intrínseca a amplificadores semicondutores operando na região de saturação. Assim, é possível apagar a informação no domínio óptico.

Figura A.2 - Apagamento de portadora empregando SOAs em regime de saturação.

Na proposta da **Fig. A.1**, 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. Logo, existe uma relação de compromisso entre a potência de injeção e ER para garantir a supressão apropriada da portadora óptica.

Através da análise da **Fig. A.2** nota-se que o apagamento de portadora óptica com o uso de SOA tem como vantagem o aumento do nível de potência óptica, uma vez que o mecanismo de supressão essencial desta técnica é o ganho do dispositivo semicondutor. Adicionalmente, é possível modular diretamente os SOAs, como demonstrado em [70-72], dispensando o uso de moduladores externos.

Entretanto, para as topologias descritas em [70-72], a eficiência do apagamento é também diretamente proporcional ao nível de razão de extinção dos dados *upstream*, tornando-se uma função de três variáveis.

Esses desenvolvimentos permitiram a redução no nível de complexidade tecnológica exigida para a implementação de ONTs refletivas, necessitando apenas a presença de um divisor de potência e um SOA em modo de reflexão para geração dos dados *upstream*.

B. Efeitos Degradantes em Topologias de Reuso e Apagamento de Portadora Óptica

Em linhas gerais, os principais efeitos degradantes presentes em sistema de reuso de portadora óptica são o ruído de sobremodulação [72-75], batimento ASE-ASE [76], dispersão cromática [77-79], efeitos de pós-filtragem [80-85], reflexões espúrias [86,87] e retroespalhamento Rayleigh. Esses efeitos são originados, basicamente, pela operação *loopback* dos sinais *upstream*, do uso de fontes ASE como sementes ópticas e do emprego da técnica de apagamento e reuso de portadora, conforme descritos a seguir.

B.1 Ruído de Sobremodulação

O ruído de sobremodulação está associado ao nível residual dos dados *downstream* contido no sinal *upstream* sobremodulados, em virtude da impossibilidade de eficiência completa no apagamento de portadora óptica, a qual estabelece uma relação de compromisso entre os níveis de razão extinção dos sinais *downstream* (*Downstream Extinction Ratio* – ER_D), nível de razão de extinção do *upstream* (*Upstream Extinction Ratio* – ER_U) e potência de injeção óptica (*Injection Power* – P_{inj}) [72-75].

Figura B.1 -Diagramas de olho para os sinais *upstream* para alguns valores de ER_D , mantendo o nível P_{inj} e ER_U em -12 dBm e 11 dB, respectivamente. Resultados obtidos em [75] pelo o autor.

Fixado os valores de potência de injeção e de ER_{UP} , quanto maior o valor de ER_D , maior será a intensidade de ruído de sobremodulação presente no sinal *upstream*. Esse comportamento está bem ilustrado nos resultados obtidos em [75] durante o desenvolvimento da tese, assim como mostra a **Fig. B.1**.

B.2 Batimento ASE-ASE

Em sistemas de amplificação óptica convencionais, constituídos de fontes ópticas com comprimento de onda bem definido, amplificador óptico (*Optical Amplifier* – OA) e um filtro óptico, é possível identificar a contribuição dos ruídos de batimento ASE-ASE e ASE-sinal presentes na fotodetecção por meio da análise espectral óptica, como mostra a ilustração esquemática da **Fig. B.2**.

Figura B.2 – Ilustração esquemática das contribuições de fontes de ruído em diferentes esquemas de amplificação: (a) sistemas convencionais e; (b) ASE fatiada e transmissores refletivos.

Em sistemas representados pela **Fig. 3.9**, o conteúdo espectral de sinais provenientes da injeção de ASE de banda estreita é definido pela função transferência

dos AWGs, uma vez que se utiliza a técnica de fatiamento espectral de fontes BLS do tipo ASE.

Em decorrência, todo o ruído ASE presente no sinal constitui-se do próprio sinal em si, tornando-se difícil a leitura individual das contribuições das fontes de ruído pela análise espectral, como mostra a **Fig. B.2**.

O batimento ASE-ASE é um efeito decorrente da distribuição aleatória do nível de intensidade na faixa de frequência das emissões espontâneas do amplificador óptico, somada à perda das correlações das componentes de alta frequência em decorrência do fatiamento espectral [76].

Os batimentos ASE-ASE das fontes BLS geram, então, perturbações no domínio do tempo em torno do valor médio do nível de potência das sementes ópticas destinadas às transmissões refletivos. Este efeito induz à variação da densidade de portadores eletrônicos na região ativa do RSOA, o que leva, então, ao acúmulo de ruído em torno dos níveis ópticos do sinal.

B.3 Dispersão Cromática (CD)

O efeito de dispersão cromática está associada às diferentes velocidades de propagação das componentes de frequência que compõe o sinal pela fibra óptica, resultando em interferência inter-simbólica (*Inter-Symbol Interference* - ISI). Este efeito é muito bem conhecido em sistemas de transmissão óptica.

Em linhas gerais, a intensidade de dispersão acumulada é diretamente proporcional ao comprimento do enlace de propagação, ao coeficiente de dispersão da fibra e à largura de filtragem óptica do AWG e à taxa de transmissão.

Embora os estudos realizados aqui estejam limitados à taxas de transmissão de 1,25 Gb/s, é fácil notar pela análise da **Fig. B.2** que o impacto de tal efeito é mais expressivo em sistemas de ASE fatiada, mesmo para distâncias de propagação de apenas algumas dezenas de quilômetros [77-79].

B.4 Efeitos de Pós-Filtragem (PFE)

Os efeitos de pós-filtragem estão associados à atenuação das componentes de alta frequência dos sinais em virtude das várias passagens pelos AWGs do sistema [80-85] (duas passagens por sentido de tráfego), ilustrado esquematicamente na **Fig. B.3**.

Essa compressão espectral é percebida no domínio do tempo como uma degradação nas transições entre os níveis ópticos dos sinais.

Este é um efeito degradante cuja fonte é proveniente das características dos sinais ASE fatiados definidos pela função transferência dos AWGs.

Figura B.3- Ilustração esquemática dos efeitos de pós-filtragem presentes em sistemas de fatiamento espectral.

B.5 Reflexões Espúrias

As reflexões espúrias tem origem na perda de retorno não nula nas conexões ópticas entre os elementos da rede. Em decorrência, uma fração do sinal *downstream*, por exemplo, pode ser refletido em direção ao receptor no OLT e somar-se aos sinais *upstream*, causando interferências ópticas na detecção.

A **Fig. B.4** ilustra esquematicamente os tipos de reflexões encontradas em sistemas de reuso de portadora óptica: reflexões tipo I (R-I) e reflexões tipo II (R-II) [86-87].

As ocorrências de reflexões R-I referem-se a uma fração do sinal óptico *downstream* refletido em direção ao receptor do OLT, a qual interfere com os dados de subida, afetando o desempenho sistêmico *upstream*. As reflexões do tipo R-II referem-se a uma fração do sinal óptico *upstream* refletido em direção a ONT. A Reflexão II pode ser ainda dividida em dois tipos: Reflexão II-A ou Reflexão II-B.

Reflexões do tipo II-A referem-se a uma fração do sinal *upstream* refletida em direção ao receptor da ONT, as quais interferem com os sinais de descida, afetando o desempenho sistêmico *downstream*, enquanto as reflexões II-B são refletidas em direção ao transmissor RSOA, interferindo na qualidade da geração dos sinais *upstream*.

O parâmetro de interesse quantitativo na análise das reflexões discretas é o

coeficiente de reflexão, ou razão de reflexão R , o qual é definido como a razão entre a potência óptica do sinal refletido (interferência) e potência óptica do sinal transmitido (*downstream* ou *upstream*). Assim, é possível medir a tolerância sistêmica ao impacto das reflexões espúrias.

Figura B.4 - Ilustração esquemática das fontes de reflexões espúrias presentes em sistemas de reuso de portadora óptica.

Somado à todos esses efeitos degradantes está a presença do retroespalhamento Rayleigh, efeito inerente a propagação de sinais em fibras ópticas, o qual afeta a transmissão bidirecional em sistemas de reuso de portadora óptica de forma similar as ocorrências de emissões espúrias.

O nível de potência acumulada do Rayleigh é diretamente proporcional as potências de lançamento dos RSOAs ONT e OLT e da metragem da fibra óptica. Logo, há uma condição de compromisso entre o nível óptico de sensibilidade do receptor, comprimento do enlace de fibra, potência de lançamento óptica dos transmissores e apagamento dos RSOAs para garantir um desempenho sistêmico satisfatório.

O impacto do efeito combinado dessas reflexões (Rayleigh e reflexões espúrias) é mais expressivo em sistemas de reuso de portadora óptica, pois os sinais de dados propagantes compartilham o mesmo comprimento de onda, diferente da configuração banda C/banda L.

Em resumo, o sentido *upstream* sofre das seguintes penalidades:

- Banda C/banda L: dispersão cromática, batimento ASE-ASE da fonte

BLS, efeitos de pós-filtragem, retroespalhamento Rayleigh e reflexões espúrias de sinais da semente banda larga para o receptor do OLT e retroespalhamento Rayleigh e reflexões espúrias do próprio sinal *upstream* que retornam ao transmissor RSOA da ONT.

- Reuso de portadora óptica: dispersão cromática, batimento ASE-ASE acumulado da fonte BLS e do sinal *downstream* semente, ruídos de sobremodulação, efeitos de pós-filtragem, retroespalhamento Rayleigh e reflexões espúrias do *downstream* para o receptor OLT e retroespalhamento Rayleigh e reflexões espúrias do próprio sinal *upstream* que retornam ao transmissor RSOA da ONT.

C. Técnicas para Mitigação dos Efeitos Degradantes de Topologias de Reuso e Apagamento de Portadora Óptica

Várias técnicas foram propostas ao longo dos anos com o intuito de mitigar o impacto destes efeitos, entre as quais o balanço dos níveis de razão de extinção [74], uso de formatos de modulação em domínios ortogonais [88-83], sementes ópticas de alta potência [94], injeção de corrente de alimentação adiante (*Feed Forward Current Injection* – FFCI) [95-101], ajuste de limiar de nível de decisão (*Decision Threshold Level Adjustment* – DTLA) [102-105] e fontes ópticas pré-fatiadas (*Pre-Spectrum-Sliced Light* - PSSSL). À seguir, será detalhada cada uma dessas técnicas.

C.1 Balanço dos Níveis de Razão de Extinção

A fim de minimizar o impacto do nível residual dos dados de descida contidos nos sinais sobremodulados e aumentar o orçamento de potência disponível na rede, valores distintos de razão de extinção podem ser empregados para ambos os sentidos, reduzindo o impacto deste efeito: uma diferença em torno de 7 dB é exigida entre os valores de razão de extinção [74] (3 dB para o *downstream* e 10 dB para o *upstream*). Entretanto, essa opção faz com que o desempenho sistêmico para o sentido *downstream* seja degradado em demasiado.

C.2 Uso de Formatos de Modulação em Domínios de Modulação Ortogonais

Alternativamente ao balanço dos níveis de ER, pode-se ainda utilizar formatos de modulação distintos para os sinais *downstream* (fase) e *upstream* (intensidade) [88-93], de forma a minimizar o ruído residual decorrente da remodulação óptica. Entretanto, tal alternativa eleva os custos de implantação e de gerenciamento operacional, em virtude do emprego semente ópticas do tipo DFB e detecção coerente para ONT.

C.3 Sementes Ópticas de Alta Potência

Uma alternativa aos métodos anteriores seria assegurar valores de potência de injeção nos RSOAs da ONT relativamente altos (superiores a -5 dBm) de modo a garantir o regime de saturação óptica do amplificador, propiciando a uma supressão eficaz do nível de razão de extinção da portadora *downstream*. Entretanto, essa condição evidentemente demanda elevado orçamento de potência na rede, limitando o alcance da tecnologia de remodulação. Para o RSOA do OLT esta opção é mais flexível, uma vez que a BLS encontra-se no OLT [94]. Essa opção leva também a redução do batimento ASE-ASE para os transmissores *downstream*, uma vez que o dispositivo encontra-se em regime de saturação.

C.4 Injeção de Corrente de Alimentação Adiante (FFCI)

A técnica FFCI foi proposta pioneiramente nos anos 2002 [69]. O objetivo da técnica é permitir um desequilíbrio nos ganhos ópticos provido pelo SOA, apoiado nas características de saturação do semicondutor, de acordo com os níveis ópticos da sequência de bits contida na portadora óptica que atinge o dispositivo: os bits de nível óptico um recebem menor ganho enquanto os bits de nível zero recebem ganho maior, reduzindo o nível de razão de extinção.

A ideia básica consiste, então, em alterar os níveis da corrente elétrica aplicadas nos terminais do SOA de forma dinâmica, a partir de uma leitura antecipada da sequência de bits contidos na portadora óptica, por meio de um arranjo elétrico acoplado ao SOA.

Esse chaveamento de alimentação de corrente produz alterações no ganho óptico do SOA de forma sincronizada à sequência de bits da portadora, propiciando um apagamento óptico mais eficiente. Em 2007 esse arranjo foi adaptado para sistemas de remodulação com RSOAs na ONT [95], sendo aprimorado entre 2009 e 2012 [95-99], o que resultou em implementações comerciais na Coreia do Sul [99-101].

O objetivo dessa nova versão era promover uma forma mais eficiente do apagamento do ruído residual *downstream* contido no nível óptico 1 do sinal de remodulação. A **Fig. C.1** mostra os detalhes da estrutura interna da técnica FFCI proposta em [95].

Nessa proposta [95], a injeção de corrente (*Current Injection* – I) no RSOA é composta por duas contribuições: a primeira parte é a fração referente a corrente de apagamento (I_1) gerada pelo conversor de sinais digital-analógico 1 (*Laser Driver* - LD), a qual está sincronizada com a sequência de bits da portadora óptica e pela nova sequência de dados *upstream* (*Upstream Data* - D_u) pela porta comparadora (AND); a segunda fração (I_2) é gerada pelo LD₂, a qual contém os dados D_u . A linha de atraso óptica e a linha de atraso elétrica asseguram o sincronismo nesse sistema.

Figura C.1 - Ilustração esquemática do diagrama de blocos da técnica FFCI, proposta em [95].

A saída elétrica do Rx UP é uma linha diferencial, onde os sinais de dados *downstream* (*Downstream Data* - D_{D+}) são direcionados para detecção, enquanto os sinais de dados *downstream* invertidos (*Inverted Downstream Data* - D_{D-}) são usados para geração da corrente I_1 .

Combinando-se a porta AND e a sequência de dados D_{D-} e D_u , o nível da corrente I_1 é gerado de tal forma que o ganho óptico do RSOA varia na direção oposta ao nível de D_{D-} , compensando a variação de potência óptica na saída do dispositivo causada pela variação de intensidade de modulação da portadora óptica.

Em termos práticos, se o valor de D_{D-} é zero, o valor absoluto de I_1 será adicionado ao nível de corrente de polarização do RSOA, promovendo o ganho óptico do sinal. Entretanto, se o valor de D_{D-} é um, o valor absoluto de I_1 será subtraído do nível de corrente de polarização do RSOA, promovendo a atenuação óptica do sinal. Finalmente, se D_u é nulo a corrente I_1 é bloqueada.

Diferentemente da proposta de FFCI por Conforti *et al* [69], aqui é necessário que o RSOA opere na região de ganho linear ao invés de região de saturação, em virtude da absorção de ganho óptico provido para os bits de nível 1 da portadora. Como vantagem, os níveis de potência óptica de injeção necessários estão compreendidos na faixa de -18 dBm à -22 dBm, o que propicia ao aumento no orçamento de potência da

rede. Valores de razão de extinção óptica máxima são de 6 dB para a portadora de *downstream*.

Cronologicamente, é neste ponto (a partir de 2007) que a fonte óptica RSOA passa a ganhar mais destaque frente aos lasers de Fabry-Pérot, pois a característica de supressão de ganho, embora também presente no laser diodo, é mais pronunciada nos dispositivos RSOAs, o que permite a uma implementação mais eficiente de esquemas de remodulação.

C.5 Ajuste de Limiar de Nível de Decisão (DTLA)

O nível óptico do bit 1 de sinais remodulados contém sempre uma intensidade maior de ruído residual do que o nível óptico do bit 0, em virtude da presença dos ruídos residuais de sobremodulação, batimento ASE-ASE, efeitos de pós-filtragem, reflexões espúrias e retroespalhamento Rayleigh.

Dependendo da intensidade de ruído em torno do nível óptico do bit 1 (ver Fig. B.1), o nível de decisão de limiar empregado comumente em 50% pode não permitir uma leitura apropriada do sinal sobremodulado que atinge o fotodetector, levando a uma degradação sistêmica. Desta forma, é desejável que o nível de decisão de limiar seja deslocado para baixo a medida que aumente a potência óptica que atinge o receptor do OLT.

Neste contexto, uma técnica complementar ao FFCI em sistemas de reuso de portadora é, então, baseada na alteração do nível de decisão de limiar para os receptores da OLT em função da potência óptica detectada. Assim, é possível alterar o posicionamento do nível de decisão de limiar como função da potência óptica que atinge o receptor, técnica denominada DTLA [102-105]. A Fig. C.2 mostra uma ilustração esquemática da técnica DTLA.

Nessa configuração, uma fração do nível de corrente gerada na detecção do sinal óptico é desviada para a leitura de potência incidente no receptor por um bloco de circuito comparador, o qual ajusta nível de tensão de limiar aplicada no amplificador limitador (*Limiting Amplifier* – LIA), seguido por um amplificador de transimpedância (*Transimpedance Amplifier* – TIA). Após o ajuste de nível de limiar, o sinal é destinado a um recuperador de sincronismo (*Clock and Data Recovery* – CDR), finalizando o processo. A referência [102] apresenta um estudo mais aprofundado do circuito comparador ilustrado na Fig. C.2.

Figura C.2 - Ilustração esquemática do diagrama de blocos do receptor com DTLA, proposta em [102]. Amp refere-se à um amplificador linear.

A combinação de ambas as técnicas FFCI e DTLA já é muito bem estabelecida, garantindo valores flexíveis tanto para o nível de razão de extinção dos sinais *downstream* quanto para o nível de potência de injeção nos transmissores *upstream*. É possível trabalhar com valores de razão de extinção *downstream* de 9 dB e potência de injeção de -24 dBm [103].

C.6 Fontes Ópticas Pré-Fatiadas (PSSL)

É possível aumentar a tolerância aos efeitos de pós-filtragem utilizando o método de pré-fatiamento espectral: a fonte ASE de banda larga é pré-fatiada por um filtro óptico cuja função de transferência possui largura de filtragem espectral inferior ao do AWG. Desta forma, as distorções no espectro dos sinais ópticos ocasionada pelas várias passagens pelos AWGs na rede são minimizadas, reduzindo o impacto do efeito de pós-filtragem.

Esse método surgiu em 2010 e foi proposto em [84-85]. A Fig. C.3 mostra uma ilustração esquemática da técnica. A fonte BLS é constituída de duas fibras dopadas com Érbio (*Erbium Doped Fiber* – EDF) alimentadas com semente óptica co-propagantes.

Uma porta de canais do *interleaver* óptico (porta par ou ímpar) é acoplado à um espelho de Faraday enquanto a porta comum é ligada ao EDFA 1. A geração da BLS se dá seguinte forma: a ASE retroespalhada do EDFA 1 é direcionada ao filtro óptico, sendo duplamente filtrada pela combinação do espelho rotacionador de faraday (*Faraday Rotator Mirror* – FRM) e *interleaver* óptico e direcionada ao EDFA 1 e EDFA 2 para amplificação co-propagante. Assim, um pente de comprimento de onda de ASE é gerado, resultando em um sinal semente com uma largura espectral inferior ao dos AWGs.

Figura C.3- Ilustração esquemática do diagrama de blocos da fonte PSSSL, redesenhada da Ref [85].

Como vantagem adicional observa-se que a densidade de potência espectral da fonte PSSSL é superior as fontes ASE usuais, em decorrência da pré-filtragem óptica realizada pelo *interleaver* óptico. Assim, os sinais sementes da PSSSL propiciam a redução do batimento ASE-ASE para os transmissores *downstream*.

D. Topologia Baseada no Compartilhamento da Banda C

Conforme discutido no **Cap. 3**, a topologia banda C compartilhada apresenta várias limitações em termos de capacidade e evolução em longo prazo, não sendo, portanto, uma topologia alvo no estado da arte em redes WDM-PON.

Entretanto, cronologicamente, esta foi a primeira configuração estudada/avaliada (em 2011) pelo autor pelas seguintes razões:

1. A abertura do subprojeto: “Redes de acesso óptico passiva de futura geração”, dentro do escopo de desenvolvimento do projeto Tecnologias Ópticas de 100 Gigabit Ethernet (100 GETH), fomentado pelo FUNTTEL/FINEP, data de 10/2010, sendo o primeiro projeto em redes WDM-PON desenvolvido na América Latina;
2. O autor inicia as atividades de experimentação em WDM-PON no CPqD em 12/2010. O conhecimento prático em redes WDM-PON foi alcançado apenas durante o desenvolvimento do projeto;
3. A técnica *self-seeding* combinada ao FRM surgiu na literatura técnica apenas em 09/2011 [119];
4. Os recursos inicialmente disponíveis (2011-2012) permitiram a implementação apenas da topologia banda C compartilhada, que serviu de plataforma de aprendizado.

Esses estudos iniciais permitiram ao autor identificar com clareza as dificuldades impostas pelo cenário ASE como fonte BLS, o que motivou a busca por novas técnicas e configurações de acesso WDM, utilizando, posteriormente, as técnicas combinadas de autoalimentação e reuso de portadora óptica.

Neste **Apêndice** são apresentados os estudos e avaliações sistêmicas da topologia banda C compartilhada no cenário acesso (20km) em taxas de 1,25 Gb/s, utilizando-se RSOAs como transmissores colorless, de forma a explorar os limites da configuração ASE de banda estreita. Procedimentos experimentais elementares, definições, características de elementos ativos/passivos utilizados nas medições são apresentados. Os trabalhos científicos obtidos decorrentes da topologia banda C compartilhada podem ser encontrados em Refs. [157-159].

O **Apêndice D** está organizado da seguinte forma: Em **D.1** apresenta-se em detalhes a topologia utilizada na investigação experimental. Na **Seção D.2** estão descritas as características de operação dos principais materiais de consumo utilizados nas experimentações. Nas seções **D.3** e **D.4** são apresentadas, respectivamente, as caracterizações e avaliações sistêmicas conduziadas nesse capítulo, finalizando com as considerações finais, na **Seção D.5**.

D.1 – Configuração Experimental

A Fig. **D.1** mostra uma ilustração esquemática do cenário experimental utilizado nas medições de caracterizações ópticas e avaliação sistêmica em taxas de 1,25 Gb/s.

Figura D.1 - Ilustração esquemática da topologia C-band *splitting* usada como investigação.

O cenário de investigação experimental proposto difere apenas da topologia original [67] por um arranjo de filtros azul/vermelho, circulador óptico e da presença de um filtro azul/vermelho em cada ONT. Foram utilizados EDFAs como fontes BLS, projetados no CPqD, com 15 dBm de potência ASE (na ausência de sinais ópticos de entrada) e 20 dBm de potência de saturação óptica, ao invés de LEDs de alta potência. ONT. Um módulo DCM foi usado no *front-end* do OLT para investigar o impacto dos efeitos de dispersão cromática nas avaliações de desempenho sistêmico.

Ambos os transmissores OLT e ONT foram diretamente modulados à taxas de 1.25 Gb/s com pulsos elétricos do tipo não retorno à zero (*Non Return-to-Zero* – NRZ), com sequências pseudo-aleatórias de bits de comprimentos iguais a $2^{23}-1$, gerados pelo MP 1800-A. Na detecção, utilizaram-se fotodetectores do tipo PIN montados em

empacotamentos SFPs. Finalmente, a saída elétrica dos fotodetectores foi analisada por um medidor de taxa de erro de bit.

D.2 Materiais Utilizados

A **Fig. D.2** mostra uma foto de alguns dos equipamentos e elementos utilizados topologia baseada na banda C compartilhada.

Figura D.2 – Foto da montagem experimental utilizada na avaliação na topologia banda C compartilhada.

Dentre os principais materiais de consumo, podem ser listados:

1. RSOAs com alta PDG (*High Polarization Dependence Gain* – HPDG), montados em empacotamento TOSA);
2. Fontes BLS baseadas em EDFAs;
3. Circulador óptico para as bandas C+L;
4. AWGs;
5. Filtro Azul/Vermelho banda C, e;
6. Módulo de compensação de dispersão (*Dispersion Compensating Module* – DCM).

No conjunto de **Figs. D.3 e D.4** e **Tabela D.1**, respectivamente, estão as imagens dos principais componentes utilizados na topologia banda C compartilhada, bem como as características de operação de cada elemento de acordo com os dados disponibilizados pelo fornecedor. A descrição e fotos dos demais elementos encontram-se no **Apêndice E**.

D.2.1 Placa de Circuito Impresso com RSOA de Alta PDG

A **Fig. D.3** mostra uma foto da placa de circuito impresso desenvolvida para operação do RSOA.

A interface do conector SMA na placa PCI permite o emprego de modulação em intensidade no domínio elétrico. Um circuito resistor-capacitor (RC), elementos os quais constituem a linha de transmissão RF da PCI, permite o controle do nível de tensão alternada aplicada aos terminais do RSOA, provenientes dos dados de modulação direta (*downstream/upstream*).

Diferentemente da maioria dos circuitos comparadores desenvolvidos visando aplicações de controle do nível de potência óptica emitida por *lasers*, por exemplo, no caso do dispositivo RSOA, a implementação deve ser feita visando o controle do nível da corrente de polarização nos terminais do dispositivo, a fim de garantir estabilidade dinâmica de operação.

Em amplificadores ópticos semicondutores, o ganho óptico é fornecido a custa de recombinação de pares de portadores eletrônicos (elétron e lacuna). 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 RSOA.

Entretanto, na presença de um sinal óptico a ser amplificado, os pares elétron-lacuna são convertidos em amplificação estimulada, reduzindo a densidade de portadores eletrônicos na cavidade do dispositivo. Desta forma, os valores de tensão contínua em nível DC devem ser corrigidos por um circuito comparador, a fim de se garantir um valor de corrente contínua fixa no material semiconductor, impedindo regimes de instabilidades dinâmicas.

Figura D.3 - Foto da placa PCI contendo o RSOA com alta dependência de ganho em relação a polarização.

Tabela D.1 - Características de operação do RSOA de alta PDG. Série: SOA-R-C-CO-FCA. Fornecedor: Fornecedor: CIP Technologies.

Características	Mínimo	Típico	Máximo
Comprimento de onda de operação	1530 nm	#	1570 nm
Ganho óptico para baixos sinais ($I = 50$ ma)	27 dB	30 dB	#
Dependência do ganho em relação a polarização	#	24 dB	30 dB
Banda elétrica	#	1,1 GHz	#
Razão de extinção óptica	3,0 dB	#	12 dB
Potência óptica de saturação	3,5 dBm	6 dBm	#

D.2.2 Fonte BLS Baseada em EDFA

O espectro de ASE da BLS cobre toda a banda C, proporcionando 15.5 dBm de potência integrada. Em virtude do perfil espectral ASE assimétrico na região de 1545 nm (**Fig. D.4**), os valores máximo de potência de injeção entregue aos RSOAs estão compreendidos entre -10 dBm e -15 dbm, dependendo do canal óptico do AWG (comprimento de onda) avaliado em questão. Tais níveis de potência semente podem ser elevados com o projeto de EDFAs de alta potência ($\sim +21$ dBm), às custas de alta complexidade no desenvolvimento dos dispositivos.

O perfil assimétrico e baixa potência integrada de ASE provenientes de EDFAs é a primeira característica apontada como dificuldade e desvantagem encontrada nos sistemas de WDM-PON empregando fontes BLS compartilhadas. O projeto dessas topologias fica estritamente condicionado as características de operação dos EDFAs em

O ganho óptico é então calculado pela diferença da leitura de potência do atenuador monitor óptico e do OSA, acrescido da perda de inserção pelo circulador (1 dB). Desta forma, é possível investigar o comportamento do ganho óptico em função de parâmetros como comprimento de onda, corrente de polarização e potência de injeção.

Figura D.5 - Ilustração esquemática do cenário utilizado nos ensaios de ganho óptico do RSOA.

D.3.1 Ganho em Função da Corrente de Polarização

Neste ensaio, 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, usando o nível de corrente DC como parâmetro principal.

O procedimento de medição foi realizado da seguinte forma: fixado o nível de potência de injeção, para determinado valor de nível de corrente contínua aplicado aos terminais do RSOA, registra-se a potência de saída no OSA e calcula-se o ganho óptico como descrito na **Seção D.3**. A **Fig. D.6** mostra as curvas de ganho óptico em função da corrente de polarização para valores fixos de potência de injeção.

Nota-se que, para valores de corrente superiores a 50 mA, o ganho óptico já está na região de saturação. O limiar de operação desses dispositivos é ligeiramente abaixo de 10 mA. É possível atingir um ganho óptico próximo a 27 dB em regime de pequenos sinais, ou seja, -20 dBm de potência de injeção.

Figura D.6 - Curvas de ganho em função da corrente contínua para diversos valores de P_{inj} .

D.3.2 Ganho em Função da Potência de Injeção

Novamente, o comprimento de onda de operação foi mantido em 1545 nm. Este ensaio foi realizado para três níveis fixos de corrente de polarização: 20 mA, 30 mA e 40 mA, usando a quantidade P_{inj} como parâmetro principal. Tipicamente, a faixa de -10 dBm a -20 dBm compreende aos níveis de potência de injeção na maioria dos sistemas WDM-PON. Os resultados extraídos estão mostrados na Fig. D.7.

Figura D.7 - Curvas de ganho vs P_{inj} para diversos valores fixos de corrente.

O procedimento de medição foi realizado da seguinte forma: escolhendo-se o valor de nível DC, a potência de injeção no RSOA foi variada com o auxílio do atenuador monitor. Registram-se, então, os valores de potência de saída na tela do OSA em função da potência de entrada pelo atenuador óptico monitor e calcula-se o ganho.

Nota-se que, nesta região de potência de injeção, o ganho óptico do RSOA possui comportamento linear, ou seja, o dispositivo opera na região de saturação para valores superiores a -20 dBm. Essa é uma das características favoráveis em RSOAs HPDG para os cenários de apagamento de portadora e autoalimentação, embora os valores de PDG de 24 dB limitem o emprego da técnica proposta na tese.

D.3.3 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 comprimento de onda da banda C, dois cenários foram estudados:

1. medição do espectro de ganho óptico para 3 níveis de potência de injeção (-20 dBm, -15 dBm e -10 dBm) e um valor de corrente de polarização fixo em 25 mA;
2. medição do espectro de ganho óptico para 3 níveis de corrente de polarização (25 mA, 35 mA e 45 mA) e um valor de potência de injeção fixo em -15 dBm.

Figura D.8 - Ganho óptico em função do comprimento de onda para alguns valores de potência de injeção, mantendo o valor de corrente contínua fixado em 25 mA.

Os resultados obtidos nos cenários 1. e 2. estão representados nas **Figs. D.8 e D.9**, respectivamente. Nota-se que o perfil de ganho óptico RSOAs é aproximadamente plano na região da banda C. Para valores de corrente de polarização de 35 mA, é possível obter um ganho de, pelo menos, 19 dB na região entre 1530 e 1540 nm e superior a 20 dB nas demais regiões para um potência de injeção de -15 dBm, resultando em uma potência de saída de 4 dBm no pior dos cenários. Desta forma, estes RSOAs são capazes de oferecer uma alta potência óptica de saída e um espectro equalizado em toda banda C.

As características de ganho e potência de saída óptica dos RSOAs fornecem um indicativo do orçamento de potência disponível na rede em função de diversos parâmetros (corrente, potência de injeção e comprimento de onda).

Entretanto, uma análise mais profunda destes parâmetros e de orçamento de potência demandado é determinada pelas avaliações sistêmicas de taxa de erro de bit, pois este parâmetro determina a qualidade do desempenho óptico dos transmissores. Nas próximas seções serão apresentados os resultados sistêmicos obtidos em taxas de 1,25 Gb/s.

Figura D.9 - Ganho óptico em função do comprimento de onda para alguns valores de corrente contínua, mantendo o valor de potência de injeção fixado em -15 dBm.

D.4 Avaliações Sistêmicas

D.4.1 Condição Transmissor-Receptor Face a Face (*Back-to-Back*)

A condição transmissor-receptor face a face (*Back-to-Back* - BtB ou B2B) é definida a partir da montagem de um arranjo constituído apenas do transmissor óptico, do receptor e de um atenuador óptico variável entre estes, na ausência de qualquer enlace de fibra óptica.

Em linhas gerais, pode ser dito que a condição B2B avalia a sensibilidade/qualidade de transmissão no formato de modulação utilizado, uma vez que os efeitos dispersivos induzidos pela fibra podem ser desprezados. Desta forma, muitas vezes a condição BtB é utilizada como ferramenta para calibração e otimização dos parâmetros do transmissor.

Este é o primeiro procedimento experimental adotado em qualquer avaliação sistêmica, pois os resultados extraídos na condição BtB são usados como referência para cálculos de penalidades na presença de efeitos degradantes induzidas pelos enlaces de fibra óptica. Assim, os estudos iniciam-se com essa primeira configuração.

A **Fig. D.10** mostra uma ilustração esquemática do cenário BtB em sistemas de ASE de banda estreita. Nessa configuração, a definição de transmissor óptico é o elemento de transmissão constituído do RSOA, AWG e fonte de BLS (nesse caso um EDFA na banda C), em virtude do uso de semente óptica e transmissores em modo de reflexão.

Um atenuador óptico variável é inserido entre o braço do AWG e do receptor, de forma a controlar o nível de potência óptica recebida pelo detector do MP1800A. Assim, gráficos de BER em função da potência óptica detectada e sensibilidades são extraídos dessas avaliações. Neste cenário, a corrente contínua dos HPDG RSOAs foram fixadas em 25 mA, de forma a otimizar o desempenho sistêmico.

Para as medições de BER, foi definido nesse estudo a região de livre de erros para valores de taxa de erro de bit inferiores à 10^{-12} . Nas medições de desempenho de BER para a condição B2B, quatro canais do AWG foram selecionados de forma a cobrir simetricamente a banda C: 1530.33 nm, 1540.55 nm, 1550.90 nm e 1558.92 nm. Assim, computou-se um valor médio dessas 4 medições. Tomando-se como referência o valor

de BER de 10^{-12} , a sensibilidade em potência medida foi de -24 dBm, conforme esperado, para detecção em taxas de 1,25 Gb/s.

Figura D.10 - Cenário usado na configuração *back-to-back*.

D.4.2 Transmissão Unidirecional

Após as medições B2B, um enlace de 20 km de fibra alimentadora foi inserido entre o OLT e o RN, mantendo a configuração da **Fig. D.10**, entretanto, sem a presença do módulo compensador DCM, de forma a avaliar o impacto dos efeitos degradantes causados pela inserção da fibra óptica.

Em virtude da indisponibilidade do conjunto completo de AWGs e filtros azul/vermelho na época das medições, foi realizada apenas a transmissão unidirecional em cada sentido, *downstream* e *upstream*, de forma separada. O conjunto dos quatro comprimentos de onda descritos simulam os canais localizados nos extremos da banda passante do filtro azul/vermelho. Desta forma, ora utilizou-se esse conjunto para medições do sentido *downstream* e ora para o *upstream*.

O primeiro procedimento de medição é tomado avaliando-se o desempenho dos sinais *downstream*. Embora as penalidades para este sentido de tráfego não sejam tão impactantes como para o *upstream*, as medições de BER do sentido de descida é o primeiro indicativo sobre o nível de transmissão da topologia de ASE-fatiada implementada.

Os mesmos conjuntos de canais utilizados na condição B2B foram mantidos para as medições no sentido *downstream*. Nestes ensaios, o nível de potência de injeção foi fixado em -10 dBm. A **Fig. D.11** mostra os resultados dessa avaliação.

Figura D.11 - Avaliação de desempenho para os canais do sentido *downstream* em 20 km de enlace de fibra alimentadora.

Por meio da análise da **Fig. D.11**, pode-se observar a existência de um evidente comportamento de patamar de erro (*floor*) no desempenho sistêmico, limitando os valores de BER entre taxas de 10^{-10} e 10^{-8} . O efeito de dispersão cromática é um forte candidato responsável por esta degradação, uma vez que apenas um enlace de fibra óptica de poucos quilômetros (20 km) foi a única modificação em relação ao B2B.

Com o intuito de investigar o impacto do efeito de dispersão cromática no sistema, foi utilizado, então, o módulo DCM com coeficiente de compensação de 340 ps/nm no *front-end* do OLT, de forma a compensar 170 ps de dispersão (20 km) no sentido *downstream*. A perda de atenuação produzida pelo módulo é de até 2 dB.

Nesta medição, foi escolhido o canal 1558,92 nm para análise. A **Fig. D.12** mostra a comparação entre os resultados de BER do sinal *downstream* antes e após a presença do DCM.

Figura D.12 - Comparação de BER para o canal 1558,92 nm sem compensação e após compensação de dispersão.

Com a utilização do módulo DCM, foi registrado um valor de sensibilidade de aproximadamente -22,5 dBm para um valor de BER de 10^{-12} , com uma penalidade de apenas 1 dB em relação a configuração B2B.

Observa-se claramente que a compensação de dispersão reduz, de forma eficiente, os efeitos degradantes ocasionados pelo enlace de fibra óptica, comprovando o impacto da dispersão cromática em sistemas de ASE de banda estreita em decorrência das características ópticas de sinais originados do fatiamento espectral de BLS (0,5 nm de largura espectral). A **Fig. D.13** mostra os resultados de BER para os 4 canais *downstream* após a compensação de DCM, dando suporte a discussão.

Esse efeito degradante é muito bem conhecido e foi reportado em [77,-79, 98]. Essa é a segunda característica que limita os cenários de ASE banda estreita, pois, mesmo para enlaces de poucos quilômetros, é necessário o emprego de técnicas de compensação de dispersão cromática, mesmo para o sentido *downstream*.

Esse impacto pode ser minimizado com o uso de altos valores de potência de injeção [94] nos RSOAs do OLT. Entretanto, tal artifício requer EDFAs/fontes BLS de alta potência, refletindo em custos excessivos e altos níveis de consumo de potência, o que é indesejável para redes de acesso óptico.

Figura D.13 - Desempenho de BER após compensação de dispersão para os 4 canais *downstream*.

O próximo passo foi avaliar o sentido *upstream*. O nível de potência da semente óptica que atinge os RSOAs localizados na ONT é sempre menor do que os RSOAs do OLT, em virtude de um acréscimo de perdas igual a 8 dB causadas pela presença do módulo DCM, enlace de fibra óptica, e filtro WDM de bandas. Desta forma, o nível de potência de injeção máximo disponível medido foi de -18 dBm. A **Fig. D.14** mostra os resultados.

Utilizando-se a compensação de dispersão para o sentido *upstream*, é possível atingir valores de BER de 10^{-12} com penalidades de no máximo 1 dB, entretanto, sem nenhuma margem adicional de potência para semente óptica. Para valores de P_{inj} inferiores a -20 dBm são observadas tendências de *floor* em BER de 10^{-6} .

Essa é a terceira característica limitante em sistemas de ASE-fatiada, pois os valores de perdas impostos pelo fatiamento espectral e módulos DCMs, necessários para compensação de dispersão, limitam em demasia o alcance desse tipo de sistema. A menos que esquemas de amplificação óptica ou sementes BLS de alta potência sejam utilizadas, é impossível aumentar o alcance no cenário banda C compartilhada. Estas argumentações estão apoiadas em um estudo complementar realizado pelo autor, considerando esquemas de amplificação [158-159].

Figura D.14 - Desempenho de BER após compensação de dispersão para os 4 canais upstream.

Como nota final, o cenário remodulação foi testado em condição semelhante aquela ilustrada pela **Fig.3.9**. Entretanto, na ausência dos mecanismos de remodulação eletrônica, foi alcançado BER de 10^{-12} apenas na condição B2B, o que levou à busca de outros métodos para implementação da topologia de reuso de portadora óptica.

D.5 Considerações Finais

Em suma, neste capítulo foram apresentados os elementos ativos/passivos utilizados nos ensaios, procedimentos experimentais elementares em redes WDM-PON refletivas e limitantes encontrados no cenário banda C compartilhada.

Os desafios técnicos encontrados no cenário de fatiamento espectral de ASE fatiada podem resumidos da seguinte forma:

1. Projeto da topologia é exclusivamente dependente das características dos EDFAs;
2. Projetos de EDFAs devem resultar em características que ofereçam alta potência e espectro equalizado;
3. O impacto do efeito dispersão cromática afeta significativamente o desempenho sistêmico na rede;
4. Técnicas de compensação de dispersão são necessárias, mesmo para cenários de curto alcance;

5. Altas perdas causadas pelo fatiamento espectral de fontes ASE e módulos de compensação;
6. Nível de potência ASE limitado para os transmissores upstream;
7. Alcance da rede limitado a 20 km;
8. Para cenários de longo alcance, formas de amplificação ou semente ASE de alta potência são necessárias. Entretanto, tais configurações elevam o nível de complexidade dos elementos da rede.

As características listadas são muito bem conhecidas na literatura técnica. No nível de estado da arte em sistemas de ASE-fatiadas, a topologia de remodulação óptica é a opção mais valorizada por atender aos vários critérios expostos na introdução. Entretanto, esses resultados preliminares foram apresentados de forma a evidenciar as dificuldades encontradas no cenário de fatiamento espectral, o que levou, posteriormente, a busca de alternativas simplificadas e alta capacidade agregada para o acesso óptico em WDM.

E. Descrição dos Materiais e Equipamentos Utilizados nas Avaliações Experimentais

O conteúdo de avaliações experimentais desenvolvidas na tese foi organizado e distribuído entre os Caps. 4, 5 e Apêndice D. O conjunto de materiais de consumo básico e instrumentos de análise foram mantidos em todas as medições, dentre eles: fontes de tensão contínua controlada de até 48 V, fonte de corrente contínua controlada de até 3A, gerador de sinais e analisador de qualidade MP 1800-A para taxas de até 12,5 Gb/s com saída diferencial elétrica SMA, analisador de espectro óptico (*Optical Spectrum Analyser* - OSA) da marca Anritsu MS9740A, placas de circuito impresso com interface SFP e saída elétrica única para detecção dos sinais ópticos modulados, medidores de potência óptica, atenuadores ópticos variáveis, atenuadores fixos, carretéis de fibras, circuladores ópticos e AWGs.

Nas Figs. E.1 e E2, e nas Tabelas E.1 e E.2, respectivamente, estão as imagens e características ópticas de operação dos AWGs e circuladores utilizados em todas as avaliações experimentais. Nas próximas seções estão apresentados os equipamentos e materiais de consumo exclusivos à cada topologia estudada.

Figura E.1 - Foto do AWG com 40 canais e espaçamento de 100 GHz.

Tabela E.1 - Características de operação do AWG 40 canais. Número de série: AWG-F-100G-40-002-C-D-JH. Fornecedor: Pointek.

Características	Mínimo	Típico	Máximo
Comprimento de onda de operação	1529,55 nm	#	1560.60 nm
Perda de inserção	4,5 dB	#	5,5 dB
Perda dependente da polarização			0,5 dB
Espaçamento intercanais	#	100 GHz	#
Banda passante à 1 dB de perda	#	0,40 nm	#
Banda passante à 3 dB de perda	#	0,55 nm	#
Isolação intercanais (canais adjacentes)	-25 dB	#	#
Isolação intercanais (canais não adjacentes)	-30 dB	#	#
Perda de retorno óptica	-40 dB	#	#
Faixa de temperatura de operação	-5°C		65°C
Desvio máximo do comprimento de onda central em relação a temperatura	#	#	50 pm
Dispersão Cromática	#	#	<10 ps/nm

Figura E.2- Foto do circulator óptico 3 portas bandas C+L.

Tabela E.2 - Características de operação circulator óptico 3 portas bandas C+L. Número de série: PIOC-3-CL-A-2-1-6. Fornecedor: AC Photonics.

Características	Mínimo	Típico	Máximo
Comprimento de onda de operação	1525 nm	#	1615 nm
Perda de inserção	1,0 dB	#	1,1 dB
Perda dependente da polarização	#		<0,15 dB
Isolação (entre portas 2-1 e portas 3-2)	40 dB	#	#
Isolação interportas	50 dB	#	#
Perda de retorno óptica	>50 dB	#	#
Faixa de temperatura de operação	0°C		70°C

E.1 Compartilhamento da Banda C

A **Fig. E.3** mostra parte dos equipamentos e elementos presentes no LSMO, utilizados na topologia baseada no compartilhamento da banda C.

Dentre os equipamentos e alguns componentes disponíveis utilizados nesses ensaios ópticos, podem ser descritos os seguintes materiais: fontes de tensão contínua controlada de até 48 V, fonte de corrente contínua controlada de até 3A, gerador de sinais e analisador de qualidade MP 1800-A para taxas de até 12,5 Gb/s com saída diferencial elétrica SMA, analisador de espectro óptico (*Optical Spectrum Analyser - OSA*) da marca Anritsu MS9740A, placas de circuito impresso com interface SFP e saída elétrica única para detecção dos sinais ópticos modulados, medidores de potência óptica, atenuadores ópticos variáveis, atenuadores fixos, carretéis de fibras, circuladores ópticos e AWGs,

Figura E.3 - Alguns dos elementos eletrônicos utilizados no cenário de teste banda C compartilhada: (a) fontes BLS do tipo EDFA compacto, projetados no CPqD; (b) gerador de sinais MP 1800-A; (c) placa de circuito impresso com interface SFP para detecção dos sinais ópticos e; d) OSA Anritsu MS9740A.

Nas Figs. **E.4**, **E.5** e nas Tabelas **E.3**, **E.4**, respectivamente, estão as imagens e características ópticas de operação dos principais componentes utilizados na topologia banda C compartilhada.

Figura E.4 - Foto do filtro Azul/Vermelho banda C. Número de série: MWDMGCR/CB. Fornecedor: Oplink.

Tabela E.3 - Características de operação filtro Azul/Vermelho banda C. Numero de série: MWDMG – C – R – O – O – O – 22 – 1 – 9. Fornecedor: Oplink.

Características	Mínimo	Típico	Máximo
Comprimento de onda de operação, banda vermelha	1547,40 nm	#	1561,00 nm
Comprimento de onda de operação, banda azul.	1530,00 nm	#	1543.20 nm
Perda de inserção	#	#	0,8 dB
Perda dependente da polarização	#		<0,10 dB
Isolação interbandas	30 dB	#	#
Perda de retorno óptica	>50 dB	#	#
Faixa de temperatura de operação	0°C		70°C

Figura E.5 – Foto do módulo DCM para compensação de dispersão em enlaces de 20 km (340 ps/nm).

Tabela E.4 - Características de operação Módulo DCM. Numero de Série: SMFDK-S-020-06-10. Fornecedor: OFS, A Furukawa Company.

Características	Mínimo	Típico	Máximo
Comprimento de onda de operação	1528 nm	#	1565 nm
Perda de inserção	1,1 dB	1,6 dB	2,2 dB
Perda dependente do comprimento de onda	#	0,4 dB	#
Perda dependente da polarização	40 dB	0,14 dB	0,3 dB
Potência óptica máxima de lançamento	>50 dB	#	23 dBm
Faixa de temperatura de operação	-5°C		70°C

E.2 Técnicas Combinadas de Autoalimentação e Reuso de Comprimento de Onda

A **Fig. E.6** mostra parte dos equipamentos e elementos presentes no LSMO, utilizados nos cenário da topologia combinada.

Figura E.6 - Alguns dos elementos eletrônicos e passivos utilizados no sistema de autoalimentação proposto: (a) AWG *Pointek*; (b) bastidor com placas PCIs; (c) placa PCI com interface SFP para detecção; (d) EDFA com controle automático de ganho; (e) circulador óptico e; (f) acoplador de potência 10/90 e FRM.

Dentre os equipamentos e alguns componentes disponíveis utilizados nesses ensaios ópticos, podem ser descritos os seguintes materiais: fontes de tensão contínua controlada de até 48 V, fonte de corrente contínua controlada de até 3A, EDFAs com

controle automático de ganho e 19 dBm de potência de saída (projetados no CPqD), osciloscópio Agilent Infiniium DCA-J 86100 C com taxas de amostragem de até 20 Gb/s, gerador de sinais e analisador de qualidade MP 1800-A para taxas de até 12,5 Gb/s com saída diferencial SMA, placas de circuito impresso com entrada SMA única, analisador de espectro óptico da marca Anritsu MS9740A, medidores de potência óptica, atenuadores ópticos variáveis, atenuadores fixos, circuladores ópticos e AWGs.

Nas tabelas E.5 e E.6, e Figs. E.7, E.8 e E.9 estão, respectivamente, listadas algumas das características de operação, de acordo com os dados disponibilizados pelo fornecedor, e imagens dos principais componentes utilizados no cenário de autoalimentação.

E.2.1 Placa de Circuito Impresso com RSOA de Baixa PDG

Figura E.7 - Foto da placa PCI contendo o RSOA com baixa dependência de ganho em relação a polarização.

Tabela E.5 - Características de operação do RSOA com baixa PDG. Número de série: SOA-RL-C-CO-FCA. Fornecedor: CIP Technologies.

Características	Mínimo	Típico	Máximo
Comprimento de onda de operação	1530 nm	#	1570 nm
Ganho óptico para pequenos sinais ($I = 80$ ma)	#	#	23 dB
Dependência do ganho em relação a polarização	#	1 dB	2 dB
Banda elétrica	#	1,1 GHz	#
Razão de extinção óptica	3,0 dB	#	12 dB
Potência óptica de saturação	2,5 dBm	5 dBm	#

Figura E.8 - Espectros ópticos de emissão dos RSOAs LPDG obtidos na tela do OSA para dois valores de corrente contínua: (a) 60 mA e; (b) 90 mA. A resolução foi mantida em 0,03 nm.

E.2.2 Espelho de Faraday

Figura E.9 - Foto do espelho de Faraday utilizado no circuito de autoalimentação.

Tabela E.6 – Características de operação do espelho de Faraday. Número de série: FMR – 1550-1-0-5. 5x 35mm – SC/APCx1. Fornecedor: Optosun.

Características	Especificado	Dados de testes
Comprimento de onda central	1550 nm	1550 nm
Largura de banda	30 nm	30 nm
Perda máxima de inserção	0,90 dB	0,52 dB
Perda dependente da polarização	0,05 dB	0,02 dB
Potência óptica máxima	500 mW	500 mW

E.3 Técnicas Combinadas de Autoalimentação e Reuso de Comprimento de Onda, Apoiadas em Remodulação Optoeletrônica

A **Fig. E.10** mostra parte dos equipamentos e elementos presentes no LSMO, utilizados nos cenários da topologia combinada, apoiada em remodulação optoeletrônica.

Dentre os equipamentos e alguns materiais de consumo disponíveis utilizados nesses ensaios, podem ser descritos: fontes de tensão contínua controlada de até 48 V, fonte de corrente contínua controlada de até 3A, EDFA com controle automático de ganho com potência de saturação de 19 dBm (projetado no CPqD), osciloscópio Agilent Infiniium DCA-J 86100 C com taxas de amostragem de até 20 Gb/s, gerador de sinais e analisador de qualidade MP 1800-A para taxas de até 12,5 Gb/s, placas de avaliação (*evaluation boards*) de módulos SFPs com saída e entrada diferencial elétrica com interface SMA, analisador de espectro óptico da marca Anritsu MS9740A, conjunto de

carretéis de fibra de 10, 20, 30 40 e 50 km, medidores de potência óptica, atenuadores ópticos variáveis, atenuadores fixos, circuladores ópticos e AWGs.

Figura E.10 - Alguns dos elementos eletrônicos e passivos utilizados no cenário de teste de remodelação: (a) placa de avaliação SFP Fujitsu; (b) placa de avaliação SFP desenvolvida no CPqD; (c) EDFA com controle automático de ganho; (d) acoplador de potência 10/90 e FRM e; e) circulador óptico.

No conjunto de Tabelas **E.7**, **E.8**, **E.9** e **E.10** e Figs **E.11**, **E.12**, **E.13** e **E.14**, respectivamente, estão listadas algumas das características de operação e imagens dos principais componentes utilizados no cenário remodelação.

Tabela E.7 - Características de operação do RSOA da ONT, incorporando o mecanismo FFCI. Número de série: MR0P0C0G12S2OTF4. Fornecedor: Mel Inc.

Características	Mínimo	Máximo
Potência óptica de saída	- 2 dBm	2 dBm
Razão de extinção óptica	9 dB	11 dB
Potência óptica de injeção	-15 dBm	#
Largura de banda de amplificação	30 nm	#
Comprimento de onda de operação	1532 nm	1558 nm
Sensibilidade do receptor	#	- 28 dBm (BER de 10^{-12})

Figura E.11 - Imagem do SFP ONT com FFCI e espectro óptico de emissão obtido na tela do OSA. A resolução foi mantida em 0,03 nm.

Figura E.12 - Imagem do SFP OLT com DTLA e espectro óptico de emissão obtido na tela do OSA. A resolução foi mantida em 0,03 nm.

Tabela E.8 - Características de operação do RSOA do OLT, incorporando o mecanismo DTLA. Número de serie: MR0P0C0G12S2BTS4. Fornecedor: Mel Inc.

Características	Mínimo	Máximo
Potência óptica de saída	5 dBm	7 dBm
Razão de extinção óptica	5 dB	7 dB
Potência óptica de injeção	-3 dBm	0 dBm
Largura de banda de amplificação	30 nm	#
Comprimento de onda de operação	1532 nm	1558 nm
Sensibilidade do receptor	#	- 32 dBm (BER de 10^{-12})

Figura E.13 - Imagem da estrutura interna da fonte PSSS e espectro óptico de emissão obtido na tela do OSA. A resolução foi mantida em 0,03 nm.

Tabela E.9 - Características de operação da fonte pré-fatiada. Número de serie: MEDF0C1G3220BTX1. Fornecedor: Mel Inc.

Características	Mínimo	Máximo
Potência óptica total	19,5 dBm	21 dBm
Potência óptica por canal	3,5 dBm	5 dBm
“Planicidade”	#	2,5 dB
Comprimento de onda de operação	1532 nm	1558.173 nm
Espaçamento entre canais	#	100 GHz

Figura E.14 - Imagem do acoplador 80x20 usado juntamente com o SFP ONT. Os cordões vermelho (terminação em ângulo) e azul conectam, respectivamente, o transmissor RSOA e o receptor do SFP ONT ao acoplador 80/20.

Tabela E.10 - Características de operação do acoplador 80/20. Número de serie: M-MPS30-PL30-L. Fornecedor: Mel Inc.

Características	Mínimo	Máximo
Comprimento de onda de operação	1510 nm	1590 nm
Razão de acoplamento - sinal sentido Tx ONT	70%	80%
Razão de acoplamento - sinal sentido Rx ONT	20%	30%
Perda de inserção - sinal sentido Tx da ONT	1,3 dB	2,0 dB
Perda de inserção – sinal sentido Rx ONT	6,0 dB	8,0 dB

O cordão vermelho do acoplador é projetado com um caminho óptico maior que o cordão azul, de forma a criar a linha de atraso óptica necessária para o emprego da técnica de injeção de correção de corrente para frente (FFCI), conforme descrito em [69, 95].

Referências Bibliográficas

- [1] N. J. Frigo *et al.*, “A Wavelength-Division multiplexed passive optical network with cost-shared components”, *IEEE Photonics Technology Letters*, **6**, No. 11, pp.1365-1367 (1994).
- [2] Recomendações ITU-T, “Transmission systems and media, digital systems and networks”, disponível em <https://www.itu.int/rec/T-REC-G/en>, acesso em 07/08/2014.
- [3] Recomendação ITU-T G.983.1, “Broadband optical access systems based on passive optical networks (PON): general characteristics”, disponível em <file:///C:/Users/uli/Downloads/T-REC-G.983.1-199810-S!!PDF-E.pdf>, acesso em 07/08/2014.
- [4] Recomendação ITU-T G.983.2, “ONT management and control interface specification for BPON”, disponível em <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.983.2-200507-I/en>, acesso em 07/08/2014.
- [5] Recomendação ITU-T G.983.3, “A broadband optical access system with increased service capability by wavelength allocation”, disponível em <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.983.3/en>, acesso em 07/08/2014.
- [6] Recomendação ITU-T G.983.4, “A broadband optical access system with increased service capability using dynamic bandwidth assignment”, disponível em <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.983.4/en>, acesso em 07/08/2014.
- [7] Recomendação ITU-T G.983.5, “A broadband optical access system with enhanced survivability”, disponível em <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.983.5/en>, acesso em 07/08/2014.
- [8] Recomendação IEEE 802.3ah, “Part 3: Carrier sense multiple access with collision detection (CSMA/CD) access method and physical layer specifications”, disponível em http://www.ieee802.org/21/doctree/2006_Meeting_Docs/200611_meeting_docs/802.3ah-2004.pdf, acesso em 07/08/2014.
- [9] Recomendação ITUT G.984.1, “Gigabit-capable passive optical networks (G-PON): General characteristics”, disponível em <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.984.1/en>, acesso em 07/08/2014.
- [10] Recomendação ITU-T G.987.1, “10-Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): General requirements”, disponível em <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.987.1/en>, acesso em 07/08/2014.
- [11] S. S. Wagner, e H. L. Lemberg, “Technology and systems issues for a WDM-based fiber loop architecture”, *IEEE Journal of Lightwave Technology*, **7**, No. 11, pp. 1759-1768, (1989).
- [12] Recomendação ITU-T G.984.2, “Gigabit-capable passive optical networks (G-PON): Physical media dependent (PMD) layer specification”, disponível em <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.984.2/en>,

- [13] Recomendação ITU-T G.984.3, “*Gigabit-capable passive optical networks (G-PON): Transmission convergence layer specification*”, disponível em <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.984.3/en>, acesso em 07/08/2014.
- [14] Recomendação ITU-T G.984.4, “*Gigabit-capable passive optical networks (G-PON): ONT management and control interface specification*”, <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.984.4/en>, acesso em 07/08/2014.
- [15] Recomendação ITU-T G.984.5, “*Gigabit-capable Passive Optical Networks (G-PON): Enhancement band*”, <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.984.5/en>, acesso em 07/08/2014.
- [16] Recomendação ITU-T G.984.6, “*Gigabit-capable passive optical networks (G-PON): Reach extension*” disponível em <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.984.6/en>, acesso em 07/08/2014.
- [17] Recomendação ITU-T G.984.7, “*Gigabit-capable passive optical networks (G-PON): Long reach*” disponível em <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.984.6/en>, acesso em 07/08/2014.
- [18] T. Pfeiffer, “*Enhancing PON capabilities using the wavelength domain*”, *Join ITU-T/IEEE Workshop on Next Generation Optical Access Systems*, Geneva, Switzerland, 2008.
- [19] P. Solina, “*European PON Deployments: A Carrier view of the technical, regulatory, and economic Challenges*”, *European Congress in Optical Communication*, Anais do ECOC 2010, paper **We.8.B.1**, (2010).
- [20] R. S. Penze, J. B. Rosolem, U. R. Duarte, e Baldini Filho, “*Passive optical network upgrading by using in-band WDM overlay*”, *SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference*, Anais do IMOC 2011, (2011).
- [21] R. S. Penze, J. B. Rosolem, e R. B. Filho, “*Upgrading and extending PON by using in-band WDM overlay*”, *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, **11**, No. 1, pp. 15 – 25, (2012).
- [22] Recomendação ITU-T G.987.2, “*10-Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): Physical media dependent (PMD) layer specification*”, disponível em <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.987.2/en>, acesso em 08/08/2014.
- [23] Recomendação ITU-T G.987.3, “*10-Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): Transmission convergence (TC) layer specification*”, disponível em <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.987.3/en>, acesso em 08/08/2014.
- [24] Recomendação ITU-T G.987.4, “*10-Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): Reach extension*”, disponível em <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.987.4/en>, acesso em 08/08/2014.
- [25] J. B. Rosolem, G. E. R. de Paiva, and U. R. Duarte, “*R-SOA Based extender for XG-PON/G-PON applications*,” *Optical Fiber Conference*, Anais do OFC 2012, paper **OM3I.3.**, (2012).

- [26] Zhu, D. Au, F. Khan, e Y. Li, “Coexistence of 10G-PON and G-PON reach extension to 50-km with entirely passive fiber plant,” *European Conference Optical Communication*, Anais do ECOC, paper **Th.13.B.5**, (2011).
- [27] Apresentação Huawei, “Four candidate NG-EPON Solutions”, disponível em http://www.ieee802.org/3/ad_hoc/ngepon/public/jan14/remein_ngepon_01_0114.pdf, acesso em 08/08/2014.
- [28] Ed Harstead, “Diverging applications for PON technologies, and future technology trends”, *Access Networks and In-house Communications*, Anais do ANIC 2012, paper **AW2A.4**, (2012).
- [29] D. V. Veen *et al.*, “Options for TDM PON beyond 10G”, *Access Networks and In-house Communications*, Anais do ANIC 2012, paper **AW2A.1**, (2012).
- [30] Recomendação ITU-T G.989.1, “40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): General requirements”, disponível em <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.989.1/en>, acesso em 08/08/2014.
- [31] N. Cvijetic, D. Qian, J. Hu, e T. Wang, “44-Gb/s/ upstream OFDMA-PON transmission with polarization-insensitive source-free ONUs”, *Optical Fiber Conference*, Anais do OFC 2010, Paper **OtuO2**, (2010).
- [32] C. Guo, e L. Dai, “A Long reach IM/DD OFDM-PON using super-Nyquist image induced aliasing and code-division multiplexing”, *Optical Fiber Conference*, Anais do OFC 2014, paper **Tu2F.3**, (2014).
- [33] J. v. H.-Huene, H. Griesser, M. H. Eiselt, C. Ruprecht e W. Rosenkranz, “Comparison of Rx-DSP-structures in experimental OFDMA-PON uplink transmission system”, *Optical Fiber Conference*, Anais do OFC 2014, paper **Tu2F.4.**, (2014).
- [34] E. Darcie, *et al.*, “Multichannel bidirectional 1.44 Gb/s lightwave distribution system using subcarrier multiplexing,” *Optical Fiber Conference*, Anais do OFC 1998, Paper PD22, (1998).
- [35] N. Cvijetic, “The “five W’s” of OFDM for optical access: What, why, where, when and how?” *Access Networks and In-house Communications*, Anais do ANIC 2011, Paper **AMC1**, (2011).
- [36] M. Presi, G. Cossu, R. Corsini, F. Bottoni, E. Ciaramella, “A Low-Cost coherent PON”, *European Conference Optical Communication*, Anais do ECOC 2013, paper **We.3.F.5**, (2013).
- [37] S. Straullu, S. Abrate, F. Forghieri, V. Ferrero, e 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*, Anais do ECOC 2012, paper **Th.3.D.6**, (2012).
- [38] H. Shim, K. Y.Cho, U. H. Hong, e 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*, Anais do OFC 2013, paper **OW1A.6**, (2013).

- [39] K. Y. Cho *et al.*, “Long-reach (80km) 10-Gb/s RSOA-based WDM PON employing QPSK signal and coherent receiver”, *Optics Express*, **20**, No. 14, pp. 15353-15358, (2012).
- [40] 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*, Anais do OFC 2011, paper **OTuB**, (2011).
- [41] 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” *Optics Express*, **18**, No. 14, pp. 14871-14877, (2010).
- [42] 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*, Anais do OFC 2013, paper **NTh4F.1**, (2013).
- [43] M. H. Reeve, A. R. Hunwicks, W. Zhao, S. G. Methley, L. Bickers, e S. Hornung, “LED spectral slicing for single-mode local loop applications,” *Electronics Letters*, **24**, No. 7, pp. 389–390, (1988).
- [44] Y. A. Akulova *et al.*, “Widely tunable electroabsorption-modulated sampled-grating DBR laser transmitter”, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, **8**, No. 6, pp. 1349-1357 (2002).
- [45] M. J. Wale, “Options and trends for PON tunable optical transceivers”, *European Conference on Optical Communications*, Anais do ECOC 2011, paper **Mo.2.C1** (2011).
- [46] 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).
- [47] M. Zirngibl, C. R. Doerr, e L. W. Stulz, “Study of spectral slicing for local access applications,” *IEEE Photonics Technology Letters*, **8**, No. 5, pp.721–723, (1996).
- [48] 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*, **10**, No. 9, pp. 1334–1336, (1996).
- [49] 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*, **16**, No. 9, pp. 1546–1559, (1998).
- [50] S. Kobayashi e T. Kimura, “Injection locking in AlGaAs semiconductor laser,” *IEEE Journal of Quantum Electronics*, **17**, no. 5, pp. 681–689, (1981).
- [51] H. D. Kim, S.-G. Kang, e C.-H. Lee, “A low-cost WDM source with an ASE injected Fabry-Perot semiconductor laser,” *IEEE Photonics Technology Letters*, **12**, No. 8, pp. 1067–1069, (2000).
- [52] P. Healey *et al.*, “Spectral slicing WDM-PON using wavelength-seeded reflective SOAs,” *Electronics Letters*, **37**, no. 19, pp. 1181–1182, (2001).

- [53] 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*, **10**, No. 9, pp. 1337–1339, (1998).
- [54] 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*, **20**, No. 3, pp. 220–222, (2008).
- [55] 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*, Anais do OFC 2004, paper **WO3** (2004).
- [56] S.-M. Lee, K.-M. Choi, S.-G. Mun, J.-H. Moon, e C.-H. Lee "Dense WDM-PON based on wavelength locked Fabry-Perot lasers" *IEEE Photonics Technology Letters*, **17**, No. 7, pp. 1579 - 1581, (2005).
- [57] C.-H. Lee *et al.*, "WDM-PON experiences in Korea [Invited]", *Journal of Optical Networking*, **6**, No. 5, pp. 451-464 (2007).
- [58] S.-G. Mun, J.-H. Moon, H.-K. Lee, J.-Y. Kim, e C.-H. Lee, "A WDM-PON with a 40 Gb/s (32 x 1.25 Gb/s) capacity based on wavelength-locked Fabry-Perot laser diodes" *Optics Express*, **16**, No. 15, pp.11361-11368, (2008).
- [59] H.-K. Lee, H.-S. Cho, J.-Y. Kim, e C.-H. Lee, "A WDM-PON with an 80 Gb/s capacity based on wavelength-locked Fabry-Perot laser diode", *Optics Express*, **18**, No. 17, pp.18077-18085 (2010).
- [60] J.-Y. Kim; S.-H. Yoo; S.-R. Moon; D. C. Kim; e C.-H Lee, "(40 × 10 Gb/s) ASE injection seeded WDM-PON based on SOA-REAM", *Optical Fiber Communications Conference*, Anais do OFC 2013, paper **OW4D.4**, (2013).
- [61] J. Kim, S.-R. Moon, S.-H. Yoo, e C.-H. Lee, "800 Gb/s (80 × 10 Gb/s) capacity WDM-PON based on ASE injection seeding", *Optics Express*, **22**, No.9, pp. 10359-10365, (2014).
- [62] 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*, **22**, No. 10, pp. 528–529, (1986).
- [63] M. D. Feuer, J. M. Wiesenfeld, J. S. Perino, C. A. Burrus, G. Raybon, S.C. Shunk, e N. K. Dutta, "Single-port laser-amplifier modulators for local access," *IEEE Photonics Technology Letters*, **8**, No. 9, pp. 1175–1177, (1996).
- [64] 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).
- [65] P. Healey *et al.*, "Reflective SOAs for spectrally sliced WDM-PONS," *Optical Fiber Conference*, Anais do OFC 2002, Paper **WW4**. (2002).
- [66] H.C. Shin *et al.*, "Reflective SOAs optimized for 1.25 Gbit/s WDM-PONs", *Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society*, Anais do LEOS 2004, **1**, pp. 308 – 309. (2004).

- [67] F. Payoux, P. Chanclou, e R. Brenot, "WDM PON with a single SLED seeding colorless RSOA-based OLT and ONU", *European Conference on Optical Communications*, Anais do ECOC 2006, (2006).
- [68] 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).
- [69] 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*, **50**, No. 1, pp. 77–81, (2002).
- [70] 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, paper **optical packet switching 8.5.6**, (2002).
- [71] 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*, **21**, No. 11, pp. 2546-2556 (2003).
- [72] W. Lee et al., "Bidirectional WDM-PON based on gain-saturated reflective semiconductor optical amplifiers," *IEEE Photonics Technology Letters*, **17**, No. 11, pp. 2460–2462, (2005).
- [73] J.-H. Yu, N. Kim, e B. W. Kim, "Remodulation schemes with reflective SOA for colorless DWDM PON", *Journal of Optical Networking*, **6**, No. 8, pp. 1041-1054, (2007).
- [74] 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*, Anais do ICTON 2010, paper **Tu.B1.5**, (2010).
- [75] U. R. Duarte et al., "Combined self-seeding and carrier remodulation scheme for WDM-PON", *Journal of Lightwave Technology*, **31**, No.8, pp. 1323-1330, (2013).
- [76] H. Kim et al., 'Impact of dispersion, PMD, and PDL on the performance of spectrum-sliced incoherent light sources using gain-saturated semiconductor optical amplifiers', *Journal of Lightwave Technology*, **24**, No. 2, pp. 775-785, (2006).
- [77] 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).
- [78] 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" *Electronics Letters*, **46**, No. 9, pp. 636 – 639, (2010).
- [79] S.-H. Cho et al., "1.25 Gb/s Operation of ASE injected RSOA with 50 GHz channel spacing by using injection current adjustment, dispersion management and receiver with decision threshold level control", *International Conference on Transparent Optical Networks*, Anais do ICTON 2010, paper **Tu.B1.6**, (2010).

- [80] H. H. Lee *et al.*, “Filtering effects in a spectrum-sliced WDM-PON system using a gain-saturated reflected-SOA”, *Optical Fiber Communications Conference, Anais do OFC 2009*, paper **JWA72**, (2009)
- [81] B.-H. Cho, S. S. Lee, “The effect of AWG-filtering on a bidirectional WDM-PON link with spectrum-sliced signals and wavelength-reused signals”, *Optical Communications*, 284, pp. 5692-5696, (2011).
- [82] S. Taebi, e S. S. Saini, “Effect of AWG filtering on spectrally sliced WDM-PONs”, *Anais da SPIE 2011*, **7988**, No. 798811, pp. 1-6, (2011)
- [83] D. McCoy *et al.*, “Noise suppression of incoherent light using a gain-saturated SOA: implications for spectrum-sliced WDM systems” *Journal of Lightwave Technology*, **23**, No. 8, pp. 2399-2409, (2005).
- [84] H. H. Lee, S. H. Cho, J. H. Lee e S. S. Lee, “Excess intensity noise suppressed 100-GHz spectrum-sliced WDM-PON with pre-spectrum-sliced seed light source”, *European Conference on Optical Communications, Anais do ECOC 2010*, paper **P6.06** (2010).
- [85] 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 Photonics Technology Letters*, **22**, No. 20, pp. 1542 - 1544, (2010).
- [86] K. Y. Cho *et al.*, “Effects of reflection in RSOA-based WDM-PON utilizing remodulation technique”, *Journal of Lightwave Technology*, **27**, No. 10, pp. 1286 – 1295, (2009).
- [87] H. C. Jeon, K. Y. Cho, Y. Takushima, e Y. C. Chung, “High reflection tolerance of 1.25-Gb/s RSOA-based WDM PON employing spectrum-sliced ASE source” *Anais da SPIE 2008*, **7136**, No. 71360N, pp. 1-11, (2008).
- [88] N. Deb, e H. Anis, “Wavelength remodulation scheme using DPSK downstream and upstream for DWDM-PONs”, *Optics Express*, **19**, No. 17, pp. 16418-16422 (2010).
- [89] 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, Anais do OFC 2003*, paper **TuR2**, pp. 281 – 282, (2003).
- [90] 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, Anais do ACP 2010*, pp. 523-524, (2010).
- [91] C. H. Wang, F. Y. Shih, C. W. Chow, C. H. Yeh, e S. Chi, “Using downstream DPSK signal for upstream OOK signal remodulation with RSOA in hybrid WDM-TDM passive optical networks”, *Optical Fiber Communications Conference, Anais do OFC 2009*, paper **JWA73**, (2009).
- [92] I. Garces *et al.*, “Analysis of narrow-FSK downstream modulation in colourless WDM PONs,” *Electronics Letters*, **43**, No. 8, pp. 471 – 472, (2007).

- [93] G.-K. Chang et al., “Key technologies of WDM-PON for future convergent optical broadband access networks [Invited]”, *Journal of Optical Communications and Networking*, **1**, No. 4, pp. C35-C50, (2009).
- [94] C. H. Kim, “Impact of seed source power on dispersion limited maximum reach in WDM-PONs using broadband light source seeded optical sources”, *Optics Express*, **20**, No. 4, pp. 3473-3478, (2012).
- [95] W. Lee et al., “Optical transceiver employing an RSOA with feed-forward current injection” *Optical Fiber Communications Conference*, Anais do OFC 2007, paper **OTuH1**, (2007).
- [96] 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*, **5**, No. 5, pp. 447 – 456, (2013).
- [97] S.-R. Moon, J.-Y. Kim, e C.-H. Lee, “Feed forward noise suppression in injection seeded WDM-PON with ASE”, *IEEE Photonics Technology Letters*, **24**, No. 15, pp. 1270 – 1272, (2012)
- [98] S.-H. Cho et al., “Demonstrations of RSOA based loop-back WDM-PON with 100 Gb/s (80x1.25 Gb/s) capacity employing spectrum sliced in incoherent light injection” *European Conference on Optical Communications*, Anais do ECOC 2010, paper **Th.10.B.1**, (2010).
- [99] J. H. Lee et al., “First commercial deployment of a colorless gigabit WDM/TDM hybrid PON system using remote protocol terminator”, *Journal of Lightwave Technology*, **28**, No. 4, pp. 344–351, (2010).
- [100] S.H. Cho et al., “A Loop-Back WDM-PON technology based on RSOA using wavelength reuse scheme and it’s commercialization status in Korea”, *International Conference on Optical Internet*, Anais do COIN 2012, paper **WF.1**, (2012).
- [101] H. Y. Rhy, e G. Y. Yi, “Current status of WDM-PON system development and standardization”, *Opto-Electronics and Communications Conference*, Anais do OECC, paper **3A1-5** (Invited), (2012).
- [102] H.-K. Lee et al., “Decision threshold control method for the optical receiver of a WDM-PON”, *Journal of Optical Communication Networking*, **2**, No. 6, pp. 381 – 388, (2010).
- [103] 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”, *Optical Fiber Technology*, **16**, No. 3, pp. 129 -134, (2010).
- [104] S.-G Mun, e C.-H. Lee, “An optimization method for the decision threshold level in optical receivers for WDM-PONs”, Anais do SPIE 2006, **6354**, No. 635429 , pp. 1–7, (2006).
- [105] S.H. Cho et al., “Reducing the back reflection-induced penalty by using a receiver with an optimized decision level in a reuse single fiber bidirectional WDM-PON”, *European Conference on Optical Communications*, Anais do ECOC 2007, paper **WeP124**, (2007).

- [106] B. Skubic, A. Bianchi, S. Dahlfort, e F. Cavaliere , “*Cost, power and performance analysis of WDM-PON systems based on reflective transmitters for next-generation optical access*”, *Optical Fiber Communications Conference*, Anais do OFC 2012, paper **JTh2A.28** (2012).
- [107] M. Presi, R. Proietti, K. Prince, G. Contestabile, e E. Ciaramella, “*A 80 km reach fully passive WDM-PON based on reflective ONUs*”, *Optics Express*, **16**, No. 23, pp. 19043-19048 (2008).
- [108] Q. Guo, e A. V. Tran, “*Demonstration of a 40 Gb/s wavelength-reused WDM-PON using coding and equalization [Invited]*”, *Journal of Optical Communications and Networking*, **5**, No. 10, pp. A119-A126, (2013).
- [109] L. H. Spiekman, “*Active devices in passive optical networks*”, *Journal of Lightwave Technology*, **31**, No. 4, pp. 488-497, (2013).
- [110] Y.-C. Chi, C.-J. Lin, S.-Y. Lin, e G.-R. Lin, “*The reuse of downstream carrier data erased by self-feedback SOA for bidirectional DWDM-PON transmission*”, *Journal of Lightwave Technology*, **30**, No. 19, pp. 3096 – 3102, (2012).
- [111] S. Hann, T.-Y. Kim, e C.-S. Park, “*Direct-modulated upstream signal transmission using a self-injection locked FP-LD for WDM-PON*”, *European Conference on Optical Communications*, Anais do ECOC 2005, paper **We3.3.3** (2005).
- [112] E. Wong, K.-L. Lee e T. Anderson, “*Low-cost WDM passive optical network with directly-modulated self-seeding reflective SOA*”, *Electronics Letters*, **42**, No. 5, pp. 299 - 301, (2006).
- [113] E. Wong, K. L. Lee, e T. B. Anderson, “*Directly-modulated self-seeding reflective SOAs as colorless transmitters for WDM passive optical networks*”, *Optical Fiber Communications Conference*, Anais do OFC 2006, paper **PDP49** (2006).
- [114] 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*”, *Journal of Lightwave Technology*, **25**, No. 1, pp. 67–74, (2007).
- [115] Z. A. E.-Sahn, W. Mathlouthi, H. Fathallah, S. LaRochelle, e L. A. Rusch, “*A novel FBG-based self-seeded RSOA transmitter with noise mitigation for dense SS-WDM PONs*”, *Annual Meeting of the Proceedings of IEEE Photonics Society*, Anais do ANP 2010, pp. 349 - 350, (2010).
- [116] J.-M. Kang, T.-Y. Kim, I.-H. Choi, S.-H. Lee, e S.-K. Han “*Self-seeded reflective semiconductor optical amplifier based optical transmitter for up-stream WDM-PON link*”, *Institution of Engineering and Technology Optoelectronics*, **1**, No. 2, pp. 77 - 81, (2007).
- [117] Q. T. Le *et al.*, “*RSOA-based external cavity laser as cost-effective upstream transmitter for WDM passive optical network*”, *Conference on Lasers and Electro-Optics*, CLEO 2011, paper **JWA9**, (2011).

- [118] H.-K. Kwon, Y.-Y. Yong-Yuk Won, e S.-K. Han, “A Self-seeded reflective SOA-based optical network unit for optical beat interference robust WDM/SCM-PON link”, *IEEE Photonics Technology Letters*, **18**, No. 17, pp. 1852 - 1854, (2006).
- [119] M. Presi, e E. Ciaramella, “Stable self-seeding RSOAs for WDM-PONs”, *Optical Fiber Communications Conference, Anais do OFC 2011*, paper **OMP4** (2011).
- [120] F. Xiong *et al.*, “Characterization of directly modulated self-seeded reflective semiconductor optical amplifiers utilized as colorless transmitters in WDM-PONs”, *Journal of Lightwave Technology*, **31**, No. 11, pp. 1727 – 1733, (2013).
- [121] L. Marazzi *et al.*, “Network-embedded self-tuning cavity WDM-PON transmitter,” *Optics Express*, **20**, No. 4, pp. 3781–3786, (2012).
- [122] Y. Ma, D. Liu, J. Yu, e X. Wang “System evaluation of economic 16/32 chs 1.25 Gbps WDM-PON with self-seeded RSOA”, *Optics Express*, **20**, No. 20, pp. 22523–22530, (2012).
- [123] M. Martinelli, L. Marazzi, P. Parolari, M. Brunero, e G. Gavioli, “Polarization in retracing circuits for WDM-PON”, *IEEE Photonics Technology Letters*, **24**, No. 14, pp. 1191–1193 (2012).
- [124] M. Presi, A. Chiuchiarelli, R. Corsini, e E. Ciaramella, “Uncooled and polarization independent operation of self-seeded Fabry-Pérot lasers for WDM-PONs”, *IEEE Photonics Technology Letters*, **24**, No. 17, pp. 1523-1526, (2012).
- [125] M. Presi, A. Chiuchiarelli, R. C. P. Choudhury, e E. Ciaramella, “Uncooled operation of directly-modulated and polarization insensitive self-seeded Fabry-Peròt laser diodes”, *Advanced Photonics Congress, Anais do APC 2012*, paper **AW4A.7**, (2012).
- [126] M. Presi, A. Chiuchiarelli e E. Ciaramella, “Polarization independent self-seeding of Fabry-Peròt laser diodes for WDM-PONs” *Optical Fiber Communications Conference, Anais do OFC 2012*, paper **OW1B.5**, (2012).
- [127] Q. Deniel, F. Saliou, P. Chanclou, e D. Erasme, “Self-seeded RSOA based WDM-PON transmission capacities” *Optical Fiber Communications Conference, Anais do OFC 2013*, paper **OW4D.3**, (2013).
- [128] 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, Anais do OFC 2012*, paper **JTh2A**, (2012).
- [129] L. Giorgi *et al.*, “WDM-PON based on self-seeded OLT and wavelength reuse at ONU”, *Optical Fiber Communications Conference, Anais do OFC 2013*, paper **OW4D.1**, (2013).
- [130] Q. Deniel, F. Saliou, P. Chanclou, D. Erasme, e Romain Brenot, “Up to 45km-long amplified self-seeded RSOA based external cavity for 2.5Gb/s WDM PON

transmission”, *Optical Fiber Communications Conference*, Anais do OFC 2013, paper **OW4D.2**, (2013).

[131] T. Komljenovic, D. Babić, e Z. Sipus, “47-km 1.25-Gbps transmission using a self-seeded transmitter with a modulation averaging reflector”, *Optics Express*, **20**, No. 16, pp. 17386 – 17392, (2012).

[132] N. Cheng, Z. Xu, H. Lin, e D. Liu, “20 Gb/s Hybrid TDM/WDM PONs with 512-split using self-seeded reflective semiconductor optical amplifiers” *Optical Fiber Communications Conference*, Anais do OFC 2012, paper **NTu2F.5**, (2012).

[133] P. Parolari *et al.*, “10-Gb/s Polarization-Insensitive RSOA-based self tuning transmitter for WDM-PON bridging up to 52 km, *Optical Fiber Communications Conference*, Anais do OFC 2013, paper **OW1A.1**, (2013).

[134] P. Parolari *et al.*, “10-Gb/s Operation of a colorless self-seeded transmitter over more than 70 km of SSMF, *IEEE Photonics Technology Letters*, **26**, No. 6, pp. 599 – 602, (2014).

[135] L. Marazzi, *et al.*, “Up to 10.7 Gb/s high-PDG RSOA-based colorless transmitter for WDM networks,” *IEEE Photonics Technology Letters*, **25**, No. 7, pp. 637–640, (2013).

[136] M.L. Deng *et al.*, “Self-seeding-based 10 Gb/s over 25 km optical OFDM transmissions utilizing face-to-face dual-RSOAs at gain saturation”, *Optics Express*, **22**, No. 10, pp. 11954- 11965, (2014).

[137] E. Wong, “Self-seeding reflective semiconductor optical amplifiers for WDM access networks”, *9th International Conference on Information, Communications and Signal Processing*, Anais do ICICS 2013, pp.1-4, (2013).

[138] M. Presi, A. Chiuchiarelli, R. Corsini, e E. Ciaramella, “Self-Seeding of semiconductor lasers for next-generation WDM passive optical networks”, *International Conference on Transparent Optical Networks*, Anais do ICTON 2013, paper **We.C3.2**, (2013).

[139] S.A. Gebrewold *et al.*, “Reflective-SOA fiber cavity laser as directly modulated WDM-PON colorless transmitter”, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, **20**, No. 5, pp. 3100409, (2014).

[140] Q. Deniel *et al.*, “Amplified RSOA self-tuning laser for WDM PON using saturated SOA for noise reduction and data cancellation”, *European Conference on Optical Communications*, Anais do ECOC 2013, paper **We.1.F.5**, (2013).

[141] M. Presi, A. Chiuchiarelli, R. Corsini, P. Choudhury, e E. Ciaramella “Enhanced 10-Gb/s operation of bandwidth-limited R-SOAs without electronic equalization”, *European Conference on Optical Communications*, Anais do ECOC 2012, paper **We.1.B.2**, (2012).

[142] M. Omella *et al.* “10 Gb/s full-duplex bidirectional transmission with RSOA-based ONU using detuned optical filtering and decision feedback equalization” *Optics Express*, **17**, No. 7, pp. 5008-5013, (2009).

- [143] Q. Guo and A. V. Tran, “40 Gb/s Operation of SOA-REAM in single-feeder WDM-PON”, *Journal of Optical Communications and Networking* , **4**, No. 11, pp. B77-B84, (2012).
- [144] K. Y. Cho, A. Agata, Y. Takushima, e Y. C. Chung, “Performance of forward-error correction code in 10-Gb/s RSOA-based WDM PON”, *IEEE Photonics Technology Letters*, **22**, No. 1, pp. 57 - 59, (2010).
- [145] I. Papagiannakis *et al.*, “Investigation of 10-Gb/s RSOA-based upstream transmission in WDM-PONs utilizing optical filtering and electronic equalization” *IEEE Photonics Technology Letters*, **20**, No. 24, pp. 2168-2170 (2008).
- [146] K. Y. Cho , “103-Gb/s Long-Reach WDM PON implemented by using directly-modulated RSOAs”, *IEEE Photonics Technology Letters*, **24**, No. 3, pp. 209 – 211, (2012).
- [147] K. Y. Cho, B. S. Choi, H. Y. Choi, Y. Takushima, e Y. C. Chung, “25.78-Gb/s operation of RSOA for WDM PON” *OptoElectronics and Communications Conference*, Anais do OECC 2010, pp. 16 – 17, paper **6A1-2**, (2010).
- [148] G. de Valicourt et al., “10 Gbit/s modulation of reflective SOA without any electronic processing” *Optical Fiber Communications Conference*, Anais do OFC 2011, paper **OThT2**, (2011).
- [149] Z. A.-Qazwini, e H. Kim, “Symmetric 10-Gb/s WDM-PON using directly modulated lasers for downlink and RSOAs for uplink,” *Journal of Lightwave Technology*, **30**, No. 12, pp. 1891–1899, (2012).
- [150] H. Kim, “10-Gbps Upstream transmission for WDM-PON using RSOA and delay interferometer”, *Optical Fiber Communications Conference*, Anais do OFC 2011, paper **OMP8**, (2011).
- [151] H. Kim, “10-Gb/s Operation of RSOA using a delay interferometer” *IEEE Photonics Technology Letters*, **22**, No. 18, pp. 1379-1381, (2010).
- [152] K. Y. Cho, B. S. Choi, Y. Takushima, e Y. C. Chung, “25.78-Gb/s Operation of RSOA for next-generation optical access networks”, *IEEE Photonics Technology Letters*, **23**, No. 8, pp. 495 – 497, (2011).
- [153] K. Y. Cho, Y. Takushima, e Y. C. Chung, “10-Gb/s Operation of RSOA for WDM PON”, *IEEE Photonics Technology Letters*, **20**, No. 18, pp. 1533- 1535, (2008).
- [154] 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).
- [155] U. R. Duarte, R. S. Penze, J. B. Rosolem, e M. A. Romero, “Analysis of ASE-Related Impairments on Wavelength-Reuse WDM-PON Based on Self-Seeded Reflective-

SOAs ”, *Journal of Optical Communications and Networking*, **6**, No. 9, pp. 773-781, (2014).

[156] U. R. Duarte, J. B. Rosolem, R. S. Penze, A. A. Leonardi, e M. A. Romero, “*Enhancement of chromatic dispersion and post-filtering effects tolerances on spectrum-sliced WDM-PONs using self-seeded reflective-SOAs*”, *International Telecommunications Symposium*, Anais do ITS 2014, pp. 1-5, (2014).

[157] U. R. Duarte *et al.*, “*A WDM-PON Implementation Employing Spectrum Sliced ASE Source, Dispersion Management and PIN Receivers*”, *SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference*, Anais do IMOC 2011, pp. 89-91, (2011).

[158] U. R. Duarte, J. B. Rosolem, and M. A. Romero, “*Extended WDM-PON Employing High Polarization Dependence R-SOAs and Hybrid EDFA/Raman*”, *Access Networks and In-house Communications*, Anais do ANIC 2012, paper **JTu5A.3**, (2012).

[159] U. R. Duarte, J. B. Rosolem, and M. A. Romero, “*A Long-Reach WDM-PON Feeder Employing EDFA-Raman Amplification and ASE Injected R-SOAs for Optical-Wireless Access Networks*”, *International Topical Meeting on Microwave Photonics*, Anais do MWP 2012, 1, pp. 248-251, (2012).

[160] J. S. Jeong *et al.*, “*Mitigation of Rayleigh crosstalk using noise suppression technique in 10-Gb/s REAM-SOA*”, *Optics Express*, 20, No. 24, pp. 26373- 26378, (2012).