

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ELETRÔNICA E SISTEMAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MARCIONILO JOSÉ DA SILVA

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE DESEMPENHO E CONSUMO DE POTÊNCIA
ELÉTRICA DE AMPLIFICADORES EDFA E HÍBRIDO RAMAN/EDFA PARA
REDES ÓPTICAS RECONFIGURÁVEIS**

Recife
2016

MARCIONILO JOSÉ DA SILVA

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE DESEMPENHO E CONSUMO DE POTÊNCIA
ELÉTRICA DE AMPLIFICADORES EDFA E HÍBRIDO RAMAN/EDFA PARA
REDES ÓPTICAS RECONFIGURÁVEIS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de
Pernambuco como parte dos requisitos para obtenção do
grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Fotônica.

Orientador: Prof. Dr. Joaquim Ferreira Martins Filho.

Recife
2016

Catálogo na fonte
Bibliotecária Valdicéa Alves, CRB-4 / 1260

- S586a Silva. Marcionilo José da.
Avaliação experimental de desempenho e consumo de potência elétrica de amplificadores edfa e híbrido raman/edfa para redes ópticas reconfiguráveis/ Marcionilo José da Silva - 2016.
76folhas, Il.; Tabs; Abr.e Sigl.
- Orientador: Prof. Dr. Joaquim Ferreira Martins Filho.
- Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2016.
Inclui Referência.
1. Engenharia Elétrica. 2. Redes Ópticas Reconfiguráveis. 3. EDFA. 4. Amplificador Raman. 5. Amplificador Híbrido Raman/EDFA. 6. Consumo de Potência Elétrica. I. Martins Filho, Joaquim Ferreira (Orientador). II. Título.

UFPE

621.3 CDD (22. ed.)

BCTG/2017 - 431



Universidade Federal de Pernambuco

Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA DE DEFESA DE
DISSERTAÇÃO DO MESTRADO ACADÊMICO DE

MARCIONILO JOSÉ DA SILVA

TÍTULO

**“AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE DESEMPENHO E CONSUMO DE
POTÊNCIA ELÉTRICA DE AMPLIFICADORES *EDFA* E *HÍBRIDO*
RAMAN/EDFA PARA REDES ÓPTICAS RECONFIGURÁVEIS”**

A comissão examinadora composta pelos professores: JOAQUIM FERREIRA MARTINS FILHO, DES/UFPE; CARMELO JOSÉ ALBANEZ BASTOS FILHO, POLI/UPE; DANIEL AUGUSTO RIBEIRO CHAVES, POLI/UPE e ANDERSON STEVENS LEONIDAS GOMES, DF/UFPE, sob a presidência do primeiro, consideram o candidato **MARCIONILO JOSÉ DA SILVA** **APROVADO**.

Recife, 02 de agosto de 2016.

MARCELO CABRAL CAVALCANTI
Coordenador do PPGE

JOAQUIM FERREIRA MARTINS FILHO
Orientador e Membro Titular Interno

DANIEL AUGUSTO RIBEIRO CHAVES
Membro Titular Externo

CARMELO JOSÉ ALBANEZ BASTOS FILHO
Membro Titular Externo

ANDERSON STEVENS LEONIDAS GOMES
Membro Titular Externo

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer, em primeiro lugar, ao professor Joaquim F. Martins Filho a oportunidade, preciosa ajuda e orientação na realização deste trabalho. Ao grupo de redes ópticas do Departamento de Eletrônica e Sistemas (DES) da UFPE e aos colegas do laboratório de Fotônica. Ao CPqD: a Uiara C. de Moura, Sandro Marcelo Rossi, Juliano R.F. de Oliveira, aos franceses Benoit Roulle e Benjamin Sarti, e a todos que me ajudaram de alguma forma com os testes experimentais. Um agradecimento muito especial a meus pais pelo constante apoio. Sem eles, nada disso seria possível. Não poderia deixar de agradecer a minha namorada, Cris, o apoio e motivação durante todo esse tempo. Ao PPGEE da UFPE. À FACEPE, pelo apoio financeiro. E ao CNPq.

Muitíssimo obrigado a todos!

RESUMO

Esta dissertação trata da avaliação experimental de desempenho e consumo de potência elétrica de amplificadores EDFA de um estágio, EDFA de dois estágios e híbrido Raman/EDFA que podem ser utilizados em redes ópticas DWDM reconfiguráveis. Os resultados da caracterização de desempenho óptico e consumo de potência elétrica dos amplificadores são apresentados em forma de máscara de potência na qual a região dinâmica é definida pela faixa de potência total de entrada de -30 a 0 dBm e pela faixa de ganhos de 20 a 30 dB em toda banda C. O desempenho óptico foi avaliado a partir da figura de ruído, planicidade espectral e precisão do controle automático do ganho. A potência elétrica total consumida pelos amplificadores foi obtida a partir do consumo dos lasers de bombeio, controladores de temperatura interna do pacote do laser (TECs) e placa de circuito eletrônico. Também foram realizados testes sistêmicos que visaram avaliar o desempenho dos amplificadores quando estão operando em enlaces com repetição, em que foi utilizado um sistema com transmissão/recepção coerente 112 Gb/s NRZ DP-QPSK com anel de recirculação óptica. O desempenho sistêmico foi avaliado a partir da relação sinal ruído óptica (OSNR) e taxa de erro de bits (BER) em função do comprimento do enlace, com seções de 100 km. Os resultados obtidos nas caracterizações mostram um desempenho óptico superior do amplificador híbrido Raman/EDFA em contraponto ao consumo de potência elétrica, que chegou a ser mais que o dobro em relação aos EDFAs de um e dois estágios.

Palavras-chave: Redes ópticas reconfiguráveis. EDFA. Amplificador Raman. Amplificador híbrido Raman/EDFA. Consumo de potência elétrica.

ABSTRACT

This dissertation deals with the experimental evaluation of the performance and electrical power consumption of one-stage EDFA, two-stage EDFA and Raman/EDFA hybrid optical amplifiers that can be applied in reconfigurable DWDM optical networks. The characterization results of optical performance and electrical power consumption are shown in the optical power mask with dynamic range defined by the total input optical power from -30 to 0 dBm and gain range from 20 to 30 dB in the C-band. The optical performance was evaluated from the noise figure, gain flatness and automatic gain control accuracy. The total electrical power consumed by amplifiers was obtained from the pump lasers, laser package internal temperature controllers (TECs) and electronic circuit board consumption. Systemic tests were also performed in order to evaluate the performance of amplifiers operating in links with repetition, in which was employed a coherent 112 Gb/s NRZ DP-QPSK transmission/reception system with optical recirculation loop. Systemic performance was evaluated from the optical signal noise ratio (OSNR) and bit error rate (BER) as a function of the link length, with 100 km spans. The results obtained in the characterizations show superior optical performance of the Raman/EDFA hybrid amplifier as opposed to the electric power consumption, which was more than twice that of the one-stage and two-stages EDFAs.

Keywords: Reconfigurable optical networks. EDFA. Raman amplifier. Raman / EDFA hybrid amplifier. Electrical power consumption.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Topologia de rede da primeira geração: sistema ponto-a-ponto com multiplexação TDM monocanal, modulação OOK e regeneradores OEO. . .	15
Figura 2 – Topologia de rede da segunda geração: sistema ponto-a-multiponto com roteamento fixo (OADM), multiplexação WDM, modulação OOK/DPSK/DQPSK e amplificadores EDFAs.	17
Figura 3 – Topologia de rede da terceira geração: sistema multiponto com roteamento reconfigurável (ROADM), multiplexação DWDM, modulação DP-QPSK e amplificadores Raman e EDFAs com AGC.	19
Figura 4 – Topologia de rede flexível dinamicamente reconfigurável: sistema multiponto reconfigurável com ROADMs independentes de cor/direção/contenção e flexível (CDC-F); multiplexação DWDM e por divisão espacial SDM; transmissão com modulação DP-nQAM; amplificadores híbridos com AGC (Raman/EDFA).	22
Figura 5 – (a) Esquema dos três primeiros estados energéticos e transições do érbio. (b) Espectro do coeficiente de emissão, g^* , e do coeficiente de absorção, α , para uma típica fibra dopada com érbio e co-dopada com alumínio.	25
Figura 6 – Exemplo de montagem básica do EDFA.	27
Figura 7 – Espectro do ganho de um EDFA típico em função do comprimento de onda para quatro valores de potência de bombeio em 1480 nm.	28
Figura 8 – Exemplo de montagem básica do EDFA com configurações de bombeio (a) contrapropagante e (b) bidirecional.	30
Figura 9 – Diagrama esquemático do processo quântico do espalhamento Raman. . . .	32
Figura 10 – Espectro do ganho de Raman para fibras DCF, SMF e DSF.	32
Figura 11 – Esquemas de bombeamento Raman: copropagante, contrapropagante ou bidirecional.	33
Figura 12 – Diagramas esquemáticos: (a) sistema amplificador Raman distribuído, (b) sistema equivalente enlace + EDFA.	35
Figura 13 – Figura de ruído total como função do ganho on-off de um amplificador Raman em um <i>span</i> de 100 km com esquema de amplificação híbrida. A linha tracejada mostra a NF para o bombeio Raman apenas. A linha pontilhada mostra a perda de 20 dB do <i>span</i>	36
Figura 14 – Exemplo de máscara de potência.	44
Figura 15 – Caracterizador experimental de amplificadores ópticos para obtenção automática de dados da máscara de potência.	44
Figura 16 – (a) Topologia e (b) placa óptica do amplificador EDFA de um estágio testado. .	47
Figura 17 – (a) Topologia e (b) placa óptica do amplificador EDFA de dois estágios testado. .	48

Figura 18 – (a) Topologia e (b) placa óptica do amplificador híbrido DRA/EDFA testado.	50
Figura 19 – Placa eletrônica dos amplificadores.	51
Figura 20 – Aparato experimental para teste sistêmico.	53
Figura 21 – Passos do processamento sobre o sinal DP-QPSK recebido.	53
Figura 22 – Máscara de potência para a figura de ruído dos amplificadores (a) EDFA de um estágio, (b) EDFA de dois estágios e (c) híbrido Raman/EDFA.	56
Figura 23 – Máscara de potência para a planicidade espectral do ganho dos amplificadores (a) EDFA de um estágio, (b) EDFA de dois estágios e (c) híbrido Raman/EDFA.	58
Figura 24 – Máscara de potência para a precisão controle automático do ganho dos amplificadores (a) EDFA de um estágio, (b) EDFA de dois estágios e (c) híbrido Raman/EDFA.	59
Figura 25 – Máscaras de potência do para potência elétrica consumida: (a) pelo laser P_{pump} , (b) pelo TEC P_{TEC} e (c) pelo circuito eletrônico P_{Cir} do EDFA de um estágio; (d) pelos lasers P_{pump} , (e) pelos TECs P_{TEC} e (f) pelo circuito eletrônico P_{Cir} do EDFA de dois estágios; (g) pelos lasers P_{pump} , (h) pelos TECs P_{TEC} e (i) pelo circuito eletrônico P_{Cir} do amplificador híbrido Raman/EDFA.	60
Figura 26 – Máscaras de potência para potência elétrica total $P_{Amp} = P_{pump} + P_{TEC} + P_{Cir}$ do amplificador (a) EDFA de um estágio, (b) EDFA de dois estágios e (c) híbrido Raman/EDFA.	62
Figura 27 – Espectros do sinal óptico transmitido para os amplificadores (a) EDFA de um estágio no lançamento, em 800 km e 1600 km, (b) EDFA de dois estágios no lançamento, em 800 km e 1600 km e (c) híbrido no lançamento, em 900 km e 1600 km.	64
Figura 28 – Variação da OSNR com o comprimento do enlace, com <i>spans</i> de 100 km, do canal testado para os amplificadores híbrido (triângulo azul), EDFA de um estágio (círculo vermelho) e EDFA de dois estágios (quadrado preto).	65
Figura 29 – Variação da BER com o comprimento do enlace, com <i>spans</i> de 100 km, do canal testado para os amplificadores híbrido (triângulo azul), EDFA de um estágio (círculo vermelho) e EDFA de dois estágios (quadrado preto).	66
Figura 30 – Constelações das polarizações X e Y do sinal 112 Gb/s NRZ DP-QPSK em 0 e 1600 km para os testes com amplificadores (a) EDFA de um estágio, (b) EDFA de dois estágios e (c) híbrido DRA/EDFA.	67

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	OBJETIVOS	14
1.2	DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS	14
2	INTRODUÇÃO ÀS REDES ÓPTICAS WDM	15
2.1	EVOLUÇÃO DAS REDES ÓPTICAS	15
2.1.1	Primeira Geração	15
2.1.2	Segunda Geração	17
2.1.3	Terceira Geração	19
2.1.4	Tendências de Evolução	21
3	AMPLIFICADORES EDFAS, RAMAN E HÍBRIDO RAMAN/EDFA	24
3.1	AMPLIFICADORES A FIBRA DOPADA COM ÉRBIO	24
3.1.1	Princípio de Funcionamento	25
3.1.2	Parâmetros Fundamentais	27
3.1.3	Otimização do Desempenho em EDFAs	29
3.2	AMPLIFICADORES ÓPTICOS RAMAN	31
3.2.1	Amplificação Raman	31
3.2.2	Ganho e Figura de Ruído	33
3.2.3	Limitações de Amplificadores Raman	36
3.2.4	Aprimoramentos do Amplificador Raman	37
3.2.5	Fontes de Bombeio	38
3.3	AMPLIFICADORES ÓPTICOS HÍBRIDOS RAMAN/EDFA	38
3.4	CONSUMO DE POTÊNCIA ELÉTRICA DE AMPLIFICADORES	40
4	METODOLOGIA	43
4.1	MÁSCARA DE POTÊNCIA E CARACTERIZAÇÃO DE AMPLIFICADORES	43
4.2	TOPOLOGIAS CARACTERIZADAS	45
4.2.1	EDFA de um Estágio Testado	45
4.2.2	EDFA de dois Estágios Testado	46
4.2.3	Amplificador Híbrido DRA/EDFA Testado	49
4.2.4	Placa Eletrônica	50
4.3	POTÊNCIA ELÉTRICA	51
4.4	TESTE SISTÊMICO	52
5	RESULTADOS EXPERIMENTAIS E ANÁLISE	55
5.1	DESEMPENHO DOS AMPLIFICADORES	55
5.2	CONSUMO DE POTÊNCIA ELÉTRICA	58
5.3	TESTES SISTÊMICOS	63
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	68

6.1	TRABALHOS FUTUROS	70
6.2	TRABALHOS PUBLICADOS	70
	REFERÊNCIAS	72

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por comunicação rápida e eficaz é uma característica marcante das sociedades atuais, principalmente devido à expansão e difusão da Internet. E a forma mais eficiente de suprir tal demanda é fazendo o uso de tecnologias de comunicação por fibra óptica. Nenhum outro meio conhecido pode suportar as demandas enormes para taxa de transmissão, com confiabilidade e eficiência energética. Desde a implementação comercial de sistemas ópticos de transmissão, na década de 1980, quando a fibra óptica substituiu os fios de cobre e a comunicação por satélite nas transmissões de longas distâncias, a capacidade de transmissão saiu de alguns Gb/s para centenas de Tb/s na atualidade (AGRELL et al., 2016).

O que tornou esse crescimento de capacidade possível foi o desenvolvimento e utilização de sistemas de transmissão com multiplexação por divisão em comprimento de onda (WDM-*Wavelength Division Multiplexing*), em que múltiplas portadoras ópticas, em diferentes comprimento de ondas (canais), são moduladas com sequências de bits independentes e transmitidas em uma mesma fibra (AGRAWAL, 2010), permitindo o uso da grande largura de banda oferecida pelas fibras ópticas. Os sistemas WDM já vinham sendo estudados desde a década de 1980, mas só foram largamente desenvolvidos na década seguinte. Nos anos 2000, as redes ópticas WDM já empregavam tecnologias que permitiram o uso de dezenas de canais com pequeno espaçamento espectral (100 ou 50 GHz) e, por isso, são também chamadas de redes DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*). Assim, a tecnologia DWDM apareceu como uma solução para o aumento do tráfego, possibilitando taxas de transmissão agregadas acima de Tb/s nos enlaces de comunicações ópticas.

As redes ópticas WDM não teriam se estabelecido como solução capaz de suprir altas demandas de tráfego de dados sem o desenvolvimento dos amplificadores ópticos, mais precisamente o amplificador a fibra dopada com érbio (EDFA) (DESURVIRE, 2002). Amplificadores ópticos são um dos principais elementos nos sistemas de transmissão ópticos e têm contribuído para o sucesso do transporte de dados ópticos juntamente com as fibras ópticas de baixa perda, os diodos lasers compactos e o fotodiodo de alta velocidade (AGRELL et al., 2016).

Os EDFAs começaram a ser utilizados em sistemas ópticos a partir de 1990, quando substituíram os regeneradores optoeletrônicos. Antes da amplificação óptica, o sinal óptico era primeiro convertido para o domínio elétrico, passava por etapas de regeneração, incluindo amplificação, era então convertido para o domínio óptico para ser retransmitido. Essa técnica se torna muito complexa e cara no caso de sistemas WDM, pois requer a demultiplexação dos canais individuais e o uso de um regenerador por canal, além de depender da taxa e formato de modulação utilizados. Os EDFAs, por outro lado, podem amplificar toda a banda C das comunicações ópticas (1530 a 1565 nm). Isso é equivalente a 80 canais, se considerarmos um espaçamento de 50 GHz (ITU-T, 2012). Os regeneradores optoeletrônicos passaram a ser

utilizados apenas nos casos específicos em que são necessárias, além da amplificação, as etapas de reformatação e resincronização do sinal. O sucesso do EDFA também se deve ao fato dele amplificar a região espectral de menor atenuação das fibras de sílica (0,2 dB/km em 1550 nm), além de sua alta eficiência energética e baixo custo. Amplificadores ópticos Raman distribuídos (DRA) (HEADLEY; AGRAWAL, 2005) também são muito utilizados em testes experimentais bem sucedidos para aumento de capacidade ou alcance do sistema, mas seu emprego em sistemas comerciais é de longe superado pelos EDFAs, pois DRAs necessitam de lasers de bombeio de alta potência, o que era economicamente e tecnologicamente inviável na época do estabelecimento das redes WDM. No entanto, com o avanço tecnológico e a viabilidade econômica da fabricação de lasers de bombeio de alta potência, o interesse em DRAs tem crescido muito na última década devido a sua característica de baixíssima inserção de ruído, o que é muito desejável nos sistemas atuais e essencial nos futuros sistemas.

O aumento da demanda por comunicação disseminou as redes ópticas WDM que, por sua vez, viabilizou a popularização da Internet. Isso fez com que a demanda por capacidade de transmissão crescesse mais rapidamente, exigindo um crescimento de capacidade e eficiência dessas redes. Assim, para tornar as redes ópticas mais eficientes e aumentar a capacidade de transmissão, foram desenvolvidas as redes ópticas WDM reconfiguráveis (dinâmicas) com o objetivo de flexibilizar a rede óptica por meio do roteamento de comprimentos de onda (adição e remoção de canais), otimizando o uso da infraestrutura através da migração das redes ópticas estáticas ponto a ponto com capacidade fixa de transmissão para redes dinâmicas com capacidade variável e definida de acordo com a demanda por capacidade de transmissão (ZYSKIND; SRIVASTAVA, 2011).

Os elementos que viabilizaram o desenvolvimento das redes ópticas reconfiguráveis foram os multiplexadores de inserção/derivação ópticos reconfiguráveis (ROADM - *Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer*) e os conectores de cruzamento ópticos (OXC - *Optical Cross Connect*) (KEISER, 2014). Os ROADMs são capazes de inserir, retirar e atenuar de forma controlável cada canal ou grupo de canais, o que permite provisionamento de caminhos ópticos, além de possibilitar estratégias de proteção na camada óptica. Os OXCs são dispositivos de rede compostos por chaves ópticas mais sofisticados do que um ROADM e permitem a comutação de qualquer canal de entrada para qualquer saída de fibra. A utilização de componentes como ROADMs e OXCs nas redes ópticas tem se tornado cada vez mais frequente, pois reduzem os custos operacionais (OPEX) e otimizam a utilização da rede, por meio de reconfiguração remota (ZYSKIND; SRIVASTAVA, 2011).

Com o crescimento da dinamicidade das redes ópticas surge a necessidade de emprego de técnicas de controle de ganho, pois com a inserção e retirada dinâmica de canais nos enlaces ópticos, o nível de potência na entrada dos amplificadores pode variar consideravelmente, o que implica em variações no ganho proporcionado aos canais (AGRAWAL, 2010). Dessa forma, o desempenho do sistema pode ser severamente comprometido, pois os canais podem chegar no receptor ora com potência maior que a de saturação ora com potência menor que a de

sensibilidade dos dispositivos de recepção, além do impacto direto na relação sinal ruído óptica (OSNR) dos canais. Nesse contexto, é necessário que os amplificadores ópticos tenham um controle automático de ganho eficaz e que forneçam ganho de forma igual para todos os canais que se propagam por eles, isto é, que tenham uma boa planicidade espectral de ganho.

Os sistemas ópticos também vêm evoluindo no que tange ao aumento da eficiência espectral, com o uso de avançados formatos de modulação, aproveitando muitas das características do sinal óptico (amplitude, fase, frequência e polarização), aumentando a taxa de dados transmitidos por canal. O desenvolvimento de novos moduladores ópticos e conversores digitais analógicos de altíssima taxa de amostragem permitem o uso de formatos de modulação digitais como o QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*) e o M-QAM (*M-Ary Quadrature Amplitude Modulation*) diretamente no domínio óptico (SEIMETZ, 2009; GNAUCK et al., 2012). Com o uso da multiplexação em polarização (PM) ou transmissão em dupla polarização (DP), é possível dobrar a eficiência espectral na mesma frequência. No entanto, como contraponto, a OSNR necessária para decodificação sem erros cresce com o aumento da eficiência espectral provido pelo formato de modulação empregado (NAKAZAWA; KIKUCHI; MIYAZAKI, 2010), ou seja, quanto mais avançado é o formato de modulação mais sensível ele é ao nível de ruído. Dessa forma, para transmissão de altas taxas de dados por longas distâncias, é desejável amplificadores ópticos que insiram pouco ruído.

Assim, no contexto de redes ópticas reconfiguráveis com formatos de modulação avançados, a tendência na evolução dos amplificadores ópticos gira em torno da necessidade de controle de ganho variável e desempenho melhorado em termos da potência de saída, baixa inserção de ruído, planicidade espectral e controle automático de ganho para qualquer valor de ganho requerido. Em busca disso, vem sendo investigado o desenvolvimento de amplificadores ópticos baseados em tecnologias de amplificação ópticas híbridas (LEE et al., 2005; TIWARI; RAJAN; THYAGARAJAN, 2008), sendo as mais promissoras as baseadas em Raman distribuído/EDFA (OLIVEIRA, 2014), pois aliam baixa inserção de ruído dos amplificadores Raman distribuídos com o alto nível de potência de saída dos EDFAs. Portanto, estudos que visam o desenvolvimento e/ou avaliação de amplificadores para redes ópticas reconfiguráveis são de extrema relevância.

Além disso, com a expansão das redes ópticas, uma grande quantidade de amplificadores passam a ser utilizados em redes WDM, principalmente em redes de *backbone*. Isso faz com que a energia elétrica consumida por amplificadores ópticos seja relevante. Estudos mostram que em um enlace óptico o consumo de energia elétrica dos EDFAs é em torno de 14% do consumo total (HEDDEGHEM et al., 2012). Esse consumo pode aumentar consideravelmente se forem usados amplificadores baseados em Raman, devido à sua baixa eficiência de conversão de potência óptica entre bombeio e sinal. Alguns trabalhos abordaram, de alguma forma, o consumo de potência elétrica dos EDFAs como em (CERCOS et al., 2015), mas nenhum estudo fez uma abordagem comparativa de desempenho e consumo de potência elétrica de amplificadores para redes DWDM reconfiguráveis, incluindo o híbrido Raman/EDFA.

1.1 OBJETIVOS

A avaliação experimental comparativa de desempenho óptico e consumo de potência elétrica de amplificadores EDFA de um estágio, EDFA de dois estágios e híbrido DRA/EDFA que podem ser aplicados em redes ópticas DWDM reconfiguráveis é o objetivo principal desta Dissertação de Mestrado. Os objetivos específicos são enumerados a seguir:

1. Avaliação experimental da figura de ruído, planicidade espectral e precisão do controle automático do ganho para os amplificadores ópticos EDFA de um estágio, EDFA de dois estágios e híbrido DRA/EDFA;
2. Avaliação experimental do consumo de potência elétrica detalhada dos amplificadores ópticos EDFA de um estágio, EDFA de dois estágios e híbrido DRA/EDFA;
3. Realização de testes sistêmicos para avaliar a variação da OSNR e BER com o comprimento enlace óptico para os amplificadores EDFA de um estágio, EDFA de dois estágios e híbrido DRA/EDFA.

1.2 DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS

- **Capítulo 2** - Faz uma breve introdução histórica da evolução das redes ópticas WDM, mostrando desde a primeira geração até atuais tendências. O intuito desse capítulo é dar embasamento e contextualizar o cenário do trabalho desenvolvido nesta Dissertação.
- **Capítulo 3** - Mostra os fundamentos teóricos e aplicações dos amplificadores ópticos EDFAs, Raman e híbrido Raman/EDFA. Também são mostradas as topologias de amplificação testadas neste Trabalho. Por fim, é apresentada uma breve revisão bibliográfica do que já foi feito a respeito de estudos sobre consumo de potência elétrica de amplificadores.
- **Capítulo 4** - Apresenta a metodologia e ferramentas utilizadas na realização dos testes experimentais, mostrando como foram feitas as caracterizações para obtenção dos resultados de desempenho óptico e de consumo de potência elétrica. Também é mostrado como foram feitos os testes sistêmicos.
- **Capítulo 5** - Apresenta os resultados experimentais das caracterizações dos amplificadores testados e faz uma análise detalhada. Primeiro, são mostrados os resultados das figuras de mérito de desempenho, como figura de ruído, planicidade espectral e precisão do controle automático do ganho. Logo em seguida, são mostrados resultados do consumo de potência elétrica e, por fim, são apresentados os resultados dos testes sistêmicos por meio da OSNR e BER.
- **Capítulo 6** - Apresenta as conclusões da avaliação experimental realizada e sugere alguns trabalhos futuros na mesma linha de pesquisa.

2 INTRODUÇÃO ÀS REDES ÓPTICAS WDM

Com o objetivo de prover embasamento para uma melhor compreensão e contextualização do trabalho desenvolvido nesta Dissertação, este Capítulo apresenta um breve histórico da evolução das redes ópticas WDM, mostrando, de forma introdutória, desde a primeira geração até as atuais tendências de evolução.

2.1 EVOLUÇÃO DAS REDES ÓPTICAS

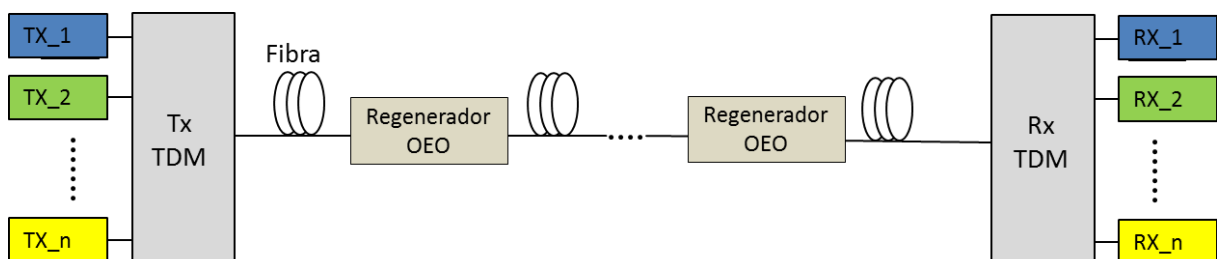
Assim como nos sistemas ópticos, a evolução das redes ópticas pode ser dividida em diferentes gerações (RAMASWAMI; SIVARAJAN; SASAKI, 2009). Essas gerações podem ser descritas pelas principais tecnologias de transmissão/recepção, topologia de rede, multiplexação da comunicação e regeneração de sinais que destacaram-se ao longo dos anos.

2.1.1 Primeira Geração

Na primeira geração, durante a década de 1980, as redes ópticas foram usadas basicamente para substituir os cabos de cobre utilizados para comunicação. Desse modo, surgiram as redes ópticas com topologia ponto-a-ponto fixa (sem roteamentos de tributários ao longo do percurso), nas quais, um enlace de fibra óptica era utilizado para conectar dois nós da rede, onde o sinal óptico era amplificado ao longo do caminho por meio de regeneradores óptico-eletrônico-óptico (OEO) capazes de regenerar um único sinal óptico para uma única taxa e formato de modulação (regeneração não transparente). A Fig. 1 ilustra uma topologia típica das redes ópticas da primeira geração.

A forma de multiplexação de dados mais utilizada nas redes da primeira geração foi a multiplexação por divisão do tempo (TDM - *time division multiplexing*) (AGRAWAL, 2010), em que há transmissão e a recepção de vários sinais independentes (tributários) em um mesmo canal óptico, cada sinal utilizando sua janela de tempo, que pode ser de tamanho fixo (síncrona) ou variável (assíncrono).

Figura 1 – Topologia de rede da primeira geração: sistema ponto-a-ponto com multiplexação TDM monocal, modulação OOK e regeneradores OEO.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os transmissores da primeira geração utilizavam modulação na intensidade (OOK - *On-Off Keying*), por meio de modulação direta nos lasers ou com moduladores Mach-Zehnder. Os receptores mais utilizados nesta geração foram fotodetectores semicondutores PIN (junção-p, semicondutor intrínseco levemente dopado-i, junção-n) e/ou fotodetectores de efeito avalanche (APD) em conjunto com circuito de transimpedância e decisão para detecção direta do sinal modulado.

Os primeiros sistemas de comunicações ópticas ficaram limitados às taxas de transmissão de 100 Mb/s ao longo da década 1980 devido à dispersão modal das fibras multimodo (MMF) (ITU-T G651.1). Essa limitação foi superada com o uso das fibras monomodo padrão (SSMF) (ITU-T G652a/b), que removeram a dispersão modal e reduziram a perda para menos de 0,5 dB/km na região de 1,3 μm (região do espectro óptico utilizada). Com o uso da SSMF em conjunto com lasers semicondutores estáveis em temperatura ambiente, foram disponibilizados sistemas de até 1,7 Gb/s ao longo de 50 km (JACOBS, 1995).

Com a evolução na fabricação de fibras ópticas, a atenuação foi reduzida para menos de 0,25 dB/km na região de 1,55 μm (região espectral que passou a ser utilizada), ao mesmo tempo que lasers semicondutores baseados em *InGaAsP* (também em 1,55 μm) operando em temperatura ambiente foram disponibilizados. Porém, SSMFs possuem um diâmetro do núcleo que varia de 8,6 a 9,5 μm e apresentam altos níveis de dispersão cromática nessa região (aproximadamente 17 ps/nm/km), o que limitava o aumento da capacidade dos sistemas ópticos. Esse problema foi solucionado com o desenvolvimento e uso das fibras de dispersão deslocada (DSF) (ITU-T G653), que possui um diâmetro do núcleo que varia de 7,8 a 8,5 μm e apresenta praticamente zero de dispersão cromática em 1,55 μm , o que permitiu o aumento de capacidade de transmissão para 2,5 Gb/s, 10 Gb/s e até 40 Gb/s (BREUER et al., 1998) ao longo da década de 1990. No entanto, apesar de solucionar o problema da dispersão acumulada, DSFs possuem uma área efetiva relativamente pequena em comparação com SSMFs, o que reduz bastante o limiar de potência que produz efeitos não lineares na fibra, em especial o efeito da mistura de quatro ondas (FWM) (AGRAWAL, 2010). Assim, a capacidade de transmissão multicanal em fibras DSF é drasticamente limitada pela geração de efeitos não lineares. Por essa razão, as DSFs deixaram de ser utilizadas nas gerações seguintes.

Outro grande empecilho para o aumento da taxa e alcance dos sistemas operando na região de 1,55 μm era a necessidade do uso de muitos regeneradores OEO 3R (realinhamento, reformatação e retransmissão), colocados a cada 60-70 km. O problema concentrou-se na falta de escalabilidade dos regeneradores, que eram desenvolvidos para uma determinada taxa e formato de modulação do sinal. Dessa forma, um aumento de taxa e/ou mudança de formato de modulação, exigia mudança de todos os regeneradores instalados ao longo da linha, aumentando bastante os custos de instalação e operação (Capex e Opex) dos sistemas de comunicações ópticas. Assim surgiu a necessidade de um amplificador transparente ao comprimento de onda, formato de modulação e taxa dos sinais transmitidos. Essa quebra de paradigma veio com o desenvolvimento e utilização dos amplificadores ópticos, mais

precisamente EDFAs, que permitiram uma diminuição drástica na quantidade de regeneradores elétricos utilizados nas redes ou os tornaram desnecessários (KEISER, 2014). A utilização de amplificadores ópticos viabilizou o surgimento da multiplexação por comprimento de onda (WDM - *wavelength division multiplexing*) (AGRAWAL, 2010), em que vários canais começaram a ser transmitidos/amplificados ao mesmo tempo em diferentes comprimentos de onda de sinal, dando início a segunda geração dos sistemas de comunicações ópticas no começo da década de 1990.

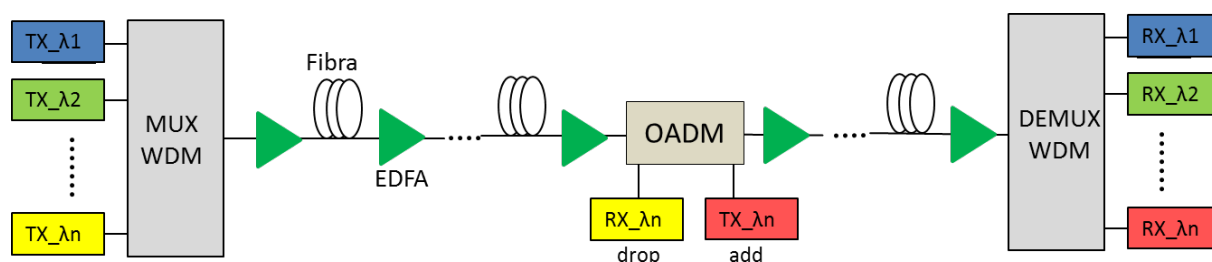
2.1.2 Segunda Geração

Na segunda geração dos sistemas de comunicações ópticas, do início da década de 1990 até metade da década de 2000, a transmissão passou a ser ponto-a-multiponto com roteamento fixo por meio de módulos de adição/remoção óptico (OADM), multiplexação WDM, modulações OOK/DPSK/DQPSK, recepção com detecção direta/balanceada (até 40 Gb/s) e amplificação com EDFAs. A Fig. 2 ilustra uma topologia típica das redes ópticas da segunda geração.

Os transmissores da segunda geração das redes ópticas, que evoluíram por meio do desenvolvimento de novas estruturas de modulação Mach-Zehnder, possibilitaram a modulação em fase e quadratura (IQ), a qual permitiu aumento de taxa/eficiência espectral (de 10 e 40 Gb/s por canal) com o uso de formatos de modulação como a diferencial em fase (DPSK) ou diferencial de fase e quadratura (DQPSK). Os receptores mais utilizados nessa geração eram compostos por decodificadores diferenciais, para formatos diferenciais, em conjunto com fotodetectores semicondutores PIN balanceados para detecção do sinal modulado.

O que mais impactou a evolução da capacidade dos sistemas ópticos de segunda geração foi a multiplexação WDM, tecnologia capaz de multiplexar várias portadoras ópticas (diferentes comprimentos de onda) em uma única fibra. Essa técnica fez a capacidade dos sistemas de comunicação crescer exponencialmente devido à possibilidade de transmissão e recepção de vários sinais (canais) independentes na mesma fibra óptica, apenas separando espectralmente as portadoras de modo a evitar interferências entre canais vizinhos. O que permitiu o estabelecimento dos sistemas WDM foi a utilização do EDFA, devido à capacidade de

Figura 2 – Topologia de rede da segunda geração: sistema ponto-a-multiponto com roteamento fixo (OADM), multiplexação WDM, modulação OOK/DPSK/DQPSK e amplificadores EDFAs.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

amplificar toda banda C (1530 a 1565 nm) de forma independente da taxa e formato de modulação, reduzindo drasticamente os custos de regeneração nos sistemas WDM. Com a utilização das redes WDM e EDFAs, deu-se início a uma revolução nos sistemas ópticos, resultando na duplicação da capacidade transmitida a cada 6 meses, elevando a taxa de comunicação de 10 Gb/s (década de 1990) até 10 Tb/s (primeira metade da década de 2000).

A partir do começo da década de 2000, o aumento das taxas de transmissão nos sistemas WDM foi realizada com base no aumento do número de canais transmitidos. Os primeiros sistemas WDM aproveitaram a região do espectro óptico da banda C, região com menor atenuação da fibra SSMF e por ser região de operação dos EDFAs. Com o crescimento da demanda por comunicações ópticas, novas bandas espectrais para operação dos sistemas de comunicações ópticas foram utilizadas para ampliar a capacidade dos sistemas. As bandas próximas ao mínimo de atenuação da fibra são as bandas S (1460 a 1530 nm), C e L (1565 a 1610 nm). Assim, pesquisas foram iniciadas em busca de novos amplificadores visando amplificação de banda larga, como Raman (BROMAGE, 2004) e baseados em fibra dopada com elementos terra rara além do érbio como em (BASTOS-FILHO, 2005).

Nessa geração, as fibras ópticas mais utilizadas foram a SSMF, a fibra de baixo pico d'água (LWP) (ITU-T G65c/d), a fibra com dispersão deslocada não nula (NZDSF) (ITU-T G.655) e a fibra compensadora de dispersão cromática (DCF) (KEISER, 2014). A LWP é fabricada com uma tecnologia que permite a remoção do pico de absorção na banda E (1,36 a 1,46 μm), que é uma das limitações da SSMF, o que torna viável a operação na faixa de onda completa de 1260 a 1625 nm. Essa fibra é utilizada em sistemas de multiplexação de comprimento de onda amplo (CWDM- *Coarse Wavelength Division Multiplexing*), em que os canais são espaçados de 20 nm, de modo que não exige um sofisticado controle de estabilidade nos lasers transmissores (KEISER, 2014). A NZDSF possui um núcleo de 8 a 11 μm e uma dispersão cromática relativamente baixa que varia de 1 a 10 ps/nm/km em torno de 1,55 μm . Tal fibra foi desenvolvida para solucionar o problema dos efeitos não lineares da DSF, mas, com o passar do tempo e utilização em sistemas reais, verificou-se que o fato da área de seu núcleo ser reduzido impede sua utilização em sistemas com grande quantidade de canais devido aos efeitos não lineares. Já as DCFs possuem um alto e negativo coeficiente de dispersão, em torno de -100 ps/nm/km, e foram utilizadas para compensar a dispersão acumulada de canais que se propagavam por longos comprimentos de SSMFs e de NZDSFs.

O contínuo aumento da demanda por banda tornou necessário o aumento da eficiência espectral dos canais transmitidos, que pode ser feito por meio da redução da ocupação espectral dos canais modulados e/ou a alocação de mais informação no espectro disponível nas redes de comunicações ópticas. Com esse objetivo surgiram os formatos avançados de modulação, juntamente com as redes WDM densas (DWDM). Além disso, devido aos custos de estabelecimento de uma rede WDM, o requisito de uma gerência eficiente da infraestrutura de rede de comunicações ópticas tornou-se mandatório, sendo necessário o desenvolvimento de um elemento de roteamento de canais operado remotamente, o que foi suprido com o

desenvolvimento dos multiplexadores de adição e remoção de canais reconfigurável (ROADM).

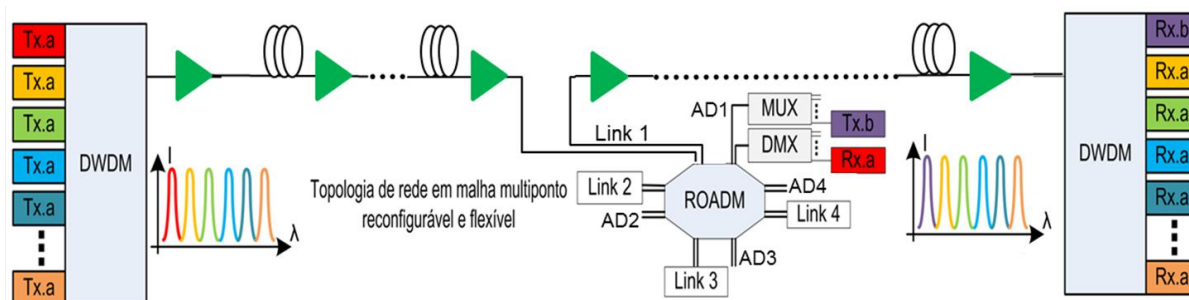
Redes ópticas DWDM com sinais modulados com formatos de modulação avançados e os ROADMs, tornaram as redes mais eficientes, porém trouxeram dificuldades adicionais, pois o aumento da eficiência espectral implica na necessidade de uma maior relação sinal ruído (OSNR) óptica para recepção dos sinais, e a reconfigurabilidade da rede óptica afeta bastante o desempenho do EDFA devido à variação de potência na entrada, afetando o ganho provido aos canais que passam pelo amplificador (ZYSKIND; SRIVASTAVA, 2011).

2.1.3 Terceira Geração

A partir da metade da década de 2000 surgiu a terceira geração dos sistemas de comunicações, que apresentou a maior evolução em termos de aproveitamento da largura espectral (eficiência espectral) da fibra, por meio do uso da multiplexação por divisão de comprimento de onda denso (DWDM), em conjunto com os formatos de modulação avançados e recepção coerente nas redes de comunicações ópticas. Foram implementados transmissores com formatos de modulação avançados de fase e quadratura em dupla polarização (DP-QPSK), receptores com detecção coerente e processamento digital de sinais (DSP) para compensar efeitos lineares impostos pela fibra. Os sistemas evoluíram para multiponto com roteamento reconfigurável (ROADM) dependente de direção/cor/contenção e com grade de canais fixa (espaçamento de 50 ou 100 GHz) e amplificação com EDFAs com controle automático de ganho (AGC - *Automatic Gain Control*) e amplificadores Raman com bombeio fixo. A Fig. 3 ilustra uma topologia típica das redes ópticas da terceira geração.

Uma importante característica das redes da terceira geração é o grande avanço com relação ao uso eficiente das bandas espectrais em um enlace, devido à possibilidade de alocação dinâmica/reconfigurável por meio de roteadores ópticos remotamente reconfiguráveis (ROADM). Com a utilização dos ROADMs, a rede óptica se torna uma rede reconfigurável. Dessa forma, se o tráfego for dinâmico, as potências na entrada dos amplificadores ao longo dos enlaces ópticos se tornam aleatórias. Como os amplificadores ópticos (principalmente os EDFAs) possuem uma dependência muito forte entre o ganho provido e seu nível de potência de entrada, é

Figura 3 – Topologia de rede da terceira geração: sistema multiponto com roteamento reconfigurável (ROADM), multiplexação DWDM, modulação DP-QPSK e amplificadores Raman e EDFAs com AGC.



Fonte: Adaptada de (OLIVEIRA, 2014).

extremamente necessário o uso de AGC nos amplificadores ópticos. Ademais, o amplificador deve prover controle automático de ganho rápido o suficiente (comparado ao tempo de transição entre os níveis de energia dos íons de érbio), para suprimir transientes de potência, evitando a geração de erros na transmissão/recepção de dados (devido a falta de potência durante o transiente), e danos aos componentes ao longo do enlace óptico (devido ao excesso de potência durante o transiente) (ZYSKIND; SRIVASTAVA, 2011).

Os EDFAs com AGC foram desenvolvidos com o objetivo de assegurar a operação da rede, mantendo o ganho alvo do amplificador bem como a planicidade espectral de ganho (para o ganho nominal do amplificador). Já os amplificadores Raman distribuídos passaram a ser usados com o objetivo de prover uma melhora de OSNR para os canais amplificados, por meio da redução da inserção de ruído nos enlaces, atingindo o nível de OSNR requerido para recepção dos sinais com formatos de modulação avançados. Porém, como os amplificadores Raman dessa geração operavam com bombeio fixo, foram empregados somente em sistemas de longa distância semi-estáticos ou com variação de potência baixa e conhecida.

Os transmissores da terceira geração das redes de comunicações ópticas evoluíram por meio da modulação em dupla polarização (DP) QPSK, que, em comparação com o sinal de 10 Gb/s de polarização simples, pulso NRZ e modulação OOK (eficiência espectral 0,5 b/s/Hz) permite um aumento de eficiência espectral de 4 vezes (1 b/s/Hz para o QPSK, com dupla polarização atinge 2 b/s/Hz) (OLIVEIRA, 2014). Com relação à taxa transmitida, quando o modulador DP-QPSK é alimentado por 4 linhas de 25 Gb/s (LANG et al., 2011), uma taxa agregada de 100 Gb/s (WUTH; CHBAT; KAMALOV, 2008) é obtida (10 vezes a mais que os 10 Gb/s da OOK e 2,5 vezes maior que o 40 Gb/s da DQPSK). Assim, o transmissor DP-QPSK é composto por dois moduladores QPSK e um rotacionador de polarização para acoplar os dois sinais modulados em polarizações diferentes.

Nessa geração, o aumento da complexidade dos formatos de modulação permitiu o aumento da eficiência espectral, por outro lado requerendo um aumento da qualidade do sinal (OSNR) necessária para realizar uma recepção livre de erros. Dessa forma, visando uma melhora na sensibilidade do receptor que permita redução da OSNR requerida para recepção livre de erros, surgiu o receptor coerente intradino com diversidade de polarização. Diferentemente da recepção coerente homodina, a qual necessita de uma diferença de fase nula para recepção do sinal, e da heteródina, a qual, para evitar a necessidade dessa diferença de fase nula, requer o uso de componentes eletrônicos que empreguem pelo menos o dobro da banda do sinal recebido, a recepção intradina (SAVORY, 2008) requer um oscilador local que opere próximo à frequência do sinal recebido (porém não necessariamente igual) e requisita que os componentes eletrônicos suportem apenas a banda nominal do sinal a ser recebido, deixando a cargo de algoritmos de processamento digital de sinais a compensação das diferenças.

Devido à capacidade do DSP de compensação de efeitos lineares dos sinais recebidos (SAVORY, 2008), o acúmulo de dispersão cromática com a propagação dos sinais por longas distâncias de fibras, que antes era tido como um problema a ser solucionado por fibras DCF,

assim como a dispersão por modo de polarização (PMD), agora passam a não ser mais problema nos sistemas coerentes.

Os tipos de fibras mais utilizados nos sistemas ópticos dessa geração foram as SSMFs, NZDSFs, LWPs e as fibras de área efetiva larga (LEAF) (ITU-T G654). As fibras LEAF possuem núcleo com diâmetro de 9,5 a 10,5 μm com dispersão cromática de 20 ps/nm/km em torno de 1,55 μm e tem uma perda muito baixa nessa região do espectro óptico, graças a utilização de um núcleo de sílica pura na sua fabricação (KEISER, 2014). Por possuir um núcleo de área larga e maior dispersão cromática (superior à SSMF), a LEAF permite o aumento do limiar de potência que excita os efeitos não lineares, como a auto modulação de fase (SPM- *Self Phase Modulation*) e a mistura de quatro ondas (FWM -*Four Wave Mixing*) (AGRAWAL, 2010). Esses efeitos não lineares restringem a potência de lançamento dos canais nas fibras ópticas e deterioram o sinal ao longo da transmissão. Por essa razão, essas fibras são geralmente utilizadas em aplicações submarinas de longa distância.

Comunicações ópticas nas bandas O (1300 a 1360 nm), E (1360 a 1460 nm), S (1460 a 1530 nm), C, L (1565 a 1610 nm) e U (1610 a 1640 nm) tornaram-se viáveis por meio do uso da fibra LWP e amplificadores Raman distribuídos. Esses puderam ser implementados graças ao desenvolvimento e comercialização dos lasers para bombeio Raman que ultrapassaram a barreira dos 500 mW de potência nos comprimentos de onda na região de 1400 a 1500 nm (FURUKAWA, 2012) para amplificação das bandas C, L e U, e dos lasers de bombeio na região de comprimentos de onda de 1200 a 1400 nm para amplificação nas bandas O, E e S (INNOLUME, 2014a; INNOLUME, 2014b). A utilização dessas bandas depende do número de canais desejado.

2.1.4 Tendências de Evolução

A nova geração dos sistemas de comunicações ópticas teve início a partir de 2010 e continua em evolução até os dias de hoje. Essa geração vem apresentando uma nova quebra de paradigma com relação à multiplexação de sinais e novas fibras ópticas, apresentando várias inovações em termos de eficiência espectral dos transmissores/receptores, maior flexibilidade para os roteadores ópticos (ROADMs), além de novas tecnologias de amplificação e/ou novas funcionalidades de controle que visam maximização do desempenho óptico para sistemas reconfiguráveis.

A atual tendência mostra que, para acompanhar o crescimento da demanda, as redes ópticas devem atender a alguns requisitos (AGRELL et al., 2016): transmissão de multi-portadoras com formato de modulação avançado e ocupação espectral flexível com m-portadoras DP-nQAM (200 Gb/s, 400 Gb/s, 1 Tb/s e além); recepção de multi-portadoras coerente com processamento digital de sinais compensando efeitos lineares e não lineares impostos pela fibra; sistema multiponto (rede em malha) com roteamento reconfigurável independentemente de cor (*colorless*), direção (*directionless*), contenção (*contentionless*) e com espaçamento de canais flexível (granularidade de 12,5 GHz de espaçamento); sistema multicanal, multi núcleo e multimodos (com poucos modos) com multiplexação DWDM, divisão espacial (SDM) e divisão

modal (MDM); e uso de amplificadores ópticos com tecnologias híbridas (EDFA e Raman) com controle automático de ganho visando ganho espectral plano e baixa figura de ruído ao longo de toda região de operação do amplificador. A Fig. 4 ilustra uma topologia típica das redes ópticas da terceira geração.

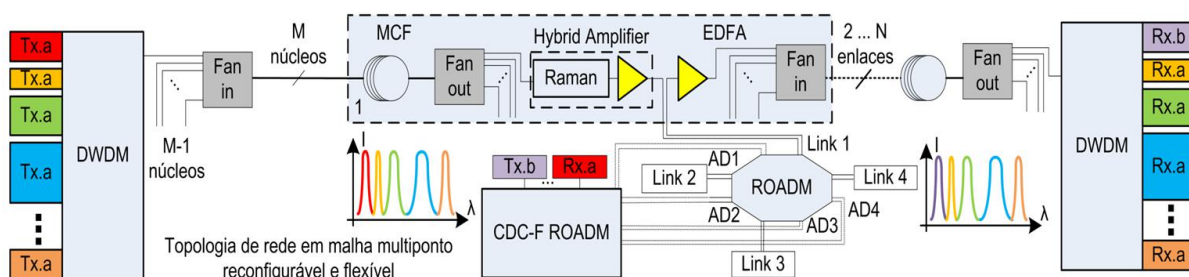
Com o aumento exponencial da demanda por largura de banda, torna-se ainda mais necessário o aumento da eficiência espectral dos canais transmitidos, que pode ser atingida com a evolução dos formatos de modulação DP-QPSK para DP-nQAM (n igual a 16 resulta em eficiência espectral de 8 b/s/Hz, com n igual a 32 eficiência espectral de 16 b/s/Hz e assim por diante), pois, com o desenvolvimento dos moduladores de LiNbO_3 , a codificação de um maior número de bits na constelação do sinal transmitido tornou-se o meio preferencial para aumento da eficiência espectral no transmissor óptico.

Para transmissão de múltiplos símbolos, o transmissor DP-nQAM da nova geração é composto por um laser contínuo que tem suas polarizações separadas por um divisor de polarização (PBS), sendo modulado em dois moduladores QPSK (compatíveis com ambas polarização TE ou TM). Porém, ao invés do uso da estratégia das quatro linhas digitais de alta frequência para modulação DP-QPSK, agora é utilizado um conversor digital analógico (DAC) de altíssima taxa de amostragem, 65 GSa/s e 8-bits, que permite a geração de até 256 níveis, ou seja, modulação 16, 32, 64 e até 256-QAM, os quais após recombinação via PBS na saída do transmissor, geram o sinal óptico modulado DP-nQAM. Para geração do sinal com qualidade, torna-se cada vez mais necessário a utilização de lasers com largura de linha muito estreita (< 100 kHz) e DACs com alta taxa de amostragem (> 25 GSa/s).

Com relação as técnicas avançadas de modulação, a evolução deve focar no desenvolvimento de canais com taxas de 400 Gb/s e 1 Tb/s com OFDM ou DP-nQAM com recepção coerente. A chave desta evolução se concentra no desenvolvimento da eletrônica de alta velocidade baseada na tecnologia CMOS e integração fotônica, assim como a integração híbrida (fotônica/eletrônica).

Com a implementação de canais com os formatos de modulação avançados, o nível

Figura 4 – Topologia de rede flexível dinamicamente reconfigurável: sistema multi-ponto reconfigurável com ROADMs independentes de cor/direção/contenção e flexível (CDC-F); multiplexação DWDM e por divisão espacial SDM; transmissão com modulação DP-nQAM; amplificadores híbridos com AGC (Raman/EDFA).



Fonte: Extraída de (OLIVEIRA, 2014).

de OSNR necessário para decodificar sem erros o sinal transmitido é bastante elevado quando comparado aos formatos de modulação tradicionais. Desta forma, são extremamente necessárias técnicas de codificação de canais ópticos para redução da OSNR para recepção dos canais com formatos de modulação avançados. Para isso, são requeridas novas técnicas de correção de erros (FEC). A tendência será a utilização de FEC com decisão via hardware (HD-FEC) e via software (SD-FEC), e aumento do código de redundância de erro de 7% para 23% (AGRELL et al., 2016).

Mesmo com o grau de reconfigurabilidade fornecido pelos ROADMs, nota-se que a estrutura da terceira geração é bastante rudimentar em termos da flexibilidade de adição e remoção dos canais, com relação a cor (mux/demux fixam as cores nas portas do ROADM), direção (cada cor deve ingressar e regressar em uma determinada porta de add/drop para que possa ser adicionado ao enlace desejado), contenção (canais da mesma cor não podem ser alocados em diferentes fibras de saída devido a interferência entre eles ao passar pelo ROADM) e principalmente flexibilidade de alocação espectral (na terceira geração a grade foi fixada em 100 ou 50 GHz de espaçamento espectral por canal).

Devido à dependência de cor/direção/contenção e da grade espectral fixa de alocação de comprimentos de onda, a eficiência espectral da infra-estrutura de rede com ROADMs da terceira geração pode evoluir significativamente. Com essas deficiências, tornou-se necessário o desenvolvimento de estruturas (cartões de linha) de adição e remoção de canais nos ROADMs, visando a flexibilização da adição e remoção de canais nestes entroncamentos de rede, tornando suas entradas e saídas independentes de cor, direção, contenção e com espaçamento espectral flexível (CDC-F) (ZYSKIND; SRIVASTAVA, 2011). O nó ROADM ilustrado na Fig. 4 é internamente composto por chaves seletoras no comprimento de onda (WSS) com grade flexível de 12,5 GHz de granularidade espectral, onde o módulo CDC-F ROADM consiste em módulos *multi-cast-switch* (MCS), chaves WSS flexgrid e amplificadores ópticos para compensação das perdas dos dois elementos anteriores, interligados de forma a possibilitar a adição e remoção de canais CDC-F (WAY, 2012).

Na terceira geração dos sistemas de comunicações ópticas, diversos métodos de controle automático de ganho (AGC) foram desenvolvidos para EDFAs com o objetivo de manter o desempenho óptico em redes reconfiguráveis, enquanto que amplificadores Raman distribuídos foram usados com bombeio fixo visando prover uma melhora de OSNR em sistemas não dinâmicos. Nesta nova geração, será extremamente desejável o desenvolvimento de amplificadores ópticos híbridos (Raman/EDFA), e sua respectiva técnica de controle automático de ganho (controlando ambas as tecnologias), para melhorar o desempenho em todos os pontos de operação de uma rede reconfigurável (ganho espectral plano aliado a baixa figura de ruído e controle com supressão de transientes).

3 AMPLIFICADORES EDFAS, RAMAN E HÍBRIDO RAMAN/EDFA

A distância de transmissão de qualquer sistema de comunicação por fibra óptica é principalmente limitada pelas perdas da fibra (AGRAWAL, 2010). Até metade da década de 1990, esse problema era contornado com o uso de regeneradores opto-eletrônicos, onde havia conversão opto-elétrica do sinal, regeneração, conversão eletro-óptica e retransmissão. Com a evolução dos sistemas WDM, o uso desses regeneradores se tornou caro e complexo, pois requeria demultiplexação e regeneração individual dos canais, aumentando o número de dispositivos com o aumento do número de canais. Uma alternativa encontrada para gerenciar perdas na fibra óptica foi o uso de amplificadores ópticos, o que permitiu aumentar consideravelmente a capacidade de transmissão nas redes ópticas WDM. Diversos tipos de amplificadores ópticos foram desenvolvidos na década de 1980 e, na década seguinte, a utilização deles em sistemas ópticos se tornou comum. Dentre as várias tecnologias de amplificação óptica desenvolvidas (WASFI, 2009), as mais conhecidas e estudadas são as baseadas em amplificadores a fibra dopada com érbio (EDFA) (DESURVIRE, 2002) e amplificadores Raman (HEADLEY; AGRAWAL, 2005). A tendência atual é a de usar tecnologias de amplificação óptica híbrida (MASUDA et al., 2000; TIWARI; RAJAN; THYAGARAJAN, 2008), sendo a mais promissora as baseadas em Raman distribuído (DRA) com EDFA (OLIVEIRA et al., 2013). Os fundamentos teóricos, os parâmetros básicos e os tipos de amplificadores EDFAs, bem como as topologias testadas neste Trabalho, são mostrados na Seção 3.1. A fundamentação teórica, os tipos, as limitações e aprimoramentos de amplificadores Raman são abordados na Seção 3.2. Os amplificadores híbridos Raman/EDFA e a topologia testada neste Trabalho são descritos na Seção 3.3. Na Seção 3.4 são descritos os principais trabalhos sobre o consumo de potência elétrica.

3.1 AMPLIFICADORES A FIBRA DOPADA COM ÉRBIO

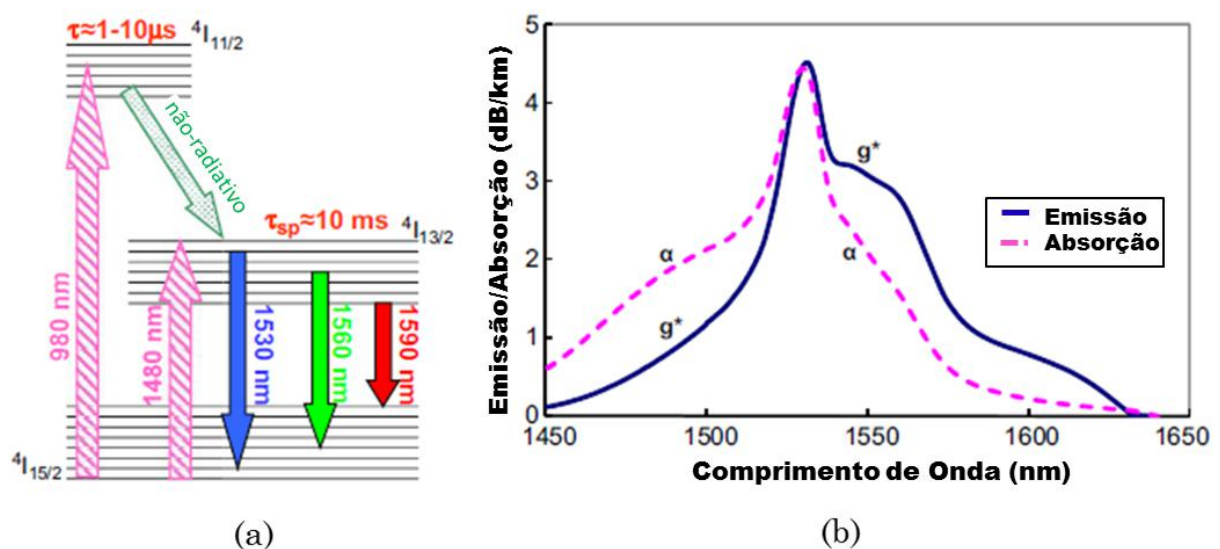
Amplificadores a fibras dopadas com terras raras foram estudados em 1964 (KOESTER; SNITZER, 1964), mas só vieram a ser utilizados na prática mais de 25 anos depois, com o aperfeiçoamento das técnicas de fabricação (POOLE et al., 1986). Entre os terras raras, o érbio é o elemento mais adequado para a implementação de amplificadores que operem na região da banda C, pois podem emitir fótons com energia que casam justamente com essa banda. O emprego de EDFAs em sistemas WDM após 1995 revolucionou a comunicação por fibra óptica, pois tornou viável a transmissão simultânea de muitos canais ópticos por longas distâncias, elevando a capacidade de transmissão para além dos Tb/s (AGRAWAL, 2010). Amplificadores a fibra dopada com érbio apresentam funcionalidades bastante atraentes, como a amplificação em uma larga faixa de canais, baixa complexidade e baixo custo de implementação (DESURVIRE, 2002). Por isso, esses amplificadores são os mais conhecidos e utilizados em sistemas de comunicações ópticas de alta capacidade.

3.1.1 Princípio de Funcionamento

O principal elemento de um EDFA é uma fibra monomodo dopada com íons de érbio (Er^{3+}). A amplificação ocorre pela interação ressonante da luz que se propaga na fibra com os íons Er^{3+} , como no esquema de três níveis de energia mostrado na Fig. 5 (ZYSKIND; SRIVASTAVA, 2011). A característica mais importante no érbio é que a transição entre o primeiro estado excitado ($^4I_{13/2}$) e o estado fundamental ($^4I_{15/2}$) corresponde aos comprimentos de onda de fótons (aproximadamente 1530 a 1560 nm) para os quais a atenuação em fibra de sílica é menor. A amplificação é alcançada invertendo a população no primeiro estado excitado com bombesios típicos em 980 ou 1480 nm. Por apresentarem melhor figura de ruído e eficiência, os lasers de bombeio em 980 nm são os mais utilizados na construção de EDFAs.

Em condições normais na fibra dopada com érbio, o sinal óptico de bombeio incidente é absorvido pelo material e, se a energia desse sinal corresponder à diferença entre dois níveis de energia do Er^{3+} , alguns dos elétrons absorvem os fótons incidentes e saltam para o estado excitado $^4I_{13/2}$ (processo de absorção de fótons) (BECKER; OLSSON; SIMPSON, 1999). O tempo de vida dos elétrons nesse estado é relativamente longo (10 ms), o que possibilita um acúmulo de elétrons e consequente inversão de população em relação ao estado fundamental. Nessas condições, fótons de sinal que incidem na fibra dopada com érbio conseguem estimular o decaimento dos elétrons para o estado fundamental e, dessa maneira, outros fótons são emitidos de forma coerente, na mesma direção de propagação, fase e frequência dos originais, o que resulta na amplificação (BECKER; OLSSON; SIMPSON, 1999). Esse fenômeno é chamado de emissão estimulada. Já os elétrons dos níveis excitados que não são estimulados a voltar ao nível

Figura 5 – (a) Esquema dos três primeiros estados energéticos e transições do érbio. (b) Espectro do coeficiente de emissão, g^* , e do coeficiente de absorção, α , para uma típica fibra dopada com érbio e co-dopada com alumínio.



Fonte: Extraída de (ZYSKIND; SRIVASTAVA, 2011).

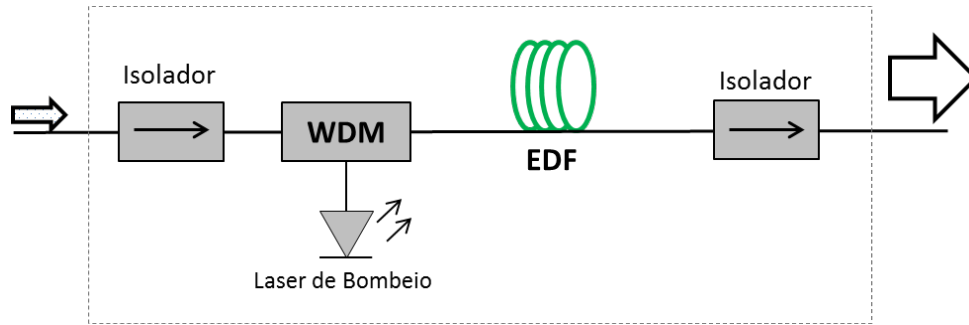
fundamental, decaem espontaneamente e emitem fótons de maneira espontânea, com direção, fase e comprimento de onda aleatórios. Esses fótons aleatórios podem estimular a emissão de outros idênticos a ele e assim sucessivamente. Esse fenômeno é chamado de emissão espontânea amplificada (ASE) e representa a principal fonte de ruído dos EDFAs (BECKER; OLSSON; SIMPSON, 1999).

No início da utilização comercial dos EDFAs, realizava-se bombeamento com lasers de 1480 nm para promover a transição ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ e assim levar o amplificador à condição de inversão de população. Posteriormente, devido a melhor eficiência de bombeio (menor potência requerida para atingir a inversão de população) e menor figura de ruído apresentada, passou-se a utilizar lasers em 980 nm que promovem a transição do estado ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ (estado metaestável) e, em seguida, a transição ${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$. (DESURVIRE, 2002). Uma vez que o tempo médio de vida no nível ${}^4I_{13/2}$ é superior ao tempo médio de vida no nível ${}^4I_{11/2}$ (aproximadamente 10 μ s), a quantidade de íons acumulada no nível ${}^4I_{13/2}$ é superior à quantidade de elétrons que migra do nível ${}^4I_{13/2}$ para o nível ${}^4I_{15/2}$ e, dessa maneira, a condição de inversão de população é rapidamente atingida (DESURVIRE, 2002).

Deve-se frisar que os níveis de energia do érbio são degenerados e, desta forma, compostos por bandas estreitas de energia. Consequentemente, as transições entre estas bandas não geram fótons apenas em 1550 nm, mas também em uma larga faixa em torno desse comprimento de onda. Contudo, os decaimentos radiativos que geram os fótons em diferentes comprimentos de onda dependem das probabilidades quânticas de distribuição de portadores nos subníveis e das transições entre estes diferentes subníveis das duas bandas distintas. É de se esperar, então, que as probabilidades de transições entre cada subnível sejam distintas e, consequentemente, a taxa de inversão de população para cada subnível em particular também será distinta. Logo, o EDFA apresenta ganhos diferentes para comprimentos de onda diferentes, como pode ser visto na Fig. 5(b), onde é mostrado o perfil de emissão e absorção do érbio em função do comprimento de onda.

Para realizar simultaneamente o acoplamento do sinal e bombeio na fibra dopada com érbio, usa-se um acoplador multiplexador de comprimento de onda, também denominado acoplador WDM. Trata-se de um dispositivo com 3 (ou 4) portas ópticas, desenvolvido para combinar duas faixas de comprimentos de onda específicos injetados nas duas portas de entrada. Por exemplo, um acoplador 980/1550 permite combinar o bombeio em 980 nm e o sinal em 1550 nm em uma única fibra. A configuração básica de um amplificador a fibra dopada com érbio é apresentada na Fig. 6. No amplificador óptico, isoladores são usados para reduzir reflexões advindas dos conectores de entrada e de saída. Os dispositivos ópticos que compõem o amplificador óptico podem ser conectados em várias possíveis configurações que permitem otimizar diferentes características do amplificador. Além disso, outros dispositivos ópticos podem ser necessários na montagem do amplificador, dependendo da aplicação para a qual o amplificador será projetado.

Figura 6 – Exemplo de montagem básica do EDFA.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

3.1.2 Parâmetros Fundamentais

Os três parâmetros básicos para a caracterização de amplificadores são o ganho, a figura de ruído e potência de saída. O ganho, em decibéis, é definido como o logaritmo da razão entre a potência do sinal na saída e a potência do sinal na entrada do amplificador, isto é:

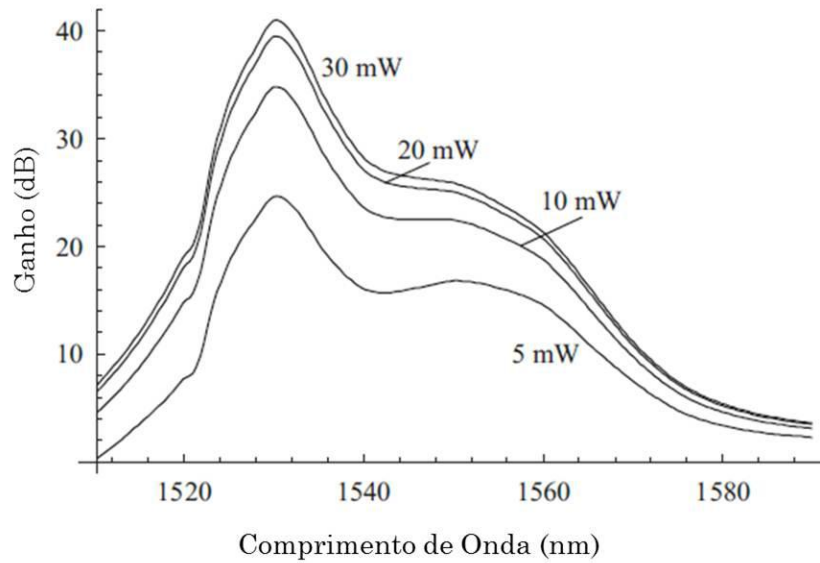
$$G(dB) = 10 \log \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right). \quad (1)$$

A potência do sinal na entrada é medida por meio de um medidor de potência ou de um analisador de espectro óptico. A medida da potência do sinal na saída do amplificador requer necessariamente o uso de um analisador de espectro óptico, pois na saída está presente também a emissão espontânea amplificada (ASE). Para obter a potência do sinal de saída, é necessário subtrair o nível de ASE no comprimento de onda do sinal da potência total de saída.

O ganho depende do nível de sinal na entrada no amplificador. Para potências de entrada abaixo de um certo valor, o ganho é constante e esta é a chamada região de operação linear do amplificador. Com o aumento da potência de sinal na entrada, o ganho passa a diminuir, isto é, o amplificador começa a apresentar saturação. O ganho de pequeno sinal é o valor de ganho para uma baixa potência de sinal injetado no amplificador, ou seja, para a região de operação linear do amplificador. Como já foi observado, o ganho do EDFA depende do comprimento de onda. Portanto, o valor do ganho é medido para um dado comprimento de onda. A dependência do ganho de pequeno sinal com o comprimento de onda é semelhante à variação espectral da Fig. 7, onde é mostrado o ganho de um EDFA típico em função do comprimento de onda para diferentes valores de potência de bombeio. O ganho na região saturada é bem mais plano do que o ganho de pequenos sinais, isto é, apresenta muito menos dependência com o comprimento de onda do sinal na entrada. Uma solução possível para tornar o ganho plano é o uso de um filtro aplainador de ganho (GFF) (SARGENT, 2004), que é um filtro óptico passivo customizado que pode aplicar um perfil fixo de perda espectral em um sinal óptico que passa através deste dispositivo.

A figura de ruído indica a degradação da relação sinal-ruído causada pelo amplificador. A principal fonte de ruído introduzida pelo amplificador é a ASE emitida pela fibra dopada com

Figura 7 – Espectro do ganho de um EDFA típico em função do comprimento de onda para quatro valores de potência de bombeio em 1480 nm.



Fonte: Extraída de (RAMASWAMI; SIVARAJAN; SASAKI, 2009).

érbio. A expressão que define a figura de ruído é descrita pela Eq. (2),

$$NF = 10 \log \left(\frac{OSNR_{in}}{OSNR_{out}} \right), \quad (2)$$

em que $OSNR_{in}$ e $OSNR_{out}$ são respectivamente as relações sinal/ruído ópticas na entrada e saída do amplificador.

A figura de ruído pode ser medida de várias formas diferentes (BECKER; OLSSON; SIMPSON, 1999). A técnica mais usada consiste em medir a figura de ruído com base no nível de ASE no comprimento de onda do sinal. Para medir o nível de ASE no sinal, faz-se uma interpolação do nível de ASE medido no OSA, no comprimento de onda do sinal, e calcula-se a figura de ruído a partir da Eq. (3) (BECKER; OLSSON; SIMPSON, 1999),

$$NF = 10 \log \left(\frac{P_{ASE}}{h\nu G \Delta\nu} + \frac{1}{G} \right), \quad (3)$$

em que P_{ASE} se refere à potência da ASE, h é a constante de Planck, ν é a frequência do sinal, $\Delta\nu$ é a largura de banda de medida do sinal e G é o ganho medido.

A potência de saída de um amplificador óptico é a potência amplificada para uma dada potência de entrada. Uma definição importante é a potência de saída saturada, que é definida como sendo a potência medida na saída, na condição de 3 dB de redução de ganho, isto é, no ponto em que a potência de entrada é tal que o ganho sofra uma redução de 3 dB em relação ao ganho de pequeno sinal. Para obtenção da potência de saída saturada do amplificador óptico, traça-se a curva de ganho em função da potência de saída e observa-se qual a potência de saída para qual o ganho caiu 3 dB. Esta curva é chamada de curva de saturação do amplificador.

3.1.3 Otimização do Desempenho em EDFAs

Os amplificadores a fibra dopada com érbio comerciais são usualmente bombeados em dois comprimentos de onda diferentes, tipicamente um laser de bombeio em 980 nm ou 1480 nm. Os amplificadores bombeados por diferentes comprimentos de onda, apresentam diferentes características, que serão discutidas a seguir.

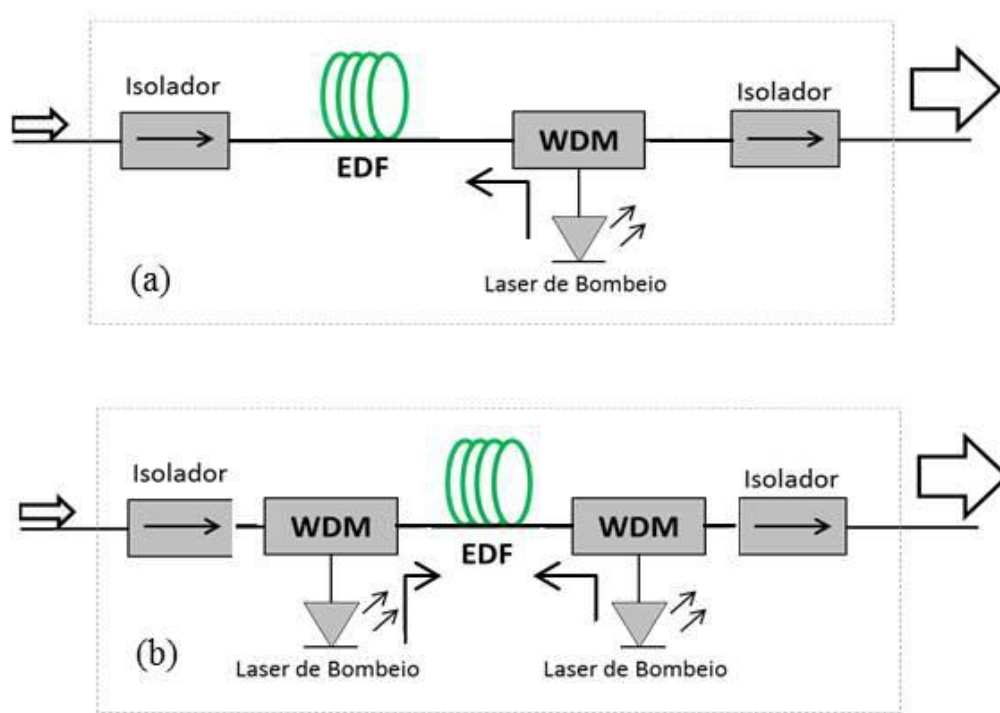
Nos primeiros amplificadores a fibra dopada com érbio, usava-se o comprimento de onda do laser de bombeio em 1480 nm. O laser nesse comprimento de onda já se encontrava desenvolvido, fabricados a partir de mudanças na composição do material do laser de sinal, que emite originalmente em torno de 1550 nm. Com a utilização do laser de bombeio em 980 nm, observou-se uma série de vantagens comparativamente ao laser de bombeio em 1480 nm. Como a radiação do laser 980 nm fica mais confinada no núcleo da fibra dopada, isso faz com que a absorção em 980 nm seja maior, permitindo espectralmente uma fibra mais curta para a fabricação do amplificador. Mais uma vantagem se dá ao fato do comprimento de onda do sinal, 1550 nm, estar mais afastado de 980 nm do que 1480 nm. Neste caso, quando a fibra é bombeada em 1480 nm, há reemissão deste comprimento de onda, o que leva a uma redução da eficiência para baixas potências de entrada e uma consequente degradação da relação sinal-ruído. Como consequência, a figura de ruído de amplificadores bombeados por laser em 980 nm pode chegar a ser até 2 dB menor do que aquela obtida bombeado por laser em 1480 nm (BECKER; OLSSON; SIMPSON, 1999). Existem outras vantagens não diretamente relacionadas à fibra dopada com érbio. Uma delas é que o laser de 980 nm fornece uma dada potência operando em uma corrente menor do que seria necessário para o laser de 1480 nm. Outra vantagem se dá pela razão de extinção em acopladores WDM 980/1550 ser maior que a mesma nos acopladores WDM 1480/1550.

Quanto ao esquema de bombeio, existem três configurações básicas para o bombeio que otimizam diferentes parâmetros. Assim, cada configuração de bombeio é mais indicada para cada uma das aplicações. Em relação ao sentido de propagação do bombeio na fibra dopada com érbio, o bombeio é classificado com relação ao sentido de propagação do sinal, e pode ser do tipo copropagante (mesmo sentido de propagação do sinal), contrapropagante (sentido contrário de propagação do sinal) ou bidirecional (BECKER; OLSSON; SIMPSON, 1999). Para obtenção destas configurações, é necessário posicionar acopladores WDM e isoladores adequadamente na montagem do amplificador. A configuração de bombeio copropagante, mostrada na Fig. 6, é indicada para projeto de pré-amplificadores, pois minimiza o nível de ASE na saída do amplificador, consequentemente reduzindo sua figura de ruído. Essa configuração é indicada também para compor o primeiro estágio de amplificação de um amplificador de linha. A configuração de bombeio contrapropagante, mostrada na Fig. 8(a), maximiza o nível da potência de saída do amplificador (em detrimento de figura de ruído), devido a máxima potência de bombeio estar acoplada na saída da fibra dopada. Com isto, esta configuração é indicada para aplicação em amplificadores de potência. Na configuração de bombeio bidirecional, mostrada na Fig. 8(b), são necessários dois acopladores WDM para acoplar bombeio em ambas

as extremidades da fibra. Pode-se usar dois lasers de bombeio ou um único laser de bombeio compartilhado via divisor de potência, para fornecer potência de bombeio para cada uma das extremidades da fibra dopada. O amplificador com bombeio duplo apresenta alto ganho e alta potência de saída, podendo ser utilizado em configurações de amplificadores de potência e amplificadores de linha.

O amplificador ideal deve apresentar alto ganho e baixa figura de ruído. Entretanto, usando qualquer uma das configurações descritas anteriormente, não é possível obter ambas as características simultaneamente. Uma solução que mais se aproxima de tal requisito é baseada na utilização de amplificadores de múltiplos estágios de amplificação. Para isso, são utilizados dois ou mais trechos de fibra dopada, bombeados por diferentes lasers de bombeio ou um laser de bombeio compartilhado, permitindo otimizar cada parâmetro separadamente. Amplificadores de dois ou mais estágio também podem ser utilizados para se inserir elementos tais como compensadores de dispersão ou *add-drops* ópticos entre os estágios. Como o segundo ou os demais estágios funcionam em saturação, a perda do dispositivo não será compensada por um aumento do ganho deste estágio, porém, caso o elemento inserido entre os estágios adicione perda ao sinal, a figura de ruído será afetada negativamente (ZYSKIND; SRIVASTAVA, 2011).

Figura 8 – Exemplo de montagem básica do EDFA com configurações de bombeio (a) contrapropagante e (b) bidirecional.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

3.2 AMPLIFICADORES ÓPTICOS RAMAN

Pesquisas em amplificação Raman em fibras ópticas começaram no início da década de 1970 (STOLEN; IPPEN, 1973) e seus benefícios na transmissão por fibra já vinham sendo investigados desde a metade da década de 1980 (MOLLENAUER; GORDON; ISLAM, 1986; MARTINS-FILHO, 1991). Contudo, o ganho Raman requer muita potência de bombeio, dezenas de miliwatt por dB de ganho, quando comparado com o EDFA, que requer décimos de miliwatt por dB de ganho. Essa desvantagem, associada à escassez de lasers com alta potência em comprimentos de onda adequados, fez com que as pesquisas com amplificadores Raman fossem preteridas durante a comercialização dos EDFAS no início da década de 1990 (HEADLEY; AGRAWAL, 2005).

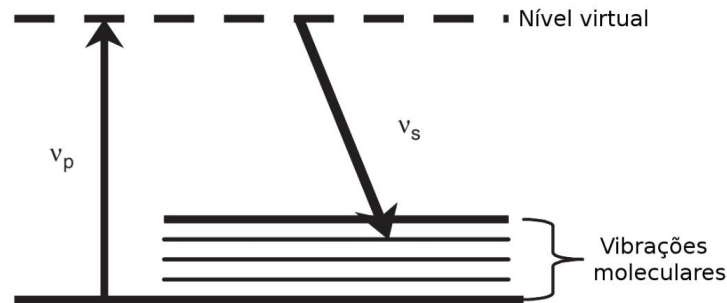
Com o desenvolvimento de lasers de bombeio de alta potência adequados, na metade da década de 1990, houve uma renovação no interesse de pesquisas na amplificação Raman e vários estudos da época mostram algumas das vantagens dos amplificadores Raman sobre os EDFAS, como em (HANSEN et al., 1997; NIELSEN et al., 1999). Isso, por sua vez, alavancou os avanços em tecnologias de bombeio Raman. Desde então, tecnologias de amplificação baseadas em Raman são utilizadas para aumentar o produto capacidade-distância de transmissão em sistemas ópticos.

3.2.1 Amplificação Raman

A amplificação Raman ocorre devido ao efeito não linear conhecido como espalhamento Raman (AGRAWAL, 2007), no qual a luz incidente em um meio é convertida para uma frequência mais baixa, com a parte da energia restante sendo transformada em fônon (vibrações moleculares). Isso é ilustrado na Fig. 9, que mostra o espalhamento por uma molécula de um fóton de energia $\hbar\nu_p$ para um de menor frequência com energia $\hbar\nu_s$. Ou seja, o fóton do bombeio, ν_p , excita uma molécula para um nível virtual mais alto (estado não ressonante), que decai rapidamente para um nível mais baixo de energia, emitindo um fóton de sinal, ν_s . A diferença na energia entre o fóton do sinal e do bombeio é dissipada por um fônon gerado pelas vibrações moleculares do material hospedeiro (núcleo da fibra). Esses níveis de vibrações determinam a frequência do deslocamento e a dependência espectral da curva de ganho Raman. A diferença entre a frequência (comprimento de onda) do fóton do bombeio e do sinal ($\nu_p - \nu_s$) é chamada de deslocamento de Stokes, e o seu pico de frequência ocorre em torno de 13,2 THz para o caso das fibras ópticas padrão com núcleo dopado com Germânio (BROMAGE, 2004). A curva de ganho Raman é razoavelmente larga nas fibras ópticas devido à natureza amorfa da sílica. A Fig. 10 mostra o espectro do ganho Raman para três tipos de fibra óptica (SMF, DSF e DCF).

O espalhamento Raman também pode ser estimulado por um sinal em uma frequência apropriada deslocada da frequência do bombeio, que é o efeito conhecido como espalhamento Raman estimulado (SRS - *stimulated Raman scattering*) (BROMAGE, 2004). Nesse processo, bombeio e sinal são coerentemente acoplados pelo processo Raman. Assim, um fóton de bombeio

Figura 9 – Diagrama esquemático do processo quântico do espalhamento Raman.

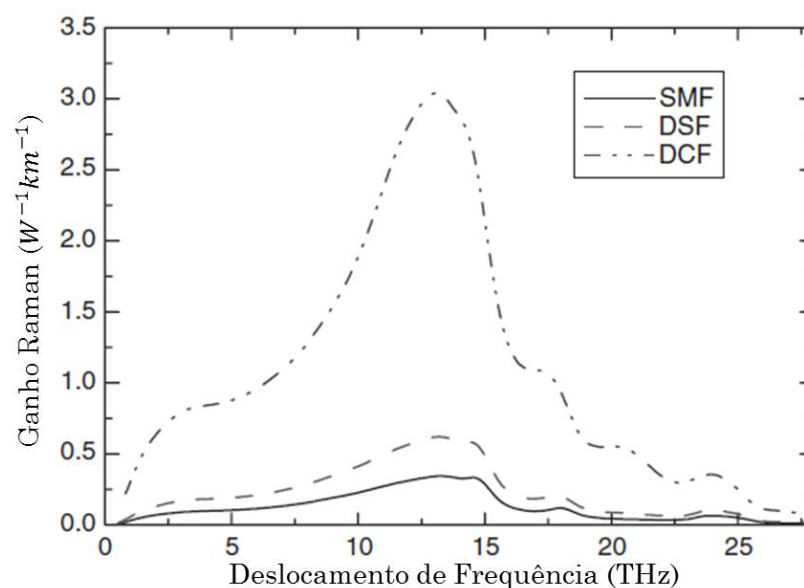


Fonte: Extraída de (HEADLEY; AGRAWAL, 2005).

é convertido em um segundo fóton de sinal que é uma réplica exata do primeiro, gerando amplificação. A energia restante produz um fônon óptico, como já explicado anteriormente.

As seguintes propriedades fundamentais de ganho devido ao SRS podem ser destacadas: O ganho Raman possui uma característica espectral que depende da separação de frequência entre o bombeio e o sinal, e não da frequência absoluta; não depende da direção relativa entre o bombeio e o sinal; o ganho pode ocorrer para qualquer comprimento de onda de sinal, dependente da escolha do comprimento de onda do bombeio; o ganho Raman é dependente da polarização, sendo que o pico da intensidade de acoplamento entre o sinal e o bombeio é aproximadamente uma ordem de magnitude maior se forem co-polarizados, quando comparado ao caso ortogonalmente polarizado; o espalhamento Raman é um processo rápido (fração de pico segundo) por não ser ressonante (o estado mais alto é virtual) e ocorre em qualquer tipo de

Figura 10 – Espectro do ganho de Raman para fibras DCF, SMF e DSF.



Fonte: Extraída de (HEADLEY; AGRAWAL, 2005).

fibra óptica.

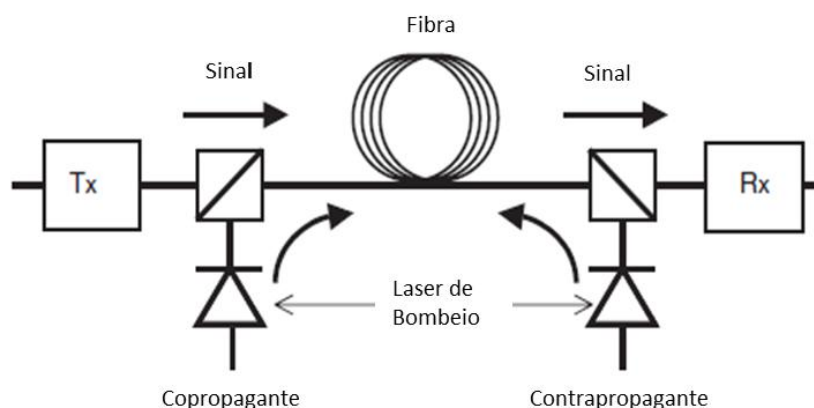
A Fig. 11 ilustra um diagrama esquemático de um sistema de telecomunicações que utiliza amplificadores Raman. O sinal se propaga de Tx para Rx. Se a fibra bombeada é o enlace de transmissão, que liga dois pontos, esta configuração é referida como amplificação Raman distribuída. Se a amplificação Raman ocorre em uma fibra contida num dispositivo localizado no transmissor, em algum elemento de linha ou no receptor, este sistema é chamado amplificação Raman discreta. Tipicamente, amplificadores Raman distribuídos são implementados em seções de fibra que excedem 50 km de comprimento enquanto que amplificadores discretos possuem comprimentos em torno de 5 km (HEADLEY; AGRAWAL, 2005). Fibras com área efetiva reduzida e composição química diferente são utilizadas em amplificadores discretos, para fornecerem coeficiente de ganho Raman maior que as fibras de transmissão, permitindo comprimentos de fibra reduzidos, para prover o mesmo nível de ganho que os fornecidos pelos amplificadores distribuídos (HEADLEY; AGRAWAL, 2005).

Como os amplificadores distribuídos fornecem ganho ao longo da fibra de transmissão (que possuem geralmente longos comprimentos), eles oferecem baixos valores de potência de saída, porém, fornecem melhor figura de ruído que os amplificadores discretos. Os amplificadores discretos por sua vez, podem fornecer altos valores de potência de saída. Além disso, amplificadores Raman discretos implementados em fibras compensadoras de dispersão (DCF), fornecem ganho ao sinal aliado à compensação de dispersão cromática.

3.2.2 Ganho e Figura de Ruído

Considerando as equações de evolução da potência de bombeio e sinal apresentadas em (HEADLEY; AGRAWAL, 2005), se a depleção do bombeio for ignorada, para o caso contrapropagante, as equações podem ser analiticamente resolvidas, gerando a Eq. (4), para a potência

Figura 11 – Esquemas de bombeamento Raman: copropagante, contrapropagante ou bidirecional.



Fonte: Extraída de (HEADLEY; AGRAWAL, 2005).

de sinal na saída de uma fibra de comprimento L com amplificação Raman,

$$P_s(L) = P_s(0)e^{(g_R P_0 L_{eff} - \alpha_s L)} \equiv G_N(L)P_s(0), \quad (4)$$

em que

$$L_{eff} = \frac{1 - e^{(-\alpha_p L)}}{\alpha_p} \quad (5)$$

é o comprimento efetivo, α_P é o coeficiente de atenuação no comprimento de onda do bombeio, G_N é o ganho líquido, $P_s(0)$ é a potência de entrada do bombeio, g_R é o coeficiente de ganho Raman normalizado em relação a área efetiva da fibra, P_0 é a potência de bombeio lançada na fibra e α_S é o coeficiente de atenuação no comprimento de onda do sinal. Essa equação é uma aproximação de primeira ordem para a evolução do sinal na fibra. Em fibras SSMF, onde a perda é de aproximadamente 0,25 dB/km em 1455 nm, o comprimento efetivo (L_{eff}), onde ocorre amplificação Raman, é aproximadamente 17 km para enlases maiores que 60 km.

Frequentemente é usada uma quantidade chamada de ganho Raman on-off, que é definida como o incremento na potência do sinal na saída do amplificador quando o bombeio está ligado. No limite de pequenos sinais, esse ganho é definido como (BROMAGE, 2004)

$$G_{on_off} \equiv \frac{P_s(L)_{\text{bombeio ligado}}}{P_s(L)_{\text{bombeio desligado}}} = \exp(g_R L_{eff} [P_P^+(0) + P_P^-(L)]), \quad (6)$$

em que $P_P^+(0)$ e $P_P^-(L)$ são as potências de bombeio co e contra-propagante, respectivamente.

A amplificação Raman, quando comparada com outros tipos de amplificações ópticas, apresenta como vantagens a baixa inserção de ruído e o ganho plano sobre uma larga faixa do espectro. Porém, em um sistema com amplificação Raman distribuída, não é possível medir a figura de ruído do amplificador devido à ocorrência de ganho ao longo da própria fibra de transmissão (OLIVEIRA, 2014). Dessa forma, a inserção de ruído de amplificadores Raman distribuídos é medida por meio da figura de ruído equivalente (BROMAGE, 2004). A figura de ruído equivalente NF_{eq}^{dB} representa o valor da figura de ruído de um amplificador discreto ficcional, que colocado em frente ao receptor, na ausência de amplificação Raman distribuída, fornece a mesma OSNR que seria obtida utilizando-se a amplificação Raman distribuída. Em amplificadores discretos, assim como em EDFAs, o parâmetro de figura de ruído pode ser calculado de forma direta como na Eq. (3). Uma expressão para NF_{eq}^{dB} pode ser obtida igualando as figuras de ruído dos dois sistemas mostrados na Fig. 12. No sistema equivalente da Fig. 12(b), a perda do sinal no enlace é $\alpha_s L$, assim, o ganho do enlace é $G = (\alpha_s L)^{-1}$ e o fator de ruído do enlace não bombeado é igual a perda do sinal. Como mostrado em (BROMAGE, 2004), a figura de ruído de um *span* com fibra com bombeio Raman deve ser

$$NF_{span}^{dB} = 10 \log(\alpha_s L + \frac{NF_{eq} - 1}{1/\alpha_s L}) = 10 \log(NF_{eq} \alpha_s L). \quad (7)$$

Portanto, a figura de ruído requerida pelo amplificador equivalente é

$$NF_{eq}^{dB} = NF_{span}^{dB} - 10 \log(\alpha_s L). \quad (8)$$

Da Eq. (8), nota-se que é possível obter uma figura de ruído equivalente com valores negativos em dB. Isso não significa que a OSNR de saída do amplificador Raman é maior do que a OSNR de entrada, o que é fisicamente impossível, mas mostra que em um sistema com elevados níveis de amplificação distribuída Raman, devido à amplificação ocorrer na fibra de transmissão, a figura de ruído sistêmica pode ser menor que a figura de ruído do enlace sem amplificação Raman. Isso mostra o desempenho superior da amplificação Raman distribuída, o qual não pode ser obtido por um amplificador discreto colocado após o enlace.

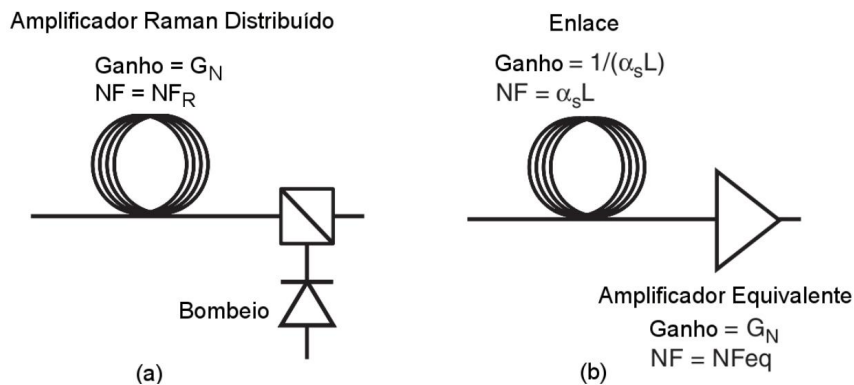
Uma forma mais prática de se obter a figura de ruído equivalente, derivada a partir de G_{On_Off} e da potência de ruído gerada P_{ASE} , é mostrada em (ZYSKIND; SRIVASTAVA, 2011) e replicada aqui na Eq. (9):

$$NF_{eq}^{dB} = 10 \log\left(\frac{P_{ASE}}{h\nu G_{On_Off} \Delta\nu} + \frac{1}{G_{On_Off}}\right), \quad (9)$$

que é idêntica à Eq. (3), com exceção do ganho, que nesse caso é G_{On_Off} .

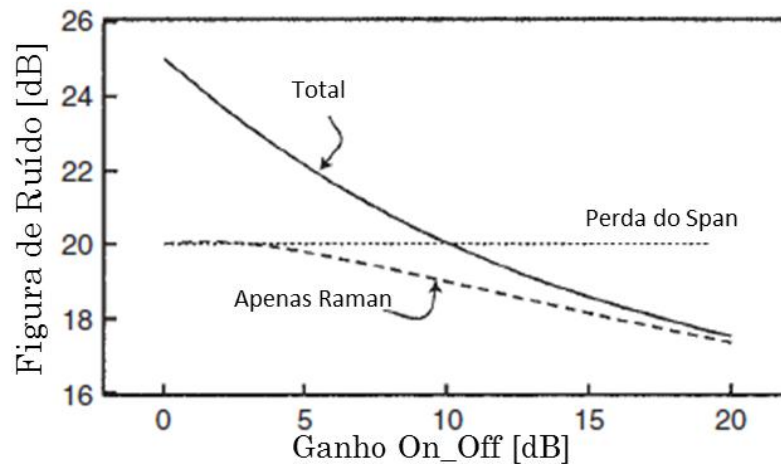
Para entender melhor o conceito de figura de ruído equivalente, considere um *span* com fibra de 100 km com perda total de 20 dB. Suponha que essa perda seja compensada com esquema de amplificação híbrida na qual um amplificador discreto, como um EDFA, com NF de por exemplo 5 dB é combinado com DRA com bombeio contrapropagante. Suponha que ganho Raman G_{On_Off} possa variar de 0 a 20 dB. Quando G_{On_Off} for igual a 0 ou a 20 dB, a amplificação será puramente discreta ou puramente distribuída, respectivamente. A Fig. 13 (HEADLEY; AGRAWAL, 2005) mostra como a NF muda com a variação de G_{On_Off} . Quando $G_{On_Off} = 0$, a figura mostra que a fibra passiva tem uma NF de 20 dB. Isso não é surpresa uma vez que qualquer fibra reduz a potência do sinal, o que degrada a OSNR (ROTTWITT; STENTZ, 2002). Quando o sinal é amplificado apenas pelo amplificador discreto, há uma degradação adicional de 5 dB, o que resulta numa NF total de 25 dB. Esse valor é decrementado quando G_{On_Off} aumenta, chegando a 17,5 dB quando $G_{On_Off} = 20$ dB (apenas amplificação distribuída). Desse exemplo, $NF_{eq}^{dB} \approx -2,5$ dB quando apenas amplificação

Figura 12 – Diagramas esquemáticos: (a) sistema amplificador Raman distribuído, (b) sistema equivalente enlace + EDFA.



Fonte: Extraída de (BROMAGE, 2004).

Figura 13 – Figura de ruído total como função do ganho on-off de um amplificador Raman em um *span* de 100 km com esquema de amplificação híbrida. A linha tracejada mostra a NF para o bombeio Raman apenas. A linha pontilhada mostra a perda de 20 dB do *span*.



Fonte: Extraída de (HEADLEY; AGRAWAL, 2005).

distribuída é empregada. Contudo, quando a amplificação puramente distribuída e a puramente discreta são comparadas, observa-se uma redução de quase 7,5 dB da figura de ruído.

3.2.3 Limitações de Amplificadores Raman

A amplificação Raman apresenta algumas desvantagens como a interferência multi-percurso, transferência de ruído do bombeio para o sinal e variação espectral da figura de ruído. Interferência multi-percurso pode ocorrer devido ao espalhamento Rayleigh na fibra que, dependendo da intensidade da luz, espalha o sinal óptico até duas vezes (HEADLEY; AGRAWAL, 2005). O primeiro espalhamento ocorre na direção contra-propagante ao sinal (retroespalhamento), que pode provocar um segundo espalhamento na direção co-propagante. Esse último aparece no receptor como ruído adicional, pois causa flutuação de fase e intensidade.

O processo de ganho Raman é extremamente rápido e qualquer flutuação de intensidade nas frequências do bombeio (menores que 1 THz) pode provocar alterações no ganho e deste modo produzir variações na potência do sinal. Esse efeito é normalmente conhecido como transferência do ruído de intensidade relativa (RIN) do bombeio para o sinal (HEADLEY; AGRAWAL, 2005). O RIN é uma medida padrão de ruído de lasers. A quantidade da transferência de ruído entre o bombeio e o sinal depende da configuração do bombeio e da frequência do ruído. A transferência do RIN entre o bombeio e o sinal é reduzida para o caso da configuração contra-propagante, devido ao ruído do bombeio ser uma média diluída ao longo de todo o comprimento do enlace.

A significativa interação Raman entre os bombeios de comprimentos de onda diferentes resulta numa amplificação dos bombeios com comprimentos de onda maiores em detrimento dos comprimentos de onda menores e, como consequência, os canais de comprimentos

de onda maiores possuem um ganho maior e mais bem distribuído ao longo da fibra e, desse modo, uma melhor figura de ruído quando comparada com a dos canais de comprimento de onda menores (HEADLEY; AGRAWAL, 2005). Um segundo efeito que influi na planicidade espectral da figura de ruído é a dependência da quantidade de ASE gerada, devido à diferença de frequência entre o bombeio e o sinal.

A necessidade de altas potências de bombeio, consequência do baixo coeficiente de ganho, e os limitantes de desempenho como o duplo espalhamento Rayleigh e o retroespalhamento Rayleigh da ASE contra-propagante limitam o uso de amplificação Raman distribuída. Como resultado, amplificadores DRAs são mais frequentemente utilizados em conjunto com EDFAs em uma configuração híbrida (ZYSKIND; SRIVASTAVA, 2011).

3.2.4 Aprimoramentos do Amplificador Raman

Nos amplificadores Raman, a figura de ruído equivalente é menor para o bombeio co-propagante, devido o ganho do sinal ocorrer próximo da entrada da fibra. Porém, nesse caso, o próprio bombeio pode limitar o ganho do amplificador, visto que ganhos altos na entrada da fibra podem produzir efeitos não-lineares intensos. Isto aponta para a necessidade de bombeio bidirecional, para que se possa obter uma figura de ruído equivalente mais baixa (bombeio co-propagante) com alto ganho (bombeio contra-propagante) (HEADLEY; AGRAWAL, 2005).

Um problema que ocorria inicialmente com o bombeio bidirecional é a transferência de ruído entre o bombeio e o sinal, o que atualmente é superado pelo desenvolvimento de lasers de bombeio com baixo valor de RIN. Em adição à melhoria efetiva da figura de ruído, o bombeio bidirecional também reduz a dependência espectral da figura de ruído na fibra quando comparado ao caso do bombeio contra-propagante. A melhoria na figura de ruído resulta da escolha do comprimento de onda do bombeio co-propagante, que determina a dependência espectral da figura de ruído, enquanto o bombeio contra-propagante determina principalmente o perfil de ganho Raman. Além disso, o bombeio bidirecional também diminui a penalidade da interferência multi-percurso, pois reduz o efeito do duplo espalhamento Rayleigh.

Um outro aprimoramento é o uso de amplificação Raman com bombeios de alta ordem. Nas topologias de amplificação Raman discutidas anteriormente, o comprimento de onda do sinal está sempre deslocado de aproximadamente um Stokes do comprimento de onda de bombeio. Isto é conhecido como amplificação Raman de primeira ordem. Nas configurações de bombeio de alta ordem, um ou mais bombeios deslocados de dois ou mais Stokes do sinal são utilizados para amplificar principalmente os bombeios de primeira ordem, que subsequentemente amplificam o sinal (BOUTEILLER et al., 2003). Quando o bombeio é deslocado do sinal de dois Stokes, este é denominado como bombeio Raman de segunda ordem e assim por diante para as configurações de bombeios de ordens superiores. Bombeio de alta ordem reduz a figura de ruído dos amplificadores Raman devido à distribuição mais uniforme do ganho ao longo do comprimento da fibra (HEADLEY; AGRAWAL, 2005).

3.2.5 Fontes de Bombeio

O que viabilizou o uso de amplificadores Raman em sistemas de comunicações ópticas foi o desenvolvimento de fontes de bombeio de alta potência em comprimentos de onda na região de 1400 nm, para amplificação na região de 1500 -1600 nm. Atualmente, existem duas fontes de bombeio que operam nessa região, o diodo laser semiconductor e o laser Raman a fibra (RFL) (HEADLEY; AGRAWAL, 2005).

O diodo laser semiconductor de bombeio empregado para amplificação Raman deve fornecer potência acoplada na fibra maior do que 100 mW, sendo desejável, porém, lasers com nível de potência de 400 a 500 mW para fornecer alto nível de ganho Raman. O laser deve operar na faixa de 1400 a 1500 nm para fornecer amplificação aos sinais nas bandas C e L (1530 a 1620 nm). Diodos laser de alta potência de *InGaAsP*, operando nessa faixa de comprimentos de onda, foram desenvolvidos a partir da década de 1990 (HEADLEY; AGRAWAL, 2005).

Quando são usados módulos de bombeio com diodo laser para amplificação Raman, algumas características são desejáveis (HEADLEY; AGRAWAL, 2005): o módulo de bombeio deve ser constituído de vários diodos lasers, com diferentes comprimentos de onda, para se obter um ganho Raman uniforme (plano) em uma extensa largura de banda; os comprimentos de onda dos bombeios devem ser estabilizados através de grades de Bragg posicionadas diretamente no pigtail que é utilizado para acoplar a saída do laser; para reduzir a dependência de polarização do ganho Raman deve-se utilizar dois lasers polarizados ortogonalmente acoplados em um combinador de polarização (PBC) no mesmo comprimento de onda, ou inserir um despolarizador na saída do módulo de bombeio.

Lasers Raman a fibra fornecem altas potências de saída, porém são de implementação complexa e possuem tamanho físico bem maior que os lasers de bombeio semicondutores, por isso são de utilização muito restrita em sistemas de comunicação óptica.

3.3 AMPLIFICADORES ÓPTICOS HÍBRIDOS RAMAN/EDFA

As tecnologias de amplificação óptica EDFA, Raman distribuído (DRA) e Raman concentrado (LRA) são as mais empregadas na amplificação em redes WDM. Cada tecnologia provê bom desempenho considerando os parâmetros de desempenho (potência de saída, figura de ruído, planicidade espectral de ganho e controle automático de ganho) para uma determinada região de operação de potência de entrada do amplificador. Porém, nenhuma fornece bom desempenho para simultaneamente todos os parâmetros de desempenho em toda a faixa de operação de potência de entrada.

A tendência na evolução dos amplificadores ópticos segue na direção de suprir a necessidade de controle de ganho variável e de fornecer desempenho melhorado em todos os seus parâmetros, como potência de saída, figura de ruído, planicidade espectral para qualquer valor de ganho requerido. Assim, vêm sendo estudado o desenvolvimento de amplificadores ópticos baseados em tecnologias de amplificação ópticas híbridas, que combinam variadas

tecnologias de amplificação óptica, para melhorar suas características de amplificação. Entre os diversos tipos de amplificadores híbridos desenvolvidos na literatura, podemos destacar os amplificadores Raman/EDFA (OLIVEIRA, 2014), Raman/Paramétrico (PEIRIS et al., 2014), Raman/SOA (REICHMANN et al., 2006) e TDFA/EDFA (SAKAMOTO et al., 2006). Porém, para redes ópticas WDM, metropolitanas e de longa distância, as principais tecnologias de amplificação empregadas são os EDFAs, amplificadores Raman distribuídos e concentrados.

O amplificador híbrido pode alcançar valores de figura de ruído equivalente tipicamente de 3 a 6 dB menor do que pode ser alcançado com um EDFA sozinho. Nos sistemas atuais que ainda transmitem em taxas de 10 e 40 Gb/s, híbridos Raman/EDFA são comumente aplicados em duas formas: primeira, na saída de *spans* muito longos para mitigar a degradação da OSNR do sistema; segunda, como amplificador de base para a maior parte ou para todos os *spans* em sistemas onde o alcance muito longo é necessário (tal como em redes de roteamento por comprimento de onda, em que comprimentos de onda podem ter longos caminhos não regenerados). Em sistemas com maior capacidade (100 Gb/s ou mais) por canal, pode ser desejável a utilização de amplificação Raman na maioria ou em todos os *spans* para satisfazer os requisitos mais exigentes da OSNR (ZYSKIND; SRIVASTAVA, 2011). Nesse tipo de amplificação óptica, o Raman funciona como um pré-amplificador, fornece parte do ganho necessário para compensar a perda do *span* e determina em grande parte o desempenho do ruído do amplificador híbrido que é, assim, significativamente menor do que a de um EDFA convencional. O EDFA, que segue o Raman, normalmente proporciona a maior parte do ganho necessário para compensar a perda de *span* de fibra e elementos tais como módulos compensadores de dispersão e ROADMs.

Muitas pesquisas e desenvolvimentos foram e vêm sendo feitos no sentido de otimizar amplificadores ópticos híbridos Raman/EDFA para aplicações em redes ópticas de forma a aumentar a capacidade de transmissão. Alguns desses estudos são brevemente descritos.

Em (LEE et al., 2005), foram realizados experimentos em quatro diferentes topologias de amplificadores ópticos, em que três empregavam tecnologias híbridas LRA/EDFA com reuso de bombeio, objetivando a avaliação do ganho e a planicidade espectral de ganho (cenário estático) para vários níveis de potência de entrada, além de avaliar o comportamento do transiente de potência no canal sobrevivente na condição de adição e remoção de canais. Contudo, todos os experimentos foram executados com bombeio fixo, sem controle automático de ganho, o que limita sua aplicação em redes ópticas dinamicamente reconfiguráveis.

Em (AHMAD et al., 2007), foram utilizadas três das topologias desenvolvidas em (LEE et al., 2005) para desenvolvimento de controle automático de ganho, porém tal controle é verificado somente para um dado ganho alvo, não sendo permitido a variação deste ganho alvo, fator extremamente necessário para redes dinamicamente reconfiguráveis.

Em (MOWLA; GRANPAYEH, 2009), é proposto e projetado um amplificador híbrido EDFA/Raman discreto com ganho espectral plano para as bandas C+L, utilizando de 6 a 10 lasers de bombeio. No entanto, este desenvolvimento visou somente a otimização da planicidade

espectral de ganho, sem propor uma técnica de controle de ganho.

Em (DUNG; JIAN; WU, 2009), uma técnica de controle automático de ganho totalmente óptico (baseado em realimentação óptica da ASE) é desenvolvida e aplicada a uma topologia de amplificação híbrida de EDFA/Raman discreto (em DCF) com reuso de bombeio. Assim como em (AHMAD et al., 2007), o controle de ganho é desenvolvido para somente um ganho alvo, e não permite variação do ganho alvo de operação.

Em (BILAL; ZAFRULLAH; ISLAM, 2012), foi projetado um enlace com amplificação híbrida Raman distribuído contra-propagante e EDFA objetivando planicidade espectral de ganho para sistemas de longa distância WDM. Foi obtido um ganho espectral aproximadamente plano (0,7 dB), porém, além de não se tratar do projeto de uma unidade de amplificação híbrida, não se propõe uma técnica de controle automático de ganho.

Em (OLIVEIRA, 2014), foi mostrado em testes de transmissão ponto a ponto sem repetição que o amplificador híbrido DRA/EDFA tem um desempenho muito superior na inserção de ruído quando comparado com o EDFA convencional e híbrido LRA/EDFA. Então, foi desenvolvido amplificador híbrido DRA contra-propagante/EDFA com controle automático de ganho para aplicação para redes WDM dinamicamente reconfiguráveis, que pode otimizar a performance de amplificação em sistemas coerentes. Esse é o amplificador híbrido testado neste trabalho.

3.4 CONSUMO DE POTÊNCIA ELÉTRICA DE AMPLIFICADORES

O interesse e as pesquisas em consumo de potência elétrica de redes de Tecnologia da Informação e Comunicação (TIC) começou em 2003 (GUPTA; SINGH, 2003), em que foi discutido o consumo de energia de dispositivos de rede e, em maior escala, da Internet, e propõe uma série de abordagens para aumentar a eficiência energética. Desde então, inúmeros trabalhos relacionados foram publicados e apresentados. A maioria dessas publicações também fornece uma estimativa do consumo de energia atual e futura de (um subconjunto de) redes, ou propõem uma potencial solução para a economia de energia. As principais razões para as pesquisas em redução de consumo de potência são geralmente econômicas (redução do custo relacionado ao consumo de energia), técnicas (redução da dissipação de calor associado) e ambiental (redução de emissão de carbono) (HEDDEGHEM et al., 2012). Seja qual for o motivo, são necessárias estimativas do consumo de energia, e um dos principais insumos são os valores de potência consumida pelos dispositivos das redes de comunicação. Uma boa estimativa desses valores é importantes para a formulação de políticas que possam avaliar o nível do consumo de energia das TICs em comparação com outros setores. Valores relativos suficientemente corretos dos equipamentos da rede são importantes para os fornecedores de equipamentos e pesquisadores concentrarem esforços em soluções com maior potencial de economia de energia elétrica.

As redes ópticas representam uma parte significativa das TICs e, para suprir o crescimento da demanda por comunicação, cada vez mais vêm crescendo. Com a evolução e expansão das redes ópticas, tornou-se necessário a avaliação do consumo de energia elétrica tanto das

redes em geral como de dispositivos específicos como transmissores, receptores, ROADMs e amplificadores ópticos. Por isso, vários trabalhos abordam, de alguma forma, o consumo de energia elétrica em redes ópticas.

A maioria dos trabalhos publicados visam soluções que aumentem a eficiência energética a partir de modelos de consumo de potência baseados no consumo individual dos componentes e, de alguma forma, contando o número desses componentes na rede como em (HEDDEGHEM et al., 2010; LUI; SHEN; SHAO, 2012; PAPADIMITRIOU et al., 2015). Outros trabalhos apenas tentam estimar a potência consumida em vez de avaliar uma solução específica para aumento da eficiência energética, em que o consumo total é calculado diretamente com base na quantidade e nos valores médios da eficiência energética dos equipamentos utilizados na rede como em (BALIGA et al., 2009; KILPER et al., 2011; UDALCOVS; BOBROVS, 2016).

Quando se trata de consumo de energia elétrica de amplificadores ópticos, especificamente, poucos trabalhos foram publicados e desses, a grande maioria está relacionado a modelos analíticos ou simulações em cenário estático, onde basicamente não há variação dos parâmetros ópticos. Quando avaliados isoladamente, os amplificadores ópticos são um dos elementos que menos consomem energia em uma rede óptica. Porém, eles são utilizados em grande quantidade, principalmente em redes de *backbone*, o que os torna relevantes. O consumo de energia em amplificadores ópticos está relacionado com os elementos ativos que os compõem: os lasers de bombeio, controladores de temperatura (TECs) e circuito eletrônico para controle e gerenciamento (TUCKER, 2011).

Em (TUCKER, 2011), foi analisado o limite inferior do consumo de energia em sistemas de transporte ópticos, em que foi mostrado como esse consumo mínimo é limitado pelo limite de Shannon devido à sensibilidade do receptor e é influenciado pelas perdas da fibra óptica e pela ASE dos amplificadores. O consumo é avaliado para os transmissores, receptores e amplificadores ópticos (EDFAs). Com relação aos amplificadores, foi considerado um modelo analítico ideal operando em cenário estático com ganho fixo. A potência elétrica total consumida pelo amplificador leva em consideração o consumo dos lasers de bombeio, controladores de temperatura e circuitos de controle e gerenciamento. Para os testes foram usados valores fixos de 100 W por amplificador, extraídos dos *datasheets* de fornecedores.

Em (HEDDEGHEM et al., 2012), são propostos valores de referência para o consumo de potência elétrica de equipamentos de redes ópticas ao mesmo tempo em que apresentam um modelo analítico para o consumo de potência elétrica para grandes redes, onde a simulação computacional é impraticável. No que diz respeito a amplificadores ópticos, esse trabalho foca no EDFA operando em um cenário estático e é mostrado que os amplificadores podem representar até 14% do consumo total em redes de *backbone*. Os valores de consumo assumidos para o EDFA foram baseados nos *datasheets* de fornecedores e variam de 65 a 120 W, dependendo do comprimento do *span* utilizado e já incluem o consumo dos controladores, *coolers*, iluminação e chassi onde o amplificador é montado, não detalhando quanto cada componente consome.

Em (VIZCAÍNO et al., 2014), é proposta uma otimização da quantidade e posição dos

amplificadores ópticos em redes de transporte WDM com várias taxas de transmissão e formatos de modulação visando o aumento da eficiência energética. Os resultados das simulações mostram significativa melhoria da eficiência energia. Contudo, além de não se configurar como uma medição de consumo de potência, o regime de operação dos amplificadores (EDFAs) foi estático com consumo de energia elétrica fixo. Para os testes foi assumido, baseado em *datasheets* de fornecedores, que o EDFA consome 30 W de potência elétrica.

Dentre os trabalhos publicados, (CERCOS et al., 2015) é o que aborda de forma experimental e mais detalhadamente o consumo de potência elétrica de amplificadores. Nesse trabalho é feita uma validação experimental do consumo de energia de EDFAs de um e dois estágios com AGC, mostrando a dependência do consumo com o número de canais amplificados, e introduz um modelo matemático baseado em dados empíricos. Os testes foram realizados com 1, 3, 12 e 50 canais com -20 dBm de potência óptica cada. Foram medidas as potências elétricas totais, do circuito de controle e dos lasers de bombeio. Os resultados desse trabalho mostram que a quantidade de canais amplificados simultaneamente contribui de forma significativa com o consumo de potência elétrica total, devido ao conjunto de circuitos utilizado para controlar o EDFA. No estado ocioso, o consumo foi de 6,34 W, devido ao circuito de controle. Em operação, os EDFAs consumiram de 7,4 a 12,8 W, com diferença máxima de 0,5 W entre consumo do EDFA de um e de dois estágios. Esses valores de potência correspondem apenas ao amplificador operando isoladamente, sem levar em conta o consumo de outros dispositivos que possam estar instalados em conjunto com esses amplificadores em estações de amplificação.

Apesar de haver muitos trabalhos a respeito do consumo de potência elétrica de amplificadores ópticos, nenhum desses avaliou experimentalmente o consumo de potência elétrica de forma comparativa considerando EDFAs e amplificadores híbridos Raman/EDFA que podem ser empregados em redes reconfiguráveis, operando em uma faixa dinâmica de potência óptica de entrada (canais) e ganhos. Por isso, esse é um dos principais objetivos desta Dissertação. Os dados experimentais obtidos dos testes aqui realizados podem servir de base para futuras comparações e avaliações analíticas de redes ópticas reconfiguráveis.

4 METODOLOGIA

Neste capítulo são descritas as ferramentas e metodologia necessárias para avaliação de desempenho e consumo de potência elétrica dos amplificadores ópticos descritos no Capítulo 3. Na Seção 4.1 é mostrado como os amplificadores ópticos foram caracterizados, na Seção 4.4 é mostrada a metodologia para realização de testes sistêmicos e na Seção 4.3 é mostrada a forma de aquisição de potência elétrica consumida.

4.1 MÁSCARA DE POTÊNCIA E CARACTERIZAÇÃO DE AMPLIFICADORES

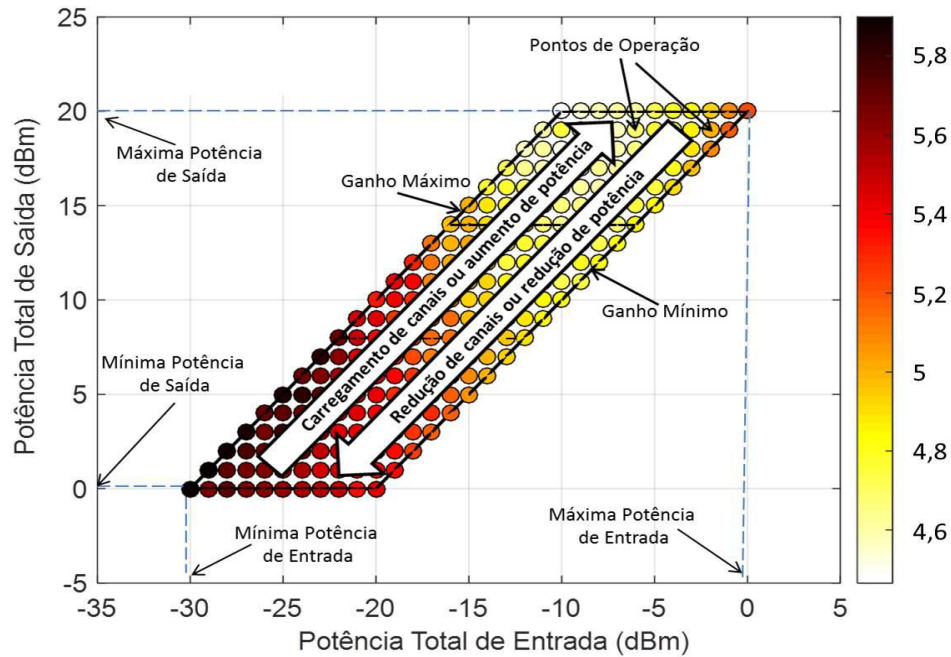
Como já exposto, em uma rede óptica DWDM reconfigurável é necessário que amplificadores operem de forma satisfatória em uma determinada faixa de potências de entrada ou diferentes carregamentos de canais, uma vez que isso pode alterar a potência de entrada de forma dinâmica e imprevisível. Além disso, variações na potência de entrada também podem ser causadas por outros fatores, como flutuações nos níveis de potência nas saídas de amplificadores/sistemas localizados no mesmo enlace.

Outra necessidade está relacionada à operação do amplificador em diferentes faixas de potências de entrada, definida por uma faixa de diferentes valores de ganhos controláveis. Neste caso, a região de operação do amplificador é definida pelas faixas de potências de entrada e ganhos alvos de operação, para os quais o desempenho do amplificador deve ser garantido, sendo esta região de operação denominada máscara de potência de um amplificador óptico (COWLE, 2010). O desempenho óptico dinâmico pode, então, ser medido por meio dos valores de figura de ruído, planicidade espectral de ganho e precisão do controle automático de ganho ao longo da máscara de potência.

A ilustração de uma máscara de potência de um amplificador óptico é apresentada na Fig. 14 e pode ser definida em termos dos ganhos máximo e mínimo e das potências máxima e mínima de entrada. A barra de cores representa o comportamento de uma figura de desempenho, como figura de ruído ou planicidade espectral. Dessa forma, a máscara de potência pode ser utilizada para prever o desempenho dinâmico do amplificador com a adição/remoção de canais ou equivalente aumento/diminuição de potência na entrada.

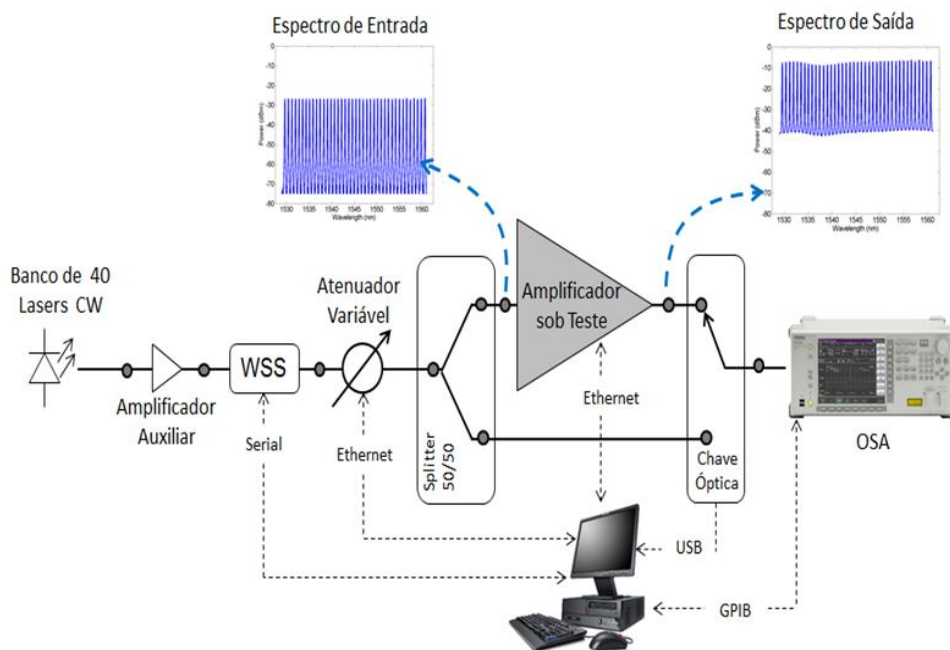
Para obtenção da máscara de potência das figura de desempenho de um determinado amplificador óptico em laboratório, de forma automática, o caracterizador experimental apresentado em (MOURA et al., 2012) pode ser utilizado. A Fig. 15 mostra a montagem experimental para obter as máscaras de potência de forma automática. Para caracterização neste trabalho, foi utilizado um banco de lasers que fornece 40 canais DWDM na banda C (192,1 - 196 THz) com espaçamento de 100 GHz entre eles. O amplificador auxiliar fornece potência óptica total de até 21 dBm. A chave seletora de comprimento de onda (WSS) é utilizada para equalizar o sinal na saída do amplificador auxiliar e atenuar o ruído entre canais adjacentes. Esse procedimento é feito para que o sinal na entrada do amplificador caracterizado seja o mais plano

Figura 14 – Exemplo de máscara de potência.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Figura 15 – Caracterizador experimental de amplificadores ópticos para obtenção automática de dados da máscara de potência.



Fonte: Adaptada de (MOURA et al., 2012).

possível e livre de ruído entre os canais adjacentes, o que permite estimar com maior precisão o quanto a planicidade espectral é afetada e o nível de ruído adicionado, facilitando o cálculo da figura de ruído. O atenuador óptico variável (VOA) faz o ajuste da potência total na entrada

do sistema de amplificação ao longo da caracterização. O divisor (*splitter* 50/50) faz com que metade do sinal na saída do VOA siga para o amplificador em teste e a outra metade vá para uma das entradas da chave óptica 2x1. Na outra entrada desta chave está o sinal amplificado na saída do amplificador. Dessa forma, é possível medir os canais ora na entrada ora na saída, de acordo com a posição da chave óptica. O analisador de espectro óptico (OSA) mede e captura os espectros de entrada e saída do amplificador sob caracterização.

Para realização de uma caracterização, é necessário inserir os parâmetros básicos da região de interesse (máxima potência de saída, mínima potência de entrada, ganhos máximo e ganho mínimo de operação), e seu respectivo passo de caracterização (por exemplo, 1 dB) na plataforma com interface gráfica desenvolvida no software Labview® (MOURA et al., 2012), que é responsável pelo envio de comandos e recebimento de dados de todos os dispositivos utilizados na caracterização. A comunicação dos dispositivos com o computador é feita através das interfaces GPIB, USB, Ethernet e serial, todas suportadas pelo software utilizado.

Após finalizado o processo de caracterização, algoritmos desenvolvidos em Matlab® tratam todos os dados adquiridos, processando cada conjunto de espectros (entrada/saída) e calculando, para cada ponto de operação, as máscaras de potência de planicidade espectral do ganho, figura de ruído (pior caso, canal com maior figura de ruído) e a precisão do controle automático do ganho ao longo de toda região de operação do amplificador. A precisão do AGC ACC_{AGC} , em decibéis, é calculada como a diferença entre os valores do ganho total configurado G_{Alvo} e o ganho total medido G_{Real} como mostra a Eq. (10).

$$ACC_{AGC} = G_{Alvo} - G_{Real}. \quad (10)$$

A planicidade espectral do ganho GF , em decibéis, é calculada por meio da diferença entre a potência do canal com nível mais alto P_{Ch_max} e a potência do canal com nível mais baixo P_{Ch_min} na saída do amplificador como mostra a Eq. (11).

$$GF = P_{Ch_max} - P_{Ch_min}. \quad (11)$$

A figura de ruído dos amplificadores EDFAs é calculada utilizando-se do método mostrado em (BECKER; OLSSON; SIMPSON, 1999), de acordo com a Eq. (3), mostrada na Seção 3.1. Já para amplificadores Raman distribuído, ou qualquer outro amplificador híbrido contendo a mesma tecnologia, é calculada a figura de ruído equivalente, como mostrado na Seção 3.2, que permite a comparação de desempenho do amplificador híbrido diretamente com a figura de ruído dos EDFAs.

4.2 TOPOLOGIAS CARACTERIZADAS

4.2.1 EDFA de um Estágio Testado

Dentre as topologias para amplificação óptica utilizadas atualmente, a topologia do EDFA de um estágio com GFF e controle automático de ganho (AGC) eletrônico realimentado é uma

das estruturas mais simples de serem implementadas. Sendo assim, essa estrutura é largamente utilizada pelos fornecedores de EDFAs (ZYSKIND; SRIVASTAVA, 2011).

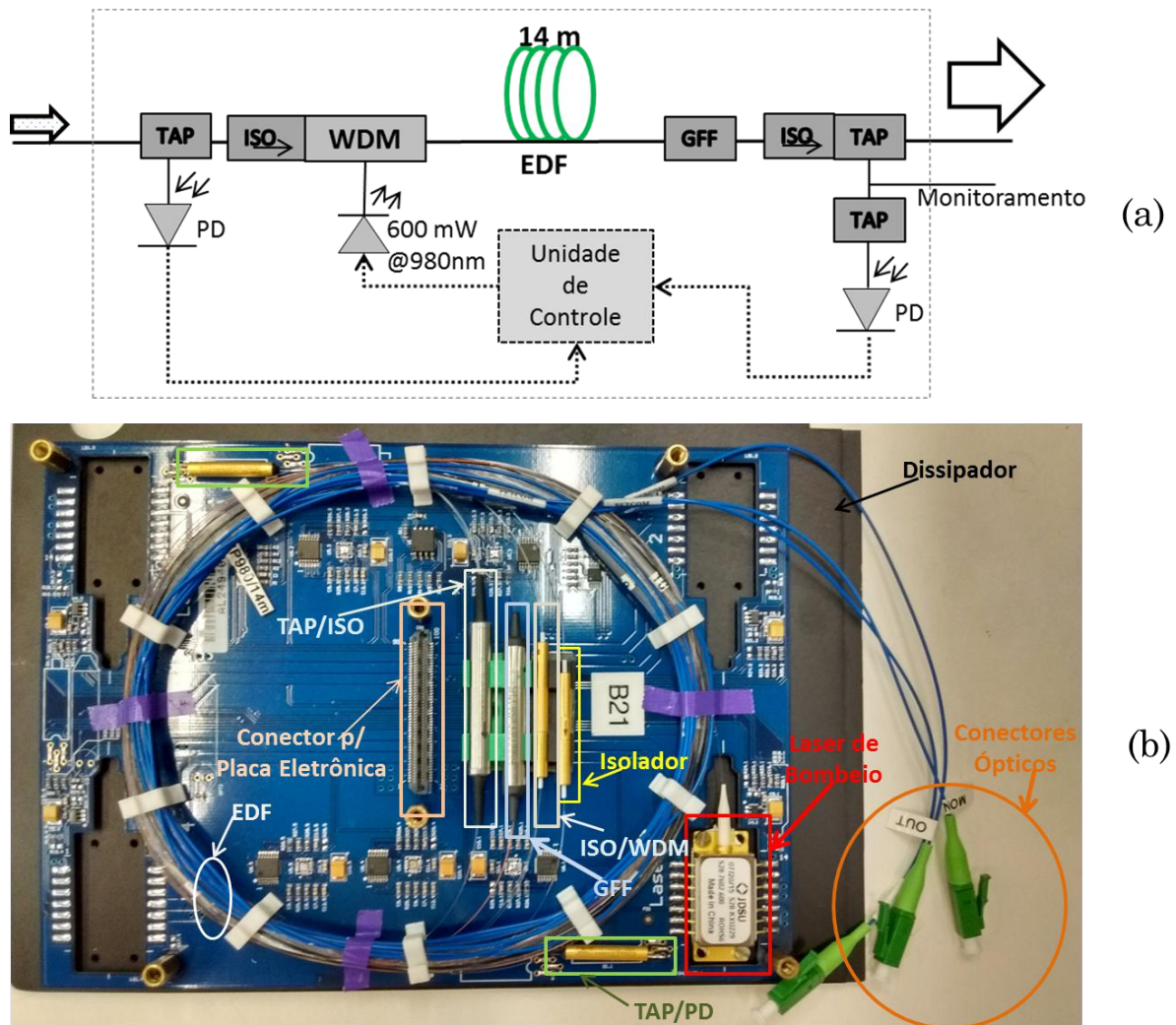
A Fig. 16(a) mostra a topologia do EDFA de um estágio com GFF e sua unidade de controle testada neste trabalho. Esse amplificador foi desenvolvido e montado por pesquisadores do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações (CPqD) em Campinas (SP) e a metodologia de projeto é mostrada em (OLIVEIRA et al., 2013). Essa topologia é constituída basicamente por quatro componentes ópticos: dois fotodetectores, um laser de bombeio (980 nm) com até 600 mW de potência óptica e um trecho de fibra dopada com Érbio (EDF) MP980 fabricada pela OFS[®] com 14 m, dispostos em uma configuração de bombeio co-propagante. O primeiro componente óptico é um componente híbrido TAP/PD, onde o derivador (TAP) retira uma parcela da potência de entrada (1% nesse caso) para monitoramento por meio do fotodetector (PD) de entrada. O isolador (ISO) provê isolamento para o sinal de luz propagante na direção contrária (retroespalhamento). O acoplador WDM combina o bombeio e o sinal na fibra dopada com érbio (EDF). O GFF tem a função de remover as diferenças entre os ganhos fornecidos para cada frequência do sinal WDM na banda C, projetado para prover ganho espectral plano em 25 dB. A unidade de controle do amplificador óptico consiste do elemento onde a malha de controle de ganho é processada para realização do controle de ganho do amplificador. Geralmente, a unidade de controle é composta por um micro controlador ou FPGA. Esse amplificador foi capaz de prover até 21 dBm de potência total de saída na banda C e foi testado neste trabalho na faixa de ganho de 20 a 30 dB.

A Fig. 16(b) mostra a placa óptica onde o EDFA de um estágio foi montado, detalhando a disposição dos dispositivos utilizados. A grande vantagem dessa topologia é que, para ganhos alvos e potências de entrada variáveis, devido ao amplificador possuir somente um estágio de amplificação, a figura de ruído é baixa e praticamente constante ao longo de toda máscara de potência de operação (PAL et al., 2007). Em contrapartida, a planicidade espectral de ganho de um EDFA de um estágio de amplificação só é mantida constante para um único valor de ganho alvo, devido ao ganho e a planicidade estarem intrinsecamente relacionada a um mesmo nível de inversão de população na EDF (PAL et al., 2007). Dessa forma, o ganho espectral plano pode ser mantido para qualquer que seja o nível de potência de entrada através do ajuste da potência de bombeio, para manter o mesmo nível de inversão de população na EDF. Porém, nesse caso, isso só é possível para um único valor de ganho. Então, a grande desvantagem relacionada ao desempenho desta topologia é que, para ganhos alvo variáveis, não é possível manter o ganho espectral plano para toda faixa de operação do ganho, e sim, somente para o ganho alvo no qual o GFF foi projetado para fornecer ganho espectral plano.

4.2.2 EDFA de dois Estágios Testado

A topologia de amplificação óptica EDFA de dois estágios com GFF, atenuador óptico variável (VOA) e controle automático de ganho eletrônico realimentado (controle de ganho acoplado) é uma estrutura complexa de amplificação que visa fornecer planicidade espectral de

Figura 16 – (a) Topologia e (b) placa óptica do amplificador EDFA de um estágio testado.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

ganho para toda a faixa de ganhos alvos controláveis (BAKAR et al., 2011).

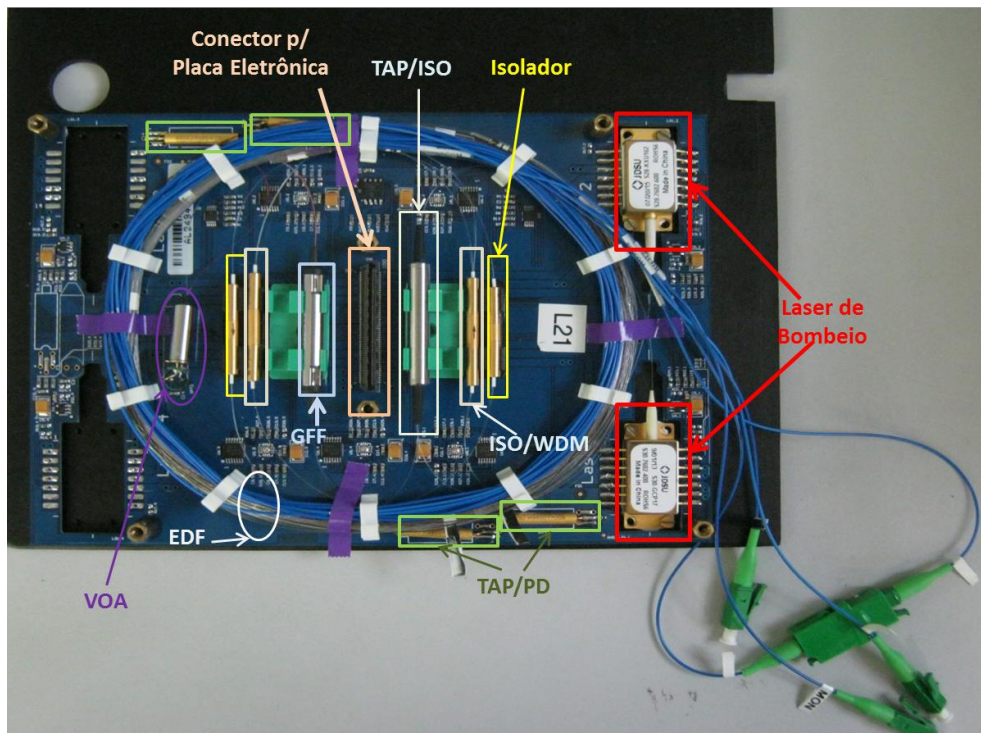
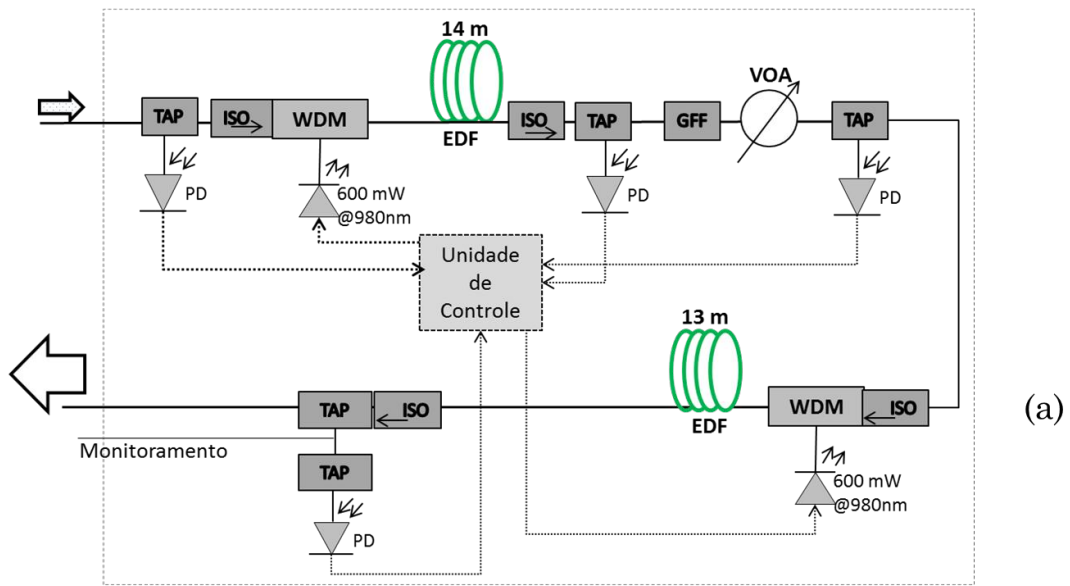
A Fig. 17(a) mostra a topologia de amplificação do EDFA de dois estágios testada neste trabalho, enquanto que a Fig. 17(b) mostra a placa óptica, detalhando a disposição dos dispositivos utilizados. Esse amplificador foi desenvolvido e montado por pesquisadores do CPqD e a metodologia de projeto é mostrada em (OLIVEIRA et al., 2013). Essa topologia é constituída por dois estágios de ganho EDFA na configuração de bombeio co-propagante, com um estágio intermediário com VOA e GFF (visando ganho espectral plano para os dois estágios operando em ganho nominal). A utilização de mais de um estágio de amplificação de EDFA e um VOA nesta topologia tem como objetivo fornecer boa planicidade espectral de ganho para toda faixa de ganhos alvo controláveis.

Para que o amplificador forneça ganho espectral plano para toda faixa, os comprimentos das EDFs de ambos os estágios devem ser cuidadosamente projetados, para que esses estágios de amplificação possuam uma figura de ruído baixa em seus ganhos nominais (ganho onde o

amplificador fornece melhor desempenho). Além disso, deve-se projetar os comprimentos das EDFs dos estágios de amplificação de tal forma que a soma dos ganhos nominais subtraído da perda do GFF e a perda de inserção do VOA, seja igual ao máximo ganho alvo da faixa de ganho projetada. Assim o GFF deve ser projetado para fornecer ganho espectral plano nesta condição (EDFAs acoplados).

Dessa forma, o AGC acoplado fornece planicidade espectral de ganho por meio do controle de ganho individual dos estágios EDFA sempre em seus ganhos nominais, aplicando

Figura 17 – (a) Topologia e (b) placa óptica do amplificador EDFA de dois estágios testado.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

a atenuação necessária através do estágio intermediário do VOA, para atingir o ganho global desejado (BAKAR et al., 2011). É possível atingir o ganho alvo máximo da faixa projetada fornecendo atenuação mínima no VOA, e atingir os ganhos mais baixos da faixa de ganhos alvo, aplicando atenuação no estágio intermediário igual a diferença entre o ganho máximo e o ganho alvo. O ganho alvo é ajustado por meio de mensagem binária (comunicação serial) enviada para o processador de controle do amplificador óptico (geralmente um microcontrolador). Para os testes realizados neste trabalho, cada estágio foi mantido, pelo AGC, com ganho nominal fixo de 16 dB. O amplificador foi capaz de prover até 21 dBm de potência total de saída para uma faixa de ganho de 20 a 30 dB.

A principal desvantagem relacionada ao desempenho dessa topologia é que, para ganhos alvos e potências de entrada variáveis, devido ao amplificador possuir dois estágios de amplificação e um estágio intermediário de atenuação, a figura de ruído é maior que a do EDFA de um estágio, e aumenta gradativamente de acordo com a diminuição do ganho alvo ao longo de toda região de operação. Porém, a grande vantagem é que, para ganhos alvos diferentes, o ganho espectral plano é mantido para toda faixa de ganho de operação, não importando qual o ganho alvo nem qual a potência de entrada do amplificador.

4.2.3 Amplificador Híbrido DRA/EDFA Testado

A Fig. 18(a) mostra a topologia do amplificador híbrido DRA/EDFA testado neste Trabalho, enquanto que a Fig. 18(b) mostra a placa óptica, detalhando a disposição dos dispositivos utilizados. Esse amplificador é composto por um estágio de amplificação distribuída Raman com dois lasers de bombeio contra-propagantes e um estágio de EDFA com bombeio co-propagante. Esse DRA/EDFA foi desenvolvido e montado por pesquisadores do CPqD e a metodologia de projeto é mostrada em (OLIVEIRA et al., 2013).

O estágio EDFA é composto por um bombeio co-propagante (980 nm) combinado com o sinal por meio de um componente óptico híbrido (TAP/ISO/WDM) que visa disponibilizar uma parte do sinal de entrada para monitoração, isolamento da rede contra reflexões indesejadas do processo de amplificação e combinação do comprimento de onda de bombeio com o sinal na direção co-propagante na EDF. O dispositivo ISO/GFF tem o objetivo de evitar perda de eficiência no processo de amplificação na EDF devido ao retroespalhamento de luz oriundo do sistema de saída e prover ganho espectral plano. Para os testes realizados neste trabalho, o ganho do estágio EDFA foi mantido, por meio do AGC, em 13 dB, pois foi o ganho que apresentou melhor planicidade espectral.

Os dois lasers de bombeio do estágio Raman são combinados pelo acoplador de bombeio e emitem potência nos comprimentos de onda de 1425 e 1455 nm na direção contra-propagante ao sinal de entrada. Os comprimentos de onda dos lasers foram escolhidos de tal forma que o ganho Raman complementasse o ganho do estágio EDFA e deixasse o espectro o mais plano possível, como mostrado na metodologia de projeto em (OLIVEIRA, 2014).

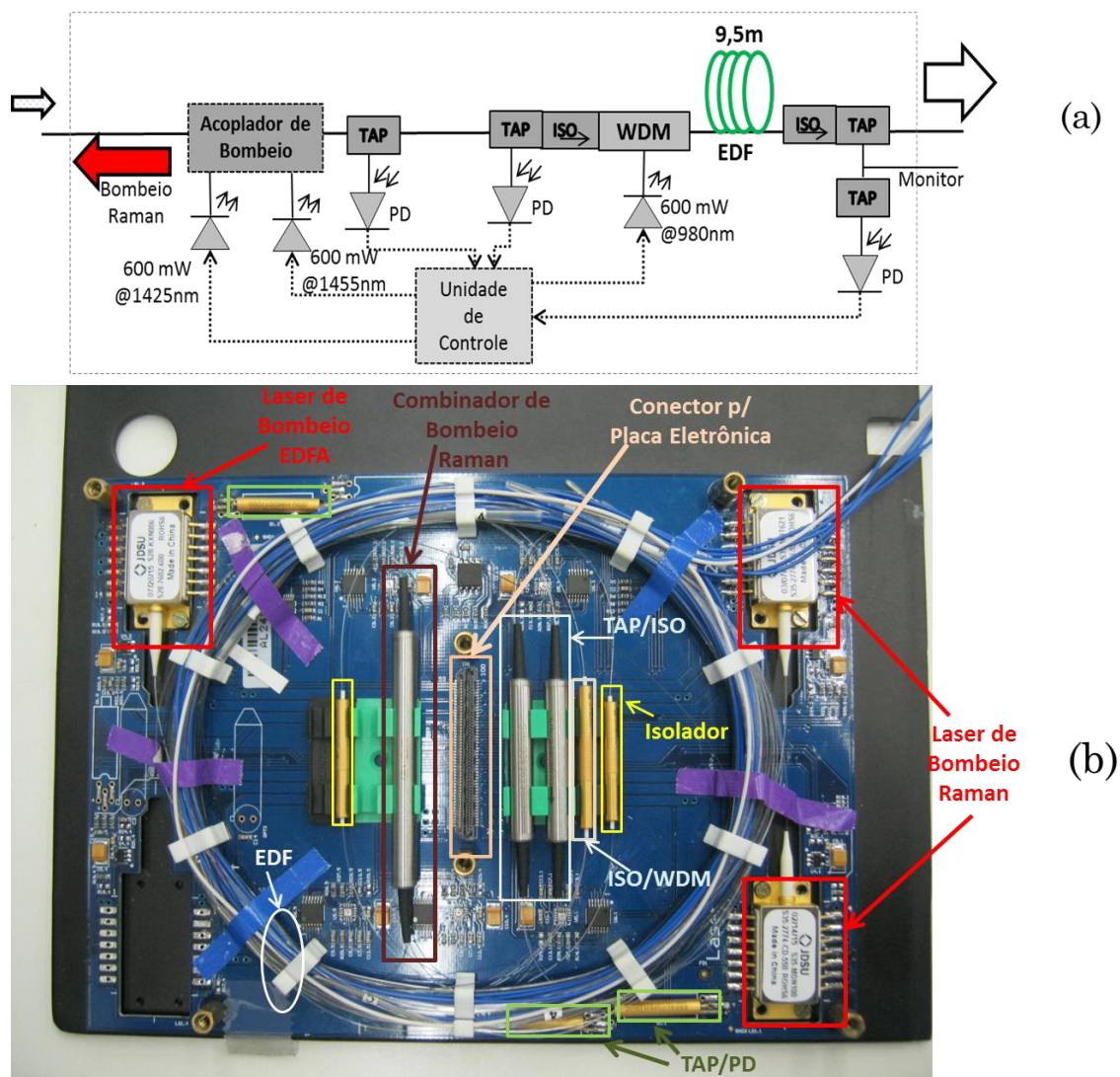
No amplificador híbrido, são utilizados três TAPs e fotodetectores para medição da

potência de saída do amplificador Raman, medição da potência de entrada e de saída do EDFA. Por meio destas medições de potência, a unidade de controle ilustrada executa o controle de ganho do amplificador. Assim como no caso dos EDFAs, esse amplificador também fornece até 21 dBm de potência de saída e foi testado para a faixa de ganhos de 20 a 30 dB.

4.2.4 Placa Eletrônica

A Fig. 19 mostra a placa eletrônica da plataforma de amplificação óptica, onde são detalhados os componentes principais. Ela é composta pelos circuitos eletrônicos necessários para controle do laser de bombeio, VOA, além dos circuitos de condicionamento dos sinais para medida da potência óptica detectada nos fotodetectores. Nesta placa encontra-se o sistema de controle em um único chip phyCORE[®] Vybrid, um processador de dois núcleos (um núcleo composto por um microprocessador ARM[®] Cortex-A5 de 500 MHz e outro núcleo composto

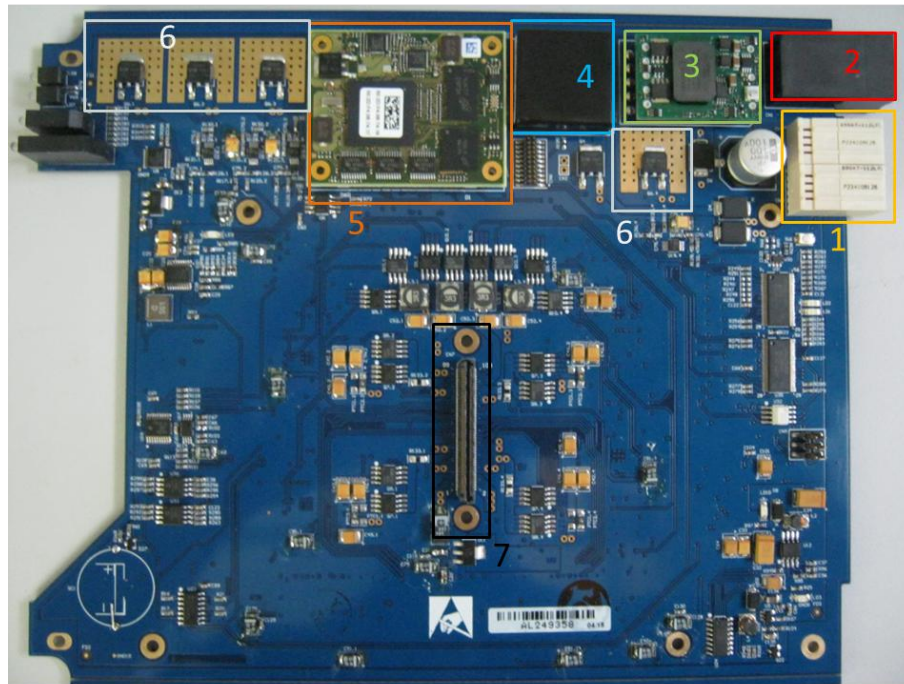
Figura 18 – (a) Topologia e (b) placa óptica do amplificador híbrido DRA/EDFA testado.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

por um microcontrolador ARM[®] Cortex-M4 com 167 MHz). O núcleo microcontrolador (ARM[®] Cortex-M4 com 167 MHz) foi utilizado para execução do laço de controle de ganho do amplificador em tempo real, executando um ciclo de leitura dos foto-deteciores, cálculo do controlador proporcional-integral de ganho e atuação no laser de bombeio em torno de 10 μ s, tempo bem menor que a dinâmica do amplificador óptico, assim podendo possibilitar o controle de ganho com supressão de transientes.

Figura 19 – Placa eletrônica dos amplificadores.



- 1 – Conector para comunicação via Ethernet;
- 2 – Conector para alimentação DC externa (54 V);
- 3 – Conversor DC/DC (54 para 5 V);
- 4 – Filtro de transiente;
- 5 – Microcontrolador;
- 6 – Controladores (*driver*) de corrente dos lasers;
- 7 – Conector para placa óptica.

Fonte: Elaborada pelo Autor.

4.3 POTÊNCIA ELÉTRICA

A potência elétrica total P_{amp} consumida para cada ponto da máscara de potência de um amplificador óptico pode ser modelada como em (12),

$$P_{amp} = P_{cir} + P_{pump} + P_{TEC}, \quad (12)$$

em que P_{cir} é a potência elétrica consumida pela placa de circuito eletrônico que faz o controle e alimentação do amplificador, P_{pump} é a potência consumida pelos lasers de bombeio e P_{TEC} é a potência consumida pelo controlador de temperatura (TEC) dos lasers de bombeio. A fonte de

alimentação não foi levada em conta nesse caso, pois todos os amplificadores testados foram alimentados diretamente por uma bancada de tomadas com saída de tensão contínua com 40 volts. Vale ressaltar que P_{cir} não é constante, mas varia com P_{pump} e P_{TEC} , pois a eficiência dos conversores de tensão DC/DC não é 100% e varia de 85% a 95%, a depender do dispositivo. Então, quanto maior P_{pump} e P_{TEC} , maior P_{cir} . P_{TEC} depende da temperatura ambiente, da eficiência do dissipador de calor onde o laser é montado e da temperatura interna de operação do laser.

Nesse trabalho, P_{amp} foi obtida diretamente da alimentação elétrica dos amplificadores, monitorando com um multímetro as tensões e correntes elétricas e multiplicando-as. P_{TEC} foi obtida do monitoramento das correntes e tensões elétricas no TEC de cada laser, fornecidas pelo sistema de monitoramento dos amplificadores e salvas em um arquivo texto para cada ponto de operação testado. O mesmo procedimento foi utilizado para obtenção de P_{pump} . Uma vez possuindo os valores das três potências elétricas anteriores e usando a relação mostrada em (12), é possível encontrar o valor de P_{cir} e, dessa forma, mostrar o consumo detalhado de potência elétrica para os amplificadores ópticos.

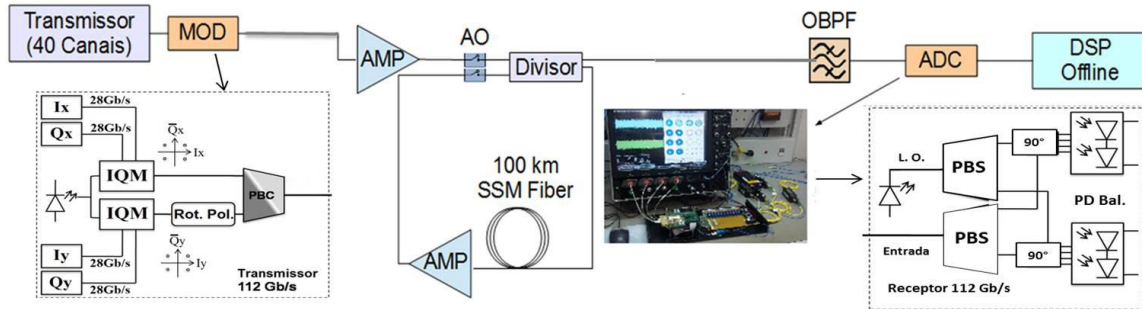
4.4 TESTE SISTÊMICO

O teste sistêmico é utilizado para verificar e comparar o desempenho das topologias de amplificação óptica apresentadas na Seção 4.2 quando postas para operar em um enlace óptico. Para tanto, foi utilizada a montagem experimental mostrado na Fig. 20, que é basicamente composta pelo transmissor, anel de recirculação e receptor óptico coerente. O anel de recirculação óptica simula a passagem dos canais ópticos por vários *spans*. Assim, é possível avaliar experimentalmente, por exemplo, a degradação da BER com o aumento de *spans* ou distância, em todo enlace óptico, sem ter que montar um sistema ou uma rede completa. Dessa forma, apenas poucos amplificadores são necessários para tal avaliação.

Do transmissor, são enviados 40 canais CW sintonizados na banda C, com 100 GHz de espaçamento, para o modulador (MOD), onde são divididos por um divisor óptico e acoplado a dois moduladores de fase e quadratura (IQ) com duas linhas de dados de 28 Gbaud/s cada, total de 56 Gbaud/s. Os sinais de 56 Gbaud/s são transmitidos em polarizações ortogonais, de modo que não ocorra interferência entre eles. Portanto, um dos sinais passa por um componente rotacionador de polarização de 90°. Por fim, ambas as polarizações são combinadas por um combinador de polarização (PBC), resultando em sinais modulados com 112 Gb/s DP-QPSK utilizando a codificação binária NRZ.

Os canais modulados são, então, amplificados por um amplificador EDFA auxiliar com saída de 20 dBm de potência óptica total de saída, antes de entrar no anel de recirculação óptica. Esse anel é controlado por duas chaves acusto-ópticas (AO) que operam de modo complementar, isto é, quando uma está aberta a outra está fechada. A chave AO de entrada é fechada por um tempo conhecido como tempo de injeção, em seguida ela é aberta e a chave AO interna é fechada, permitindo a recirculação do sinal. O enlace de fibra do anel de recirculação é composto por

Figura 20 – Aparato experimental para teste sistêmico.

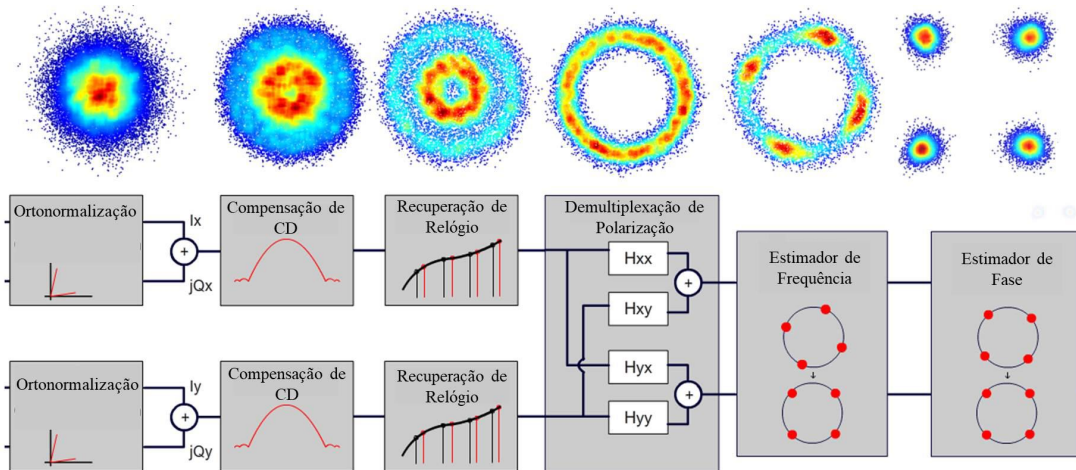


Fonte: Elaborada pelo Autor.

um carretel de 100 km de fibra óptica SSMF, cuja atenuação é 0,2 dB/Km em 1550 nm, e pelo amplificador a ser testado. Uma parcela do sinal óptico propagado ao longo do enlace é direcionada para um sistema de recepção onde o sinal é analisado (medidor de taxa de erros, analisador de espectro óptico, osciloscópio de amostragem, por exemplo). A outra parcela do sinal circula no anel. Este direcionamento é realizado utilizando um acoplador (divisor) óptico 2x2. As perdas no anel devido ao divisor e à chave AO foram de 7 dB, que somadas à atenuação dos 100 km da SSMF, 20 dB, totalizaram 27 dB. Esse deve ser o ganho do amplificador sob teste para compensar as perdas a cada circulação do sinal no anel.

O receptor é basicamente composto por um filtro óptico sintonizável (OBPF), um conversor analógico digital (ADC) e um processador de sinais digitais (DSP). O receptor é utilizado para realizar a recepção coerente do canal que foi modulado em duas polarizações, fase e quadratura. O sinal recebido passa pelo filtro óptico (passa banda com largura espectral de 200 GHz), que tem por objetivo separar somente o canal a ser analisado, além de reduzir a potência de ruído que será detectada no receptor. Uma vez separado o canal a ser analisado, ele

Figura 21 – Passos do processamento sobre o sinal DP-QPSK recebido.



Fonte: Extraída de (OLIVEIRA, 2014).

passa por um divisor ortogonal de polarizações (PBS). Um outro sinal é produzido por um laser oscilador local (LO) com o mesmo comprimento de onda do canal de teste e também tem suas polarizações divididas por outro PBS. Ambas as polarizações, do canal testado e do oscilador local, são direcionadas para as híbridas de 90° , que realizam interferência (batimento) desses componentes. Em seguida, os sinais de saída das híbridas são detectados por fotodetectores balanceados, que produzirão quatro linhas de 28 Gb/s. Os sinais que saem dos fotodetectores passam pelo processamento digital de sinais (DSP), executado de forma *off-line*, para equalização de efeitos da propagação do sinal na fibra óptica. No DSP os seguintes procedimentos são realizados: ortonormalização, compensação de dispersão cromática (CD), recuperação de relógio, demultiplexação de polarização, estimação de frequência e de fase. Esses procedimentos são ilustrados na Fig. 21.

5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS E ANÁLISE

Nesse capítulo são apresentados os resultados das caracterizações, consumo de potência elétrica e testes sistêmicos das topologias de amplificação óptica EDFA copropagante de um estágio, EDFA copropagante de dois estágios e híbrida DRA contrapropagante/EDFA copropagante. Os resultados da caracterização e de consumo de potência elétrica são apresentados por meio de máscaras de potência, nas Seções 5.1 e 5.2. Os resultados dos testes sistêmicos são apresentados por meio dos gráficos da OSNR e BER em função da distância do enlace óptico, na Seção 5.3.

5.1 DESEMPENHO DOS AMPLIFICADORES

Foram caracterizadas três topologias de amplificadores ópticos: EDFA de um estágio (topologia mostrada na Fig. 16), EDFA de dois estágios com VOA entre os estágios (topologia mostrada na Fig. 17) e Híbrido DRA/EDFA (topologia mostrada na Fig. 18). Os amplificadores foram caracterizados para a máscara de potência definida pelos seguintes parâmetros:

- Ganho mínimo: 20 dB;
- Ganho máximo: 30 dB;
- Potência mínima de entrada: -30 dBm;
- Potência máxima de entrada: 0 dBm.

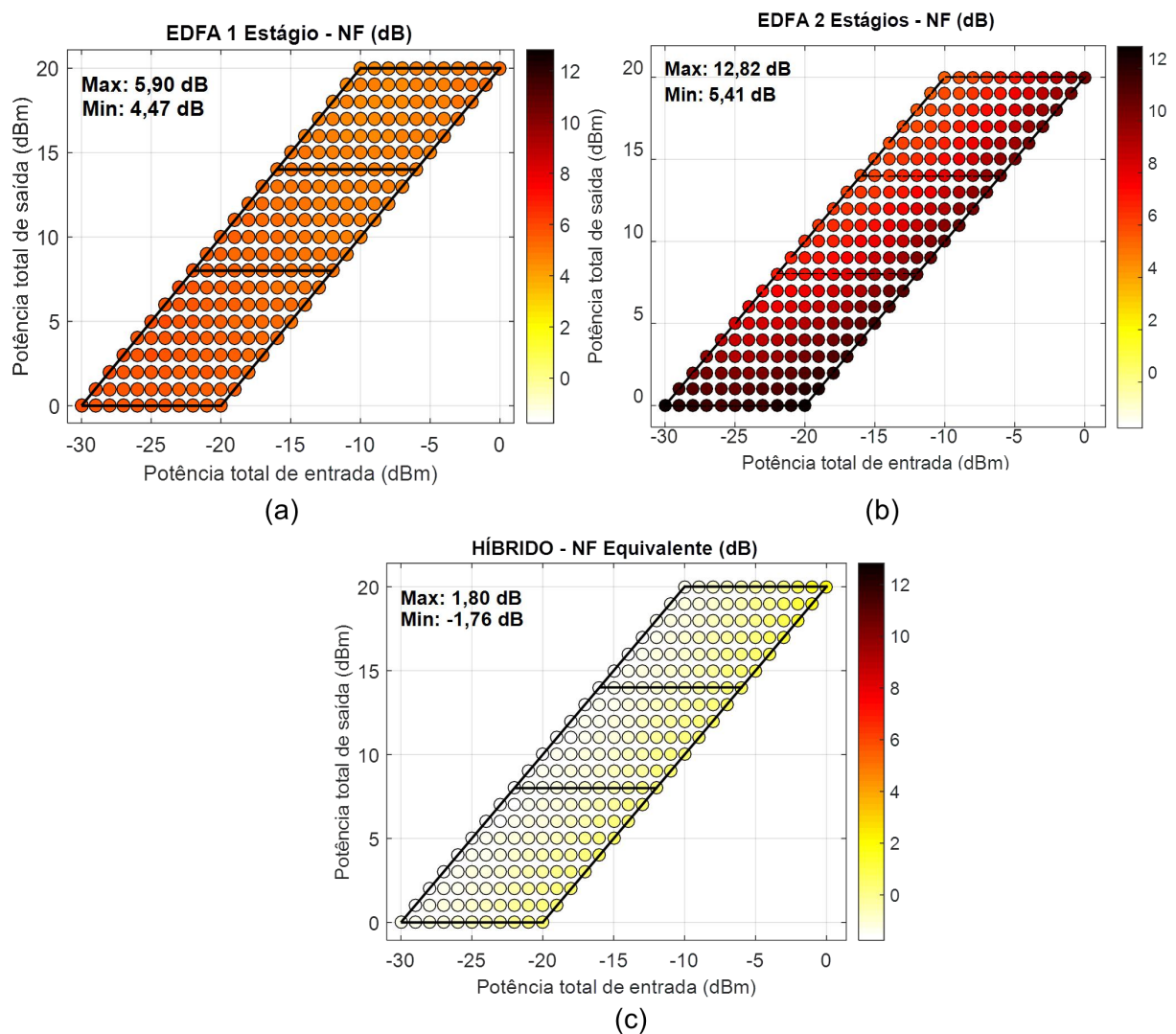
Essa região de operação foi definida dessa forma com o objetivo de amplificar *spans* com perdas que podem variar de 20 a 30 dB. Se for considerado que essas perdas são unicamente devido à fibra SSMF (atenuação de 0,2 dB/km), por exemplo, é possível compensar as perdas de *spans* que variam de 100 a 150 km. O passo ajustado para a caracterização foi de 1 dB. Assim, foram 11 valores de ganho e, para cada ganho, 21 valores de potência de entrada, totalizando 231 pontos na máscara.

Antes das caracterizações, foi verificado que os GFFs dos EDFAs testados não funcionavam como deveriam, então foi utilizado um WSS projetado como GFF nas saídas dos amplificadores, e a perda adicionada pela inserção do WSS (7 dB) foi descontada nos cálculos. Na caracterização do amplificador híbrido foram utilizados 50 km de fibra óptica SSMF para gerar ganho Raman.

Na Fig. 22 são mostrados os resultados das máscaras de potência de figura de ruído para as três topologias de amplificação testadas. A Fig. 22(a) mostra como a figura de ruído varia na região de operação definida, quando a potência de entrada e ganho variam. Observa-se que a inserção máxima e mínima de ruído é de 5,9 e 4,47 dB, respectivamente. A melhor região de operação, com figura de ruído menor que 5 dB, é a de potências totais de saída acima de 10 dBm,

para faixa de potências de entrada entre -13 e -4 dBm. Abaixo de -15 dBm de potência de entrada a figura de ruído aumenta até seu valor máximo. De um modo geral, o ruído inserido diminui à medida que a potência de entrada aumenta, pois aumenta o nível de saturação do amplificador, e com o aumento do ganho, de acordo com a Eq. (3). A Fig. 22(b) mostra a máscara de potência de figura de ruído para o EDFA de dois estágios, a qual apresenta uma variação da figura de ruído de 5,41 a 12,82 dB, em que a região de ganhos mais altos apresenta menor figura de ruído. A exceção ocorre para baixas potências de saída (menores que 5 dBm) porque o AGC desse amplificador mantém os ganhos dos estágios constantes, enquanto o VOA é ajustado para atingir o ganho alvo total. Dessa forma, para baixos valores de ganho e potência de saída, o nível de atenuação do VOA é maior, o que gera impacto negativo na figura de ruído, pois o nível de saturação diminui consideravelmente, principalmente no segundo estágio. Na Fig. 22(c) são

Figura 22 – Máscara de potência para a figura de ruído dos amplificadores (a) EDFA de um estágio, (b) EDFA de dois estágios e (c) híbrido Raman/EDFA.



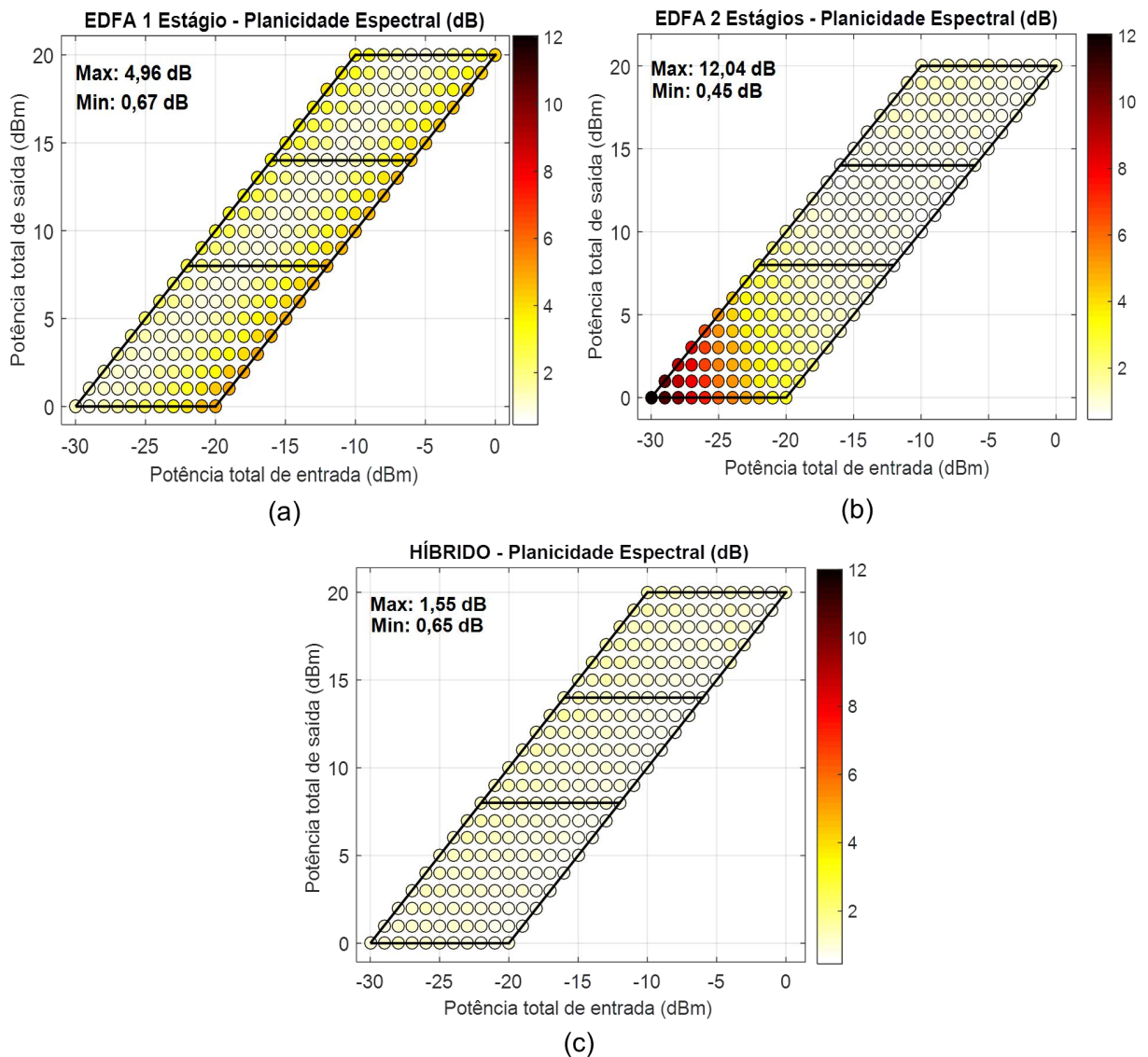
Fonte: Elaborada pelo autor.

mostrados os resultados da máscara de potência de figura de ruído equivalente para o amplificador híbrido DRA/EDFA, em que apresenta uma variação de -1,76 a 1,80 dB, onde a região de ganhos mais altos apresenta menor figura de ruído equivalente. Isso acontece porque o AGC desse amplificador mantém o ganho do estágio EDFA constante, variando o ganho do estágio Raman para prover o ganho alvo total. Assim, os ganhos altos exigem uma maior contribuição do estágio Raman, gerando efeito mais intenso distribuído na fibra, e consequentemente reduzindo a figura de ruído equivalente.

Na Fig. 23 são mostrados os resultados das máscaras de potência da planicidade espectral do ganho para as três topologias de amplificação testadas. A Fig. 23(a) mostra a máscara de potência de planicidade espectral de ganho para o EDFA de um estágio, na qual foi obtida uma planicidade espectral de ganho em torno de 0,7 dB para os ganhos 25 e 26 dB, aumentando até aproximadamente 5 dB à medida que se afasta desses ganhos. Isso acontece porque o GFF (WSS como GFF) foi projetado para perfil de ganho plano na parte central da máscara e como no EDFA de um estágio a planicidade varia com o ganho, o *tilt* aumenta à medida que se afasta da parte central da máscara de potência. Na Fig. 23(b) é mostrada a máscara de potência da planicidade espectral de ganho para o EDFA de dois estágios. Como esperado, é obtido o ganho praticamente plano (0,5 dB de planicidade espectral) para a maior parte da máscara de potência, somente falhando em atingir este nível quando o amplificador opera em potências de entrada baixas (menores que -17 dBm), pois abaixo desta potência o bombeio atinge o seu valor mínimo e ainda assim o ganho fornecido por cada estágio ultrapassa o ganho nominal, o que muda consideravelmente o perfil do ganho e, como consequência, muda a planicidade espectral. A Fig. 23(c) mostra a máscara de potência da planicidade espectral de ganho para o amplificador híbrido, onde há variação de 0,65 a 1,55 dB, mas que de uma forma geral é bem uniforme, isso porque o estágio EDFA se mantém com ganho fixo e plano em 13 dB, devido ao projeto do GFF (WSS como GFF), e o bombeio Raman para complemento do ganho foi projetado de tal forma a continuar plano, porém os resultados mostram que a planicidade piora à medida que a contribuição do Raman aumenta. Isso provavelmente acontece devido a um pequeno desbalanceamento nos bombeios Raman, causado por perdas nas fusões dos lasers com o acoplador de bombeio.

Na Fig. 24 são mostrados os resultados das máscaras de potência da precisão do AGC para as três topologias de amplificação testadas. A Fig. 24(a) mostra o resultado da máscara de potência da precisão do controle automático de ganho do EDFA de um estágio. Observa-se que o AGC foi eficaz, com erro absoluto variando entre -0,16 e 0,2 dB, o que é aceitável, considerando uma faixa de ganhos de 20 a 30 dB, na qual erro relativo é no máximo de 1%. A Fig. 24(b) mostra o resultado da máscara de potência da precisão do controle automático de ganho do EDFA de dois estágios. Observa-se que o AGC foi eficaz, com erro absoluto variando entre -0,12 e 0,2 dB, o que é aceitável, considerando uma faixa de ganhos de 20 a 30 dB, na qual erro relativo é no máximo de 1%. A Fig. 24(c) mostra o resultado da máscara de potência da precisão do controle automático de ganho do EDFA de dois estágios. Observa-se que o AGC foi eficaz,

Figura 23 – Máscara de potência para a planicidade espectral do ganho dos amplificadores (a) EDFA de um estágio, (b) EDFA de dois estágios e (c) híbrido Raman/EDFA.



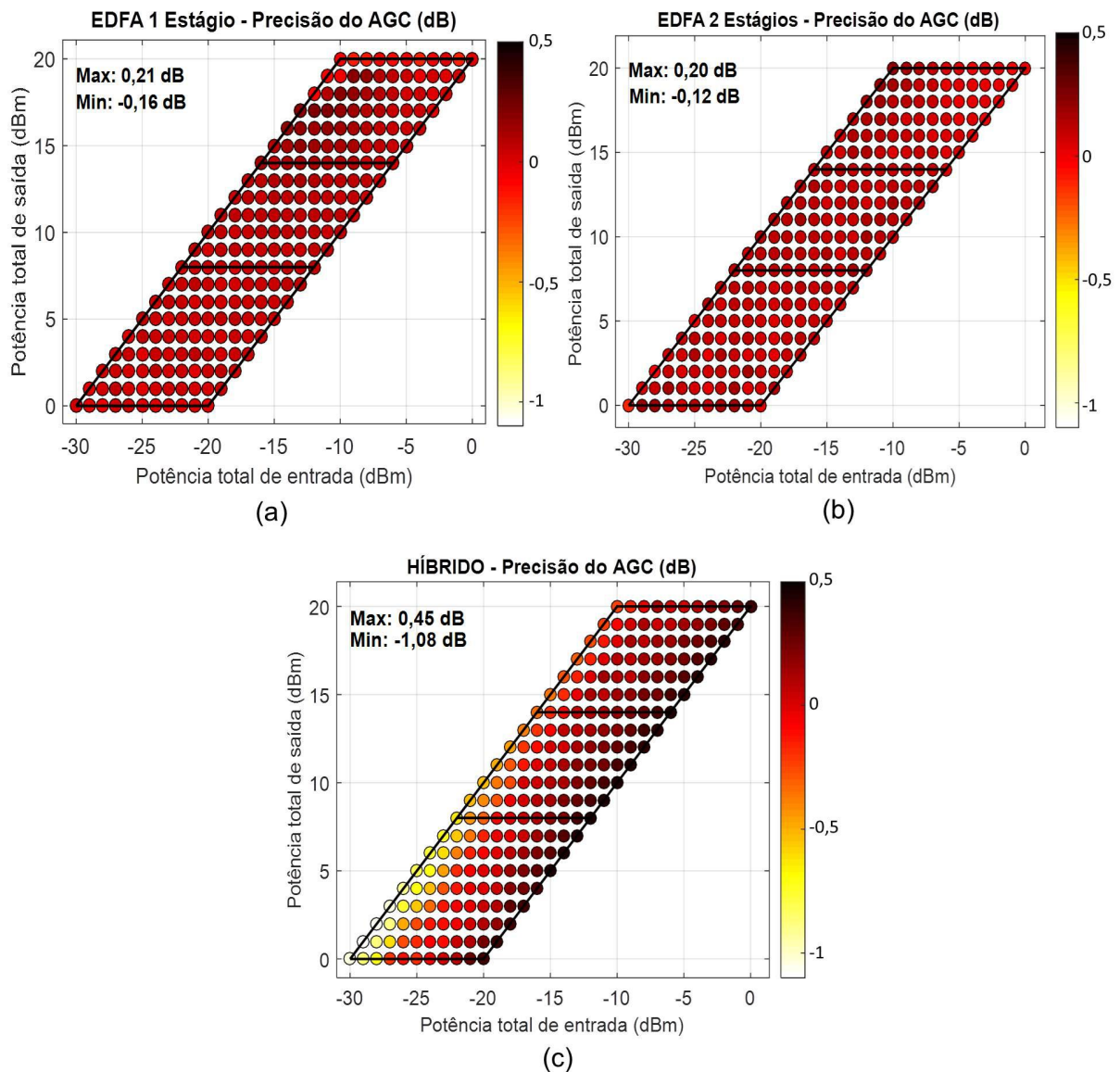
Fonte: Elaborada pelo autor.

com erro absoluto variando entre -1,08 e 0,45 dB, o que é aceitável, considerando uma faixa de ganhos de 20 a 30 dB, na qual o erro relativo é no máximo de 3,6%, na região de altos ganhos e baixa potência de entrada.

5.2 CONSUMO DE POTÊNCIA ELÉTRICA

Nas medidas de consumo de potência elétrica, a temperatura ambiente foi mantida em 24 °C. A temperatura nominal de operação interna dos lasers de bombeio dos amplificadores EDFAs de um e dois estágios é de 45 °C e para o estágio Raman do amplificador híbrido DRA/EDFA é de 35 °C. Uma ventoinha posta sobre a placa dissipadora auxiliou a dissipar o calor para manter a temperatura interna do amplificador estável. Na prática, isso também é feito nas estações de

Figura 24 – Máscara de potência para a precisão controle automático do ganho dos amplificadores (a) EDFA de um estágio, (b) EDFA de dois estágios e (c) híbrido Raman/EDFA.



Fonte: Elaborada pelo autor.

amplificação.

Antes de fazer as medidas de consumo dos amplificadores em operação, foram feitas medidas do consumo de potência elétrica com lasers de bombeio desligados, para verificar a contribuição da placa de controle eletrônico no estado ocioso. O EDFA de um estágio consumiu 7,8 W no estado ocioso, o EDFA de dois estágios consumiu 7,6 W e o amplificador híbrido DRA/EDFA consumiu 8 W no estado ocioso.

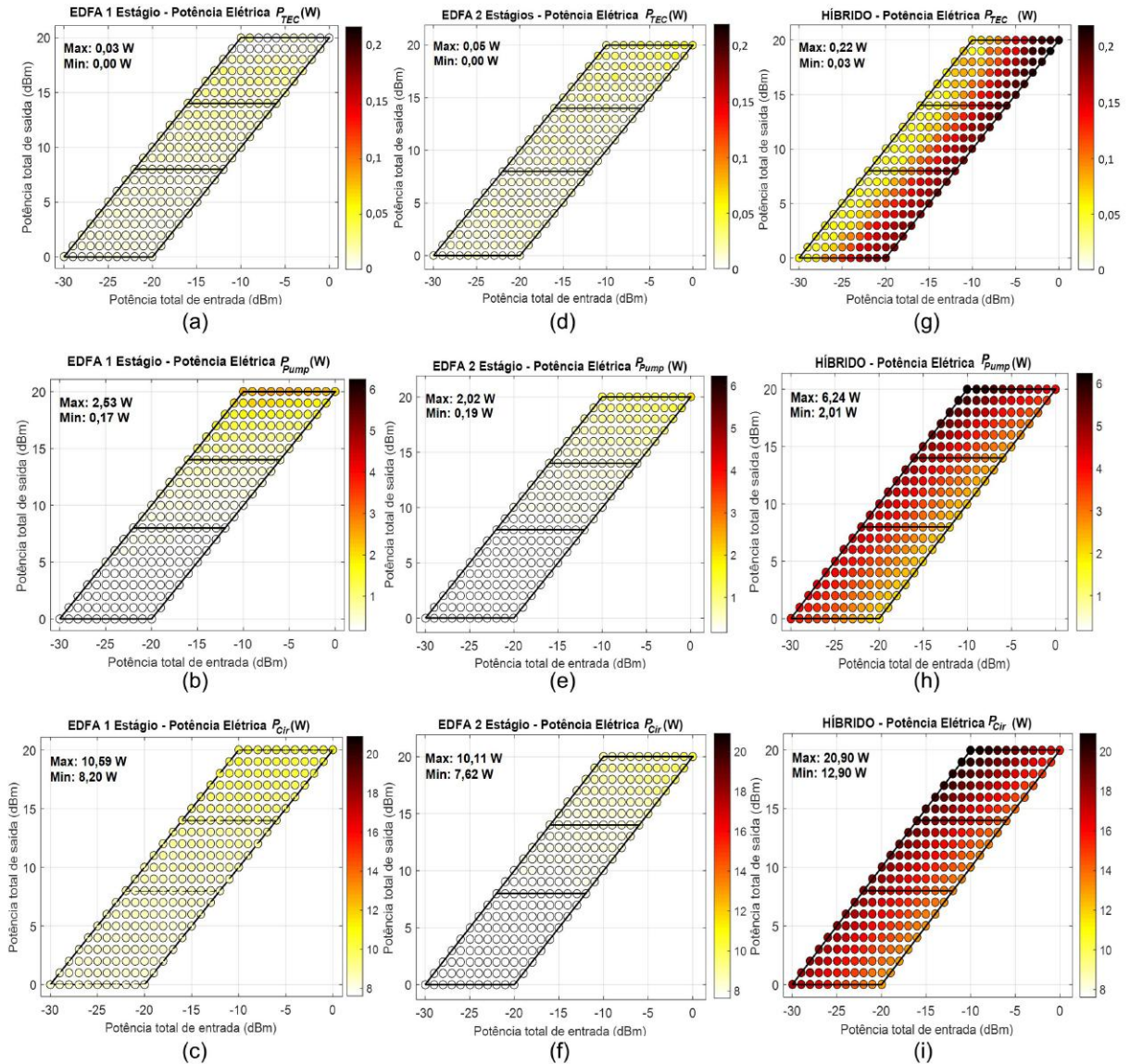
A Fig. 25 mostra os resultados das máscaras de potência para a potência elétrica consumida pelos TECs, lasers de bombeio e placa de circuito eletrônico das três topologias de amplificação testadas neste trabalho.

As Figs. 25(a), 25(b) e 25(c) são relativas ao EDFA de um estágio. A Fig. 25(a) mostra a

máscara de potência para o consumo de potência elétrica do TEC do laser de bombeio, que tem consumo máximo de 30 mW, que é praticamente desprezível e sua influência no consumo total pode ser, nesse caso, desprezada. Já na Fig. 25(b) é mostrado o consumo de potência elétrica do laser de bombeio na região de operação, onde é possível observar que ele aumenta com o aumento da potência óptica de saída, com valores máximo e mínimo de 2,53 W e 0,17 W, respectivamente. O consumo de potência elétrica do circuito eletrônico é mostrado na Fig. 25(c), em que foi verificado que o consumo aumenta com a potência óptica de saída, com valores mínimo e máximo de 8,2 e 10,59 W, respectivamente.

As Figs. 25(d), 25(e) e 25(f) são relativas ao EDFA de dois estágios. A Fig. 25(d) mostra

Figura 25 – Máscaras de potência do para potência elétrica consumida: (a) pelo laser P_{pump} , (b) pelo TEC P_{TEC} e (c) pelo circuito eletrônico P_{Cir} do EDFA de um estágio; (d) pelos lasers P_{pump} , (e) pelos TECs P_{TEC} e (f) pelo circuito eletrônico P_{Cir} do EDFA de dois estágios; (g) pelos lasers P_{pump} , (h) pelos TECs P_{TEC} e (i) pelo circuito eletrônico P_{Cir} do amplificador híbrido Raman/EDFA.



Fonte: Elaborada pelo autor.

a máscara de potência para o consumo de potência elétrica dos TECs, que têm consumo máximo de 50 mW e praticamente não contribuem para o consumo total. Na Fig. 25(e) é mostrado o consumo dos dois lasers de bombeio na região de operação, onde é possível observar que o consumo aumenta com o aumento da potência óptica de saída, com valores mínimo e máximo de 0,19 e 2,02 W, respectivamente. Observa-se, ainda, que a potência elétrica varia com o ganho, sendo mais evidente para potências ópticas de saída maiores. O consumo decresce com o aumento do ganho. Isso acontece porque, para uma potência fixa de saída, o ganho global decresce à medida que a potência de entrada aumenta. Mas no primeiro estágio do amplificador, que mantém ganho fixo independente do nível de potência de entrada, a potência de saída aumenta, aumentando também o consumo. O consumo do circuito eletrônico é mostrado na Fig. 25(f), onde é possível observar que a potência elétrica aumenta com a potência óptica de saída com o mesmo padrão do consumo dos lasers de bombeio, como esperado, com valores mínimo e máximo de 7,62 e 10,11 W, respectivamente.

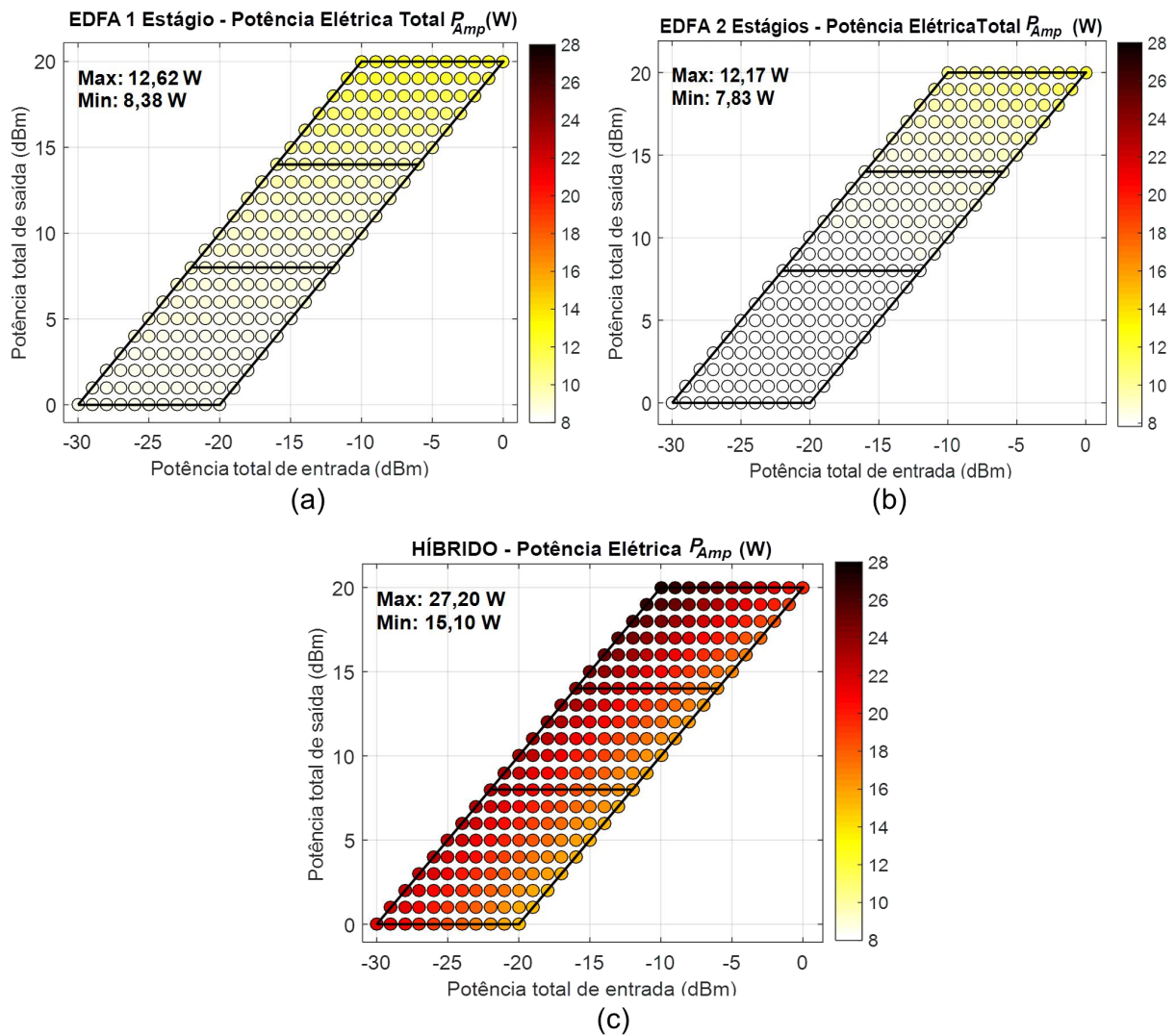
As Figs. 25(g), 25(h) e 25(i) são relativas ao amplificador híbrido Raman/EDFA. A Fig. 25(g) mostra a máscara de potência para o consumo de potência elétrica dos TECs, que têm consumo máximo de 220 mW e praticamente não influenciam no consumo total. Na Fig. 25(h) é mostrado o consumo dos lasers de bombeio na região de operação, onde pode ser observado o aumento da potência elétrica com o aumento da potência óptica de saída, devido ao estágio EDFA, e também com o ganho, devido ao estágio Raman, com valores mínimo e máximo de 2,01 W e 6,24 W, respectivamente. A potência elétrica do circuito eletrônico é mostrada na Fig. 25(i), onde é possível observar o mesmo padrão de consumo de potência elétrica dos lasers de bombeio, com valores mínimo e máximo de 12,9 e 20,9 W, respectivamente.

Como foi verificado, o consumo dos TECs pode ser desprezado quando comparado com os consumos do bombeio e do circuito. No entanto, é importante frisar que os TECs podem vir a consumir bem mais energia elétrica se o encapsulamento dos lasers de bombeio operar em temperaturas mais baixas ou mais altas que a nominal, podendo chegar a consumir mais que o próprio bombeio.

As máscaras para potência elétrica total das três topologias de amplificação testadas são mostradas na Fig. 26. A Fig. 26(a) mostra o resultado para a potência elétrica total do EDFA de um estágio na região de operação, onde é possível observar que o consumo de energia elétrica com o aumento da potência óptica de saída é praticamente constante com o ganho, com valores mínimo e máximo de potência elétrica de 8,38 e 12,62 W, respectivamente. Analisando esses resultados, verifica-se que o circuito eletrônico pode consumir de 84% a 98% da energia elétrica total consumida pelo EDFA de um estágio na região de operação definida. Uma outra forma de analisar é em termos da adição/remoção de canais (potência óptica de entrada). Se o número de canais for aumentando e o ganho for mantido (potência óptica de saída aumentando), o consumo de energia elétrica também aumentará. A Fig. 26(b) mostra a máscara para potência elétrica total do EDFA de dois estágios na região de operação, onde é possível observar que o consumo de energia elétrica cresce com o aumento da potência óptica de saída e é praticamente constante com

o ganho, com valores mínimo e máximo de potência elétrica de 7,83 e 12,17 W, respectivamente. Desses resultados, verifica-se que o circuito eletrônico pode consumir de 83% a 97% da energia elétrica total consumida pelo EDFA de um estágio na região de operação definida. Comparando os resultados do EDFA de um e de dois estágios, é possível observar que apesar do EDFA de dois estágio possuir dois lasers de bombeio, seu consumo de potência elétrica foi menor ou igual ao do EDFA de um estágio em toda máscara de potência. Foi verificado que a soma das correntes elétricas de polarização dos lasers de bombeio do EDFA de dois estágios foi sempre menor ou igual à corrente elétrica de polarização do laser do EDFA de um estágio. Como essa corrente elétrica está diretamente ligada ao consumo de potência elétrica do laser e este com o consumo total do amplificador, tais resultados são esperados. Por fim, a Fig. 26(c) mostra a máscara para potência elétrica total do amplificador híbrido DRA/EDFA, onde é possível observar que

Figura 26 – Máscaras de potência para potência elétrica total $P_{Amp} = P_{pump} + P_{TEC} + P_{Cir}$ do amplificador (a) EDFA de um estágio, (b) EDFA de dois estágios e (c) híbrido Raman/EDFA.



Fonte: Elaborada pelo autor.

o consumo de energia elétrica cresce com o aumento da potência óptica de saída e do ganho, o mesmo padrão do consumo dos lasers, com valores mínimo e máximo de potência elétrica de 15,10 e 27,20 W, respectivamente. Desses resultados, verifica-se que o circuito eletrônico pode consumir de 77% a 85% da energia elétrica total consumida pelo amplificador híbrido na região de operação definida. Outro ponto importante é que o aumento de consumo de mais de duas vezes do híbrido em relação aos EDFAs é causado pelo uso do amplificador Raman, o qual necessita de altos níveis de bombeios e consequente maior consumo de energia elétrica.

5.3 TESTES SISTÊMICOS

Nos testes sistêmicos, o amplificador auxiliar da montagem experimental da Fig. 20 forneceu potência de 21 dBm para a entrada do anel de recirculação, potência esta que foi atenuada de 8,8 dB, devido à chave óptica e divisor, restando 12,2 dBm na entrada da fibra. Os 100 km de SSMF atenuou 19,4 dB, deixando a potência de entrada nos amplificadores com -7,2 dBm. Como mostrado na Seção 4.4, os amplificadores devem fornecer ganho de 27 dB para compensar exatamente as perdas no anel. Assim, a potência total de saída dos amplificadores foi de 19,8 dBm.

Os testes foram realizados com 20 canais na parte mais plana do espectro da banda amplificação (192,1 até 194,05 THz) com espaçamento de 100 GHz entre eles para os três casos. Não foi possível o uso dos 40 canais distribuídos em toda banda C, pois os amplificadores não dispunham de GFF, o que degrada a planicidade espectral do ganho e, como consequência, limita bastante o alcance. Uma possível solução seria o uso do WSS para tornar o espectro plano, mas a perda adicionada pelo dispositivo a tornava impraticável. Outra razão para o uso de apenas 20 canais foi que os 10 dos 20 últimos da banda C (194,15 até 196,05 THz) estavam, por razões desconhecidas, com OSNR bem abaixo das dos outros canais na entrada do anel de recirculação.

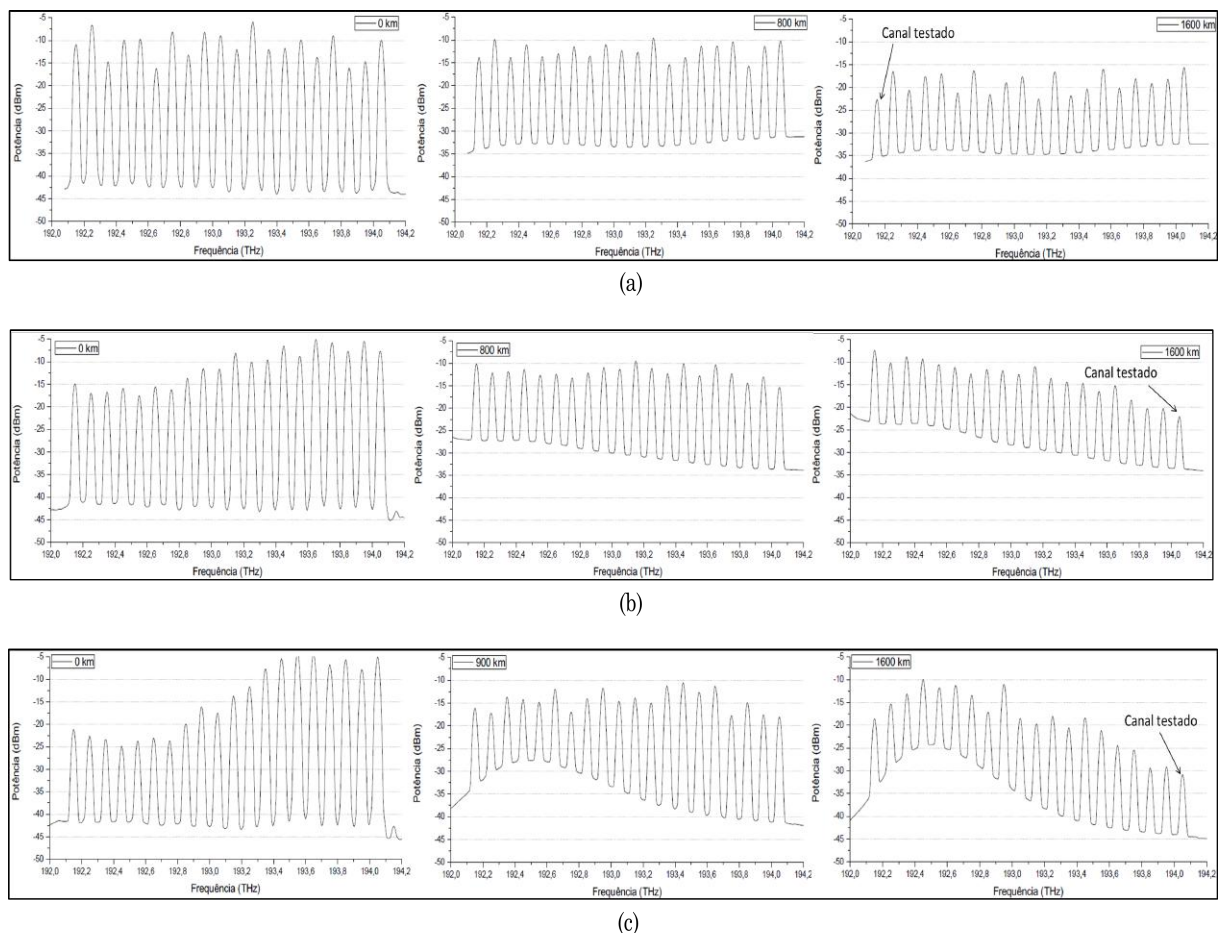
Antes dos testes propriamente ditos, foi verificado experimentalmente qual a OSNR mínima para uma taxa de erro de bits de 4×10^{-3} , BER limite para recepção coerente DP-QPSK 112 Gb/s livre de erros com FEC (Forward Error Correction) de 7%. O valor foi de aproximadamente 16 dB. Dessa forma, foi possível saber e acompanhar o canal que limitaria o alcance da transmissão com cada topologia de amplificação testada e otimizar os níveis de potência de lançamento de cada canal (pré ênfase) para conseguirmos alcance máximo.

A Fig. 27 mostra os espectros do sinal óptico transmitido, com resolução de 0,1 nm no analisador de espectro, no lançamento (0 km), depois de 800 km e 1600 km para os amplificadores EDFAs de um e dois estágios, Figs. 27(a) e 27(b), respectivamente, e no lançamento, depois de 900 km e 1600 km para o amplificador híbrido, Fig. 27(c). Os sinais sofreram uma atenuação adicional de 8 dB na saída do anel de recirculação para medição no OSA. Dessa forma, para se ter o valor exato de potência óptica na saída do anel de recirculação, deve-se somar 8 dB (deslocamento positivo) em todos os espectros mostrados na Fig. 27. Esses espectros mostram o impacto do acúmulo do ganho não plano por não se utilizar dispositivos como GFF ou WSS, principalmente nos casos do EDFA de dois estágios e do amplificador híbrido. Para o EDFA

de um estágio o canal escolhido para acompanhar a variação de OSNR e BER em função da distância foi o de 192,15 THz, pois foi o primeiro a apresentar OSNR mínima para detecção livre de erros. Pela mesma razão, foi escolhido o canal 194,05 THz para os amplificadores EDFA de dois estágios e híbrido.

A Fig. 28 mostra os resultados da variação da OSNR do canal de teste escolhido com a distância de transmissão para os amplificadores testados. Observa-se que a OSNR do canal de teste no lançamento para o amplificador híbrido é, devido à pré ênfase, mais alta que a dos EDFAs e se mantém assim até 1600 km. Nos seis primeiros *spans*, a tendência de queda da OSNR para o amplificador híbrido é menor que as dos EDFAs, pois o ruído inserido é menor, concordando com os resultados da máscara de potência para figura de ruído. A partir de 1100 km, ou 11 *spans*, a tendência de queda da OSNR do amplificador híbrido aumenta, devido à forte influência do acúmulo da não planicidade do perfil de ganho, que faz com que canais de certa parte da banda de transmissão receba cada vez mais ganho e que canais de outra parte da banda receba menos ganho. O EDFA de um estágio foi o amplificador que mais manteve a planicidade

Figura 27 – Espectros do sinal óptico transmitido para os amplificadores (a) EDFA de um estágio no lançamento, em 800 km e 1600 km, (b) EDFA de dois estágios no lançamento, em 800 km e 1600 km e (c) híbrido no lançamento, em 900 km e 1600 km.



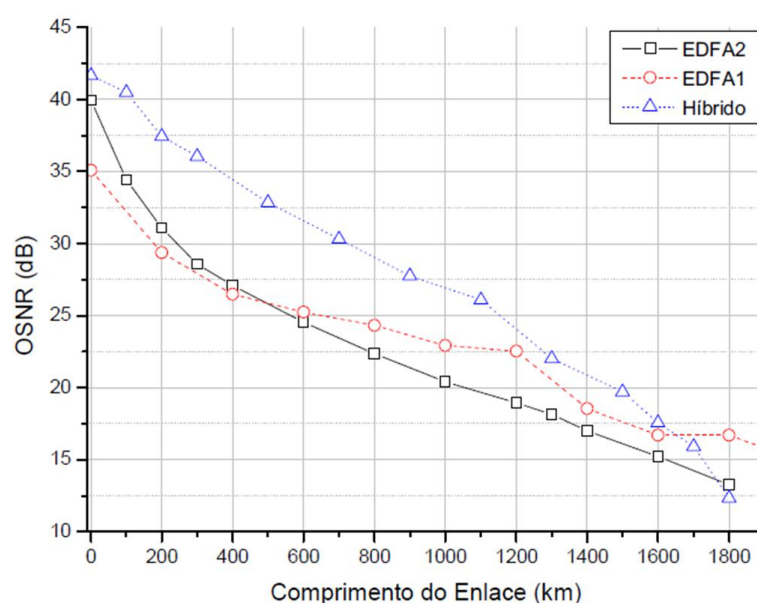
Fonte: Elaborada pelo autor.

espectral, por isso a pré ênfase para esse amplificador deixou a potência de lançamento dos canais mais bem distribuída do que a dos outros amplificadores e, como consequência, o canal de teste teve a menor OSNR no lançamento (35 dB) quando comparado com o dos outros, como pode ser visto na Fig. 28. Em 1200 km, ou 12 *spans*, vemos uma queda brusca na OSNR. Essa queda foi causada principalmente pelo o aumento do nível de potência do ruído da parte da banda não ocupada, que chegou a ficar maior que o nível dos canais, de tal forma que recebeu parte do ganho que deveria ir para os canais, sendo crítico a partir daquele ponto. O EDFA de dois estágios foi o que manteve a curva da OSNR mais bem comportada, porém foi o que a degradou mais, o que está de acordo com o resultado da máscara de potência para figura de ruído, sendo o amplificador que mais inseriu ruído dentre os três testados neste trabalho.

De uma forma geral, esperávamos que o amplificador híbrido tivesse um desempenho muito superior aos demais e degradasse menos a OSNR, seguido pelo EDFA de um estágio, de acordo com os resultados das caracterizações para figura de ruído mostrados na Fig.22 para região de -7 dBm de potência de entrada e 20 dBm de saída dos amplificadores. Mas como foi observado, a não planicidade do perfil de ganho teve muita influência, devido à não utilização de dispositivos para correção do espectro. De qualquer forma, são necessários mais testes experimentais, simulações, inclusive em outras regiões das máscaras de potência, bem como uma análise mais detalhada.

A Fig. 29 mostra os resultados da variação da BER do canal de teste escolhido com a distância de transmissão para os amplificadores testados, em que foi feita uma média de 10 medidas para cada ponto. Observa-se que a taxa de erro é praticamente igual para os três

Figura 28 – Variação da OSNR com o comprimento do enlace, com *spans* de 100 km, do canal testado para os amplificadores híbrido (triângulo azul), EDFA de um estágio (círculo vermelho) e EDFA de dois estágios (quadrado preto).

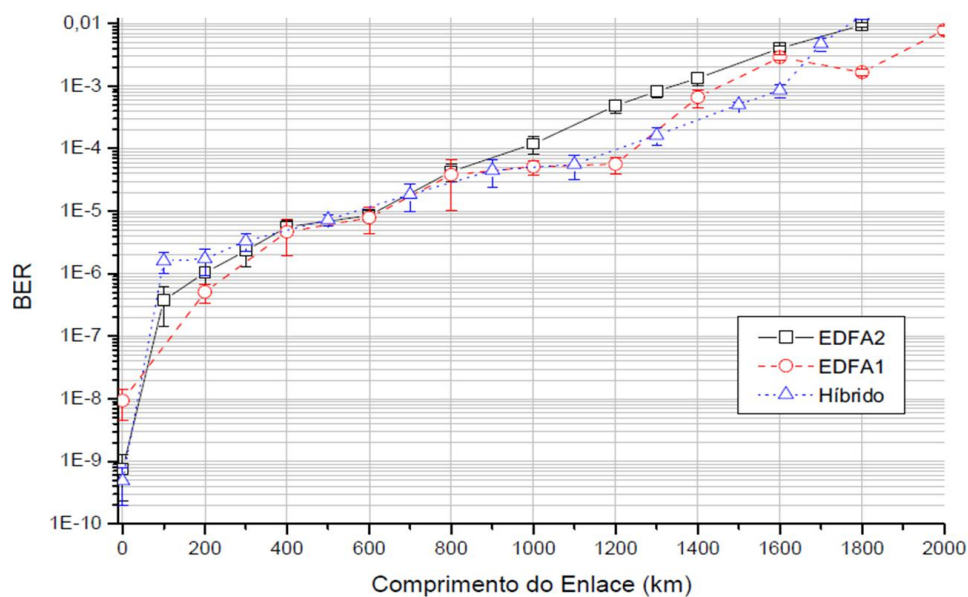


Fonte: Elaborada pelo autor.

amplificadores até 800 km, ou oito *spans*, e a partir daí o EDFA de dois estágios apresenta desempenho inferior em relação aos outros. Considerando que a BER para alcance máximo é de 4×10^{-3} , apenas os amplificadores híbrido e EDFA de um estágio conseguem ultrapassar os 1600 km, e que neste ponto a BER do amplificador híbrido é de aproximadamente 1×10^{-3} , enquanto que a do EDFA de um estágio é de aproximadamente 3×10^{-3} e a do de dois estágios está no limite da recepção livre de erro. Na prática, esses resultados mostram que o alcance é o mesmo para os três amplificadores, com variação de no máximo 100 km entre uma topologia de amplificação e outra. Observa-se que o gráfico da BER para o EDFA de um estágio não é bem comportado e que os valores até diminuem em alguns pontos, como em 1200 km e 1800 km, mesmo com o aumento do número de *spans*. Isso aconteceu devido à instabilidade do nível de potência dos canais na saída do modulador, que variava a OSNR em até 3 dB no intervalo entre as medidas de um ponto para outro, por isso ora a BER é melhor do que a do *spans* anterior ora piora bruscamente. A instabilidade dos canais foi uma das principais dificuldades nas medidas de BER e OSNR.

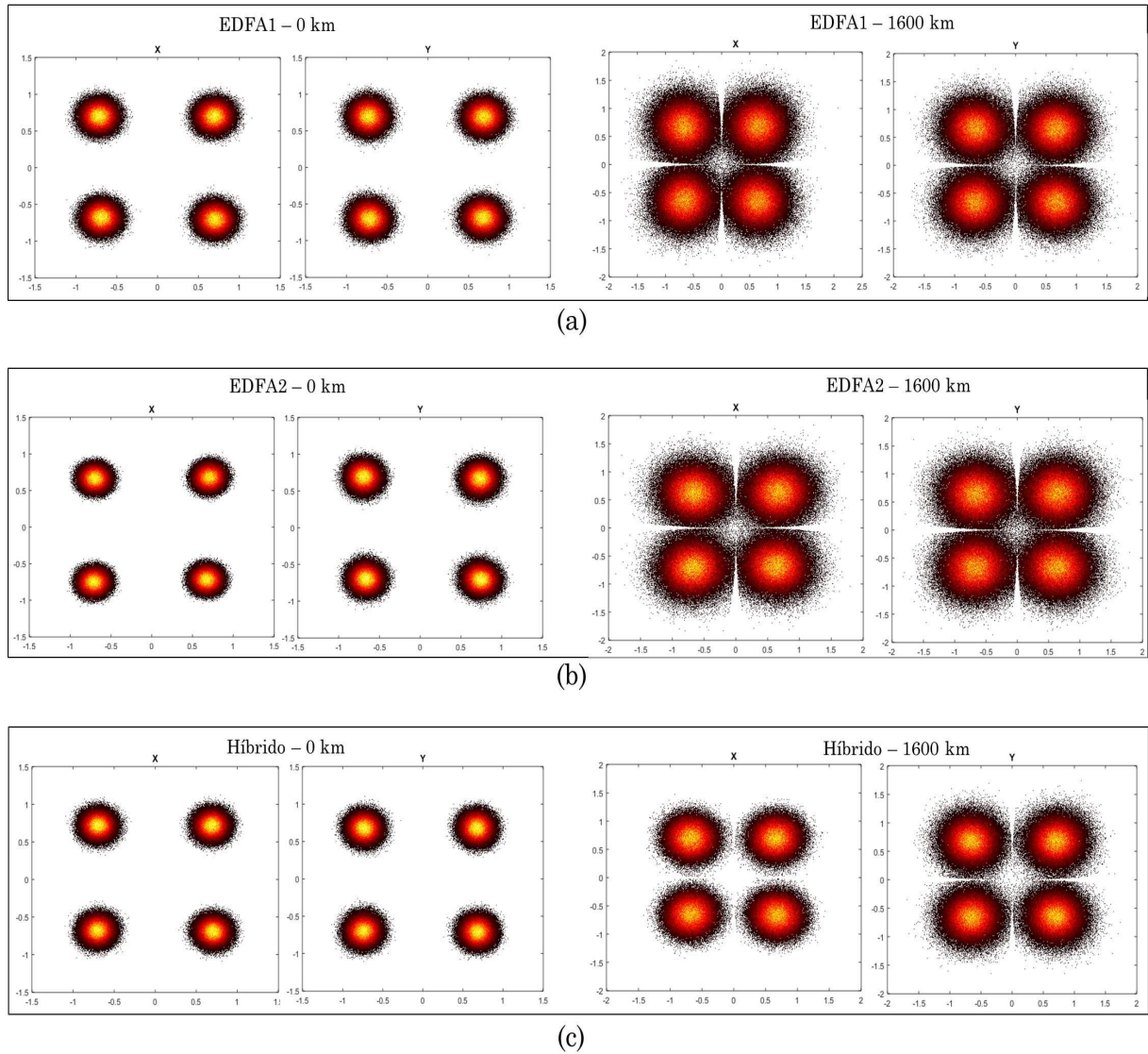
Quando os gráficos da OSNR e BER nas Figs. 28 e 29, respectivamente, são comparados, observa-se que apesar do canal de teste do amplificador híbrido ter a melhor OSNR, desde do lançamento até 1600 km (16 *spans*), o valor da BER foi maior ou igual ao do EDFA de um estágio para a maioria dos pontos no gráfico. Esperava-se que a BER do amplificador híbrido fosse menor que a das outras topologias, por causa da relação inversa com a OSNR. No entanto, como foi necessário fazer uma pré ênfase para maior alcance, os níveis de potência do canal de teste e dos vizinhos ficaram altos, o que pode ter gerado efeitos não lineares como o SPM

Figura 29 – Variação da BER com o comprimento do enlace, com *spans* de 100 km, do canal testado para os amplificadores híbrido (triângulo azul), EDFA de um estágio (círculo vermelho) e EDFA de dois estágios (quadrado preto).



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 30 – Constelações das polarizações X e Y do sinal 112 Gb/s NRZ DP-QPSK em 0 e 1600 km para os testes com amplificadores (a) EDFA de um estágio, (b) EDFA de dois estágios e (c) híbrido DRA/EDFA.



Fonte: Elaborada pelo autor.

e XPM e degradado a BER. Junta-se a isso o fato da amplificação Raman distribuída manter o nível de potência dos canais alto durante toda a propagação na fibra óptica, o que é bom do ponto de vista da OSNR, mas pode gerar efeitos não lineares indesejáveis que degradam a BER. Mas, como já foi exposto anteriormente, são necessários mais testes experimentais, avaliação do impacto da não linearidade na transmissão, simulações e uma análise mais bem detalhada.

A Fig. 30 mostra as constelações na recepção do sinal das polarizações X e Y do canal testado 112 Gb/s DP-QPSK no lançamento e após a passagem no enlace de 1600 km, ou 16 *spans*, para os amplificadores testados. A Fig. 30(a) mostra as constelações para o EDFA de um estágio. A Fig. 30(b) mostra as constelações para o EDFA de dois estágios. A Fig. 30(c) mostra as constelações para o amplificador híbrido.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Foi apresentada nesta Dissertação uma avaliação experimental do desempenho óptico e consumo de potência elétrica de amplificadores EDFAs de um e dois estágios e híbrido DRA contrapropagante/EDFA com controle automático de ganho para redes ópticas WDM reconfiguráveis. A avaliação foi feita em uma região dinâmica de potências ópticas de entrada, -30 a 0 dBm, e de ganhos, 20 a 30 dB, na banda C. O desempenho óptico foi avaliado por meio da figura de ruído, planicidade espectral e controle automático do ganho. A potência elétrica total consumida foi obtida a partir dos consumos dos lasers de bombeio, TECs e placa eletrônica de controle do amplificador. Os resultados da caracterização óptica e do consumo de potência foram apresentados na forma de máscaras de potência. Também foram feitos testes sistêmicos em anel de recirculação óptica com 20 canais espaçados de 100 GHz e modulados com 112 Gb/s NRZ DP-QPSK. Esses testes foram realizados no ponto de operação de potência de entrada nos amplificadores ópticos de -7 dBm e ganho de 27 dB, com o objetivo de compensar perdas dos *spans* de 100 km e dispositivos do anel de recirculação. O desempenho sistêmico foi avaliado a partir da OSNR e BER em função do comprimento do enlace óptico.

Os resultados das caracterizações mostraram como a figura de ruído variou na região da máscara de potência para cada amplificador testado. O EDFA de um estágio apresentou uma figura de ruído que variou de 4,47 a 5,9 dB, com melhores desempenhos na região de altas potências de entrada e altos ganhos. O EDFA de dois estágios apresentou uma figura de ruído que variou de 5,41 a 12,82 dB, com melhor desempenho para altos ganhos e altas potências de saída. Para o amplificador híbrido DRA/EDFA foi avaliada figura de ruído equivalente, com valores que variaram de -1,76 a 1,8 dB, melhorando o desempenho com o aumento do ganho, devido à contribuição da amplificação Raman. Como esperado, o amplificador híbrido é o que apresenta melhor desempenho com relação à inserção de ruído, devido ao uso da amplificação Raman. O EDFA de dois estágios foi o que, no geral, apresentou maior figura de ruído, devido ao uso do VOA entre os estágios para atenuação do sinal.

Os resultados das caracterizações mostraram como a planicidade espectral do ganho variou na região da máscara de potência para cada amplificador testado. A planicidade espectral do EDFA de um estágio variou de 0,7 a 5 dB, com melhores resultados para os ganhos centrais da máscara de potência, devido ao GFF que foi projetado para ganho plano em 25 dB de ganho. Desses resultados, conclui-se que o EDFA de um estágio não é adequado para operar como amplificador de linha em redes ópticas reconfiguráveis, pois a planicidade espectral do ganho é crítica para a maioria dos pontos de operação, o que deteriora rapidamente a OSNR de muitos canais e limita o alcance do sistema. Para o EDFA de dois estágios a planicidade espectral foi de praticamente 0,5 dB para quase toda a máscara de potência, com exceção da região de potências de entrada menores que -17 dBm, onde a planicidade chegou a atingir 12 dB. A planicidade espectral do amplificador híbrido DRA/EDFA variou de 0,65 a 1,55 dB, em que o desempenho

piorou com o aumento do ganho Raman, devido ao pequeno desbalanceamento entre as potências dos lasers de bombeio Raman. No geral, o EDFA de dois estágios apresentou melhor planicidade espectral, com exceção de alguns pontos de operação.

Os resultados das caracterizações mostraram a precisão do AGC na região da máscara de potência para cada amplificador testado. Os AGCs dos EDFAs de um e de dois estágios atuaram de forma satisfatória, com erro máximo de 1%. A precisão do AGC do amplificador híbrido DRA/EDFA variou de -1,08 a 0,45 dB, com erro relativo máximo de 3,6%, ou seja, menos preciso que o dos EDFAs, mas ainda satisfatório.

Dos testes de consumo de energia elétrica, foi observado que o EDFA de um estágio consumiu de 8,38 a 12,62 W, aumentando esse consumo com o aumento da potência óptica de entrada, para um determinado ganho, devido à necessidade de um maior bombeio. Isso mostra que quanto maior o número de canais a ser amplificados, maior o consumo de energia elétrica. Nesse caso, a placa eletrônica consumiu de 84 a 98% da energia elétrica total. O EDFA de dois estágios consumiu de 7,83 a 12,17 W, aumentando o consumo com o aumento da potência óptica de entrada, para um determinado ganho. A placa eletrônica do EDFA de dois estágios consumiu de 83 a 97% da energia elétrica total. O amplificador híbrido consumiu de 15,1 a 27,2 W, aumentando o consumo com aumento da potência de entrada, para um certo ganho, mas, nesse caso, o consumo de potência elétrica também aumenta com o aumento do ganho, devido à contribuição Raman. A placa eletrônica do híbrido consumiu de 77 a 85% da energia elétrica total. Assim, concluímos que o amplificador híbrido pode consumir mais de duas vezes a energia elétrica que cada amplificador EDFA consome na região de operação testada. Mas analisar esses números de forma absoluta não é o melhor jeito de comparar o consumo de energia elétrica, visto que o amplificador híbrido insere baixa quantidade de ruído quando comparado com os outros amplificadores testados e permite o aumento da taxa de transmissão (com uso de formato de modulação mais eficiente) ou do alcance da rede (com uso maior quantidade de seções de fibra) ou de ambos. Uma melhor forma de se fazer uma comparação é analisar o aumento ou a economia de energia elétrica por bit (joule/bit) quando um ou outro amplificador é utilizado. Dessa forma, considere, por exemplo, um determinado enlace de uma rede óptica que utiliza EDFAs de dois estágios, formato de modulação 4-QAM e opera com OSNR próxima do limite da recepção livre de erro. Se os EDFAs forem substituídos por amplificadores híbridos e não houver nenhuma outra mudança no sistema, o gasto de energia elétrica por bit por amplificador irá, no mínimo, duplicar. Nesse caso, apesar de haver um aumento de mais de 6 dB na OSNR, não será vantajoso substituir o EDFA de dois estágios pelo amplificador híbrido. No entanto, esse aumento de mais de 6 dB na OSNR permite a utilização de formatos de modulação mais eficientes como o 16-QAM, que é duas vezes mais eficiente que o 4-QAM. Nesse último contexto, substituir o EDFA de dois estágios pelo amplificador híbrido aumentará em duas vezes o consumo de energia elétrica por amplificador, mas a quantidade de bits transmitida também aumentará nessa proporção, mantendo praticamente o mesmo consumo de energia elétrica por bit por amplificador. Dessa forma, a utilização do amplificador híbrido permitiu o aumento de capacidade de transmissão do

sistema mantendo a mesma eficiência energética.

Os resultados dos testes sistêmicos mostraram, a partir dos gráficos da BER, desempenhos similares até 800 km de distância de transmissão com os três amplificadores testados. A partir dessa distância, o EDFA de dois estágios apresentou desempenho inferior em relação aos outros amplificadores, com alcance máximo de transmissão livre de erro de 1500 km, considerando uma BER limite de 4×10^{-3} . Nos casos de transmissão com o amplificador híbrido ou EDFA de um estágio, o alcance máximo foi de 1700 km. De uma forma geral, esperávamos um desempenho muito superior do amplificador híbrido, o que não ocorreu. No entanto, como foi observado anteriormente, a falta de um gerenciamento de planicidade, a necessidade de uma pré ênfase de nível de potência dos canais e efeitos não lineares podem ter prejudicado nossa avaliação. Por isso, são necessários mais testes experimentais, avaliação do impacto da não linearidade, simulações e análises mais detalhadas. Isso poderá ser feito em trabalhos futuros.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

Em seguida, são sugeridos alguns temas para trabalhos futuros nesta linha de pesquisa:

1. Avaliação experimental da eficiência energética (bits/J) de amplificadores ópticos EDFAs e híbrido Raman/EDFA em sistemas de transmissão com formatos de modulação com alta eficiência espectral (M-QAM).
2. Avaliação experimental de desempenho de amplificadores ópticos EDFAs e híbrido Raman/EDFA em anel de recirculação com gerenciamento de planicidade espectral por *span* com WSS para vários pontos de operação da máscara de potência.
3. Estudo experimental do impacto da não linearidade em enlaces amplificados com amplificadores ópticos híbridos Raman/EDFA para modernos formatos de modulação.

6.2 TRABALHOS PUBLICADOS

Artigo publicado relacionado com o trabalho desenvolvido na Dissertação:

- **SILVA, M.J.**; MARTINS-FILHO, J.F.; MOURA, U.C.; OLIVEIRA, J.R.F. Avaliação experimental do desempenho e consumo de potência elétrica de amplificadores ópticos para redes ópticas DWDM reconfiguráveis. In: *MOMAG 2016*, Porto Alegre, 2016.

Artigos publicados não relacionados à Dissertação:

- BARBOZA, E.A.; BASTOS-FILHO, C.J.; MARTINS-FILHO, J.F.; **da SILVA, M.J.**; COELHO, C.D.; de MOURA, U.C. e de OLIVEIRA, J.R.F. Local and global approaches for the adaptive control of a cascade of amplifiers. *Photonic Network Communications*, p. 1-14, 2016.

- BARBOZA, E.A.; **da SILVA, M.J.**; COELHO, C.D.; MARTINS-FILHO, J.F.; BASTOS-FILHO, C.J.; de MOURA, U.C. e de OLIVEIRA, J.R.F. Impact of nonlinear effects on the performance of 120 Gb/s 64 QAM optical system using adaptive control of cascade of amplifiers. In: *Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC), 2015 SBMO/IEEE MTT-S International*. IEEE, 2015. p. 1-5.

REFERÊNCIAS

- AGRAWAL, G. P. *Nonlinear fiber optics*. [S.l.]: Academic press, 2007. Citado na página 31.
- AGRAWAL, G. P. *Fiber-Optic Communication Systems*. 4. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc., 2010. Citado 7 vezes nas páginas 11, 12, 15, 16, 17, 21 e 24.
- AGRELL, E. et al. Roadmap of optical communications. *Journal of Optics*, IOP Publishing, v. 18, n. 6, p. 063002, 2016. Citado 3 vezes nas páginas 11, 21 e 23.
- AHMAD, A. et al. Investigation of hybrid gain-clamped raman-fiber-amplifier/edfa utilizing pump reuse technique. *Laser Physics Letters*, IOP Publishing, v. 5, n. 3, p. 202, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 39 e 40.
- BAKAR, M. A. et al. Variable gain-flattened l-band erbium-doped fiber amplifier. *Laser Physics*, Springer, v. 21, n. 9, p. 1638–1644, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 47 e 49.
- BALIGA, J. et al. Energy consumption in optical ip networks. *Journal of Lightwave Technology*, IEEE, v. 27, n. 13, p. 2391–2403, 2009. Citado na página 41.
- BASTOS-FILHO, C. J. A. *Amplificadores ópticos para sistemas de Comunicação multicanais de alta Capacidade*. Tese (Tese de Doutorado) — Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, 2005. Citado na página 18.
- BECKER, P. M.; OLSSON, A. A.; SIMPSON, J. R. *Erbium-doped fiber amplifiers: fundamentals and technology*. [S.l.]: Academic press, 1999. Citado 5 vezes nas páginas 25, 26, 28, 29 e 45.
- BILAL, S.; ZAFRULLAH, M.; ISLAM, M. Achieving gain flattening with enhanced bandwidth for long haul wdm systems. *Journal of Optical Technology*, SI Vavilov Optical Institute, v. 79, n. 2, p. 80–83, 2012. Citado na página 40.
- BOUTEILLER, J.-C. et al. Dual-order raman pump. *IEEE Photonics Technology Letters*, IEEE, v. 15, n. 2, p. 212–214, 2003. Citado na página 37.
- BREUER, D. et al. Unrepeated 40-gb/s rz single-channel transmission at 1.55 μm using various fiber types. *IEEE Photonics Technology Letters*, IEEE, v. 10, n. 6, p. 822–824, 1998. Citado na página 16.
- BROMAGE, J. Raman amplification for fiber communications systems. *Journal of Lightwave Technology*, IEEE, v. 22, n. 1, p. 79–93, 2004. Citado 4 vezes nas páginas 18, 31, 34 e 35.
- CERCOS, S. S. et al. Empirical multichannel power consumption model for erbium-doped fiber amplifiers. In: IEEE. *Photonics in Switching (PS), 2015 International Conference on*. [S.l.], 2015. p. 142–144. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 42.
- COWLE, G. J. Challenges and opportunities for optical amplifiers in metro optical networks. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICS AND PHOTONICS. *OPTO*. [S.l.], 2010. p. 76210B–76210B. Citado na página 43.
- DESURVIRE, E. *Erbium-doped fiber amplifiers: principles and applications*. [S.l.]: Wiley-Interscience, 2002. Citado 3 vezes nas páginas 11, 24 e 26.

DUNG, J.-C.; JIAN, Y.-R.; WU, B.-S. All-optical gain-clamping dispersion-compensated raman/edfas for wdm systems. In: OPTICAL SOCIETY OF AMERICA. *International Quantum Electronics Conference*. [S.l.], 2009. p. JWA61. Citado na página 40.

FURUKAWA. *Fol 1437 series - 14xx-nm pump with fbg for raman application up to 500 mw*. [S.l.], 2012. Disponível em: <[https://www.furukawa.co.jp/fitel/english/active/pdf/pumping/ODC_DC003E_FOL1437_series_with_FBG_\(1400-1465nm\).pdf](https://www.furukawa.co.jp/fitel/english/active/pdf/pumping/ODC_DC003E_FOL1437_series_with_FBG_(1400-1465nm).pdf)>. Citado na página 21.

GNAUCK, A. H. et al. Generation and transmission of 21.4-gbaud pdm 64-qam using a novel high-power dac driving a single i/q modulator. *Journal of Lightwave Technology*, IEEE, v. 30, n. 4, p. 532–536, 2012. Citado na página 13.

GUPTA, M.; SINGH, S. Greening of the internet. In: ACM. *Proceedings of the 2003 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications*. [S.l.], 2003. p. 19–26. Citado na página 40.

HANSEN, P. et al. Capacity upgrades of transmission systems by raman amplification. *IEEE Photonics Technology Letters*, IEEE, v. 9, n. 2, p. 262–264, 1997. Citado na página 31.

HEADLEY, C.; AGRAWAL, G. *Raman amplification in fiber optical communication systems*. [S.l.]: Academic Press, 2005. Citado 9 vezes nas páginas 12, 24, 31, 32, 33, 35, 36, 37 e 38.

HEDDEGHEM, W. V. et al. Energy-efficiency in telecommunications networks: link-by-link versus end-to-end grooming. In: IEEE. *14th Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM 2010)*. [S.l.], 2010. Citado na página 41.

HEDDEGHEM, W. V. et al. Power consumption modeling in optical multilayer networks. *Photonic Network Communications*, Springer, v. 24, n. 2, p. 86–102, 2012. Citado 3 vezes nas páginas 13, 40 e 41.

INNOLUME. *Ld-12xx-fbg-500 - fiber bragg grating wavelength locked high power laser diode*. [S.l.], 2014. Disponível em: <[https://www.innolume.com/_pdfs/SM_HPLD/LD-12XX-FBG-500%20\(2014-04-10\).pdf](https://www.innolume.com/_pdfs/SM_HPLD/LD-12XX-FBG-500%20(2014-04-10).pdf)>. Citado na página 21.

INNOLUME. *Ld-13xx-fbg-350 - fiber bragg grating wavelength locked high power laser diode*. [S.l.], 2014. Disponível em: <[https://www.innolume.com/_pdfs/SM_HPLD/LD-13XX-FBG-350%20\(2014-04-10\).pdf](https://www.innolume.com/_pdfs/SM_HPLD/LD-13XX-FBG-350%20(2014-04-10).pdf)>. Citado na página 21.

ITU-T. *Recommendation G.694.1 - Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid*. [S.l.]: February, 2012. Citado na página 11.

JACOBS, I. Lightwave system development: looking back and ahead. *Optics and Photonics News*, Optical Society of America, v. 6, n. 2, p. 19, 1995. Citado na página 16.

KEISER, G. *Comunicações por Fibras Ópticas-4*. [S.l.]: AMGH Editora, 2014. Citado 4 vezes nas páginas 12, 17, 18 e 21.

KILPER, D. C. et al. Power trends in communication networks. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, v. 2, n. 17, p. 275–284, 2011. Citado na página 41.

KOESTER, C. J.; SNITZER, E. Amplification in a fiber laser. *Applied Optics*, Optical Society of America, v. 3, n. 10, p. 1182–1186, 1964. Citado na página 24.

LANG, F. et al. A 6 bit 25 gs/s flash interpolating adc in 90 nm cmos technology. In: IEEE. *Ph. D. Research in Microelectronics and Electronics (PRIME), 2011 7th Conference on*. [S.l.], 2011. p. 117–120. Citado na página 20.

LEE, J. H. et al. A detailed experimental study on single-pump raman/edfa hybrid amplifiers: static, dynamic, and system performance comparison. *Journal of lightwave technology*, IEEE, v. 23, n. 11, p. 3484, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 39.

LUI, Y.; SHEN, G.; SHAO, W. Energy-minimized design for ip over wdm networks under modular router line cards. In: IEEE. *2012 1st IEEE International Conference on Communications in China (ICCC)*. [S.l.], 2012. p. 266–269. Citado na página 41.

MARTINS-FILHO, J. F. *Aplicações do espalhamento Raman estimulado em fibras ópticas*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, 1991. Citado na página 31.

MASUDA, H. et al. Review of wideband hybrid amplifiers. *OFC 2000 Tech. Dig*, p. 2–4, 2000. Citado na página 24.

MOLLENAUER, L.; GORDON, J.; ISLAM, M. Soliton propagation in long fibers with periodically compensated loss. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, IEEE, v. 22, n. 1, p. 157–173, 1986. Citado na página 31.

MOURA, U. C. et al. Caracterizador automatizado de máscara de potência de amplificadores ópticos para redes wdm reconfiguráveis. In: *XXX Brazilian Symposium on Telecommunication, Brasilia, Brazil*. [S.l.: s.n.], 2012. Citado 3 vezes nas páginas 43, 44 e 45.

MOWLA, A.; GRANPAYEH, N. Optimum design of a hybrid erbium-doped fiber amplifier/fiber raman amplifier using particle swarm optimization. *Applied optics*, Optical Society of America, v. 48, n. 5, p. 979–984, 2009. Citado na página 39.

NAKAZAWA, M.; KIKUCHI, K.; MIYAZAKI, T. *High spectral density optical communication technologies*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2010. v. 6. Citado na página 13.

NIELSEN, T. et al. 1.6 tb/s (40×40 gb/s) transmission over 4×100 km nonzero-dispersion fiber using hybrid raman/erbiumdoped inline amplifiers. In: *Proc. Europ. Conf. Optical Communications*. [S.l.: s.n.], 1999. Citado na página 31.

OLIVEIRA, J. de. *Amplificador óptico híbrido Raman/EDFA com controle automático de ganho para redes DWDM reconfiguráveis*. Tese (Tese de Doutorado) — Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, SP, 2014. Citado 9 vezes nas páginas 13, 19, 20, 22, 34, 39, 40, 49 e 53.

OLIVEIRA, J. R. et al. Hybrid distributed raman/edfa amplifier with hybrid automatic gain control for reconfigurable wdm optical networks. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, SciELO Brasil, v. 12, n. 2, p. 602–616, 2013. Citado 4 vezes nas páginas 24, 46, 47 e 49.

PAL, M. et al. Study of gain flatness for multi-channel amplification in single stage edfa for wdm applications. *Optical and Quantum Electronics*, Springer, v. 39, n. 14, p. 1231–1243, 2007. Citado na página 46.

- PAPADIMITRIOU, G. et al. Towards power consumption in optical networks: a cognitive prediction-based technique. *International Journal of Communication Systems*, Wiley Online Library, 2015. Citado na página 41.
- PEIRIS, S. et al. Engineering an extended gain bandwidth hybrid raman—optical parametric amplifier for next generation cwdm pon. *Journal of Lightwave Technology*, IEEE, v. 32, n. 5, p. 939–946, 2014. Citado na página 39.
- POOLE, S. et al. Fabrication and characterization of low-loss optical fibers containing rare-earth ions. *Journal of Lightwave Technology*, IEEE, v. 4, n. 7, p. 870–876, 1986. Citado na página 24.
- RAMASWAMI, R.; SIVARAJAN, K.; SASAKI, G. *Optical networks: a practical perspective*. [S.l.]: Morgan Kaufmann, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 28.
- REICHMANN, K. C. et al. 240-km cwdm transmission using cascaded soa raman hybrid amplifiers with 70-nm bandwidth. *IEEE photonics technology letters*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, v. 18, n. 1-4, p. 328–330, 2006. Citado na página 39.
- ROTTWITT, K.; STENTZ, A. Raman amplification in lightwave communication systems. *Optical Fiber Telecom*, v. 4, p. 213–257, 2002. Citado na página 35.
- SAKAMOTO, T. et al. Hybrid fiber amplifiers consisting of cascaded tdfa and edfa for wdm signals. *Journal of lightwave technology*, IEEE, v. 24, n. 6, p. 2287–2295, 2006. Citado na página 39.
- SARGENT, R. B. Recent advances in thin film filters. In: OPTICAL SOCIETY OF AMERICA. *Optical Fiber Communication Conference*. [S.l.], 2004. p. TuD6. Citado na página 27.
- SAVORY, S. J. Digital filters for coherent optical receivers. *Optics Express*, Optical Society of America, v. 16, n. 2, p. 804–817, 2008. Citado na página 20.
- SEIMETZ, M. *High-order modulation for optical fiber transmission*. [S.l.]: Springer, 2009. v. 143. Citado na página 13.
- STOLEN, R.; IPPEN, E. Raman gain in glass optical waveguides. *Applied Physics Letters*, AIP Publishing, v. 22, n. 6, p. 276–278, 1973. Citado na página 31.
- TIWARI, U.; RAJAN, K.; THYAGARAJAN, K. Multi-channel gain and noise figure evaluation of raman/edfa hybrid amplifiers. *Optics Communications*, Elsevier, v. 281, n. 6, p. 1593–1597, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 24.
- TUCKER, R. S. Green optical communications—part i: Energy limitations in transport. *IEEE Journal of selected topics in quantum electronics*, IEEE, v. 17, n. 2, p. 245–260, 2011. Citado na página 41.
- UDALCOVS, A.; BOBROVS, V. Energy efficiency in wdm fiber-optical links considering oadm/oxc nodes. *Optics Communications*, Elsevier, v. 359, p. 102–108, 2016. Citado na página 41.
- VIZCAÍNO, J. L. et al. Amplifier placements optimization for enhanced energy efficiency in optical transport networks. In: *2014 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. [S.l.: s.n.], 2014. Citado na página 41.

WASFI, M. Optical fiber amplifiers-review. *International Journal of Communication Networks and Information Security*, Kohat University of Science and Technology (KUST), v. 1, n. 1, p. 42, 2009. Citado na página 24.

WAY, W. I. Optimum architecture for $m \times n$ multicast switch-based colorless, directionless, contentionless, and flexible-grid roadm. In: OPTICAL SOCIETY OF AMERICA. *National Fiber Optic Engineers Conference*. [S.l.], 2012. p. NW3F–5. Citado na página 23.

WUTH, T.; CHBAT, M. W.; KAMALOV, V. F. Multi-rate (100g/40g/10g) transport over deployed optical networks. In: *Proceedings, Optical Fiber communication/National Fiber Optic Engineers Conference 2008*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 1–9. Citado na página 20.

ZYSKIND, J.; SRIVASTAVA, A. *Optically Amplified WDM Networks*. 1st. ed. [S.l.]: Academic Press, 2011. Citado 10 vezes nas páginas 12, 19, 20, 23, 25, 30, 35, 37, 39 e 46.