

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  
Coorientador: Dr. Juliano Rodrigues Ferreira de Oliveira

Recife

2016

# 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 RF 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 disto 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

O presente trabalho mostra os resultados 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 na banda C (192,1 a 196 THz). 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 é 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 e, para tanto, 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 *spans* 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:** Comunicações Ópticas, Redes Ópticas Reconfiguráveis, EDFA, Amplificador Raman, Amplificador Híbrido Raman/EDFA, Consumo de Potência Elétrica.

# Abstract

This work shows the experimental evaluation results 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 shape 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 (192.1 to 196 THz). 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 link length function, 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 came to be more than twice that one-stage and two-stages EDFAs.

**Keywords:** Optical Communications, Reconfigurable Optical Networks, EDFA, Raman Amplifier, Raman / EDFA Hybrid Amplifier , Electrical Power Consumption.

# Lista de ilustrações

Figura 1 – Ilustração de uma rede em anel. . . . .	17
Figura 2 – Aplicação de amplificadores ópticos: (a) amplificador de linha, (b) pré-amplificador e (c) amplificador de potência. . . . .	23
Figura 3 – Ilustração de um OXC transparente. . . . .	23
Figura 4 – Ilustração de uma WSS com $N = 4$ . . . . .	24
Figura 5 – Exemplo de OADM. . . . .	25
Figura 6 – (a) Estados energéticos e transições do érbio. (b) Espectro de emissão e absorção do érbio. . . . .	27
Figura 7 – Exemplo de montagem básica do EDFA. . . . .	28
Figura 8 – (a) Topologia e (b) placa óptica do amplificador EDFA de estágio único testado. . . . .	32
Figura 9 – (a) Topologia e (b) placa óptica do amplificador EDFA de estágio único testado. . . . .	33
Figura 10 – Placa eletrônica dos amplificadores. . . . .	34
Figura 11 – Diagrama esquemático do processo quântico do espalhamento Raman. . . . .	34
Figura 12 – Sistema óptico com amplificação Raman. . . . .	35
Figura 13 – Perfil do ganho de Raman para fibras DCF, SMF e DSF. . . . .	36
Figura 14 – Diagramas esquemáticos: (a) sistema amplificador Raman distribuído, (b) sistema equivalente enlace + EDFA . . . . .	37
Figura 15 – (a) Topologia e (b) placa óptica do amplificador híbrido DRA/EDFA testado. . . . .	39
Figura 16 – Exemplo de máscara de potência. . . . .	41
Figura 17 – Caracterizador experimental. . . . .	41
Figura 18 – Aparato experimental para teste sistêmico. . . . .	43
Figura 19 – Passos do processamento sobre o sinal DP-QPSK recebido. . . . .	44
Figura 20 – Máscaras de potência do amplificador EDFA de um estágio para (a) figura de ruído, (b) planicidade espectral do ganho e (c) precisão do AGC. . . . .	47
Figura 21 – Máscaras de potência do amplificador EDFA de dois estágio para (a) figura de ruído, (b) planicidade espectral do ganho e (c) precisão do AGC. . . . .	48
Figura 22 – Máscaras de potência do amplificador Híbrido para (a) figura de ruído equivalente, (b) planicidade espectral do ganho e (c) precisão do AGC. . . . .	50
Figura 23 – Máscaras de potência do EDFA de um estágio para potência elétrica consumida (a) pelo laser, (b) pelo TEC, (c) pelo circuito eletrônico e (d) total. . . . .	51
Figura 24 – Máscaras de potência do EDFA de dois estágios para potência elétrica consumida (a) pelos lasers, (b) pelos TECs, (c) pelo circuito eletrônico e (d) total. . . . .	52

Figura 25 – Máscaras de potência do amplificador Híbrido para potência elétrica consumida (a) pelos lasers, (b) pelos TECs, (c) pelo circuito eletrônico e (d) total. . . . .	54
Figura 26 – 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. . . . .	56
Figura 27 – Variação da OSNR com o comprimento do enlace, com <i>spans</i> de 100 km, do canal testado para os amplificadores híbrido, EDFA de um e de dois estágios . . . . .	56
Figura 28 – Variação da BER com o comprimento do enlace, com <i>spans</i> de 100 km, do canal testado para os amplificadores híbrido, EDFA de um e dois estágios . . . . .	57
Figura 29 – Constelações na recepção 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. . . . .	58

# Lista de abreviaturas e siglas

ADC	Conversor Analógico Digital ( <i>Digital Analog Converter</i> ).
AGC	Controle Automático de Ganho ( <i>Automatic Gain Control</i> ).
ASE	Emissão espontânea amplificada ( <i>Amplified Spontaneous Emission</i> ).
CAPEX	Despesas de Capital ( <i>Capital Expenditure</i> ).
CD	Dispersão Cromática ( <i>Chromatic Dispersion</i> ).
DCF	Fibras de Compensação de Dispersão ( <i>Dispersion Compensation Fiber</i> ).
DCM	Módulo de Compensação de Dispersão ( <i>Dispersion Compensation Module</i> ).
DP-QPSK	Chaveamento em fase e quadratura em dupla polarização ( <i>Dual Polarization Quadrature Phase Shifting Keying</i> ).
DRA	Amplificador Raman distribuído ( <i>Distributed Raman Amplifier</i> ).
DRB	Retro-espalhamento duplo de Rayleigh ( <i>Double Rayleigh Backscattering</i> ).
DSF	Fibra de Dispersão Deslocada ( <i>Dispersion Shifted Fiber</i> ).
DSP	Processador Digital de Sinais ( <i>Digital Signal Processing</i> ).
DWDM	Multiplexação por divisão de comprimento de onda denso ( <i>Dense Wavelength Division Multiplexing</i> ).
EDF	Fibra Dopada com Érbio ( <i>Erbium Doped Fiber</i> ).
EDFA	Amplificador a fibra dopada com Érbio ( <i>Erbium Doped Fiber Amplifier</i> ).
FEC	Código Corretor de Erro Direto ( <i>Forward Error Correction</i> ).
FWM	Mistura de Quatro Ondas ( <i>Four Wave Mixing</i> ).
GFF	Filtro Aplainador de Ganho ( <i>Gain Flattening Filter</i> ).

# Lista de símbolos

$\alpha_p$	Coefficiente de perda no comprimento de onda do bombeio [ $1/km$ ].
$\alpha_s$	Coefficiente de perda no comprimento de onda do sinal [ $1/km$ ].
$\Delta\nu$	Resolução de frequência medida [ $Hz$ ].
$\hbar$	Constante de Planck [ $6,626068 \times 10^{-34} m^2 kg/s$ ].
$\hbar\nu_p$	Fóton de energia do bombeio.
$\hbar\nu_s$	Fóton de energia do sinal.
$\mu m$	Micrômetros [ $10^{-6} m$ ].
$\omega_p$	Frequência angular do bombeio [ $Hz$ ].
$\omega_s$	Frequência angular do sinal [ $Hz$ ].
$\nu$	frequência óptica do sinal [ $Hz$ ].
$\nu_p$	Frequência do bombeio [ $Hz$ ].
$\nu_s$	Frequência do sinal [ $Hz$ ].
${}^4I_{11/2} \longrightarrow {}^4I_{13/2}$	Decaimento predominantemente não radioativo.
${}^4I_{13/2} \longrightarrow {}^4I_{15/2}$	Emissão estimulada em 1550 nm.
${}^4I_{15/2} \longrightarrow {}^4I_{11/2}$	Absorção em 980 nm.
${}^4I_{15/2} \longrightarrow {}^4I_{13/2}$	Absorção em 1450 nm.
$A_{eff}$	Área efetiva do núcleo da fibra [ $m^2$ ].
$G_N$	Ganho de rede.
$g_r$	Coefficiente de ganho Raman [ $W^{-1}m^{-1}$ ].
$K_{eff}$	Fator de polarização da fibra .
$L$	Comprimento da fibra [ $m$ ].
$L_{eff}$	Comprimento efetivo.
$NF_{eq}$	Figura de ruído equivalente.
$P_0$	Potência lançada de bombeio [ $W$ ].



$P_{BS}$	Potência do espalhamento Rayleigh.
$P_{DRB}$	Potência do espalhamento Rayleigh duplo.
$P_P$	Potência do Bombeio [ $W$ ].
$P_S$	Potência do Sinal [ $W$ ].
$b/s/Hz$	Eficiência espectral em bits por segundo por Hertz.
$b/s$	Bits por segundo (bits per second).
$dB/km$	Decibel por Quilômetros (Decibel per Kilometer).
$dB$	Decibel.
$dBm$	Decibel com relação a 1 mW.
$Gb/s$	Giga bits por segundo [ $10^9 b/s$ ] (Giga bits per second).
$Gbaud$	Giga Baud [ $10^9 Baud$ ] (Velocidade de sinalização).
$GHz$	Giga Hertz [ $10^9 Hz$ ].
$Hz$	Hertz [ $1/s$ ].
$Kb/s$	Kilo bits por segundo [ $10^3 b/s$ ] (Kilo bits per second).
$km$	Quilômetros [ $10^3 m$ ] (Kilometers).
$Mb/s$	Mega bits por segundo [ $10^6 b/s$ ] (Mega bits per second).
$MHz$	Mega Hertz [ $10^6 Hz$ ].
$mm$	Milímetros [ $10^{-6} m$ ] (Milimetres).
$mW$	Mili Watts [ $10^{-3} W$ ].
$nm$	Nanômetros [ $10^{-9} m$ ] (Nanometers).
$Tb/s$	Tera bits por segundo [ $10^{12} b/s$ ] (Tera bits per second).
$THz$	Tera-Hertz [ $10^{12} Hz$ ].
$W$	Watts [ $J/s$ ].

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>12</b>
1.1	Objetivos	14
1.2	Descrição dos Capítulos	15
<b>2</b>	<b>Redes Ópticas DWDM Reconfiguráveis</b>	<b>16</b>
2.1	Evolução das Redes Ópticas	16
2.2	Efeitos de degradação do sinal em redes WDM	18
2.2.1	Atenuação	18
2.2.2	Dispersão cromática	19
2.2.3	Dispersão do modo de polarização	19
2.2.4	Espalhamento Brillouin estimulado	19
2.2.5	Espalhamento Raman estimulado	20
2.2.6	Auto-modulação de fase, modulação de fase cruzada e mistura de quatro ondas	20
2.3	Dispositivos de Redes Ópticas WDM Reconfiguráveis	20
2.3.1	Transmissores e receptores	21
2.3.2	Amplificadores	22
2.3.3	OXC	23
2.3.4	WSS	24
2.3.5	OADM e ROADM	24
<b>3</b>	<b>Amplificadores Ópticos</b>	<b>26</b>
3.1	Amplificadores a Fibra Dopada com Érbio	26
3.1.1	Princípio de funcionamento	26
3.1.2	Parâmetros Fundamentais	28
3.1.3	Otimização do Desempenho em EDFAs	29
3.1.4	EDFAs Testados	31
3.2	Amplificadores Ópticos Raman	32
3.2.1	Princípios Fundamentais	32
3.3	Amplificadores Ópticos Híbridos Raman/EDFA	37
3.3.1	Amplificador Híbrido DRA/EDFA Testado	38
<b>4</b>	<b>Metodologia</b>	<b>40</b>
4.1	Máscara de Potência e Caracterização de Amplificadores	40
4.2	Teste Sistemico	42
4.3	Potência Elétrica	44
<b>5</b>	<b>Resultados Experimentais e Análise</b>	<b>46</b>
5.1	Desempenho dos Amplificadores	46
5.2	Consumo de Potência Elétrica	50

5.3	Testes Sistêmicos . . . . .	54
<b>6</b>	<b>Conclusões e Trabalhos Futuros . . . . .</b>	<b>60</b>
6.1	Trabalhos Futuros . . . . .	60
6.2	Trabalhos Publicados . . . . .	60
	<b>Referências . . . . .</b>	<b>62</b>

# 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. Tal demanda só pode ser satisfeita quase que exclusivamente com tecnologias de comunicação por fibra óptica. Nenhum outro meio conhecido pode suportar as demandas enormes para taxa de dados, confiabilidade e eficiência energética e, desde de sua implementação comercial nas décadas de 1980 e 90, em que substituiu os fios de cobre e a comunicação por satélite nas transmissões de longas distâncias, a capacidade de transmissão em uma única fibra saiu de alguns Gb/s para centenas de Tb/s na atualidade (AGRELL et al., 2016).

As redes ópticas com multiplexação por divisão em comprimento de onda (WDM- *Wavelength Division Multiplexing*) foram desenvolvidas para melhor explorar a grande largura de banda oferecida pelas fibras ópticas, 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). No receptor, o sinal óptico é demultiplexado em canais separados por meio de dispositivos ópticos apropriados. Tal conceito já vinha sendo estudado desde da década de 1980, mas os sistemas WDM só foram largamente desenvolvidos na década de 1990. Nos anos 2000, esses sistemas empregavam centenas de canais com pequeno espaçamento (100 ou 50 GHz) e são chamados de WDM denso (DWDM - *dense WDM*). Nesse contexto, 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.

Um dos principais componentes que permitiram o estabelecimento das redes de comunicações ópticas DWDM de alta capacidade foram os amplificadores ópticos, mais precisamente o amplificador a fibra dopada com érbio (EDFA) (Desurvire et al., 1987; R.J. Mears et al., 1987).

As taxas de transmissão por comprimento de onda em redes de comunicações ópticas vêm evoluindo por meio do uso de formatos avançados de modulação, baseados na codificação de múltiplos bits sobre todos os graus de liberdade da onda eletromagnética (amplitude, fase, polarização e frequência), desta forma aumentando a eficiência espectral (otimizando o uso da fibra óptica), e conseqüentemente aumentando a taxa transmitida (Roberts et al., 2010). Já os receptores vêm evoluindo por meio do uso da tecnologia de recepção coerente aliada a processamento digital de sinais (DSP) (Savory, 2008), visando aumento da sensibilidade e da robustez contra as distorções lineares causadas pela fibra.

Os responsáveis pelo aumento da eficiência espectral do transmissor óptico foram o desenvolvimento de novos moduladores ópticos (visando formatos de modulação avançados) e

conversores digitais analógicos de altíssima taxa (DAC maior que 25G amostras) permitindo o uso de formatos de modulação digitais diretamente no domínio óptico, quais sejam, a modulação via chaveamento em quadratura e fase (QPSK), e a modulação em n-níveis de quadratura da amplitude (N-QAM), respectivamente (Gnauck et al., 2012). Com o uso de modulações de alta ordem, consegue-se uma eficiência espectral muito maior que nos sistemas com modulação de intensidade (OOK). Com o uso da multiplexação em polarização (PM) ou transmissão em dupla polarização (DP), é possível dobrar a eficiência espectral na mesma frequência (Seimetz, 2009). Já na recepção, a evolução se dá devido à utilização de detectores coerentes e circuitos de aplicação específica (ASIC) que realizam em tempo real o processamento digital de sinais (DSP) (Roberts et al., 2010).

Adicionalmente, com a contínua disseminação das redes DWDM ópticas, aliada à necessidade por redução de custos capitais (CAPEX) e operacionais (OPEX), surgiram as redes ópticas DWDM reconfiguráveis (dinâmicas) com o objetivo de flexibilizar a rede óptica através do roteamento de comprimentos de onda (adição e remoção de canais), otimizando o uso da infraestrutura através da migração das redes ópticas DWDM estáticas ponto-a-ponto com capacidade fixa de transmissão para redes ópticas DWDM dinâmicas com capacidade variável e definida de acordo com a demanda por capacidade de transmissão (ZYSKIND; SRIVASTAVA, 2011).

Os elementos responsáveis por viabilizar redes ópticas reconfiguráveis (dinâmicas) foram os dispositivos insere/deriva ópticos reconfiguráveis (ROADM) e os módulos de conexão cruzada (OXC). Os ROADMs, que geralmente encontram-se nos nós de entroncamento da rede óptica, são capazes de prover a inserção, retirada e atenuação intencional de cada canal (comprimentos de onda) ou grupo de canais, provendo a capacidade de aprovisionar caminhos ópticos, além de possibilitar estratégias de proteção na camada óptica. Já os OXCs são dispositivos compostos por chaves ópticas que permitem o chaveamento de fibras ópticas (todos os canais de uma só vez), não permitindo o chaveamento por canal, como no ROADM. A utilização de componentes como ROADMs e OXCs nas redes ópticas tem se tornado cada vez mais frequente, representando uma realidade devido à redução de custos operacionais (OPEX) e otimização (reuso) da rede, conseguidos com a reconfiguração remota (Zyskind e Srivastava, 2011).

Na transmissão de sinais com formatos de modulação avançados em redes DWDM estáticas, o nível de qualidade do sinal necessário para decodificação sem erros (relação sinal ruído óptica - OSNR) cresce proporcionalmente de acordo com o aumento da eficiência espectral provido pelo formato de modulação empregado (der Borne, 2008; Nakazawa et al., 2010). Portanto, uma maneira de melhorar a qualidade dos sinais em uma rede óptica é através do desenvolvimento de amplificadores ópticos com figura de ruído reduzida e ganho espectral plano. Visando esta redução de figura de ruído, surgiram várias topologias de amplificação Raman distribuída (DRA) e concentrada (LRA) unidirecional e bidirecional (Bromage, 2004; Headley e Agrawal, 2005; Labrunie et al., 2001), assim como topologias de amplificação híbrida

(Raman/EDFA) com ganho espectral plano (Lee et al., 2005; Tiwari et al., 2009), amplificadores Raman concentrados com compensação de dispersão cromática (LRA) (Liaw et al., 2010), amplificadores híbridos de banda larga (Namiki e Emori, 2001; Seo et al., 2005) e amplificadores Raman com controle automático de ganho (Ahmad et al., 2008; Dung et al., 2009; Kim e Park, 2005).

Com a introdução das redes ópticas DWDM dinâmicas, as variações de potência na entrada dos amplificadores ópticos, em geral amplificadores a fibra dopada com érbio (EDFA), principalmente quando se encontram operando em modo saturado, implicam de forma direta em alterações no ganho proporcionado aos sinais amplificados (AGRAWAL, 2010). O desempenho de amplificadores em sistemas ou redes DWDM, em que o número de canais na entrada varia em decorrência dos elementos que inserem e removem canais (tais como os multiplexadores ópticos add-drop reconfiguráveis, ROADMs), pode ser severamente comprometido caso técnicas de controle de ganho não sejam empregadas. Nesse contexto, 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, figura 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 óptica híbridas, sendo as mais promissoras as baseadas em Raman distribuído/EDFA (OLIVEIRA, 2014), pois alia baixa inserção de ruído dos amplificadores Raman distribuídos com o alto nível de potência de saída dos EDFAs. Desta forma para composição de um amplificador híbrido, é ideal combinar tecnologias de amplificação óptica, aproveitando-se de suas características favoráveis em detrimento de suas deficiências.

Além disso, a grande quantidade de amplificadores utilizados em redes DWDM, principalmente em redes de *backbone*, faz com que a energia elétrica consumida por eles 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 e mostra a evolução das redes ópticas WDM, os elementos de rede e os efeitos de degradação do sinal.
- **Capítulo 3** - Mostra os amplificadores ópticos utilizados neste trabalho, detalhando fundamentos e aplicações.
- **Capítulo 4** - Mostra a metodologia e ferramentas utilizadas na realização dos testes experimentais.
- **Capítulo 5** - Mostra os resultados, bem como faz uma análise detalhada.
- **Capítulo 6** - Apresenta as conclusões da avaliação experimental realizada.

## 2 Redes Ópticas DWDM Reconfiguráveis

Neste capítulo, é apresentado um breve histórico da evolução das redes ópticas WDM, os principais componentes que a constituem e os principais efeitos de degradação do sinal óptico.

### 2.1 Evolução das Redes Ópticas

Assim como os sistemas ópticos, a evolução das redes ópticas pode ser dividida em diferentes gerações (RAMASWAMI; SIVARAJAN; SASAKI, 2009) . Na primeira geração, durante a década de 80, as redes ópticas basicamente foram usadas para substituir os cabos de cobre utilizados para comunicação. Desse modo, surgiram as redes ópticas ponto a ponto, nas quais, um enlace de fibra era utilizado para conectar dois nós da rede. Durante esta geração, usava-se a multiplexação por divisão no tempo (*time division multiplexing* - TDM) no domínio elétrico, na qual os dados eram multiplexados, convertidos para o domínio óptico e transmitidos pela rede. Nesta geração, todo o processamento da informação e gerenciamento de tráfego era feito no domínio elétrico, sendo a regeneração do sinal óptico feita por regeneradores optoeletrônicos, que convertiam o sinal do domínio óptico para o elétrico, regeneravam, e convertiam novamente para o óptico. Tal conversão dependia da taxa do sinal, formato de modulação e protocolo de comunicação usados.

Uma forma natural de expansão da capacidade da rede seria a adoção de mais de um canal sendo transmitido pela fibra. Desse modo, cada canal implicaria na necessidade de um regenerador, o que resultaria em um aumento gigantesco do custo capital (CAPEX) e operacional (OPEX) da rede. Este problema foi superado com o desenvolvimento da segunda geração das redes ópticas, durante a década de 1990, com a comercialização do EDFA e a amplificação do sinal no domínio óptico. O EDFA permitiu reduzir o custo da expansão das redes ponto a ponto e do aumento do número de canais utilizados na multiplexação por divisão em comprimento de onda, diminuindo o número de regeneradores necessários.

Inicialmente, as redes WDM apresentavam ligações ponto - multiponto com topologia de rede como estrela e barramento. Nestas topologias, um comprimento de onda específico era atribuído a cada nó para se comunicar com os outros nós da rede. O sinal gerado pelo transmissor de cada nó era dividido por acopladores e ligados aos outros nós da rede. Em cada nó, os receptores eram sintonizados para receber o comprimento de onda de interesse, ignorando o comprimento de onda destinado a outros nós. Este tipo de rede foi chamado de "transmite e seleciona" (*broadcast and select*). Nas redes *broadcast and select*, os comprimentos de onda não podiam ser reutilizados, pois cada comprimento de onda determinava a comunicação entre dois nós específicos, havendo uma coordenação entre os transmissores e receptores de



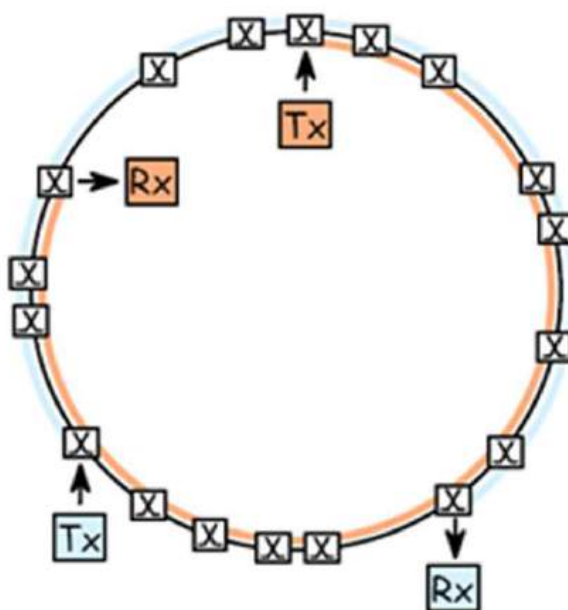
diferentes nós. Este problema foi superado com a evolução dos dispositivos de filtragem óptica e o surgimento dos multiplexadores ópticos insere e retira (*optical add/drop multiplexer* - OADM), que permitiam a adição e remoção dos comprimentos de onda propagando-se na fibra.

A presença dos OADMs nos nós da rede e o uso de topologias de redes em anel caracterizam o início da terceira geração de redes ópticas. Nestas redes, os diferentes comprimentos de onda são transmitidos ao longo do anel, nos quais os comprimentos de onda de interesse são removidos e novos comprimentos de onda adicionados ao passarem em cada nó da rede. A Fig. 1 mostra uma rede em anel com adição e remoção de canais.

O uso da multiplexação WDM nas redes ópticas permitiu o aumento da taxa agregada transmitida devido ao aumento do número de canais na fibra. Inicialmente, poucos canais eram utilizados, dando origem a norma dos sistemas chamados WDM amplos (*coarse wavelength division multiplexing* - CWDM), nos quais a norma indica que, potencialmente, 16 canais poderiam ser transmitidos ao longo dos comprimentos de onda de 1270 a 1610 nm com espaçamento de 20 nm entre eles (ITU-T, 2003b). Com a melhoria na estabilidade de lasers e na fabricação de filtros multiplexadores e demultiplexadores, surgiram os sistemas WDM com espaçamentos de 100 GHz ou, aproximadamente 0,8 nm, com faixa de operação de comprimento de onda de 1530 nm a 1565 nm, definida pela banda de amplificação dos EDFA (ITU-T, 2003a). Mas tarde, esse número de canais foi novamente expandido, permitindo o uso de 80 canais na mesma banda, mas espaçados por 50 GHz ou, aproximadamente, 0,4 nm (ITU-T, 2003a). Este sistema passou a ser chamado de multiplexação por divisão em comprimento de onda densa (*dense wavelength division multiplexing* - DWDM).

As redes WDM em anéis com OADMs permitiram a reutilização dos comprimentos

Figura 1 – Ilustração de uma rede em anel.



de onda para comunicar dois nós diferentes e, também, a diminuição da perda causada pelo uso de acopladores nas redes *broadcast and select*. No entanto, o uso de OADM ainda apresentava limitações quanto aos canais adicionados e removidos na rede. Nestes dispositivos, os canais adicionados e removidos necessitavam de intervenções manuais para reconfiguração da rede, implicando em maiores custos operacionais e limitando a reconfiguração da rede de maneira dinâmica. Esse problema foi superado com o desenvolvimento de elementos dinâmicos de chaveamento, como os módulos ópticos de conexão cruzada (*optical cross connect* - OXC) e chaves seletoras de comprimento de onda (*wavelength selective switch* - WSS). Esses componentes permitiram o surgimento dos multiplexadores ópticos insere e deriva reconfiguráveis (reconfigurable optical add/drop multiplexer - ROADM), capazes de serem reconfiguráveis remotamente, possibilitando o controle dinâmico da rede, a diminuição dos custos operacionais e o surgimento de topologias de redes mais complexas. Com o controle remoto e configurabilidade dos diferentes elementos da camada física, as redes passam a poder suportar novas funcionalidades e diferentes métodos de controle podem ser utilizados, implicando também em novos desafios para seu gerenciamento (GERSTEL et al., 2012).

## 2.2 Efeitos de degradação do sinal em redes WDM

Os principais efeitos de degradação do sinal ocorrem no domínio óptico, em que a qualidade do sinal recebido é determinada principalmente pelos elementos físicos da rede, como elementos de chaveamento do sinal, transmissores, amplificadores, fibra óptica, etc. Os limites de degradação aceitáveis pelo receptor dependem das características do transmissor e receptor utilizados, dentre as quais podem-se citar a taxa de transmissão, o formato de modulação, a OSNR e a potência do canal. Dentre os principais efeitos de degradação estão os efeitos resultantes do canal de comunicação. Estes efeitos podem ser lineares e não lineares.

Os efeitos lineares não dependem da potência do sinal transmitido e são aplicados a todos os comprimentos de onda de forma homogênea. Já os efeitos não lineares dependem da potência do sinal e podem causar a interferência entre sinais em diferentes comprimentos de onda (AGRAWAL, 2010). Na sequência são descritos os principais efeitos de degradação quando o sinal óptico se propaga na fibra.

### 2.2.1 Atenuação

A atenuação do sinal óptico ocorre principalmente durante sua propagação na fibra, sendo causada normalmente pela absorção da luz, seja pelo próprio material vítreo (sílica) ou por impurezas adicionadas durante o processo de fabricação, e por efeitos de espalhamento. Dentre os efeitos de espalhamento, destaca-se o espalhamento Rayleigh, que resulta em luz refletida no sentido inverso ao da propagação do sinal. Estas reflexões resultam de micro variações de homogeneidade do material da fibra, que levam a variações no índice de refração. Porém, com

a evolução do processo de fabricação das fibras, as perdas por estes efeitos foram reduzidas, sendo possível encontrar fibras comerciais com perdas entre 0,16 e 0,17 dB/km.

### 2.2.2 Dispersão cromática

A dispersão cromática (*chromatic dispersion* - CD) pode ser dividida em dois tipos, a dispersão intermodal e a dispersão intra-modal. A dispersão intermodal ocorre somente em fibras multimodos e é causada pela diferença de velocidade de propagação de cada um dos modos guiados. A dispersão intra modal ocorre devido à variação do índice de refração efetivo com o comprimento de onda, que é normalmente causada pela variação do índice de refração do próprio material da fibra com o comprimento de onda e pela variação do índice de refração efetivo percebido pelo sinal com a geometria do guia de onda utilizado. Dessa maneira, comprimentos de onda diferentes apresentam velocidades de fase diferentes, provocando um atraso de grupo. Pelo fato das fontes de luz não serem perfeitamente monocromáticas e, também, pela adição de componentes de frequências ao sinal devido à modulação, a CD causa o alargamento temporal do pulso, podendo gerar interferência entre diferentes símbolos durante a transmissão. A CD é normalmente indicada pelo parâmetro de dispersão em ps/(km-nm) e indica o alargamento temporal do pulso dadas a sua banda e a distância percorrida na fibra.

### 2.2.3 Dispersão do modo de polarização

Idealmente, a fibra apresenta uma estrutura cilíndrica perfeita. Desse modo, os índices de refração efetivos em duas direções ortogonais em relação ao eixo da fibra são iguais, as quais podem-se associar dois modos de propagação degenerados. Na prática, devido à imperfeições durante o processo de fabricação, os índices de refração efetivos dos dois modos de polarização diferem-se. Esta diferença gera um atraso entre os sinais nos diferentes modos e, conseqüentemente, o alargamento do pulso transmitido. Este atraso é chamado de atraso diferencial de grupo (*differential group delay* - DGD) e caracteriza a dispersão de modo de polarização (*polarization mode dispersion* - PMD) de primeira ordem. Na fibra, os índices de refrações efetivos variam de forma aleatória e o valor eficaz do atraso diferencial é usado para caracterizar este efeito. Além disso, o atraso diferencial pode variar com o comprimento de onda e, conseqüentemente, gerar um efeito de dispersão no pulso propagado. Essa dependência caracteriza a PMD de segunda ordem. Normalmente, o DGD é expresso em ps/ $\sqrt{km}$  e representa o alargamento temporal causado ao pulso, sendo proporcional à raiz quadrada da distância percorrida pelo sinal na fibra.

### 2.2.4 Espalhamento Brillouin estimulado

O espalhamento Brillouin estimulado (*stimulated Brillouin scattering* - SBS) ocorre devido à tendência dos materiais a se comprimirem na presença de um campo elétrico. Neste tipo de espalhamento, um sinal óptico dá origem a uma onda acústica na estrutura da sílica. Os fótons

do sinal são absorvidos pelo material e perdem energia ao excitar a onda acústica na estrutura, gerando fótons com menor energia e maior comprimento de onda. O batimento entre os fótons do sinal e os fótons espalhados dá origem a uma frequência igual à da onda acústica gerada, que resulta em uma realimentação positiva, estimulando o espalhamento Brillouin.

### 2.2.5 Espalhamento Raman estimulado

O espalhamento Raman estimulado (*stimulated Raman scattering* - SRS) ocorre devido à interação do sinal óptico com as moléculas de sílica presentes na fibra. Os fótons do sinal são absorvidos pelo material e perdem energia excitando vibrações na estrutura da sílica, gerando novos fótons com menor energia e maior comprimento de onda. O batimento entre o sinal no comprimento de onda original e o gerado a partir do espalhamento age como fonte para as vibrações das moléculas e contribuem para o espalhamento do sinal, que resulta em uma realimentação positiva do processo, estimulando o espalhamento Raman. Por se tratar de um efeito não linear, o espalhamento Raman se torna estimulado quando a potência do sinal ultrapassa um determinado valor limite. Para um fibra padrão, este valor é de 570 mW para sinais com comprimento de onda próximos a 1550 nm. O espalhamento Raman será mostrado com mais detalhes na Seção 3.2.

### 2.2.6 Auto-modulação de fase, modulação de fase cruzada e mistura de quatro ondas

Estes efeitos ocorrem devido à dependência do índice de refração da fibra com a potência do sinal. Na auto-modulação de fase (*self-phase modulation* - SPM), a fase do sinal é deslocada de forma proporcional à potência do sinal transmitido, e isto se dá devido à componente dependente da potência do índice de refração. Já na modulação de fase cruzada (*cross-phase modulation* - XPM), a dependência do índice de refração com a potência ocorre devido às potências de sinais em diferentes comprimentos de onda. Na mistura de quatro ondas (*four wave mixing* - FWM), três diferentes sinais com diferentes comprimentos de onda dão origem a um quarto sinal com comprimento de onda determinado pelo batimento entre os três sinais originalmente presentes na fibra. Este efeito se torna relevante quando é atendida a condição de casamento de fase. Isto é, a constante de propagação das componentes geradas no batimento é igual à constante de propagação da fibra para a mesma frequência.

## 2.3 Dispositivos de Redes Ópticas WDM Reconfiguráveis

Os elementos da camada física são os responsáveis por diversas funções da rede, como geração do sinal óptico com a informação, propagação, amplificação, roteamento e recuperação da informação no receptor. Nesta seção, serão apresentados os elementos básicos da camada física

que constituem uma rede WDM, com a introdução dos seus princípios básicos de funcionamento e suas funções na rede.

### 2.3.1 Transmissores e receptores

Os transmissores e receptores apresentam um papel fundamental nos sistemas de comunicação óptica, pois são os responsáveis por enviar e receber os dados transmitidos. O sinal gerado pelo transmissor deve passar pela rede e chegar ao receptor com um mínimo de qualidade para recuperação da informação transmitida. Nesta subseção será apresentada uma breve descrição do funcionamento de transmissores e receptores e seus principais parâmetros.

Os transmissores ópticos são os dispositivos responsáveis pela conversão dos dados do domínio elétrico para o domínio óptico. Para isto, utiliza-se uma fonte de luz com um comprimento de onda determinado, sendo esta fonte de luz normalmente um laser. Além da fonte de luz, um modulador responsável por modular o sinal óptico com base nos pulsos elétricos é também necessário. A fonte de luz ideal constitui-se em um sinal com largura espectral nula, ou seja, toda sua energia está concentrada em um único comprimento de onda. No entanto, fontes práticas sempre possuem uma largura espectral finita em torno do comprimento de onda central. Neste ponto, os lasers se apresentam como a melhor opção para fonte de luz, pois apresentam menor largura espectral que o diodo emissor de luz (*light emitting diode* - LED). Isto porque o processo dominante no laser é a amplificação óptica baseado na emissão estimulada para geração da luz, em que fótons coerentes são gerados com mesma fase e frequência. Contudo, também ocorre no laser o processo de emissão espontânea, gerando fótons com fase aleatória e dando origem ao ruído de fase do laser e à sua largura espectral.

O modulador é responsável por aplicar a modulação ao sinal óptico, determinando o formato do pulso utilizado e a banda ocupada pelo sinal. Dentre alguns formatos de modulação comumente usados, podem-se citar o chaveamento liga-desliga (*on-off keying* - OOK), chaveamento de fase diferencial (*differential phase-shift keying* - DPSK), chaveamento de fase em quadratura (*quadrature phase shift-keying* - QPSK) e modulação de amplitude em quadratura (*quadrature amplitude modulation* - QAM). O tipo de modulação e o formato de pulso são escolhidos com base nas condições e características do canal e das taxas de símbolos e de bits a serem transmitidas. Além disso, alguns sistemas utilizam FEC, adicionando bits de redundância junto a informação transmitida. O uso de FEC permite obter ganhos na recepção com a diminuição da OSNR mínima necessária para conseguir uma recepção considerada livre de erros em troca da diminuição da taxa de bits de informação transmitido no canal.

Em redes WDM metropolitanas, os transmissores normalmente apresentam comprimentos de onda distintos dentro da banda C (1530 a 1565 nm), cada um modulado por um modulador distinto. Normalmente, os transmissores são classificados em dois tipos, com base em sua capacidade de ajustar seu comprimento de onda: os transmissores de comprimentos de onda fixos, os quais não podem mudar seu comprimento de onda após sua fabricação, e

os transmissores de comprimento de onda sintonizável, os quais são compostos por laser e filtros sintonizáveis e permitem que o comprimento de onda do sinal gerado possa ser ajustado dinamicamente.

Os receptores são dispositivos responsáveis por converter o sinal óptico em sinal elétrico e recuperar os dados recebidos. Dentre os principais parâmetros de um receptor, estão a sensibilidade, que determina a mínima potência necessária para recuperar a informação, e a mínima OSNR do sinal, que determina a potência mínima do sinal em relação ao ruído e também a BER dos sinal recebidos. Os limiares de cada um destes parâmetros podem depender de parâmetros do transmissor, como tipo de modulação, taxa de símbolos e taxa de bits, como, também, da estrutura do receptor utilizado (LÊ, 2015).

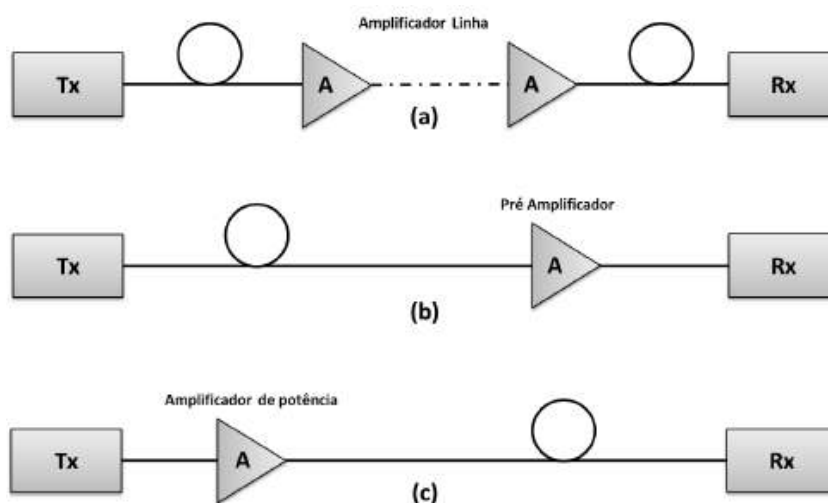
Os receptores podem ser classificados como de detecção direta ou coerentes. Na detecção direta, a envoltória de potência do sinal transmitido é recuperada a partir de sua detecção por um fotodetector. Em receptores coerentes, a informação é também recuperada após o fotodetector, mas depois de se realizar o batimento do sinal transmitido com o de um laser local, chamado de oscilador local. Neste tipo de receptor, idealmente, o laser local deve estar sincronizado (ou seja, ser coerente) ao sinal recebido, apresentando fase e frequência iguais a do sinal transmitido. Neste caso, é possível a conversão não somente da amplitude do sinal, mas também da sua fase para o domínio elétrico. Atualmente, pratica-se a recepção coerente digital, onde, com base nas informações de amplitude e fase do sinal, diversos algoritmos de processamento de sinais foram propostos para minimizar os efeitos degradantes do canal e recuperar a coerência do sinal transmitido (BINH, 2013). Dessa forma, tem-se o aumento da sensibilidade e resistência ao ruído dos receptores coerentes em relação aos receptores com detecção direta (LÊ, 2015).

### 2.3.2 Amplificadores

Os amplificadores ópticos têm como principal função compensar a atenuação sofrida pelos canais na rede diretamente no domínio óptico. Isto possibilitou que o sinal pudesse ser reamplificado sem a necessidade de conversão do sinal para o domínio elétrico, evitando, dessa maneira, a recuperação da informação em pontos intermediários do enlace, os quais não são o destino dos dados transmitidos. Os amplificadores são divididos em três categorias: amplificadores de linha, pré-amplificadores e amplificadores de potência. A Fig. 2 ilustra esses três tipos aplicação, respectivamente.

Quando usados logo após o transmissor, os amplificadores são chamados de amplificadores de potência e sua principal função é gerar um sinal com alta potência em sua saída. Quando utilizados em pontos intermediários do enlace, os amplificadores são chamados de amplificadores de linha e são usados para compensar as perdas do enlace. Já os pré-amplificadores são usados logo antes do receptor, para aumentar sua sensibilidade. Os amplificadores ópticos serão abordados com mais detalhes no Capítulo 3.

Figura 2 – Aplicação de amplificadores ópticos: (a) amplificador de linha, (b) pré-amplificador e (c) amplificador de potência.

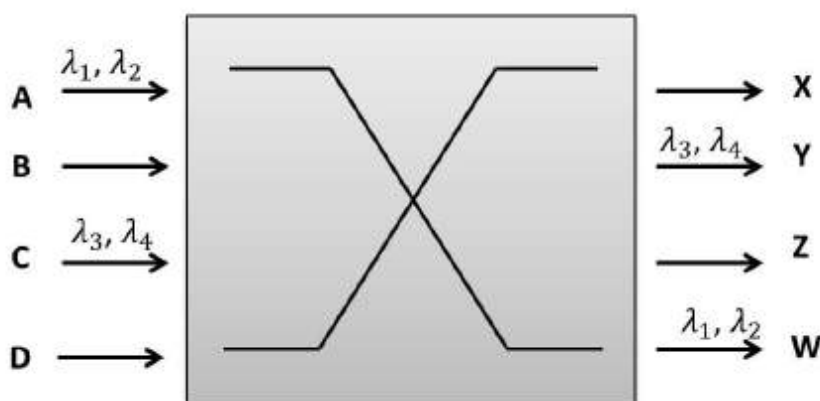


### 2.3.3 OXC

Os módulos de conexão cruzada (OXC) permitem chavear o sinal óptico entre portas de entrada e portas de saída de maneira independente dos comprimentos de onda presentes no sinal. Este componente pode ser classificado como não transparentes ou transparente. Os OXC não transparentes dependem do tipo de modulação do sinal e do protocolo usado na transmissão, pois o sinal precisa ser demultiplexado, convertido para o domínio elétrico, chaveado eletronicamente e, então, convertido de volta para o domínio óptico. Já os OXC transparentes constituem-se de chaves ópticas, nas quais o sinal é chaveado diretamente no domínio óptico, mantendo a independência em relação ao formato de modulação, taxa e protocolo utilizado. A Fig. 3 ilustra o funcionamento de um OXC transparente.

Na Figura 3, pode-se observar que o OXC chaveia os comprimentos de onda  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$  da porta A e  $\lambda_3$  e  $\lambda_4$  da porta C para as portas W e Y, respectivamente. Este tipo de funcionalidade

Figura 3 – Ilustração de um OXC transparente.



pode ser obtido a partir de diferentes tecnologias, como sistemas microeletromecânicos (*microelectromechanical systems* - MEMS), e circuitos fotônicos planares (*planar lightwave circuit* - PLC), entre outras (NEUKERMANS; RAMASWAMI, 2001).

### 2.3.4 WSS

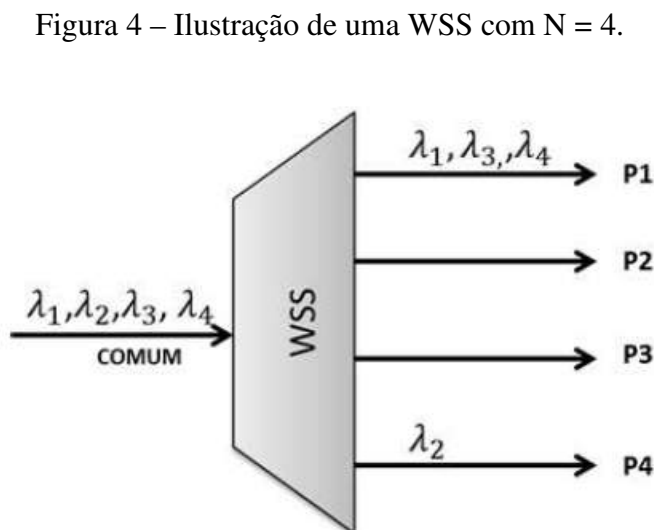
A principal função da chave seletora de comprimento de onda (WSS) é permitir a separação dos sinais em diferentes comprimentos de onda de forma configurável. A WSS possui uma porta comum e N portas de saída, com os sinais em diferentes comprimentos de onda presentes na porta comum podendo ser enviados para qualquer uma das N portas de saída.

A Fig. 4 ilustra esse processo de forma simples, em que um WSS com quatro portas de saída, com um sinal com quatro diferentes comprimentos de onda acoplados à porta comum. Os sinais são, então, demultiplexados entre as quatro portas, sendo três canais para a primeira porta e um para a quarta.

Por ser um dispositivo bi-direcional, este pode ser utilizado também para multiplexar diferentes comprimentos de onda provenientes das diferentes N portas. A grande vantagem em relação a um demultiplexador é que as WSS podem ser reconfiguradas para chavear os diferentes comprimentos de onda para diferentes portas de saída, além de equalizar o nível de potência dos canais, se necessário.

### 2.3.5 OADM e ROADM

O Multiplexador óptico de adição/remoção (OADM) consegue adicionar e remover canais ópticos através do uso de filtros ópticos multiplexadores e demultiplexadores. Diferentes arquiteturas desse dispositivo são encontradas na literatura (RAMASWAMI; SIVARAJAN; SASAKI, 2009). Um exemplo de arquitetura de OADM é ilustrado na Fig. 5. Nesta arquitetura,

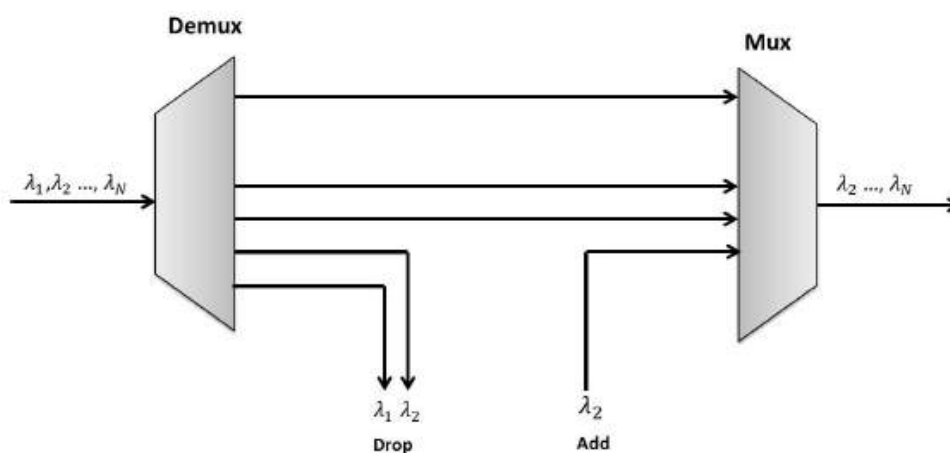




os canais na entrada do OADM são demultiplexados, sendo os canais  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$  removidos e os outros ligados a um multiplexador. No multiplexador, o canal em  $\lambda_2$  dos canais removidos, por exemplo, pode ser inserido e multiplexado na saída do OADM. Esta arquitetura permite a inserção e remoção de canais, sem a interrupção do tráfego presente no enlace e com perdas constantes com o aumento do número de canais adicionados ou removidos. No entanto, quando poucos canais são adicionados ou removidos, outras arquiteturas podem apresentar menor custo. É importante destacar, que, para a escolha dos canais adicionados ou removidos, as conexões internas do OADM precisam ser refeitas, o que exige uma intervenção manual que limita a capacidade de adaptação da rede. No entanto, os OADMs se apresentam como uma solução simples e barata, que pode ser suficiente para atender aos requisitos das redes mais simples.

Assim como o OADM, o multiplexador óptico de adição/remoção reconfigurável (ROADM) permite a adição e remoção de canais em um enlace óptico. No entanto, a escolha dos comprimentos de onda a serem adicionados e/ou removidos pode ser feita de maneira dinâmica e remota. Isto é possível graças ao uso de dispositivos com capacidade de reconfiguração de suas conexões internamente, como, por exemplo, WSSs e OXCs.

Figura 5 – Exemplo de OADM.



## 3 Amplificadores Ópticos

### 3.1 Amplificadores a Fibra Dopada com Érbio

Largamente utilizado em sistemas de comunicações ópticas de alta capacidade, o EDFA apresenta funcionalidades bastante atraentes aos sistemas de comunicações, como por exemplo, o espectro de emissão coincidente com a janela de menor atenuação da fibra óptica, por volta de 1550 nm, amplificação em uma larga faixa de canais, baixa complexidade e baixo custo de implementação. São os amplificadores ópticos mais conhecidos, estudados e utilizados.

#### 3.1.1 Princípio de funcionamento

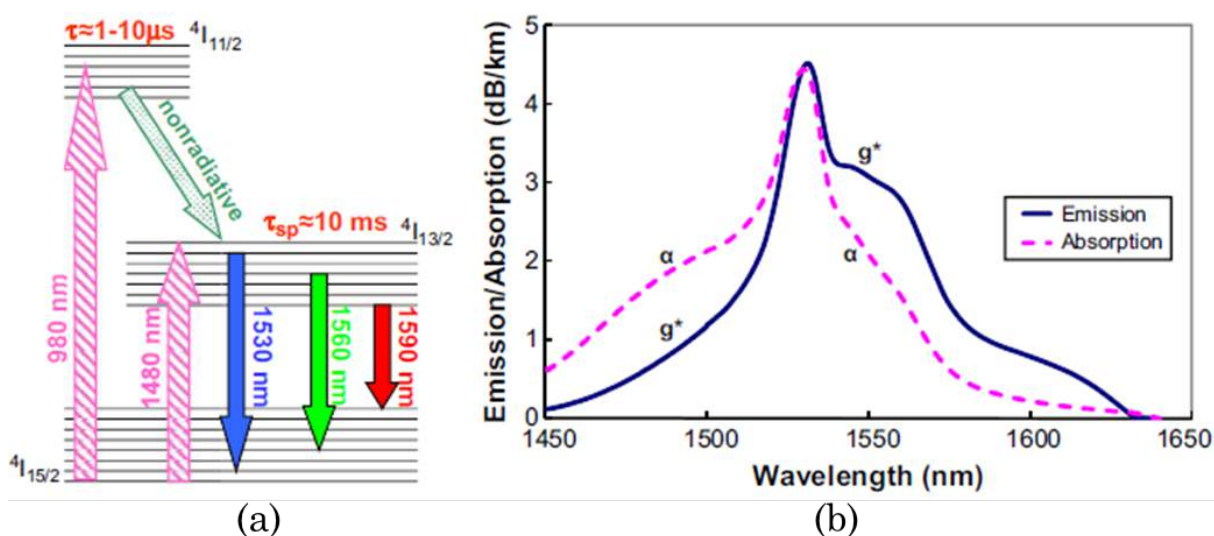
O Érbio apresenta uma série de faixas espectrais de absorção que determinam os comprimentos de onda de bombeio permitidos neste tipo de amplificador. Na prática, apenas dois comprimentos de onda de bombeio são usados, devido a uma maior disponibilidade de lasers nestas regiões. Estes comprimentos de onda estão em torno de 980 e 1480 nm. Em condições normais na fibra dopada com érbio, a energia advinda da luz incidente é absorvida pelo material. Se esta energia for correspondente à diferença entre dois níveis de energia do dopante no material, alguns dos elétrons absorvem os fótons incidentes e saltam para um estado mais alto de energia (processo de absorção de fótons) (BECKER; OLSSON; SIMPSON, 1999). A Fig. 6(a) mostra os níveis de transição do érbio.

Com a absorção de energia do laser de bombeio pela fibra dopada com érbio, e o tempo elevado de permanência no estado excitado é assegurado, uma maior densidade de elétrons no nível excitado (com relação ao nível fundamental), caracterizando uma inversão de população. Nessas condições, um sinal incidente na fibra dopada com Érbio consegue estimular o decaimento dos elétrons e, dessa maneira, os fótons são emitidos de maneira coerente, na mesma direção de propagação, fase e frequência do sinal, culminando na amplificação (BECKER; OLSSON; SIMPSON, 1999).

Os elétrons dos níveis excitados que voltam ao nível fundamental, sem fornecer amplificação ao sinal incidente na fibra, emitem fótons de maneira espontânea (ruído ASE), ou seja, com direção fase e comprimento de onda aleatórios, representando a principal fonte de ruído dos EDFAs (BECKER; OLSSON; SIMPSON, 1999). Para a construção de EDFAs são empregadas fibras cuja matriz de silício é dopada com íons de  $\text{Er}^{3+}$ .

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

Figura 6 – (a) Estados energéticos e transições do érbio. (b) Espectro de emissão e absorção do érbio.



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  $4I_{15/2} \rightarrow 4I_{11/2}$  e, conseqüentemente, a transição  $4I_{11/2} \rightarrow 4I_{13/2}$  antes da transição  $4I_{13/2} \rightarrow 4I_{15/2}$  (DESURVIRE, 2002).

Uma vez que o tempo médio de decaimento do nível  $4I_{13/2}$  para o nível  $4I_{15/2}$  é superior ao tempo médio de decaimento do nível  $4I_{11/2}$  para o nível  $4I_{13/2}$  (aproximadamente  $10 \mu s$ ), 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. Conseqüentemente, as transições entre estas bandas não geram fótons apenas em 1550 nm, mas geram fótons em uma larga faixa em torno desse comprimento de onda. Portanto, o EDFA atende bem a janela que compreende a Banda C das comunicações ópticas. Contudo, os decaimentos radiativos que geram os fótons em diferentes comprimentos de onda dependem das probabilidades quânticas de distribuição de portadores nos sub níveis 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, conseqüentemente, 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. 6(b), onde é mostrado o perfil de emissão e absorção do érbio em função do comprimento de onda. Vale mencionar também que a emissão espontânea gerada no amplificador se propaga ao longo da fibra e é amplificada, gerando ruído na saída do amplificador. Este ruído é chamado de emissão espontânea amplificada ou ASE (*Amplified Spontaneous Emission*).

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, desenhado 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 apresentado na Fig. 7. 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.

### 3.1.2 Parâmetros Fundamentais

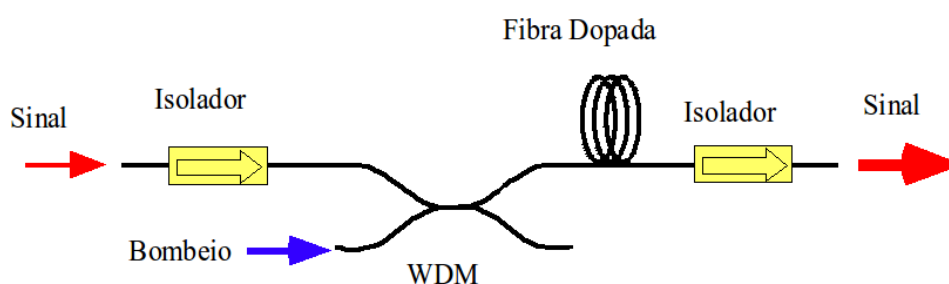
Os três parâmetros básicos para a caracterização de amplificadores a fibra dopada com érbio são ganho, figura de ruído e potência de saída. O ganho, em dB, é definido como o logaritmo da razão entre a potência do sinal na saída e potência do sinal na entrada, dadas em mW, isto é:

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

A potência do sinal na entrada é medida através 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 ASE, ou emissão espontânea amplificada. Para obter a potência do sinal na 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

Figura 7 – Exemplo de montagem básica do EDFA.



linear do amplificador. É importante observar também que, no amplificador a fibra dopada com érbio, o ganho 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 de emissão, representada na Fig. 6(b). 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.

A figura de ruído indica a degradação da relação sinal-ruído causada pelo amplificador. A principal fonte de ruído introduzida pelo amplificado é a ASE emitida pela fibra dopada com érbio. A expressão que define a figura de ruído é descrita da Eq. (2),

$$NF = \frac{SNR_{in}}{SNR_{out}}, \quad (2)$$

em que  $SNR_{in}$  e  $SNR_{out}$  são respectivamente as relações sinal/ruído elétricas 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),

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

em que  $P_{ASE}$  se refere à potência de ruído da emissão espontânea amplificada (ASE),  $h$  é a constante de Planck,  $\nu$  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 compressão 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 neste comprimento de onda já se encontrava desenvolvido, fabricados a partir de mudanças na composição do material do laser de sinal, que emite 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. 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 1480nm. Outra vantagem se dá pela razão de extinção em acopladores WDM 980/1550 ser maior que a mesma nos acopladores WDM 1480/1550.

O bombeio em 980nm apresenta também algumas desvantagens. Uma delas é que fibras monomodo em 980nm apresentam diâmetro de núcleo menor. Com isso, as perdas por curvatura em 1550nm são maiores. Na montagem de um amplificador isso reflete na necessidade de um maior cuidado ao posicionar a fibra dopada, para que esta não apresente curvaturas com diâmetro muito pequeno. Existem três configurações básicas para o bombeio de fibras dopadas com Érbio, que otimizam parâmetros diferentes. 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 co-propagante (mesmo sentido de propagação do sinal), contra-propagante (sentido contrário de propagação do sinal), ou bidirecional. Para obtenção destas configurações, é necessário posicionar acopladores WDM e isoladores adequadamente no circuito óptico. A configuração de bombeio co-propagante é indicada para projeto de pré-amplificadores, pois minimiza o nível de ASE na saída do amplificador, consequentemente reduzindo sua figura de ruído. Esta configuração é indicada também para compor o primeiro estágio de amplificação de um amplificador de linha. A configuração de bombeio contra-propagante 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 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 apresentaria 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 isto, 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. O amplificador de duplo estágio pode ser utilizado também para inserirmos elementos tais como compensadores de dispersão ou *add-drops* ópticos entre os estágios. Como o segundo estágio funciona 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.

### 3.1.4 EDFAs Testados

Todos os amplificadores testados foram capazes de prover até 21 dBm de potência total de saída na banda C.

A Fig. 8 mostra a topologia de amplificação e placa óptica do EDFA de um estágio testado neste trabalho. Esse amplificador foi descrito e desenvolvido em (OLIVEIRA, 2014).

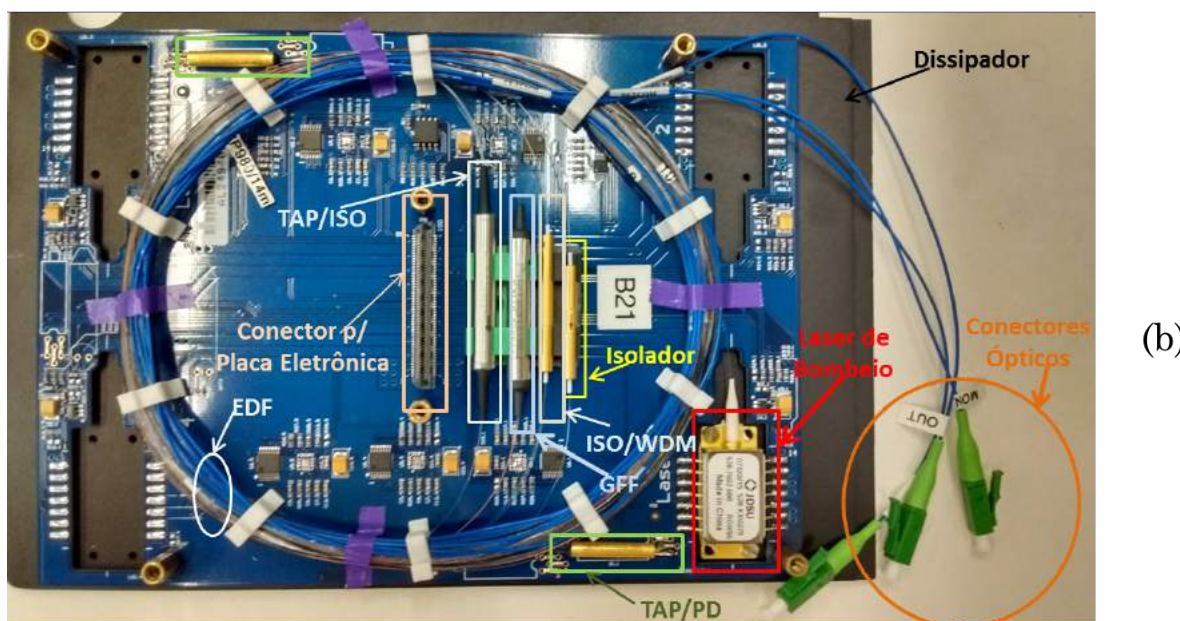
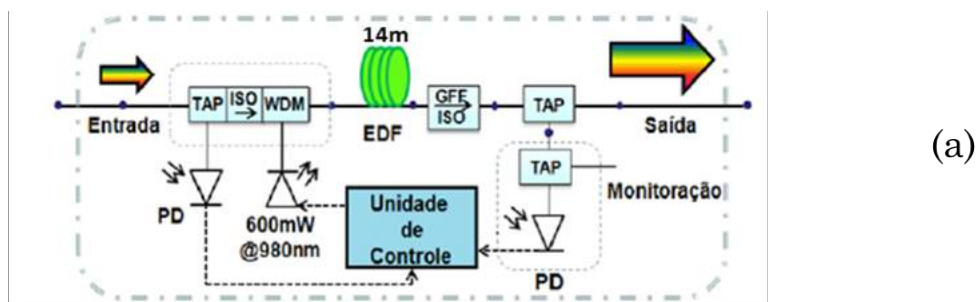
O EDFA de único estágio utilizado é basicamente composto por 14 metros de fibra dopada com érbio, laser para bombeio em 980 nm copropagante com 600 mW de potência óptica, acoplador direcional (WDM), isoladores, filtro GFF para ganho plano em 25 dB e AGC. Os derivadores ópticos (TAP) são usados para desviar 1% da potência para os fotodetectores (PD) para monitoramento do ganho.

A Fig. 9 mostra a topologia de amplificação e placa óptica do EDFA de dois estágios testado neste trabalho. Esse amplificador foi descrito e desenvolvido em (OLIVEIRA, 2014).

O EDFA de dois estágios é composto basicamente por dois EDFAs simples com AGC acoplado para ganho nominal fixo em 16 dB para cada estágio, mas com um VOA entre os estágios para controlar o ganho global e manter a planicidade espectral.

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, processador digital de sinais (DSP) ou FPGA.

Figura 8 – (a) Topologia e (b) placa óptica do amplificador EDFA de estágio único testado.



## 3.2 Amplificadores Ópticos Raman

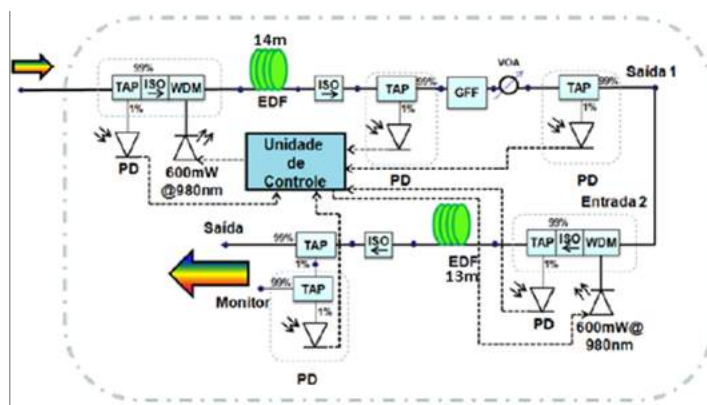
### 3.2.1 Princípios Fundamentais

O efeito não linear conhecido como espalhamento Raman espontâneo foi descoberto por Chandrasekhara Venkata Raman, que recebeu por isso o Premio Nobel de Física de 1930. Este mecanismo de espalhamento pode transferir, em um meio molecular, uma pequena fração de potência (tipicamente  $10^{-6}$ ) de um campo óptico para um outro, cuja frequência é reduzida da frequência do fônon gerado pelos modos vibracionais do meio (HEADLEY; AGRAWAL, 2005).

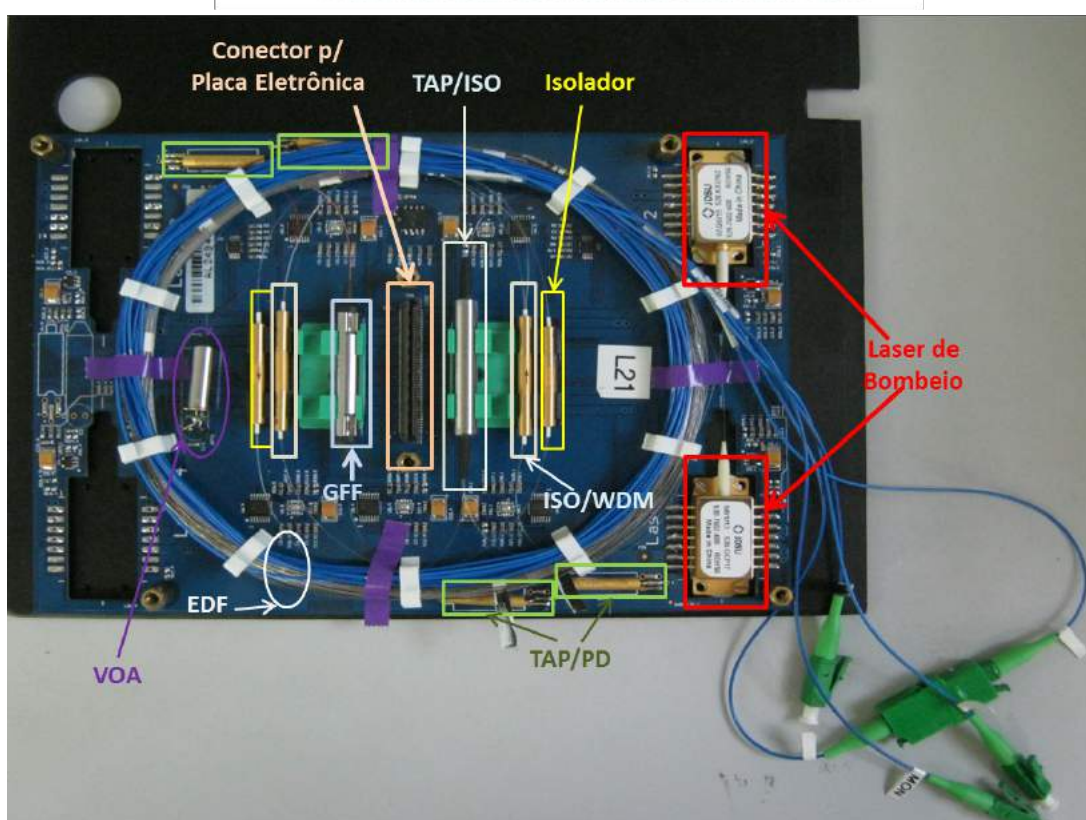
Os amplificadores Raman se baseiam no fenômeno físico do espalhamento Raman estimulado (SRS - *Stimulated Raman Scattering*), que pode ser obtido a partir da luz de um sinal em uma frequência apropriadamente deslocada da frequência da luz de bombeio. Neste processo, a luz do sinal e do bombeio são coerentemente acopladas pelo efeito Raman. O SRS pode transformar fibras ópticas em amplificadores de banda larga ou em lasers sintonizáveis como, também, pode degradar o desempenho dos sistemas ópticos de múltiplos canais, transferindo energia de um canal para canais vizinhos. Diferentemente dos amplificadores EDFAs, o efeito da



Figura 9 – (a) Topologia e (b) placa óptica do amplificador EDFA de estágio único testado.



(a)

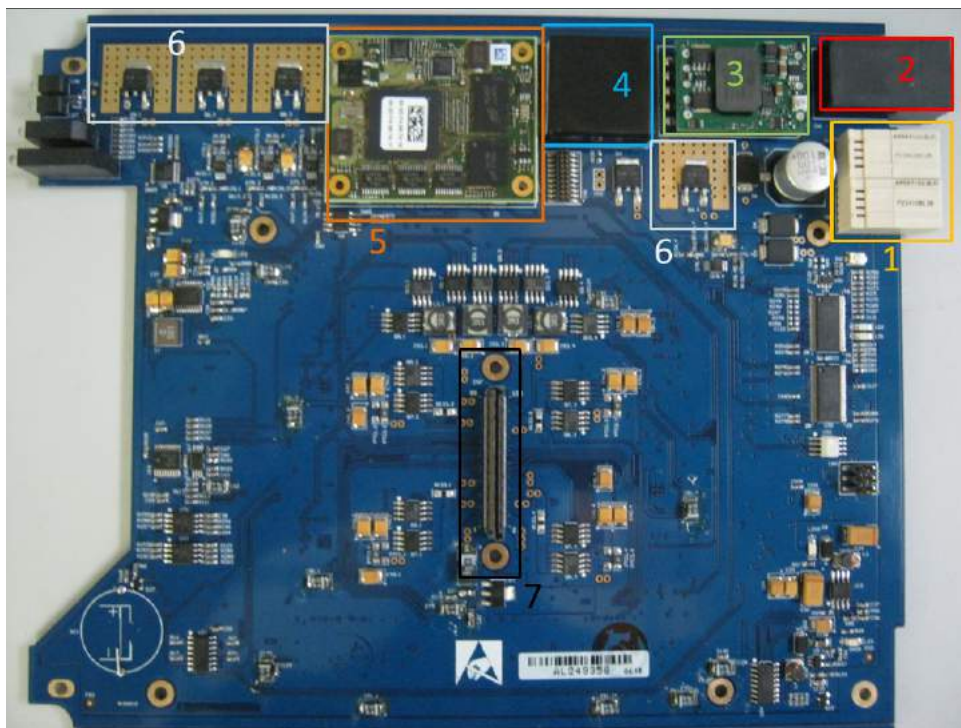


(b)

amplificação é obtido pela interação não-linear, dentro de uma fibra, entre os fótons do sinal e os de um laser de bombeio. A Fig. 11 ilustra o diagrama do processo quântico do espalhamento Raman.

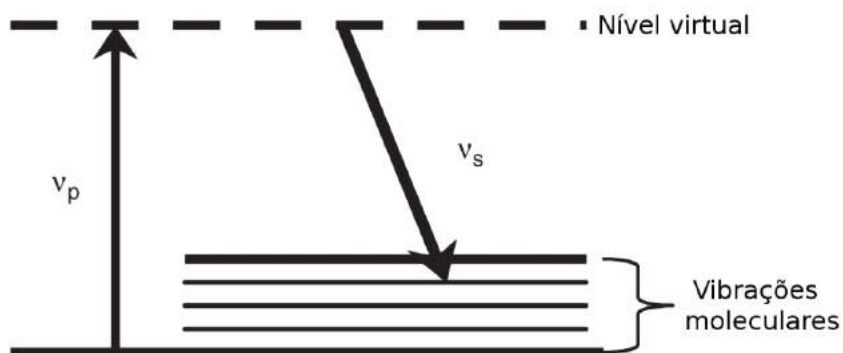
O espalhamento Raman pode ser descrito pela mecânica quântica como o espalhamento por uma molécula de um fóton de energia  $h\nu_p$  para um de menor frequência com energia  $h\nu_s$ . Ou seja, o fóton do bombeio,  $\nu_p$ , excita uma molécula para um nível virtual mais alto (estado não ressonante), sendo que esta decai rapidamente para um nível mais baixo de energia, emitindo no processo um fóton de sinal,  $\nu_s$ . 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 curva de ganho Raman é razoavelmente larga nas fibras

Figura 10 – Placa eletrônica dos amplificadores.



Fonte: próprio autor.

Figura 11 – Diagrama esquemático do processo quântico do espalhamento Raman.



ópticas devido a natureza amorfa da sílica.

As seguintes propriedades fundamentais do ganho Raman 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. 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 e ocorre em qualquer tipo de fibra.

A Fig. 12 ilustra o diagrama esquemático de um sistema de telecomunicações que utiliza amplificadores Raman. Quando o bombeio viaja na mesma direção do sinal, este é chamado de bombeio co-propagante ou direto, se o mesmo viaja na direção contrária a do sinal, é chamado bombeio contra-propagante ou contrário.

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 ou receptor, este sistema é chamado amplificação Raman discreta.

Tipicamente, amplificadores Raman distribuídos precisam de comprimentos de fibra de enlace maiores que 40 km enquanto amplificadores discretos possuem comprimentos em torno de 5 km. 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.

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 a compensação de dispersão cromática.

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 contra-propagante, as equações podem ser facilmente resolvidas, gerando a Eq. (4), da potência de sinal ao longo da fibra com amplificação Raman,

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

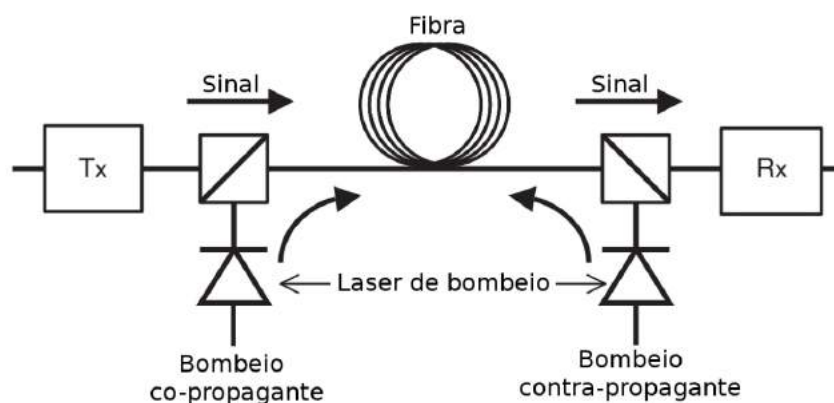
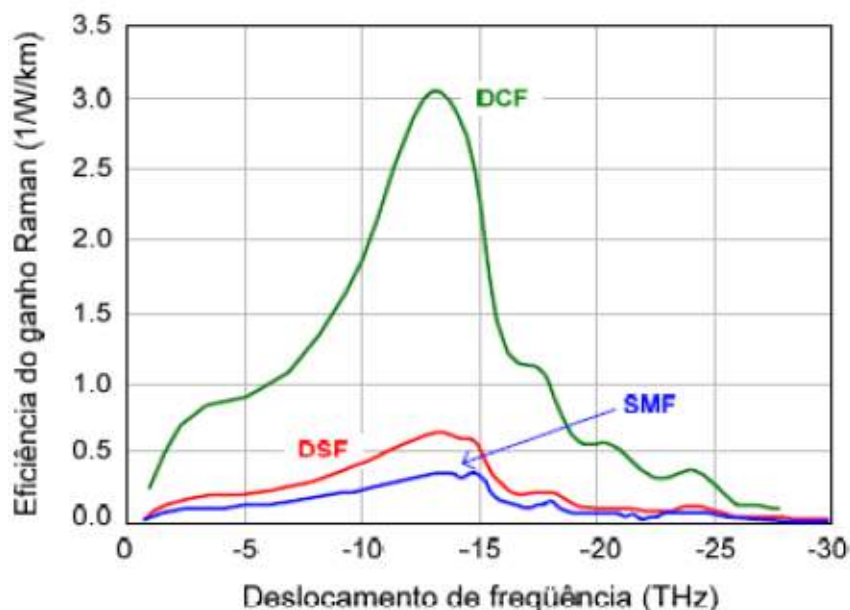


Figura 12 – Sistema óptico com amplificação Raman.

Figura 13 – Perfil do ganho de Raman para fibras DCF, SMF e DSF.



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

em que  $G_N$  é o ganho de rede,  $g_R$  é o coeficiente de ganho Raman da fibra, normalizado em relação a área efetiva da fibra,  $P_s(0)$  é a potência de entrada do bombeio e  $L$  é o comprimento da fibra. Esta equação é uma aproximação de primeira ordem da 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 enlaces maiores que 60 km.

Na Fig. 13 é ilustrado o espectro de ganho Raman para três diferentes tipos de fibras ópticas: Fibra monomodo padrão, fibra de dispersão deslocada e fibra compensadora de dispersão (HEADLEY; AGRAWAL, 2005). A diferença de frequências (ou comprimento de onda) entre o fóton de 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.

A amplificação Raman, quando comparada com outros tipos de amplificações ópticas, apresenta como vantagens a baixa figura de ruído equivalente e o ganho plano sobre uma larga faixa do espectro. A figura de ruído ( $NF$ ), de um dispositivo é a relação entre a relação sinal ruído ( $SNR$ ) de entrada pela  $SNR$  de saída, e mede o quanto um dispositivo degrada a qualidade do sinal. 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. Desta forma, a figura de ruído destes amplificadores é medida através da figura de ruído equivalente ( $NF_{eq}$ ).

A figura de ruído equivalente representa o valor da figura de ruído de um amplificador

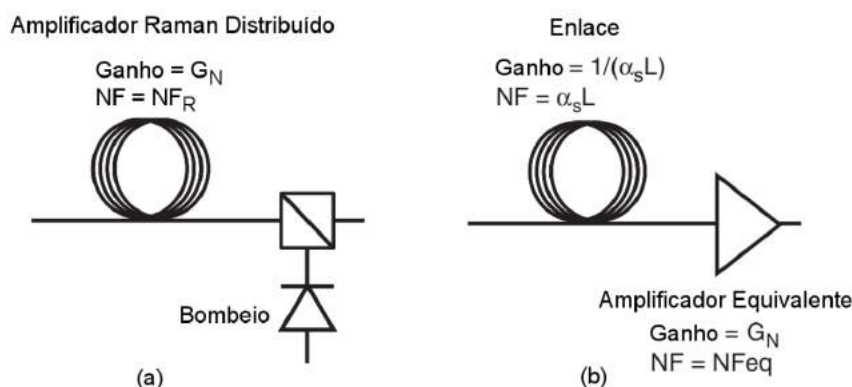
discreto, que colocado em frente ao receptor, na ausência de amplificação Raman, fornece a mesma SNR, que seria obtida utilizando-se a amplificação Raman distribuída. Em amplificadores Raman discretos, assim como em EDFAs, o parâmetro de figura de ruído pode ser calculado de forma direta. Na Fig. 14 são apresentados os dois sistemas, amplificador Raman distribuído e o sistema para medição da figura de ruído equivalente. Nesta figura, a perda do sinal no enlace é  $\alpha_s L$ , assim, o ganho do enlace é  $G = (\alpha_s L)^{-1}$  e a figura de ruído do enlace é igual a perda do sinal.

### 3.3 Amplificadores Ópticos Híbridos Raman/EDFA

No Apêndice A é apresentada uma revisão bibliográfica das tecnologias de amplificação óptica EDFA, Raman distribuído e Raman concentrado, que são as tecnologias mais empregadas na amplificação de sinais ópticos em redes DWDM. Cada tecnologia em particular, quando empregada na regeneração de canais nas redes ópticas DWDM, 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 dessas tecnologias citadas fornece bom desempenho para simultaneamente todos os parâmetros de desempenho em toda a faixa de operação de potência de entrada. A tecnologia de amplificação Raman distribuída tem como ponto forte a baixa inserção de ruído, porém fornece um baixo nível de ganho e potência de saída. A tecnologia de amplificação a fibra dopada com érbio (EDFA) tem como ponto forte o alto nível de ganho e potência de saída, com um nível de inserção de ruído intermediário. Já a tecnologia de amplificação Raman concentrado tem como ponto forte o alto nível de ganho e potência de saída, com possibilidade de compensação de dispersão durante a amplificação, porém fornece um nível de inserção de ruído pior que o EDFA e o Raman distribuído.

A tendência na evolução dos amplificadores ópticos DWDM gira em torno da necessidade de um amplificador óptico com controle de ganho variável que forneça desempenho melhorado

Figura 14 – Diagramas esquemáticos: (a) sistema amplificador Raman distribuído, (b) sistema equivalente enlace + EDFA



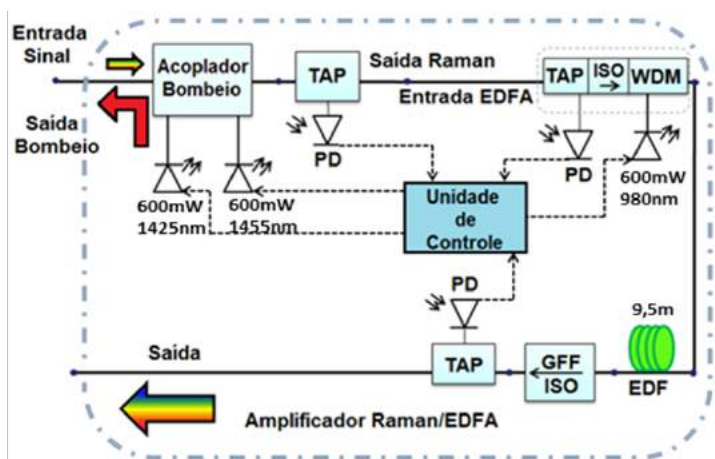
em todos os seus parâmetros de performance (potência de saída, figura de ruído, planicidade espectral de ganho e controle automático de ganho) para qualquer valor de ganho requerido. Em busca disso, vêm sendo investigado o desenvolvimento de amplificadores ópticos baseados em tecnologias de amplificação 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 as seguintes topologias: Amplificadores Raman/EDFA, Raman/Paramétrico, Raman/SOA ((Reichmann et al., 2006)) e TDFA/EDFA ((Sakamoto et al., 2006)). Porém, para redes ópticas DWDM (metropolitanas e de longa distância), as principais tecnologias de amplificação empregadas são os EDFAs, amplificadores Raman distribuídos e concentrados.

### 3.3.1 Amplificador Híbrido DRA/EDFA Testado

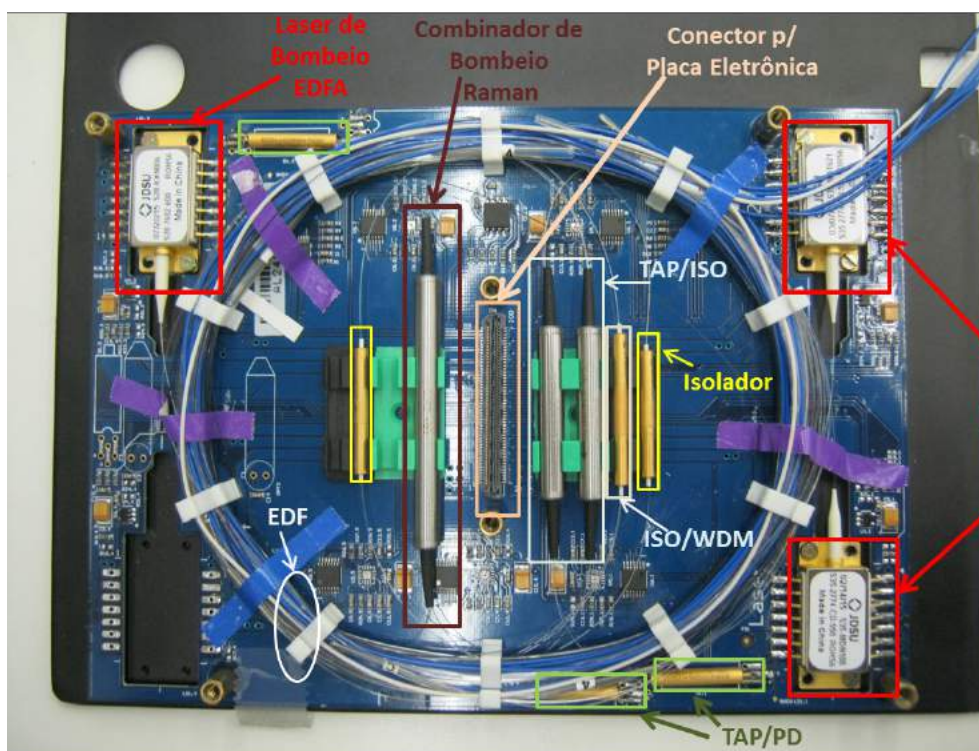
A Fig. 15 mostra a topologia de amplificação e placa óptica do do amplificador híbrido DRA/EDFA testado neste trabalho. Esse amplificador foi descrito e desenvolvido em (OLIVEIRA, 2014).

O amplificador híbrido é composto basicamente por um estágio Raman com dois lasers de bombeio (1425 e 1455 nm) contrapropagante com AGC e um estágio EDFA simples com ganho nominal fixo em 13 dB. Para as caracterizações do amplificador híbrido foram utilizados 50 km de fibra óptica monomodo padrão (SSMF) para gerar ganho Raman.

Figura 15 – (a) Topologia e (b) placa óptica do amplificador híbrido DRA/EDFA testado.



(a)



(b)

## 4 Metodologia

Nesse 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 4.2 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.

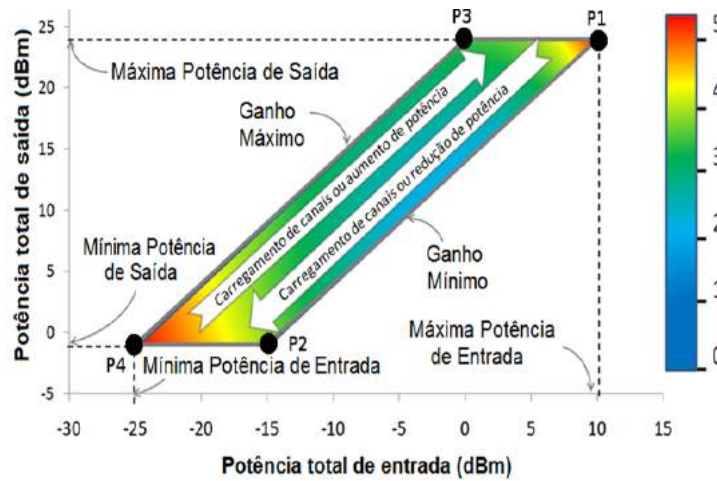
Outra necessidade está relacionada à operação do amplificador em diferentes faixas de potências de entrada, definida por uma faixa de diferentes valores de ganhos controláveis. Neste caso, a região de operação do amplificador é definida pelas faixas de potências de entrada e ganhos alvos de operação, 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. 16 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, podemos utilizar o caracterizador experimental apresentado em (MOURA et al., 2012). A Fig. 17 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

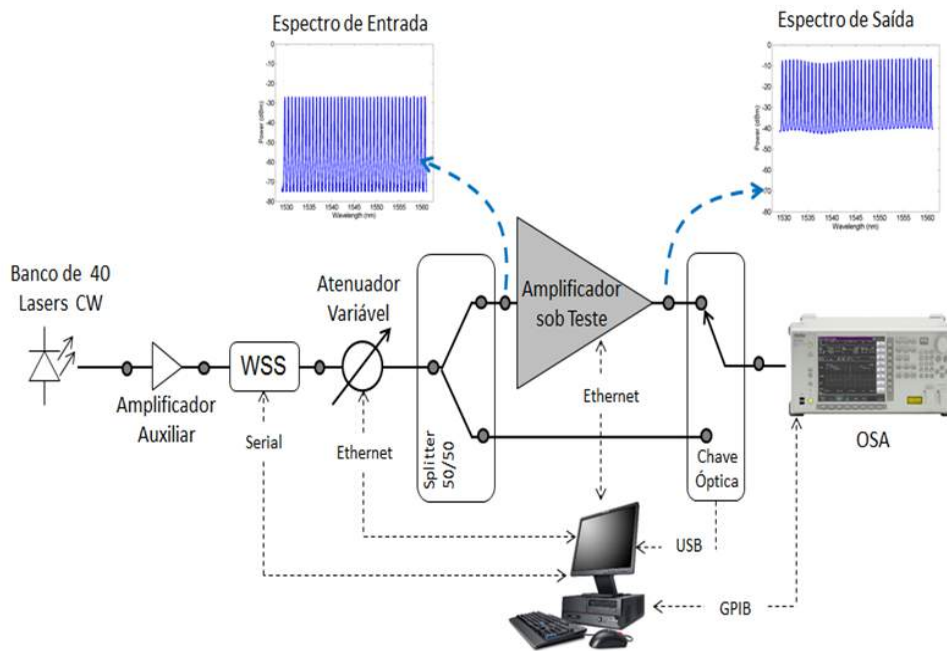


Figura 16 – Exemplo de máscara de potência.



Fonte: (OLIVEIRA, 2014).

Figura 17 – Caracterizador experimental.



Fonte: adaptada de (OLIVEIRA, 2014).

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. Este procedimento é feito para que o sinal na entrada do amplificador caracterizado seja o mais plano 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 de ganho ao longo de toda região de operação do amplificador. A precisão do AGC é calculada como a diferença entre os valores do ganho total configurado e ganho total medido. A planicidade espectral de ganho é calculada por meio da diferença entre o canal com máxima potência de pico menos o canal com mínima potência de pico na saída do amplificador. A figura de ruído  $NF$  do amplificador EDFA 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 do EDFA.

## 4.2 Teste Sistemico

O teste sistemico é utilizado para verificar e comparar o desempenho das topologias de amplificação óptica apresentadas nas Seções 3.1 e 3.3 quando postas para operar em um enlace óptico. Para tanto, foi utilizada a montagem experimental mostrado na Fig. 18, que é basicamente composto 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.

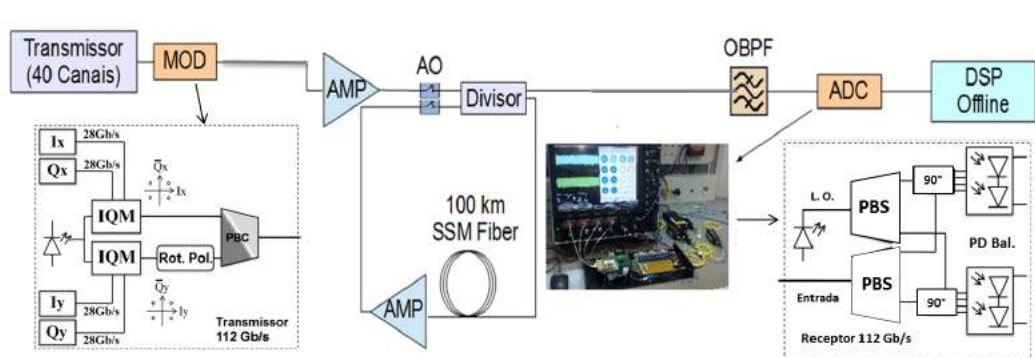
Do transmissor, são enviados 40 canais CW sintonizados na banda C, com 100 GHz de

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  $90^\circ$ . 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 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.

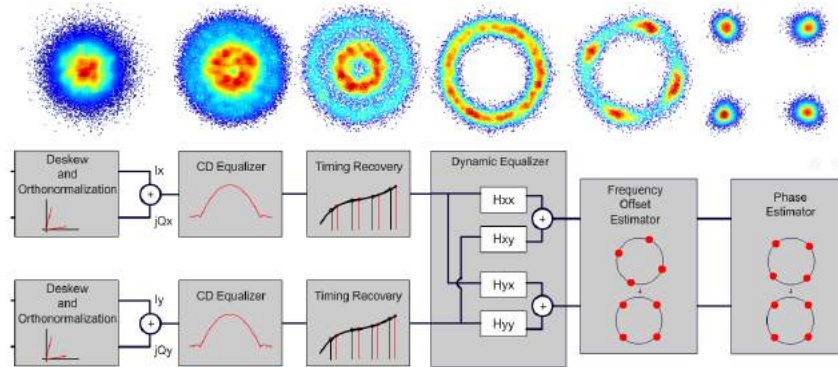
O receptor é basicamente composto por um filtro óptico sintonizável (OBPF), um conversor analógico digital (ADC) e um processador de sinais digitais (DSP). O receptor é utilizado para realizar a recepção coerente do canal que foi modulado em duas polarizações, fase e quadratura. O sinal recebido passa 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

Figura 18 – Aparato experimental para teste sistêmico.



Fonte: adaptada de (OLIVEIRA, 2014).

Figura 19 – Passos do processamento sobre o sinal DP-QPSK recebido.



Fonte: (OLIVEIRA, 2014).

potência de ruído que será detectada no receptor. Uma vez separado o canal a ser analisado, ele 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) destes 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. 19.

### 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 (1),

$$P_{amp} = P_{cir} + P_{pump} + P_{TEC}, \quad (1)$$

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. 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 (1), é possível encontrar o valor de  $P_{cir}$  e, dessa forma, mostrar o consumo detalhado de potência elétrica para os amplificadores ópticos.

## 5 Resultados Experimentais e Análise

Nesse capítulo são mostrados 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, EDFA de dois estágios com VOA entre os estágios e Híbrido DRA/EDFA. 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.

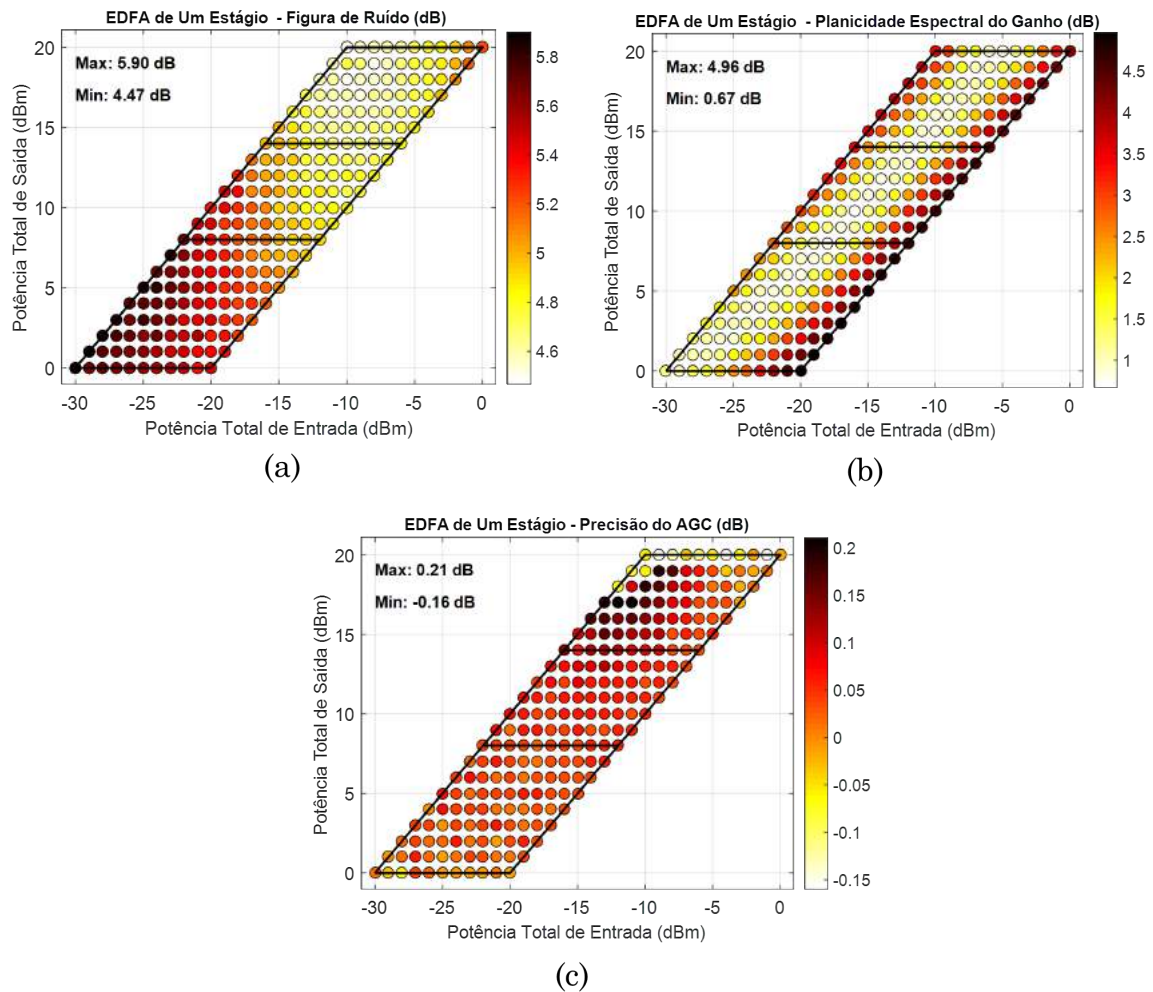
Essa região de operação foi definida dessa forma com o objetivo de amplificar *spans* com perdas que podem variar de 20 a 30 dB. Se considerarmos que essas perdas são unicamente devido à fibra SSMF (0,2 dB/km), por exemplo, podemos compensar as perdas de *spans* que variam de 100 a 150 km. O passo ajustado 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. 20 são mostrados os resultados das máscaras de potência de figura de ruído, planicidade espectral do ganho e precisão do AGC para o amplificador EDFA de um estágio testado.

A Fig. 20(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

Figura 20 – Máscaras de potência do amplificador EDFA de um estágio para (a) figura de ruído, (b) planicidade espectral do ganho e (c) precisão do AGC.



Fonte: Elaborada pelo autor.

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. (??).

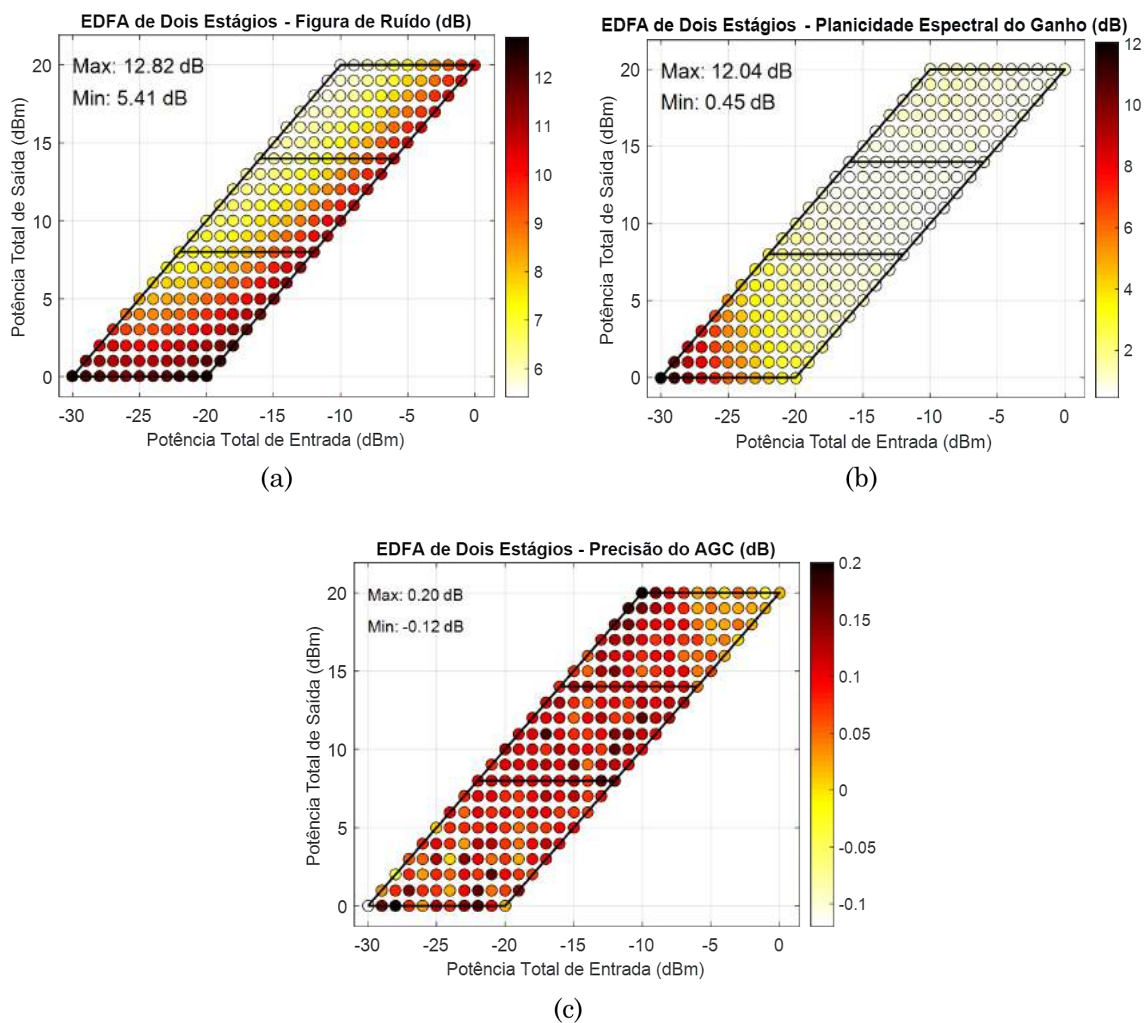
A Fig. 20(b) mostra a máscara de potência de planicidade espectral de ganho para o EDFA de um estágio, na qual foi obtida uma planicidade espectral de ganho em torno de 0,7 dB para os ganhos 25 e 26 dB, aumentando até aproximadamente 5 dB à medida que se afasta desses ganhos. Isso acontece porque o GFF (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.

A Fig. 20(c) 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%.

Na Fig. 21 são mostrados os resultados das máscaras de potência de figura de ruído, planicidade espectral do ganho e precisão do controle automático do ganho para o amplificador EDFA de dois estágios com VOA entre os estágios e AGC acoplado.

A Fig. 21(a) 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

Figura 21 – Máscaras de potência do amplificador EDFA de dois estágio para (a) figura de ruído, (b) planicidade espectral do ganho e (c) precisão do AGC.



Fonte: Elaborada pelo autor.



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. 21(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. 21(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, 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%.

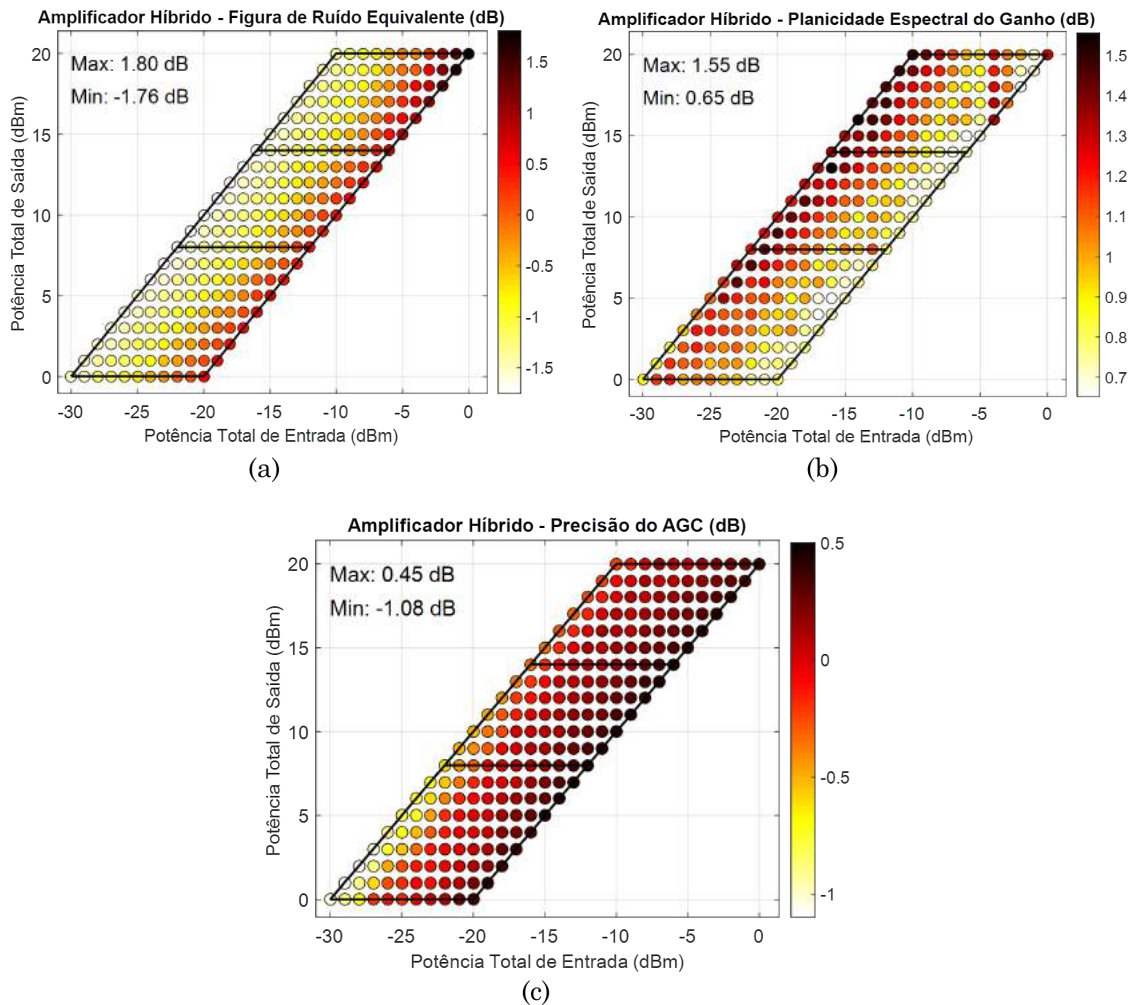
Os resultados das máscaras de potência de figura de ruído, planicidade espectral do ganho e precisão do controle automático do ganho para o amplificador híbrido DRA/EDFA são mostrados na Fig. 22.

Na Fig. 22(a) são 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 conseqüentemente reduzindo a figura de ruído equivalente.

A Fig. 22(b) mostra as máscaras 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.

A Fig. 22(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, 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.

Figura 22 – Máscaras de potência do amplificador Híbrido para (a) figura de ruído equivalente, (b) planicidade espectral do ganho e (c) precisão do AGC.



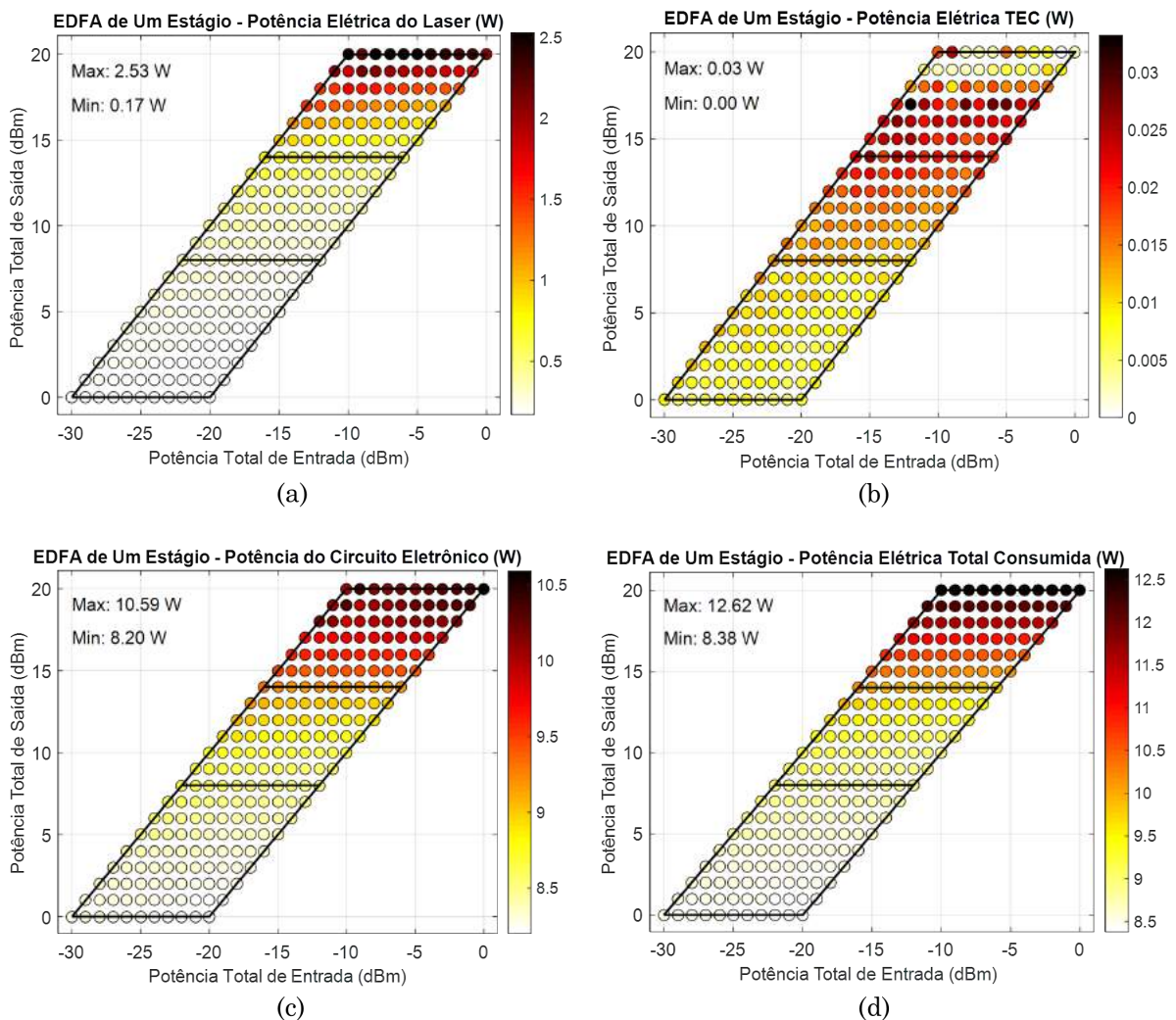
Fonte: Elaborada pelo autor.

## 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 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.

Figura 23 – Máscaras de potência do EDFA de um estágio para potência elétrica consumida (a) pelo laser, (b) pelo TEC, (c) pelo circuito eletrônico e (d) total.



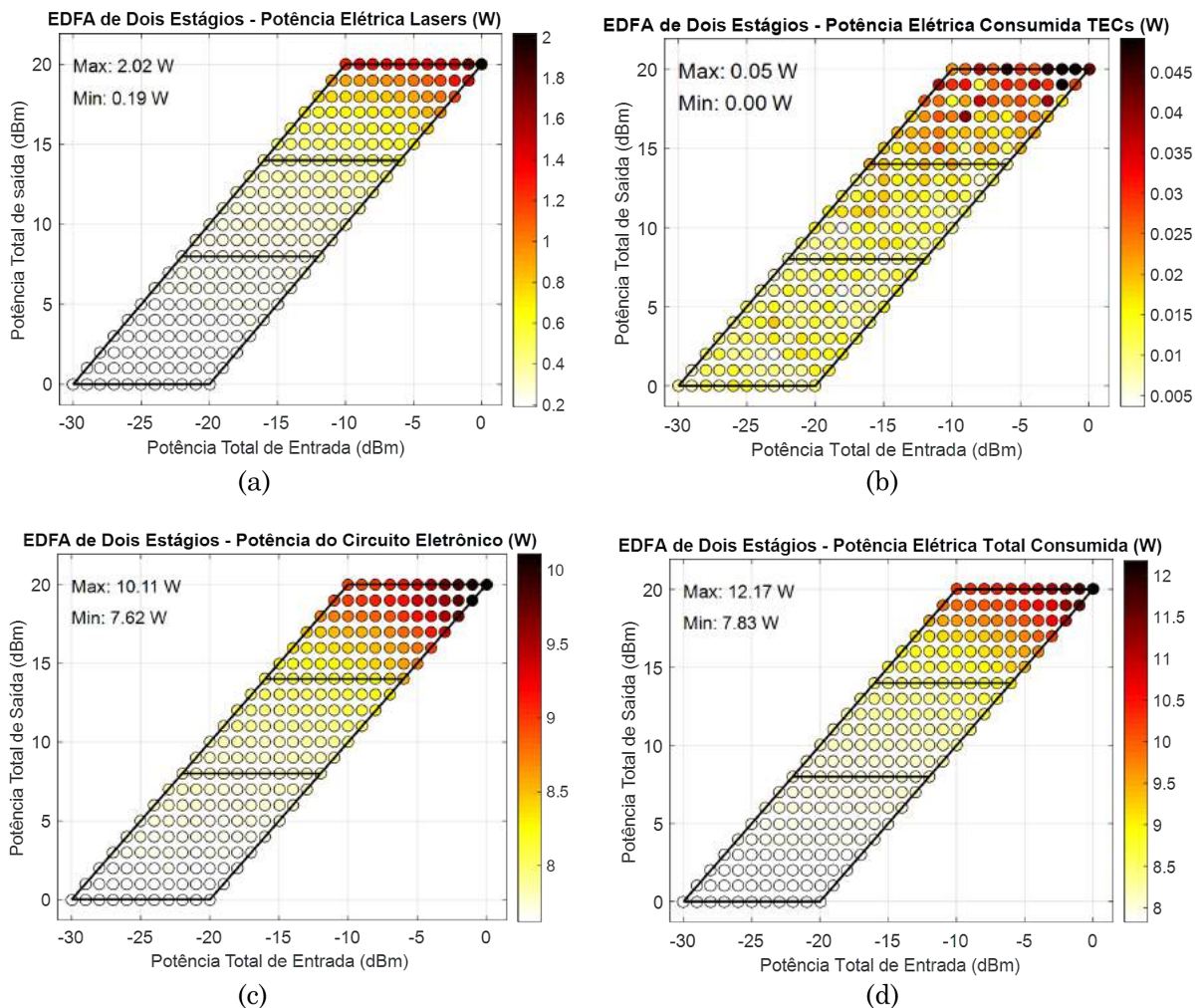
Fonte: Elaborada pelo autor.

A Fig. 23 mostra os resultados da máscara de potência do consumo potência elétrica do EDFA de um estágio para o laser de bombeio, para o TEC, para o circuito eletrônico e total. Na Fig. 23(a) é mostrado o consumo do laser de bombeio na região de operação, onde se observa que aumenta com o aumento da potência óptica de saída, com valores máximo e mínimo de 2,53 W e 0,17 W, respectivamente. A Fig. 23(b) mostra a máscara de potência para o consumo de potência elétrica do TEC, que tem consumo máximo de 30 mW, praticamente desprezível e sua influência no consumo total pode ser desprezada. O consumo de potência elétrica do circuito eletrônico é mostrado na Fig. 23(c), onde podemos observar que o consumo aumenta com a potência óptica de saída, com valores mínimo e máximo de 8,2 e 10,59 W, respectivamente. Por fim, a Fig. 23(d) mostra o resultado do consumo total do EDFA de um estágio na região de operação, onde observamos que o consumo cresce com o aumento da potência óptica de saída e é praticamente constante com o ganho, com valores mínimo e máximo de 8,38 e 12,62

W. Desses resultados, observamos que o circuito eletrônico pode consumir de 84% a 98% da potência 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 de entrada). Se o número de canais for aumentando e o ganho for mantido (potência de saída aumentando), o consumo de potência elétrica também aumentará.

A Fig. 24 mostra os resultados da máscara de potência do consumo potência elétrica do EDFA de dois estágios para os lasers de bombeio, para os TECs, para o circuito eletrônico e total. Na Fig. 24(a) 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

Figura 24 – Máscaras de potência do EDFA de dois estágios para potência elétrica consumida (a) pelos lasers, (b) pelos TECs, (c) pelo circuito eletrônico e (d) total.



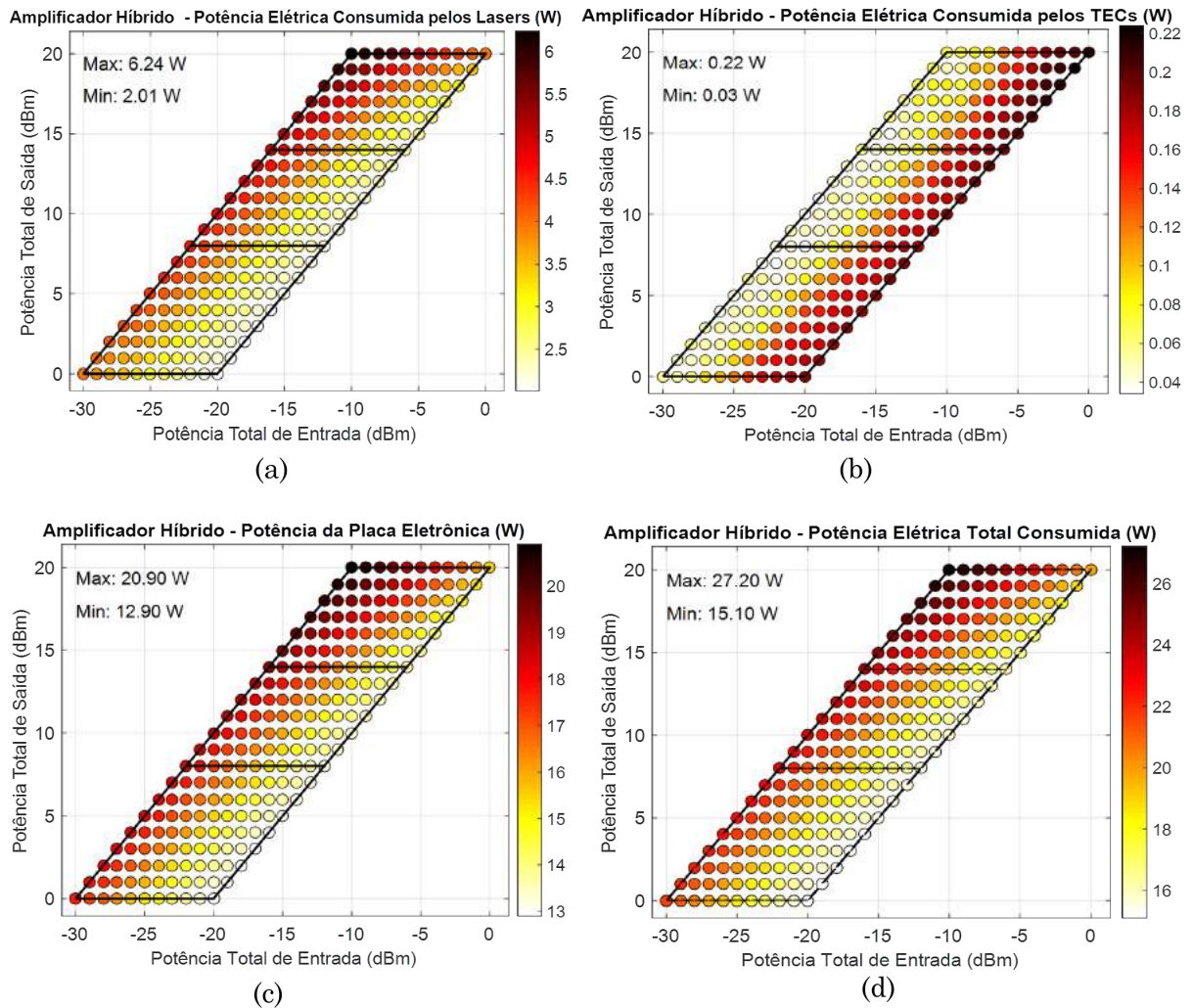
Fonte: Elaborada pelo autor.

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. A Fig. 24(b) mostra a máscara de potência para o consumo de potência elétrica do TECs, que tem consumo máximo de 50 mW e praticamente não contribui para o consumo total. O consumo de potência elétrica do circuito eletrônico é mostrado na Fig. 24(c), onde podemos observar que aumenta com a potência óptica de saída com o mesmo padrão dos lasers de bombeio, como esperado, com valores mínimo e máximo de 7,62 e 10,11 W, respectivamente. Por fim, a Fig. 24(d) mostra o resultado do consumo total do EDFA de um estágio na região de operação, onde observamos que o consumo cresce com o aumento da potência óptica de saída e é praticamente constante com o ganho, com valores mínimo e máximo de 7,83 e 12,17 W. Desses resultados, observamos que o circuito eletrônico pode consumir de 83% a 97% da potência elétrica total consumida pelo EDFA de um estágio na região de operação definida.

Comparando os resultados do EDFA de um e dois estágios, observamos 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 esta corrente elétrica está diretamente ligada ao consumo de potência elétrica do laser e este com o consumo total do amplificador, tais resultados são esperados.

A Fig. 25 mostra os resultados da máscara de potência do consumo potência elétrica do amplificador híbrido DRA/EDFA para os três lasers de bombeio, para os TECs, para o circuito eletrônico e total. Na Fig. 25(a) é mostrado o consumo dos lasers de bombeio na região de operação, onde podemos observar que aumenta 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 Fig. 25(b) mostra a máscara de potência para o consumo de potência elétrica dos TECs, que tem consumo máximo de 220 mW e praticamente não influencia no consumo total. O consumo de potência elétrica do circuito eletrônico é mostrado na Fig. 25(c), onde podemos 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. Por fim, a Fig. 25(d) mostra máscara de potência do consumo total do amplificador DRA/EDFA, onde observamos que o consumo 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 15,10 e 27,20 W. Desses resultados, observamos que o circuito eletrônico pode consumir de 77% a 85% da potência elétrica total consumida pelo amplificador híbrido DRA/EDFA 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 conseqüente maior consumo de energia elétrica.

Figura 25 – Máscaras de potência do amplificador Híbrido para potência elétrica consumida (a) pelos lasers, (b) pelos TECs, (c) pelo circuito eletrônico e (d) total.



Fonte: Elaborada pelo autor.

### 5.3 Testes Sistêmicos

Nos testes sistêmicos, o amplificador auxiliar da montagem experimental da Fig. 18 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 4.2, 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.

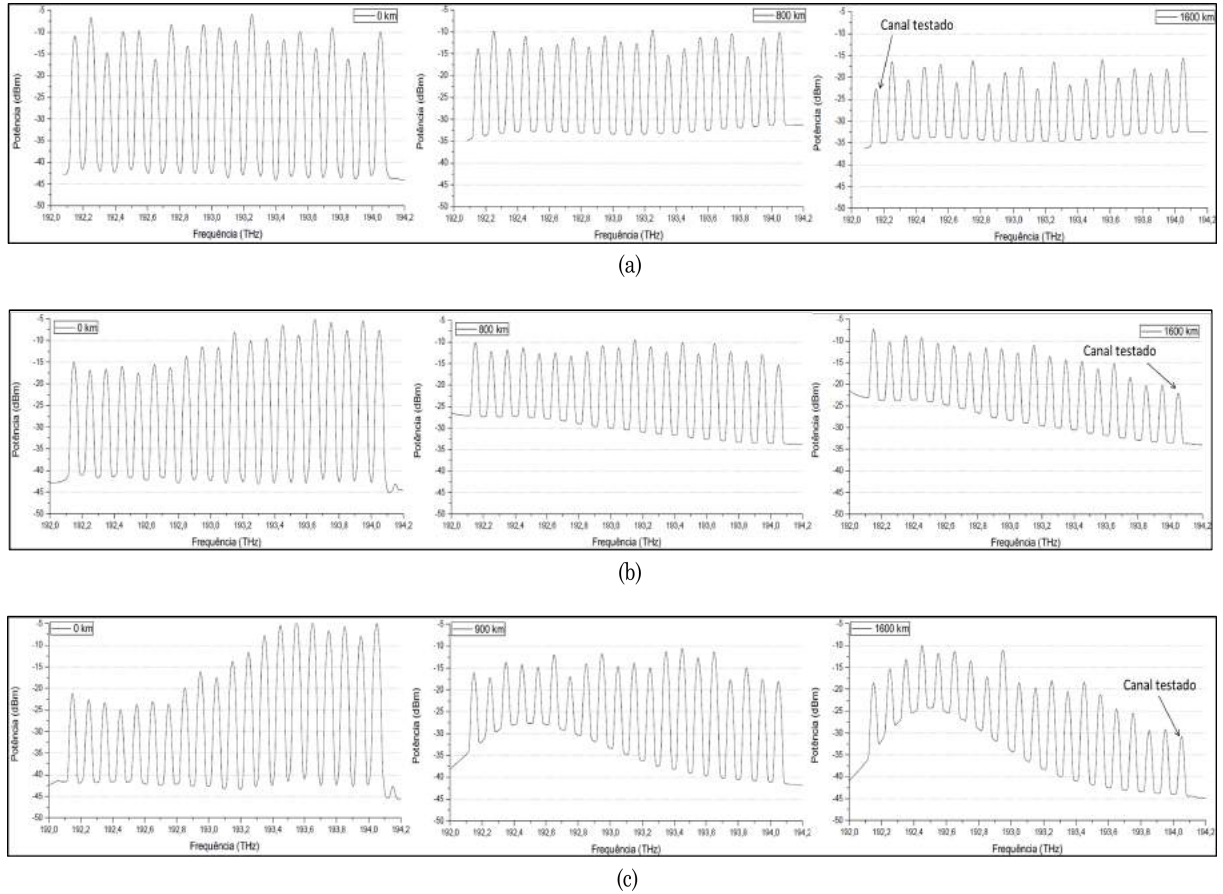
Antes dos testes propriamente ditos, foi verificado experimentalmente qual a OSNR mínima para uma taxa de erro de bits de  $4 \times 10^{-3}$ , BER limite para recepção coerente DP-QPSK 112 Gb/s livre de erros com FEC (Forward Error Correction) de 7%. O valor foi de aproximadamente 16 dB. Dessa forma, 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. 26 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 dois estágios, Figs. 26(a) e 26(b), respectivamente, e no lançamento, depois de 900 km e 1600 km para o amplificador híbrido, Fig. 26(c). Os sinais sofreram atenuação de 8 dB até chegarem ao OSA. Essas figuras mostram o impacto do acúmulo do ganho não plano por não utilizarmos dispositivos como GFF ou WSS, principalmente nos casos do EDFA de dois estágio 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 o híbrido.

A Fig. 27 mostra os resultados da variação da OSNR do canal de teste escolhido com a distância de transmissão para os amplificadores testados. Observamos 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 do *tilt* do ganho, que faz com que canais com níveis mais altos de potência "roube" ganho dos canais com níveis mais baixos.

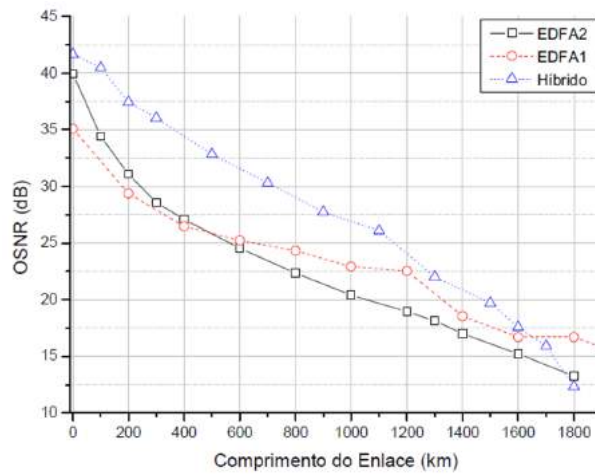
O EDFA de um estágio foi o amplificador que mais manteve a planicidade espectral, por isso a pré ênfase para esse amplificador deixou a potência de lançamento dos canais mais bem distribuída do que a dos outros amplificadores e, como consequência, o canal de teste teve a menor OSNR no lançamento (35 dB) quando comparado com o dos outros, como pode ser visto na Fig. 27. 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 "roubava" o ganho, sendo crítico a partir daquele ponto.

Figura 26 – 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.

Figura 27 – Variação da OSNR com o comprimento do enlace, com *spans* de 100 km, do canal testado para os amplificadores híbrido, EDFA de um e de dois estágios .



Fonte: Elaborada pelo autor.

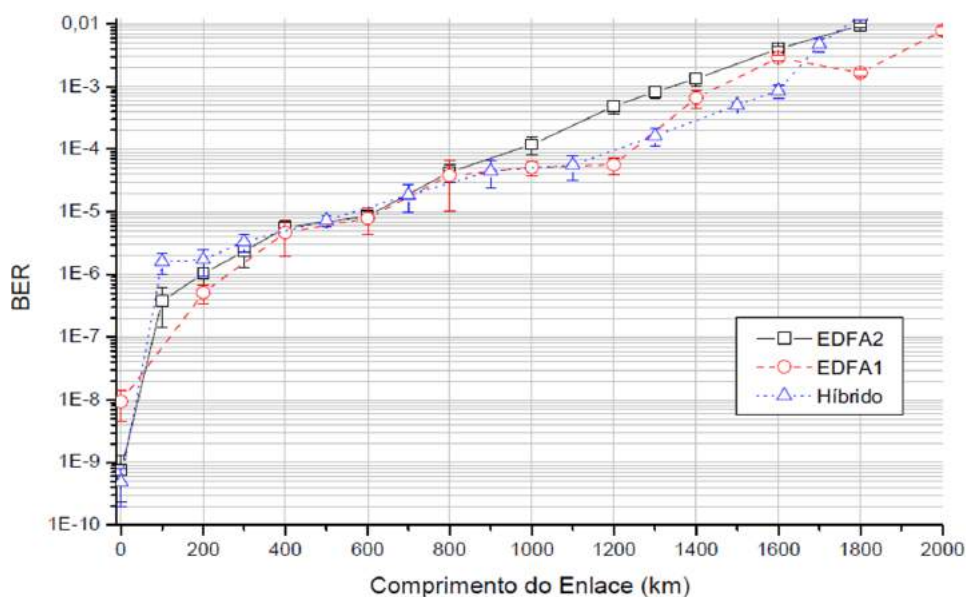


O EDFA de dois estágios foi o que manteve a curva da OSNR mais bem comportada, porém foi o que degradou mais, o que está de acordo com o resultado da máscara de potência para figura de ruído, sendo o amplificador que mais inseriu ruído dentre os três testados neste trabalho.

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 mostrados nas Figs. 20, 21 e 22 para região de -7 dBm de potência de entrada e 20 dBm de saída dos amplificadores. Mas como foi observado, o *tilt* do ganho teve muita influência, por não utilizarmos dispositivos para melhorar a planicidade 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. 28 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. Observamos que a taxa de erro é praticamente igual para os três amplificadores até 800 km, ou oito *spans*, e a partir daí o EDFA de dois estágios apresenta desempenho inferior em relação aos outros. Considerando a BER para alcance máximo de  $4 \times 10^{-3}$ , 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  $1 \times 10^{-3}$ , enquanto que a do EDFA de um estágio é de aproximadamente  $3 \times 10^{-3}$  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

Figura 28 – Variação da BER com o comprimento do enlace, com *spans* de 100 km, do canal testado para os amplificadores híbrido, EDFA de um e dois estágios .



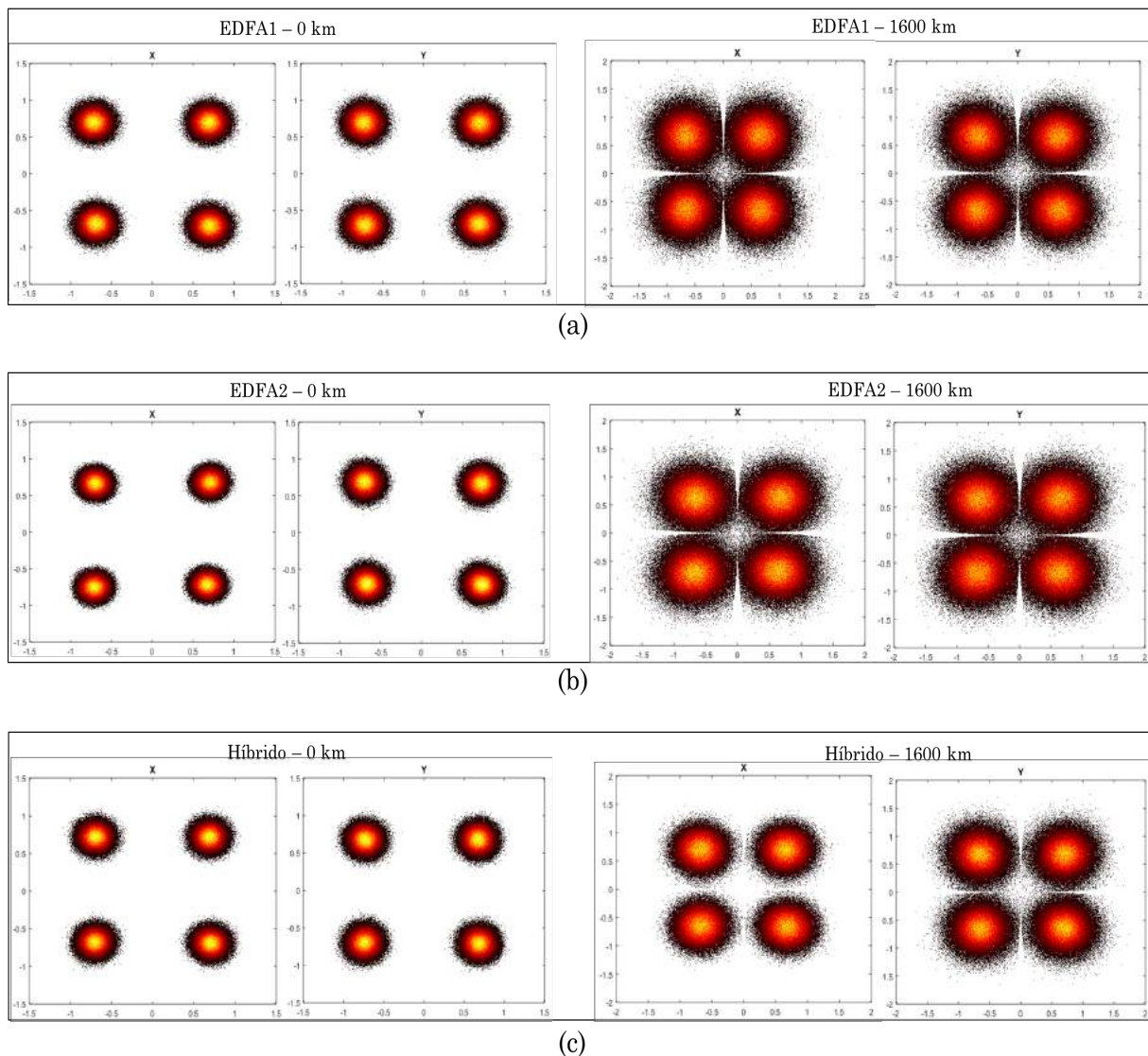
Fonte: Elaborada pelo autor.

amplificação e outra.

Observamos 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 comparamos os gráficos da OSNR e BER nas Figs. 27 e 28, respectivamente,

Figura 29 – Constelações na recepção 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.

observamos 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, na maioria dos pontos no gráfico, maior ou igual ao do EDFA de um estágio. Esperávamos 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 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. 29 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. 29(a) mostra as constelações para o EDFA de um estágio. A Fig. 29(b) mostra as constelações para o EDFA de dois estágios. A Fig. 29(c) mostra as constelações para o amplificador híbrido.

## 6 Conclusões e Trabalhos Futuros

Este trabalho apresentou uma avaliação experimental comparativa de desempenho por figuras de mérito e consumo de potência elétrica de amplificadores EDFAs de um e dois estágios e Híbrido Raman/EDFA distribuído contrapropagante que podem ser usados em redes DWDM reconfiguráveis.

Os resultados mostraram, como esperado, que o amplificador Híbrido apresenta o melhor desempenho em termos de figura de ruído equivalente e planicidade espectral, em que apresenta valores de -1,76 a 1,80 dB e 0,65 a 1,55 dB, respectivamente. O EDFA de estágio único apresentou uma figura de ruído que variou de 4,47 a 5,9 dB e uma planicidade espectral que variou de 0,7 a 5 dB. Já o EDFA de duplo estágio apresentou uma figura de ruído que variou de 5,41 a 12,82 dB e uma planicidade que variou de 0,45 a 12,04 dB.

Em contrapartida, o amplificador Híbrido foi o que apresentou maior consumo de potência elétrica, de 15 a 27,2 W, mais que duas vezes o consumo dos EDFAs, que variou de aproximadamente 8 a 12,5 W.

### 6.1 Trabalhos Futuros

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

1. Avaliação experimental do desempenho do amplificador óptico híbrido com as topologias de amplificação óptica EDFA, EDFA acoplado com VOA e Raman (sem controle de ganho) com EDFA em sistemas de comunicações ópticas DWDM reconfiguráveis.
2. Avaliação de desempenho experimental do amplificador óptico híbrido em loop de recirculação com relação as topologias de amplificação óptica para redes DWDM reconfiguráveis utilizadas atualmente.
3. Estudo de compensação automática da planicidade espectral de ganho por meio do controle dos níveis dos bombeios do amplificador óptico híbrido Raman/EDFA.

### 6.2 Trabalhos Publicados

Até o presente momento foi publicado o seguinte artigo referente ao trabalho desenvolvido nesta dissertação:

1. 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.

# Referências

- AGRAWAL, G. P. *Fiber-Optic Communication Systems*. 4. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc., 2010. Citado 3 vezes nas páginas 12, 14 e 18.
- AGRELL, E. et al. Roadmap of optical communications. *Journal of Optics*, IOP Publishing, v. 18, n. 6, p. 063002, 2016. Citado na página 12.
- BECKER, P. M.; OLSSON, A. A.; SIMPSON, J. R. *Erbium-doped fiber amplifiers: fundamentals and technology*. [S.l.]: Academic press, 1999. Citado 3 vezes nas páginas 26, 29 e 42.
- BINH, L. N. *Digital processing: Optical transmission and coherent receiving techniques*. Taylor and Francis, 2013. Citado na página 22.
- 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 na página 14.
- 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 40.
- DESURVIRE, E. *Erbium-doped fiber amplifiers: principles and applications*. [S.l.]: Wiley-Interscience, 2002. Citado na página 27.
- GERSTEL, O. et al. Elastic optical networking: A new dawn for the optical layer? *IEEE Communications Magazine*, IEEE, v. 50, n. 2, p. s12–s20, 2012. Citado na página 18.
- HEADLEY, C.; AGRAWAL, G. *Raman amplification in fiber optical communication systems*. [S.l.]: Academic Press, 2005. Citado 3 vezes nas páginas 32, 35 e 36.
- 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 na página 14.
- ITU-T. *G.694.1. Spectral grids for WDM applications: DWDM wavelength grid*. 2003. Citado na página 17.
- ITU-T. *G.694.2. Spectral grids for WDM applications: CWDM wavelength grid*. 2003. Citado na página 17.
- LÊ, N. B. *Advanced digital optical communications*. [S.l.]: Taylor & Francis, 2015. Citado na página 22.
- 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 2 vezes nas páginas 40 e 42.
- NEUKERMANS, A.; RAMASWAMI, R. Mems technology for optical networking applications. *IEEE Communications Magazine*, IEEE, v. 39, n. 1, p. 62–69, 2001. Citado na página 24.

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 6 vezes nas páginas 14, 31, 38, 41, 43 e 44.

QIAN, D. et al. 101.7-tb/s (370× 294-gb/s) pdm-128qam-ofdm transmission over 3× 55-km ssmf using pilot-based phase noise mitigation. In: OPTICAL SOCIETY OF AMERICA. *National Fiber Optic Engineers Conference*. [S.l.], 2011. p. PDPB5. Nenhuma citação no texto.

RAMASWAMI, R.; SIVARAJAN, K.; SASAKI, G. *Optical networks: a practical perspective*. [S.l.]: Morgan Kaufmann, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 24.

ZYSKIND, J.; SRIVASTAVA, A. *Optically Amplified WDM Networks*. 1st. ed. [S.l.]: Academic Press, 2011. Citado na página 13.