



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO  
DEPARTAMENTO DE MICROONDA E ÓPTICA**

# **Análise Experimental de Topologias de Amplificadores Ópticos a Fibra Dopada com Érbio**

**Thalles Valente Pinto Coelho**

**Orientador:  
Aldário Chrestani Bordonalli (FEEC)**

## **Composição da Banca Examinadora:**

Prof. Dr. Aldário Chrestani Bordonalli – FEEC/UNICAMP – Presidente  
Prof. Dr. João Batista Rosolem – Fundação CPqD  
Prof. Dr. Rui Fragassi Souza – FEEC/UNICAMP

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do grau de MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**Campinas, janeiro de 2007**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE -  
UNICAMP

C65a Coelho, Thalles Valente Pinto  
Análise experimental de topologias de amplificadores  
ópticos a fibra dopada com Érbio / Thalles Valente Pinto  
Coelho. --Campinas, SP: [s.n.], 2007.

Orientador: Aldário Chrestani Bordonalli  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de  
Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de  
Computação.

1. Amplificadores óticos. 2. Topologia. 3. Fibras óticas.  
4. Sistemas de telecomunicação. 5. Metais de terras raras.  
6. Érbio. I. Bordonalli, Aldário Chrestani. II. Universidade  
Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e  
de Computação. III. Título.

Título em Inglês: Experimental analysis of topologies of erbium doped fiber  
amplifiers

Palavras-chave em Inglês: Optical amplifiers, Topologies, Optical fibers, WDM systems,  
Erbium

Área de concentração: Telecomunicações e Telemática  
Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica  
Banca examinadora: João Batista Rosolem e Rui Fragassi Souza  
Data da defesa: 05/01/2007  
Programa de Pós-Graduação: Engenharia Elétrica

## **RESUMO**

Este trabalho realiza um estudo detalhado de diversas topologias de amplificadores a fibra dopada com érbio (EDFA). Tendo como referência a topologia básica do EDFA (bombeio co-propagante), foram implementadas outras topologias através de modificações do circuito óptico, por meio da inserção de diferentes dispositivos passivos, da mudança da localização da aplicação do bombeio e até da possibilidade de dupla passagem do sinal pela fibra dopada. Com este estudo, é possível verificar os fundamentos de operação do EDFA e também realizar análises comparativas entre diferentes topologias que foram contempladas em trabalhos anteriores. Além disso, foram propostas outras montagens de circuitos ópticos. Para tanto, foram utilizados dois comprimentos de onda distintos para o sinal de entrada, diversos segmentos de fibra dopada com érbio e diferentes valores de potência de sinal e de bombeio óptico. Assim, os resultados obtidos puderam ser comparados, com o intuito de identificar as topologias que melhor se adequam a uma determinada aplicação (potência, linha ou pré-amplificação). Além do ganho de sinal, outros parâmetros analisados foram a figura de ruído e o espectro de saída do amplificador, entre outros.

## **ABSTRACT**

This work presents a detailed study of different topologies of erbium doped fiber amplifier (EDFA). By using an optical circuit based on the classic topology of the EDFA, others topologies were implemented. In order to modify the optical circuit, it was necessary to insert passive and/or active optical components, change the position where the pump is coupled and to make a double pass of the signal through the doped fiber. In this study it was verified the fundamentals of the functionalities of the EDFA and, beyond that, we carried out comparative analysis among different topologies, so far this has not been referenced in the current literature. For the experimental measurements we used two distinct wavelengths for the optical signal, several lengths of erbium doped fibers and different powers for pumping and signal. For instance, it was possible to observe a performance comparison with the topologies and identify the best characteristics for a specific function in the optical system (line, power or pre-amplification). Other amplifier operational characteristics are also analyzed, such as, amplifier gain, noise figure and amplified spontaneous emission, among others.

Dedico este trabalho a Selma e Francisco, os meus pais. À minha mãe, uma predestinada, que durante todos estes anos me orientou, mostrando-me sempre o caminho do trabalho e da perseverança. Ao meu pai, que continua vivo na minha memória, que me deixou a vontade de sempre procurar ser um ser humano melhor e de conseguir passar pelas dificuldades sem me deixar entristecer. Dedico este trabalho também a minha irmã Khamilla que tem um lugar muito especial no meu coração.

## **Agradecimentos**

A Deus que me deu forças para seguir em frente e chegar até aqui...

Ao professor Aldário, por me aceitar como aluno e orientar pacientemente todas as etapas deste trabalho.

A minha namorada, amiga e companheira Giovanna, por ser minha fonte de inspiração diária e ter compreendido a minha ausência em tantas ocasiões em que precisei me dedicar integralmente ao mestrado. Pelas palavras de incentivo, gestos de amor e carinho nas horas certas.

Aos amigos de ontem e hoje das Repúblicas em que estive: Reginaldo Lessa, Chelaine, Juju, Heraldo, Chicó, Charles, Lelê, Salsicha e Daniel "Edilberto", pelos bons tempos de Moradia e pelas valiosas trocas de idéias que, sem dúvida, contribuíram muito para o meu conhecimento.

Ao Instituto de Pesquisa Eldorado e aos amigos, Carlão, Caio, Pinguim, PhD, Fernando Contrera, Dante, Wagnão e a família Business (Mario, Renatinho e Karina) pela amizade, solidariedade e apoio em todos os momentos de convívio.

Aos grandes amigos do Inatel Luciano José, Henrique Catanha e Mauro Periquito pelo incentivo e amizade. A todos os amigos de Volta Redonda que estiveram comigo em grande parte da minha vida, em especial para Atair (Bill), Cyrola e Fred.

A toda a minha família, pelo amor incondicional durante esta fase da minha vida, para as vovós Lurdes e Carmem, para o meu avô Orides e Renato (em memória), aos meus tios Deca, Renê, João Bosco, Jorge (Professor), Zezinho, Carlão e Serginho, as minhas tias Silvana, Adriana, Sandra, Andréia, Regina, Carmem e Fátima.

Finalmente, agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro.

# Índice

<b>Capítulo 1 – Introdução</b> .....	<b>1</b>
<b>Capítulo 2 – Teoria do EDFA</b> .....	<b>13</b>
2.1 – Introdução .....	13
2.2 – Emissão espontânea .....	13
2.3 – Emissão estimulada .....	16
2.4 – Sistemas de níveis de energia do érbio .....	18
2.5 – Características do EDFA .....	20
2.5.1 – Ganho óptico .....	20
2.5.2 – Emissão espontânea .....	22
2.5.3 – Figura de ruído .....	23
2.5.4 – Regime de saturação .....	26
2.5.5 – Fibra dopada com érbio .....	27
2.5.6 – Comprimento ótimo para a fibra dopada com érbio .....	28
2.6 – Conclusão .....	29
<b>Capítulo 3 – Apresentação das Topologias</b> .....	<b>31</b>
3.1 – Introdução .....	31
3.2 – Configurações básicas de EDFA .....	32
3.3 – Configuração de EDFA com dispositivos reflexivos .....	35
3.3.1 – Amplificadores com reflexão de bombeio .....	36
3.3.2 – Amplificadores com reflexão de sinal .....	37
3.3.3 – Amplificadores com reflexão de sinal e bombeio .....	39
3.4 – Conclusão .....	40

<b>Capítulo 4 – Projeto Opto-eletrônico</b> .....	<b>41</b>
4.1 – Introdução .....	41
4.2 – Dispositivos utilizados .....	42
4.2.1 – Acoplador direcional WDM .....	42
4.2.2 – Isolador e circulador óptico .....	45
4.2.3 – Atenuador óptico variável .....	48
4.2.4 – Laser semiconductor .....	49
4.3 – Caracterização dos dispositivos .....	54
4.4 – Descrição dos equipamentos .....	56
4.5 – Descrição das topologias .....	59
4.6 – Conclusão .....	63
<b>Capítulo 5 – Análise dos Resultados</b> .....	<b>65</b>
5.1 – Introdução .....	65
5.2 – Topologia co-propagante .....	66
5.3 – Topologia contra-propagante .....	75
5.4 – Topologia com bombeio bi-direcional .....	83
5.5 – Topologia com reflexão de bombeio e sinal co-propagante .....	90
5.6 – Topologia com reflexão de bombeio e sinal contra-propagante .....	96
5.7 – Topologia com bombeio co-propagante e reflexão de sinal .....	102
5.8 – Topologia com bombeio contra-propagante e reflexão de sinal .....	108
5.9 – Topologia com bombeio bi-direcional e reflexão de sinal .....	113
5.10 – Topologia com reflexão de bombeio e sinal .....	118
5.11 – Conclusão .....	123
<b>Capítulo 6 – Conclusão</b> .....	<b>131</b>
<b>Referências Bibliográficas</b> .....	<b>139</b>

## Lista de Símbolos e Acrônimos

Parâmetro	Unidade	Descrição
$\lambda$	(nm)	Comprimento de onda
$\tau = \tau_2$	(ms)	Tempo de vida de fluorescência do estado metaestável
$\nu$	(Hz)	Frequência do sinal óptico
ASE	-	Emissão espontânea amplificada ( <i>amplified spontaneous emission</i> )
APC	-	Contato físico angulado ( <i>angled physical contact</i> )
$B_0$	(Hz)	Largura de banda do sinal
$c$	(m/s)	Velocidade da luz no vácuo
$E$	(J)	Energia do fóton
$Er^{3+}$	-	Íon de érbio
$Nd^{3+}$	-	Íon de neodímio
ESA	-	Absorção de estado excitado ( <i>excited state absorption</i> )
FAR	-	Rotator de Faraday ( <i>Faraday rotator</i> )
FP	-	Fabry Perot
FC	-	Conector da fibra ( <i>fiber connector</i> )
NF	-	Figura de ruído
$G$	-	Ganho ao longo da fibra
$h$	(J.s)	Constante de Planck
$L_{ótimo}$	(m)	Comprimento ótimo da fibra dopada
MCVD	-	Deposição modificada de vapor químico ( <i>modified chemical vapor deposition</i> )
$N_1$	(m <sup>-3</sup> )	Densidade de portadores dos íons dopantes no nível fundamental
$N_2$	(m <sup>-3</sup> )	Densidade de portadores dos íons dopantes no nível metaestável
$N_3$	(m <sup>-3</sup> )	Densidade de portadores dos íons dopantes no nível de bombeio
$P_{ASE}$	(W)	Potência do ruído ASE
OSA	-	Analisador de espectro óptico ( <i>optical spectrum analyzer</i> )
SNR	-	Relação sinal-ruído ( <i>signal to noise ratio</i> )
SWP	-	Polarizador de desvio espacial ( <i>spacial walk-off polarizer</i> )
VAD	-	Deposição axial de vapor ( <i>vapor axial deposition</i> ),
WDM	-	Multiplexação/multiplexador por divisão em comprimento de onda ( <i>wavelength division multiplexing/multiplexer</i> )

## Lista de Figuras

- 1.1 *Diagrama esquemático simplificado de um amplificador a fibra dopada da primeira geração.*
- 1.2 *Diagrama esquemático simplificado de um amplificador a fibra dopada da segunda geração.*
- 1.3 *Diagrama esquemático simplificado de um amplificador a fibra dopada de terceira geração.*
- 2.1 *Mecanismos de amplificação do EDFA para sistemas de 3 níveis. (a) Absorção; (b) Emissão estimulada; (c) Emissão espontânea.*
- 2.2 *Diagrama simplificado de níveis de energia do  $Er^{3+}$  com os respectivos comprimentos de onda de absorção e emissão.*
- 2.3 *Representação do sinal óptico: (a) na entrada do EDFA e (b) após ser amplificado.*
- 2.4 *Método de Interpolação espectral para obtenção da potência de ASE.*
- 3.1 *Configuração de um EDFA com sinal e bombeio no sentido co-propagante.*
- 3.2 *Configuração de um EDFA com sinal e bombeio no sentido contra-propagante.*
- 3.3 *Configuração de um EDFA com sinal e bombeio bi-direcional.*
- 3.4 *Configuração de um EDFA com sinal co-propagante e reflexão de bombeio.*
- 3.5 *Configuração de um EDFA com reflexão de sinal.*
- 3.6 *Configuração de um EDFA com reflexão de sinal e bombeio.*
- 4.1 *Diagrama esquemático para um acoplador 3 dB com destaque para o acoplamento da luz entre os dois guias de onda.*
- 4.2 *Princípio de funcionamento de um isolador óptico independente do estado de polarização: (a) o sinal se propaga no sentido da esquerda para a direita; (b) o sinal se propaga no sentido da direita pra esquerda.*
- 4.3 *Estrutura básica de um laser semiconductor construído com uma homojunção p-n.*
- 4.4 *Diagrama em blocos de um laser sintonizável à cavidade externa e a representação do espectro de emissão do laser.*
- 4.5 *Curva da potência de saída do laser em função da corrente de alimentação.*
- 4.6 *Montagem experimental para as configurações básicas e para as que possuem reflexão de bombeio.*

- 4.9 *Montagem experimental para as configurações que possuem reflexão do sinal.*
- 5.1 *Ganho óptico do EDFA co-propagante em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 3,6 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.*
- 5.2 *Ganho óptico do EDFA co-propagante em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 6 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm*
- 5.3 *Ganho óptico do EDFA co-propagante em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 8,2 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.*
- 5.4 *Ganho óptico do EDFA co-propagante em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 10,15 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.*
- 5.5 *Ganho óptico do EDFA co-propagante em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 14,2 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.*
- 5.6 *Ganho óptico do EDFA co-propagante em função da potência de entrada de sinal, tendo o comprimento da EDF como parâmetro: bombeio em 10 mW e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.*
- 5.7 *Ganho óptico do EDFA co-propagante em função da potência de entrada de sinal, tendo o comprimento da EDF como parâmetro: bombeio em 20 mW e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.*
- 5.8 *Espectro da ASE<sup>+</sup> para o EDFA co-propagante, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostras de EDF (a) 3,6 m, (b) 6 m, (c) 8,2 m, (d) 10,15 m, (e) 14,2 m.*
- 5.9 *Espectro da ASE<sup>+</sup> para o EDFA co-propagante, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 10,15 m, potência de entrada do sinal de -32 dBm e comprimento de onda (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.*
- 5.10 *Espectro da ASE<sup>+</sup> para o EDFA co-propagante, tendo a potência de entrada do sinal como parâmetro: amostra de EDF de 10,15 m, potência de bombeio de 20 mW e comprimento de onda (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.*
- 5.11 *Ganho óptico do EDFA contra-propagante em função da potência de entrada do*

- sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 3,6 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.*
- 5.12 *Ganho óptico do EDFA contra-propagante em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 6 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm*
- 5.13 *Ganho óptico do EDFA contra-propagante em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 8,2 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.*
- 5.14 *Ganho óptico do EDFA contra-propagante em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 10,15 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.*
- 5.15 *Ganho óptico do EDFA contra-propagante em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 14,4 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.*
- 5.16 *Ganho óptico do EDFA contra-propagante em função da potência de entrada de sinal, tendo o comprimento da EDF como parâmetro: bombeio em 10 mW e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.*
- 5.17 *Ganho óptico do EDFA contra-propagante em função da potência de entrada de sinal, tendo o comprimento da EDF como parâmetro: bombeio em 20 mW e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.*
- 5.18 *Espectro da ASE<sup>+</sup> para o EDFA contra-propagante, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostras de EDF de (a) 3,6 m, (b) 6 m, (c) 8,2 m, (d) 10,15 m e (e) 14,2 m.*
- 5.19 *Espectro da ASE<sup>+</sup> para o EDFA contra-propagante, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 10,15 m, potência de entrada do sinal de -32 dBm e comprimento de onda (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.*
- 5.20 *Espectro da ASE<sup>+</sup> para o EDFA contra-propagante, tendo a potência de entrada do sinal como parâmetro: amostra de EDF de 10,15 m, potência de bombeio de 20 mW e comprimento de onda (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.*
- 5.21 *Ganho óptico do EDFA bi-direcional em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 3,6 m e*

- comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.*
- 5.22 *Ganho óptico do EDFA bi-direcional em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 6 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.*
- 5.23 *Ganho óptico do EDFA bi-direcional em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 8,2 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.*
- 5.24 *Ganho óptico do EDFA bi-direcional em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 10,15 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.*
- 5.25 *Ganho óptico do EDFA bi-direcional em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 14,2 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.*
- 5.26 *Ganho óptico do EDFA bi-direcional em função da potência de entrada de sinal, tendo o comprimento da EDF como parâmetro: bombeio em 10 mW e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.*
- 5.27 *Ganho óptico do EDFA bi-direcional em função da potência de entrada de sinal, tendo o comprimento da EDF como parâmetro: bombeio em 20 mW e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.*
- 5.28 *Espectro da ASE<sup>+</sup> para o EDFA bi-direcional, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 14,2 m, potência de entrada do sinal de -32 dBm e comprimento de onda (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm*
- 5.29 *Espectro da ASE<sup>+</sup> para o EDFA bi-direcional, tendo a potência de entrada do sinal como parâmetro: amostra de EDF de 14,2 m, potência de bombeio de 20 mW e comprimento de onda (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.*
- 5.30 *Ganho óptico do EDFA com reflexão do bombeio co-propagante em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 3,6 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.*
- 5.31 *Ganho óptico do EDFA com reflexão do bombeio co-propagante em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 6 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.*

- 5.32 *Ganho óptico do EDFA com reflexão do bombeio co-propagante em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 8,2 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.*
- 5.33 *Ganho óptico do EDFA com reflexão do bombeio co-propagante em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 10,15 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.*
- 5.34 *Ganho óptico do EDFA com reflexão do bombeio co-propagante em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 14,2 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.*
- 5.35 *Ganho óptico do EDFA com reflexão do bombeio co-propagante em função da potência de entrada de sinal, tendo o comprimento da EDF como parâmetro: bombeio em 10 mW e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.*
- 5.36 *Ganho óptico do EDFA com reflexão do bombeio co-propagante em função da potência de entrada de sinal, tendo o comprimento da EDF como parâmetro: bombeio em 20 mW e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.*
- 5.37 *Ganho óptico do EDFA com reflexão do bombeio contra-propagante em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 3,6 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.*
- 5.38 *Ganho óptico do EDFA com reflexão do bombeio contra-propagante em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 6 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.*
- 5.39 *Ganho óptico do EDFA com reflexão do bombeio contra-propagante em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 8,2 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.*
- 5.40 *Ganho óptico do EDFA com reflexão do bombeio contra-propagante em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 10,15 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.*
- 5.41 *Ganho óptico do EDFA com reflexão do bombeio contra-propagante em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 14,2 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.*
- 5.42 *Ganho óptico do EDFA com reflexão do bombeio contra-propagante em função da*

- potência de entrada de sinal, tendo o comprimento da EDF como parâmetro: bombeio em 10 mW e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.*
- 5.43 *Ganho óptico do EDFA com reflexão do bombeio contra-propagante em função da potência de entrada de sinal, tendo o comprimento da EDF como parâmetro: bombeio em 20 mW e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.*
- 5.44 *Ganho óptico do EDFA com reflexão de sinal e bombeio co-propagante em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: EDF de 3,6 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.*
- 5.45 *Ganho óptico do EDFA com reflexão de sinal e bombeio co-propagante em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: EDF de 6 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.*
- 5.46 *Ganho óptico do EDFA com reflexão de sinal e bombeio co-propagante em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: EDF de 8,2 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.*
- 5.47 *Ganho óptico do EDFA com reflexão de sinal e bombeio co-propagante em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: EDF de 10,15 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.*
- 5.48 *Ganho óptico do EDFA com reflexão de sinal e bombeio co-propagante em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: EDF de 14,2 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.*
- 5.49 *Ganho óptico do EDFA com reflexão de sinal e bombeio co-propagante em função da potência de entrada do sinal, tendo o comprimento da EDF como parâmetro: bombeio em 10 mW e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.*
- 5.50 *Ganho óptico do EDFA com reflexão de sinal e bombeio co-propagante em função da potência de entrada do sinal, tendo o comprimento da EDF como parâmetro: bombeio em 20 mW e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.*
- 5.51 *Ganho óptico do EDFA com reflexão de sinal e bombeio contra-propagante em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 3,6 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.*
- 5.52 *Ganho óptico do EDFA com reflexão de sinal e bombeio contra-propagante em*

- função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 6 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.*
- 5.53 *Ganho óptico do EDFA com reflexão de sinal e bombeio contra-propagante em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 8,2 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.*
- 5.54 *Ganho óptico do EDFA com reflexão de sinal e bombeio contra-propagante em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 10,15 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.*
- 5.55 *Ganho óptico do EDFA com reflexão de sinal e bombeio contra-propagante em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 14,2 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.*
- 5.56 *Ganho óptico do EDFA com reflexão de sinal e bombeio contra-propagante em função da potência de entrada do sinal, tendo o comprimento da EDF como parâmetro: bombeio em 10 mW e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.*
- 5.57 *Ganho óptico do EDFA com reflexão de sinal e bombeio contra-propagante em função da potência de entrada do sinal, tendo o comprimento da EDF como parâmetro: bombeio em 20 mW e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.*
- 5.58 *Ganho óptico do EDFA com reflexão de sinal e bombeio bi-direcional em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 3,6 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.*
- 5.59 *Ganho óptico do EDFA com reflexão de sinal e bombeio bi-direcional em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 6 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.*
- 5.60 *Ganho óptico do EDFA com reflexão de sinal e bombeio bi-direcional em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra*

- de EDF de 8,2 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.*
- 5.61 *Ganho óptico do EDFA com reflexão de sinal e bombeio bi-direcional em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 10,15 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.*
- 5.62 *Ganho óptico do EDFA com reflexão de sinal e bombeio bi-direcional em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 14,2 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.*
- 5.63 *Ganho óptico do EDFA com reflexão de sinal e bombeio bi-direcional em função da potência de entrada do sinal, tendo o comprimento da EDF como parâmetro: bombeio em 10 mW e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.*
- 5.64 *Ganho óptico do EDFA com reflexão de sinal e bombeio bi-direcional em função da potência de entrada do sinal, tendo o comprimento da EDF como parâmetro: bombeio em 20 mW e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.*
- 5.65 *Ganho óptico do EDFA com reflexão de sinal e bombeio em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 3,6 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.*
- 5.66 *Ganho óptico do EDFA com reflexão de sinal e bombeio em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 6 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.*
- 5.67 *Ganho óptico do EDFA com reflexão de sinal e bombeio em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 8,2 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.*
- 5.68 *Ganho óptico do EDFA com reflexão de sinal e bombeio em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 10,15 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.*
- 5.69 *Ganho óptico do EDFA com reflexão de sinal e bombeio em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 14,2 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.*
- 5.70 *– Ganho óptico do EDFA com reflexão de sinal e bombeio em função da potência de entrada do sinal, tendo o comprimento da EDF como parâmetro: bombeio em 10 mW e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.*

- 5.71 *Ganho óptico do EDFA com reflexão de sinal e bombeio em função da potência de entrada do sinal, tendo o comprimento da EDF como parâmetro: bombeio em 20 mW e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.*
- 5.72 *Evolução da NF em função do comprimento da fibra dopada.*

## **Lista de Tabelas**

- 5.1 *Potência de bombeio residual obtido na saída do segundo acoplador WDM.*
- 5.2 *Potência de bombeio residual obtido na saída do primeiro acoplador WDM*
- 5.3 *Potência de bombeio residual obtido na saída do segundo acoplador WDM.*
- 5.4 *Referência para as topologias analisadas.*
- 5.5 *Comprimento de EDF quando foi obtido os maiores ganhos ópticos.*
- 5.6 *Ganho óptico das topologias básicas com sinal de entrada em 1537 nm e potência de -32 dBm.*
- 5.7 *Ganho óptico das topologias dos casos 1 e 4, com sinal de entrada em 1537 nm e potência de -32 dBm.*
- 5.8 *Ganho óptico das topologias dos casos 2 e 5, com sinal de entrada em 1537 nm e potência de -32 dBm.*
- 5.9 *Ganho óptico das topologias dos casos 6, 7, 8 e 9, com sinal de entrada em 1537 nm e potência de -32 dBm.*
- 5.10 *Figura de ruído para a fibra de 8,2 m.*



# Capítulo 1

## Introdução

O crescente número de serviços de telecomunicações disponíveis e sua demanda por largura de banda têm exercido, nas últimas décadas, uma enorme pressão para aumentar a capacidade dos sistemas de telecomunicações. Neste contexto, as comunicações ópticas levam uma vantagem em relação aos sistemas de comunicação convencionais, pois, a largura de banda utilizável é consideravelmente maior que a dos outros sistemas de telecomunicações [1].

Atualmente, tornou-se comum o uso de fibras ópticas em sistemas de comunicação. A razão para isto se encontra nas vantagens que as fibras podem trazer ao sistema, como ampla largura de banda de transmissão, baixas perdas e imunidade a interferências eletromagnéticas, entre outras. Entretanto, apenas após o advento dos amplificadores ópticos empregando fibras dopadas com elementos das terras-raras é que sistemas de alta capacidade puderam se tornar realidades comerciais. O aperfeiçoamento dos processos de fabricação das fibras e, principalmente, o aparecimento dos amplificadores a fibra dopada com érbio (EDFA – *erbium doped fiber amplifier*) tornaram a transmissão multicanal em uma única fibra óptica técnica e economicamente viável. Atualmente, com o gerenciamento de dispersão, o processamento do sinal resume-se à sua amplificação, que pode ser, agora, realizada totalmente no domínio óptico, onde cada canal transmitido por meio da técnica de multiplexação por divisão em comprimento de onda (WDM – *wavelength division multiplexing*) é amplificado com um mínimo de intermodulação e com o potencial de utilizar a ampla banda de transmissão da fibra. Como consequência, tem-se o aumento da

capacidade agregada de transmissão e a diminuição do custo por canal em relação a sistemas com repetidores.

Por volta de 1987, um grupo de pesquisadores da Universidade de Southampton, na Inglaterra, demonstrou um amplificador a fibra dopada com érbio de alto ganho e, desde então, os sistemas de comunicação óptica não são mais os mesmos [2]. Antes do advento dos amplificadores ópticos, os sistemas de transmissão óptica eram geralmente constituídos por transmissores e receptores separados por trechos de fibra óptica intercalados por regeneradores opto-eletrônicos, que tinham a função de corrigir a atenuação, dispersão e outras degradações do sinal óptico. O princípio de funcionamento do regenerador opto-eletrônico ou repetidor eletrônico é bem simples. Primeiramente, o dispositivo detecta os pulsos ópticos que chegam até ele atenuados e distorcidos, reconstituem eletronicamente e então transmitem opticamente os dados regenerados para o próximo trecho de fibra óptica. A utilização do repetidor em um sistema de comunicação óptica é bem eficiente, pois consegue recuperar o sinal transmitido em um trecho considerado longo de fibra óptica (cerca de 100 km) e, com isso, aumentar a distância entre o transmissor e o receptor [3]-[4]. Porém, o inconveniente é que se o sistema opera com taxas de transmissão elevadas, a eletrônica utilizada no repetidor começa a ficar muito complexa e isso tende a elevar o custo do equipamento, podendo torná-lo economicamente inviável. Assim, embora os sistemas que utilizam fibras ópticas possuam uma capacidade de transmissão e uma largura de banda elevada, devido à sua natureza óptica, eles eram limitados pelos regeneradores eletrônicos.

Com a implementação do EDFA no lugar do repetidor, este problema e outros foram minimizados, pois o EDFA realiza todo o processo de amplificação no domínio

óptico. Dessa forma, um enlace que possuía vários repetidores para recuperar o sinal óptico passou a ter um pequeno número de EDFAs em seu enlace. Além disso, o EDFA também leva vantagem em relação aos repetidores, quando o mesmo é utilizado em sistemas de transmissão com diversos comprimentos de onda (WDM). Neste caso, o EDFA consegue amplificar, simultaneamente, vários sinais com comprimentos de onda distintos. Por outro lado, o repetidor é capaz de realizar amplificação para o sinal em apenas um comprimento de onda. Com isso, é necessário implementar diversos repetidores para que se possa amplificar a mesma quantidade de sinais. A mudança de regeneradores para amplificadores permitiu um aumento considerável na capacidade de transmissão do sistema.

Essencialmente, o amplificador óptico a fibra dopada, que é objeto de análise neste trabalho, utiliza como dopante um elemento químico do grupo chamado de terras raras, que se localiza na série dos Lantanídeos da tabela periódica, o érbio. O meio ativo do EDFA, ou seja, onde se obtém o ganho óptico, é uma fibra óptica do tipo monomodo cujo núcleo é dopado com íons de érbio ( $Er^{3+}$ ) [5]. A utilização do érbio como dopante é, de fato, importante para os sistemas de comunicação óptica, pois, com esse elemento químico é possível amplificar luz na região de comprimento de onda de 1550 nm. Esta região é extremamente importante para os sistemas de comunicações ópticas, pois coincide com a terceira janela de comunicação da fibra óptica, onde as perdas, geralmente, são mais baixas, aproximadamente 0,2 dB/km [6]. Com isso, o EDFA se mostra uma solução eficiente para ser utilizado em sistemas de comunicação óptica, pois tem a vantagem de amplificar o sinal óptico que possui comprimento de onda na mesma região de baixa atenuação da fibra. Esta foi uma das principais características que fizeram com que o EDFA revolucionasse as comunicações ópticas.

Em linhas gerais, a amplificação do sinal ocorre, porque a energia carregada por um feixe de luz em determinado comprimento de onda e gerado por um laser chamado de laser de bombeio é absorvida e é suficiente para excitar os  $Er^{3+}$ , provocando a transição dos átomos do nível fundamental para um nível excitado. Esses átomos permanecem excitados por um determinado tempo e depois retornam para o nível fundamental. Este retorno pode ser realizado por meio de emissões radiativas espontâneas ou estimuladas [7]. As emissões espontâneas de fótons podem ser consideradas como um ruído aleatório gerado pelo amplificador e, conseqüentemente, pode degradar o ganho óptico final do amplificador. O outro tipo de transição, a emissão estimulada, ocorre devido à presença de um fóton que estimula um  $Er^{3+}$  excitado a decair para o nível fundamental. Este decaimento libera um outro fóton com as mesmas características do fóton incidente. Com esse processo ocorrendo seguidas vezes dentro da fibra dopada com érbio (EDF – *Erbium doped fiber*), um sinal que no início da EDF apresentava uma potência óptica relativamente baixa, ao passar através da fibra dopada, sai amplificado devido às sucessivas emissões estimuladas e, conseqüentemente, está pronto para percorrer outro segmento de fibra óptica. Contudo, as emissões espontâneas também podem ser amplificadas, pois, os fótons gerados aleatoriamente são capazes de estimular a emissão de outros fótons. Com isso, o sinal de entrada passa a ter que competir com estes fótons para alcançar os maiores ganhos.

É seguro dizer que, após 1989, quando surgiu o EDFA, iniciou-se uma nova geração de redes e enlaces de fibra óptica, tanto terrestres quanto submarinos, utilizando altas taxas de transmissão. Alguns anos depois, os amplificadores ópticos já estavam disponíveis comercialmente e começaram a ser vendidos e instalados pelas maiores empresas de telecomunicações. Em 1996, o EDFA estava em uso comercial e era utilizado em diversos

enlaces submarinos, aumentando de forma significativa a capacidade de transmissão se comparada com as gerações ópticas anteriores. Contudo, a história dos amplificadores ópticos a fibra não é tão recente como a do EDFA. Ela começa na década de 60, com as primeiras montagens de amplificadores ópticos, e se estende até os dias de hoje.

Na história dos amplificadores operando nas frequências ópticas, pode-se encontrar as primeiras idéias que levaram à montagem de um amplificador óptico com o sinal de entrada atravessando toda a extensão da fibra. Esse experimento foi apresentado em 1962 por J. E. Geusic e H. E. D. Scovil [8], alguns anos após a invenção do laser, que se deu em 1960. As idéias e o experimento apresentado por Geusic e Scovil marcaram a primeira construção de um amplificador nas frequências ópticas que possuía um ganho ligeiramente alto e de certa forma estável. Esse tipo de amplificador óptico consistia de uma pequena barra de rubi que servia de meio ativo. O sinal passava através da barra e era amplificado através da emissão estimulada dos íons do cristal de rubi, que, por sua vez, haviam sido excitados por uma lâmpada de xenônio que funcionava como a fonte de bombeio. A mesma possuía a forma cilíndrica e era colocada paralelamente à barra de rubi. Um isolador óptico também foi utilizado para isolar um estágio do outro, visto que os primeiros amplificadores possuíam dois estágios. Assim, este tipo de amplificador conseguia um ganho óptico de aproximadamente 12 dB.

O desenvolvimento dos amplificadores ópticos a fibra deu início por volta dos anos de 1963 e 1964, com um experimento realizado por C. J. Koester e E. Snitzer [9]. Esse amplificador óptico foi o primeiro a utilizar uma fibra dopada produzida com uma estrutura de núcleo e casca capaz de confinar a luz propagante dentro do seu núcleo. Essa primeira geração de amplificadores a fibra utilizava um laser semiconductor com comprimento de

onda de  $1,06 \mu\text{m}$  para fornecer o sinal a ser amplificado. O meio ativo, nesse caso, era uma fibra dopada com neodímio e, para o bombeio, foi utilizado uma lâmpada de xenônio. A fibra dopada utilizada nesse experimento possuía um núcleo com diâmetro de  $15 \mu\text{m}$  e uma casca com diâmetro de  $45 \mu\text{m}$ . O comprimento da mesma era de  $45 \text{cm}$  e a sua extremidade possuía um corte com inclinação de, aproximadamente,  $20$  graus para suprimir a realimentação do sinal óptico. Nas primeiras montagens, a fibra era enrolada em uma lâmpada de xenônio para melhorar a eficiência de bombeio. A Fig. 1.1 apresenta um diagrama esquemático simplificado de um amplificador óptico a fibra, considerado de primeira geração.

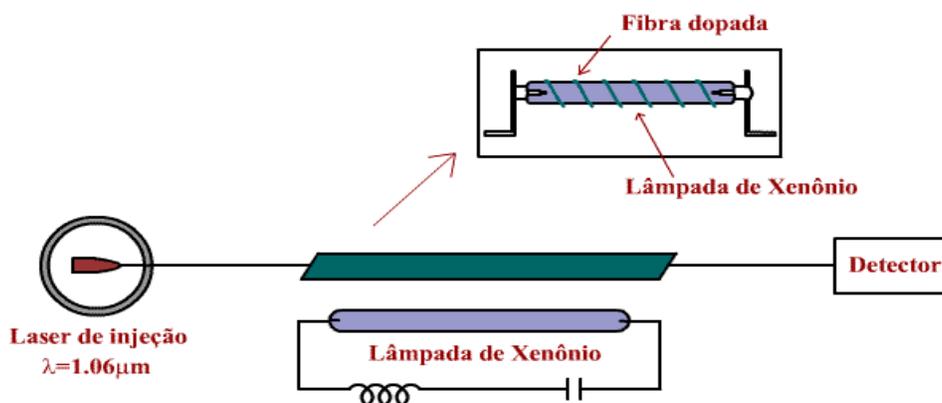


Fig. 1.1 – Diagrama esquemático simplificado de um amplificador a fibra dopada da primeira geração [12].

Apesar dos  $\text{Nd}^{3+}$  fornecerem ganho óptico, a forma como era feito o bombeio (através de uma lâmpada de xenônio) não era tão eficiente, uma vez que o espectro de fluorescência da lâmpada era bem maior que o espectro de absorção dos íons de neodímio. Além disso, a fibra utilizada nesse experimento também não era um meio de baixas perdas e, conseqüentemente, uma amplificação eficiente não era possível de ser obtida.

Em meados da década de 70, os pesquisadores C. J. Stone e A. Burrus desenvolveram um experimento onde, pela primeira vez, utilizava-se um laser diodo para

bombear uma fibra óptica de sílica dopada com neodímio [10]. Porém, essa pesquisa pioneira não recebeu muita atenção naquela ocasião. O avanço mais importante na tecnologia de amplificadores a fibra veio em 1987, quando um grupo de pesquisadores da Universidade de Southampton, na Inglaterra, apresentaram um amplificador a fibra dopada com érbio de alto ganho operando na região de comprimento de onda de 1,5  $\mu\text{m}$ . Estes amplificadores ópticos podem ser denominados amplificadores a fibra de 2ª geração. Em relação aos amplificadores da 1ª geração, esses apresentam uma melhora significativa, principalmente, em relação à forma de bombeamento e à preparação da fibra dopada. Com isso, o ganho óptico obtido foi superior a 20 dB na região de 1,5  $\mu\text{m}$ . A configuração experimental desse amplificador óptico a fibra, possui uma EDF de 3 m de comprimento, bombeada reversamente por um laser de argônio, sendo que, o sinal amplificado era transmitido por um laser diodo no comprimento de onda de 1,54  $\mu\text{m}$ . Com isso, os  $\text{Er}^{3+}$  forneceram uma amplificação eficiente no comprimento de onda de 1,5  $\mu\text{m}$ , uma vez que o bombeio exercido pelo laser de argônio operando em 0,65  $\mu\text{m}$  e que substituiu a lâmpada de xenônio, apresenta uma estreita banda comparada à faixa de absorção dos íons de érbio [2]. Esta amplificação eficiente é devido a outras importantes características, como as baixas perdas obtidas do dispositivo, uma maior abertura numérica da fibra dopada e a melhoria da técnica de fabricação de fibra dopada com terras raras (que era uma adaptação da técnica já bem estabilizada de deposição por vapor químico, (MCVD - *modified chemical vapor deposition*) [11]. A Fig. 1.2 apresenta um diagrama esquemático do amplificador a fibra dopada da segunda geração.

Outro importante desenvolvimento tecnológico do amplificador a fibra foi a substituição das fontes de bombeio por lasers diodo nos comprimentos de onda de 1,48  $\mu\text{m}$

e  $0,98 \mu\text{m}$ . Assim, pôde-se conceber um amplificador a fibra compacto e com alto ganho, o que caracteriza a 3ª geração de amplificadores a fibra dopada [13]. Esse tipo de amplificador possui um laser diodo de bombeio cujo feixe é acoplado à fibra dopada com érbio através de um acoplador direcional WDM, que permite também o acoplamento a esta mesma fibra do sinal óptico a ser amplificado. Essa montagem promoveu um importante avanço no desenvolvimento dos amplificadores a fibra e nos sistemas de comunicação óptica por sua praticidade e pelos resultados obtidos. Algumas modificações podem ser feitas no circuito óptico com o intuito de obter, por exemplo, um ganho mais elevado ou uma figura de ruído menor na saída do amplificador. O diagrama esquemático de um amplificador a fibra terceira geração convencional é apresentado na Fig. 1.3.

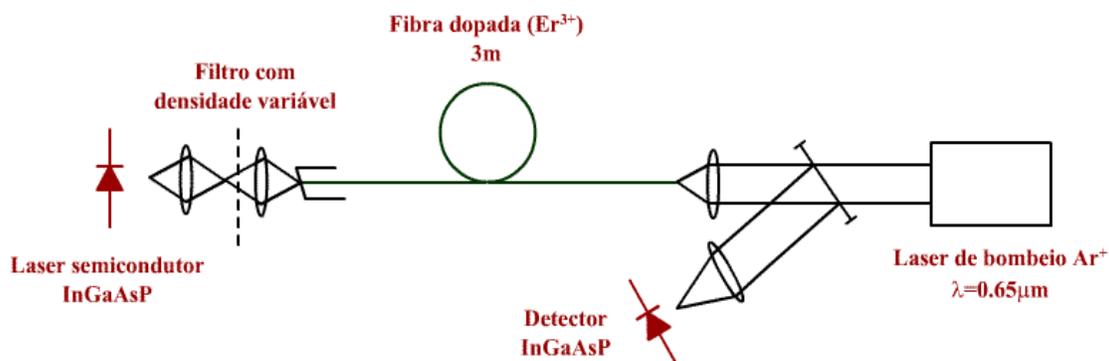


Fig. 1.2 – Diagrama esquemático simplificado de um amplificador a fibra dopada da segunda geração [12].

A função de um EDFA pode ser classificada de acordo com a sua localização física no enlace óptico: amplificador de potência, amplificador de linha ou pré-amplificador [14]. Para cada uma delas, o amplificador deve apresentar valores apropriados de ganho e figura de ruído, sugerindo que diferentes topologias de EDFA possam atender às especificações com variados graus de sofisticação e complexidade. Apesar do EDFA possuir várias aplicações, o seu maior impacto foi no uso como amplificadores de linha (substituindo os repetidores regenerativos) com o objetivo de compensar as perdas do canal óptico e com

isso aumentar a distância entre transmissor e receptor. Usado como amplificador de linha o EDFA oferece a possibilidade de transformar o enlace em um meio de transmissão transparente, suportando sinais independentes do formato de modulação e da taxa de bits do canal.

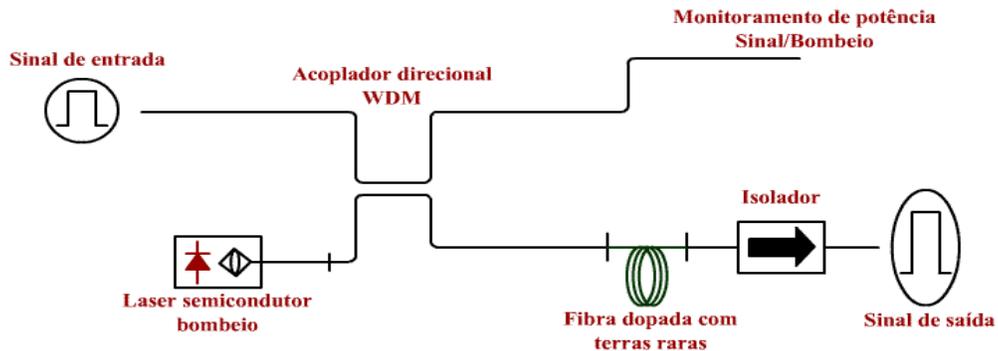


Fig. 1.3 – Diagrama esquemático simplificado de um amplificador a fibra dopada de terceira geração [12].

De fato, várias referências [15]-[18] mostram a possibilidade de uma ou outra topologia ser a mais adequada para uma determinada função de amplificação, assim, com este trabalho, é possível realizar análises comparativas entre diferentes topologias sob condições similares de operação e para um mesmo tipo de fibra dopada. Assim sendo e dada a importância do EDFA no contexto atual das comunicações ópticas, as características de operação de diferentes topologias de EDFAs são experimentalmente analisadas neste trabalho. Para tanto, foram propostas, a partir do modelo clássico de um circuito óptico de EDFA, outras 8 topologias distintas. Basicamente, estas alterações e adaptações do circuito óptico vão desde a maneira como o bombeio é acoplado ao amplificador até o número de vezes em que há passagem do sinal e/ou bombeio pela fibra dopada. Assim sendo, pôde-se fazer um estudo comparativo entre as mesmas, afim de se obter uma configuração que possa atender os requisitos básicos para uma determinada função em um sistema óptico. Além do ganho óptico, serão analisados o espectro de emissão espontânea amplificada e a

figura de ruído, entre outros. Para isso, foram utilizados dois comprimentos de onda distintos, diversos comprimentos de EDF e várias potências de bombeio.

O Capítulo 2 descreve os conceitos básicos de operação de um EDFA. Primeiramente, serão apresentados e discutidos os mecanismos envolvidos na amplificação fornecida pelo EDFA. Na seqüência, será feita uma análise do processo de amplificação por meio dos níveis de energia do érbio. Com isso, pode-se compreender as propriedades espectrais desse elemento. Em seguida, são analisadas as características de um EDFA, considerando que o sistema possui apenas três níveis atômicos. Finalmente, serão apresentadas informações que servirão de base para a caracterização do EDFA. Dentre as principais características destacam-se o ganho óptico, a emissão espontânea amplificada, a figura de ruído e a dopagem da fibra dopada com érbio, entre outras.

No Capítulo 3, faz-se uma análise qualitativa de diferentes topologias de amplificadores a fibra dopada com érbio. Partindo-se de uma configuração considerada como básica, apresentam-se as modificações que levam a novas configurações. A configuração básica, como no caso da 3<sup>a</sup> geração, é composta por uma fibra monomodo dopada com érbio, dois acopladores WDM e um isolador óptico. Modificações na maneira como o bombeio é acoplado ao circuito óptico e/ou se há passagem do sinal e/ou bombeio mais de uma vez na fibra dopada formam as diferentes topologias. Tendo-se isto em mente, foi possível analisar experimentalmente, mais tarde, um total de nove topologias distintas de EDFA.

O Capítulo 4 descreve detalhadamente, cada um dos dispositivos utilizados no circuito óptico do EDFA. Para tanto, serão apresentados dispositivos passivos, como acopladores WDM, isoladores e circuladores ópticos, e, também, um dispositivo ativo, o

laser semiconductor. A intenção é mostrar as características mais importantes de cada um deles, para que seja possível identificar as fontes de atenuação do sinal e/ou do bombeio. Após isto, descrevem-se as características de funcionamento dos equipamentos de medida utilizados e os métodos de calibração de cada um deles. Finalmente, apresentam-se os diagramas esquemáticos do circuito óptico, com as adaptações necessárias para a montagem das topologias.

No Capítulo 5 apresentam-se e analisam-se os resultados experimentais obtidos para as 9 topologias propostas, submetidas a diferentes condições de operação. Primeiro, serão apresentados os dados referentes às topologias básicas, que são aquelas que utilizam um número mínimo de dispositivos em seu circuito óptico. Em seguida, os resultados obtidos para as topologias que possuem reflexão de bombeio e/ou sinal (dupla passagem) serão avaliadas. Para todos os casos, as medidas serão mostradas na forma de curvas de ganho óptico e de espectro da emissão espontânea amplificada, considerando diferentes comprimentos de fibra dopada com érbio, diferentes valores de potência do sinal de entrada e bombeio, além de comprimentos de onda distintos do sinal a ser amplificado. Através de uma análise comparativa entre as curvas de ganho óptico é possível, por exemplo, verificar qual tipo de topologia é mais indicada para uma determinada aplicação (potência, linha ou pré-amplificação). Na sequência são apresentados os valores de figura de ruído encontrados para todas as topologias. Finalmente, o Capítulo 6 resume o conteúdo deste trabalho, avaliando-se os resultados obtidos e apresentando as conclusões obtidas. A partir destes, traçam-se as perspectivas quanto às contribuições geradas por este trabalho e propõem-se sugestões para futuras pesquisas.



## **Capítulo 2**

### **Teoria do EDFA**

#### **2.1 Introdução**

Neste capítulo serão discutidos conceitos fundamentais do processo de amplificação óptica, abordando desde os mecanismos utilizados na amplificação, como também, informações pertinentes à caracterização do dispositivo. Sendo assim, primeiramente serão apresentados como os processos de emissão estimulada e emissão espontânea podem ocorrer em um sistema óptico. Em seguida, existe uma descrição de como pode ser tratado teoricamente um sistema de níveis de energia; neste caso, o sistema utilizado é o do érbio. Outro assunto a ser abordado, se refere às características do EDFA que são de considerável importância para compreender o comportamento do amplificador. Além disso, estas informações serão utilizadas para caracterizar o EDFA. As principais características são o ganho óptico, o tipo de fibra dopada com érbio, a figura de ruído, a operação do amplificador sob regime de saturação e a emissão espontânea amplificada, entre outras.

#### **2.2 Emissão Espontânea**

No processo de amplificação do EDFA, tem-se a necessidade de empregar uma fibra especial com núcleo modificado pela inclusão de um elemento do grupo das terras raras, com o intuito de torná-la um meio opticamente ativo. A fibra assim modificada é conhecida como hospedeira do material usado na alteração do núcleo como dopante, que no caso particular deste trabalho, o dopante utilizado foi o érbio. Quando os elétrons dos átomos de érbio adquirem energia, estes saltam para um estado quântico mais alto e,

posteriormente retornam ao estado inicial, perdendo idealmente a mesma energia que haviam ganhado. O decaimento pode ocorrer de duas formas, espontânea ou estimuladamente. Parte da energia liberada no decaimento é na forma de fótons, cujo comprimento de onda depende da diferença de energia entre o nível excitado e o nível fundamental. Segundo a lei de Plank [19] é possível obter uma relação entre a diferença de energia e a frequência dos fótons emitidos, na forma.

$$E = h\nu \quad (2.1)$$

onde  $h$  é uma constante universal conhecida como constante de Plank, podendo ser expressa por  $h = 6,625.10^{-34}(J.s)$ , a frequência do sinal óptico é expressa por  $\nu$  e a energia do fóton por  $E$ . Porém, como os sinais ópticos são geralmente designados por seus comprimentos de onda e menos por suas frequências, pode-se utilizar a Eq. (2.2) para se obter a frequência do sinal óptico a partir do comprimento de onda. Sendo assim, têm-se:

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (2.2)$$

sendo que  $c$  é a velocidade da luz no vácuo e  $\lambda$  o comprimento de onda do sinal óptico. Por essas duas expressões, demonstrou-se que a energia de uma radiação eletromagnética qualquer está associada ao seu comprimento de onda.

Existem três mecanismos que podem descrever a interação dos elétrons com os fótons [7]. Essa interação pode ocorrer em um ambiente cujo meio ativo é, por exemplo, um gás como também em dispositivos semicondutores e materiais do grupo das terras raras, como no caso deste trabalho o érbio. O primeiro mecanismo a ser abordado é a absorção, que no caso de semicondutores, pode ocorrer através de uma onda eletromagnética que se propaga por dentro do cristal e sua energia é suficiente para transferir elétrons da banda de

valência para a banda de condução. Com isso, criam-se elétrons livres e lacunas a partir de seus estados de energia anteriores. Para um meio ativo cujo elemento principal é o érbio, ocorre uma transição entre os níveis de energia considerados como fundamental e excitado, representados respectivamente por  $E_1$  e  $E_2$ . Essa transição é gerada pela absorção dos fótons do campo incidente pelos elétrons presente no nível fundamental ou  $E_1$ , ocorrendo, portanto, uma transição para um nível de estado excitado  $E_2$ . A Fig. 2.1 (a) representa este mecanismo de interação dos elétrons com fótons.

Para o caso dos dispositivos semicondutores, quando existirem elétrons livres na banda de condução, tem-se uma probabilidade desses elétrons retornarem à banda de valência, podendo assim, ocupar um estado quântico vazio. Com isso, ocorre a recombinação de um elétron com uma lacuna, com o cancelamento do correspondente par elétron-lacuna. Por conseguinte, a descida do elétron para uma banda mais baixa implica na liberação da correspondente diferença de energia sob a forma de um fóton. Esse fenômeno é conhecido como emissão espontânea, luminescência ou, ainda, eletroluminescência. Em um sistema atômico com dois níveis de energia e sem radiação externa presente, os átomos que se encontram no nível de energia  $E_2$ , após um determinado tempo, decaem para o nível de energia inferior  $E_1$ , emitindo assim, um fóton.

O processo de emissão espontânea não contribui para o ganho do amplificador, entretanto os fótons emitidos podem apresentar a mesma energia do sinal óptico incidente no EDFA. O problema desse tipo de emissão espontânea é que os fótons são emitidos em direções, polarizações e fases aleatórias; assim, estes fótons podem ser considerados como um ruído adicionado pelo amplificador óptico. O processo de emissão espontânea pode ser também denominado como um processo incoerente, assim como o processo de emissão

estimulada é denominado como um processo coerente. A Fig. 2.1 (b) e 2.1 (c) representam os processos de emissão estimulada e de emissão espontânea, respectivamente. Como o nível  $E_y$  em geral possui vários subníveis, o fóton gerado possuirá um comprimento de onda diferente se a transição tiver origem em um dos vários subníveis de energia possíveis. O nível representado por  $E_x$  equivale ao nível fundamental  $E_1$ .

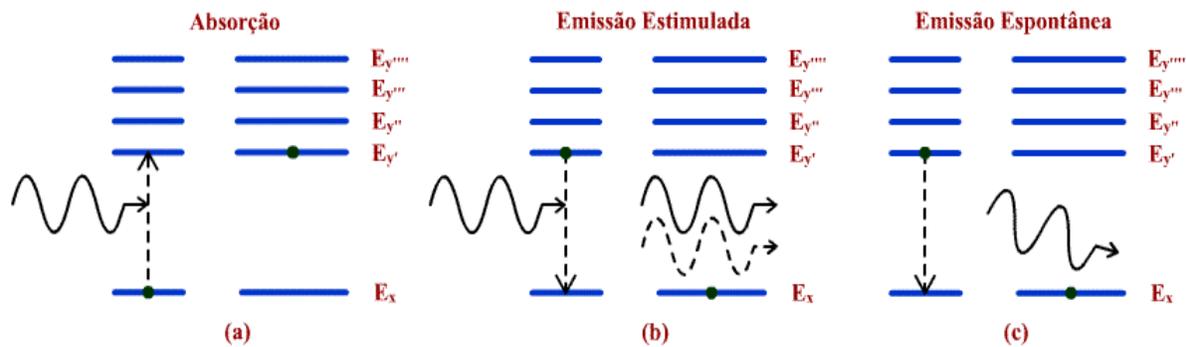


Fig. 2.1 – Mecanismos de amplificação do EDFAs para sistemas de 3 níveis: (a) absorção, (b) emissão estimulada e (c) emissão espontânea.

### 2.3 Emissão estimulada

O principal fenômeno físico por trás da amplificação do sinal óptico é a emissão estimulada de radiação por átomos na presença de um campo eletromagnético. Através deste mecanismo é possível além de aumentar significativamente a quantidade de fótons presente em um sinal óptico, é possível gerar esses fótons de forma coerente, ou seja, com as mesmas características do fóton incidente. No caso dos dispositivos semicondutores, a recombinação do elétron com a lacuna pode ser provocada pela presença de um fóton. Essa recombinação ocorre mais facilmente quando existe uma grande quantidade de elétrons na banda de condução. Os fótons que entram no material excitam esses elétrons de maneira insuficiente para levá-los para um estado de energia superior. Com isso, a tendência é que se transfiram para a banda de valência e a diferença de energia entre as duas faixas é

emitida na forma de radiação eletromagnética. Do ponto de vista ideal, a luz emitida deve ser idêntica à utilizada para excitar o cristal, em comprimento de onda e fase. Em um sistema que utiliza o érbio como meio ativo, pode-se considerar que a emissão estimulada acontece quando ocorre a transição de átomos de  $E_2$  para  $E_1$ . Para estas transições, os fótons interagem com os íons de érbio excitados (nível  $E_2$ ) e estimulam o decaimento dos mesmos para o nível  $E_1$ . A Fig. 2.1 (b) representa o mecanismo de emissão estimulada de fótons. Esta figura mostra o fóton incidente, que estimula o íon de érbio a decair para o nível fundamental, e conseqüentemente, um outro fóton (tracejado) que é gerado com as mesmas características do fóton incidente.

De acordo com Plank, o comprimento de onda do fóton emitido depende da diferença de energia entre dois níveis, sendo que os valores de  $E_y$  e  $E_x$  podem variar de um íon de érbio no estado excitado para outro. Com isso, pode-se obter o comprimento de onda através da Eq. (2.3), que pode ser obtida através das Eq. (2.1) e (2.2).

$$\lambda = hc / (E_y - E_x) \quad (2.3)$$

Em condições normais, grande parte dos portadores estão localizados no nível fundamental, ou no caso dos semicondutores, na banda de valência. Com isso, faz-se necessário um mecanismo que introduza uma quantidade elevada de portadores no nível excitado, ou em sua banda de condução. Este processo é conhecido como inversão de população. Dessa forma, o número de átomos em um determinado nível de energia pode ser representado por  $N_1$  e  $N_2$  correspondendo aos níveis de energia  $E_1$  e  $E_2$  respectivamente. Quando o sistema se encontra em equilíbrio térmico, os níveis de baixa energia são altamente populados, ou seja,  $N_1 > N_2$ . Assim, a tendência é que ocorra

predominantemente a absorção do sinal óptico de entrada. Para que haja amplificação do sinal óptico, deve-se inverter as populações dos níveis  $E_1$  e  $E_2$ . Durante o equilíbrio térmico, grande parte dos portadores estão presentes no nível fundamental, com isso, faz-se necessário o fornecimento adicional de energia ao sistema através de uma polarização direta na junção  $p-n$  ou através da injeção de uma luz chamada de bombeio.

## 2.4 Sistemas de níveis de energia do érbio

Para compreender as características espectrais do érbio, é necessário uma análise mais detalhada do seu diagrama de níveis de energia. O érbio possui sete níveis de energia relevantes, cada um deles responsável por transições específicas entre os níveis, emitindo e/ou absorvendo fótons em comprimentos de onda distintos. Porém, no processo de amplificação de luz, pode-se considerar os três primeiros níveis de energia como os mais relevantes. A Fig. 2.2 mostra um diagrama com alguns dos principais níveis de energia do érbio.

As transições que ocorrem do nível  $E_2$  para o nível fundamental  $E_1$  são predominantemente radiativas, ou seja, o produto desta transição é a emissão de fótons em uma faixa de comprimentos de onda em torno de 1550 nm. Porém, antes de ocorrer esta transição, o portador permanece um determinado tempo no nível excitado até que retorne para o nível fundamental. Esse tempo que o portador permanece no nível excitado é de aproximadamente 10 ms, o que pode ser considerado como um tempo de vida longo para os portadores de carga [20]. Dessa forma, pode-se considerar que os elétrons adquirem certa estabilidade quando permanecem nesse nível de energia. Por essa razão, este nível é também conhecido como nível metaestável, o que indica que a transição deste nível para o

nível mais baixo de energia dura um tempo consideravelmente longo se comparado com transições que ocorrem em outros níveis.

Para uma fonte de bombeio que utiliza o comprimento de onda de 980 nm e tendo a Fig. 2.2 como referência, verifica-se que a absorção de fótons do bombeio provoca transições que ocorrem do nível fundamental  $E_1$  para o nível  $E_3$ . A tendência é que o portador também retorne para o nível fundamental, porém, antes de retornar para o estado inicial, parte dos portadores decaem espontaneamente para o nível metaestável  $E_2$ . Neste caso, a energia pode ser emitida na forma de uma vibração da rede cristalina. Essa onda mecânica pode ser associada a uma partícula equivalente, denominada fônon [6]. Uma característica importante do érbio é o fato de que as transições de  $E_3$  para  $E_2$  são mais rápidas que as transições dos níveis  $E_2$  para o  $E_1$ . A primeira é da ordem de microsegundos, enquanto a segunda, como mencionada acima, é da ordem de 10 ms.

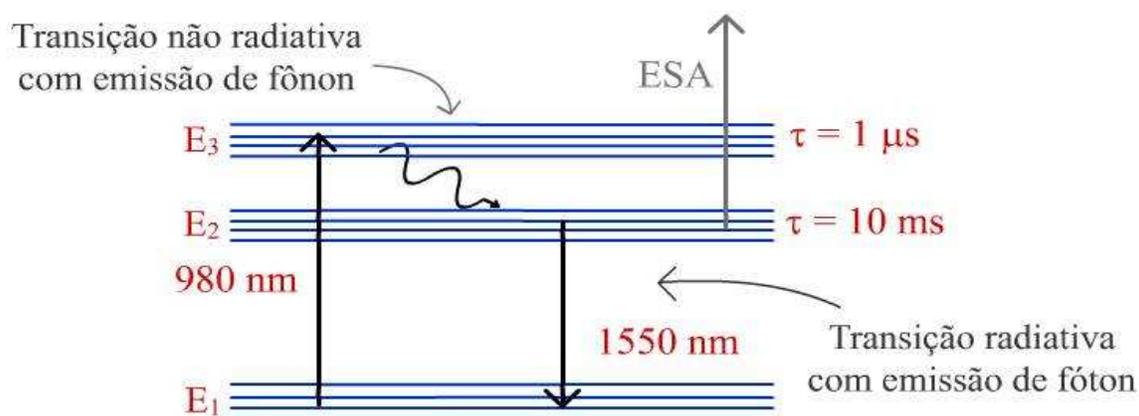


Fig. 2.2 – Diagrama simplificado de níveis de energia do  $Er^{3+}$  com os respectivos comprimentos de onda de absorção e emissão.

A absorção da energia proveniente do bombeio pelas impurezas presentes no núcleo da fibra que serve como meio ativo (nesse caso o érbio), podem não ocorrer com a mesma intensidade para vários comprimentos de onda. As maiores eficiências de absorção ocorrem, principalmente, nos comprimentos de onda de 532 nm, 980 nm e 1480 nm. Por

volta destes comprimentos de onda, o érbio consegue absorver uma quantidade de fótons maior que em outras faixas de comprimento de onda [20]. Sendo assim, com um bombeio apropriado, é possível obter um ganho óptico elevado com uma potência óptica de bombeio relativamente baixa.

Um fenômeno que pode ocorrer no processo de amplificação do sinal óptico e prejudicar o ganho final do EDFA é a absorção de estado excitado (ESA – *excited state absorption*) [21]. Em algumas circunstâncias, os fótons provenientes do bombeio ou do sinal a ser amplificado, não são absorvidos pelos íons de érbio no nível fundamental, mas pelos portadores presentes no nível metaestável. Este fenômeno acontece em diferentes comprimentos de onda e pode absorver tanto fótons do bombeio como fótons do sinal a ser amplificado. Deste modo, apesar de ocorrerem transições para níveis de energia superiores a este mesmo nível, os portadores retornam quase que instantaneamente para  $E_2$ , sendo que, este decaimento para o nível metaestável é não-radioativo. O problema neste caso, é que um fóton de bombeio que poderia estar sendo utilizado para transferir um portador do nível fundamental para o nível metaestável acaba sendo perdido. Da maneira semelhante, a absorção de um fóton do sinal pelos portadores no nível  $E_2$ , também pode prejudicar a inversão de população e, conseqüentemente, o ganho final.

## **2.5 Características do EDFA**

### **2.5.1 Ganho óptico**

O ganho é uma das principais características de um amplificador óptico e pode ser definido como a razão entre a potência do sinal de saída e a potência do sinal de entrada, tipicamente expressa em dB. Aparentemente, a medida de ganho óptico não apresenta

dificuldades técnicas, porém, no caso do EDFA, vários fatores podem influenciar o valor final de ganho. Dentre estes fatores, os principais são a topologia utilizada na montagem do circuito óptico, o comprimento de fibra dopada com érbio, a potência de bombeio e do sinal óptico a ser amplificado, o comprimento de onda do bombeio e do sinal óptico a ser amplificado e a quantidade de dopantes presentes na EDF [20]. Assim sendo, pode-se definir o ganho óptico através da Eq. (2.4). Com isso, verifica-se que não basta saber apenas a potência do sinal de entrada e do sinal de saída, mas também se deve atentar para evolução da ASE. Este é um fator que pode influenciar, principalmente, as medidas experimentais de ganho, pois, em alguns casos, a potência da ASE pode suplantar o sinal óptico amplificado. Para facilitar o entendimento da Eq. (2.4), a Fig. 2.3 mostra uma representação do sinal óptico na entrada do EDFA e outra na saída do amplificador, com destaque para os pontos que indicam a potência do sinal de entrada e de saída, além da potência do ruído.

$$G(dB) = 10 \log_{10} \left( \frac{P_{\text{sinal-saída}} - P_{\text{ruído-saída}}}{P_{\text{sinal-entrada}}} \right) \quad (2.4)$$

Assim sendo, neste trabalho foram realizadas medidas cujo objetivo era verificar as alterações do ganho óptico decorrentes de possíveis adaptações no circuito óptico, como por exemplo, o tipo de topologia utilizada e o comprimento de EDF. Além disso, foram realizadas medidas de ganho com diversos valores de potência de bombeio e de sinal óptico, sendo que o sinal óptico foi utilizado em dois comprimentos de onda distintos. Com isso, foi possível obter as respostas do EDFA para todas essas configurações e compará-las afim de se obter uma topologia com características específicas para uma determinada aplicação.

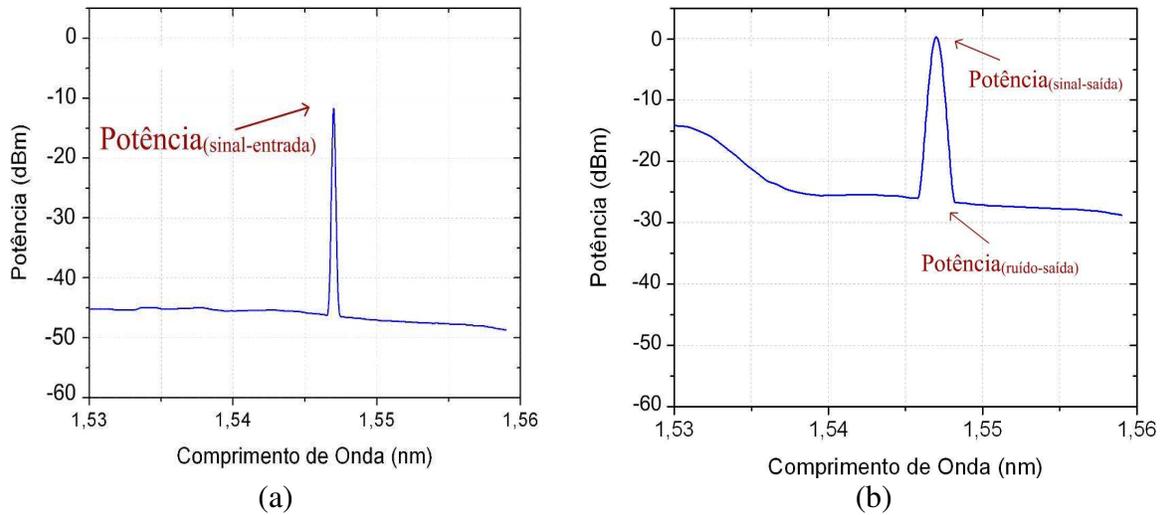


Fig. 2.3 – Representação do sinal óptico: (a) na entrada do EDFA e (b) após ser amplificado [20].

## 2.5.2 Emissão espontânea amplificada

Uma característica importante para o processo de amplificação óptica, e que esta presente em outros tipos de amplificadores, é a emissão espontânea amplificada de fótons [6]. Todos os íons que foram excitados através de um bombeio óptico e que estão em níveis de energia superiores podem decair espontaneamente, após um determinado tempo, emitindo um fóton que não possui semelhança alguma com qualquer fóton pertencente ao sinal óptico ou com outro fóton também gerado espontaneamente. No entanto, há a possibilidade desses fótons de origem espontânea estimularem íons de érbio presentes no estado excitado a decaírem, produzindo, desta forma, fótons com as mesmas características dos diferentes fótons gerados espontaneamente, todos descorrelacionados em relação ao sinal óptico de informação.

Assim, os fótons espontâneos podem ser considerados como um sinal extra gerado dentro da EDF que também sofre amplificação e, por causa de suas características incoerentes em relação ao sinal que se deseja amplificar, pode ser considerado como um

ruído produzido pelo EDFA. Este processo pode ocorrer em qualquer frequência dentro do espectro de fluorescência das transições do amplificador. Quando a ocorrência desse fenômeno é significativa em relação ao sinal óptico, o desempenho do amplificador pode ser prejudicado, pois, em alguns casos, pode ocorrer a saturação na saída do amplificador e a limitação de ganho óptico. Este processo de amplificação de fótons que foram gerados pela emissão espontânea é chamado de emissão espontânea amplificada (ASE). Vale salientar que este processo de amplificação pode ocorrer nos dois sentidos dentro da EDF, o co-propagante em relação ao sinal óptico e o contra-propagante em relação ao sinal óptico.

Dependendo do tipo de configuração de EDFA utilizado, a ASE pode apresentar valores distintos. Isto se deve ao fato de que dependendo, por exemplo, por onde o bombeio óptico e o sinal óptico são inseridos, é possível que a ASE encontre um ambiente com maior ou menor facilidade para se desenvolver. No Capítulo 3, que diz respeito às topologias de EDFA, será apresentado um estudo referente ao impacto que a ASE pode causar em uma determinada topologia. Outro fato que pode prejudicar o desempenho do EDFA é a potência do sinal óptico de entrada que, se for relativamente baixa, pode causar a supressão do ganho pela ASE. Isso ocorre devido a elevada quantidade de portadores no nível metaestável que não estão sendo estimulados pelo sinal óptico na entrada da EDF. Com isso, algumas emissões espontâneas se tornam eminentes e, conseqüentemente, a amplificação das mesmas. Quanto maior a quantidade de emissões espontâneas, maior é a tendência de uma ASE relativamente forte nas outras extremidades da EDF.

### **2.5.3 Figura de ruído**

O processo de amplificação óptica do EDFA é acompanhado por um fenômeno indesejado, a ASE, que, como exposto na secção anterior, cresce à medida que os fótons

emitidos pelo decaimento espontâneo são amplificados ao longo da EDF. A ASE adiciona ruído e, conseqüentemente, degrada o sinal de saída. Assim, a figura de ruído (NF – *noise figure*) pode ser considerada como um parâmetro importante na caracterização do EDFA e pode ser definida como a razão entre a relação sinal ruído (SNR – *signal to noise ratio*) da saída do amplificador pela SNR da entrada do amplificador. A NF pode também ser definida como uma medida da degradação do sinal óptico pelo ruído adicionado pelo amplificador. Como a contribuição dominante para a NF de um amplificador óptico é a ASE, a potência de ASE na saída do EDFA pode variar de forma significativa dependendo, por exemplo, do tipo de topologia utilizado.

Existem diversos métodos que podem ser utilizados para medir a figura de ruído em um sistema óptico [22]. Entre os mais conhecidos, destaca-se o método com interpolação espectral. Para utilizar este método é necessário que se faça uma interpolação de pontos no espectro do sinal óptico amplificado, com o objetivo de se determinar o valor aproximado da potência de ASE. A Fig. 2.4 mostra uma pequena parte do espectro de EDFA para o bombeio em 10 mW, sendo que, este gráfico relaciona a potência óptica com o comprimento de onda, para um sinal que acabou de ser amplificado. Para obter a potência real de ASE, é necessário, primeiramente, marcar dois pontos na base do pico do sinal amplificado. Em seguida, deve-se traçar uma reta unindo estes dois pontos. Tendo como referência o ponto com maior amplitude do sinal amplificado, deve-se unir este ponto até o segmento de reta traçado anteriormente. Assim, obtém-se o ponto que representa a potência de ASE para o sinal óptico amplificado.

Com isso, pode-se utilizar a Eq. (2.5) para determinar a NF através do método de interpolação espectral [22].

$$NF(dB) = 10 \log \left( \frac{P_{ASE}}{h\nu B_0 G} - \frac{1}{G} \right) \quad (2.5)$$

onde  $P_{ASE}$  é a potência da ASE observada para uma largura de banda  $B_0$ ,  $h\nu$  é a energia do fóton e  $G$  é o valor do ganho óptico do EDFA. Através desta equação, é possível perceber que a potência da ASE é um dos fatores que mais contribuem para o aumento da figura de ruído, pois, é diretamente proporcional a mesma.

Da mesma forma, pode-se dizer que o ganho óptico tem uma contribuição positiva no cálculo da figura de ruído, pois, um ganho óptico eficiente alto pode melhorar de forma significativa a figura de ruído. Quanto maior o ganho óptico, maior se torna a relação sinal ruído na saída do EDFA e, conseqüentemente, isto melhora os valores de figura de ruído. A inversão de população na entrada do amplificador também apresenta um grande impacto na figura de ruído. Isso ocorre devido às emissões espontâneas geradas na entrada do amplificador, que, por sua vez, experimentam o ganho quase que completo do EDFA, degradando assim, a relação sinal/ruído da saída e conseqüentemente, a figura de ruído.

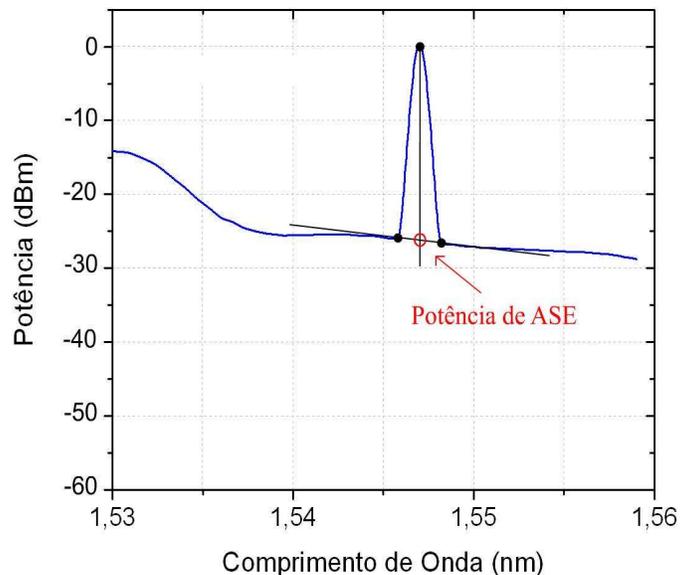


Fig. 2.4 – Método de Interpolação espectral para obtenção da potência de ASE [20].

## 2.5.4 Regime de saturação

Um outro fato interessante que deve ser comentado é quando o EDFA esta amplificando um sinal óptico com valores de potência de entrada relativamente elevados. Nesse caso, pode ser que o EDFA esteja operando sob regime de saturação [20]. O EDFA pode atingir esta condição quando uma grande quantidade de fótons provenientes do sinal a ser amplificado é acoplada à EDF. Na prática, isto acontece porque o forte sinal de entrada ao ser amplificado, durante sua passagem pela EDF, provoca a emissão estimulada de grande parte dos  $Er^{3+}$  que estão presentes no nível metaestável; com isso, a população deste nível é consumida rapidamente. Isso faz com que a maior parte dos íons permaneçam no estado fundamental. Uma outra forma de ocorrer a saturação é através da própria ASE, pois se o sinal de entrada é fraco, a ASE gerada na entrada da EDF pode ser amplificada por todo comprimento da fibra, saturando assim a saída do amplificador.

A saturação do amplificador óptico pode prejudicar consideravelmente o ganho óptico, pois os íons que estão no estado excitado são rapidamente consumidos, afetando assim, o ganho óptico do amplificador. Quando o amplificador óptico esta operando sob regime de saturação, a quantidade de transições provocadas pelo bombeio óptico, que ocorrem do nível fundamental para o nível excitado, são balanceadas pela emissão estimulada de fótons do sinal de entrada. Assim, devido a esse balanceamento, quanto maior a potência de bombeio, maior deve ser a potência do sinal óptico a ser amplificado para poder saturar o EDFA. Com isso, verifica-se que a potência de saturação do sinal de entrada, ou seja, a potência máxima que o amplificador trabalha sem que entre no regime de saturação, não é constante, mas cresce linearmente com a potência de bombeio [14].

### 2.5.5 Fibra dopada com érbio

Um dos principais elementos de um EDFA é a fibra dopada com érbio. Esse tipo de fibra geralmente é do tipo monomodo e possui o núcleo dopado com íons de érbio. A fibra dopada com érbio, geralmente, é produzida pelas técnicas de deposição modificada de vapor químico (MCVD – *modified chemical vapor deposition*) e pela técnica de deposição axial de vapor (VAD – *vapor axial deposition*), que permitem adicionar érbio uniformemente ao longo de todo núcleo da fibra óptica [20]. Com o uso dessas técnicas, é possível obter um alto grau de controle, por exemplo, na elaboração do perfil do índice de refração, o qual pode ser feito sob medida.

A fibra dopada com érbio deve ser projetada para maximizar o bombeio absorvido pelos íons de érbio. Para que isso ocorra, a EDF deve ter um núcleo pequeno e uma diferença de índices de refração do núcleo e da casca relativamente elevada. Isso minimiza a área efetiva do núcleo e maximiza o fator de confinamento óptico do bombeio.

Algumas considerações a respeito dos materiais utilizados como dopante são importantes na determinação da saturação do EDFA, como a concentração de érbio e dos co-dopantes que podem ser utilizados. Quando a concentração de érbio na sílica é alta, os átomos de érbio se agrupam formando pequenos grupos denominados também como *clusters*. Se mais de um átomo presente em um *cluster* for excitado pela absorção do bombeio, um dos átomos excitados pode decair para o estado fundamental, transferindo a energia para um íon próximo que já está no nível excitado  $E_2$ . Este segundo íon de érbio é elevado para um estado de excitação mais alto e sua energia extra é dissipada através de um decaimento não-radiativo para o nível  $E_2$ . O resultado é a absorção do fóton de bombeio sem a produção de um fóton de sinal.

Para que a fibra dopada com érbio possa ser utilizada com uma baixa concentração de érbio no núcleo, é necessário que essa fibra possua um núcleo grande e uma pequena diferença entre os valores dos índices de refração do núcleo e da casca. Essa fibra é comumente utilizada em aplicações onde o objetivo é o de se obter uma alta potência de saída ao invés de se obter um ganho óptico relativamente alto, com uma potência de bombeio mínima. O inconveniente para esse tipo de fibra é que, aumentando-se o núcleo da EDF, aumenta-se também o limiar necessário de potência de bombeio para que se possa obter ganho óptico com o EDFA. Assim para amplificadores de potência, é preferível que a EDF possua um núcleo menor e um contraste acentuado entre os índices de refração do núcleo e da casca.

### **2.5.6 Comprimento ótimo para a fibra dopada com érbio**

Para qualquer topologia de EDFA, existe um comprimento ótimo de EDF, com o qual se produz um ganho óptico máximo. Como a energia de bombeio é absorvida pelo meio à medida que se propaga ao longo da fibra dopada, a quantidade de portadores no nível excitado aumenta consideravelmente e, conseqüentemente, a concentração de íons de érbio no nível fundamental diminui. Este fenômeno é conhecido como inversão de população. Após a energia do bombeio óptico percorrer um certo trecho da EDF, pode não haver energia suficiente para garantir uma eficiente inversão de população, e, portanto, pode ocorrer uma supressão do ganho óptico. Desta maneira, o comprimento ótimo da EDF é definido como sendo a distância em relação ao ponto de entrada do sinal, a partir do qual a amplificação do sinal é máxima.

Na prática, o comprimento ótimo da EDF pode ser determinado realizando medidas sucessivas de ganho óptico utilizando diversos comprimentos de EDF. Neste teste, um

pedaço de EDF é cortado repetidamente e a potência óptica de saída é medida. Com isto, obtêm-se uma curva experimental que relaciona o ganho óptico com o comprimento da fibra. O comprimento ótimo é obtido conservando-se o máximo valor de ganho obtido. Este método é preciso, porém, tem o inconveniente de ser destrutivo, visto que a fibra dopada com érbio é cortada em vários pedaços.

## **2.6 Conclusão**

Neste capítulo, uma análise teórica básica para o funcionamento do EDFA foi apresentada. Primeiramente, foram discutidos os conceitos fundamentais dos processos de amplificação óptica. Além disso, uma análise de sistemas de níveis de energia do érbio considerando apenas os três primeiros níveis foi descrita neste capítulo. Em seguida, algumas características do EDFA foram apresentadas. Os conceitos destas propriedades serão utilizados posteriormente com intuito de auxiliar na caracterização dos dispositivos utilizados no circuito óptico e também para descrever o comportamento de cada topologia em análise.



# Capítulo 3

## Apresentação das Topologias

### 3.1 Introdução

Com a finalidade de se obter um melhor desempenho para o EDFA, algumas modificações e adaptações têm sido realizadas no circuito óptico com o intuito, por exemplo, de aumentar o ganho óptico e/ou minimizar o efeito da ASE. Uma forma de se obter melhorias pode ser atribuída ao material que é utilizado na fabricação da EDF, como por exemplo, a adição de elementos co-dopantes que têm a finalidade de elevar o ganho óptico do amplificador. Outra forma de melhorar o desempenho do EDFA é através de modificações em suas topologias, alterando, por exemplo, a posição dos dispositivos no circuito óptico.

Dessa forma, alguns componentes ativos e passivos podem ser incorporados ou retirados do circuito óptico para se obter novas topologias de EDFA. Comercialmente, é interessante que o EDFA seja projetado com as características necessárias para o sistema óptico que será utilizado, pois o incremento de um componente passivo ou ativo poderá elevar, de forma significativa, o custo do equipamento. Sendo assim, neste capítulo serão analisadas diversas topologias de EDFAs, sendo que, para cada configuração, serão observadas algumas características fundamentais, como, o ganho óptico, a ASE e a figura de ruído, entre outras.

## 3.2 Configurações básicas de EDFA

As configurações de EDFA que podem ser classificadas como básicas são as que possuem um circuito óptico que utiliza o bombeio no sentido co-propagante, o bombeio no sentido contra-propagante e o bombeio bidirecional (utiliza o bombeio em ambos os sentidos) [15]-[17]. A configuração que utiliza o bombeio co-propagante geralmente é utilizada em sistemas ópticos que requerem amplificadores com características de baixo ruído. O EDFA com bombeio contra-propagante geralmente é utilizado em sistemas que necessitam de alta potência de saída. A configuração com bombeio bidirecional é usada para aplicações que necessitem das duas características, baixo ruído e alta potência de saída.

Os principais componentes de um EDFA são a fibra dopada com érbio, que possui, geralmente, dezenas de metros, a fonte de bombeio, que na maioria das vezes é um laser do tipo semiconductor emitindo luz na faixa do infravermelho, os acopladores direcionais WDM, para acoplar e desacoplar o sinal a ser amplificado com o sinal do bombeio, e isoladores ópticos, para evitar que reflexões do sinal ou do bombeio sejam re-acopladas ao circuito óptico. A configuração que utiliza sinal e bombeio no sentido co-propagante, possui o circuito óptico mais simples, o sinal óptico a ser amplificado entra no amplificador através de um acoplador direcional WDM, juntamente com o sinal proveniente do laser de bombeio. Em seguida, o sinal de luz do laser de bombeio excita os  $Er^{3+}$  que estão presentes na EDF, provocando a inversão de população. Dessa forma, o sinal de entrada, ao se propagar pela fibra dopada, é amplificado através das emissões estimuladas. Após a amplificação, o bombeio é separado do sinal amplificado por um segundo acoplador direcional WDM. Por um dos terminais do WDM tem-se a saída residual do bombeio e,

pelo outro terminal, o sinal amplificado. Alguns isoladores podem ser utilizados na entrada e saída do amplificador para impedir que reflexões de sinais espúrios se acoplem ao amplificador e interfiram no processo de amplificação. Uma característica importante dessa configuração é a baixa figura de ruído. Isto ocorre porque, a região onde o bombeio é acoplado à fibra dopada, tende a possuir uma quantidade maior de portadores no nível metaestável e, conseqüentemente, a amplificação do sinal é mais forte nesta região. Com isso, o surgimento da ASE é minimizado no início da EDF, pois, os fótons do sinal de entrada estimulam boa parte dos portadores no nível excitado e, como a quantidade de emissões espontâneas na entrada da EDF é relativamente baixa, a amplificação da mesma pode ocorrer com menor intensidade. A Fig. 3.1 apresenta o diagrama esquemático de um EDFA que utiliza sinal e o bombeio no sentido co-propagante.

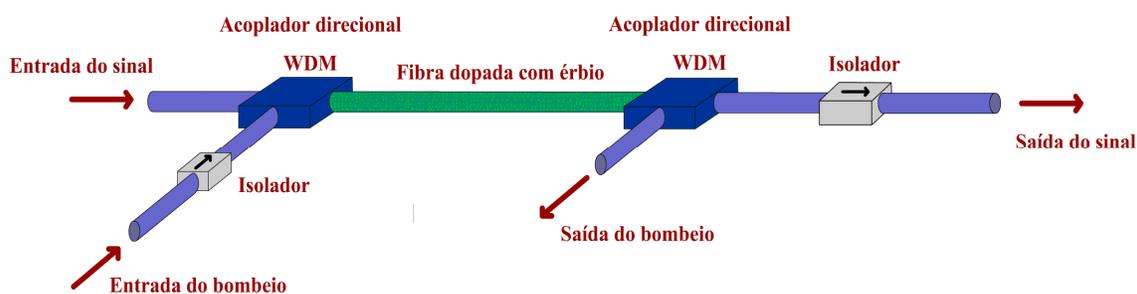


Fig. 3.1 – Configuração de um EDFA com sinal e bombeio no sentido co-propagante.

A segunda configuração básica do EDFA apresenta uma pequena modificação no circuito óptico em relação à configuração anterior. O laser de bombeio que anteriormente era acoplado à EDF através do primeiro acoplador direcional WDM, agora, é acoplado utilizando-se o segundo acoplador WDM. Dessa forma, o bombeio óptico se propaga através da EDF no sentido contra-propagante, ou seja, no sentido contrário ao do sinal óptico de entrada [23]. Com esta pequena modificação, a configuração pode apresentar características um pouco diferentes em relação à anterior. O ganho óptico obtido pode ser

ligeiramente maior, pois, a quantidade de portadores na parte final da fibra dopada é, consideravelmente maior. Assim, o sinal de entrada não é amplificado com muita eficiência na entrada da fibra e, com isso, a tendência é que ele não sature a saída da EDF. Uma desvantagem dessa configuração é a figura de ruído, que pode piorar consideravelmente devido à menor quantidade de portadores no nível metaestável na região onde o sinal de entrada é acoplado a EDF. Isso pode ocasionar o aumento das emissões espontâneas amplificadas e, conseqüentemente, a diminuição da SNR na saída do amplificador óptico. A Fig. 3.2 apresenta um diagrama esquemático para a configuração que utiliza sinal e bombeio no sentido contra-propagante.

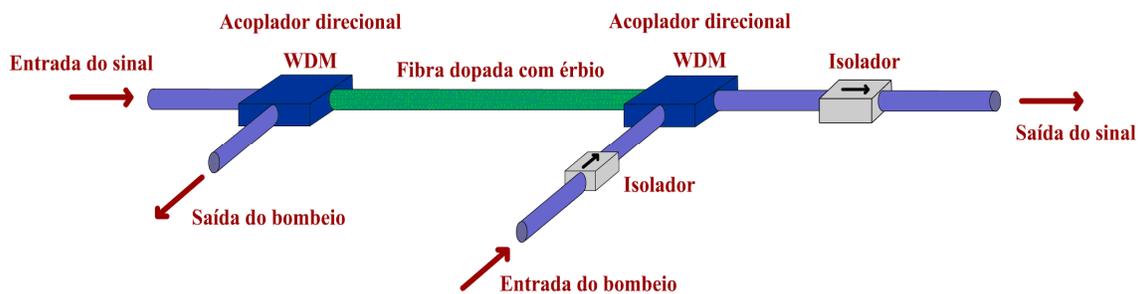


Fig. 3.2 – Configuração de um EDFA com sinal e bombeio no sentido contra-propagante.

A outra topologia que apresenta uma configuração que ainda se pode chamar de básica, ou seja, que possui os mínimos componentes necessários para a montagem do circuito óptico, é obtida a partir de uma pequena variação em um dos circuitos ópticos das duas configurações anteriores. Para a topologia de EDFA que possui o bombeio bidirecional, duas fontes de bombeio são utilizadas, uma acoplada ao primeiro acoplador direcional WDM e outra, ao segundo. Assim a luz emitida pela fonte de bombeio se propagará tanto no sentido co-propagante como no sentido contra-propagante. Dessa forma, a quantidade de  $Er^{3+}$  presentes no nível metaestável é consideravelmente maior do que nas configurações anteriores, principalmente em fibras com comprimentos mais longos

(maiores que 10 m de comprimento). Com isso, o ganho óptico dessa configuração consegue ser consideravelmente maior que o das duas configurações anteriores, pois, a EDF permanece com uma eficiente inversão de população em praticamente toda sua extensão. O problema para esse tipo de configuração é que a figura de ruído também apresenta valores relativamente altos se comparado com as topologias anteriores. A Fig. 3.3 mostra o diagrama esquemático para a configuração do EDFA com bombeio bidirecional.

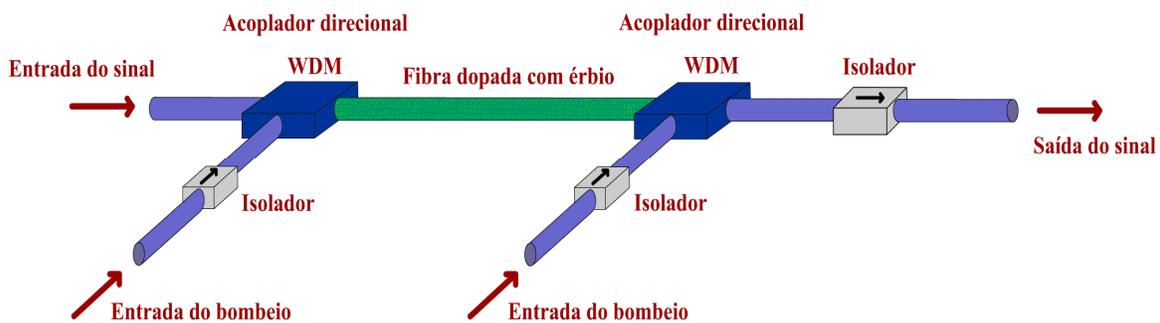


Fig. 3.3 – Configuração de um EDFA com sinal e bombeio bi-direcional.

### 3.3 Configurações de EDFAs com dispositivos reflexivos

Esta secção descreve algumas modificações que podem ser realizadas nas configurações que foram apresentadas anteriormente, com o objetivo, por exemplo, de melhorar a eficiência de utilização do bombeio ou promover a re-amplificação do sinal, fazendo com que um ou ambos passem mais de uma vez pela EDF. Essas modificações podem ser feitas no circuito óptico pela adição de componentes reflexivos como, por exemplo, a grade de Bragg. Outra forma é através da adição de determinados componentes passivos como os circuladores. As topologias de amplificador óptico que utilizam um elemento do tipo reflexivo têm como característica principal a reflexão do sinal de entrada, do bombeio ou de ambos. Isso tudo é feito com o intuito de maximizar o ganho óptico e

minimizar a ASE. A seguir serão apresentados vários tipos de configurações de EDFAs que utilizam dispositivos reflexivos [18].

### **3.3.1 Amplificadores com reflexão de bombeio**

O circuito óptico para a configuração com reflexão de bombeio é bem semelhante ao da configuração básica com bombeio co-propagante. A diferença é a de que um dispositivo reflexivo é inserido ao circuito óptico na extremidade de saída da EDF. Esse dispositivo óptico pode ser uma grade de Bragg, que têm a função de refletir apenas o comprimento de onda de interesse (neste caso, é o bombeio, cujo comprimento de onda é de 980 nm), enquanto que os demais comprimentos de onda são transmitidos. Outra forma de se obter uma reflexão para o bombeio, é através de adaptações realizadas no circuito óptico, que serão apresentadas no Capítulo 4.

A inserção de um dispositivo reflexivo pode melhorar a eficiência de acoplamento do bombeio, pois este bombeio passa duas vezes pela fibra dopada com érbio. Porém, é importante ressaltar que, dependendo do comprimento da fibra e da potência do sinal de entrada, a quantidade de bombeio refletido chega a ser insignificante. Do ponto de vista operacional, este tipo de configuração é semelhante à configuração com bombeio bidirecional, pois o sinal de bombeio se propagará nos sentidos co-propagante e contra-propagante. Por outro lado, uma das vantagens desse tipo de configuração é o uso de um elemento passivo (grade de Bragg), ou alguma adaptação, no lugar de um elemento ativo (laser de bombeio) com o objetivo de se obter um EDFA com as características semelhantes às da configuração com bombeio bidirecional, com um custo relativamente menor. A Fig. 3.4 mostra o diagrama esquemático para a configuração de um EDFA com reflexão de bombeio inicialmente co-propagante. Além de se poder acoplar o bombeio na direção co-

propagante em sua primeira passagem, uma variação direta desta topologia é considerar, inicialmente a direção contra-propagante para o bombeio.



Fig. 3.4 – Configuração de um EDFA com sinal co-propagante e reflexão de bombeio.

### 3.3.2 Amplificadores com reflexão de sinal

Neste tipo de topologia de amplificador óptico reflexivo, outros dispositivos passivos são adicionados ao circuito óptico, conforme apresentado pela Fig. 3.5. O primeiro deles é o circulador óptico, colocado onde antes era a entrada do sinal no primeiro acoplador WDM. Este dispositivo possui três portas, sendo que, por uma delas, o sinal de entrada é injetado. A porta 2, por onde o sinal de entrada sai do dispositivo, é conectada ao WDM. No final da EDF pode ser colocado um dispositivo reflexivo, da mesma maneira que a configuração anterior, ou ainda realizar uma adaptação ao circuito óptico com a finalidade de se obter também a reflexão do sinal. A diferença, dessa vez, está no comprimento de onda que vai ser refletido, pois, neste caso, o interesse é na reflexão no comprimento de onda do sinal de entrada. Após essa reflexão, o sinal óptico é amplificado novamente ao passar através da EDF e se acopla ao circulador óptico pela porta 2. Com isso, o sinal óptico já amplificado é lançado na porta 3 para então deixar o EDFA.

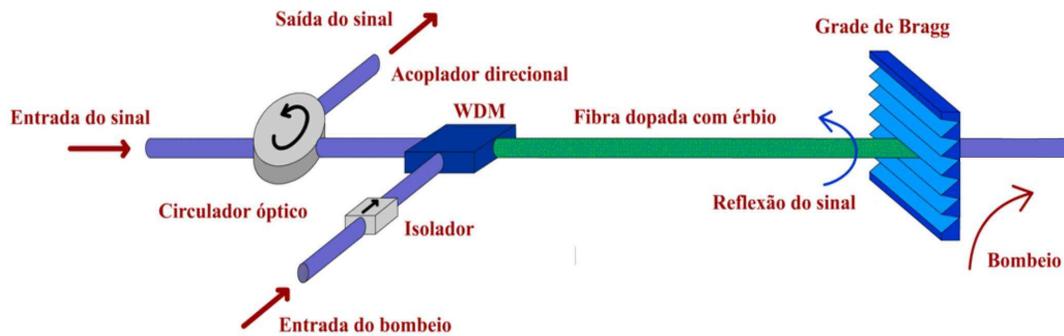


Fig. 3.5 – Configuração de um EDFA com reflexão de sinal.

Assim sendo, neste amplificador o sinal óptico é amplificado duas vezes. A primeira amplificação ocorre no sentido co-propagante, resultando numa amplificação mais eficiente. Nesse caso, o sinal óptico e o bombeio estão no mesmo sentido e, com isso, a região da EDF que possui uma quantidade maior de portadores no nível excitado está localizada junto ao circulador óptico. Isso faz com que o sinal óptico seja fortemente amplificado quando atravessa a fibra no sentido co-propagante. Por outro lado, quando o sinal óptico atravessa a EDF no sentido contra-propagante, ou seja, logo após ter sido refletido, a amplificação não é tão eficiente, pois a quantidade de portadores no nível excitado não é mais tão intensa. Grande parte desses portadores foram utilizados no processo de amplificação do sinal que atravessou a EDF no sentido co-propagante. Por outro lado, uma das desvantagens desse tipo de configuração é que a ASE também é refletida pela grade de Bragg, juntamente com o sinal óptico, e, com isso, é novamente amplificada. Essa amplificação pode degradar de forma significativa a SNR e piorar a NF. Algumas modificações em relação à posição do bombeio puderam ser realizadas para esta topologia. Assim, uma variação deste tipo de topologia pode ser obtida ao, acoplar o laser de bombeio no sentido contra-propagante ao sinal de entrada, além disso, é possível também utilizar um bombeio bi-direcional.

### 3.3.3 Amplificadores com reflexão de sinal e bombeio

Esse tipo de configuração apresenta basicamente os mesmos dispositivos da configuração anterior, porém uma alteração deve ser realizada no elemento reflexivo, conforme pode ser visto na Fig. 3.6. Dessa vez, tanto o bombeio quanto o sinal amplificado devem ser refletidos [23]. Uma das formas de se obter a reflexão do sinal e do bombeio é utilizando, por exemplo, uma grade de Bragg específica para cada comprimento de onda. Após serem refletidos, ambos os sinais se acoplam novamente à EDF. Da mesma forma que a topologia anterior, o sinal óptico é amplificado no sentido co-propagante e no sentido contra-propagante, sendo que a amplificação no sentido contra-propagante tem uma magnitude menor que a da amplificação no sentido co-propagante. Como o bombeio também sofre reflexão, a intensidade de bombeio, principalmente na parte final da fibra pode aumentar de maneira significativa, aumentando a quantidade de portadores no nível metaestável e melhorando a inversão de população não só na parte final, mas praticamente em toda extensão da EDF. Esse tipo de configuração se assemelha à configuração com bombeio bi-direcional, porém a quantidade de bombeio refletida não possui valores elevados como no outro tipo de configuração que utiliza um outro laser de bombeio para esse bombeio no sentido contra-propagante.

Nessa configuração, fica evidente que o ganho óptico pode ser ligeiramente maior se comparado aos das configurações com reflexão de sinal e com reflexão de bombeio. A desvantagem é que, da mesma forma que o sinal e o bombeio sofrem reflexão, a ASE também é refletida e re-amplificada, podendo assim, diminuir a SNR na saída do amplificador.

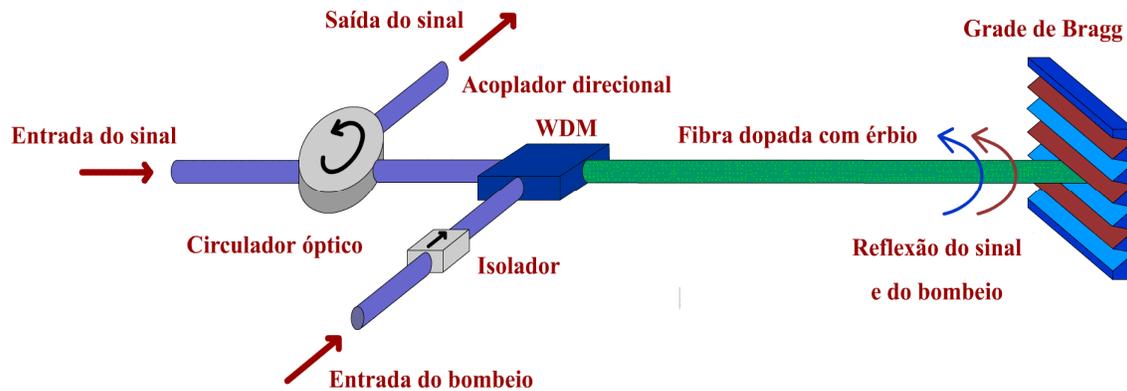


Fig. 3.6 – Configuração de um EDFA com reflexão de sinal e bombeio.

### 3.4 Conclusão

Este capítulo apresentou um estudo das topologias utilizadas nesta dissertação. Para tanto, foram apresentadas as características fundamentais de cada configuração, juntamente com as modificações que devem ser realizadas no circuito óptico. Devido a estas alterações foi possível definir quais as configurações que possuem características específicas para cada tipo de aplicação. A partir das topologias que possuem o circuito óptico mais simples, ou seja, as que possuem apenas os dispositivos necessários para um EDFA, foram propostas alternativas contemplando configurações com reflexão de sinal, reflexão de bombeio e, reflexão de sinal e bombeio simultaneamente. O conhecimento básico destas topologias será útil para que as modificações no circuito óptico, propostas no próximo capítulo, não alterem as suas principais características.

# Capítulo 4

## Projeto Opto-eletrônico

### 4.1 Introdução

Neste capítulo, serão apresentadas as modificações que devem ser feitas nas montagens para cada tipo de configuração de EDFA. Assim, primeiramente serão apresentados quais foram os dispositivos utilizados no circuito óptico e, também, o princípio de funcionamento de cada um deles. Como algumas características podem variar de dispositivo para dispositivo, deve-se, primeiramente, realizar medidas para a caracterização dos dispositivos. Com isso, pode-se definir previamente, a perda por inserção dos dispositivos e a atenuação que ocorre entre os conectores. Além disso, é necessário ter um bom conhecimento dos equipamentos envolvidos, pois os mesmos devem estar calibrados para cada condição.

Este capítulo também mostra as adaptações que foram realizadas nos circuitos ópticos apresentados no Capítulo 3. Essas montagens que aparentemente parecem ser bem simples de serem feitas, possuem um certo grau de dificuldade, haja visto que alguns dispositivos terão que ser substituídos por outros que realizam as mesmas funções. Com isso, a aparência do circuito óptico de algumas configurações também serão modificadas. Além disso, as adaptações que devem ser feitas no circuito óptico para substituir os dispositivos, não podem alterar, de maneira significativa, as principais características do circuito óptico.

## **4.2 Dispositivos utilizados**

### **4.2.1 Acoplador WDM**

O acoplador óptico WDM é um dispositivo recíproco que tem como principal função distribuir a luz proveniente de uma fibra principal, em um ou mais terminais de fibra, que podem ser denominados como as saídas do dispositivo. A forma mais simples do dispositivo é a que possui um terminal de entrada e dois terminais de saída. Com isso, o dispositivo consegue sobrepor dois sinais ópticos, oriundos de fibras distintas, em uma única fibra óptica, sendo que, cada fibra pode suportar um sinal óptico presente em uma determinada faixa do espectro. Alguns acopladores WDM são amplamente usados para combinar o sinal de bombeio, como 980 nm ou 1480 nm, com o sinal a ser amplificado, na faixa de 1550 nm, dentro de uma única fibra e com baixas perdas.

O interesse em dispositivos que desempenham esse tipo de função tem aumentado de forma significativa há algum tempo, pois, através deles, é possível combinar diversos comprimentos de onda ou separar sinais ópticos com comprimentos de onda distintos. Os acopladores WDM atuais podem distribuir o sinal óptico entre os terminais de fibra com uma perda por inserção relativamente baixa. Portanto, torna-se viável o uso destes dispositivos em sistemas ópticos de grande capacidade de tráfego. Por outro lado, se os acopladores WDM não apresentarem essas propriedades é possível que o dispositivo afete de maneira significativa o desempenho de um EDFA ou, até mesmo, de uma rede óptica. Idealmente, o dispositivo deve ter uma perda por inserção relativamente baixa na janela de cada banda de transmissão. Além disso, o dispositivo deve exibir uma alta isolamento entre as bandas, minimizando assim, o efeito de intermodulação (interferência que um canal pode

exercer sobre o outro), principalmente quando estiver sendo utilizado como um demultiplexador [11].

Na parte experimental foi utilizado um acoplador WDM bombeio/sinal da empresa JDS Uniphase. Este dispositivo possui uma configuração 1 x 2, ou seja, um terminal comum P1 e dois terminais P2 e P3. O terminal P2 é utilizado para multiplexar e demultiplexar os menores comprimentos de onda, que neste caso, é o comprimento de onda do bombeio, 980 nm, e o terminal P3, para multiplexar e demultiplexar os maiores comprimentos de onda, como o do sinal óptico a ser amplificado (faixa de operação entre 1528 nm e 1605 nm). A perda por inserção máxima do dispositivo é de 0,2 dB e a perda por retorno de 55 dB.

Outro dispositivo que possui o princípio de funcionamento semelhante ao do acoplador WDM é o acoplador 3 dB. Esse dispositivo é bastante utilizado em circuitos ópticos de EDFAs, sendo que uma de suas principais funções é a de decompor o sinal óptico que chega ao dispositivo em uma determinada proporção nas portas de saída, ou seja, a potência óptica do sinal é, de certa forma, dividida em duas partes, que podem ter, teoricamente, valores idênticos ou diferentes.

Para se obter um acoplador 3 dB, uma das formas é fundindo duas fibras ópticas pelo núcleo, de forma semelhante ao acoplador WDM. Nesse caso, o dispositivo consegue retirar uma fração  $\alpha$  de potência do sinal da entrada 1 e lançá-la à saída 1, enquanto que a parcela restante, ou seja,  $1 - \alpha$ , é lançada à saída 2. Sendo assim, quando dois guias de onda (nesse caso, os dois núcleos de fibra óptica) são colocados em proximidade um com o outro, a luz tende a se acoplar de um guia de ondas para o outro. Isso geralmente ocorre devido à propagação dos modos, dentro dos guias de onda quando estão combinados, serem

diferentes da propagação dos modos quando os mesmos percorrem um único guia de onda [24]. Dessa forma, para guias de onda idênticos, o sinal óptico lançado dentro de um guia de onda tende a se acoplar ao outro guia de onda completamente e, em seguida, retorna ao primeiro guia de onda. Esse acoplamento de luz ocorre de forma periódica, sendo que, dependendo do comprimento  $L$  do dispositivo e do comprimento de onda do sinal de entrada, é possível ajustar a fração  $\alpha$  de potência óptica que será lançada nas saídas do dispositivo. Para o acoplador 3 dB a fração da potência óptica deve ser distribuída igualmente a cada um dos terminais de saída; nesta situação, o valor de  $\alpha$  é de 0,5. Existem outros acopladores que possuem diferentes porcentagens para a proporção de sinal de saída, como por exemplo, 90% e 10%. A Fig. 4.1 representa os dois guias de onda unidos pelo núcleo e o sinal óptico que percorre este guia de onda.

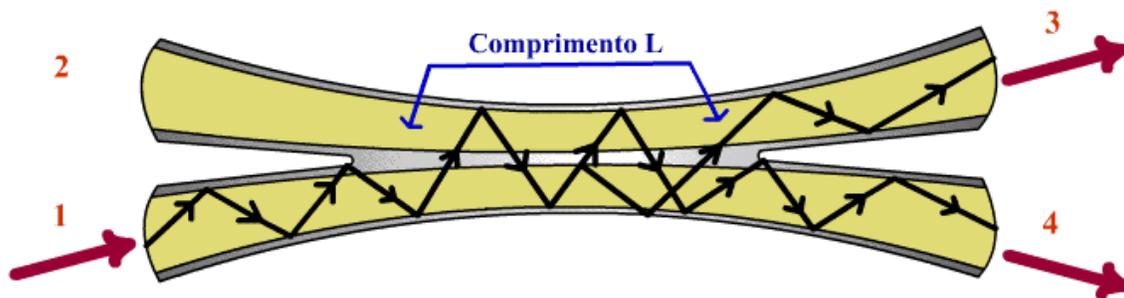


Fig. 4.1 – Diagrama esquemático para um acoplador 3 dB com destaque para o acoplamento da luz entre os dois guias de onda.

O acoplador 3 dB utilizado no circuito óptico do EDFA foi produzido pela JDS Uniphase. Este dispositivo possui uma configuração 2 x 2, ou seja, dois terminais de entrada e dois terminais de saída. Um dos terminais de entrada, rotulado por P1, é também denominado terminal comum, ou seja, é por este terminal que é injetado o sinal que posteriormente terá a potência óptica dividida. Uma característica importante deste dispositivo é que ele possui uma razão de acoplamento de 50 %, ou seja, teoricamente,

metade da potência injetada no terminal de entrada é transferida para a saída P2 e outra parte para o terminal de saída P3. É importante ressaltar que o dispositivo possui uma perda por inserção de aproximadamente 3,2 dB em cada terminal e uma perda por retorno de 55 dB.

#### **4.2.2 Isolador e circulador óptico**

Os isoladores e circuladores ópticos, ao contrário dos acopladores WDM, não são considerados recíprocos, ou seja, os dispositivos não trabalham exatamente da mesma forma se os terminais de entrada e saída forem invertidos. Porém, alguns sistemas precisam de um dispositivo não recíproco, que permita apenas a transmissão em um único sentido, bloqueando todas as transmissões no sentido contrário. Com isso, o isolador óptico pode ser utilizado em circuitos ópticos de EDFA em diversas posições, sendo que, uma das posições mais comuns é imediatamente após o laser de bombeio e do laser do sinal óptico. A finalidade da utilização desses dispositivos é evitar que reflexões espúrias possam realimentar os lasers e, conseqüentemente, danificá-los. Os dois parâmetros principais que caracterizam um isolador e um circulador óptico são a perda por inserção, que deve ser a menor possível, e a isolação, que nada mais é que a capacidade do dispositivo de não deixar que o sinal atravesse o dispositivo no sentido reverso.

Como o estado de polarização da luz que é lançada dentro de um isolador ou circulador óptico não pode ser controlado, esses dispositivos devem operar independentemente de qualquer estado inicial de polarização. Sendo assim, o sinal de entrada, que possui um estado de polarização arbitrário, entra pelo isolador óptico por um terminal considerado como a entrada do dispositivo. Em seguida, já no interior do dispositivo, o sinal óptico atravessa determinados componentes que possuem funções

específicas cada um. Com isso, o sinal é enviado através de um dispositivo denominado polarizador de desvio espacial (SWP – *Spacial Walk-off Polarizer*). O SWP tem como função dividir o sinal óptico em dois componentes que são polarizados ortogonalmente. O componente vertical segue na mesma direção em que o sinal óptico entrou no dispositivo, e o componente horizontal é desviado para um caminho alternativo paralelo ao primeiro, de acordo com a Fig. 4.2. Em seguida, cada um dos componentes do sinal óptico que foram separados anteriormente passam através de um girador de polarização de Faraday (FaR – *Faraday Rotator*), que tem a função de girar o estado de polarização em  $45^\circ$ . O rotator de Faraday é seguido por uma placa de meia-onda (*Half-Wave Plate*), que gira o estado de polarização em  $45^\circ$  no sentido horário quando o sinal se propaga da esquerda para a direita e gira  $45^\circ$  no sentido anti-horário para o sinal que se propaga no sentido contrário. Sendo assim, a combinação do rotator de Faraday e a placa de meia onda converte o estado de polarização vertical em horizontal e vice-versa. Em seguida os dois sinais são combinados por outro SWP e lançado para o terminal de saída do isolador óptico [25].

Para os sinais que entram no isolador no sentido reverso (da saída para a entrada), a placa de meia-onda e o rotator de Faraday cancelam o efeito um com o outro, ou seja, os estados de polarização dos dois componentes são anulados devido ao sentido de rotação que é um contrário ao outro. Dessa maneira, o estado de polarização permanece o mesmo quando passa através desses dois dispositivos e, a partir daí, não conseguem ser recombinados pelo SWP presente na entrada do dispositivo. Isso se deve ao fato de que o estado de polarização horizontal é desviado ao passar pelo SWP e não consegue se acoplar à fibra óptica, da mesma forma, o estado de polarização vertical ao passar pelo SWP não é

desviado e também não consegue alcançar a fibra óptica. A Fig. 4.2 apresenta o princípio de operação de um isolador óptico independente da polarização do sinal de entrada.

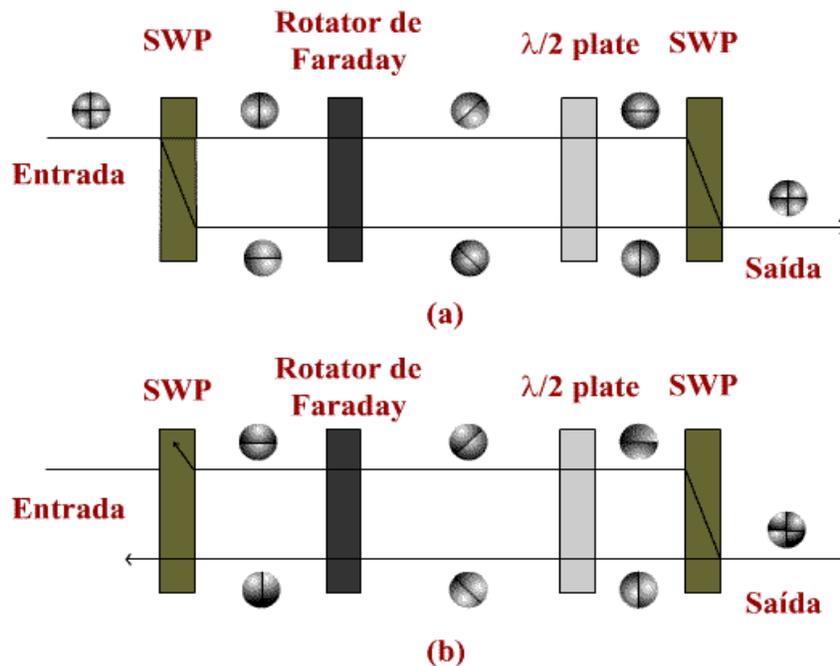


Fig. 4.2 – Princípio de funcionamento de um isolador óptico independente do estado de polarização: (a) o sinal se propaga no sentido da esquerda para a direita; (b) o sinal se propaga no sentido da direita pra esquerda [26].

O modelo de isolador óptico utilizado é o produzido pela JDS Uniphase e também trabalha independentemente do estado de polarização da luz. Este dispositivo opera numa faixa de comprimentos de onda em torno de 1550 nm, com uma isolação mínima de 38 dB entre os terminais e uma perda por inserção de aproximadamente 0,2 dB.

O princípio de operação de um circulador óptico é similar ao de um isolador óptico, exceto que ele possui várias portas, geralmente 3 ou 4. Nesse caso, vários isoladores são inseridos entre as respectivas portas. Dessa forma, para um circulador óptico que possui 3 portas, o sinal óptico que entra no dispositivo pela porta 1 é enviado apenas para a porta 2 e o sinal que entra pela porta 2 é enviado para a porta 3, sendo que no sentido contrário não é possível a transmissão do sinal devido à presença de isoladores ópticos. Existem

circuladores ópticos que realizam a transmissão de sinal da porta 3 para porta 1, outros possuem uma alta isolação entre essas duas portas [26].

O circulador óptico empregado é insensível à polarização do sinal e pode operar com altas potências ópticas acopladas. Este dispositivo, produzido pela JDS Uniphase, possui a função de transferir o sinal no comprimento de onda que pode variar entre 1530 nm a 1620 nm, do terminal P1 para o P2 e do terminal P2 para o P3 sem retorno de P2 para P1 e de P3 para P1 ou P2. Vale salientar que a faixa de operação é ligeiramente maior que aquela da banda C (1530 nm a 1570 nm), porém, pouco menor que a faixa complementar da banda L (1570 nm a 1630 nm). Entre os terminais P1 e P3 ocorre uma isolação de aproximadamente 50 dB, impossibilitando, assim, a passagem do sinal entre esses terminais. A perda por inserção máxima do dispositivo é de 0,6 dB.

### **4.2.3 Atenuador Óptico Variável**

Outro dispositivo passivo utilizado em algumas configurações foi um atenuador variável (JDS Uniphase). Este tipo de atenuador possui um filtro óptico com uma grade de Bragg que tem a função de refletir a luz incidente no dispositivo. Porém, esta reflexão, pode atenuar o sinal de entrada dependendo da inclinação dos espelhos internos; ou seja, através dessa inclinação é possível aumentar ou diminuir a quantidade de luz que será re-acoplada à fibra por onde o sinal sai do dispositivo. Assim, este tipo de reflexão permite que os terminais de entrada e saída fiquem do mesmo lado, facilitando a montagem do dispositivo. O ajuste da atenuação é controlado girando um parafuso que se encontra no próprio dispositivo. A potência de entrada máxima que o dispositivo suporta é de 50 mW (17 dBm), a perda por inserção é geralmente menor que 1,5 dB e a perda de retorno superior a 45 dB.

#### 4.2.4 Laser semiconductor

As fontes ópticas que são geralmente utilizadas em sistemas de comunicação óptica são o LED (*light-emitting diode*) e o laser (*light amplification by stimulated emission of radiation*). Atualmente, a fonte de luz mais utilizada é o laser do tipo semiconductor, que apresenta algumas vantagens em relação ao LED e aos outros tipos de laser que estão disponíveis comercialmente. Entre as principais vantagens que o laser semiconductor possui, destacam-se o seu tamanho, que facilita o acoplamento da luz do dispositivo à fibra óptica ou outros dispositivos, a boa eficiência na conversão de energia elétrica em energia luminosa, tempo de vida útil relativamente alto, a modulação direta da luz através da variação da corrente de polarização que permite altas taxas de bits e o relativamente baixo custo do laser semiconductor em relação aos LEDs de alta potência, entre outros [27]. Na fabricação do diodo laser, alguns materiais compostos são comumente utilizados como semicondutores. Assim, é possível encontrar dispositivos formados de arsênio, gálio e alumínio, na forma  $Ga_{1-x}Al_xAs$ , e também, estruturas quaternárias do tipo  $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$ . Dependendo dos valores de  $x$  e  $y$ , é possível determinar a diferença de energia entre as bandas de condução e de valência e, conseqüentemente, o comprimento de onda dominante da luz emitida.

Do ponto de vista físico, um laser é essencialmente um amplificador óptico no interior de uma cavidade refletora, que atinge uma condição de oscilação ocasionada por uma realimentação positiva propiciada pela reflexão da luz nas faces clivadas da cavidade, as quais atuam como semi-espelhos. Dessa forma, parte da radiação eletromagnética fica confinada dentro da cavidade óptica, gerando também um processo de auto-seleção do comprimento de onda que será emitido pelo laser. O espectro de emissão de um laser

corresponde ao comprimento de onda de ressonância da cavidade. Este espectro pode conter vários modos de oscilação longitudinais, o que leva à classificação deste tipo de laser como multimodal ou monomodal.

Existem vários tipos de lasers semicondutores que podem ser utilizados como bombeio óptico e com a finalidade de gerar o sinal óptico a ser amplificado. No caso de bombeio, em relação ao comprimento de onda, eles geralmente operam em 1480 nm, 980 nm, 800 nm e 670 nm. Em alguns casos, podem também ser utilizados, como bombeio, lasers no estado sólido e lasers à fibra de alta potência. Dos tipos de laser apresentados, os mais utilizados atualmente são os lasers semicondutores nos comprimentos de onda de 1480 nm e 980 nm. O laser semicondutor também pode ser utilizado na transmissão do sinal óptico a ser amplificado, com o comprimento de onda utilizado geralmente concordando com as janelas de baixa atenuação e dispersão da fibra óptica. Assim, pode-se concluir que um dos motivos do sucesso do EDFA, é dado, principalmente, pela disponibilidade comercial do laser semicondutor utilizado para realizar o bombeio do EDFA.

Um tipo de laser semicondutor que é bastante utilizado em EDFAs, é o que utiliza uma cavidade óptica do tipo FP (*Fabry Perot*) como cavidade ressonante [27]. Este tipo de laser possui uma estrutura relativamente simples, que é a de uma homojunção *p-n* na forma de um minúsculo paralelepípedo. Nas faces do dispositivo são formados dois espelhos semi-transparentes que constituem as superfícies semi-refletoras da cavidade. Estes espelhos são geralmente criados pelo processo de clivagem dos cristais, estabelecendo-se a reflexão pela diferença de índices de refração entre o semicondutor e o ar. Vale observar, que os espelhos devem ser parcialmente reflexivos (pelo menos um deles), para permitir que parte da luz gerada escape da estrutura e seja aproveitada externamente. A Fig. 4.3 representa uma

estrutura básica de uma cavidade ressonante FP, constituída por duas superfícies espelhadas paralelas.

O funcionamento do laser é também resultado de três processos, o de absorção, o de emissão estimulada e o de emissão espontânea. Sendo assim, no caso de existirem elétrons livres na banda de condução, existe a probabilidade desses elétrons retornarem à banda de valência, ocupando um estado quântico vazio. Ocorre, então, a recombinação de um elétron com uma lacuna, com o cancelamento do correspondente par elétron-lacuna. Portanto, para que este processo ocorra, o elétron precisa liberar a correspondente diferença de energia, que pode ser na forma de uma onda eletromagnética. Esse comportamento é conhecido como emissão espontânea ou eletroluminescência. Também é possível que ocorra a interação de elétrons com fótons presentes na estrutura, o que dá origem à chamada emissão estimulada. Para que ocorra uma emissão eficiente de luz, é necessário que um grande número de elétrons se recombine. Com isso, é interessante que exista uma quantidade elevada de elétrons livres na banda de condução do material, o suficiente para que uma inversão de população ocorra. Dessa forma, o laser deve ser polarizado diretamente, de forma que a corrente exceda o valor de limiar. Nestas condições, o número de portadores livres (elétrons) na banda de condução fica maior do que na banda de valência, aumentando a probabilidade de recombinação radiativa e, conseqüentemente, a eficiência da geração de fótons. Com a realimentação dos semi-espelhos e a partir de uma dada corrente de polarização, que pode-se chamar de corrente de limiar, o ganho consegue superar as perdas dentro da cavidade óptica e a luz começa a ser amplificada, com o número de fótons dentro da cavidade óptica começando a aumentar consideravelmente. A Fig. 4.3 mostra um diagrama que representa a estrutura de um laser semiconductor do tipo

Fabry-Perot, de homojunção  $p-n$ , ou seja, as regiões  $p-n$  do diodo são formadas com cristais do mesmo material.

Um outro tipo de laser semiconductor utilizado para caracterizar o EDFA, foi um laser com cavidade externa sintonizável. Através deste laser foi possível selecionar os comprimentos de onda que puderam ser utilizados como sinal a ser amplificado. Da mesma forma que um laser semiconductor FP, este tipo de laser possui uma cavidade óptica composta por uma junção P-N e um espelho (geralmente côncavo) paralelo às faces externas do cristal. Entretanto, em um dos lados do laser, encontra-se um espaço livre formado entre a extremidade da cavidade óptica e o espelho refletor. Este espaço também pode ser considerado como uma outra cavidade óptica cujas características podem influenciar o comprimento de onda de emissão do laser. Com o auxílio desta nova cavidade óptica, é possível alterar o comprimento de onda de emissão do laser através de um controle da distância entre o espelho refletor e a cavidade onde ocorre o ganho óptico interno [28].

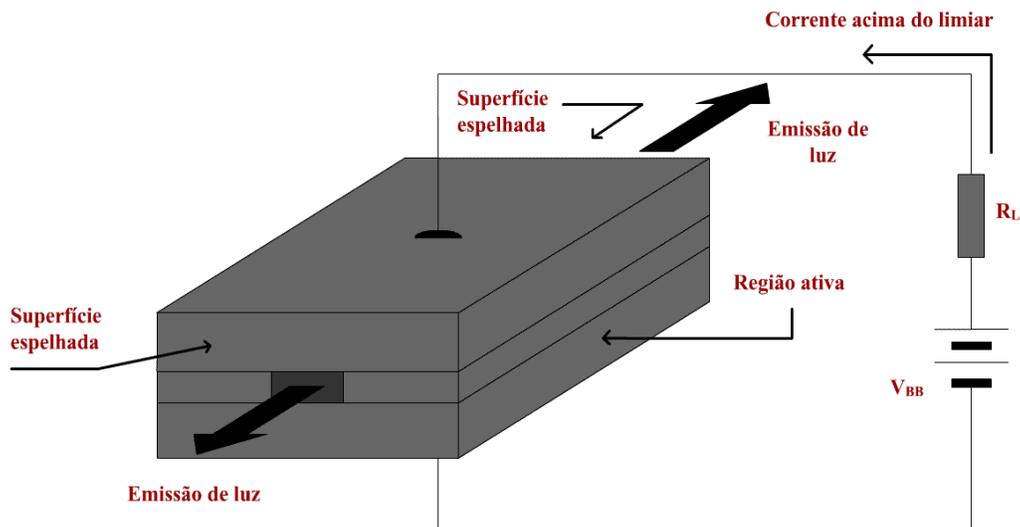


Fig. 4.3 – Estrutura básica de um laser semiconductor construído com uma homojunção  $p-n$

Alguns tipos de lasers sintonizáveis por cavidade externa, que utilizam uma *grade de Bragg* ao invés de um espelho refletor, podem fazer uma seleção do modo ressonante

através, por exemplo, de uma alteração do ângulo do espelho. Porém, quando se utiliza um espelho refletor ao invés da *grade de Bragg*, a seleção do comprimento de onda é realizada através de uma pequena variação da posição deste espelho, fazendo com que o comprimento da cavidade óptica seja alterado. De qualquer forma, em ambos os casos, é necessário que se faça um controle rigoroso da temperatura do dispositivo para que não haja flutuação da temperatura e, conseqüentemente, uma alteração indesejável do comprimento de onda. A Fig. 4.4 mostra um diagrama de blocos de um laser sintonizável pela cavidade externa, juntamente com uma representação do espectro de emissão do laser.

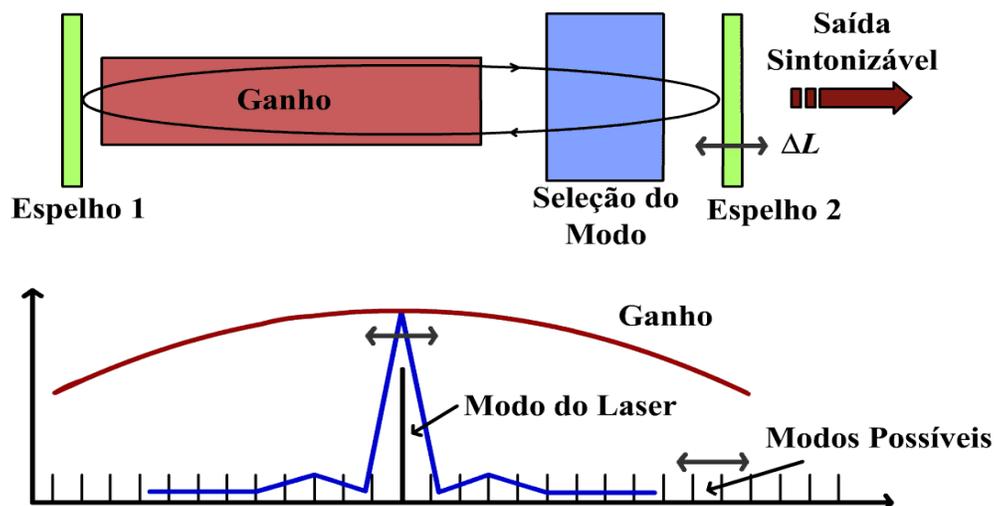


Fig. 4.4 – Diagrama em blocos de um laser sintonizável por cavidade externa e a representação do espectro de emissão do laser [28].

Esta figura mostra de forma simplificada os dois espelhos refletores, um bloco representando a cavidade óptica, onde ocorre o ganho óptico interno, e um outro bloco para representar a área cujo comprimento variável serve para sintonizar um determinado comprimento de onda. Assim, dependendo do comprimento total da cavidade óptica, o laser ressonará de forma a promover ganho em apenas um modo longitudinal, suprimindo assim, os modos restantes. Vale lembrar que quando se altera o tamanho da cavidade através de

um ajuste na posição do espelho  $\Delta L$  é possível selecionar a frequência central de ressonância.

### 4.3 Caracterização dos dispositivos

Nesta sessão serão apresentadas algumas características importantes dos dispositivos que constituem o circuito óptico. Com essas características, é possível realizar um cálculo aproximado da atenuação que o sinal ou o bombeio podem sofrer ao passarem por um determinado dispositivo. O primeiro dispositivo a ser abordado é o acoplador 3 dB que opera no comprimento de onda de 980 nm (*Coupler, Fused, 980*), produzido pela empresa JDS Uniphase. Este dispositivo possui uma configuração 2x2, ou seja, dois terminais de entrada e dois de saída. Um dos terminais de entrada, rotulado por P1, é chamado terminal comum, ou seja, é por essa porta que é injetado o sinal que será dividido. Uma característica importante desse dispositivo, é que ele possui uma razão de acoplamento de 50%, ou seja, metade da potência óptica do sinal injetado na entrada, teoricamente é transferido para a porta de saída P2 e a outra parte para a porta de saída P3. Porém, algumas medidas tiveram que ser realizadas com o intuito de se obter um valor real da perda por inserção do dispositivo. Dessa forma, foi necessário injetar um sinal óptico, cuja potência óptica fora definida previamente e compara-lo com a potência do sinal na saída do dispositivo. Dessa forma, foi observado uma perda por inserção de aproximadamente 3,2 dB em cada terminal.

Outro dispositivo utilizado é o acoplador WDM bombeio/sinal, operando no comprimento de onda de 980 nm (*WDM, Fused, 980 Pump/Signal*) da empresa JDS Uniphase. Este dispositivo, como visto anteriormente, tem a função de multiplexar e demultiplexar o sinal e o bombeio, de forma que consiga acoplá-los e desacoplá-los à EDF.

Este dispositivo possui uma configuração 1x2, ou seja, um terminal de entrada comum P1, e dois terminais de saída, P2 e P3, com P2 utilizado para multiplexar e demultiplexar os menores comprimentos de onda, que neste caso é o comprimento de onda de bombeio, 980 nm, e o terminal de saída P3, para multiplexar e demultiplexar os maiores comprimentos de onda, onde o sinal geralmente pode variar entre 1528 e 1605 nm. Este dispositivo foi caracterizado da mesma forma que o acoplador 3 dB; com isso, foi obtido uma perda por inserção máxima de 0,2 dB.

O circulador óptico também é utilizado em algumas topologias de EDFA. O modelo utilizado é o circulador óptico não sensível à polarização que pode operar com altas potências ópticas (*Circulator, Compact, High Power*) da empresa JDS Uniphase. Este dispositivo tem a função de transferir o sinal no comprimento de onda que pode variar entre 1530 nm a 1620 nm do terminal P1 para o P2 e do terminal P2 para o P3. Entre os terminais P1 e P3 ocorre uma isolação de aproximadamente 50 dB, impossibilitando assim a passagem do sinal entre esses terminais. A perda por inserção máxima medida é cerca de 0,6 dB quando o sinal atravessa o dispositivo no sentido de P1 para P2 e do terminal P2 para o P3.

Um isolador óptico deve ser usado em determinados pontos do circuito óptico para minimizar os efeitos da reflexão do sinal e o espalhamento no sentido reverso de algum tipo de estado de polarização. O modelo utilizado é o isolador para fibra independente da polarização (*Polarization-Insensitive Fiber Isolators*) da empresa JDS Uniphase. Este dispositivo opera no comprimento de onda de 1550 nm, possui uma isolação mínima de 38 dB entre os terminais e uma perda por inserção medida de aproximadamente 0,25 dB.

## 4.4 Descrição dos equipamentos

Para descrever como foram caracterizados os dispositivos utilizados no circuito óptico do EDFA, torna-se necessário, primeiramente, relatar quais foram os equipamentos utilizados e qual a funcionalidade de cada um deles. Com isso, é possível entender como os resultados que serão apresentados no próximo capítulo foram obtidos. Dentre os equipamentos utilizados na elaboração deste trabalho, os principais foram: uma fonte de corrente com controle de temperatura ILX Lightwave, modelo LDC-3724B, um medidor de potência óptica (*Power Meter*) da Anritsu, modelo ML910A, um analisador de espectro óptico da Anritsu, modelo MS96A, e um atenuador óptico variável da Agilent, modelo 8163B.

Para que o laser de bombeio pudesse ser polarizado adequadamente e, além disso, realizar o controle de temperatura interna do dispositivo, foi necessário utilizar uma fonte de corrente com controle de temperatura ILX Lightwave, modelo LDC-3724B. Esta fonte de corrente realiza o controle de temperatura com a ajuda de sensores que podem ser pré-definidos para uma determinada aplicação. Porém o mais usual é a utilização de termistores para verificar as alterações de temperatura. Os termistores são componentes sensíveis à variação de temperatura, cuja principal função é apresentar uma alteração da resistência elétrica quando, neste caso, o encapsulamento do laser sofre mudança na temperatura. Outro fator importante para a escolha do tipo de fonte de corrente é a possibilidade de ajustar uma faixa de valores de operação para a corrente elétrica e para a temperatura. Com isso, torna-se mais seguro a polarização do laser de bombeio, elevando a vida útil do mesmo.

Outro equipamento utilizado para realizar algumas medições nesta parte experimental foi o medidor de potência. Através dele, foi possível obter, com certa precisão, a potência óptica emitida do laser responsável pelo bombeio ou a potência do sinal a ser amplificado. Para realizar medidas de potência óptica com este equipamento, deve-se, primeiramente, selecionar qual o tipo de fotodetector mais adequado. Esta escolha depende do comprimento de onda do sinal. Isso se deve ao fato de que cada fotodetector possui uma maior sensibilidade para um determinado comprimento de onda. Com isso, foi necessário utilizar dois tipos de fotodetectores, um para uma faixa de comprimento de onda que varia entre 750 nm e 1800 nm, Anritsu MA9302A, e outro com faixa de operação entre 750 nm e 1700 nm, Anritsu MA9301A, sendo que este modelo possui uma sensibilidade maior para sinais com potência óptica relativamente baixa. Além disso, é necessário ajustar o equipamento para um valor aproximado do comprimento de onda do sinal óptico a ser medido, afim de ajustar a largura de banda do filtro óptico do dispositivo.

Com o objetivo de promover variações de potência óptica do sinal a ser amplificado, foi necessária a utilização de um atenuador óptico variável Agilent, modelo 8163B. Através deste aparelho foi possível obter valores bem precisos para o sinal que, posteriormente, era lançado na entrada do EDFA. Este tipo de atenuador é composto de dois conectores do tipo FC/APC (*Fiber Connector / Angled Physical Contact*), sendo um para a entrada do sinal a ser amplificado e, a outra, para a saída do sinal óptico. Com isso, através de um controle digital de variação da potência óptica, é possível obter valores bem precisos da potência óptica do sinal na saída do equipamento. Além disso, este equipamento permite atenuar o sinal óptico até valores próximos de 60 dB.

Um dos equipamentos utilizados na parte experimental, e de fundamental importância para a coleta dos dados na parte experimental, é o analisador de espectro

óptico. Com o auxílio desse equipamento foi possível obter, com boa precisão, o comprimento de onda e a potência óptica do sinal. Assim, foi possível verificar as alterações da potência óptica e fazer uma análise do espectro de emissão do érbio. O modelo utilizado possui uma faixa de varredura entre 800 nm e 1600 nm, com uma resolução espectral de até 0,1 nm. Durante as medições, foi utilizado um computador conectado ao analisador de espectro óptico, com o intuito de se obter os gráficos de espectro do sinal em análise.

Para que o laser de bombeio possa ser polarizado adequadamente, além dos ajustes na fonte de corrente e no controle de temperatura, é necessário que se faça a conexão desta fonte aos terminais do laser de bombeio. Assim, para que as conexões possam ser efetuadas com segurança, foi necessário que o laser de bombeio fosse fixado dentro de uma caixa de metal com o objetivo de proteger o dispositivo e dissipar parte da energia térmica gerada durante a operação do mesmo. Para essa fixação, utilizou-se uma pasta térmica entre a base do dispositivo e a superfície metálica da caixa no intuito de melhorar a dissipação de calor gerado pelo laser. Dois cabos foram responsáveis pela conexão entre a fonte de corrente e o laser de bombeio: um dos cabos possui um conector do tipo DB-9, e se refere ao controle de temperatura. Outro, possui um conector do tipo DB-15, e tem a função de polarizar o laser. Além disso, através deste cabo é possível fazer o aterramento do laser. Com o intuito de facilitar estas conexões, foi elaborada uma placa de circuito impresso com trilhas distintas para cada conexão. Com isso, os terminais dos dois conectores foram adequadamente soldados à placa de circuito impresso, e os terminais do laser também foram soldados nas outras extremidades do laser. Após todas as conexões terem sido feitas e testadas, a placa, juntamente com o laser, foram fixadas no interior da caixa metálica.

Para que se possa ter controle da potência óptica de saída do laser, foi necessário levantar a curva de resposta do laser, para que fique claro o nível de potência óptica que dispomos para o bombeio, bem como os níveis de corrente necessários para a operação do EDFA em várias condições de ganho. Estes valores foram medidos na saída do primeiro acoplador WDM, ou seja, no ponto onde o bombeio é acoplado à EDF. Sendo assim, a Fig. 4.5 mostra a curva experimental de potência óptica em função da corrente de alimentação do laser. Para este laser, observou-se uma corrente de limiar em aproximadamente 11 mA, ou seja, quando a corrente atinge este valor, o ganho na cavidade do laser consegue suplantar as perdas internas e, conseqüentemente, começa a ocorrer emissão de luz.

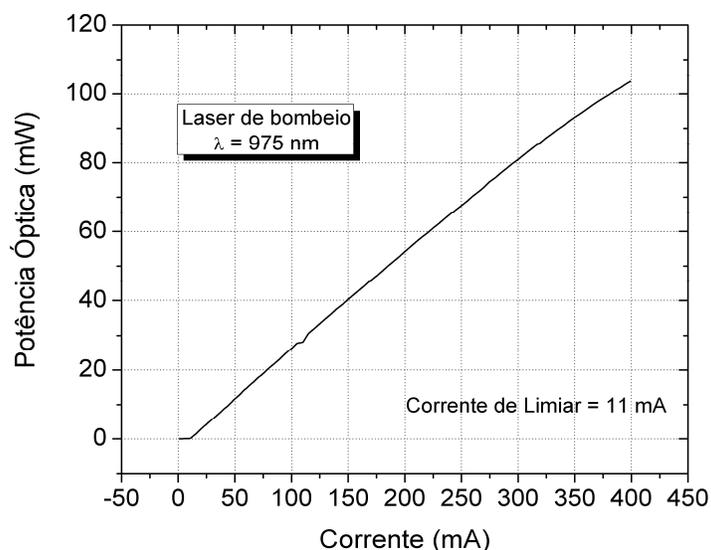


Fig. 4.5 – Curva da potência de saída do laser em função da corrente de alimentação.

## 4.5 Descrições das topologias

Para realizar a caracterização básica de um amplificador óptico foi necessário utilizar uma montagem experimental como mostrado na Fig. 4.6. Esta montagem consiste de um laser FP sintonizável operando na região de 1550 nm (fornece o sinal a ser amplificado), um laser semiconductor para o bombeio da EDF, isoladores ópticos (evitam acoplamento de retro-reflexões e sinais indesejados), um atenuador óptico variável,

acopladores WDM (acoplamento de sinal óptico e bombeio na EDF) e um analisador de espectro óptico (OSA – *Optical Spectrum Analyzer*). De acordo com este diagrama experimental, após o laser responsável pelo sinal óptico a ser amplificado é inserido um atenuador óptico variável com o objetivo de alterar o nível de potência do sinal. Em seguida, é adicionado ao circuito óptico um isolador óptico para que reflexões espúrias não possam danificar o laser semiconductor.

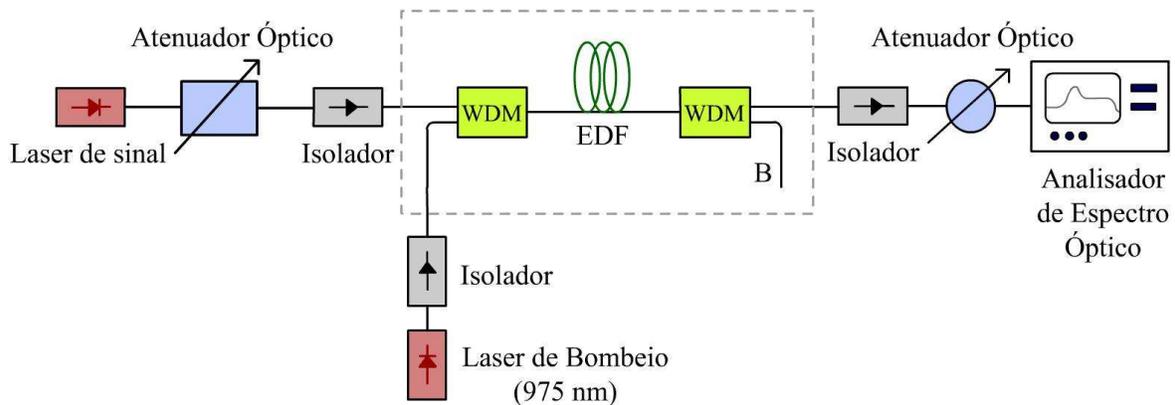


Fig. 4.6 – Montagem experimental para as configurações básicas e para as que possuem reflexão de bombeio.

Outro fato importante é que quando se deseja caracterizar um amplificador óptico, deve-se ficar atento com a potência de saída do sinal, pois, a mesma pode apresentar valores relativamente elevados. Devido a isso, foi necessário que se realizasse a atenuação do sinal óptico antes do mesmo ser acoplado ao fotodetector do analisador de espectro Anritsu, modelo MS96A. Sendo assim, após o isolador óptico que se encontra na saída do EDFA, foi necessário adicionar um outro isolador e um atenuador óptico variável. Esse conjunto possui uma atenuação total de 24 dB devido ao atenuador óptico e às respectivas perdas por inserção, também presentes nas conexões. Apesar de todas as conexões utilizarem conectores do tipo FC/APC, ainda assim foi observada uma perda de

aproximadamente 1 dB em cada conexão. Todas essas perdas foram consideradas no momento dos cálculos do ganho óptico e figura de ruído.

Para as topologias que possuem o bombeio no sentido contra-propagante, o conjunto isolador óptico e laser de bombeio deve ser acoplado ao terminal B, situado no segundo acoplador WDM. Porém, quando um bombeio bi-direcional é utilizado, é necessário acoplar o conjunto isolador óptico e laser de bombeio primeiramente em um acoplador 3 dB. Este, por sua vez, tem os seus terminais de saída conectados aos dois acopladores direcionais WDM. Com isso, é possível obter a mesma potência óptica nos dois terminais de saída utilizando apenas um laser de bombeio.

No caso das topologias que necessitam de uma reflexão do bombeio, a princípio foram realizadas medidas para obter os valores da potência óptica residual do bombeio. Em seguida, utilizou-se um dos terminais do acoplador 3 dB, que serve para dividir a potência óptica do bombeio e, então, conectou-se a um atenuador óptico variável. A partir daí, ajusta-se a potência de bombeio para que a saída do atenuador possua os mesmos valores da potência de bombeio residual. Com isso, é possível simular uma reflexão de bombeio sem a necessidade de utilizar duas fontes ópticas. Vale salientar que foram verificados os valores da potência óptica residual para todas as alterações de potência do sinal de entrada e potência de bombeio.

Para as topologias que utilizam a reflexão de sinal é necessário fazer uma adaptação no circuito óptico para que o sinal possa ser novamente injetado na fibra dopada. Sendo assim, foi inserido um circulador óptico na saída do segundo acoplador óptico, conforme apresentado na Fig. 4.7. Esse circulador óptico é conectado pela porta 2 ao terminal de saída do acoplador WDM, que opera no comprimento de onda do sinal a ser amplificado.

Com isso, o sinal é enviado à porta 3 que, por sua vez, esta conectada à porta 1. Assim, é possível fazer com que o sinal seja injetado novamente na fibra dopada, com perdas relativamente baixas. As perdas por inserção e as perdas nos conectores somam aproximadamente 1,2 dB. Estas perdas foram levadas em consideração no momento do cálculo do ganho óptico. Um outro circulador óptico foi utilizado na entrada do primeiro acoplador WDM com o intuito de separar os sinais de entrada e de saída em caminhos distintos.

Outras configurações de EDFAs podem ser obtidas alternando determinados dispositivos no circuito óptico. Para uma topologia que possui reflexão de sinal e bombeio contra-propagante, é necessário que o conjunto isolador óptico e laser de bombeio seja acoplado ao terminal B. É possível, também, utilizar um bombeio bi-direcional ou até mesmo uma reflexão do bombeio para as topologias que utilizam a reflexão do sinal.

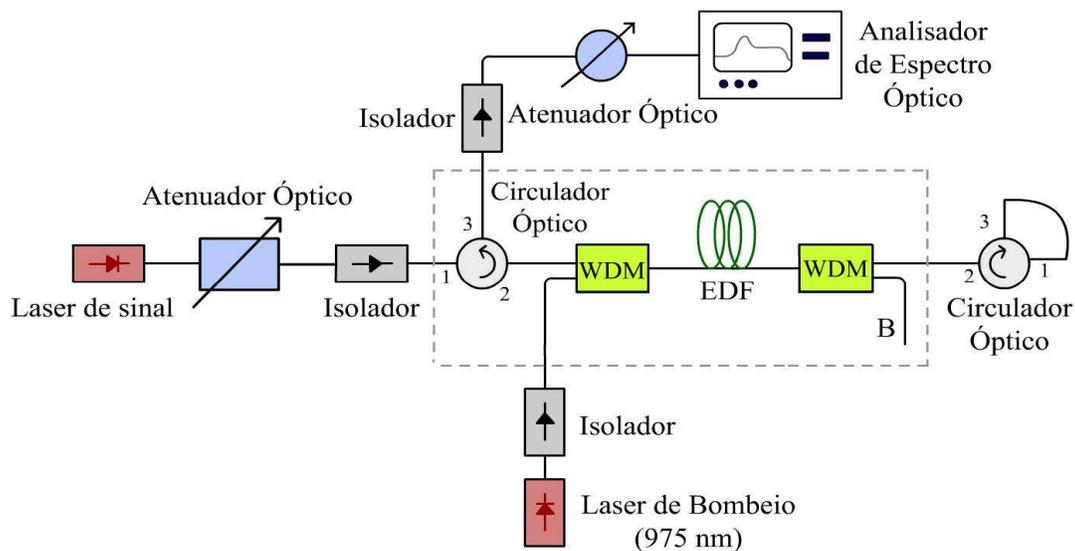


Fig. 4.7 - Montagem experimental para as configurações que possuem reflexão do sinal.

## 4.5 Conclusão

Este capítulo apresentou pontos relevantes a respeito do projeto opto-eletrônico. Para tanto, foi apresentada uma descrição do princípio de funcionamento dos componentes utilizados na composição do circuito óptico. Como nas montagens de algumas topologias, foram realizadas modificações no circuito óptico, e este capítulo apresentou estas adaptações e quais seriam as possíveis alterações das características dos circuitos ópticos. Deste modo, foram necessárias diversas medições de calibração, com o intuito de identificar as perdas por inserção e perdas nos conectores existentes em cada dispositivo, para que estas perdas pudessem ser consideradas nos cálculos de ganho óptico e figura de ruído. Por fim, o capítulo apresentou os equipamentos utilizados para obter as medidas de caracterização de dispositivos e, também, na obtenção de dados para análise das topologias.



# Capítulo 5

## Análise dos Resultados

### 5.1 Introdução

Os resultados obtidos através das medições realizadas para diversas topologias de EDFAs serão apresentados e analisados neste capítulo. Primeiro serão apresentados os dados referentes às topologias consideradas como básicas, que são aquelas que deram impulso ao desenvolvimento do amplificador. Em seguida, serão apresentados os dados referentes às topologias do tipo reflexivas, que englobam as que possuem a reflexão de bombeio, a reflexão do sinal e a reflexão de sinal e bombeio.

Para todas as topologias, foram realizadas medições utilizando, individualmente, dois valores de comprimentos de onda para o sinal óptico de entrada, 1537 nm e 1563,8 nm, enquanto que, para o sinal de bombeio, foi sempre utilizado um laser cujo comprimento de onda é de 980 nm. A potência óptica do bombeio utilizada nas topologias também foi sempre alterada com o objetivo de se obter uma análise mais detalhada da resposta do EDFA. Três diferentes níveis de potência foram utilizados durante as medições: 5 mW, 10 mW e 20 mW, sendo que estes valores foram escolhidos, para que a potência óptica emitida pelo laser não danifique nenhum dispositivo do circuito óptico. Também foram alterados os valores da potência óptica do sinal a ser amplificado. Os valores de potência óptica foram: -2 dBm, -7 dBm, -12 dBm, -17 dBm, -22 dBm, -27 dBm, -32 dBm, -37 dBm, -42 dBm, -47 dBm e -52 dBm. Outro parâmetro que também foi modificado dentro das diferentes topologias de EDFA foi o comprimento da EDF. Ao todo, foram

realizadas medidas para cinco diferentes segmentos de EDF, sendo eles de comprimento de 3,6 m, 6 m, 8,2 m, 10,15 m e 14,2 m.

## **5.2 Topologia co-propagante**

A primeira topologia a ser inspecionada é a que utiliza o bombeio no sentido co-propagante em relação ao sinal. No intuito de facilitar a visualização e a interpretação dos dados, a maior parte dos resultados para esta topologia, bem como para as demais, será apresentada na forma de gráficos. Os primeiros deles relacionam o ganho óptico produzido pelo EDFA ao sinal de entrada, tendo a potência de bombeio como parâmetro. A faixa de valores de potência de entrada de sinal utilizada nas medições foi de -52 dBm a -2 dBm, em intervalos de 5 dB. Para cada um dos valores de potência de bombeio e cada um dos valores de potência de sinal, determinou-se o respectivo valor de ganho óptico. Considerando-se que o ganho do EDFA também pode variar em relação aos dois comprimentos de onda do sinal de entrada que foram adotados, os gráficos de ganho versus potência de entrada foram apresentados aos pares e na mesma escala, para os dois comprimentos de onda de sinal adotados, como na Fig. 5.1. Neste caso, o comprimento de EDF utilizado foi de 3,6 m. As mesmas situações e condições aplicadas para as medições referentes à EDF de 3,6 m foram mantidas para os demais segmentos de fibra dopada. Os gráficos de ganho óptico para as fibras de 6 m, 8,2 m, 10,15 m e 14,2 m são apresentados, respectivamente, pelas Fig. 5.2, 5.3, 5.4 e 5.5.

Em algumas figuras pode-se perceber que as curvas de ganho apresentam certa inclinação quando a potência do sinal de entrada é maior que cerca de -15 dBm. Esta inclinação pode indicar que o EDFA está operando sob regime de saturação. Com isso, a eficiência do amplificador é prejudicada devido à excessiva quantidade de fótons do sinal

de entrada que consome grande parte dos portadores no nível metaestável, fazendo com que estes decaiam rapidamente para o estado fundamental.

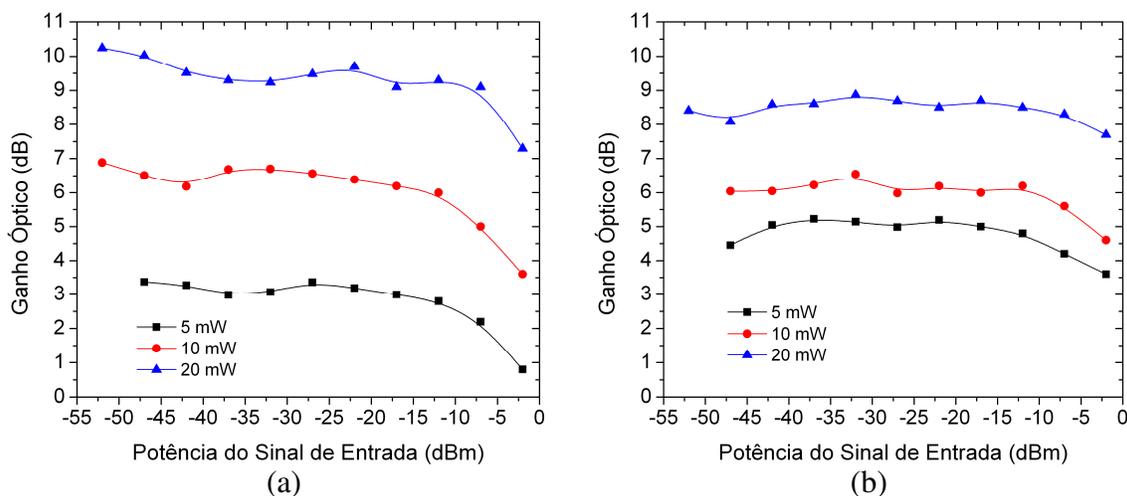


Fig. 5.1 – Ganho óptico do EDFA co-propagante em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 3,6 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.

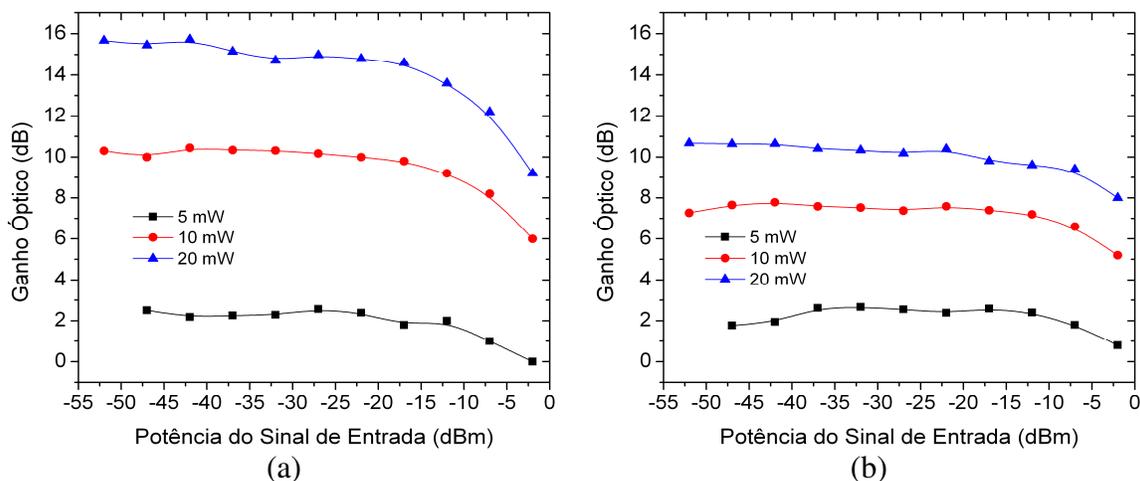


Fig. 5.2 – Ganho óptico do EDFA co-propagante em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 6 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.

Para todas as figuras, percebe-se que, em particular, quando a potência do bombeio é da ordem de 20 mW, a amplificação do sinal no comprimento de onda de 1537 nm é, em geral, mais eficiente se comparada à que se obtém para o comprimento de onda de 1563,8

nm. Esse fato pode ser explicado pela resposta variável que as seções transversais de emissão e absorção dos íons de érbio têm em relação ao comprimento de onda do sinal aplicado [29].

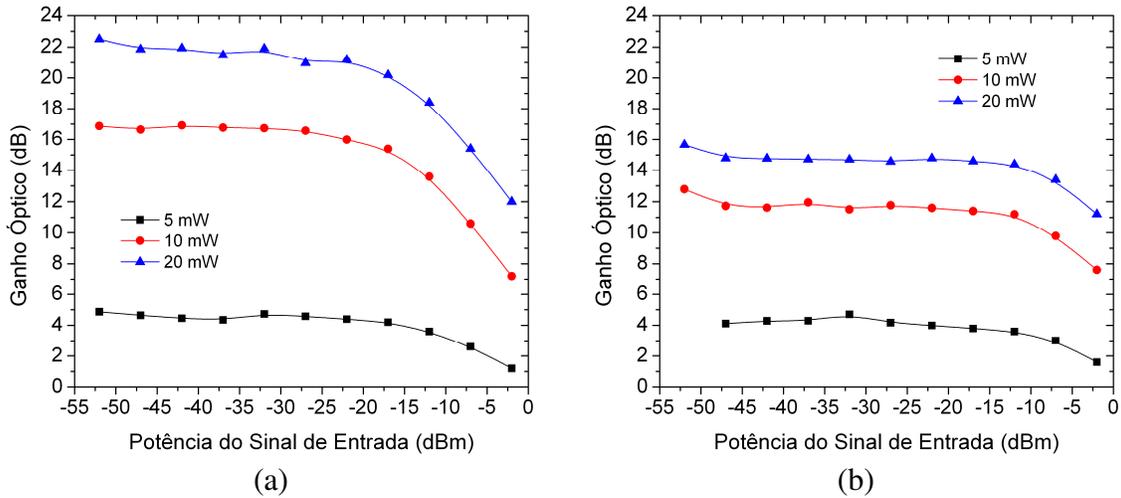


Fig. 5.3 – Ganho óptico do EDFA co-propagante em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 8,2 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.

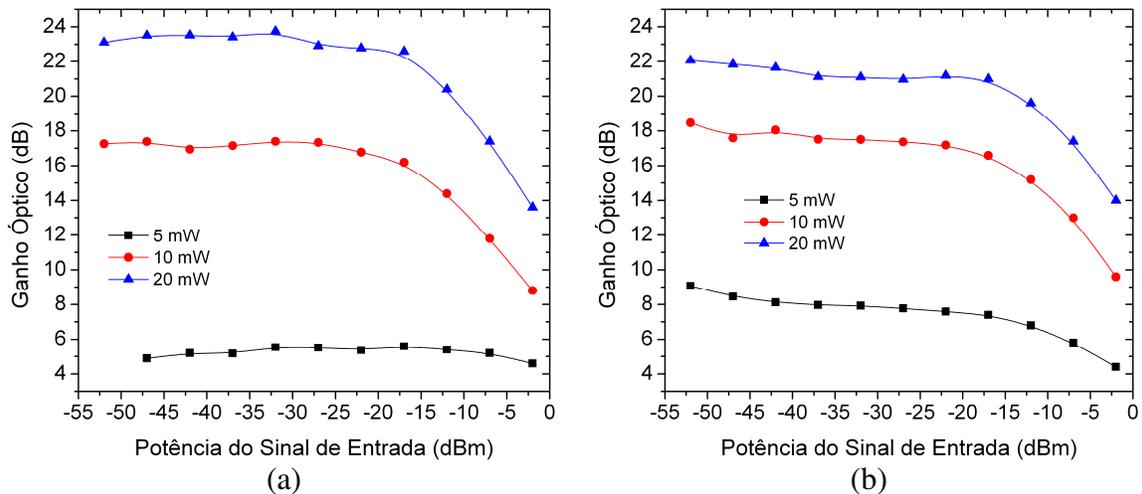


Fig. 5.4 – Ganho óptico do EDFA co-propagante em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 10,15 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.

Como o sinal de 1537 nm se encontra próximo ao pico de emissão, uma quantidade maior de portadores  $Er^{3+}$  é estimulada a decair pelos fótons do sinal neste comprimento de onda, produzindo um ganho maior que no caso de 1563,8 nm, mais afastado desse pico da

curva de emissão. Por exemplo, para bombeio em 20 mW, os valores de ganho para 1563,8 nm são menores se comparados aos do comprimento de onda de 1537 nm.

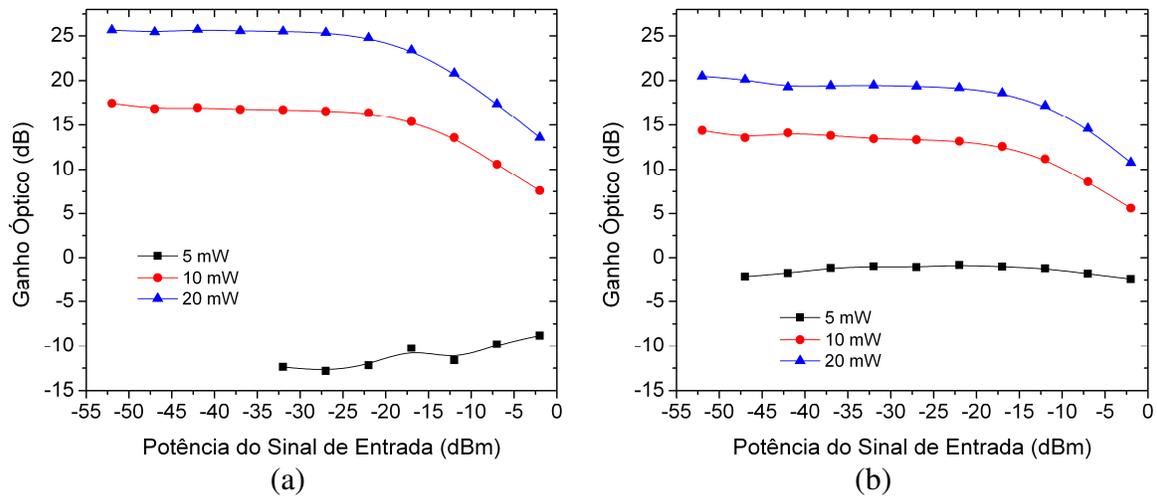


Fig. 5.5 – Ganho óptico do EDFA co-propagante em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 14,2 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.

Para potências de bombeio menores (5 mW ou 10 mW), observou-se uma razoável dependência do ganho com o comprimento da EDF. Se uma fibra possuir um comprimento excessivo, a potência óptica de bombeio pode não conseguir inverter a população dos íons no final da fibra. Conseqüentemente, o sinal de entrada pode ser absorvido ao invés de amplificado. Sendo assim, o quanto este sinal será absorvido dependerá, entre outras coisas, do seu próprio comprimento de onda. Como a resposta da seção transversal de absorção dos íons de érbio ao redor de 1537 nm possui uma amplitude maior que aquela por volta de 1563,8 nm, a taxa de absorção é consideravelmente maior para 1537 nm. Isso pode ser observado nos gráficos com EDF de comprimentos 10,15 m e 14,2 m, onde o ganho em 1563,8 nm possui valores menores que os de 1537 nm. Vale salientar que, quando se utiliza a potência de bombeio em 5 mW, pode ocorrer a atenuação do sinal para EDF relativamente longas, como é o caso para o comprimento de 14,2 m.

Para se entender melhor como o ganho se comporta com a variação do comprimento da EDF, realizou-se uma comparação entre os ganhos do EDFA co-propagante para os diferentes comprimentos de EDF analisados, considerando-se o bombeio em 10 mW e 20 mW, e os comprimentos de onda do sinal de entrada de 1537 nm e 1563,8 nm. As Fig. 5.6 (a) e (b) apresentam os gráficos referentes ao bombeio de 10 mW. Para esta configuração, nem sempre o ganho óptico é maior para as EDFs que possuem comprimentos mais longos. A fibra de comprimento 10,15 m possui um ganho superior para a maioria dos pontos medidos quando comparado ao que foi conseguido para os outros comprimentos de fibra. A princípio, poderia se esperar que a fibra com maior comprimento possuísse o maior ganho óptico. Porém, o bombeio pode não estar sendo capaz de popular o nível metaestável de forma eficiente, principalmente na parte final da fibra, de maneira que o sinal pode estar sendo atenuado por sua absorção pelos íons de  $Er^{3+}$ . Outro fato observado é a proximidade das curvas de ganho das EDFs com comprimento de 8,2 m, 10,15 m e 14,2 m quando o sinal de entrada está em 1537 nm. Neste caso, acredita-se que o comprimento da EDF que fornece o maior ganho óptico se localiza nesta faixa de comprimentos de EDF. Sendo assim, mesmo com comprimentos de EDF maiores, não seria possível obter uma amplificação mais eficiente com esta potência de bombeio. Para a obtenção das Fig. 5.7 (a) e (b), os procedimentos acima foram repetidos, porém com a potência de bombeio em 20 mW. O primeiro ponto a ser observado foi o de que o valor do ganho óptico subiu com o bombeio de 20 mW, como era esperado. O sinal com comprimento de onda de 1537 nm também apresentou, em geral, ganho óptico maior que aquele para 1563,8 nm. Porém, vale salientar que, para 1537 nm, a EDF de 14,2 m foi a que obteve o maior ganho óptico, ao passo que, em 1563,8 nm, a EDF de 10,15 m foi a que proporcionou o maior ganho. Para o

caso de 1563,8 nm de EDF de 14,2 m, o bombeio não foi capaz de provocar uma inversão eficiente ao longo de toda a EDF, resultando em absorção ao invés de amplificação do sinal óptico no final da EDF.

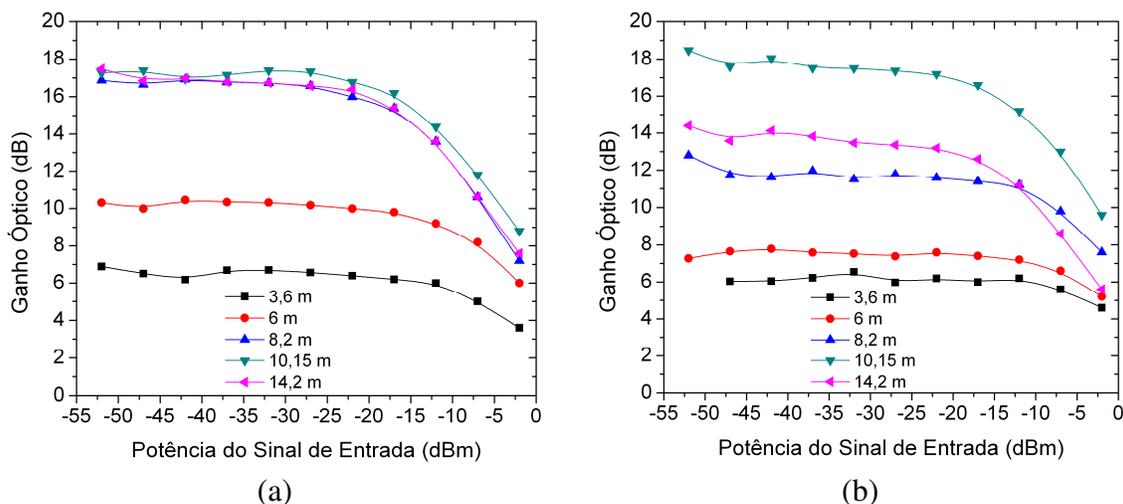


Fig. 5.6 – Ganho óptico do EDFA co-propagante em função da potência de entrada de sinal, tendo o comprimento da EDF como parâmetro: bombeio em 10 mW e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.

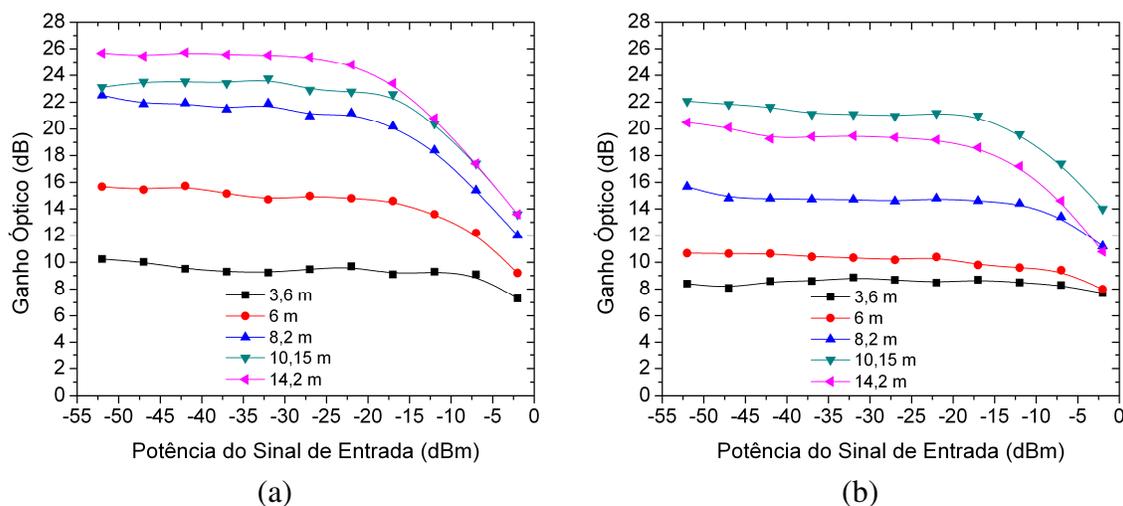


Fig. 5.7 – Ganho óptico do EDFA co-propagante em função da potência de entrada de sinal, tendo o comprimento da EDF como parâmetro: bombeio em 20 mW e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.

Uma outra importante característica do EDFA que deve ser analisada é a contribuição de ASE para diferentes valores de potência de bombeio e comprimentos de

EDF. Sabe-se que a ASE está presente em todos os tipos de topologia, porém, é interessante saber qual o nível de potência de ASE que cada tipo de topologia apresenta, para então fazer a escolha da topologia que se adequará às características de um dado sistema. A contribuição de ASE foi visualizada através de medidas do espectro de emissão do EDFA por um analisador de espectro óptico. Neste caso, as medidas foram feitas sem o acoplamento de um sinal à entrada do EDFA e adotaram-se os valores de bombeio de 5 mW, 10 mW e 20 mW, além das diferentes amostras de EDF disponíveis. As Fig. 5.8 (a), (b), (c), (d) e (e) apresentam os espectros de ASE<sup>+</sup> da topologia de EDFA com bombeio co-propagante, respectivamente, para as EDF de 3,6 m, 6 m, 8,2 m, 10,15 m e 14,2 m, tendo a potência de bombeio como parâmetro. Através dessas figuras observa-se que, para quase todos os comprimentos de EDF que foram utilizados nos experimentos, os espectros de ASE para a potência de bombeio de 5 mW não apresentam o formato teórico esperado. Em outras palavras, pode-se perceber que o pico de 1530 nm não é formado, o que indica uma baixa quantidade de emissões espontâneas ocorrendo no interior da fibra devido à baixa potência de bombeio utilizada. Para o caso da EDF de 14,2 m, praticamente se observa apenas o ruído de fundo do analisador, pois o bombeio óptico é praticamente consumido nos primeiros metros de fibra e as emissões espontâneas geradas são reabsorvidas pela fibra dopada. Para o bombeio em 10 mW e 20 mW, as curvas de espectro de ASE que apresentam as maiores amplitudes foram àquelas produzidas quando o EDFA utilizou os comprimentos de EDF de 8,2 m e 10,15 m. Apesar das fibras com comprimentos menores possuírem uma quantidade elevada de portadores no nível metaestável, o tamanho da fibra limitou a quantidade de emissões e, conseqüentemente, o ganho óptico.

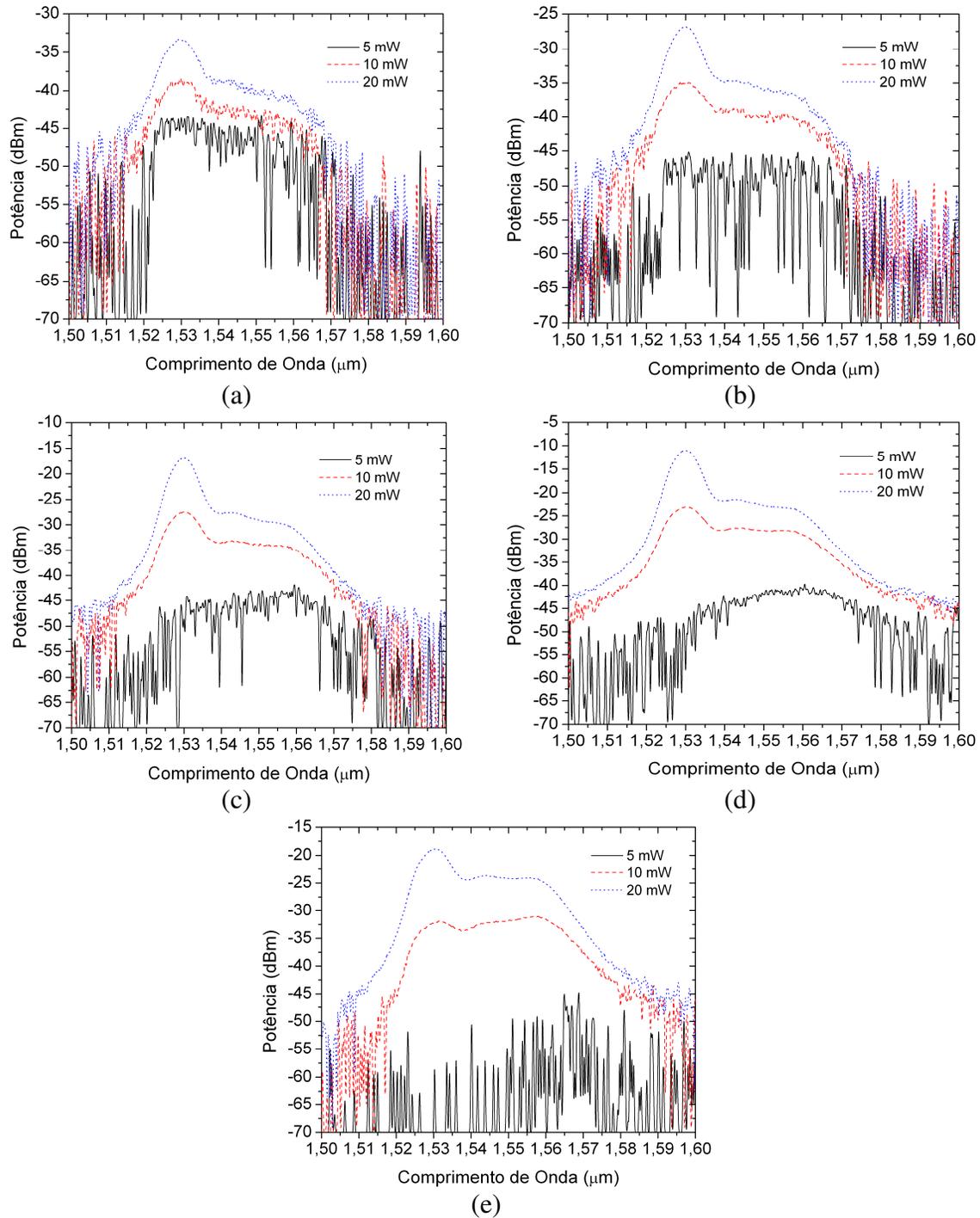


Fig. 5.8 – Espectro da ASE<sup>+</sup> para o EDFA co-propagante, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostras de EDF (a) 3,6 m, (b) 6 m, (c) 8,2 m, (d) 10,15 m e (e) 14,2 m.

A Fig. 5.9 (a) e (b) apresenta os espectros de saída do EDFA co-propagante para uma fibra com 10,15 m de comprimento, considerando-se a amplificação de um canal em

diferentes comprimentos de onda (respectivamente, 1537 nm e 1563,8 nm). Neste caso, o sinal de entrada possui -32 dBm e o bombeio é tomado como parâmetro. Sem levar em consideração o sinal, os espectros são semelhantes àqueles mostrados na Fig. 5.8 (d), sugerindo que a baixa potência do sinal de entrada não é suficiente para perturbar a formação da ASE.

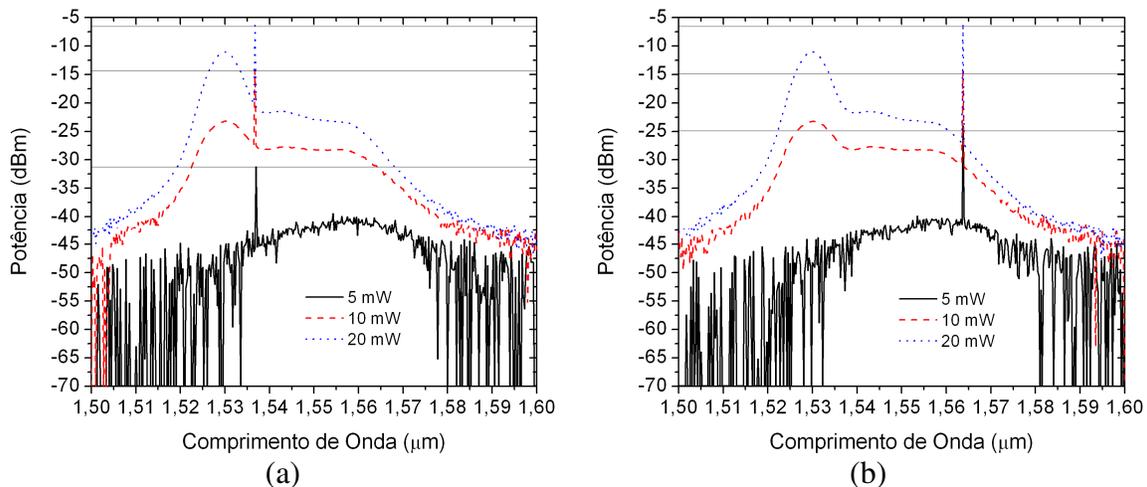


Fig. 5.9 – Espectro da ASE<sup>+</sup> para o EDFA co-propagante, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 10,15 m, potência de entrada do sinal de -32 dBm e comprimento de onda (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.

Já nas Fig. 5.10 (a) e (b), mostram-se os espectros de saída do EDFA com a potência de bombeio fixada em 20 mW e a potência do sinal de entrada utilizada como parâmetro. Quando o sinal de entrada possui valor de -2 dBm, o espectro é, de certa forma, deformado se comparado ao espectro das Fig. 5.8. Isto ocorre pois a maioria dos portadores que estão no nível excitado estão sendo estimulados pelos fótons do sinal de entrada, pressupondo uma operação do EDFA sob o regime de saturação. Quando o sinal de entrada possui a potência de -32 dBm ou menor, o espectro se assemelha ao espectro clássico de ASE. Isso ocorre, pois, nem todos os portadores excitados estão sendo utilizados na amplificação do sinal, decaindo por emissões espontâneas e produzindo ASE.

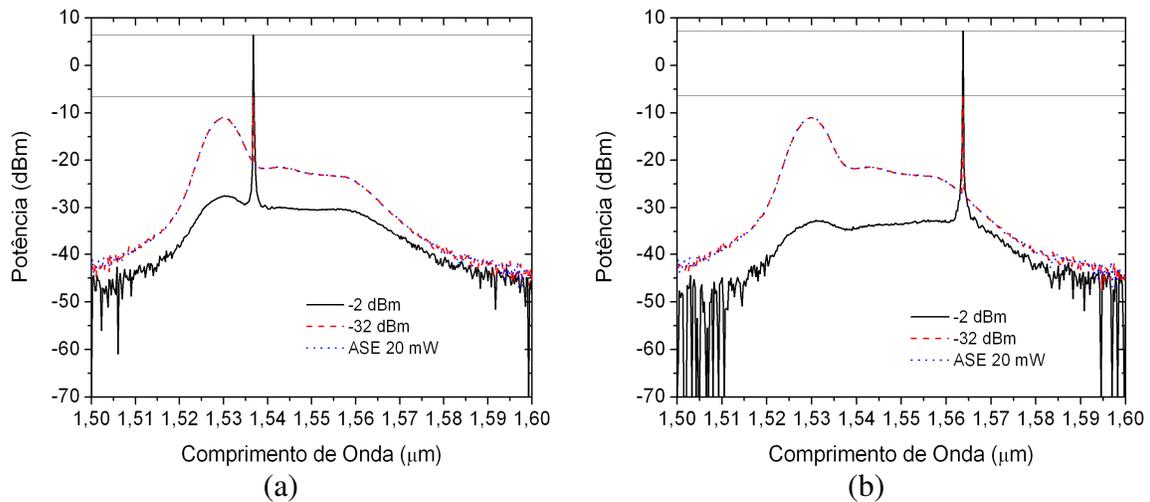


Fig. 5.10 – Espectro da ASE<sup>+</sup> para o EDFA co-propagante, tendo a potência de entrada do sinal como parâmetro: amostra de EDF de 10,15 m, potência de bombeio de 20 mW e comprimento de onda (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.

### 5.3 Topologia contra-propagante

A segunda topologia a ser analisada é a que utiliza o bombeio contra-propagante ao sinal. Como visto no Capítulo 3, esta topologia apresenta o laser de bombeio acoplado ao segundo WDM, bem próximo à saída do EDFA. Dessa forma, as características de amplificação do amplificador óptico apresentam comportamentos diferentes, se comparados aos da topologia anterior. O fato do bombeio óptico ser acoplado à fibra dopada no sentido oposto ao do sinal a ser amplificado, faz com que uma quantidade maior de portadores sejam excitados para o nível metaestável, principalmente, nesta região da fibra. Com isso, tem-se uma probabilidade menor do sinal de entrada saturar a saída do amplificador e, conseqüentemente, pode-se obter um ganho óptico com valores maiores do que para a topologia anterior.

Da mesma forma que na seção anterior, os dados serão apresentados na forma de gráficos. Sendo assim, as Fig. 5.11, 5.12, 5.13, 5.14 e 5.15 mostram as curvas de ganho

óptico em função da potência do sinal de entrada, tendo o bombeio óptico como parâmetro. A princípio, as figuras serão apresentadas aos pares, sendo que, a primeira figura contempla o sinal de entrada em (a) 1537 nm e a outra o sinal em (b) 1563,8 nm. Além disso, serão apresentadas as figuras para todos os comprimentos de EDF utilizados.

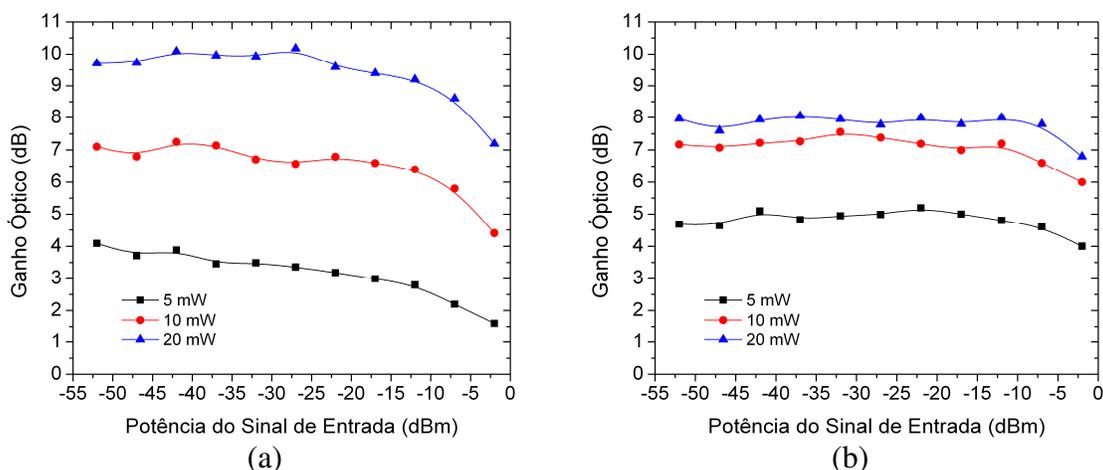


Fig. 5.11 – Ganho óptico do EDFA contra-propagante em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 3,6 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.

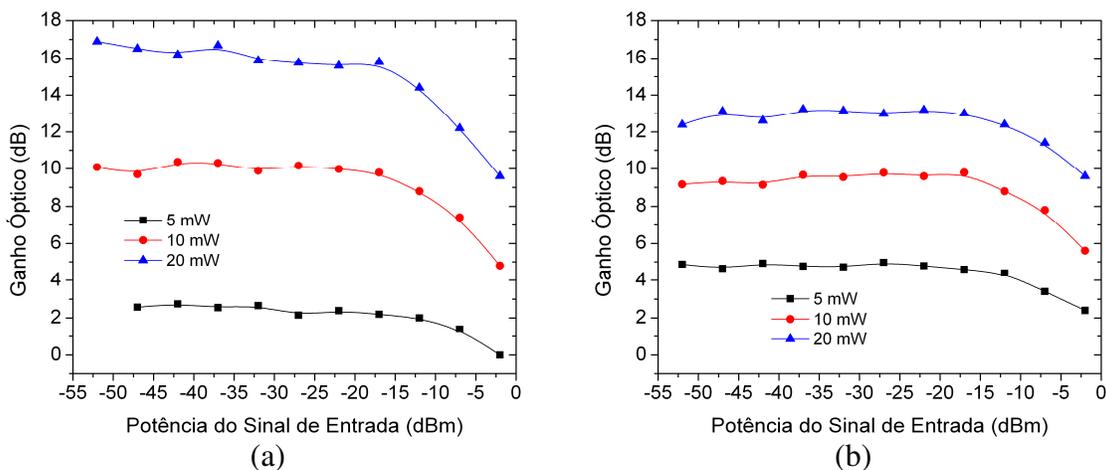


Fig. 5.12 – Ganho óptico do EDFA contra-propagante em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 6 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.

Analisando as figuras, percebe-se que, para um bombeio óptico em 5 mW ou 10 mW, as curvas de ganho óptico que utilizam comprimento de onda em 1563,8 nm possuem

valores de ganho relativamente maiores se comparado ao comprimento de onda de 1537 nm, com exceção das EDFs que possuem 6 m e 8,2 m. Neste caso, o bombeio óptico pode não ser capaz de promover uma inversão da população de portadores eficiente ao longo da fibra. Como a parte inicial da EDF possui uma quantidade menor de portadores no nível metaestável, devido ao bombeio acoplado na outra extremidade da EDF, pode estar ocorrendo atenuação do sinal óptico devido à absorção de fótons de sinal por  $Er^{3+}$  no nível fundamental. Esta atenuação devida à absorção de fótons, geralmente é mais forte quando o sinal possui comprimento de onda em 1537 nm.

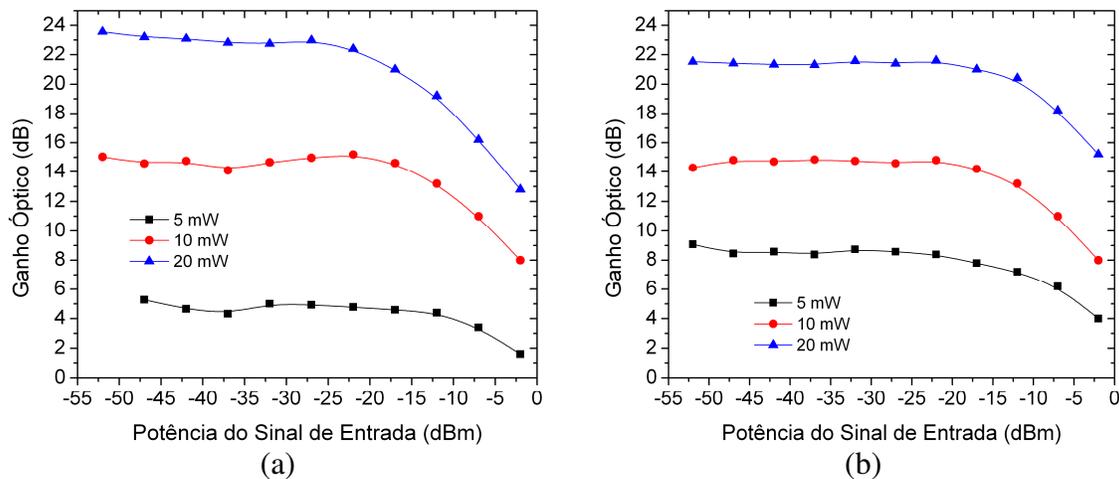


Fig. 5.13 – Ganho óptico do EDFA contra-propagante em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 8,2 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.

Por outro lado, quando o bombeio utilizado é forte o suficiente para inverter a população dos portadores, principalmente, na região onde o sinal é acoplado à EDF, é possível obter valores de ganho óptico maiores para o sinal em 1537 nm, se comparado ao comprimento de onda de 1563,8 nm. Este fato pode ser observado nas curvas de ganho óptico que utilizam bombeio em 20 mW. Outro fato interessante é a semelhança dos valores de ganho óptico encontrados para as duas topologias em análise quando se utiliza

fibras curtas (3,6 m e 6 m ). Neste caso, para estes dois comprimentos de EDF, o bombeio é forte o suficiente para excitar os íons de érbio em praticamente toda extensão da fibra dopada, independente do sentido em que o bombeio é acoplado.

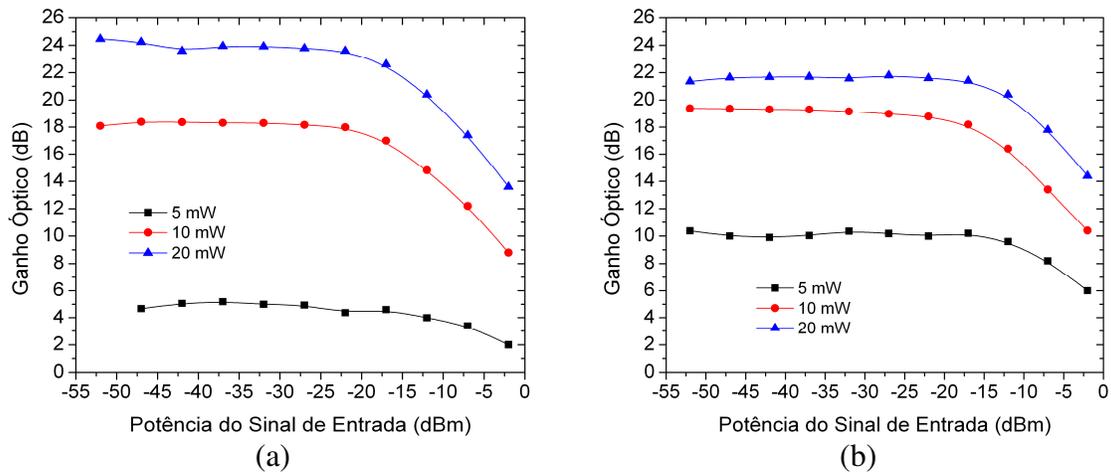


Fig. 5.14 – Ganho óptico do EDFA contra-propagante em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 10,15 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.

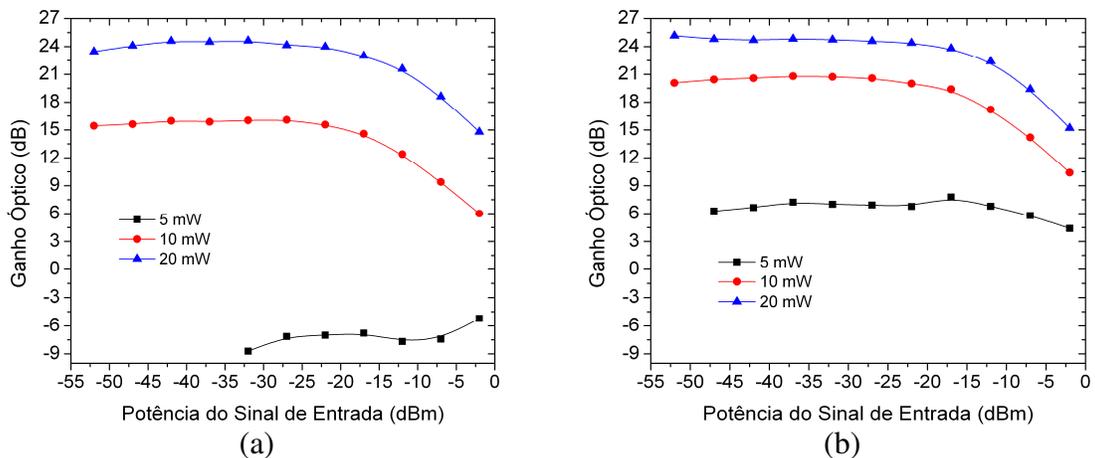


Fig. 5.15 – Ganho óptico do EDFA contra-propagante em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 14,4 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.

Em seguida, as Fig. 5.16 e 5.17, apresentam as curvas de ganho óptico para os comprimentos de onda do sinal de entrada em (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm, tendo como parâmetro o comprimento de EDF. Através dessas figuras, é possível verificar a evolução

do ganho óptico em função dos diversos comprimentos de EDF disponíveis. A princípio serão analisadas as figuras referentes ao bombeio em 10 mW. Neste caso, as curvas de ganho óptico, quando se utilizam fibras de 3,6 m, 6 m e 8,2 m de comprimento, possuem valores semelhantes tanto em 1537 nm como em 1563,8 nm. Como visto anteriormente, a configuração que utiliza o bombeio contra-propagante ao sinal possui uma quantidade maior de portadores no nível metaestável na região onde o sinal deixa a EDF. Além disso, quando se utilizam fibras com comprimentos menores, a possibilidade de ocorrer absorção do sinal óptico na região em que o mesmo é acoplado a EDF tende a ser menor. Dessa forma, estes dois fatores fazem com que ambos os sinais, em 1537 nm e 1563,8 nm, possuam curvas de ganho óptico semelhantes. Para amplificação utilizando sinal em 1563,8 nm, as atenuações que ocorrem no início da EDF são relativamente menores, se comparadas às que ocorrem em 1537 nm, devido ao perfil de absorção do érbio, que possui uma amplitude maior para este comprimento de onda.

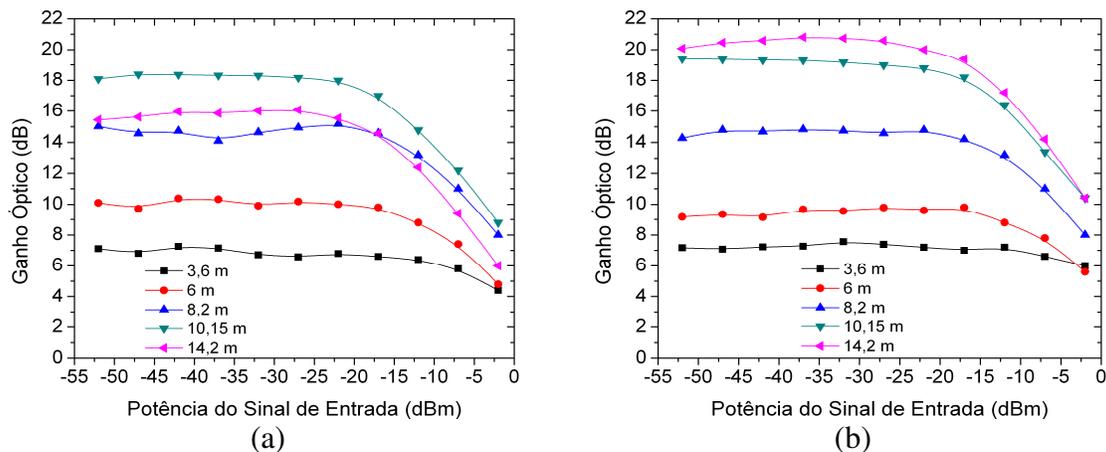


Fig. 5.16 – Ganho óptico do EDFA contra-propagante em função da potência de entrada de sinal, tendo o comprimento da EDF como parâmetro: bombeio em 10 mW e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.

Para o EDFA que utiliza bombeio em 20 mW, em todas as fibras dopadas, o ganho óptico foi maior do que os obtidos com bombeio em 10 mW, como era esperado. Além

disso, o ganho óptico para o sinal de entrada em 1537 nm é relativamente maior que para 1563,8 nm. Isso ocorre devido à forte emissão de fótons que é possível ser obtida utilizando este comprimento de onda. Além disso, esse ganho óptico é obtido devido à baixa absorção dos fótons do sinal de entrada da fibra. A exceção é a fibra que possui o comprimento de 14,2 m. Para este comprimento, a absorção de sinal na entrada da fibra, quando o bombeio é de 20 mW, não é tão forte como a que ocorre para o bombeio em 10 mW. Porém, ainda assim, esta ocorrendo atenuação do sinal na entrada da fibra. Como visto anteriormente, essa atenuação é maior para o sinal em 1537 nm.

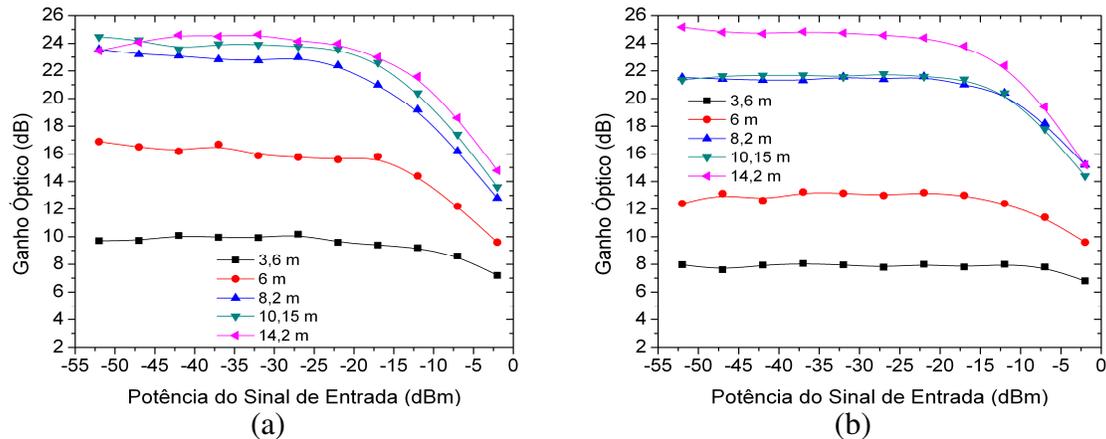


Fig. 5.17 – Ganho óptico do EDFA contra-propagante em função da potência de entrada de sinal, tendo o comprimento da EDF como parâmetro: bombeio em 20 mW e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.

Para a Fig. 5.18, que se refere às curvas de espectro de ASE obtidas para a topologia com bombeio contra-propagante ao sinal, verifica-se que, quando o bombeio possui um nível de potência de 20 mW, a fibra cujo comprimento é de 14,2 m produz também uma quantidade maior de ASE. Esta consideração já era esperada, pois, tanto em 1537 nm quanto em 1563,8 nm, o ganho óptico do EDFA foi maior para esse comprimento de fibra. Outro fato interessante é quando se utiliza bombeio em 5 mW. Neste caso, o espectro clássico de ASE não é obtido em nenhum comprimento de EDF, pois, com esta potência de

bombeio a quantidade de emissões espontâneas geradas pelos portadores presentes no nível excitado não são suficientes para formar este espectro de emissão.

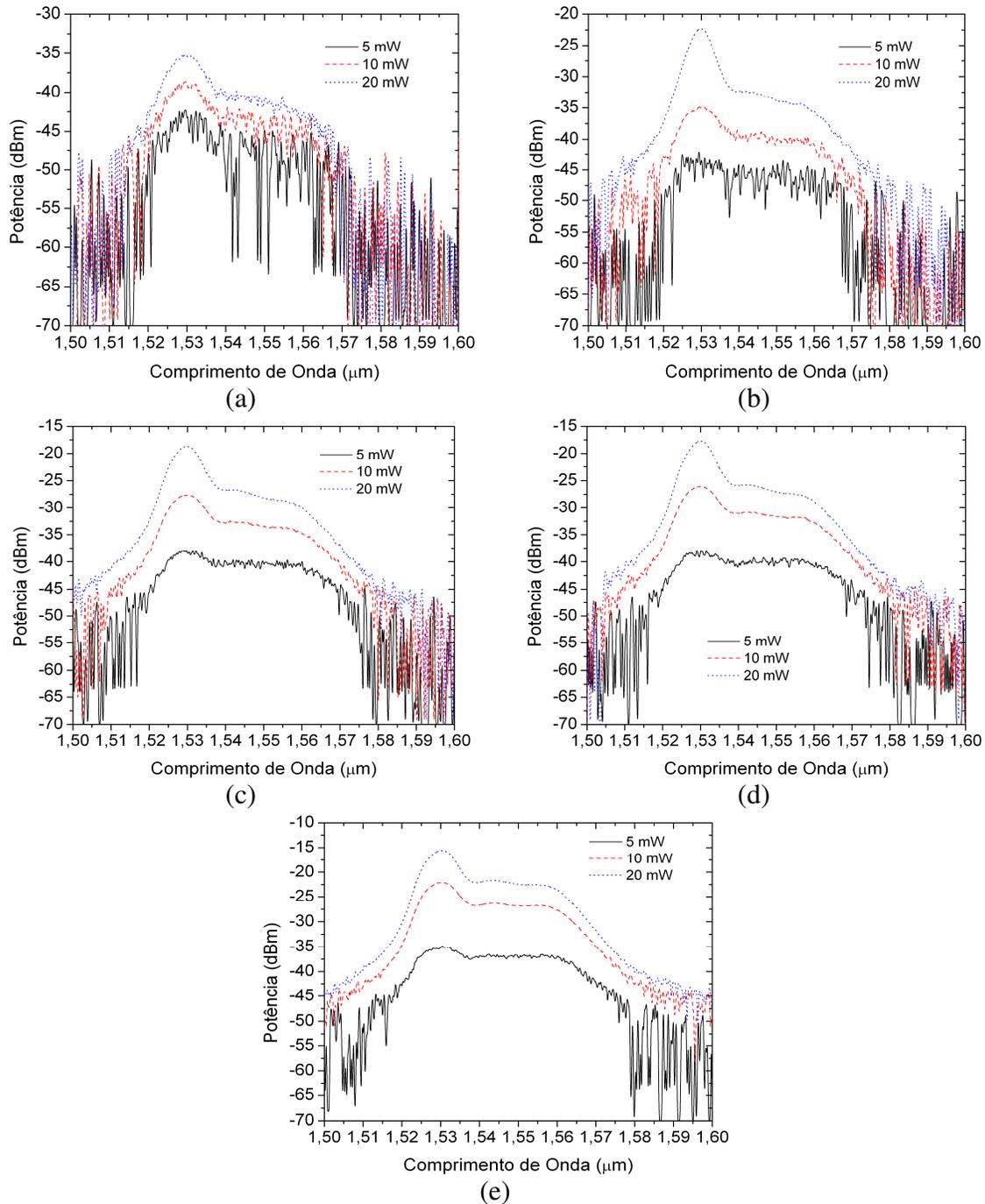


Fig. 5.18 – Espectro da ASE<sup>+</sup> para o EDFA contra-propagante, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostras de EDF de (a) 3,6 m, (b) 6 m, (c) 8,2 m, (d) 10,15 m e (e) 14,2 m.

A Fig. 5.19 mostra a evolução do espectro de ASE tendo como parâmetro a potência óptica de bombeio, sendo que, cada figura apresenta a amplificação de um canal com -32 dBm em um determinado comprimento de onda (1537 nm e 1563,8 nm, respectivamente). A fibra dopada utilizada possui 10,15 m de comprimento. Com isso, é possível verificar que o espectro óptico vai perdendo o formato clássico de emissão do EDFA quando se diminui a potência de bombeio óptico. A Fig. 5.20 mostra os espectros de emissão do EDFA para uma fibra de 10,15 m de comprimento, bombeada com 20 mW, tendo a potência do sinal de entrada como parâmetro. Devido ao baixo valor de potência de entrada do sinal óptico (-32 dBm), a possibilidade de ocorrer saturação do amplificador diminui e, conseqüentemente, não ocorre deformação do formato do espectro óptico.

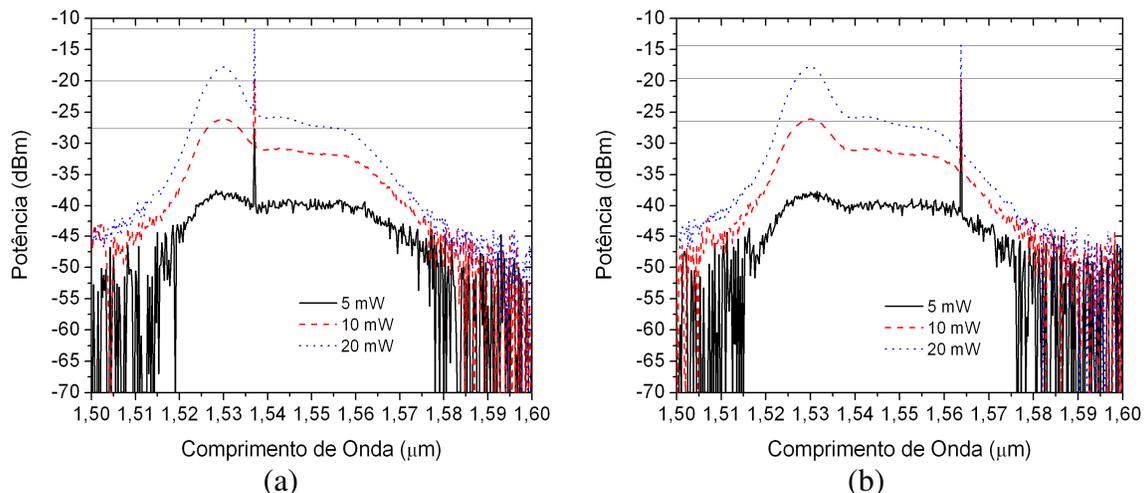


Fig. 5.19 – Espectro da ASE<sup>+</sup> para o EDFA contra-propagante, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 10,15 m, potência de entrada do sinal de -32 dBm e comprimento de onda (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.

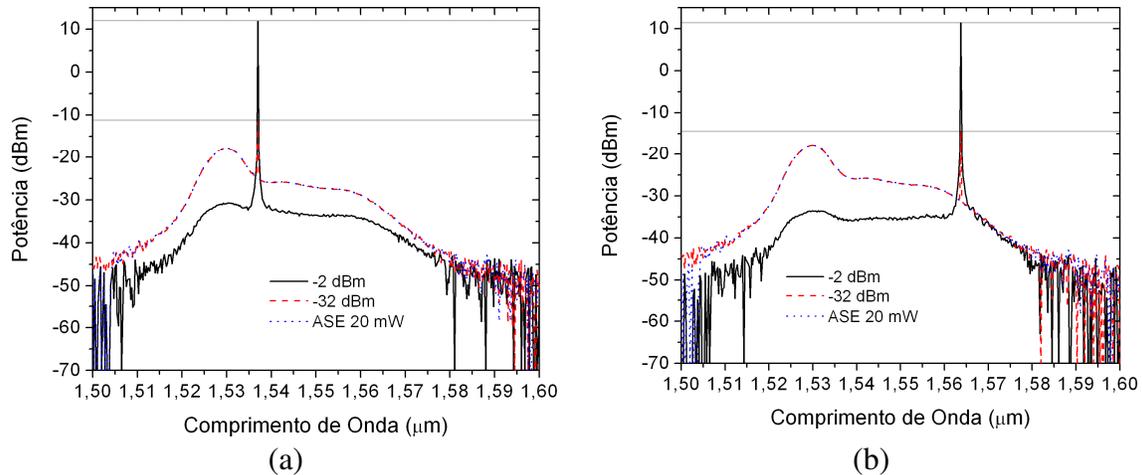


Fig. 5.20 – Espectro da ASE<sup>+</sup> para o EDFA contra-propagante, tendo a potência de entrada do sinal como parâmetro: amostra de EDF de 10,15 m, potência de bombeio de 20 mW e comprimento de onda (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.

## 5.4 Topologia com bombeio bi-direcional

Como visto no Capítulo 3, para esta topologia, a distribuição de bombeio no interior é suficiente para promover inversão de população em praticamente toda a extensão da fibra. Assim, é possível obter valores de ganho óptico elevados para todos os comprimentos de EDF. Até mesmo quando se utiliza bombeio em 5 mW é possível obter um ganho óptico considerável. Além disso, o ganho obtido para esta topologia tende a apresentar resultados mais satisfatórios se comparados aos das topologias com bombeio co-propagante e com bombeio contra-propagante, principalmente quando se utilizam EDFs com comprimentos mais longos (maiores que 10,15 m).

As Fig. 5.21, 5.22, 5.23, 5.24 e 5.25 mostram as curvas que representam o ganho óptico da configuração com bombeio bi-direcional em função da potência do sinal de entrada, tendo como parâmetro a potência de bombeio. Para tanto, foram utilizados diversos comprimentos de EDF e dois comprimentos de onda distintos para o sinal de entrada. Considerando as diferenças que foram observadas nas topologias anteriores, em

relação ao comprimento de onda do sinal de entrada, observa-se que, para esta topologia, o ganho óptico também é relativamente maior para o sinal em 1537 nm. Isto é possível devido ao fato de que este tipo de bombeio provoca uma inversão de população mais eficiente em praticamente toda a extensão da EDF e, como consequência, a probabilidade de ocorrer absorção do sinal de entrada na parte final da EDF é reduzida em ambos os comprimentos de onda do sinal de entrada.

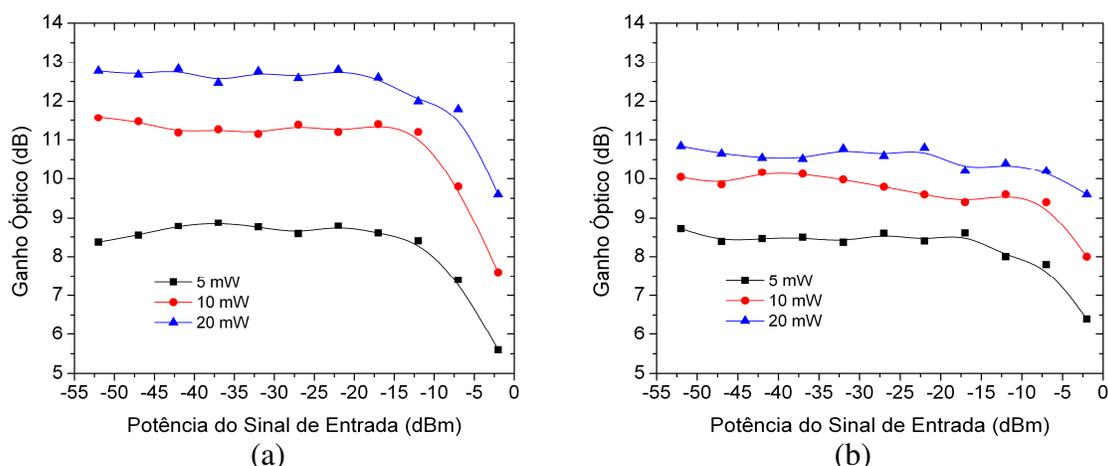


Fig. 5.21 – Ganho óptico do EDFA bi-direcional em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 3,6 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.

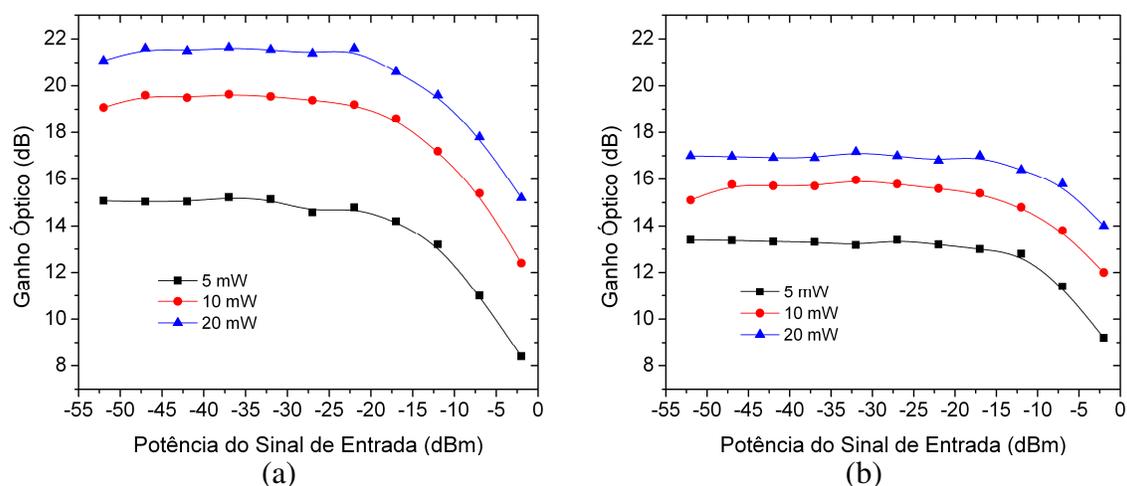


Fig. 5.22 – Ganho óptico do EDFA bi-direcional em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 6 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.

Como esta topologia tem como característica principal a forte amplificação óptica, em alguns casos, a saída do EDFA opera sob regime de saturação. Dessa forma, verificou-se que, para as fibras longas (10,15 m e 14,2 m), bombeio em 20 mW e sinal de entrada em -2 dBm, foi possível alcançar aproximadamente 20 dB de ganho óptico. Por outro lado, para estas mesmas condições de operação, porém com o bombeio em 10 mW, foi obtido cerca de 14 dB de ganho óptico. Neste caso, quando o EDFA opera sob regime de saturação, as emissões estimuladas pelos fótons do sinal de entrada são balanceadas pela absorção de fótons do bombeio por portadores no nível fundamental. Com isso, aumentando-se a potência do bombeio, eleva-se a quantidade de portadores no nível metaestável e, conseqüentemente, as emissões espontâneas. Deste modo, pode-se ter um aumento da potência de do sinal óptico na saída do EDFA.

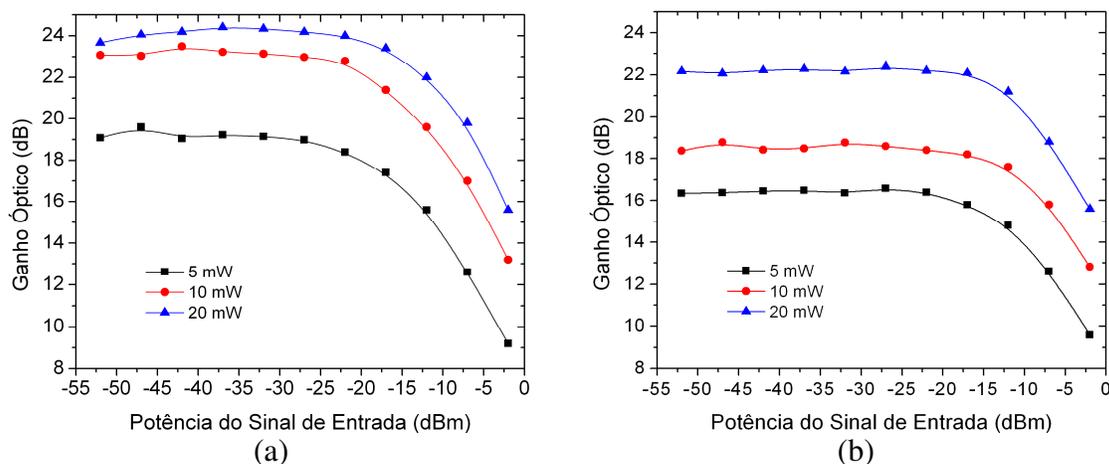


Fig. 5.23 – Ganho óptico do EDFA bi-direcional em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 8,2 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.

Quando o EDFA possui segmentos de fibra dopada com comprimentos que podem ser considerados longos, ou seja, 10,15 m e 14,2 m, o ganho óptico atinge valores maiores se comparado aos das configurações anteriores, principalmente, quando a potência de bombeio tem níveis não muito elevados, como em 5 mW. Com esta potência óptica, é

possível comparar as curvas obtidas para esta topologia, com as curvas de ganho óptico das topologias anteriores que utilizam bombeio em 10 mW. Assim, através do bombeio bi-direcional, é possível que esteja ocorrendo uma melhor distribuição da energia do bombeio ao longo da fibra dopada, fazendo com que a atenuação devido à absorção de fótons seja minimizada. Com isso, obtem-se ganhos maiores para esta topologia de EDFA.

Da mesma forma que nas topologias anteriores, uma maneira simples de comparar o ganho óptico para uma determinada topologia é analisando a evolução do ganho para os diversos segmentos de EDF. A Fig. 5.26 apresenta o ganho óptico da topologia com bombeio bi-direcional para diversos comprimentos de EDF, sendo que o bombeio tem 10 mW e o sinal de entrada com (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm. Deste modo, nestas figuras, os valores de ganho óptico são maiores quando a EDF possui um comprimento mais longo, sendo que, em 1537 nm o ganho óptico é ligeiramente maior que no caso de 1563,8 nm.

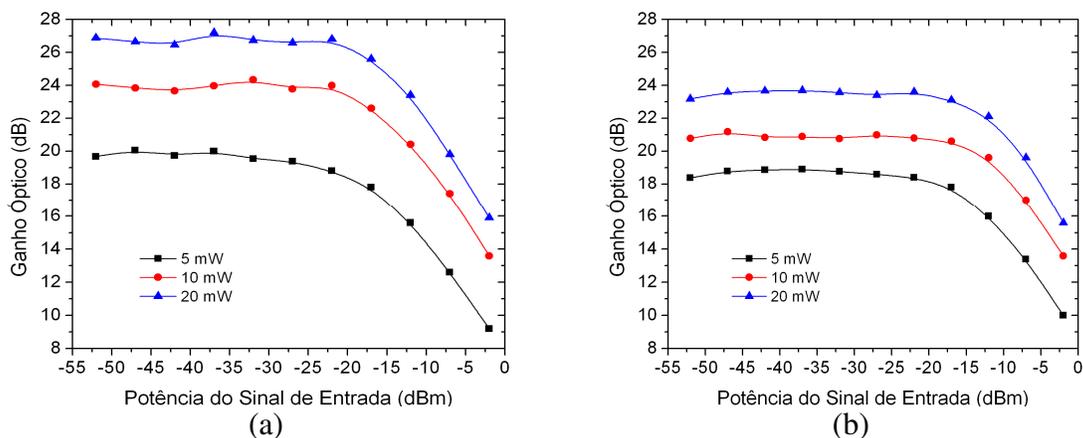


Fig. 5.24 – Ganho óptico do EDFA bi-direcional em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 10,15 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.

Outro fato observado é quando se compara as curvas de ganho óptico para a topologia com bombeio bi-direcional e potência de bombeio de 10 mW com, por exemplo, a topologia com bombeio co-propagante e potência óptica de bombeio de 20 mW. Como a

quantidade de bombeio acoplada à EDF é, teoricamente da mesma ordem de grandeza, os valores de ganho obtidos tendem a apresentar certa semelhança. Porém, ainda assim, a topologia com bombeio bi-direcional obtêm ganhos ligeiramente maiores, devido a melhor distribuição de energia ao longo de toda a fibra.

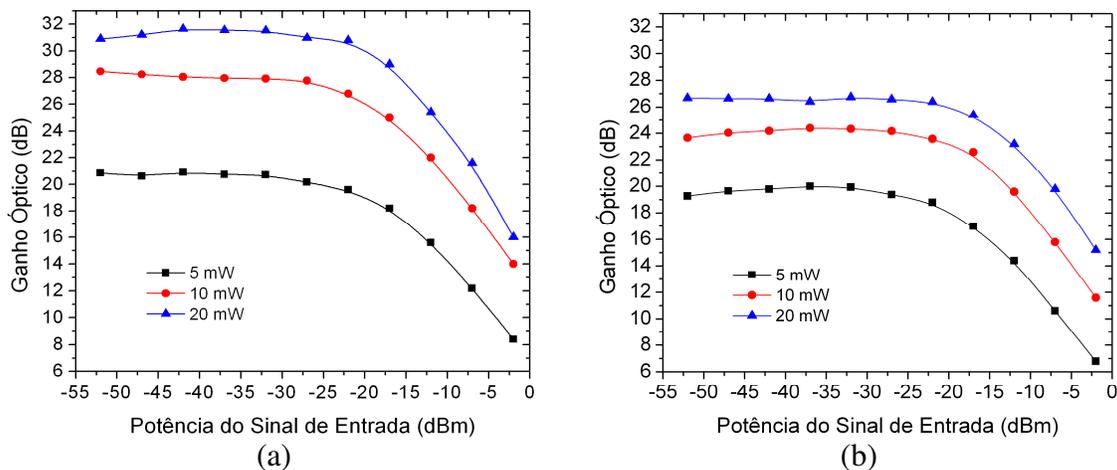


Fig. 5.25 – Ganho óptico do EDFA bi-direcional em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 14,2 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.

Este fato ocorre também quando a potência de bombeio é de 20 mW, mostrado na Fig. 5.27. Porém, ao contrário das outras topologias inspecionadas, a topologia em questão conseguiu também um ganho maior para a fibra de 14,2 m, podendo assim considera-se este como sendo o comprimento mais próximo do comprimento ótimo de fibra, para esta topologia. Além disso, verificou-se que quando o EDFA opera sob regime de saturação, o ganho óptico para os diversos segmentos de EDF tendem a convergir para um mesmo ponto. Neste caso, como o sinal de entrada é fortemente amplificado na parte inicial da EDF, rapidamente alcança-se a condição de saturação e, como a energia do bombeio bi-direcional é distribuída em praticamente toda a extensão da fibra dopada, a atenuação devida à absorção de fótons do sinal, por portadores no nível fundamental, diminui consideravelmente. Com isso, verifica-se que para as fibras maiores que 6 m, o

comprimento total da EDF não altera significativamente o ganho final, pois, antes mesmo de atravessar os 6 m de fibra dopada, o sinal já pode estar saturando a saída do EDFA. Por outro lado, a fibra de 3,6 m comprimento não é capaz de alcançar ganhos como os obtidos para as fibras maiores que 6 m, mesmo quando o amplificador opera sob saturação.

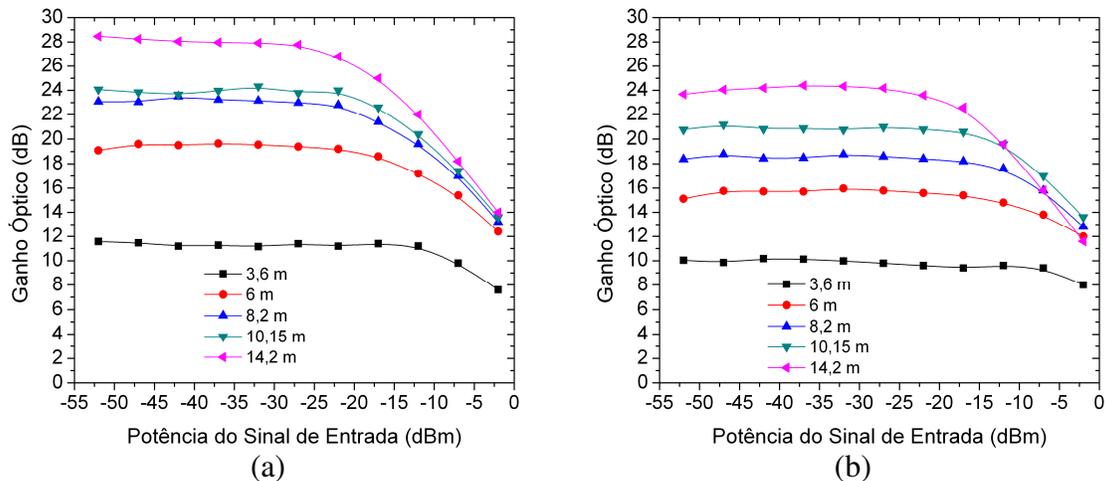


Fig. 5.26 – Ganho óptico do EDFA bi-direcional em função da potência de entrada de sinal, tendo o comprimento da EDF como parâmetro: bombeio em 10 mW e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.

A Fig. 5.28 mostra os espectros de saída do EDFA com bombeio bi-direcional para uma fibra de 14,2 m de comprimento. Para isso, foi inserido no EDFA um canal com -32 dBm de potência em diferentes comprimentos de onda (respectivamente, 1537 nm e 1563,8 nm). Dessa forma, através do espectro de emissão do érbio foi possível perceber a dependência da ASE em relação a potência óptica de bombeio. Quando a potência de bombeio acoplado ao EDFA é de 5 mW, o espectro de emissão não possui o formato clássico do EDFA. Neste caso, parte dos fótons presentes no pico de emissão em 1537 nm foi utilizado na amplificação do sinal óptico. Outro fato a ser observado, é que o comprimento de onda do sinal a ser amplificado não influencia de forma significativa o formato do espectro de emissão. Através dessas figuras verifica-se que não ocorre alteração

do espectro quando se utilizam os sinais de entrada em 1537 nm e 1563,8 nm, para o nível de potência de sinal de utilizado.

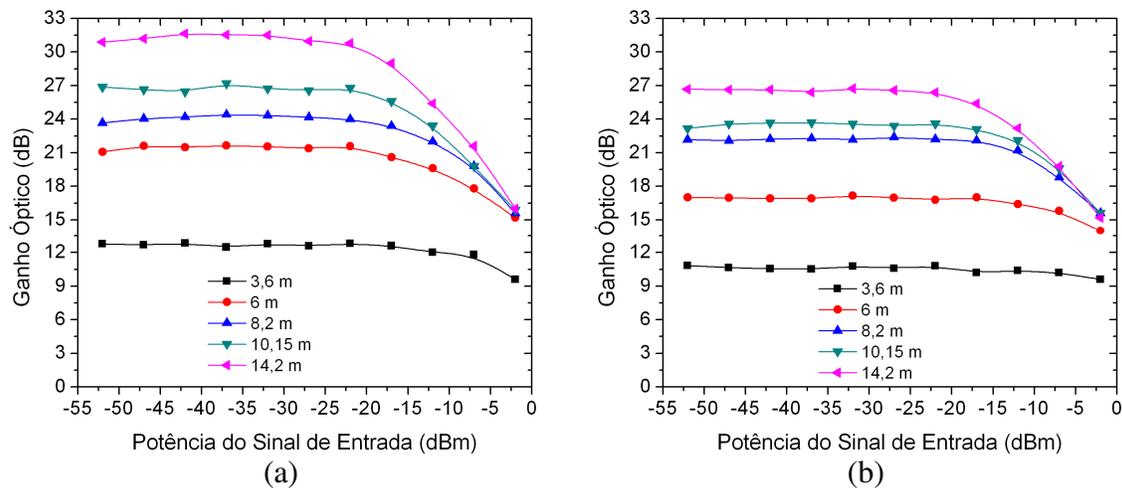


Fig. 5.27 – Ganho óptico do EDFA bi-direcional em função da potência de entrada de sinal, tendo o comprimento da EDF como parâmetro: bombeio em 20 mW e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.

Finalizando esta seção, a Fig. 5.29 mostra os espectros de emissão do EDFA, sendo que, neste caso, acopla-se ao amplificador um sinal óptico com -32 dBm e, em seguida, um outro com -2 dBm de potência óptica. Além disso, para auxiliar as comparações, foi inserida na figura uma curva do espectro de ASE para mesma condição de bombeio. Os dados foram obtidos de um EDFA cuja fibra dopada possui 14,2 m e o bombeio utilizado foi de 20 mW. Assim, percebe-se que a curva do espectro de ASE e a que possui sinal em -32 dBm, estão praticamente sobrepostas uma à outra. Quando o sinal de entrada possui pouca intensidade, como os valores menores que -32 dBm, o EDFA, geralmente, não opera sob regime de saturação, ou seja, para estes valores, é possível que os fótons do sinal não sejam capazes de consumir grande parte dos portadores no nível metaestável. Para as curvas com sinal de entrada em -2 dBm, o espectro toma uma forma diferente da obtida com o espectro clássico de ASE, devido ao consumo dos portadores no nível metaestável pelos fótons do sinal de entrada, o que caracteriza a operação do EDFA sob saturação.

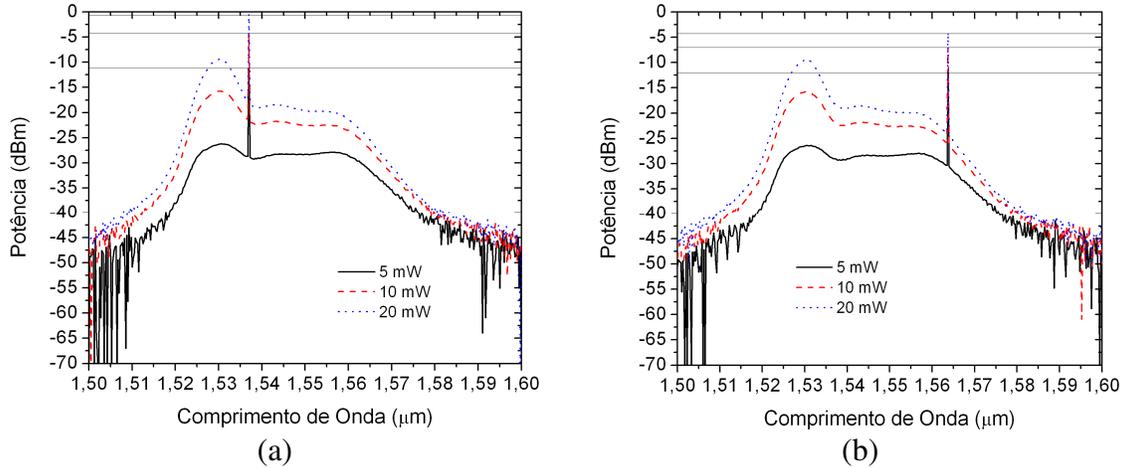


Fig. 5.28 – Espectro da ASE<sup>+</sup> para o EDFA bi-direcional, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 14,2 m, potência de entrada do sinal de -32 dBm e comprimento de onda (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.

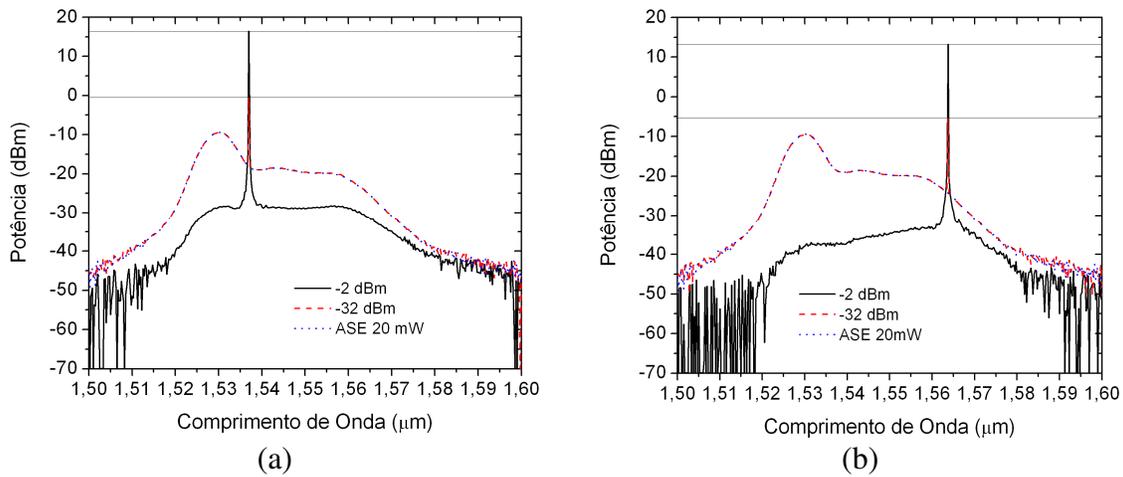


Fig. 5.29 – Espectro da ASE<sup>+</sup> para o EDFA bi-direcional, tendo a potência de entrada do sinal como parâmetro: amostra de EDF de 14,2 m, potência de bombeio de 20 mW e comprimento de onda (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.

## 5.5 Topologia com reflexão de bombeio e sinal co-propagante

Esta configuração de EDFA é classificada como reflexiva, pois, o bombeio residual na saída do segundo acoplador WDM da topologia co-propagante é refletido de volta para a EDF. Assim, uma parcela da potência óptica do bombeio refletido pode ser utilizada para aumentar a população de portadores no nível metaestável na região próxima ao segundo

acoplador WDM. Porém, a potência óptica de bombeio refletida, em alguns casos, não apresenta valores significativos que possam melhorar a eficiência do bombeio co-propagante. Os valores de potência de bombeio residual obtidos na saída do segundo acoplador WDM são apresentados na Tab. 5.1. Pode-se observar que, quando se utiliza uma fibra dopada com 3,6 m, ou seja, quando a fibra possui um comprimento considerado curto, é possível de se obter, através de medidas experimentais, os maiores valores de bombeio residual. Para estas fibras, a quantidade de bombeio residual tende a ser maior pois parte do bombeio óptico acoplado à entrada da EDF não é totalmente absorvido. Com a utilização de fibras dopadas com comprimentos mais longos, a quantidade de bombeio residual tende a diminuir consideravelmente. Dessa forma, verifica-se que o bombeio residual é fortemente dependente da potência de bombeio inicial, como era esperado.

*Tabela 5.1 – Potência de bombeio residual obtido na saída do segundo acoplador WDM.*

<b>Comprimento da EDF / Bombeio</b>	<b>5 mW</b>	<b>10 mW</b>	<b>20 mW</b>
3,6 m	1,85 mW	4,8 mW	11,2 mW
6 m	0,6 mW	2 mW	5,6 mW
8,2 m	0,42 mW	1,7 mW	5 mW
10,15 m	0,17 mW	0,9 mW	3 mW
14,2 m	17 $\mu$ W	0,2 mW	0,7 mW

O bombeio refletido pode não apresentar valores significantes, em alguns casos, porém, dependendo da potência de bombeio inicial e do comprimento de fibra dopada, esse bombeio refletido pode chegar a quase 50 % do valor inicial. Neste caso, este tipo de topologia se apresenta com uma solução interessante para obter valores de ganho relativamente maiores se comparado com a primeira topologia analisada (bombeio co-

propagante). Por outro lado, dependendo da quantidade de bombeio re-acoplado à fibra dopada, esta topologia pode apresentar resultados semelhantes à topologia com bombeio co-propagante.

As Fig. 5.30, 5.31, 5.32, 5.33, 5.34 mostram as curvas de ganho óptico em função da potência do sinal de entrada, tendo o bombeio como parâmetro. As figuras apresentam as curvas de ganho para os comprimentos de EDF de 3,6 m, 6 m, 8,2 m, 10,15 m e 14,2 m, e para os comprimentos de onda do sinal de entrada de 1537 nm e 1563,8 nm. Através dessas figuras, é possível perceber que as curvas com maiores valores de ganho são as que foram obtidas quando o bombeio possui 20 mW de potência, porém, para este tipo de topologia, as curvas de ganho para o bombeio em 10 mW se aproximam das curvas com bombeio mais forte, principalmente, para as EDF de comprimentos mais curtos. Isto se deve ao fato da reflexão do bombeio ocorrer na parte final da EDF, o que melhora o processo de amplificação nesta região.

Quando se utilizam fibras dopadas com comprimentos considerados longos, como é o caso da EDF de 14,2 m e potência de bombeio relativamente baixa, como 5 mW, na maior parte das vezes, não é possível obter ganho óptico adicional com esta configuração. Na Tab. 5.1 verifica-se que a quantidade de bombeio refletido é insignificante. Este fato também foi observado na topologia que utiliza o bombeio co-propagante. Como existe uma certa semelhança entre essas duas topologias, verifica-se que, neste caso, a reflexão do bombeio não é capaz de alterar o ganho óptico final do amplificador. Por outro lado, quando a potência de bombeio é de 20 mW, foram obtidos valores elevados de ganho óptico, principalmente, quando o comprimento de onda é de 1537 nm. Neste caso, a

primeira passagem do bombeio pela EDF já é suficiente para a obtenção de um ganho óptico elevado.

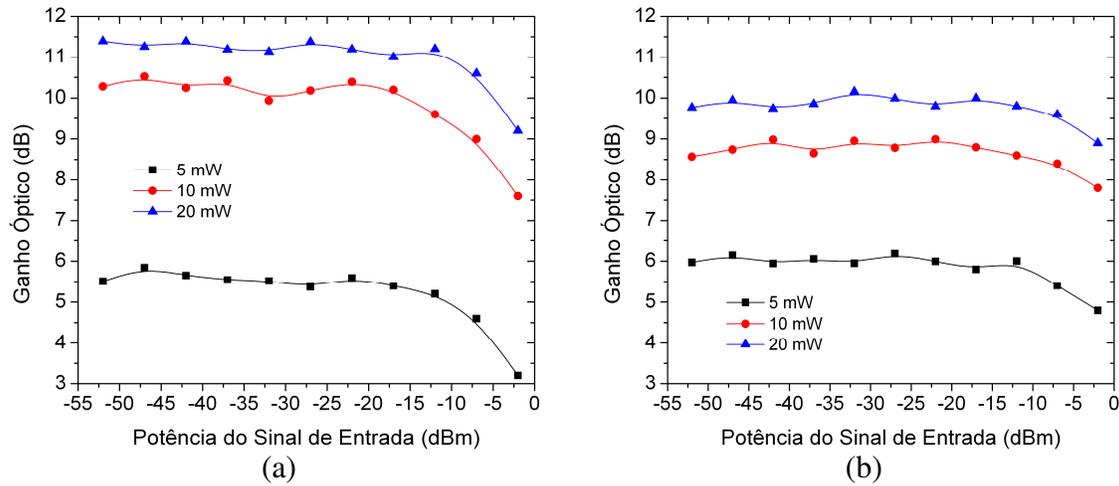


Fig. 5.30 – Ganho óptico do EDFA com reflexão do bombeio co-propagante em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 3,6 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.

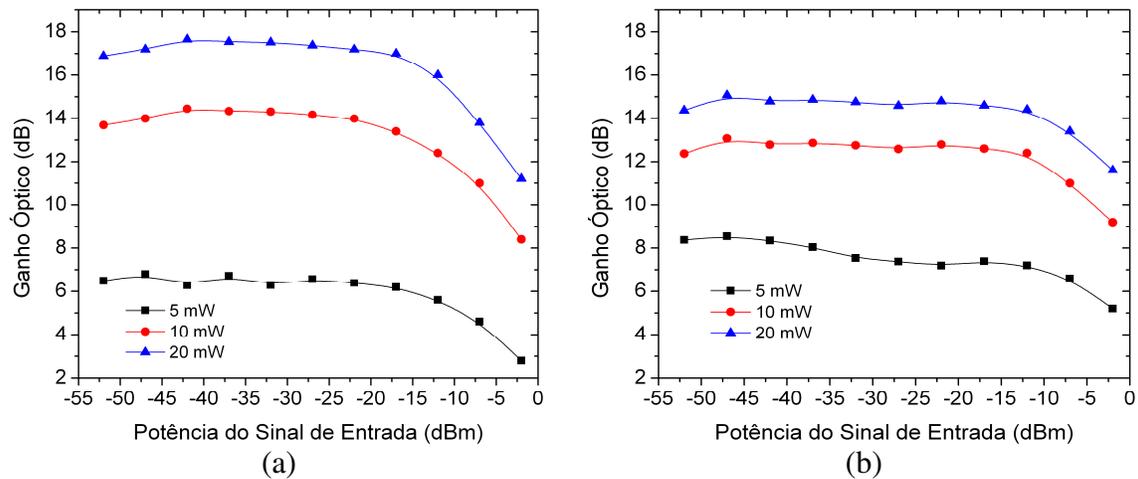


Fig. 5.31 – Ganho óptico do EDFA com reflexão do bombeio co-propagante em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 6 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.

Em alguns casos, os valores de ganho encontrados para esta topologia são semelhantes aos encontrados para a topologia com bombeio co-propagante. Porém, principalmente para as topologias que utilizam fibras dopadas com comprimentos menores, o ganho óptico é relativamente maior para as configurações que possuem reflexão do

bombeio óptico, pois, neste caso, a quantidade de bombeio refletido é maior no interior da EDF.

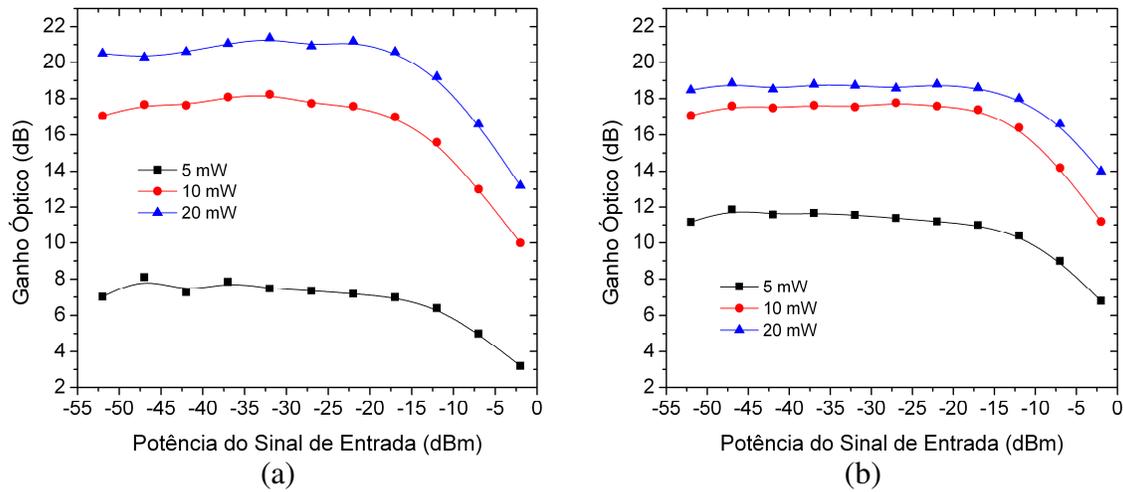


Fig. 5.32 – Ganho óptico do EDFA com reflexão do bombeio co-propagante em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 8,2 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.

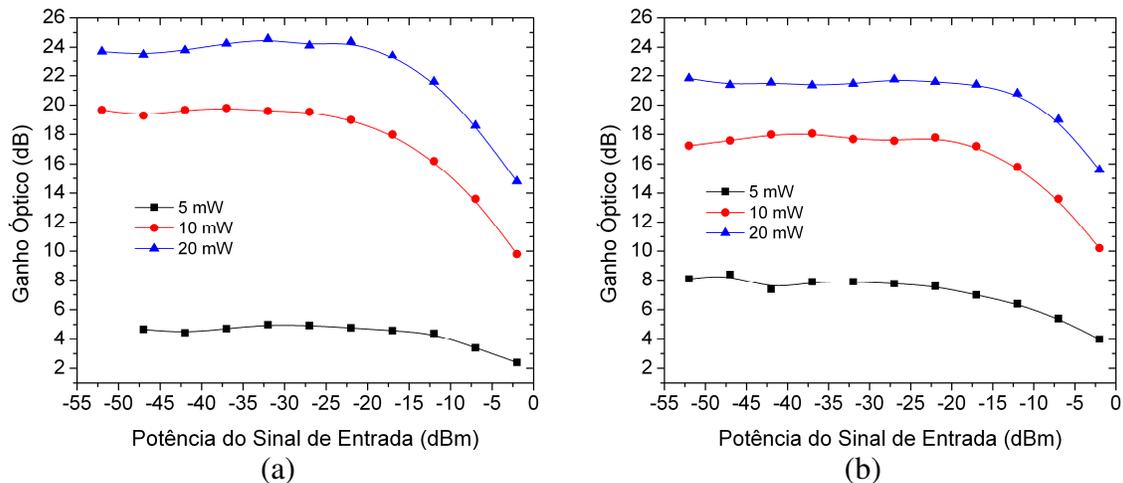


Fig. 5.33 – Ganho óptico do EDFA com reflexão do bombeio co-propagante em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 10,15 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.

Para facilitar as comparações entre as curvas de ganho óptico obtidas para os diversos segmentos de EDF, as Fig. 5.35 e 5.36 apresentam as curvas de ganho óptico em função da potência do sinal de entrada para diferentes comprimentos de EDF. Estas figuras contemplam os comprimentos de onda em (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm, com bombeio

óptico em 10 mW e 20 mW, respectivamente. Para as figuras que contemplam o bombeio de 10 mW, as curvas para a EDF que possui 14,2 m não apresentam valores elevados como, por exemplo, em 8,2 m e 10,15 m. Como a quantidade de bombeio refletido é, de certa forma maior para as fibras que apresentam comprimentos menores que 10 m, é possível que este bombeio residual eleve a quantidade de portadores no nível metaestável na região contrária à que o bombeio é acoplado inicialmente à EDF. Com isso, a atenuação devida à absorção de fótons do sinal de entrada diminui nesta região, favorecendo assim, o aumento do ganho óptico.

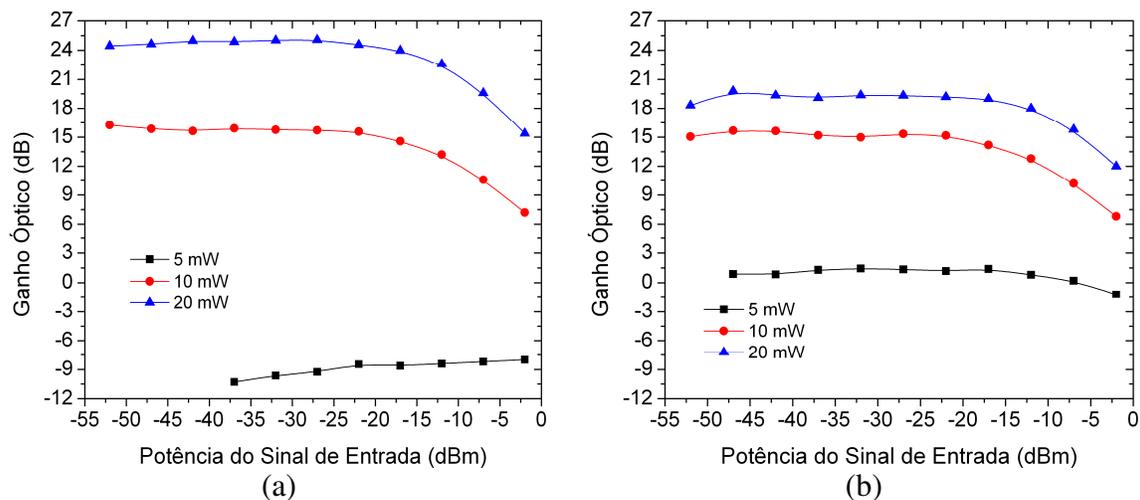


Fig. 5.34 – Ganho óptico do EDFA com reflexão do bombeio co-propagante em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 14,2 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.

A Fig. 5.36 representa as curvas de ganho óptico em função da potência de entrada do sinal para todas as EDF disponíveis e potência de bombeio em 20 mW. Ao contrário das curvas para o bombeio em 10 mW, neste caso, quando se utiliza uma EDF com 14,2 m, o ganho óptico obtido é um pouco maior se comparado ao dos outros comprimentos de fibra dopada. Para este segmento de EDF, a quantidade de bombeio refletido é relativamente baixa, enquanto que para os comprimentos de 8,2 m e 10,15 m, a quantidade de bombeio

residual é maior que o medido para a EDF de 14,2 m, o que pode elevar a população de portadores na região onde o bombeio é refletido e, com isso, aumentar o ganho óptico.

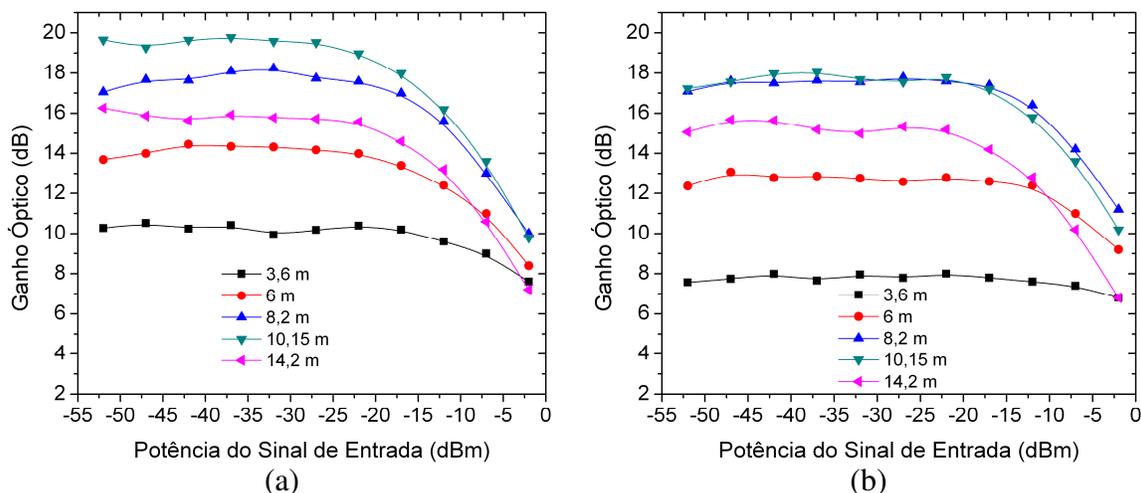


Fig. 5.35 – Ganho óptico do EDFA com reflexão do bombeio co-propagante em função da potência de entrada de sinal, tendo o comprimento da EDF como parâmetro: bombeio em 10 mW e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.

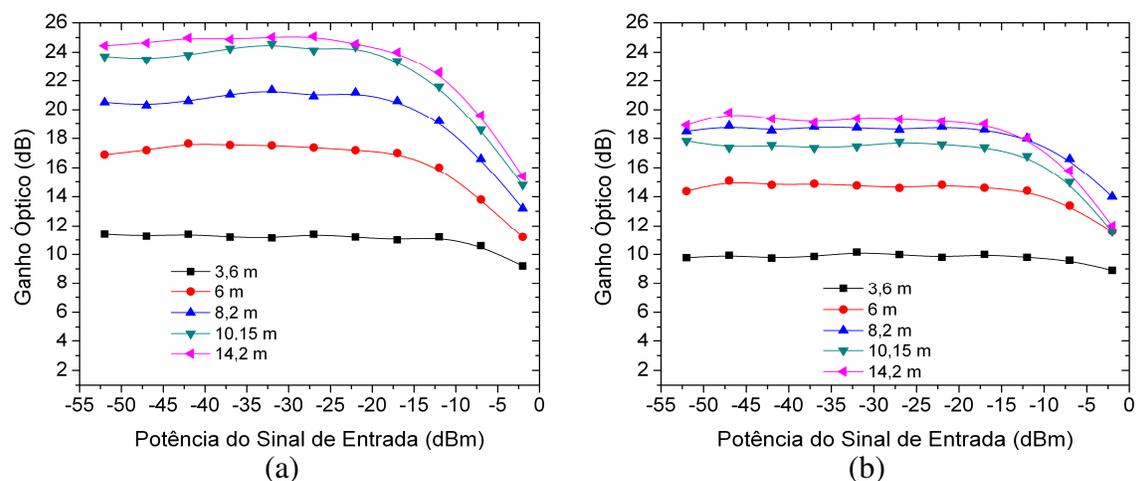


Fig. 5.36 – Ganho óptico do EDFA com reflexão do bombeio co-propagante em função da potência de entrada de sinal, tendo o comprimento da EDF como parâmetro: bombeio em 20 mW e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.

## 5.6 Topologia com reflexão de bombeio e sinal contra-propagante

Da mesma forma que a topologia anterior, esta topologia faz uso do artifício da dupla passagem de bombeio pela EDF, porém, neste caso, o bombeio é inicialmente acoplado à fibra no segundo acoplador WDM, fazendo com que o mesmo possua um

sentido contra-propagante ao sinal. Assim, a reflexão de bombeio ocorre na região onde o sinal a ser amplificado é inserido na fibra. Isso faz com que algumas características dessa configuração sejam um pouco diferentes da anterior. A princípio, o ganho óptico obtido para esta configuração tende a ser maior, se comparado ao das outras topologias que foram analisadas (com exceção para a topologia com bombeio bi-direcional). Isso ocorre pois, com este procedimento de acoplamento de bombeio, é possível obter uma quantidade elevada de portadores na parte final da fibra dopada e, além disso, a reflexão do bombeio residual pode melhorar, em alguns casos, a inversão de população no início da fibra dopada. Este tipo de configuração se assemelha a topologia com bombeio contra-propagante, porém, em alguns casos, o ganho óptico é relativamente maior que o obtido com esta topologia de EDFA.

Do mesmo modo como foi feito para a configuração anterior os valores da potência de bombeio residual são apresentados na Tab. 5.2. Pode-se verificar que os valores de potência de bombeio indicados por ela são semelhantes aos da configuração anterior. Para um mesmo segmento de EDF, como em ambos os casos a quantidade de íons de érbio presente no interior da EDF é o mesmo, a quantidade de bombeio residual tende a não se alterar, independentemente do sentido em que o bombeio óptico é inserido na fibra.

As Fig. 5.37, 5.38, 5.39, 5.40, 5.41 mostram as curvas de ganho óptico em função da potência do sinal de entrada, tendo a potência de bombeio como parâmetro, sendo que, as figuras contemplam o sinal de entrada com comprimento de onda em (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm. Através das figuras, é possível perceber que o ganho óptico aumenta com o aumento da potência óptica de bombeio, como era esperado. Quando o comprimento de onda do sinal de entrada é de 1537 nm, os valores de ganho óptico são ligeiramente maiores

que os encontrados para o sinal de entrada em 1563,8 nm, quando são utilizadas fibras com comprimentos menores. Para as fibras que possuem comprimentos maiores, os valores de ganho óptico obtidos em ambos os comprimentos de onda são semelhantes, apesar que, na maior parte das vezes, o ganho óptico quando o sinal de entrada possui 1537 nm se sobressai. Neste caso, é possível que o bombeio residual re-acoplado à EDF melhore a inversão de população no início da EDF, diminuindo assim, a possibilidade de absorção do sinal de entrada. Porém, nem sempre o bombeio residual re-acoplado é suficiente para auxiliar no processo de inversão de população na parte inicial da EDF.

*Tabela 5.2 – Potência de bombeio residual obtido na saída do primeiro acoplador WDM.*

<b>Comprimento da EDF / Bombeio</b>	<b>5 mW</b>	<b>10 mW</b>	<b>20 mW</b>
3,6 m	1,7 mW	4,5 mW	10,8 mW
6 m	0,65 mW	2,2 mW	5,65 mW
8,2 m	0,4 mW	1,8 mW	4,9 mW
10,15 m	0,18 mW	1 mW	3,1 mW
14,2 m	19 $\mu$ W	0,2 mW	0,6 mW

Quando o bombeio possui 5 mW, da mesma forma que para a topologia com bombeio contra-propagante, as curvas de ganho óptico obtidas para o comprimento de onda em 1563,8 nm apresentaram valores maiores do que para 1537 nm. Isso é possível, pois, a parte inicial da fibra dopada, geralmente, é a região onde a inversão de população de íons  $Er^{3+}$  é mais prejudicada. Além disso, o bombeio residual pode não ser suficiente para inverter a população dos portadores presentes nesta região. Quando o bombeio utilizado possui 10 mW de potência, as curvas de ganho óptico em 1537 nm e em 1563,8 nm apresentam amplitudes semelhantes, com um ganho ligeiramente maior quando o sinal está

em 1537 nm. Porém, quando a EDF possui 14,2 m de comprimento, a curva de ganho óptico para o comprimento de onda de 1563,8 nm possui amplitude relativamente maior, se comparado ao do outro comprimento de onda. Neste caso, o comportamento do sinal em 1537 nm, ao passar pela fibra de 14,2 m, é semelhante ao comportamento do mesmo sinal quando atravessa uma fibra dopada bombeada com 5 mW de potência. Em ambos os casos, é possível que esteja ocorrendo uma maior atenuação devido à absorção de fótons do sinal de entrada, principalmente, na região onde o sinal é acoplado a EDF. Além disso, a quantidade de bombeio residual, para uma EDF de 14,2 m com bombeio em 5 mW, é praticamente inexistente.

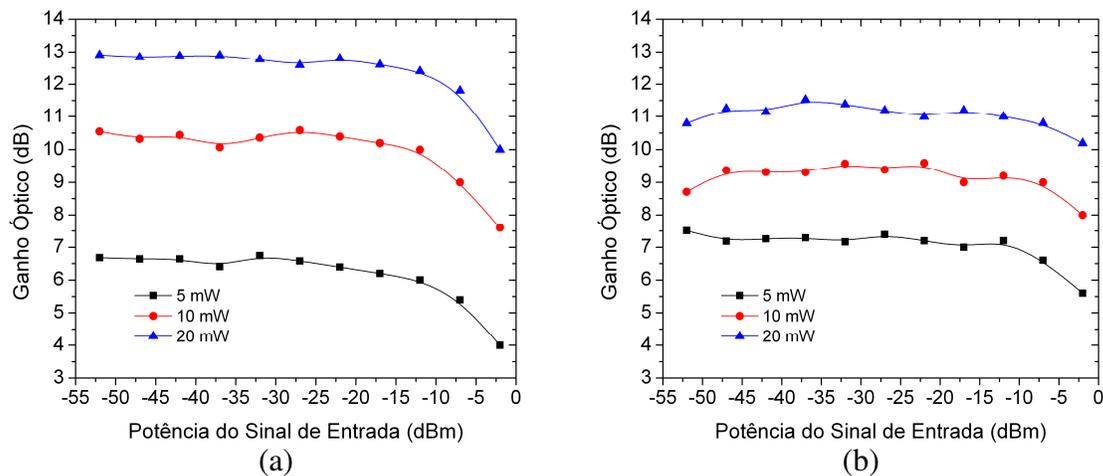


Fig. 5.37 – Ganho óptico do EDFA com reflexão do bombeio contra-propagante em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 3,6 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.

As Fig. 5.42 e 5.43 mostram as curvas de ganho óptico em função da potência do sinal de entrada, tendo como parâmetro o comprimento da EDF. As curvas de ganho óptico foram obtidas para os comprimentos de onda de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm. Para as figuras que contemplam o bombeio em 10 mW, os maiores valores de ganho óptico foram obtidos para as fibras dopadas de 8,2 m e 10,15 m, quando o comprimento de onda foi de 1537 nm. A fibra que possui 14,2 m não apresentou valores tão elevados, devido ao

bombeio óptico que não foi capaz de inverter a população de íons de érbio de forma eficiente ao longo de toda a EDF. Por outro lado, quando o sinal de entrada possui o comprimento de onda de 1563,8 nm, os maiores valores de ganho óptico foram obtidos para as fibras dopadas que possuem 8,2 m, 10,15 m e 14,2 m de comprimento. De acordo com perfil de absorção dos íons de érbio [29], a atenuação devida à absorção de fótons do sinal de entrada é menor para o comprimento de onda de 1563,8 nm, o que faz com que o ganho óptico, em alguns casos, seja maior do que o obtido para o sinal em 1537 nm.

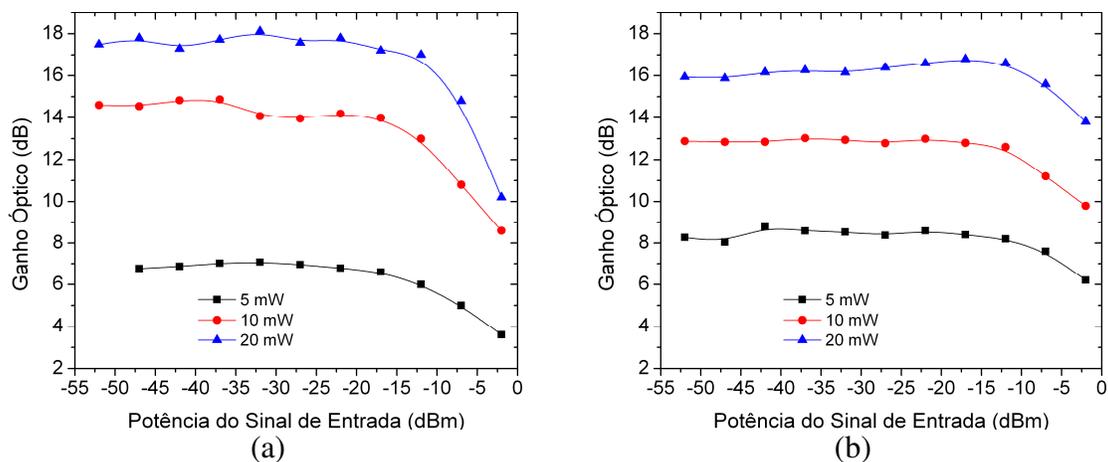


Fig. 5.38 – Ganho óptico do EDFA com reflexão do bombeio contra-propagante em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 6 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.

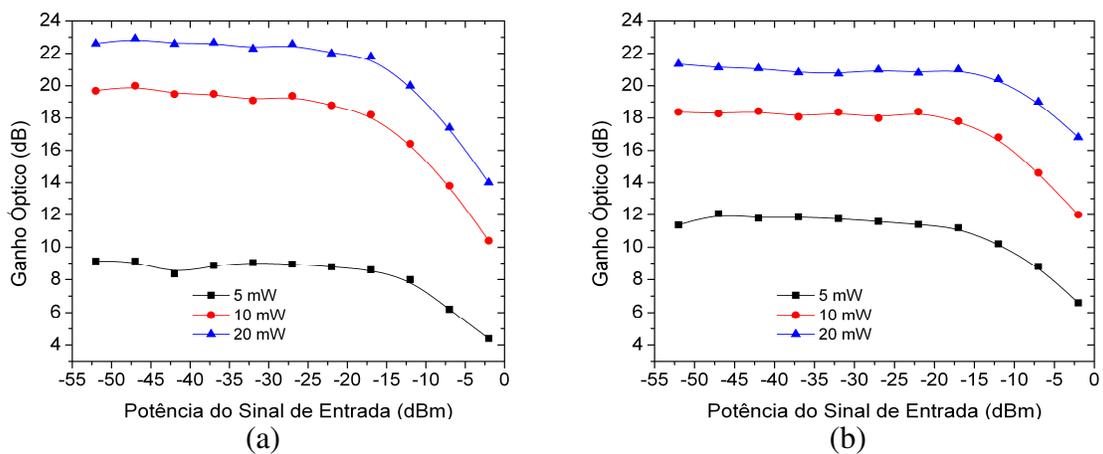


Fig. 5.39 – Ganho óptico do EDFA com reflexão do bombeio contra-propagante em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 8,2 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.

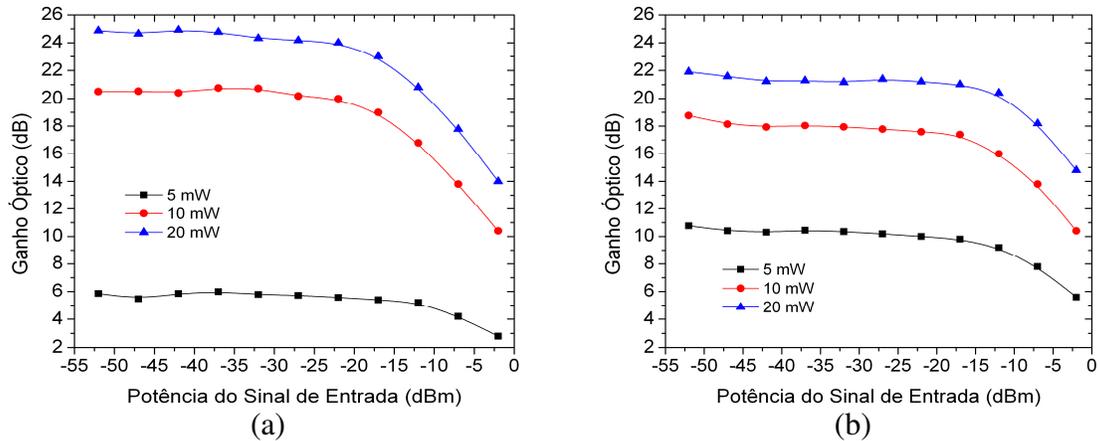


Fig. 5.40 – Ganho óptico do EDFA com reflexão do bombeio contra-propagante em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 10,15 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.

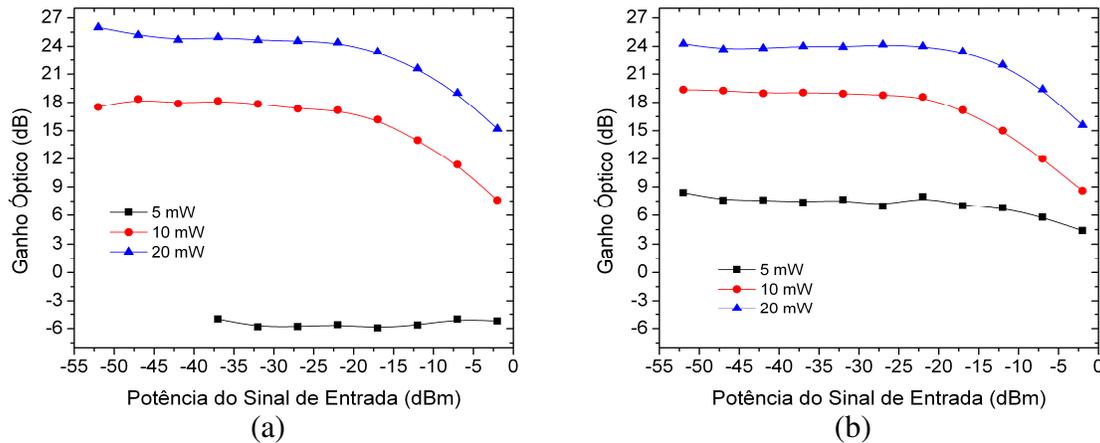


Fig. 5.41 – Ganho óptico do EDFA com reflexão do bombeio contra-propagante em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 14,2 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.

Quando se utiliza um bombeio com 20 mW de potência, o ganho óptico do EDFA para as fibras mais longas tende a ser maior, como era esperado. Além do mais, quando o comprimento de onda do sinal de entrada é de 1537 nm, o ganho óptico para todos os comprimentos de EDF é ligeiramente maior que os ganhos em 1563,8 nm. Assim, para o sinal em 1537 nm, verifica-se que as curvas de ganho para as fibras de 10,15 m e 14,2 m são semelhantes. Neste caso, apesar do bombeio de 20 mW, a amplificação com a fibra de

14,2 m começa a apresentar resultados não muito satisfatórios devido ao excessivo comprimento da fibra dopada.

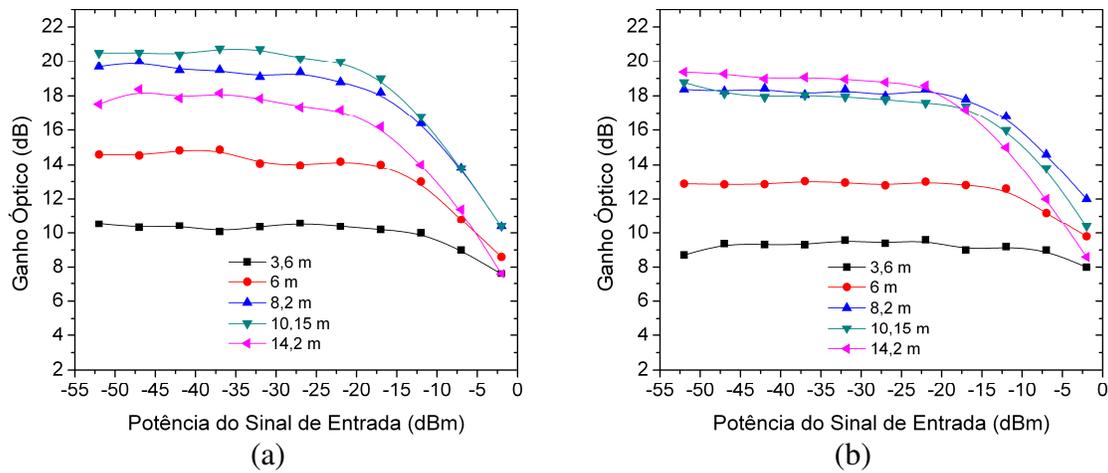


Fig. 5.42 – Ganho óptico do EDFA com reflexão do bombeio contra-propagante em função da potência de entrada de sinal, tendo o comprimento da EDF como parâmetro: bombeio em 10 mW e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.

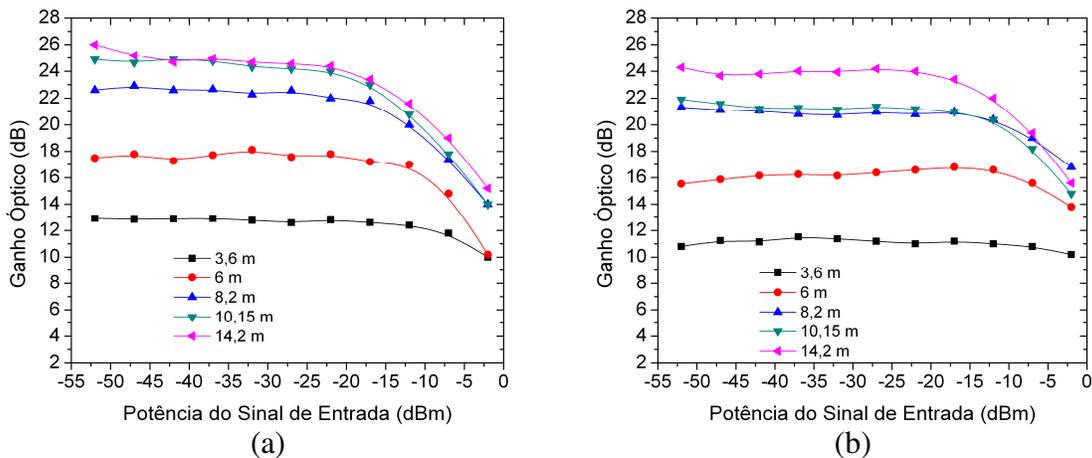


Fig. 5.43 – Ganho óptico do EDFA com reflexão do bombeio contra-propagante em função da potência de entrada de sinal, tendo o comprimento da EDF como parâmetro: bombeio em 20 mW e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.

## 5.7 Topologia com bombeio co-propagante e reflexão de sinal

Neste tipo de topologia, como o próprio nome diz, ocorre a dupla passagem do sinal óptico a ser amplificado, ou seja, o sinal atravessa toda a extensão da fibra dopada duas vezes. Com isso, dependendo da quantidade de bombeio que é acoplado à EDF e do

comprimento da EDF, é possível obter valores de ganho óptico maiores que os alcançados com as topologias que utilizam bombeio co-propagante ou contra-propagante. Por outro lado, se o bombeio não é forte o suficiente para gerar uma inversão de população eficiente em toda a extensão da EDF, a atenuação do sinal devida à absorção de fótons pode aumentar, principalmente na segunda passagem do sinal pela EDF. Para esta configuração, o bombeio óptico é acoplado a EDF na mesma extremidade do EDFA em que o sinal a ser amplificado é injetado. Vale lembrar que o sinal amplificado deixa a EDF pela mesma porta do WDM em que foi acoplado, ou seja, na região onde o bombeio tende a ser mais forte.

As Fig. 5.44, 5.45, 5.46, 5.47 e 5.48 mostram as curvas de ganho óptico em função da potência do sinal de entrada, tendo como parâmetro a potência de bombeio óptico. Estas curvas de ganho foram obtidas utilizando os comprimentos de onda de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm. Quando a potência do bombeio óptico utilizado é de 20 mW, é possível obter, para alguns comprimentos de EDF, valores maiores que os encontrados em outras topologias. Sendo assim, com este bombeio, os segmentos de EDF que possuem os maiores comprimentos foram os que obtiveram os maiores ganhos ópticos, tanto para o sinal com comprimento de onda de 1537 nm, como para o de 1563,8 nm. Neste caso, este bombeio é capaz de excitar, de forma eficiente, os íons de érbio presentes na EDF. Em relação ao comprimento de onda do sinal de entrada, quando o sinal possui 1537 nm, é possível obter um ganho relativamente maior, porém, a fibra com 14,2 m de comprimento apresenta valores de ganho maiores quando o sinal possui 1563,8 nm. Como o sinal de entrada percorre todo o comprimento da EDF duas vezes, é possível que esteja ocorrendo uma maior atenuação devida à absorção de fótons do sinal de entrada e, de acordo com o perfil

de absorção do érbio, o sinal de 1537 nm é mais sensível a esta absorção. Por outro lado, para as fibras com menos de 10 m de comprimento, os ganhos maiores para o sinal de 1537 nm foram obtidos devido ao perfil de emissão do érbio que possui uma magnitude maior para este comprimento de onda se comparado com 1563,8 nm. Além disso, a atenuação devida à absorção de fótons do sinal diminuiu consideravelmente para ambos os comprimentos de onda quando é utilizado o bombeio de 20 mW.

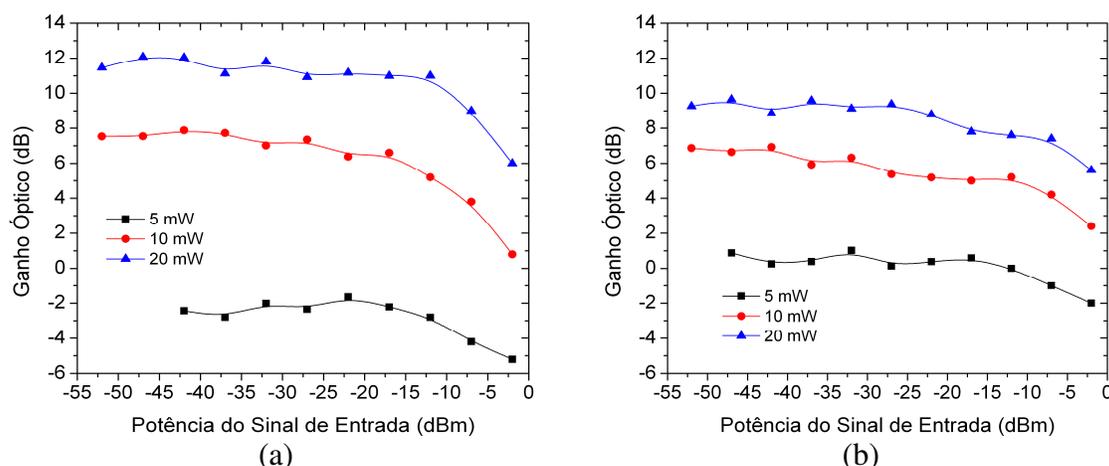


Fig. 5.44 – Ganho óptico do EDFA com reflexão de sinal e bombeio co-propagante em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: EDF de 3,6 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.

No caso das curvas de ganho óptico obtidas para o bombeio de 10 mW, os maiores valores de ganho óptico foram alcançados com uma fibra de 8,2 m de comprimento, quando o sinal de entrada possui 1537 nm. Para o outro comprimento de onda, o maior valor de ganho óptico foi obtido com a fibra de 14,2 m de comprimento. A dupla passagem do sinal pela EDF consome uma quantidade maior de portadores no nível metaestável e isso demanda um bombeio forte em toda extensão da fibra dopada. Porém, o bombeio de 10 mW pode não ser suficiente para manter uma quantidade elevada de portadores no nível metaestável. Além disso, o sinal óptico pode ser atenuado devido à absorção de fótons, sendo que, segundo o perfil de absorção do érbio, para 1537 nm esta absorção possui uma

magnitude maior que em 1563,8 nm. Deste modo, verifica-se que para o sinal de 1537 nm, as perdas são mais significativas quando se utilizam fibras maiores que 8 m. Por outro lado, para o sinal de 1563,8 nm, as perdas por absorção do sinal também ocorrem, porém, com menor intensidade. Dessa forma, é possível obter os maiores ganhos utilizando os maiores segmentos de EDF.

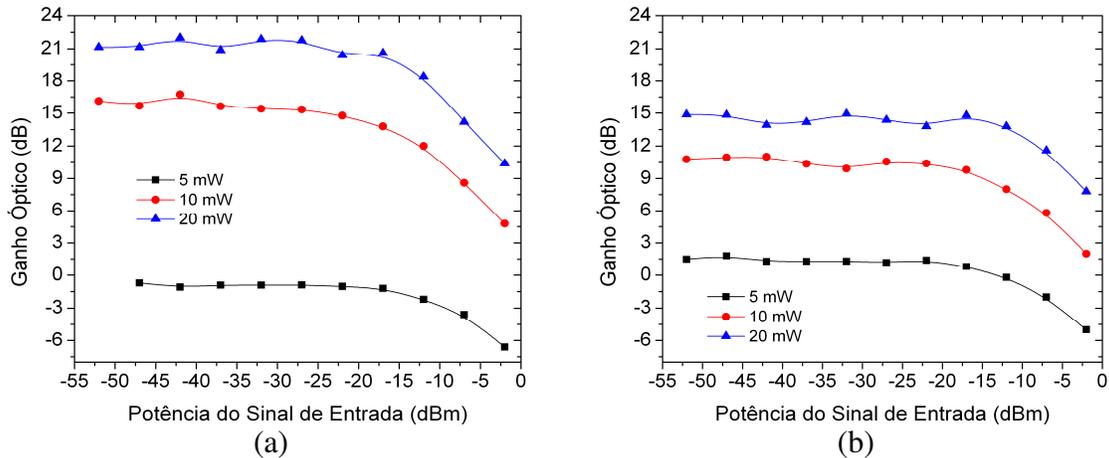


Fig. 5.45 – Ganho óptico do EDFA com reflexão de sinal e bombeio co-propagante em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: EDF de 6 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.

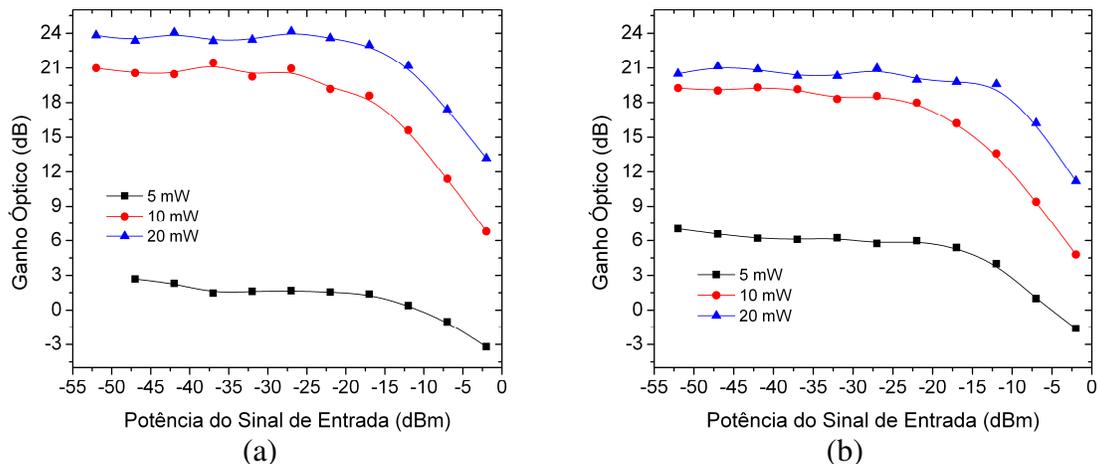


Fig. 5.46 – Ganho óptico do EDFA com reflexão de sinal e bombeio co-propagante em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: EDF de 8,2 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.

Como nesta topologia o sinal percorre toda extensão da fibra dopada mais de uma vez, é interessante que o bombeio óptico acoplado a EDF possa excitar os íons de érbio de

forma eficiente. Assim sendo, se o bombeio possui 5 mW de potência, se torna mais difícil conseguir esta condição. Com isso, se o sinal possui 1537 nm, ou seja, quando a absorção do sinal de entrada é mais forte, é possível obter ganho apenas quando o sinal de entrada é menor que -15 dBm e a EDF é menor que 8,2 m. Por outro lado, na amplificação do sinal em 1563,8 nm, foi obtido ganho óptico para quase todas as fibras dopadas, porém, estes não foram elevados.

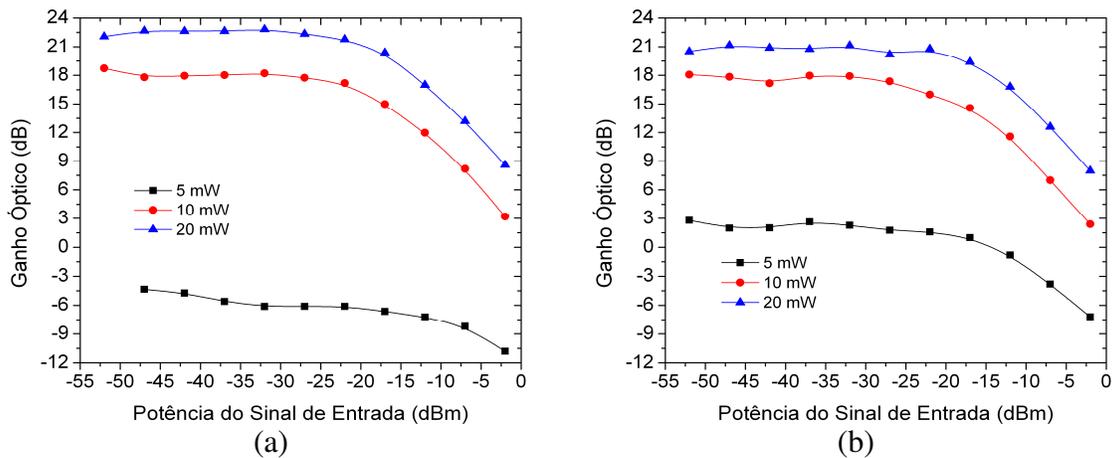


Fig. 5.47 – Ganho óptico do EDFA com reflexão de sinal e bombeio co-propagante em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: EDF de 10,15 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.

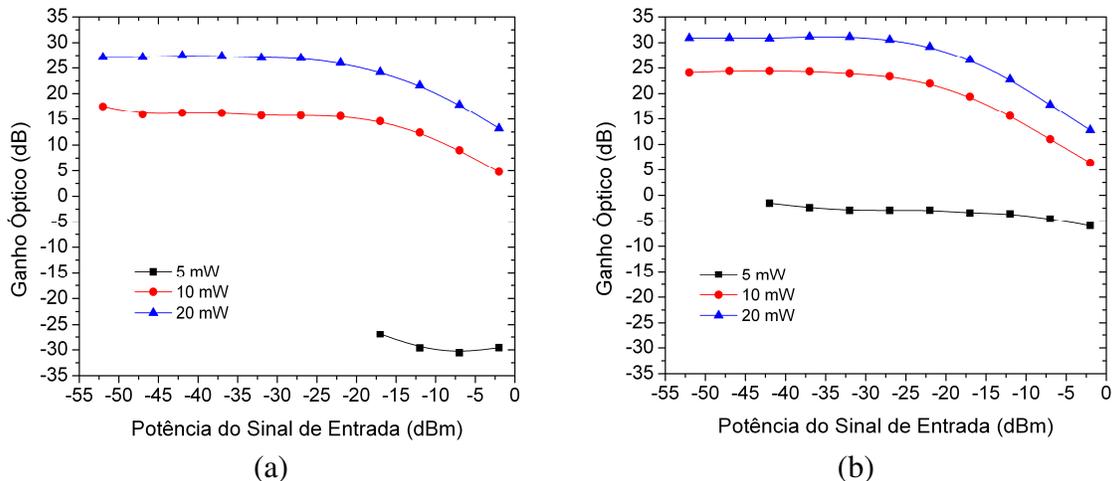


Fig. 5.48 – Ganho óptico do EDFA com reflexão de sinal e bombeio co-propagante em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: EDF de 14,2 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.

As Fig. 5.49 e 5.50 mostram as curvas de ganho óptico em função da potência do sinal de entrada, tendo o comprimento da EDF como parâmetro. Assim, através dessas figuras, verifica-se a evolução do ganho óptico em função dos diversos comprimentos de fibra dopada disponíveis. Para o bombeio em 10 mW, o comportamento do EDFA é um pouco diferente, pois, quando o sinal está em (a) 1537 nm, os maiores valores de ganho foram obtidos para as fibras que possuem 8,2 m e 10,15 m, ao contrário do comportamento do EDFA quando o sinal de entrada está em (b) 1563,8 nm. Neste caso, os maiores ganhos foram obtidos para a fibra de 14,2 m. Como em 1537 nm a atenuação devida à absorção do sinal de entrada é maior, se comparada com o sinal em 1563,8 nm, verifica-se que para as fibras maiores que 8 m de comprimento o bombeio não está sendo suficiente para excitar os íons de érbio no nível fundamental e, com isso, a absorção de fótons é maior, principalmente na região oposta ao primeiro acoplador WDM.

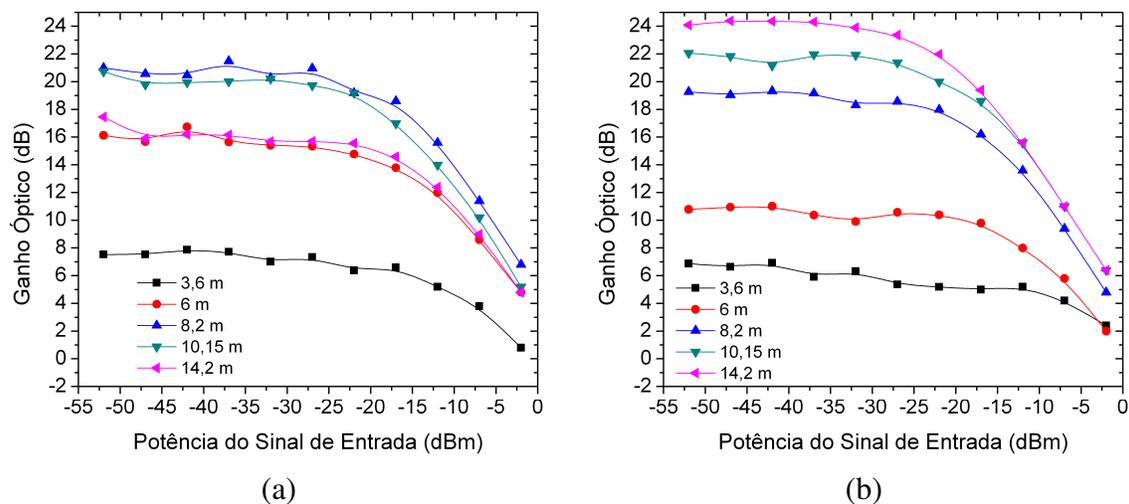


Fig. 5.49 – Ganho óptico do EDFA com reflexão de sinal e bombeio co-propagante em função da potência de entrada do sinal, tendo o comprimento da EDF como parâmetro: bombeio em 10 mW e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.

Para o bombeio com potência óptica de 20 mW, o ganho para a fibra de 14,2 m e sinal de 1537 nm teve uma melhora significativa se comparado ao conseguido com o bombeio de 10 mW. Neste caso, o ganho foi relativamente maior do que os encontrados

para as EDFs de 8,2 m e 10,15 m. Essa ligeira melhora do ganho se deve ao bombeio de 20 mW que elevou a quantidade de portadores no nível excitado e, conseqüentemente, diminuiu o efeito da atenuação devida à absorção de fótons. Dessa forma, foi possível obter ganhos maiores para os segmentos de EDF mais longos.

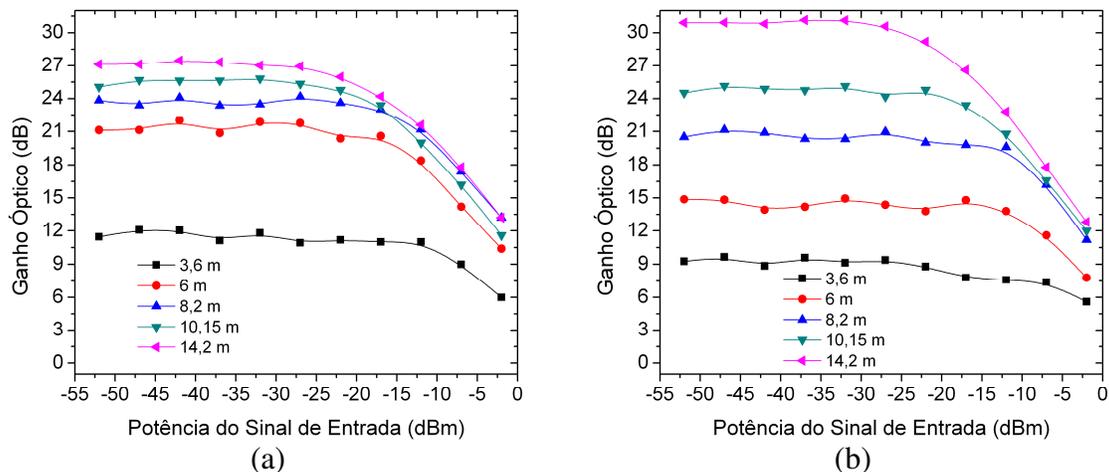


Fig. 5.50 – Ganho óptico do EDFA com reflexão de sinal e bombeio co-propagante em função da potência de entrada do sinal, tendo o comprimento da EDF como parâmetro: bombeio em 20 mW e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.

## 5.8 Topologia com bombeio contra-propagante e reflexão de sinal

Esta configuração possui o circuito óptico semelhante ao da configuração anterior, sendo os dispositivos utilizados no circuito óptico também os mesmos. A diferença está na posição em que o laser de bombeio é acoplado à EDF. Neste caso, o bombeio é inserido no segundo acoplador WDM, realizando assim, um bombeio no sentido contra-propagante em relação à primeira passagem do sinal de entrada pela EDF. Com isso, a região da fibra dopada onde ocorre a reflexão do sinal de entrada, ou seja, próxima ao segundo acoplador WDM é a que possui a maior quantidade de portadores no nível metaestável. Assim sendo, o ganho óptico para este tipo de topologia, teoricamente, tende a ser menor que o ganho para a topologia anterior, pois, o sinal a ser amplificado entra e sai da EDF pelo mesmo

lado, ou seja, o lado oposto ao que o bombeio óptico foi acoplado, onde a população de íons de érbio é ligeiramente menor. As Fig. 5.51, 5.52, 5.53, 5.54 e 5.55 mostram as curvas de ganho óptico em função da potência do sinal de entrada, tendo a potência de bombeio óptico como parâmetro e o sinal em (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.

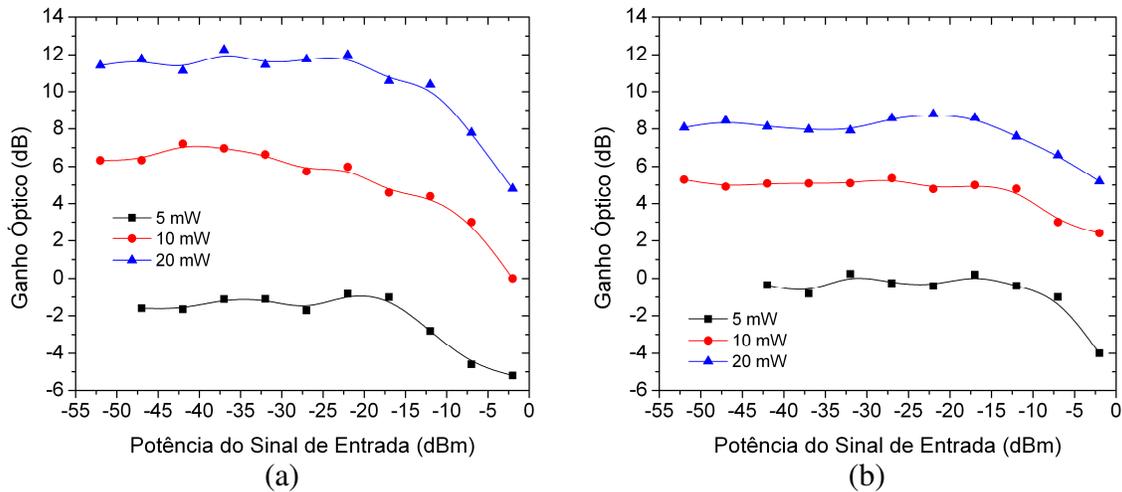


Fig. 5.51 – Ganho óptico do EDFA com reflexão de sinal e bombeio contra-propagante em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 3,6 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.

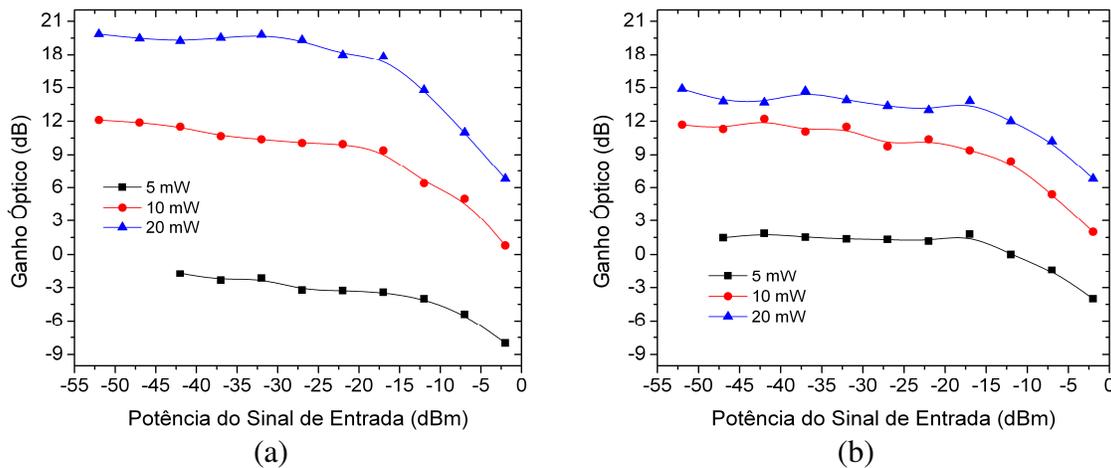


Fig. 5.52 – Ganho óptico do EDFA com reflexão de sinal e bombeio contra-propagante em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 6 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.

Através dessas figuras, percebe-se que, quando o sinal de entrada está em 1537 nm, os maiores valores de ganho óptico foram obtidos para a fibra de 8,2 m. Para as fibras com

comprimentos maiores, o ganho óptico é ligeiramente menor que o obtido para a fibra de 8,2 m. Com isso, pode-se considerar este como sendo o segmento próximo do comprimento ótimo de EDF para esta configuração, já que é possível conseguir, uma boa amplificação.

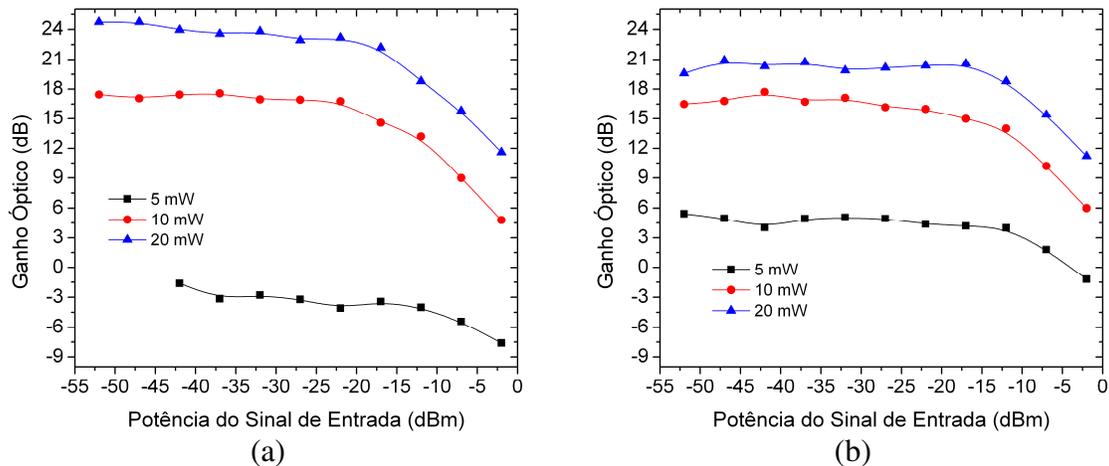


Fig. 5.53 – Ganho óptico do EDFA com reflexão de sinal e bombeio contra-propagante em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 8,2 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.

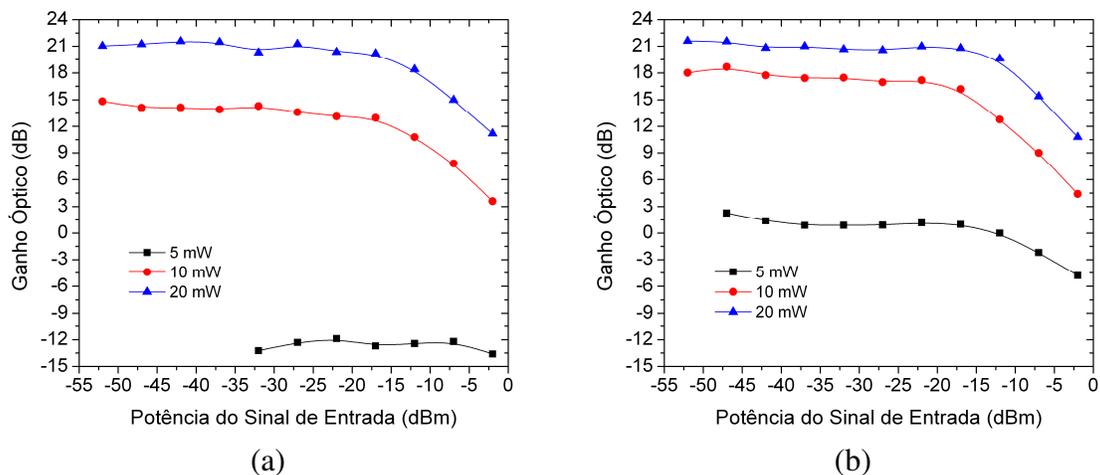


Fig. 5.54 – Ganho óptico do EDFA com reflexão de sinal e bombeio contra-propagante em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 10,15 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.

Por outro lado, quando o comprimento de onda do sinal de entrada é de 1563,8 nm, o ganho óptico tende a ser maior para as fibras com comprimentos mais longos. Isso indica que o sinal óptico neste comprimento de onda não sofre uma forte atenuação por absorção

de fótons como em 1537 nm, o que poderia prejudicar o ganho óptico final. Além disso, para um bombeio em 10 mW, o ganho óptico do EDFA quando se utiliza as fibras de 10,15 m e 14,2 m são bem parecidos, o que indica que para a fibra de 14,2 m e para as que possuem comprimentos superiores, pode estar ocorrendo absorção do sinal de entrada, principalmente na região próxima ao primeiro acoplador WDM. Outro fato interessante, é que o bombeio de 5 mW não é suficiente para poder amplificar um sinal cujo comprimento de onda é de 1537 nm. Neste caso, a dupla passagem do sinal pela fibra exige que se tenha uma quantidade maior de portadores no nível metaestável, fato que não pode ser alcançado com este nível de bombeio. Para o comprimento de onda do sinal de entrada em 1563,8 nm, apesar da absorção de sinal ser menor, também não é possível obter ganhos expressivos.

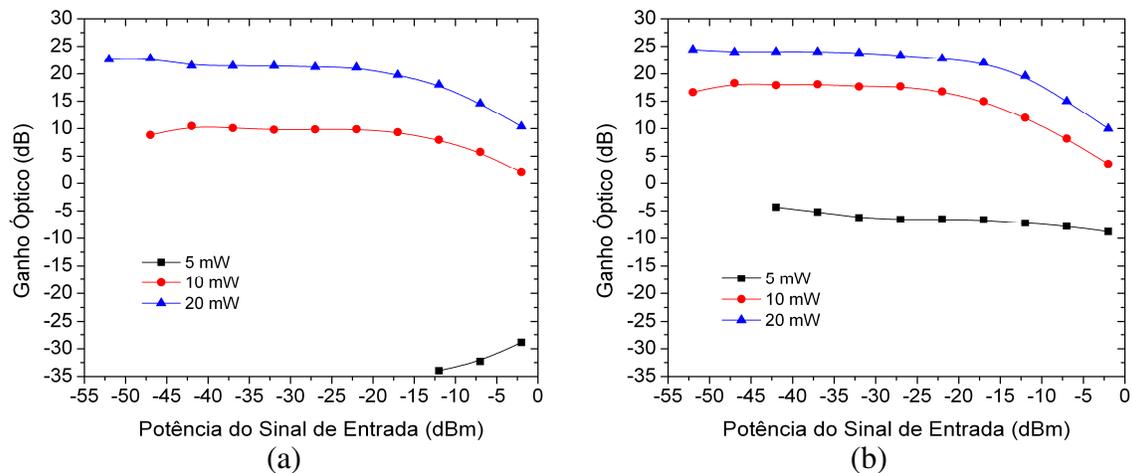


Fig. 5.55 – Ganho óptico do EDFA com reflexão de sinal e bombeio contra-propagante em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 14,2 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.

As Fig. 5.56 e 5.57 mostram as curvas de ganho óptico em função da potência do sinal de entrada, tendo o comprimento da EDF como parâmetro, e comprimentos de onda do sinal em (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm. Assim, para as Fig. 5.56 onde o bombeio utilizado foi de 10 mW, percebe-se que o comprimento de fibra dopada de 14,2 m é, de

certa forma, exagerado, pois, nas duas figuras verifica-se que é possível obter ganhos semelhantes ou, em algumas vezes, maiores utilizando fibras de 8,2 m e 10,15 m de comprimento. Nesse caso, o sinal de entrada pode estar sendo absorvido, principalmente na região onde o sinal é acoplado a EDF, pois, este sinal atravessa toda a extensão da fibra duas vezes e a potência de bombeio não é suficiente para manter os portadores no nível metaestável por toda a extensão.

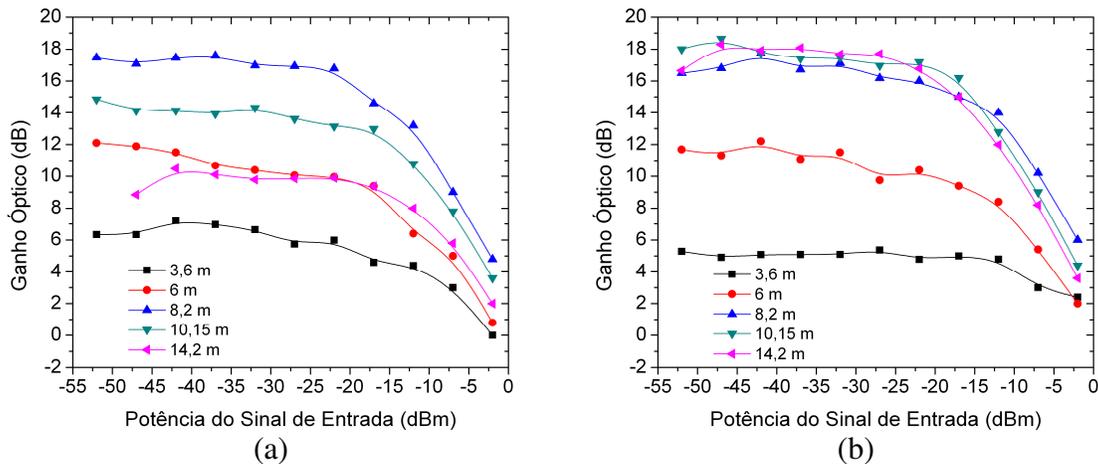


Fig. 5.56 – Ganho óptico do EDFA com reflexão de sinal e bombeio contra-propagante em função da potência de entrada do sinal, tendo o comprimento da EDF como parâmetro: bombeio em 10 mW e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.

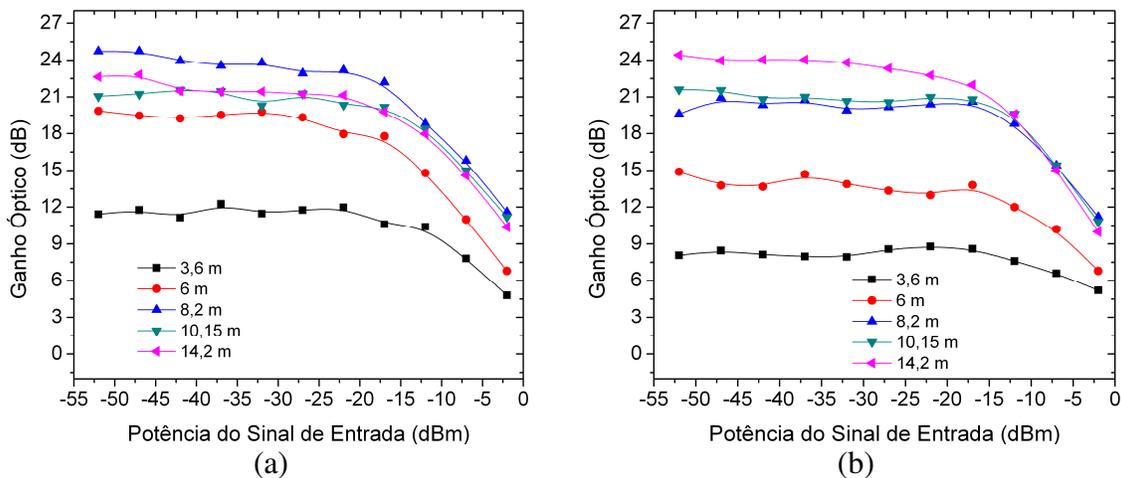


Fig. 5.57 – Ganho óptico do EDFA com reflexão de sinal e bombeio contra-propagante em função da potência de entrada do sinal, tendo o comprimento da EDF como parâmetro: bombeio em 20 mW e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.

Quando o bombeio óptico é de 20 mW, o ganho obtido com as fibras curtas foi ligeiramente maior para o sinal em 1537 nm. Neste caso, apesar da dupla passagem do sinal pela fibra, o bombeio óptico consegue promover uma inversão de população eficaz ao longo da EDF e, com isso, a absorção de fótons do sinal na entrada não ocorre com grande intensidade. Além disso, de acordo com o perfil da curva de emissão do érbio, em 1537 nm, a probabilidade de ocorrer emissões é maior, o que faz com que a amplificação do sinal seja mais eficiente. Se for feita uma comparação entre os valores de ganho óptico obtidos para essa configuração e compará-los com os obtidos pela configuração anterior, verifica-se que com o bombeio co-propagante é possível obter ganhos maiores, pois, a região onde existem mais portadores no nível metaestável, é também a região onde o sinal é acoplado à fibra dopada e também por onde ele sai do EDFA.

## **5.9 Topologia com bombeio bi-direcional e reflexão de sinal**

Este tipo de topologia possui dois lasers de bombeio acoplados à fibra dopada, a cada um dos WDMs do EDFA. Deste modo, com esta distribuição de bombeio é possível aumentar, significativamente, a quantidade de portadores no nível metaestável. Outra característica desta topologia é a reflexão do sinal óptico de entrada que, juntamente com o bombeio bi-direcional, pode alcançar ganhos elevados. Assim, para que isso aconteça, o bombeio deve ser forte em praticamente toda a extensão da fibra e, com isso, o sinal pode ser amplificado com eficiência, atingindo altas taxas de ganho. As Fig. 5.58 5.59, 5.60, 5.61 e 5.62 que são apresentadas a seguir se referem as curvas de ganho óptico em função da potência do sinal de entrada, tendo a potência de bombeio como parâmetro, para o sinal em 1537 nm e 1563,8 nm.

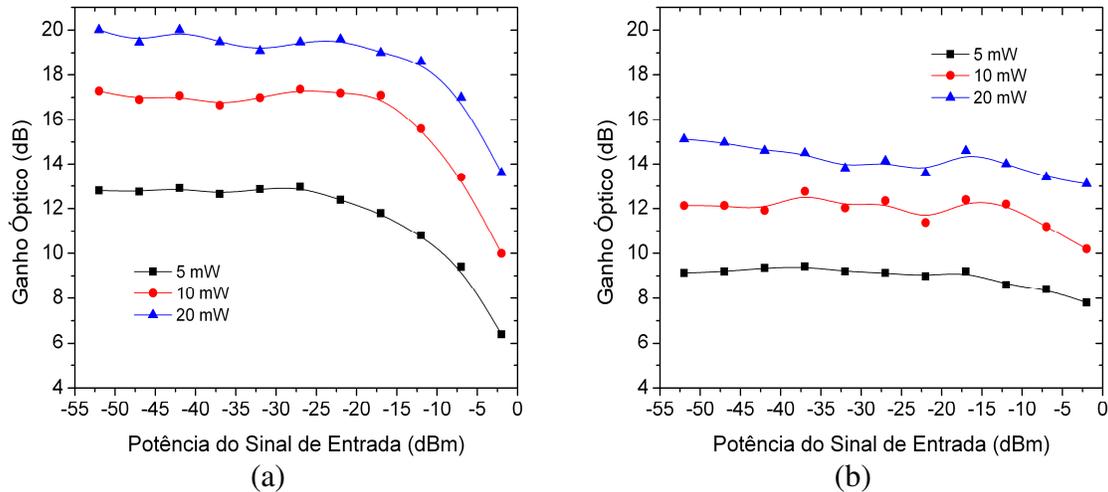


Fig. 5.58 – Ganho óptico do EDFA com reflexão de sinal e bombeio bi-direcional em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 3,6 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.

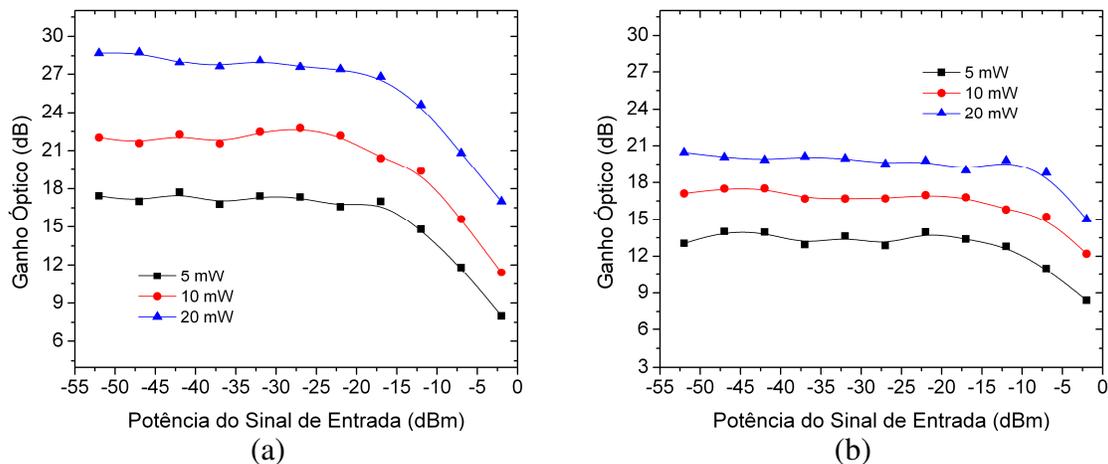


Fig. 5.59 – Ganho óptico do EDFA com reflexão de sinal e bombeio bi-direcional em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 6 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.

As curvas de ganho óptico obtidas com esta topologia foram as que obtiveram os maiores valores de ganho se comparados aos obtidos por todas as outras topologias analisadas, principalmente quando o sinal de entrada possui o comprimento de onda de 1537 nm. Isso se deve ao fato da eficiência do bombeio bi-direcional e do perfil de emissão do érbio que é maior para este comprimento de onda. A única exceção se encontra nas Fig. 5.62, que mostram curvas de ganho com amplitudes maiores para o sinal em 1563,8 nm,

quando o bombeio possui 5 mW ou 10 mW. A dupla passagem do sinal por uma fibra de 14,2 m de comprimento torna esta configuração dependente de um bombeio forte para se obter ganhos consideráveis. Caso isto não ocorra, é possível que ocorram mais absorções de fótons do sinal de entrada para o sinal em 1537 nm que para o sinal em 1563,8 nm.

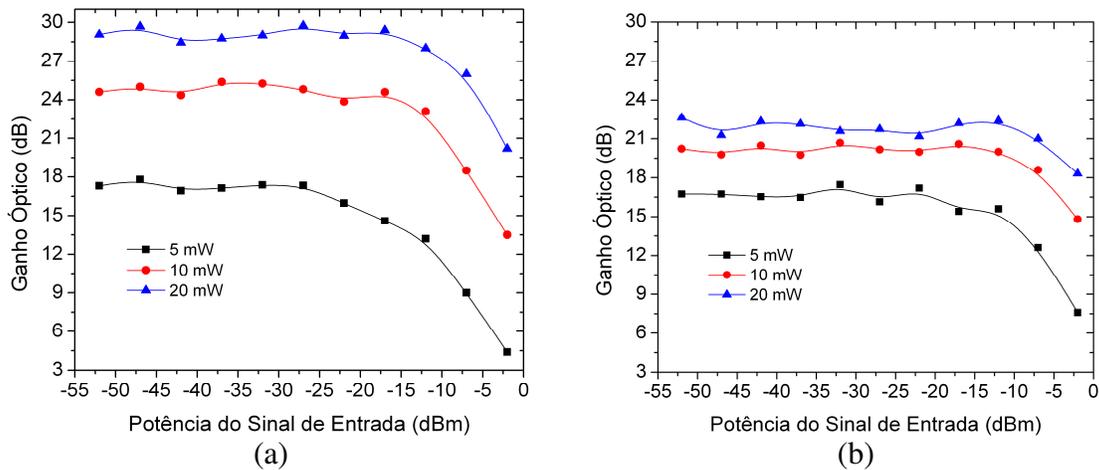


Fig. 5.60 – Ganho óptico do EDFA com reflexão de sinal e bombeio bi-direcional em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 8,2 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.

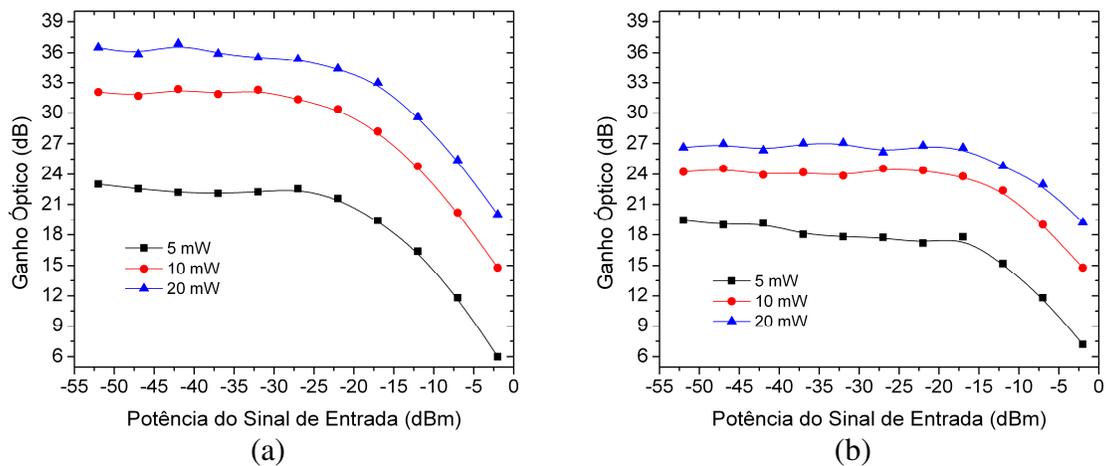


Fig. 5.61 – Ganho óptico do EDFA com reflexão de sinal e bombeio bi-direcional em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 10,15 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.

Outro fato observado nesta topologia é a evolução do ganho óptico em função do comprimento da EDF. Assim sendo, pode-se considerar o segmento com comprimento

mais adequado para a montagem do EDFA como sendo o de 10,15 m para o sinal de entrada em 1537 nm. Para o bombeio em 20 mW, as curvas de ganho óptico das fibras de 10,15 m e 14,2 m apresentam amplitudes semelhantes àquelas quando o sinal está em 1537 nm. Sendo que, em ambos os casos, o ganho é bem elevado.

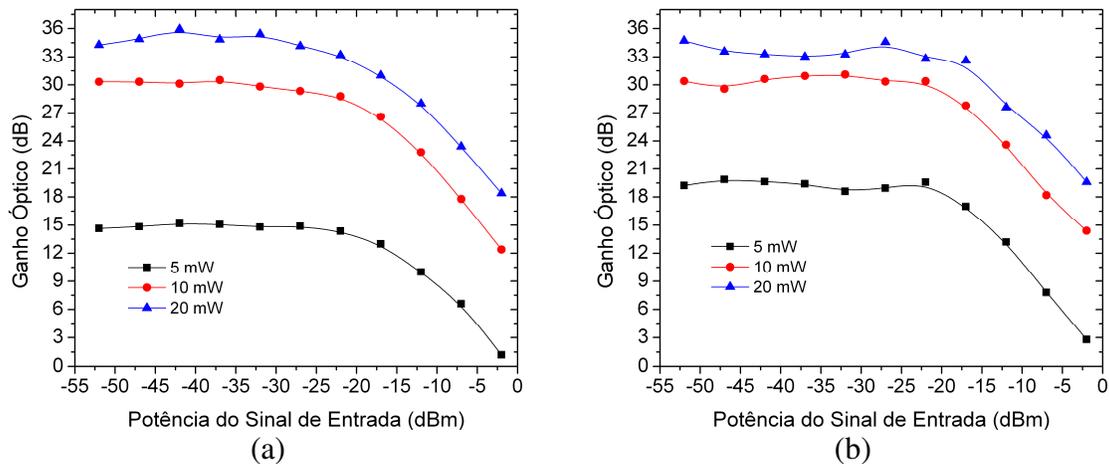


Fig. 5.62 – Ganho óptico do EDFA com reflexão de sinal e bombeio bi-direcional em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 14,2 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.

As Fig. 5.63 e 5.64 mostram as curvas de ganho óptico em função da potência do sinal de entrada, tendo os comprimentos de EDF como parâmetro e a potência de bombeio em (a) 10 mW e (b) 20 mW, para os comprimentos de onda de sinal de 1537 nm e 1563,8 nm. No caso do sinal em 1537 nm, verifica-se que as curvas de ganho para a fibra de 14,2 m não apresentam os maiores valores. Porém, ao as comparar com às de outras topologias, os valores obtidos ainda são os maiores registrados. Para o bombeio em 10 mW, a curva de ganho para a fibra de 10,15 m possui os maiores valores. Possivelmente, pode estar ocorrendo uma absorção maior de fótons do sinal para a fibra de 14,2 m. Quando o bombeio utilizado é de 20 mW, as fibras de 10,15 m e 14,2 m possuem valores semelhantes. Neste caso, acredita-se que esteja ocorrendo uma atenuação maior do sinal na

fibra de 14,2 m, pois, mesmo com bombeio de 20 mW, pode estar ocorrendo absorção de fótons do sinal.

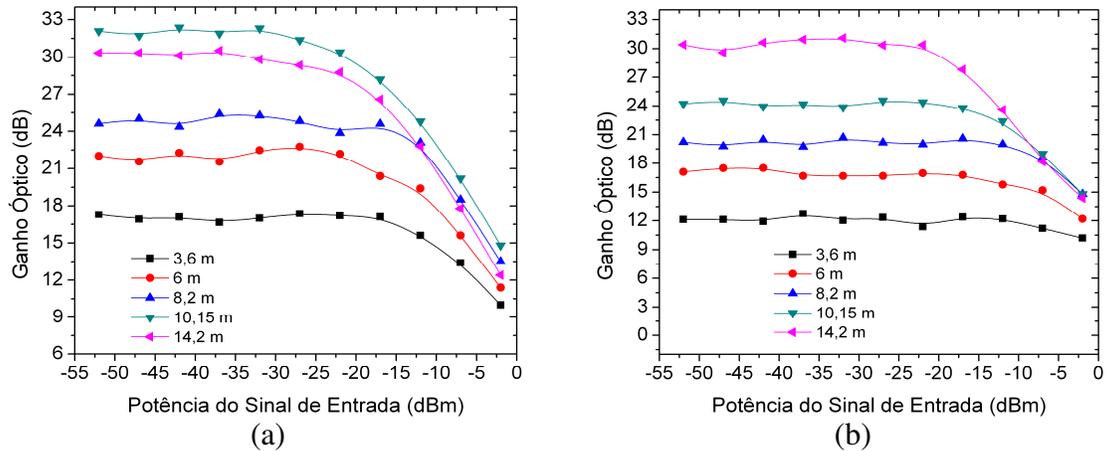


Fig. 5.63 – Ganho óptico do EDFA com reflexão de sinal e bombeio bi-direcional em função da potência de entrada do sinal, tendo o comprimento da EDF como parâmetro: bombeio em 10 mW e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.

No caso das curvas de ganho obtidas com o sinal em 1537 nm, tanto para o bombeio em 10 mW como em 20 mW, as fibras que possuem os maiores comprimentos conseguem amplificar o sinal com maior eficiência, pois o sinal de entrada não sofre absorção considerável de fótons pelos portadores no nível fundamental. Deste modo, o ganho óptico para a EDF de 14,2 m alcança os maiores valores.

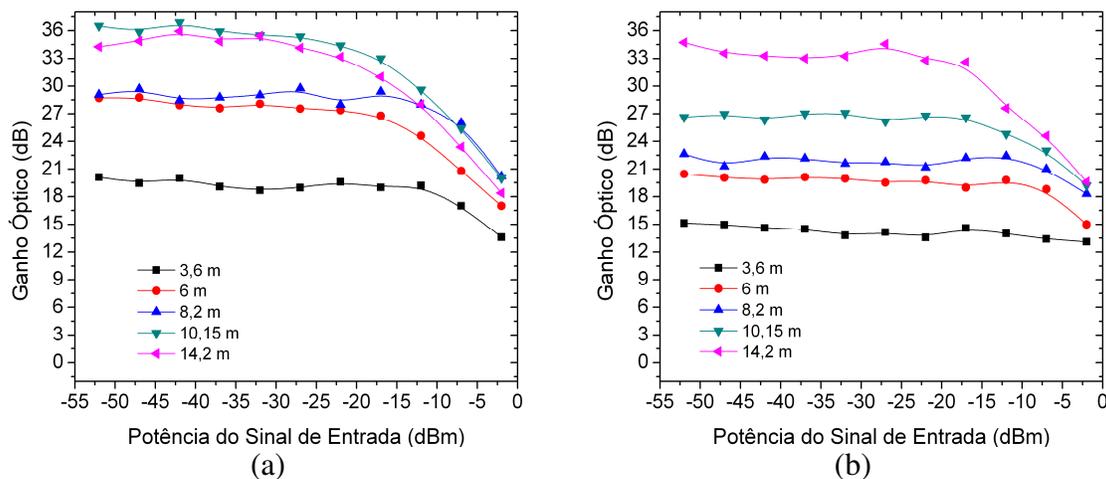


Fig. 5.64 – Ganho óptico do EDFA com reflexão de sinal e bombeio bi-direcional em função da potência de entrada do sinal, tendo o comprimento da EDF como parâmetro: bombeio em 20 mW e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.

## 5.10 Topologia com reflexão de bombeio e sinal

Para finalizar a análise das topologias propostas no Capítulo 4, esta sessão apresenta os resultados para a topologia que utiliza a reflexão do sinal de entrada e a reflexão do bombeio. Assim, esta topologia pode ser considerada como a união das topologias que apresentam a reflexão do sinal e a reflexão do bombeio. Como parte do bombeio residual é re-acoplado à EDF, a Tab. 5.3 apresenta os valores medidos de bombeio residual para todos os comprimentos de EDF disponíveis e para o bombeio em 5 mW, 10 mW e 20 mW.

Comparando os valores desta tabela com os obtidos para as topologias que possuem reflexão do bombeio, verifica-se que os níveis de bombeio residual para esta topologia são ligeiramente menores que os encontrados para as outras topologias. Isso se deve ao fato de que, a dupla passagem do sinal pela fibra dopada faz com que ocorra uma quantidade maior de emissões estimuladas, diminuindo assim, a população de íons de érbio presentes no nível metaestável. Com isso, os fótons pertencentes ao bombeio são rapidamente absorvidos pelos portadores presentes no nível fundamental.

*Tabela 5.3 – Potência de bombeio residual obtido na saída do segundo acoplador WDM.*

<b>Comprimento da EDF / Bombeio</b>	<b>5 mW</b>	<b>10 mW</b>	<b>20 mW</b>
3,6 m	1,7 mW	4,5 mW	8,5 mW
6 m	0,3 mW	1,1 mW	3,5 mW
8,2 m	0,2 mW	1,0 mW	2,2 mW
10,15 m	0,1 mW	0,6 mW	1,4 mW
14,2 m	13 $\mu$ W	0,1 mW	0,3 mW

De acordo com as características descritas para esta topologia, o sinal de entrada e o bombeio atravessam toda extensão da fibra dopada e, em seguida, são refletidos na extremidade oposta. Dessa forma, o comportamento adquirido por esta topologia se assemelha às da topologia com reflexão de sinal e bombeio co-propagante, principalmente, quando o bombeio residual não representa valores significativos. As Fig. 5.65, 5.66, 5.67, 5.68 e 5.69 mostram as curvas de ganho óptico em função da potência do sinal óptico de entrada para vários comprimentos de fibra dopada e diferentes potências de bombeio, quando o sinal opera em (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.

Quando o bombeio óptico é de 5 mW, esta topologia não se mostra como uma solução apropriada, pois, dependendo do comprimento de onda do sinal de entrada e do comprimento da EDF, não é possível obter ganho. Para o sinal com comprimento de onda de 1537 nm, a absorção de fótons é maior se comparada àquela para o sinal em 1563,8 nm. Com isso, os ganhos foram menores para 1537 nm. As fibras menores, por sua vez, ainda são capazes de alcançar certo ganho. Porém, a amplificação com fibras longas e baixo bombeio é prejudicada devido a dupla passagem do sinal e, ao baixo bombeio residual.

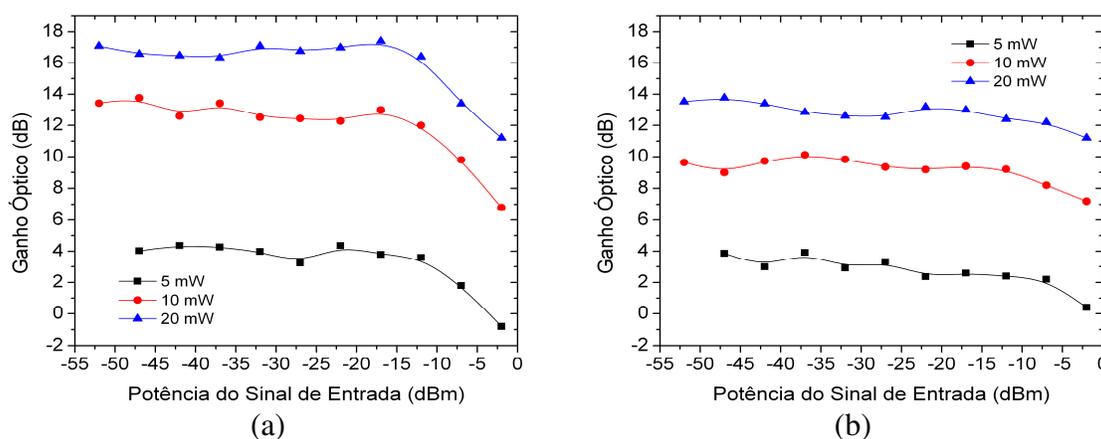


Fig. 5.65 – Ganho óptico do EDFA com reflexão de sinal e bombeio em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 3,6 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.

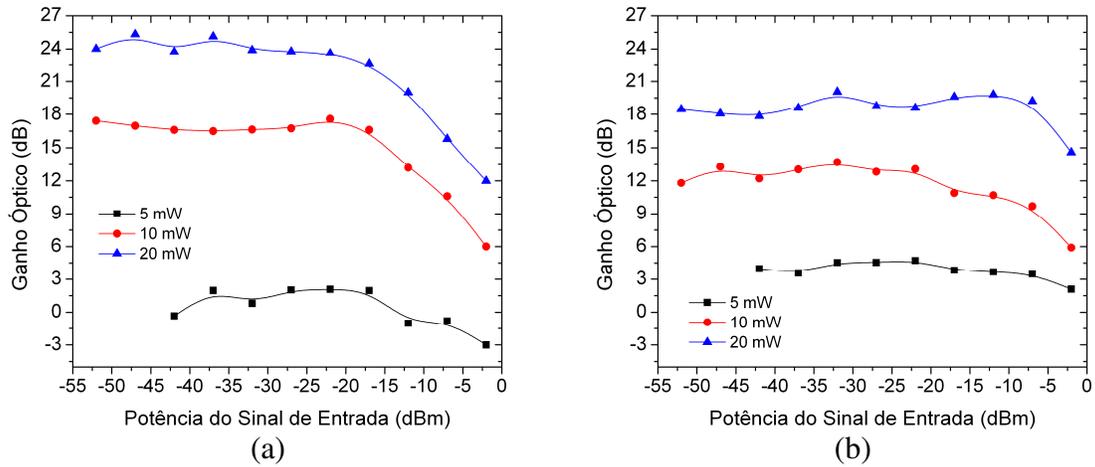


Fig. 5.66 – Ganho óptico do EDFA com reflexão de sinal e bombeio em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 6 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.

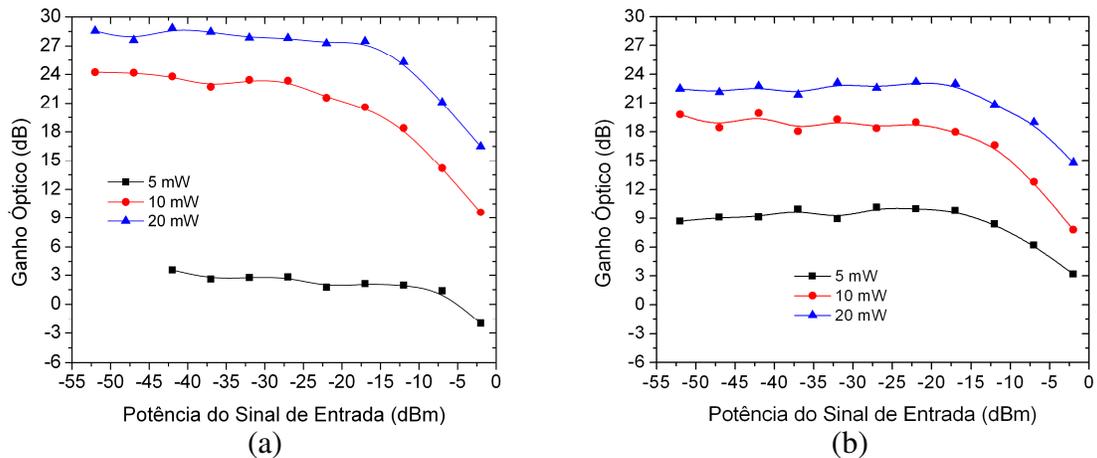


Fig. 5.67 – Ganho óptico do EDFA com reflexão de sinal e bombeio em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 8,2 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.

Para níveis de bombeio de 10 mW ou 20 mW, os maiores valores de ganho óptico foram obtidos quando o comprimento de onda do sinal é de 1537 nm. A única exceção foi para a fibra de 14,2 m de comprimento, cujo maior ganho aconteceu para 1563,8 nm. Assim, da mesma forma que para as outras topologias que utilizam reflexão de sinal, este comprimento de fibra se torna uma opção pouco adequada, necessitando, assim, de um bombeio mais potente para melhorar a inversão de portadores. Se o bombeio possui 10 mW de potência, o comprimento considerado ótimo para esta topologia se encontra por volta de

8,2 m para sinal em 1537 nm e 14,2 m para sinal em 1563,8 nm. Assim, para fibras menores, o sinal em 1537 nm tende a obter ganhos maiores. Por outro lado, quando este sinal é amplificado por fibras mais longas, pode ocorrer absorção do mesmo devido à provável falta de portadores no nível metaestável. Com o bombeio em 20 mW, devido à maior quantidade de portadores no nível metaestável, em ambos os comprimentos de onda, os ganhos ópticos foram maiores com o aumento do comprimento da EDF.

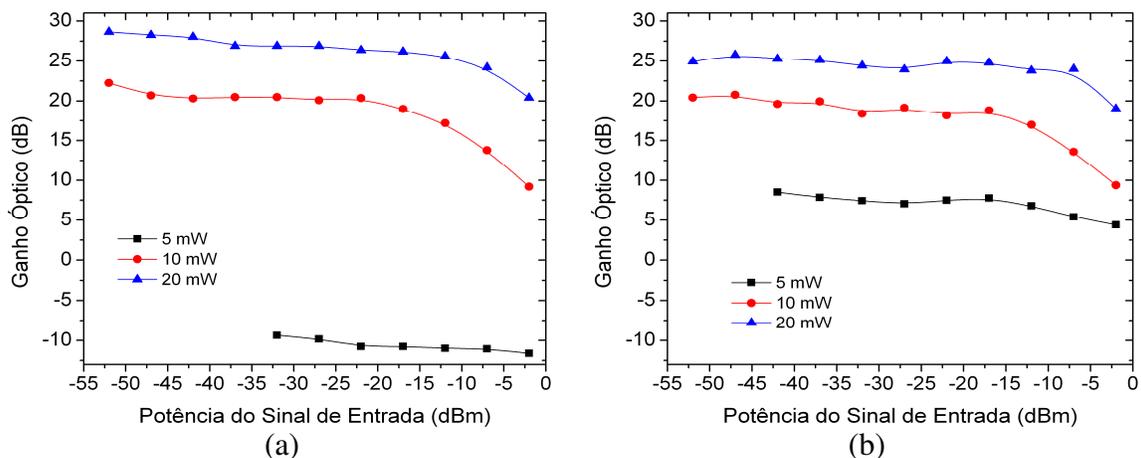


Fig. 5.68 – Ganho óptico do EDFA com reflexão de sinal e bombeio em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 10,15 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.

As Fig. 5.70 e 5.71 apresentam as curvas de ganho óptico em função da potência do sinal de entrada, tendo como parâmetro diversos comprimentos de EDF, e sinal em (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm. Através das figuras que se referem ao sinal em 1537 nm, é possível perceber que as curvas para os comprimentos de fibra maiores não apresentam os maiores valores de ganho, principalmente, para os bombeios em 5 mW e 10 mW. Se compararmos estes valores aos obtidos para a topologia com reflexão de sinal e bombeio co-propagante, pode-se verificar que a reflexão de bombeio, em alguns casos, auxilia a inversão de portadores, principalmente, para as fibras menores. Isso faz com que o ganho para esta topologia seja maior. Além disso, da mesma forma que para a topologia com reflexão de

sinal e bombeio co-propagante, o comprimento de EDF de 14,2 m não apresenta os maiores valores de ganho óptico.

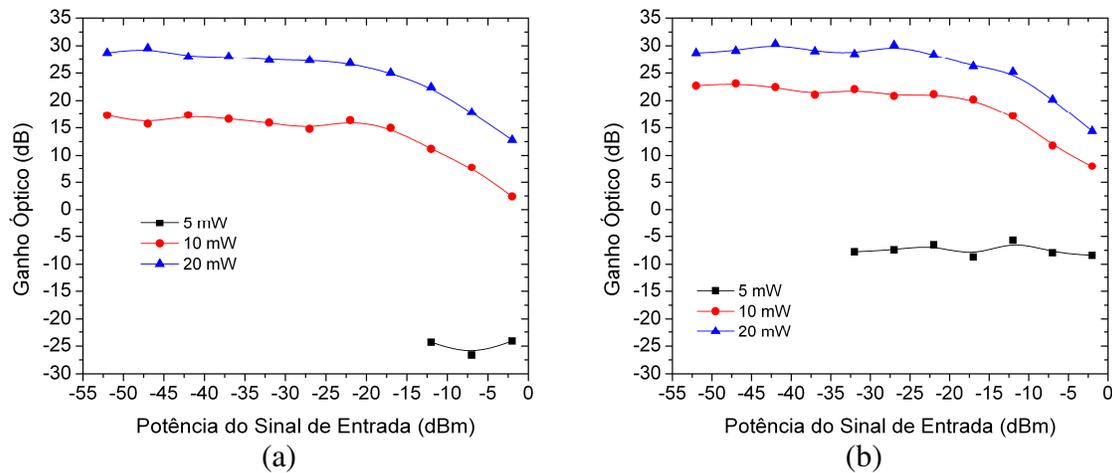


Fig. 5.69 – Ganho óptico do EDFA com reflexão de sinal e bombeio em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro: amostra de EDF de 14,2 m e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.

Para o bombeio em 20 mW e comprimento de onda do sinal de 1537 nm, as fibras dopadas com 8,2 m, 10,15 m e 14,2 m apresentam curvas de ganho óptico com valores semelhantes. Para as fibras mais longas (10,15 m e 14,2 m), a possibilidade de estar ocorrendo atenuação devido a absorção de fótons do sinal, principalmente na região onde o sinal amplificado é refletido, é consideravelmente maior. Além disso, as fibras curtas ainda se beneficiam do bombeio residual que, de certa forma, é mais significativo para estas fibras. Para o comprimento de onda de 1563,8 nm, a evolução do ganho óptico acontece com o aumento do comprimento da EDF. Neste caso, devido a menor probabilidade de absorção de fótons, as fibras mais longas tendem a conseguir os maiores ganhos. As fibras de 8,2 m e 10,15 m também apresentam curvas semelhantes para este sinal de entrada. Neste caso, acredita-se que o bombeio residual re-acoplado à EDF possa aumentar a quantidade de portadores no nível metaestável e, conseqüentemente, o ganho óptico para as fibras mais curtas.

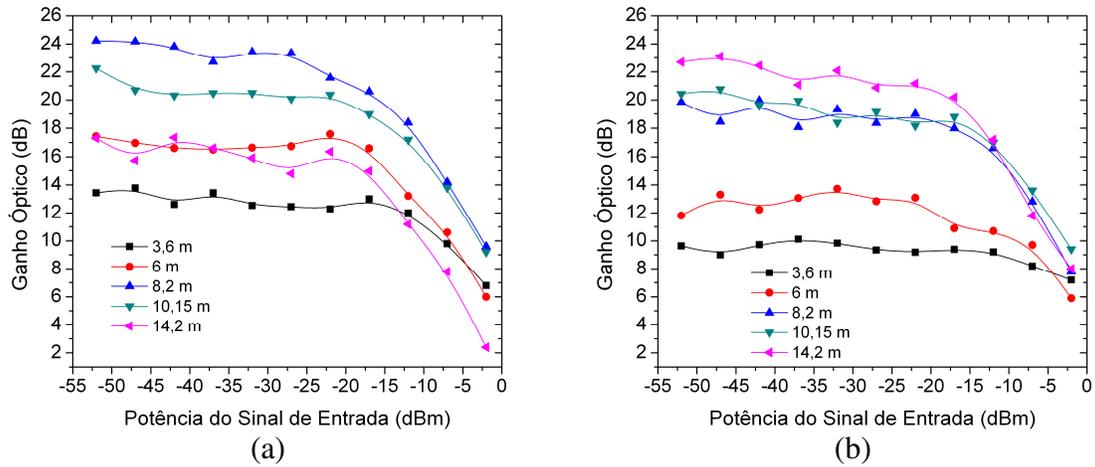


Fig. 5.70 – Ganho óptico do EDFA com reflexão de sinal e bombeio em função da potência de entrada do sinal, tendo o comprimento da EDF como parâmetro: bombeio em 10 mW e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.

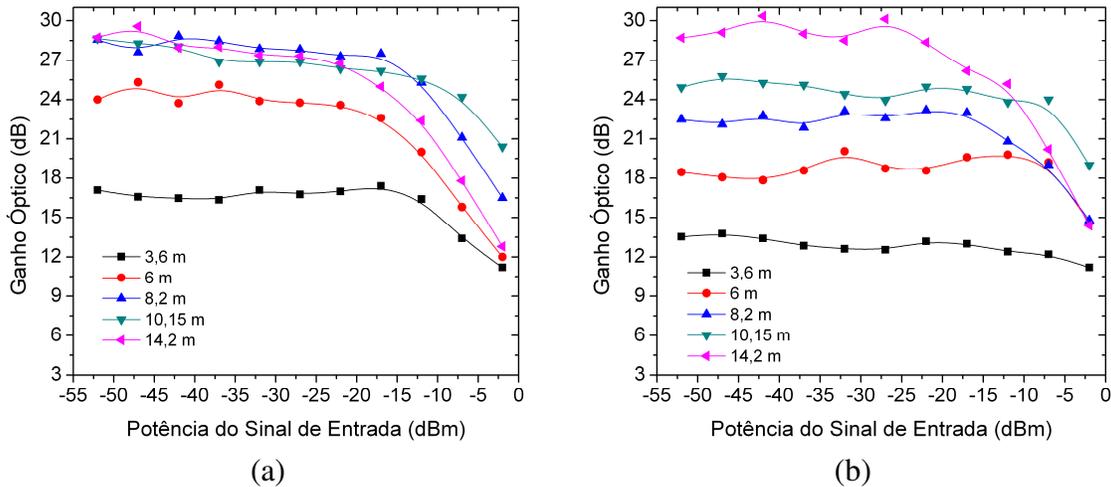


Fig. 5.71 – Ganho óptico do EDFA com reflexão de sinal e bombeio em função da potência de entrada do sinal, tendo o comprimento da EDF como parâmetro: bombeio em 20 mW e comprimento de onda do sinal de (a) 1537 nm e (b) 1563,8 nm.

## 5.11 Conclusão

Com intuito de se fazer uma comparação mais ampla entre as topologias analisadas, esta seção resume os dados experimentais obtidos para discutir as primeiras características de cada uma delas. Para tanto, a Tab. 5.4 apresenta as topologias empregadas. Para facilitar

o entendimento, serão adotados números que servirão de referência a cada uma das topologias ao longo do texto.

*Tabela 5.4 – Referência para as topologias analisadas.*

<b>Caso</b>	<b>Topologia</b>
1	Bombeio co-propagante (básica)
2	Bombeio contra-propagante
3	Bombeio bi-direcional
4	Bombeio co-propagante com reflexão
5	Bombeio contra-propagante com reflexão
6	Bombeio co-propagante com reflexão de sinal
7	Bombeio contra-propagante com reflexão de sinal
8	Bombeio bi-direcional com reflexão de sinal
9	Reflexão de sinal e bombeio (co-propagante)

Mantendo-se a mesma linha de análise e dentro das limitações referentes ao número e comprimento das amostras de fibras disponíveis, a Tab. 5.5 apresenta os resultados que identificaram os comprimentos de EDF que forneceram os maiores valores de ganho para as diferentes topologias de EDFA, obtidos para condições de operação e comprimentos de onda fixos. A tabela foi montada considerando-se os resultados para cada uma das topologias de 1 a 9, para os comprimentos de onda do sinal de entrada em 1537 nm e 1563,8 nm (representados, respectivamente, por A e B), para as potências de bombeio de 10 mW e 20 mW e, para a potência de entrada de sinal de -32 dBm. Quando são utilizadas topologias que possuem uma distribuição de bombeio mais eficiente, ou até com excesso de bombeio, como é o caso das configurações 3 e 8, o comprimento para maior ganho foi obtido com a amostra de 14 m de comprimento, uma vez que a inversão de população é melhor distribuída e, conseqüentemente, pode gerar um ganho final ainda considerável na

saída da EDF. Por outro lado, para as topologias onde o bombeio não é capaz de realizar uma inversão de população eficiente ao longo de toda fibra dopada, os comprimentos que produzem maiores ganhos tendem a se localizar entre 8 e 10 m, principalmente, quando o bombeio de 10 mW é utilizado. No entanto, para as topologias 6 e 7, que envolvem reflexão de sinal, a dupla passagem do sinal tende a reduzir o comprimento de fibra onde o ganho é máximo.

*Tabela 5.5 – Comprimento de EDF que foi obtido os maiores ganhos ópticos.*

$\lambda$	$P_p$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1537 nm	10	10	10	14	8	10	10	8	14	10
	20	14	14	14	10	10	14	8	14	14
1563,8 nm	10	10	10	14	8	8	10	10	14	10
	20	10	14	14	10	10	14	8	14	14

Devido às semelhanças entre as topologias consideradas básicas, ou seja, as que possuem o circuito óptico mais simples, primeiramente, serão apresentadas comparações entre elas. Assim, a Tab. 5.6 mostra os valores de ganho óptico obtidos para um sinal de entrada em 1537 nm e potência de entrada de -32 dBm, sendo as potências de bombeio de 10 e 20 mW. Neste caso, a topologia que possui bombeio contra-propagante (Caso 2), nem sempre apresenta valores de ganho óptico maiores que os do Caso 1. Como a parte final da EDF possui uma quantidade maior de portadores no nível excitado devido ao bombeio contra-propagante, o sinal óptico tende a não saturar a saída do EDFA e, com isso, obter ganhos maiores. Porém, em alguns casos, a diferença de ganho entre as topologias 1 e 2 não é tão significativa. Neste caso, acreditasse que, com a utilização de potências de bombeio de maior intensidade, o ganho óptico para o Caso 2 possa alcançar valores ainda maiores que os encontrados para o Caso 1.

Em teoria, o Caso 3 é o que deveria produzir os maiores valores de ganho óptico. Experimentalmente, esta topologia foi a que obteve os maiores ganhos, se comparado com os Casos 1 e 2. Como este bombeio possibilita uma melhor inversão de população ao longo de toda a EDF é possível obter ganhos maiores, além do que a atenuação por absorção do sinal óptico diminui consideravelmente. Com isso, verifica-se que quanto maior o segmento da EDF, maior é o ganho óptico obtido, principalmente para o bombeio em 20 mW.

*Tabela 5.6 – Ganho óptico das topologias básicas com sinal de entrada em 1537 nm e potência de -32 dBm.*

EDF (m)	3,6		6		8,2		10,15		14,2		
	Bombeio(mW)	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20
1		6,7	9,2	10,3	14,7	16,7	21,9	17,4	23,7	16,7	25,5
2		6,7	9,9	9,9	15,9	15,7	22,7	18,3	23,9	16,0	24,6
3		11,2	12,8	19,5	21,5	23,1	24,3	24,3	26,7	27,9	31,5

A Tab. 5.7 faz essa mesma comparação entre as topologias do caso 1 e 4. Esta comparação foi realizada devido à semelhança entre as duas topologias. Neste caso, o sentido que o sinal atravessa a fibra dopada em ambos os casos são os mesmos, porém o Caso 4 possui a reflexão de bombeio, o que tende a melhorar a amplificação de sinal para esta topologia. Como visto anteriormente, as fibras que possuem comprimentos menores, tendem a não absorver uma quantidade de bombeio elevada e, com isso, é possível que o bombeio residual re-acoplado a EDF seja maior. Assim, o ganho óptico para o Caso 4 apresenta valores maiores do que para o Caso 1, pois o bombeio refletido, de certa forma, auxilia a inversão de população dos portadores, principalmente, na parte final da fibra dopada. Para as fibras mais longas, o nível baixo de bombeio residual que é re-acoplado à EDF resulta em ganhos ópticos semelhantes para ambos os casos. Assim, o Caso 4 se

mostra como uma solução interessante quando são utilizadas fibras dopadas curtas, uma vez que, neste caso, o ganho óptico é consideravelmente maior.

*Tabela 5.7 – Ganho óptico das topologias dos casos 1 e 4, com sinal de entrada em 1537 nm e potência de -32 dBm.*

<b>EDF (m)</b>	<b>3,6</b>		<b>6</b>		<b>8,2</b>		<b>10,15</b>		<b>14,2</b>	
<b>Bombeio(mW)</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>10</b>	<b>20</b>
1	6,7	9,2	10,3	14,7	16,7	21,9	17,4	23,7	16,7	25,5
4	9,9	11,1	14,3	17,5	18,2	21,4	19,6	24,6	15,8	25,1

De forma semelhante ao que foi apresentado na tabela anterior, a Tab. 5.8 faz uma comparação entre outras topologias que possuem certa semelhança, as topologias 2 e 5. Nestes casos, o sentido no qual o bombeio atravessa a EDF é o mesmo, ou seja, contra-propagante ao sinal de entrada. Porém, o Caso 5 utiliza a reflexão de bombeio para melhorar a população de portadores no nível excitado, principalmente na região onde ocorre a reflexão. Com isso, a comparação entre estas topologias é interessante, pois, permite analisar a influência do bombeio residual no ganho óptico final do amplificador. Pelos valores apresentados, é possível perceber que o Caso 5 obtém valores expressivos de ganho óptico, principalmente, quando se utilizam fibras curtas. Isto mostra a influência do bombeio residual na região onde o sinal de entrada é acoplado a EDF. Com uma quantidade maior de portadores no nível metaestável, a absorção de fótons do sinal óptico diminui, garantindo assim, uma amplificação mais eficiente. Além disso, devido ao bombeio contra-propagante, estes dois casos apresentam um ganho maior se comparados com os Casos 1 e 4, respectivamente.

Para finalizar esta sessão, foi realizada uma comparação entre as topologias que utilizam da reflexão do sinal (Casos 6, 7, 8 e 9). Para tanto, a Tab. 5.9 apresenta os valores

de ganho óptico obtidos para tais topologias. O sinal de entrada utilizado como referência foi o de -32 dBm, sendo o bombeio em 10 mW e 20 mW. Considerando os valores de ganho óptico para os Casos 6 e 7, ou seja, as configurações que utilizam reflexão de sinal com bombeio co-propagante e bombeio contra-propagante, respectivamente, é possível verificar valores de ganho óptico melhores para o primeiro caso. Como uma das principais características das configurações que possuem reflexão de sinal é o fato do sinal a ser amplificado ser acoplado à EDF na mesma extremidade em que o sinal deixa a fibra dopada, isso faz com que a topologia que possui bombeio co-propagante melhore a inversão de população nesta região. Com isso, a amplificação do sinal é mais forte nesta região, aumentando assim, o ganho óptico final.

*Tabela 5.8 – Ganho óptico das topologias dos casos 2 e 5, com sinal de entrada em 1537 nm e potência de -32 dBm.*

<b>EDF (m)</b>	<b>3,6</b>		<b>6</b>		<b>8,2</b>		<b>10,15</b>		<b>14,2</b>	
<b>Bombeio(mW)</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>10</b>	<b>20</b>
2	6,7	9,9	9,9	15,9	14,7	22,7	18,3	23,9	16,0	24,6
5	10,4	12,8	14,1	18,1	19,1	22,8	20,7	24,3	17,8	24,6

A topologia com reflexão de sinal e bombeio bi-direcional (Caso 8), foi a que apresentou os maiores valores de ganho óptico, tanto para as topologias que possuem reflexão de sinal, como para as outras topologias propostas. Neste caso, o bombeio óptico é acoplado nas duas extremidades da fibra dopada e a inversão de população de portadores melhora, significativamente, apesar da dupla passagem do sinal pela EDF. Através da Tab. 5.9 verificam-se os elevados ganhos ópticos obtidos para esta configuração e isto mostra que esta configuração seria uma possível candidata, em sistemas ópticos para a aplicações do tipo amplificador de potência.

*Tabela 5.9 – Ganho óptico das topologias dos casos 6, 7, 8 e 9, com sinal de entrada em 1537 nm e potência de -32 dBm.*

<b>EDF (m)</b>	<b>3,6</b>		<b>6</b>		<b>8,2</b>		<b>10,15</b>		<b>14,2</b>	
<b>Bombeio(mW)</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>10</b>	<b>20</b>
6	7,1	11,8	15,4	21,9	20,3	23,5	20,2	25,9	15,7	27,1
7	6,6	11,5	10,4	19,8	16,9	23,8	14,3	20,3	9,8	21,4
8	16,9	18,7	22,5	29,1	25,3	29	32,3	35,5	29,8	35,4
9	12,5	17,1	16,6	23,9	23,4	27,8	20,5	26,9	15,9	27,4

A topologia com reflexão de sinal e bombeio (Caso 9), apresenta resultados semelhantes aos do Caso 6, pois, para as duas topologias, o sinal óptico atravessa a EDF no mesmo sentido. Porém, a reflexão do bombeio residual melhora, significativamente, a inversão de população na extremidade em que o sinal é refletido, principalmente, quando são utilizadas fibras curtas. Assim, para as EDFs com 3,6 m, 6 m e 8,2 m, é possível obter um ganho óptico relativamente maior para a topologia 9 em relação à 6. Para as fibras com comprimentos maiores, os valores de ganho não se diferem muito daqueles da topologia 6, pois, o bombeio residual é praticamente insignificante.

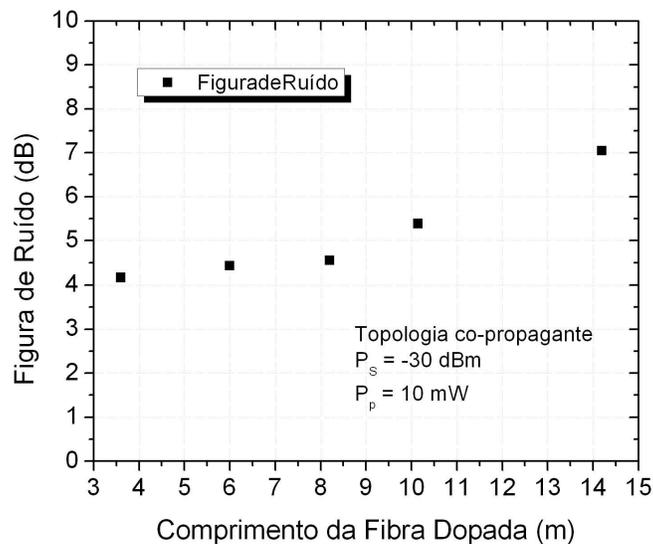
Uma análise da contribuição do ruído via espectro de emissão do amplificador se torna complexa, dada a variação da própria forma do espectro com as diversas condições de operação às quais o amplificador pode estar submetido. Assim sendo, a figura de ruído passa a ser o parâmetro de caracterização do ruído do EDFA, pois define um número que representa a razão entre a relação sinal/ruído de entrada e a de saída. A Tab. 5.10 apresenta os valores medidos de NF para as topologias analisadas, considerando-se a potência de bombeio em 10 mW, o comprimento de onda do sinal em 1563,8 nm, a potência de entrada do sinal em -30 dBm e a amostra de fibra dopada de 8,2 m de comprimento. Através da tabela é possível perceber que as topologias com reflexão de sinal apresentam valores

maiores de NF. Este resultado é esperado, uma vez que a ASE é re-acoplada ao EDFA, juntamente com o sinal, após a reflexão. Das topologias sem reflexão de sinal, a que apresentou o menor valor de NF foi a topologia 1.

*Tabela 5.10 – Figura de ruído para a fibra de 8,2 m.*

<b>Caso</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>
<b>NF (dB)</b>	4,5	6,9	5,3	6,9	5,6	9,3	8,9	10,6	8,7

A Fig. 5.72 mostra a evolução da NF para os diversos comprimentos de EDF. Para tanto, foi utilizado a topologia co-propagante com bombeio em 10 mW de potência, o sinal de entrada com comprimento de onda de 1563,8 nm e potência óptica de -30 dBm. Desta forma, verificou-se valores maiores de NF para os segmentos de fibra dopada mais longos. Como a potência de ASE é um dos principais fatores que influenciam a SNR na saída do amplificador [22] e a quantidade de emissões espontâneas amplificadas é maior para os segmentos mais longos, as configurações que utilizam estas fibras possuem uma figura de ruído maior que para as que possuem fibras de menor comprimento.



*Fig. 5.72 – Evolução da NF em função do comprimento da fibra dopada.*

## Capítulo 6

### Conclusão

Esta dissertação apresentou uma análise experimental de diferentes topologias de EDFA, onde foi realizado um estudo comparativo entre as diversas topologias para condições de operação distintas. Através da verificação do desempenho das configurações propostas, pode-se determinar as condições de operação que melhor se enquadram para atender os pré-requisitos que cada função de amplificação exige. Deste modo, pode-se definir o tipo de configuração mais adequada para exercer a função de amplificador de potência, ou de amplificador de linha ou, ainda de pré-amplificador. Para se chegar a argumentos que permitam estas conclusões, foi necessário utilizar, para cada topologia, diferentes segmentos de EDF, valores de potência de bombeio e sinal distintos e verificar a resposta do amplificador para dois comprimentos de onda do sinal de entrada. Com isso, os resultados obtidos mostraram que o desempenho do EDFA não depende apenas da topologia utilizada no circuito óptico, mas também de todos os parâmetros descritos acima, além, é claro, do tipo de amostra de EDF utilizado.

No Capítulo 2, apresentou-se uma introdução sobre os conceitos fundamentais de operação de um EDFA. Primeiramente, foram apresentados os princípios dos mecanismos de amplificação, ou seja, os conceitos referentes aos processos de absorção, emissão espontânea e emissão estimulada. Em seguida, formalizaram-se as considerações para o tratamento teórico do processo de amplificação do sinal em 3 níveis de energia. Finalmente, foram descritas as características fundamentais do EDFA, como, ganho óptico, figura de

ruído e ASE, entre outros. Com isto, pôde-se avaliar o comportamento do EDFA sob diversas condições de operação.

O Capítulo 3 apresentou as topologias ópticas que foram utilizadas na parte experimental, sendo que, ao todo foram propostas 9 topologias para análise. Com isso, a partir de uma configuração clássica do EDFA (co-propagante), foram mencionadas as modificações necessárias para que se chegasse a cada uma das outras topologias. Estas modificações se deram desde a inclusão de dispositivos passivos ao circuito óptico como pela mudança na posição de aplicação de bombeio ao circuito óptico. Deste modo, foi possível obter topologias que possuem circuitos ópticos adicionais com características distintas. Por conseguinte, em alguns casos, é possível melhorar o desempenho do amplificador óptico, com configurações que possuem valores elevados de ganho óptico e baixa influência de ASE.

O Capítulo 4 iniciou-se com uma descrição dos dispositivos utilizados na montagem dos circuitos ópticos. Neste caso, em cada circuito óptico, foram utilizados dispositivos passivos e ativos, como o acoplador WDM, o isolador, o circulador óptico e o laser semiconductor, entre outros. Com isso, foram apresentados os conceitos básicos do funcionamento de cada dispositivo. Com o conhecimento de operação de cada dispositivo, foi possível realizar medidas com o objetivo de descobrir as perdas por inserção e perdas nos conectores. Deste modo, foi possível estimar previamente, as perdas decorrentes de conexões entre dispositivos e perdas intrínsecas, de modo a serem consideradas no momento das medições experimentais. No caso do laser semiconductor, foi feito um levantamento da resposta do laser através da variação da corrente de polarização. Porém, para fazer tais calibrações e, também, para obter os dados dos experimentos, por exemplo,

para o cálculo de ganho óptico, foi necessário aprender o funcionamento dos equipamentos de medição, como o analisador de espectro óptico e o medidor de potência, entre outros. Por fim, foram apresentados os diagramas esquemáticos para os circuitos ópticos de cada topologia.

As análises e os resultados experimentais obtidos encontram-se no Capítulo 5. Porém, antes de iniciar a análise das topologias, é interessante relatar as dificuldades encontradas na parte experimental desta dissertação. Para simular o sinal a ser amplificado foi utilizado um laser semiconductor variável, porém a alimentação do mesmo foi realizada através de uma fonte de corrente sem controle de temperatura. Um dos problemas que a variação de temperatura causava era a ligeira oscilação da amplitude do sinal de entrada. Além disso, este laser apresentava desgaste devido ao longo tempo em que se encontrava em uso no laboratório. Com isso, para minimizar a flutuação do sinal, foi necessário calibrar diversas vezes o sinal de entrada, afim de que os resultados não fossem comprometidos. Com o laser de bombeio não ocorreu este tipo de problema, pois foi utilizada uma fonte de corrente estável e com controle de temperatura. Porém, devido a potência de saída elevada, algumas pontas de conectores foram danificadas ao longo das medidas. Quando alguma impureza se deposita na superfície da ponta do conector, um laser com potência elevada pode fundir esta sujeira ao conector e, conseqüentemente, atenuar o sinal óptico. Este problema foi também observado em outros dispositivos e nas pontas dos conectores da EDF. Para minimizar este problema, foi necessário adotar um procedimento de limpeza dos conectores a cada conexão ou re-conexão executada.

Na proposta inicial deste trabalho, estava previsto utilizar bombeios mais potentes, acima de 40 mW, mas logo isto se tornou inviável, devido aos diversos problemas que se

sucederam. Neste caso, para algumas topologias, foi constatado que, acima deste valor de potência de bombeio, ocorria o surgimento de sinais espúrios no pico de emissão do érbio, por volta de 1530 nm. Outro problema observado é relativo à utilização de dispositivos conectorizados nos circuitos ópticos. Em alguns casos, o acoplamento entre os mesmos pode causar reflexões internas do sinal de entrada. Desta forma, estes sinais podem atravessar toda a extensão da EDF e, conseqüentemente, podem também ser amplificados. Assim, estas reflexões podem competir internamente com os fótons do sinal de entrada, o que pode prejudicar o seu ganho final.

Um problema semelhante foi verificado para um tipo de topologia que utiliza dupla passagem e filtragem do sinal óptico. Neste caso, não foi possível realizar um estudo com esta topologia, pois, foi observado que, na faixa de passagem do filtro óptico (coincidente com os dois comprimentos de onda do sinal de entrada), vários modos longitudinais começavam a se formar à medida que a potência do sinal de entrada diminuía e o ganho óptico aumentava. Assim sendo, apesar de terem ocorrido diversos problemas na parte experimental, as medidas foram feitas com o máximo de cuidado, observando os diversos procedimentos de calibração dos equipamentos e atenção nas montagens dos circuitos ópticos.

O estudo experimental neste trabalho baseou-se em analisar o comportamento de operação de diversas topologias de EDFA por meio de medidas experimentais. A análise experimental teve o intuito de verificar, principalmente, as características de ganho de cada topologia, seguida de uma análise final da contribuição do ruído de emissão espontânea. Por meio destes resultados, é possível traçar um estudo qualitativo que avalie as vantagens e desvantagens que cada uma das topologias estudadas apresenta e como cada uma delas

pode ser utilizada em um sistema óptico real, ou seja, podem-se determinar as condições de operação que são mais adequadas para atender os pré-requisitos que cada função de amplificação exige, seja esta função de potência, de linha ou de pré-amplificação.

Os resultados obtidos mostraram que o desempenho do EDFA não depende apenas da topologia utilizada no circuito óptico, mas também de outros parâmetros como potência de bombeio, comprimento de EDF e comprimento de onda do sinal de entrada, além, é claro, do tipo de EDF utilizado. No caso particular desta análise, quando o sinal de entrada está em 1537 nm, ou seja, localizado próximo ao pico de ASE, o ganho óptico obtido foi, em geral, maior que aquele para 1563,8 nm, aumentando de valor com o aumento da potência de bombeio acoplada. As análises de variação de ganho com o comprimento da EDF mostraram como a determinação deste parâmetro é complicada, dadas as inúmeras variáveis envolvidas, principalmente no que se diz respeito a diferentes comprimentos de onda, base da transmissão nos sistemas WDM. Apesar de alguma discrepância com o comportamento teórico ter sido observada, fruto de alguns problemas enfrentados durante os procedimentos experimentais (instabilidade do laser de sinal e sujeira nos conectores dos componentes do EDFA, entre outros), observou-se que o valor máximo de ganho deixa de ter uma forte dependência com o comprimento de onda quando as topologias operam sob condições de saturação, o que é um fato provável em sistemas WDM.

Com relação às topologias consideradas básicas (1, 2 e 3), as duas primeiras apresentaram valores de ganho relativamente parecidos para bombeio com potência de 10 mW. Porém, quando o bombeio sobe para 20 mW, a topologia 2 apresentou ganho superior ao da topologia 1 devido à inversão de população mais eficiente na parte final da EDF. Quando é utilizada uma EDF com comprimento variando de 3 m a 6 m, a posição em que o

laser de bombeio é acoplado à EDF não altera, significativamente, o ganho final. Neste caso, independentemente do sentido que o bombeio é acoplado, o mesmo é intenso em praticamente toda a extensão da fibra dopada. Apesar das análises teóricas indicarem um ganho maior para a topologia 2, experimentalmente, esta melhoria de ganho pôde ser observada somente quando se utilizou um bombeio igual ou maior que 20 mW.

A topologia 3 apresenta um ganho maior que o das outras duas, atingindo o seu máximo para a EDF de 14,2 m, principalmente por causa da intensidade de bombeio aplicada, que é capaz de promover uma inversão de população eficiente em praticamente toda a EDF, como esperado teoricamente. Sendo assim, pode-se considerar o uso da topologia 3 em amplificadores de potência. O ganho óptico de aproximadamente 19 dB, quando utilizou-se um bombeio de 20 mW, EDF de 14,2 m e potência do sinal óptico de -2 dBm, é adequado para essa aplicação. A topologia 8 também pode ser utilizada com o mesmo intuito, pois, seu ganho sob regime de saturação é ainda maior que o da topologia 3 (aproximadamente 21 dB). As desvantagens são a inserção de outros dispositivos passivos no circuito óptico (circulador óptico e espelhos), que pode encarecer esta topologia. Além disso, a NF também apresenta valores maiores para o caso 8, pois um dos problemas da reflexão de sinal é o de que a ASE também é refletida e re-amplificada.

Para as topologias 4 e 5, onde se utiliza a reflexão de bombeio, os valores de ganho foram pouco maiores que os obtidos para as topologias 1 e 2, respectivamente. O ganho foi relativamente maior quando o comprimento da EDF utilizada era menor que 10,2 m. De um modo geral, as topologias 1, 2, 4 e 5 poderiam ser utilizadas como amplificadores de linha, pois seus valores de NF variam entre 4,5 e 7 dB para EDFs mais curtas. Tecnicamente a topologia 1 também é indicada para pré-amplificação, pois, apresentou os menores valores

NF. Uma desvantagem das topologias com reflexão de bombeio em relação às topologias dos casos 1 e 2, é a necessidade de utilizar um dispositivo passivo para a reflexão do bombeio, o que pode aumentar o custo do EDFA. Em teoria, os casos 4 e 5 deveriam apresentar os maiores ganhos, porém, experimentalmente, este fato foi observado somente para algumas configurações. Sendo assim, acredita-se que o ganho óptico, neste caso, possa aumentar consideravelmente para as fibras maiores que 10 m, quando for utilizado uma potência de bombeio maior que 20 mW. Dessa forma, o bombeio refletido aumenta consideravelmente e, com isso, o ganho tende a ser melhor do que os obtidos pelas topologias 1 e 2. Com relação às topologias que utilizam reflexão de sinal (6 a 9), os valores de ganho obtidos são, em geral, bem mais altos que os das outras topologias. Porém, a NF também apresenta valores relativamente elevados, o que inviabilizaria a utilização destas topologias como, por exemplo, pré-amplificadores e, em alguns casos, amplificadores de linha. No entanto, aplicações recentes das topologias reflexivas com módulos de compensação de dispersão têm-se mostrado atrativas [30].

Sendo assim, além das conclusões e dos resultados específicos obtidos no trabalho propriamente dito, o aprendizado básico e a experiência adquirida no laboratório, não são considerados menos importantes, são ao contrário fundamentais para que seja dado um prosseguimento nesta linha de atuação, fazendo com que os próximos trabalhos possam trazer contribuições ainda mais relevantes. Como sugestão para trabalhos futuros ficam, entre outros, a análise experimental para o EDFA utilizando simultaneamente vários canais de sinal, a possível inclusão de novas configurações, como a topologias de EDFA com reflexão e filtragem do sinal óptico, além da utilização dos resultados aqui obtidos para validar a simulação do comportamento do amplificador óptico.



## Referências Bibliográficas

- [1] A. J. M. Soares, “Comunicações Ópticas”, Departamento de Engenharia Elétrica, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, 2005.
- [2] R. J. Mears, L. Reekie, I. M. Jauncey e D. N. Payne, “Low-noise erbium-doped fibre amplifier at 1.54  $\mu\text{m}$ ”, *Electron. Lett.*, vol. 23, no. 19, pp.1026-1028, 1987.
- [3] T. Li, “The impact of optical amplifiers on long-distance lightwave telecommunications”, *Proceedings of the IEEE*, vol. 81, no. 11, pp. 1568-1579, 1993.
- [4] S. Nilsson “Optical Fiber Theory for Communication Networks”, 2<sup>a</sup> ed., Ericsson, Suécia, 2002.
- [5] S. B. Poole, D. N. Payne, R. J. Mears, M. E. Fermann e R. I. Laming, “Fabrication and characterization of low-loss optical fibers containing rare-earth ions”, *J. Lightwave Technol.*, vol. LT-4, no. 7, pp. 870-876, 1986.
- [6] G. P. Agrawal, “Fiber-Optic Communication Systems”, 3<sup>a</sup> ed., Wiley-Interscience, EUA, 2002.
- [7] W. F. Giozza, E. Conforti e H. Waldman, “Fibras Ópticas: Tecnologias e Projeto de Sistemas”, Makron Books, São Paulo, 1991.
- [8] J. E. Geusic e H. E. D. Scovil, “A unidirectional traveling-wave optical maser” *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 41, pp. 1371-1397, 1962.
- [9] C. J. Koester e E. Snitzer, “Fiber laser as a light amplifier”, *J. Opt. Soc. Amer.*, vol. 53, pp. 515-516, 1963.

- [10] J. Stone e C. A. Burrus, “Neodymium-doped fiber lasers: room temperature CW operation with injection laser pump”, *J. Quant. Electron.*, vol. 10, no. 9, pp. 794, 1974.
- [11] H. J. R. Dutton, “Understanding Optical Communications”, International Technical Support Organization, 1<sup>a</sup> ed., EUA, 2003.
- [12] S. Sudo, “Optical Fiber Amplifiers – Material, Devices, and Applications”, 1<sup>a</sup> ed., Artech House, EUA, 1997.
- [13] R. I. Laming e M. C. Farries, “Efficient pump wavelengths of erbium-doped fibre optical amplifier”, *Electron. Lett.*, vol. 25, no. 1, pp. 12-14, 1989.
- [14] I. P. Kaminow e T. L. Koch, “Optical Fiber Telecommunications”, 3<sup>a</sup> ed., Academic Press, EUA, 1997.
- [15] B. Heens, X. Wang, L. Meuleman, F. Ravet e M. Blondel, “Improvement of the EDFA design for both preamplifier and booster applications”, *MELECON Proceedings of the 1998 9<sup>th</sup> Mediterranean Electrotechnical Conference, May 18-20*, vol. 2, pp.1404-1408, 1998.
- [16] F. R. M. Adikan, A. S. M. Noor e M. A. Mahdi, “Pumping scheme optimization of 980 nm pumped L-band EDFA associated with broadband noise as the secondary pump”, *Opt. Commun.*, vol. 236, pp. 167-172, 2004.
- [17] Q. Mao, J. Wang, X. Sun e M. Zhang, “A theoretical analysis of amplification characteristics of bi-directional erbium-doped fiber amplifiers with single erbium-doped fiber”, *Opt. Commun.*, vol. 159, pp. 149-157, 1999.
- [18] Q. Mao e J. W. Y. Lit, “Amplification enhancement of L-band erbium-doped fiber amplifiers by reflection scheme”, *Opt. Commun.*, vol. 201, pp. 61-69, 2002.

- [19] D. Hallyday e R. Resnick, “Fundamentos de Física 4: Óptica e Física Moderna”, 4<sup>a</sup> ed., LTC, Brasil, Brasil, 1996.
- [20] P. C. Becker, N. A. Olsson e J. R. Simpsons, “Erbium-Doped Fiber Amplifiers – Fundamentals and Technology”, 1<sup>a</sup> ed., Academic Press, EUA, 1999.
- [21] M. Bolshtyansky, I. Mandelbaum e F. Pan, “Signal excited-state absorption in the L-band EDFA: simulation and measurements”, *J. Lightwave Technol.*, vol. 23, no. 9, pp. 2796-2799, 2005.
- [22] M. Movassaghi, M. K. Jackson, V. M. Smith e W. J. Hallam, “Noise figure of erbium-doped fiber amplifier in saturated operation”, *J. Lightwave Technol.*, vol. 16, no. 5, pp. 812-817, 1998.
- [23] S. Millo, “Análise de Desempenho de Topologias de Amplificadores Ópticos a Fibra Dopada com Érbio”, Dissertação de Mestrado, Departamento de Microonda e Óptica, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, 2003.
- [24] J. M Senior, “Optical Fiber Communications: Principles and Practice”, 2<sup>a</sup> ed., Prentice Hall, England, 1992.
- [25] Y. Fujii, “High-isolation polarization-independent optical circulator coupled with single-mode fibres”, *J. Lightwave Tech.*, vol. 9, no. 4, pp. 456-459, 1991.
- [26] R. Ramaswami e K. N. Sivarajan, “Optical Networks - A Practical Perspective”, 1<sup>a</sup> ed., Morgan Kaufmann, EUA, 1998.
- [27] G. P. Agrawal, “Semiconductor Laser: Past, Present and Future”, 1<sup>a</sup> ed., Woodbury, EUA, 1995.

- [28] L. A. Coldren, G. A. Fish, Y. Akulova, J. S. Barton, L. Johansson e C. W. Coldren, “Tunable Semiconductor Lasers: A Tutorial”, *J. Lightwave Technol.*, vol. 22, no. 1, pp. 193-202, 2004.
- [29] E. Desurvire, “Erbium-Doped Fiber Amplifiers - Principles and Applications”, 1<sup>a</sup> ed., John Wiley & Sons, EUA, 1994.
- [30] J. B. Rosolen, A. A. Juriolo e Murilo A. Romero, “Polarization analysis in double-pass erbium-doped fiber amplifier with an embedded-DCF module”, *Photon. Technol. Lett.*, vol.16, no. 8, pp. 1828-1830, 2004.