



INSTITUTO FEDERAL
CEARÁ
Campus Fortaleza



Programa de Pós-graduação em
Engenharia de Telecomunicações
PPGET - IFCE

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DO CEARÁ

CAMPUS FORTALEZA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
TELECOMUNICAÇÕES – PPGET

José Stelio Sampaio Bastos Neto

Simulação e estudo de topologias para otimização do ganho óptico de
amplificadores a fibra dopada

Fortaleza

2017

JOSÉ STELIO SAMPAIO BASTOS NETO

**Simulação e estudo de topologias para otimização do ganho óptico de
amplificadores a fibra dopada**

Dissertação apresentada à Coordenação
do Programa de Pós-Graduação em Engenharia
de Telecomunicações (PPGET/IFCE) como
requisito final para a obtenção do título de mestre
em Engenharia de Telecomunicações.

Orientador: Prof. Dr. José Wally
Mendonça Menezes

FORTALEZA – CE

2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Instituto Federal do Ceará - IFCE
Sistema de Bibliotecas - SIBI

Ficha catalográfica elaborada pelo SIBI/IFCE, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

NETO, JOSE STELIO SAMPAIO BASTOS.
SIMULAÇÃO E ESTUDO DE TOPOLOGIAS PARA OTIMIZAÇÃO DO GANHO DE
AMPLIFICADORES A FIBRA DOPADA / JOSE STELIO SAMPAIO BASTOS NETO. - 2017.
73 f. : il.

Dissertação (Mestrado) Instituto Federal do Ceará, Mestrado em Engenharia de Telecomunicações,
Campus Fortaleza, 2017.

Orientação: Prof. Dr. JOSÉ WALLY MENDONÇA MENEZES.
Coorientação: Prof. Dr. GLENDON DE FREITAS GUIMARÃES.

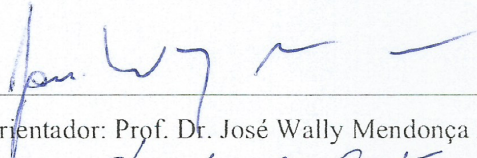
1. AMPLIFICADORES ÓPTICOS. 2. TOPOLOGIAS. 3. FIBRA ÓPTICA. 4. ÉRBIO. I. Título.
CDD 621.382

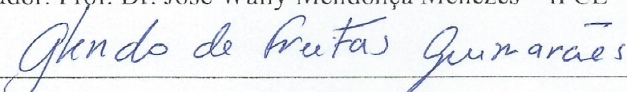


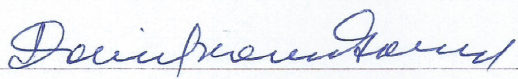
Simulação e estudo de topologias para otimização do ganho óptico de amplificadores a fibra dopada

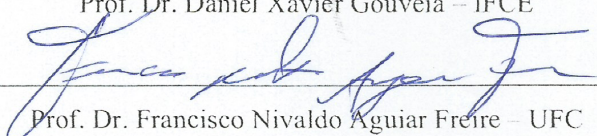
Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de mestre em Engenharia de Telecomunicações, sendo aprovada pelo programa de Pós-Graduação em Engenharia de Telecomunicações do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará e pela banca examinadora:

Banca Examinadora:


Orientador: Prof. Dr. José Wally Mendonça Menezes – IFCE


Prof. Dr. Glendo de Freitas Guimarães – IFCE


Prof. Dr. Daniel Xavier Gouveia – IFCE


Prof. Dr. Francisco Nivaldo Aguiar Freire – UFC

Fortaleza, 18 de agosto de 2017

A minha esposa Samantha Onofre Lóssio Bastos, pelo amor e dedicação

Aos meus pais

Dedico

Agradecimentos

A Deus, Senhor e dono da minha vida.

A minha família e a minha esposa pelo apoio e suporte durante este tempo.

Ao meu formador pessoal tio Marco Flávio pelo suporte espiritual.

A Comunidade Católica Shalom por tão bela vocação que me enche de esperança.

Aos professores da banca julgadora.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Telecomunicações – PPGET/IFCE e aos professores do Departamento de Telemática do IFCE.

A todos os funcionários do IFCE.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará

*“Antes de tudo, quando quiseres
realizar algo de bom, pede a Deus com
oração muito insistente que seja
plenamente realizado por Ele”*

- São Bento

Resumo

Este trabalho realiza um estudo com amplificadores a fibra dopada com érbio (EDFA) na posição de pré-amplificação. O funcionamento básico do amplificador é apresentado, bem como algumas características principais como ganho óptico e figura de ruído. A partir das topologias básicas copropagante e contra propagante são realizadas modificações utilizando dispositivos ópticos passivos para refletir o sinal do laser de bombeamento, ou refletir o sinal e o bombeamento em conjunto para retroalimentar o amplificador. Com isso, foi realizado um estudo entre as topologias apresentadas, alterando diversos parâmetros como comprimento da fibra dopada e potência do laser de bombeamento, de forma a encontrar a melhor configuração para utilização no estágio de pré-amplificação. A topologia com reflexão do sinal e do bombeamento em conjunto se mostrou mais eficiente que as demais com uma diferença de 7 dB a 12 dB em relação as topologias básicas, além da economia nos custos com a redução do tamanho da fibra dopada.

Palavras-chave: 1. Amplificadores Ópticos 2. Topologia 3. Fibra Óptica 4. Érbio

Abstract

This work performs a study with amplifiers the erbium doped fiber (EDFA) in the preamplification position. The basic operation of the amplifier is presented, as well as some key features like optical gain and noise figure. From the basic topologies copropagant and counter propagant modifications are made using passive optical devices to reflect the pumping laser signal, or reflect the signal and pumping together to feed back the amplifier. Thus, a study was performed among the presented topologies, changing several parameters such as doped fiber length and pumping laser power, in order to find the best configuration for use in the preamplification stage. The topology with signal reflection and pumping together proved to be more efficient than the others with a difference of 7 dB at 12 dB in relation to the basic topologies, in addition to the cost savings in reducing the size of the doped fiber.

Keywords: 1. Optical Amplifiers 2. Topology 3. Optical Fibers 4. Erbium

Lista de Abreviações

EDFA – Amplificador a Fibra Dopada com Érbio (*Erbium Doped Fiber Amplifier*)

WDM – Multiplexador por Divisão de Comprimento de Onda (*Wavelength Division Multiplex*)

FBG – In Fibre Bragg Grating

SNR – Relação Sinal-Ruído (*Signal Noise Ratio*)

NF – Figura de Ruído (*Noise Figure*)

MWCD – Deposição Modificada de Vapor Químico (*Modified Chemical Vapor Deposition*)

VAD – Deposição Axial de Vapor (*Vapor Axial Deposition*)

LED – Diodo Emissor de Luz (*Light-Emitting Diode*)

GaAsP – Arsenieto de Gálio e Fósforo

GaAsAl – Arsenieto de Gálio e Alumínio

InGaAs – Arsenieto de Gálio e Índio

CW – Onda Contínua (*Continuous Wave*)

Lista de Figuras

Figura 2-1 Níveis de energia do Érbio. Fonte: (DUTTON, 1998).....	23
Figura 2-2 Mecanismos de amplificação do EDFA. Fonte (VALENTE; COELHO, 2007)	24
Figura 3-1 Estrutura básica de um laser semiconductor. Fonte: (AGRAWAL, 2002).....	29
Figura 3-2 <i>Lasing</i> . Fonte: (DUTTON, 1998)	30
Figura 3-3 Funcionamento de um FBG. Fonte: (DUTTON, 1998).....	31
Figura 3-4 Configuração básica do EDFA copropagante. Fonte: Elaborado pelo autor.	33
Figura 3-5 Configuração básica do EDFA contra propagante. Fonte: Elaborado pelo autor. ..	34
Figura 3-6 Topologia copropagante com reflexão do bombeamento. Fonte: Elaborado pelo autor	35
Figura 3-7 Topologia contra propagante com reflexão do bombeamento. Fonte: Elaborado pelo autor	35
Figura 3-8 Topologia copropagante com reflexão do sinal e do bombeamento. Fonte: Elaborado pelo autor	36
Figura 3-9 Topologia contra propagante com reflexão do sinal e do bombeamento. Fonte: Elaborado pelo autor	37
Figura 4-1 Ganho óptico do EDFA em 980nm no sentido copropagante topologia básica com 10 mW de bombeamento. Fonte: Elaborado pelo autor	40
Figura 4-2 Ganho óptico do EDFA em 980nm no sentido copropagante topologia básica com 20 mW de bombeamento. Fonte: Elaborado pelo autor	40
Figura 4-3 Ganho óptico do EDFA em 980nm no sentido copropagante topologia básica com 40 mW de bombeamento. Fonte: Elaborado pelo autor	41
Figura 4-4 Ganho óptico EDFA em 980 nm e 10mW com reflexão do bombeamento (a) e reflexão do sinal e do bombeamento (b). Fonte: Elaborado pelo autor	41
Figura 4-5 Ganho óptico EDFA em 980 nm e 20mW com reflexão do bombeamento (a) e reflexão do sinal e do bombeamento (b). Fonte: Elaborado pelo autor	42
Figura 4-6 Ganho óptico EDFA em 980 nm e 40mW com reflexão do bombeamento (a) e reflexão do sinal e do bombeamento (b). Fonte: Elaborado pelo autor	43
Figura 4-7 Ganho óptico do EDFA em 1480nm no sentido copropagante topologia básica com 10 mW de bombeamento. Fonte: Elaborado pelo autor	43
Figura 4-8 Ganho óptico do EDFA em 1480nm no sentido copropagante topologia básica com 10 mW de bombeamento. Fonte: Elaborado pelo autor	44

Figura 4-9 Ganho óptico do EDFA em 1480nm no sentido copropagante topologia básica com 10 mW de bombeamento. Fonte: Elaborado pelo autor	44
Figura 4-10 Ganho óptico EDFA em 1480 nm e 10mW com reflexão do bombeamento (a) e reflexão do sinal e do bombeamento (b). Fonte: Elaborado pelo autor	45
Figura 4-11 Ganho óptico EDFA em 1480 nm e 20mW com reflexão do bombeamento (a) e reflexão do sinal e do bombeamento (b). Fonte: Elaborado pelo autor	45
Figura 4-12 Ganho óptico EDFA em 1480 nm e 40mW com reflexão do bombeamento (a) e reflexão do sinal e do bombeamento (b). Fonte: Elaborado pelo autor	46
Figura 4-13 Figura de ruído do EDFA em 980nm no sentido copropagante topologia básica com 10 mW de bombeamento. Fonte: Elaborado pelo autor.....	46
Figura 4-14 Figura de ruído do EDFA em 980nm no sentido copropagante topologia básica com 20 mW de bombeamento. Fonte: Elaborado pelo autor.....	47
Figura 4-15 Figura de ruído do EDFA em 980nm no sentido copropagante topologia básica com 40 mW de bombeamento. Fonte: Elaborado pelo autor.....	47
Figura 4-16 Figura de ruído EDFA em 980 nm e 10mW com reflexão do bombeamento (a) e reflexão do sinal e do bombeamento (b). Fonte: Elaborado pelo autor	48
Figura 4-17 Figura de ruído EDFA em 980 nm e 20mW com reflexão do bombeamento (a) e reflexão do sinal e do bombeamento (b). Fonte: Elaborado pelo autor	48
Figura 4-18 Figura de ruído EDFA em 980 nm e 40mW com reflexão do bombeamento (a) e reflexão do sinal e do bombeamento (b). Fonte: Elaborado pelo autor	49
Figura 4-19 Figura de ruído do EDFA em 1480nm no sentido copropagante topologia básica com 10 mW de bombeamento. Fonte: Elaborado pelo autor.....	49
Figura 4-20 Figura de ruído do EDFA em 1480nm no sentido copropagante topologia básica com 20 mW de bombeamento. Fonte: Elaborado pelo autor.....	50
Figura 4-21 Figura de ruído do EDFA em 1480nm no sentido copropagante topologia básica com 40 mW de bombeamento. Fonte: Elaborado pelo autor.....	50
Figura 4-22 Figura de ruído EDFA em 1480 nm e 10mW com reflexão do bombeamento (a) e reflexão do sinal e do bombeamento (b). Fonte: Elaborado pelo autor	51
Figura 4-23 Figura de ruído EDFA em 1480 nm e 20mW com reflexão do bombeamento (a) e reflexão do sinal e do bombeamento (b). Fonte: Elaborado pelo autor	51
Figura 4-24 Figura de ruído EDFA em 1480 nm e 40mW com reflexão do bombeamento (a) e reflexão do sinal e do bombeamento (b). Fonte: Elaborado pelo autor	52
Figura 4-25 Ganho óptico do EDFA em 980nm no sentido contra propagante topologia básica com 10 mW de bombeamento. Fonte: Elaborado pelo autor.....	53

Figura 4-26 Ganho óptico do EDFA em 980nm no sentido contra propagante topologia básica com 20 mW de bombeamento. Fonte: Elaborado pelo autor.....	53
Figura 4-27 Ganho óptico do EDFA em 980nm no sentido contra propagante topologia básica com 40 mW de bombeamento. Fonte: Elaborado pelo autor.....	54
Figura 4-28 Ganho óptico EDFA em 980 nm e 10mW com reflexão do bombeamento (a) e reflexão do sinal e do bombeamento (b). Fonte: Elaborado pelo autor	54
Figura 4-29 Ganho óptico EDFA em 980 nm e 20mW com reflexão do bombeamento (a) e reflexão do sinal e do bombeamento (b). Fonte: Elaborado pelo autor	55
Figura 4-30 Ganho óptico EDFA em 980 nm e 40mW com reflexão do bombeamento (a) e reflexão do sinal e do bombeamento (b). Fonte: Elaborado pelo autor	55
Figura 4-31 Ganho óptico do EDFA em 1480nm no sentido contra propagante topologia básica com 10 mW de bombeamento. Fonte: Elaborado pelo autor.....	56
Figura 4-32 Ganho óptico do EDFA em 1480nm no sentido contra propagante topologia básica com 20 mW de bombeamento. Fonte: Elaborado pelo autor.....	56
Figura 4-33 Ganho óptico do EDFA em 1480nm no sentido contra propagante topologia básica com 40 mW de bombeamento. Fonte: Elaborado pelo autor.....	57
Figura 4-34 Ganho óptico EDFA em 1480 nm e 10mW com reflexão do bombeamento (a) e reflexão do sinal e do bombeamento (b). Fonte: Elaborado pelo autor	57
Figura 4-35 Ganho óptico EDFA em 1480 nm e 20mW com reflexão do bombeamento (a) e reflexão do sinal e do bombeamento (b). Fonte: Elaborado pelo autor	58
Figura 4-36 Ganho óptico EDFA em 1480 nm e 40mW com reflexão do bombeamento (a) e reflexão do sinal e do bombeamento (b). Fonte: Elaborado pelo autor	58
Figura 4-37 Figura de ruído EDFA em 980 nm e 10mW com reflexão do bombeamento (a) e reflexão do sinal e do bombeamento (b). Fonte: Elaborado pelo autor	59
Figura 4-38 Figura de ruído EDFA em 980 nm e 20mW com reflexão do bombeamento (a) e reflexão do sinal e do bombeamento (b). Fonte: Elaborado pelo autor	59
Figura 4-39 Figura de ruído EDFA em 980 nm e 40mW com reflexão do bombeamento (a) e reflexão do sinal e do bombeamento (b). Fonte: Elaborado pelo autor	60
Figura 4-40 Figura de ruído EDFA em 980 nm e 10mW com reflexão do bombeamento (a) e reflexão do sinal e do bombeamento (b). Fonte: Elaborado pelo autor	60
Figura 4-41 Figura de ruído EDFA em 980 nm e 20mW com reflexão do bombeamento (a) e reflexão do sinal e do bombeamento (b). Fonte: Elaborado pelo autor	61
Figura 4-42 Figura de ruído EDFA em 980 nm e 40mW com reflexão do bombeamento (a) e reflexão do sinal e do bombeamento (b). Fonte: Elaborado pelo autor	61

Figura 4-43	Figura de ruído EDFA em 1480 nm e 10mW com reflexão do bombeamento (a) e reflexão do sinal e do bombeamento (b). Fonte: Elaborado pelo autor	62
Figura 4-44	Figura de ruído EDFA em 1480 nm e 20mW com reflexão do bombeamento (a) e reflexão do sinal e do bombeamento (b). Fonte: Elaborado pelo autor	62
Figura 4-45	Figura de ruído EDFA em 1480 nm e 40mW com reflexão do bombeamento (a) e reflexão do sinal e do bombeamento (b). Fonte: Elaborado pelo autor	63
Figura 4-46	Figura de ruído EDFA em 1480 nm e 10mW com reflexão do bombeamento (a) e reflexão do sinal e do bombeamento (b). Fonte: Elaborado pelo autor	63
Figura 4-47	Figura de ruído EDFA em 1480 nm e 20mW com reflexão do bombeamento (a) e reflexão do sinal e do bombeamento (b). Fonte: Elaborado pelo autor	64
Figura 4-48	Figura de ruído EDFA em 1480 nm e 40mW com reflexão do bombeamento (a) e reflexão do sinal e do bombeamento (b). Fonte: Elaborado pelo autor	64

Sumário

Agradecimentos	vi
Resumo	viii
Abstract.....	ix
Lista de Abreviações.....	x
Lista de Figuras.....	xi
Sumário	xv
CAPÍTULO 1.....	17
1. Introdução	17
CAPÍTULO 2.....	21
2. Amplificador Óptico a Fibra Dopada com Érbio.....	21
2.1. Introdução	21
2.2. Emissão Espontânea e Estimulada.....	22
2.3. Ganho Óptico	24
2.4. Emissão Espontânea Amplificada.....	24
2.5. Fibra dopada com Érbio.....	25
2.5.1. Regime de Saturação.....	26
2.5.2. Comprimento ótimo para a fibra dopada	26
2.6. Conclusão.....	27
CAPÍTULO 3.....	28
3. Dispositivos e Topologias do EDFA	28
3.1. Dispositivos	28
3.1.1. Fontes de Luz.....	28
3.1.2. Lasers Semicondutores	29
3.1.3. Acopladores WDM	30
3.1.4. <i>In-Fibre Bragg Gratings (FBGs)</i>	31
3.1.5. Isoladores e Circuladores Ópticos	32

3.1.6.	Analizador Duplo WDM.....	32
3.2.	Topologias.....	33
3.2.1.	Topologias básicas.....	33
3.2.2.	Topologias com reflexão de bombeamento	34
3.2.3.	Topologias com reflexão de sinal e bombeamento.....	36
3.3.	Conclusão.....	37
CAPÍTULO 4.....		38
4.	Resultados.....	38
4.1.	Introdução	38
4.2.	Resultados.....	39
4.2.1.	Topologias copropagantes	39
4.2.1.1.	Ganho Óptico	39
4.2.1.2.	Figura de Ruído.....	46
4.2.2.	Topologias contra propagantes	52
4.2.2.1.	Ganho Óptico	52
4.2.2.2.	Figura de ruído	59
4.3.	Conclusão.....	65
CAPÍTULO 5.....		66
5.	Conclusão.....	66
5.1.	Perspectiva de trabalhos futuros	67
Bibliografia.....		68
ANEXO A – Topologias Optisystem		70
A.1 -	Topologias copropagantes	70
A.2 –	Topologias contra propagantes	72

CAPÍTULO 1

1. Introdução

Com o crescimento dos serviços de telecomunicações e de redes interligadas de nova geração surge a necessidade de se aumentar a largura de banda e consequentemente a capacidade dos sistemas de comunicação. As comunicações ópticas levam vantagem em relação aos sistemas tradicionais, pois possui uma largura de banda consideravelmente mais alta do que os demais.

A tecnologia utilizada para os primeiros sistemas de comunicação óptica utilizava interfaces eletrônicas e podia transmitir em intervalos de 20 km a 60 km. Os repetidores-regeneradores, como eram conhecidos, faziam a conversão do sinal óptico em sinal elétrico e tinham o objetivo de recuperar a amplitude e a forma do sinal óptico. O sinal era processado em circuitos eletrônicos capazes de recuperar o formato e a amplitude do sinal original. Com a mensagem recuperada modulava-se uma outra fonte de luz acoplada a uma fibra óptica para dar continuidade à transmissão (RIBEIRO, 2003).

Com o tempo a capacidade dos repetidores ficou insuficiente e começaram a surgir outros problemas como a degradação dos componentes eletrônicos devido ao uso prolongado, variações de temperatura e outras condições ambientais. Ao operar em altas taxas de transmissão, esses dispositivos causavam distorções e problemas de intermodulação entre os canais. Para resolver estes problemas eram necessários componentes eletrônicos muito caros e outras formas de amplificação do sinal óptico começaram a ser pesquisadas de forma que o sinal pudesse ser amplificado sem a necessidade de converter o sinal óptico em elétrico (SILVA, 2000).

Neste contexto, por volta de 1987, surgem os amplificadores ópticos que utilizam fibras dopadas com os elementos químicos da classe dos terra-raras (MORRISON et al., 1987). Dentre estes amplificadores o EDFA (*Erbium Doped Fiber Amplifier* – Amplificador à Fibra Dopada com Érbio) destaca-se como solução para amplificação de sinais ópticos. O objetivo da utilização deste tipo de amplificação é o aumento do espaçamento entre os repetidores e o uso em conjunto com a Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda

(WDM – *Wavelength-Division Multiplexing*) para aumentar a taxa de bits (AGRAWAL, 2002).

O EDFA é constituído por um pedaço de fibra óptica que, em seu processo de fabricação, recebe partículas de érbio (Er^{3+}) em sua constituição. Este elemento químico atua como componente ativo no processo de amplificação do sinal óptico. Durante o processo de amplificação os íons dopantes são estimulados por uma fonte de luz de bombeamento e ao retornarem ao nível fundamental amplificam o sinal opticamente. O érbio é capaz de amplificar a luz na região das bandas C (*Conventional Band* - 1530 nm a 1565 nm) e L (*Long Band* – 1565nm a 1620 nm) de comunicação óptica, sendo importante sua utilização nos enlaces ópticos, visto que essas janelas de transmissão possuem perdas mais baixas na faixa de 0,2 dB/km (AGRAWAL, 2002).

A função do amplificador pode ser classificada de acordo com sua localização física no enlace óptico: amplificador de potência, amplificador de linha ou pré-amplificador (RIBEIRO, 2003). Para cada uma dessas configurações o amplificador deve apresentar valores de ganho e figura de ruído adequadas. Podemos montar diferentes topologias de forma a alcançar os valores mais relevantes ao sistema em questão.

Vários estudos de topologias foram desenvolvidos com o objetivo de aumentar o ganho óptico. Heens (1998) propõe um *layout* que permite amplificar de forma eficiente sinais com alta intensidade luminosa, potências altas, e baixa intensidade luminosa, potências baixas. A topologia básica do amplificador é alterada adicionando-se um circulador e um acoplador sintonizável de forma que o sinal com baixa potência de entrada passe duas vezes pelo EDFA e tenha uma amplificação mais eficiente (HEENS; WANG, 1998). Mao (1999) apresenta um EDFA bi-direcional e analisa alguns parâmetros como o comprimento da fibra dopada e potência do laser de bombeamento para encontrar a melhor configuração para este tipo de aplicação (MAO et al., 1999). Rieznik (2006) utiliza as topologias básicas em diferentes bandas de comunicação, fixa a potência do laser de bombeamento e faz um comparativo de forma a encontrar o tamanho adequado da fibra dopada para cada situação (RIEZNİK, 2006). Durak (2017) utiliza duas grades de Bragg (FBG – *In-Fibre Bragg Grating*) para melhorar o desempenho de um EDFA na banda L de comunicação óptica, nesta configuração o ruído óptico retroalimenta o amplificador e causa um aumento no ganho (DURAK; ALTUNCU, 2017). Por fim, Kaler (2011) utiliza uma topologia com amplificadores em cascata para melhoria do ganho (KALER; KALER, 2011).

Neste trabalho apresentamos diversas topologias de amplificação do sinal óptico utilizando um sistema de reflexão do bombeamento e do sinal com objetivo de melhorar as figuras de mérito de ganho e figura de ruído do EDFA através de modelos simples e de baixo custo de implantação. Para isto foram estudadas topologias divididas em copropagantes e contra propagantes. Estas, por sua vez, foram configuradas com dois comprimentos de onda de bombeamento: 980 nm e 1480 nm. Finalmente foram testadas configurações básicas, com reflexão do bombeamento e com reflexão do sinal e do bombeamento em conjunto.

Os testes foram realizados através de simulação utilizando a versão 14 do software *Optisystem* da empresa *Optiwave*. Este software é bastante utilizado no projeto de enlaces ópticos devido ao alto custo para se realizar experimentalmente os testes. Estudo de performance de filtros ópticos (CHEN; LUO; CAI, 2016; KABONZO; PENG, 2016), portas lógicas totalmente ópticas (KATTI; PRINCE, 2016), rádio sobre fibra (RoF – *Radio over Fiber*) (WANG et al., 2016) e geradores de ondas ópticas (ZHANG; HE, 2016) são alguns exemplos da abrangência do software.

Em cada cenário de teste os parâmetros de comprimento da fibra da dopada e potência do laser de bombeamento eram alterados gradativamente de forma a encontrar a melhor configuração de ganho e figura de ruído.

O Capítulo 2 descreve os conceitos básicos de funcionamento do EDFA. Primeiramente discutimos os processos gerais de amplificação óptica abordando os dois de tipos de emissão que ocorrem. Em seguida, analisamos os níveis atômicos do érbio e sua função no processo de amplificação. E por último, algumas características gerais do EDFA como ganho, ASE e a própria fibra dopada.

O Capítulo 3 descreve os dispositivos ópticos utilizados na montagem do sistema de comunicação e as topologias utilizadas nos testes. São apresentados dispositivos passivos como os acopladores WDM, FBGs (*In-Fibre Bragg Grating*) e um laser semi-condutor como dispositivo ativo. A intenção é mostrar as características gerais de cada dispositivo para verificar de que modo cada um deles influencia o valor do ganho. As topologias são apresentadas começando pelas topologias básicas de um EDFA, em seguida são adicionados dispositivos de reflexão e um estudo entre estas configurações é realizado.

O Capítulo 4 apresenta os resultados de ganho e figura de ruído entre as topologias testadas. Para um dado valor de bombeamento e tamanho da fibra dopada são testadas as topologias divididas em copropagantes e contra propagantes. Através da análise dos gráficos

de ganho e figura de ruído é possível verificar a condição ótima do sistema para a pré-amplificação. O Capítulo 5 resume o conteúdo deste trabalho apresentando as conclusões obtidas com base nos resultados e mostrando perspectivas de trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

2. Amplificador Óptico a Fibra Dopada com Érbio

2.1. Introdução

Os amplificadores ópticos revolucionaram a forma de comunicação mundial por volta dos anos 80. Trata-se de um dispositivo capaz de amplificar o sinal de luz diretamente, sem a necessidade de conversão para eletricidade (DUTTON, 1998).

Os amplificadores ópticos utilizados em conjunto com WDM aumentam o ganho do sinal óptico com o objetivo de atingir grandes distâncias e alta velocidade. No entanto, o ruído presente no enlace também é amplificado e em algumas situações o uso se torna inviável. Dependendo do local onde forem posicionados no enlace óptico são adotadas as classificações de: pré-amplificadores, amplificadores de linha e amplificadores de potência. Os pré-amplificadores são colocados diretamente na frente do receptor e são caracterizados por apresentarem um baixo nível de ruído e conseguirem trabalhar com níveis de sinal muito baixos. Os amplificadores de linha possuem alto ganho e um aumento de ruído moderado, e podem ser colocados em qualquer parte do enlace óptico. Quando posicionados logo após o emissor do sinal óptico são classificados como amplificadores de potência (DECUSATIS; DECUSATIS, 2006).

Nos amplificadores que utilizam fibras dopadas como elemento ativo de amplificação o funcionamento é semelhante ao de um laser a fibra. Um sistema de bombeamento estimula os íons do elemento de dopagem para estados excitados, que decaem quando fótons do sinal de informação interagem eletromagneticamente amplificando o sinal. Este decaimento pode acontecer de duas formas a emissão estimulada e a emissão espontânea. Na emissão estimulada os decaimentos geram fótons com as mesmas características do sinal de informação causando a amplificação do mesmo. Na emissão espontânea os íons decaem sem a interação com o sinal óptico, devido o tempo de vida do nível de energia, e acabam gerando um ruído óptico (SILVA, 2000).

Neste capítulo serão abordados os processos de emissão espontânea e estimulada presentes nos amplificadores ópticos, os níveis de energia do Érbio que é o elemento dopante utilizado nos amplificadores deste estudo e, por fim, algumas características importantes sobre

o Amplificador Óptico a Fibra Dopada com Érbio (EDFA) como o ganho óptico e a figura de ruído.

2.2. Emissão Espontânea e Estimulada

No EDFA é utilizada uma fibra especial que possui adicionado em seu núcleo o elemento químico érbio, do grupo das terras raras, a fim de criar um meio opticamente ativo. Através do bombeamento a laser, os íons de Érbio presentes no núcleo da fibra saltam para um nível quântico superior. Ocorre a inversão de população quando a densidade de íons no nível superior é maior que no nível básico este fenômeno é condição fundamental para obtenção do ganho óptico. Em seguida, os íons decaem emitindo a mesma energia adquirida pelo bombeamento. Uma parte da energia emitida no decaimento é liberada na forma de fótons cujo comprimento de onda depende da diferença de energia dos níveis quânticos do elemento dopante.

Na emissão estimulada, o fóton permanece em fase com sinal óptico que se propaga na fibra, causando a amplificação. A luz gerada pela emissão espontânea causa um ruído no sistema. Na Figura 2-1 são mostrados os níveis de energia do Érbio. A representação I_x se refere a intensidade de luz no referido nível de energia. $I_{15/2}$ representa o estado fundamental de energia. São utilizados para o bombeamento os comprimentos de onda de 980 nm e 1480 nm. Estes comprimentos de onda permitem que os íons de Érbio absorvam de forma mais eficiente a energia do bombeamento e saltem do nível fundamental $I_{15/2}$ para os níveis $I_{11/2}$ e $I_{13/2}$ (BECKER; OLSSON; SIMPSON, 1999). Após esta transição, os íons decaem para o estado energético inferior, liberando energia relativa a diferença de entre os níveis. De acordo com a lei de Plank (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2012) podemos obter uma relação entre a diferença de energia dos níveis quânticos e os fótons emitidos

$$E = h\nu \quad (1)$$

onde $h = 6,625 \cdot 10^{-34}$ (J.s) é a constante de Plank, ν é a frequência do sinal óptico e E é a energia do fóton. Os sinais ópticos são comumente expressos mais em termos de comprimento de onda que em frequências. Assim:

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (2)$$

sendo c a velocidade da luz no vácuo e λ o comprimento de onda do sinal óptico. Podemos utilizar estas duas equações para obtermos os comprimentos de onda do fóton emitido no decaimento do nível $I_{11/2}$ para o nível fundamental. Considerando E_1 como o nível de energia do nível quântico fundamental e E_2 o nível de energia do nível $I_{11/2}$, temos:

$$\lambda = \frac{hc}{(E_2 - E_1)} \quad (3)$$

Podem ocorrer transições não-radiativas entre certos níveis. Neste caso a energia é liberada na forma de vibrações mecânicas da rede cristalina da sílica.

A transição entre os níveis $I_{15/2}$ e $I_{11/2}$ é considerada radiativa, ou seja, a energia é liberada na forma de fótons com pico de emissão no comprimento de onda próximo de 1550 nm. Este nível também é conhecido como metaestável considerando que o decaimento acontece num tempo em torno de 10 ms. Pode-se assim utilizar este dispositivo para comunicações com altas taxas de bits e em enlaces de grandes distâncias. (RIBEIRO, 2003)

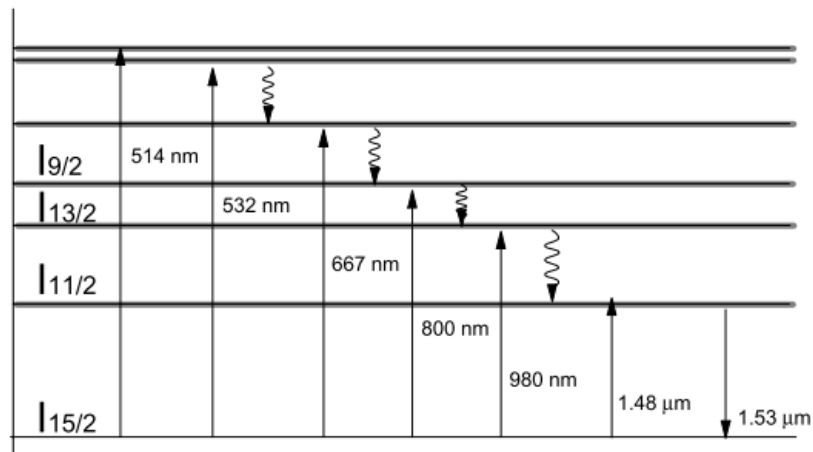


Figura 2-1 Níveis de energia do Érbio. Fonte: (DUTTON, 1998).

Um processo semelhante ocorre na emissão espontânea: há o estímulo dos íons através do bombeamento, a subida para um nível quântico de maior energia e o decaimento espontâneo. No entanto, os íons que decaem emitem um campo óptico que está fora de fase com o feixe de informação e são considerados como ruído no sistema de comunicação. Na Figura 2-2 é mostrado os três cenários possíveis dentro de um amplificador óptico. Em (a) o processo de absorção onde os íons do meio ativo absorvem o feixe de informação e não há a amplificação. Em (b) o processo de emissão estimulada discutido acima e em (c) a emissão espontânea.

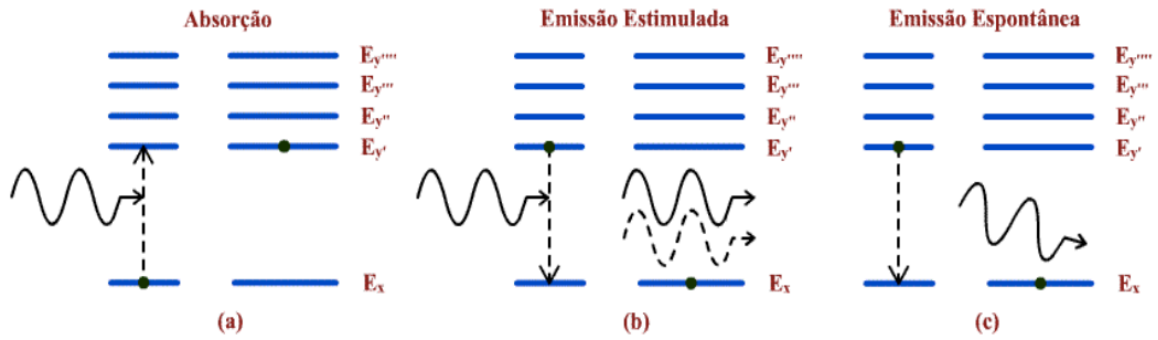


Figura 2-2 Mecanismos de amplificação do EDFA. Fonte (VALENTE; COELHO, 2007)

2.3. Ganho Óptico

O ganho, uma das principais características dos amplificadores, é a razão entre potência de saída e a potência de entrada do sinal óptico, expresso em decibéis. Vários fatores podem influenciar o valor final do ganho, como o comprimento de fibra dopada com érbio, a topologia de montagem do circuito óptico, a potência de bombeamento e do sinal a ser amplificado, o comprimento de onda do bombeamento e do sinal a ser amplificado e a quantidade de dopantes na fibra. (VALENTE; COELHO, 2007)

Na Eq. 4 é definida a relação de ganho do amplificador atentando para o ruído decorrente da Emissão Espontânea Estimulada - ASE (*Amplified Spontaneous Emission*). A ASE é um tipo ruído particular nos amplificadores ópticos, resultante da amplificação do ruído juntamente com o feixe óptico de informação.

$$\text{Ganho}(dB) = 10\log \left(\frac{P_{\text{Saída do Sinal}} - P_{\text{Saída do Ruído}}}{P_{\text{Entrada do Sinal}}} \right) \quad (4)$$

Neste trabalho foram realizadas medidas através de simulações para verificação da alteração do ganho no amplificador devido a adaptações no circuito óptico. Foram modificados o comprimento da fibra dopada e o tipo de topologia. Também foram utilizados diferentes valores de potência de bombeamento, tanto para o sinal, quanto para o bombeamento.

2.4. Emissão Espontânea Amplificada

A ASE é uma característica importante nos amplificadores ópticos e está presente em todos os tipos de amplificadores (AGRAWAL, 2002). Os íons que foram excitados através do

bombeamento óptico, que se encontram em níveis quânticos de maior energia, podem decair espontaneamente, emitindo um fóton que não possui as mesmas características dos fótons do sinal óptico a ser amplificado ou qualquer outro fóton. Tais fótons espontâneos podem estimular o decaimento de outros que ainda se encontram em nível excitado e, da mesma forma, incoerentes com o sinal óptico de informação.

Estes fótons são considerados como um elemento extra dentro da fibra dopada e também sofrem amplificação. Por possuírem características diferentes do sinal a ser amplificado, são considerados um ruído dentro do sistema de comunicação óptica (VALENTE; COELHO, 2007).

Caso se apresente de forma significativa, este fenômeno pode atrapalhar o desempenho do amplificador óptico, pois causará a saturação na saída do amplificador, já que os íons do elemento dopante passam a ser utilizados não mais para aumentar o sinal óptico de informação, e sim os fótons de ruído presentes na fibra dopada.

Podemos parametrizar o impacto que a ASE causa no sistema através da figura de ruído (NF – *Noise Figure*), que é a razão da relação sinal ruído (SNR – *Signal Noise Ratio*) da saída do amplificador pela SNR da entrada do amplificador. Podemos definir também a SNR como a medida de degradação do sinal óptico pelo ruído adicionado pelo amplificador. A NF pode variar de acordo com a topologia (ABU-AISHEH; ALNAJJAR, 2010).

Nas simulações a figura de ruído é calculada pelo Analisador Duplo WDM da seguinte forma:

$$NF(dB) = \frac{1}{Ganho} + \left[\frac{N_{out} - Ganho \cdot N_{in}}{h \cdot \nu \cdot Ganho \cdot B} \right] \quad (5)$$

Onde N_{out} e N_{in} são o ruído de saída e o ruído de entrada respectivamente, h é a constante de Plank, ν é a frequência do sinal e B é a banda (OPTIWAVE, 2017).

2.5. Fibra dopada com Érbio

A fibra dopada com érbio é do tipo monomodo e possui íons de érbio como elemento dopante no núcleo. É um dos principais componentes do EDFA e pode ser produzida por duas técnicas: Deposição Modificada de Vapor Químico (MWCD – *modified chemical vapor deposition*) e Deposição Axial de Vapor (VAD – *vapor axial deposition*) (BECKER, 1999).

Esta fibra deve ser projetada de forma a maximizar o bombeamento absorvido pelos íons de érbio. Com as técnicas mencionadas acima é possível obter um alto grau de controle na elaboração do índice refração, favorecendo que a diferença de índices entre o núcleo e a casca seja elevado. Com isso, o fator de confinamento óptico do bombeamento é maximizado (VALENTE; COELHO, 2007).

2.5.1. Regime de Saturação

A saturação ocorre quando o sinal a ser amplificado possui uma potência muito alta e consome rapidamente os íons dopantes no estado metaestável, fazendo com que a maior parte dos íons de érbio permaneçam no estado fundamental. Se o sinal de informação possuir uma potência muito baixa, os íons que se encontravam em estado excitado decaem de forma espontânea por conta do tempo, estimulando outros íons a também decaírem de forma espontânea, aumentando o nível da ASE e saturando a saída do amplificador.

A saturação pode prejudicar o ganho óptico, pois o consumo dos íons excitados afeta diretamente o ganho do amplificador. Deve haver um balanceamento entre a potência de entrada do sinal a ser amplificado e a potência de bombeamento. Quanto maior a potência de entrada do sinal, maior deve ser a potência de bombeamento. A potência de saturação cresce linearmente com a potência de bombeamento (KAMINOW et al., 2013).

2.5.2. Comprimento ótimo para a fibra dopada

O comprimento ótimo para a fibra dopada ocorre quando se obtém o máximo ganho do amplificador. Ao se propagar pela fibra dopada, a energia de bombeamento é absorvida, causando a excitação dos íons no estado fundamental para o estado metaestável. Depois de um certo comprimento não haverá mais energia para que esse efeito ocorra e, ao mesmo tempo, com o sinal óptico de informação trafegando pela fibra, pode acontecer uma diminuição da emissão estimulada e um aumento da emissão espontânea. Quando não houver mais a inversão de população, o ganho diminui devido a absorção de energia pelo material. Também deve-se levar em conta o nível de ruído e a potência de bombeamento para o cálculo do comprimento ótimo (RIBEIRO, 2003).

Procuramos neste trabalho obter o tamanho ótimo através de simulações, nas quais o tamanho da fibra foi alterado sucessivamente e testado com as topologias apresentadas no

capítulo 3. Na prática, esse método é preciso, porém inconveniente e dispendioso, pois tem-se de recortar a fibra dopada em vários pedaços.

2.6. Conclusão

Neste capítulo foi apresentada uma análise teórica do EDFA. Primeiramente, foram apresentados os conceitos de emissão estimulada e espontânea, fundamentais ao processo de amplificação óptica. Em seguida, mostramos algumas características do EDFA. Estes conceitos serão utilizados posteriormente para caracterizar os resultados obtidos neste trabalho e descrever o comportamento de cada topologia em análise.

CAPÍTULO 3

3. Dispositivos e Topologias do EDFA

3.1. Dispositivos

Neste capítulo, apresentaremos os dispositivos e as topologias que serão utilizados nas simulações e o princípio de funcionamento de cada um deles.

3.1.1. Fontes de Luz

Utilizadas para converter um sinal elétrico de entrada em um sinal óptico correspondente acoplando-o posteriormente a uma fibra óptica para transmissão. Os enlaces de comunicação óptica utilizam fontes de luz semicondutoras como os Diodos Emissores de Luz (LED) e lasers semicondutores, por apresentarem vantagens como tamanho compacto, alta eficiência, confiabilidade e comprimento de onda adequados (AGRAWAL, 2014).

As fontes de luz devem cumprir algumas exigências conforme a aplicação ou a sensibilidade do sistema receptor óptico. Em um sistema de comunicação de longa distância, com poucos repetidores, é necessário o emprego de uma fonte de luminosa de alta intensidade. Ou seja, sua geometria e irradiação devem garantir um acoplamento eficiente com a fibra óptica de modo que, em condições ideais, a emissão seja apenas do comprimento de onda desejado.

A largura espectral da luz deve ser estreita e o tempo de geração da luz deve ser pequeno de modo a diminuir a dispersão, permitir a transmissão de modulações com altas taxas de bits e possibilitar a comunicação de alta capacidade. Por fim, a fonte de luz deve ser estável no meio em que é submetida, invariável com o tempo e a temperatura externa.

Alguns semicondutores podem gerar uma irradiação recombinando suas estruturas p-n ao injetarmos elétrons. Com isso, foram criados dispositivos que emitem luz em comprimentos de onda específicos de acordo com os cristais utilizados. Diversas combinações de materiais semicondutores foram testadas de modo a oferecer um comprimento de onda adequado para utilização em comunicações ópticas. Com os cristais do arsenieto de gálio e fósforo (GaAsP), o arsenieto de gálio e alumínio (GaAsAl) e o arsenieto de gálio e índio

(InGaAs) podemos, por exemplo, obter um comprimento de onda dominante de 920nm ou 1650nm, valores convenientes para utilização em comunicações ópticas (RIBEIRO, 2003).

3.1.2. Lasers Semicondutores

Nos lasers semicondutores a junção p-n é bombardeada eletricamente de modo semelhante aos LEDs. Esse bombeamento pode ser feito através de uma estrutura de três camadas, na qual o núcleo central, região ativa, fica entre as camadas p-n dopadas e polarizadas diretamente. A Figura 3-1 mostra a estrutura de um laser semiconductor.

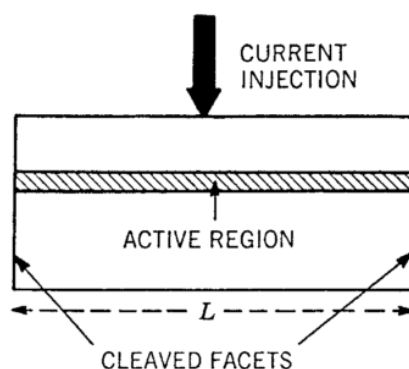


Figura 3-1 Estrutura básica de um laser semiconductor. Fonte: (AGRAWAL, 2002)

Com o bombeamento os elétrons são organizados nas bandas de valência e condução. A banda de valência é preenchida com vários elétrons e a de condução com poucos elétrons. Os elétrons são levados da banda de valência para a banda de condução através do bombeamento e deixam espaços vazios, buracos ou lacunas. Um fóton é gerado quando um elétron próximo da banda de condução se recombina com uma lacuna da banda de valência e possui comprimento de onda de acordo com a diferença de energia entre as bandas. A configuração de três camadas ajuda a confinar os portadores injetados e a luz gerada pela recombinação dos elétrons e lacunas no interior da camada ativa.

Existe ainda o processo de realimentação óptica que pode ocorrer dentro de uma cavidade ressonante com espelhada que possibilitam a seleção do comprimento de onda desejado obtendo-se uma irradiação coerente e um ganho óptico interno. No caso dos lasers semicondutores as faces clivadas atuam como espelhos devido a diferença grande dos índices de refração na interface ar-semicondutor (AGRAWAL, 2014).

A fonte externa de bombeamento do laser deve possuir uma quantidade de corrente superior a corrente limiar necessária para que haja a emissão estimulada. Se esta condição não

for satisfeita o laser emitirá apenas emissões espontâneas e o dispositivo age como se fosse um LED comum. Satisfeitas estas condições, após um tempo ligado, o laser começa sua “ação laser” ou *lasing* emitindo uma irradiação coerente no comprimento de onda desejado. (RIBEIRO, 2003)

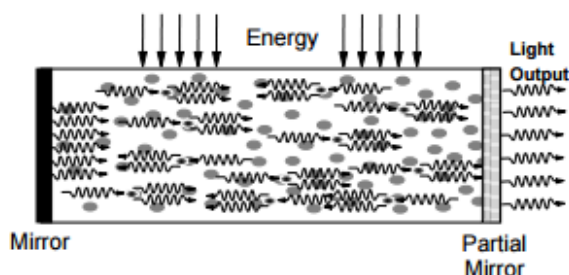


Figura 3-2 *Lasing*. Fonte: (DUTTON, 1998)

Procuramos neste trabalho, através de simulações, apontar melhorias no ganho dos amplificadores a fibra dopada para comunicações ópticas de longa distância no estágio de pré-amplificação. São utilizados dois tipos de *lasers* sintonizados em comprimentos de onda diferentes. Um para simular a informação e o outro o bombeamento.

O primeiro *laser* utilizado no projeto para simulação do envio das informações. É um laser ideal semiconductor de onda contínua (*Continuous Wave*) com 10MHz de largura espectral (OPTIWAVE, 2017). A característica principal desse tipo de laser é manter um sinal óptico contínuo no comprimento de onda configurado para seu funcionamento. Em todas as simulações, os *lasers CW* foram configurados em 1550 nm de comprimento de onda para se encaixar em uma janela de baixa atenuação e dispersão óptica chamada banda C de comunicação óptica. O segundo *laser* utilizado simulou o bombeamento necessário para o funcionamento do EDFA. Trata-se, também, de um laser ideal semiconductor configurado em dois comprimentos de onda diferentes 980nm e 1480nm.

3.1.3. Acopladores WDM

O acoplador WDM é um dispositivo óptico que tem como função unir dois sinais ópticos com comprimentos de onda diferentes em uma única fibra. Em sua configuração mais simples é formado por duas entradas e uma saída. É muito utilizado para combinação do sinal óptico de informação a ser amplificado com o sinal de bombeamento com baixas perdas. (VALENTE; COELHO, 2007)

O interesse no uso deste tipo de dispositivo vem crescendo devido ao baixo índice de perdas que apresenta. Em acopladores comuns a luz é combinada, porém tem-se uma perda de metade da potência óptica a cada junção. Para sistemas de WDM de alto desempenho seriam necessários o uso de vários acopladores e as perdas acumuladas seriam muito grandes tornando o sistema inviável. (DUTTON, 1998)

Foi utilizado no projeto um acoplador WDM ideal. Deste modo, não há perda de inserção no acoplamento dos dois *lasers*, bombeamento e sinal, e também não há perdas devido a reflexão do sinal nos dispositivos. Também apresenta isolamento ideal entre as bandas que acopla evitando efeitos de intermodulação.

3.1.4. *In-Fibre Bragg Gratings (FBGs)*

Os filtros ópticos modificam o espectro da luz incidente utilizando algum mecanismo de difração ou interferência óptica como espelhos associados a placas piezoelétricas, acopladores e ondas sonoras. Os filtros ópticos de Bragg utilizam as propriedades de seleção de comprimento de onda das grades de Bragg. Assim, é possível selecionar quais comprimentos de onda irão prosseguir na transmissão óptica e quais irão ser refletidos de volta para o sistema.

Os FBGs são filtros de seleção de comprimento de onda extremamente simples e de baixo custo. Trata-se de um pedaço de fibra monomodo cujo núcleo é construído com variações do índice de refração. Sua principal característica é a reflexão dos comprimentos de onda ressonantes e transmissão dos comprimentos de onda não ressonantes sem perdas. (DUTTON, 1998)



Figura 3-3 Funcionamento de um FBG. Fonte: (DUTTON, 1998)

Na Figura 3-3 apresentamos um esquema do funcionamento deste tipo de filtro. Em uma das pontas é inserido o sinal de entrada, os comprimentos de ondas selecionados são

refletidos de voltam na direção contrária e os não selecionados prosseguem com a transmissão.

O comprimento de onda central especifica o centro da banda de reflexão do FBG e a banda de reflexão que inclui um intervalo de comprimentos de onda que serão refletidos pelo filtro são umas das características principais de um FBG. Na simulação foi utilizado um FBG uniforme com comprimento de onda central de reflexão coincidindo com o comprimento de onda do *laser* de bombeamento, banda de 125 GHz e índice de reflexão de 99%. A resolução das equações de acoplamento são utilizadas pelo simulador para este dispositivo (AGRAWAL, 2001; OPTIWAVE, 2017).

3.1.5. Isoladores e Circuladores Ópticos

Um isolador é um dispositivo que permite a passagem da luz apenas em uma direção. Eles são utilizados nos sistemas de comunicação para evitar que reflexões internas retornem pela fibra e prejudiquem o funcionamento dos lasers. Estes dispositivos utilizam o Efeito Faraday. Através de mudanças na polarização do sinal óptico, os sinais de entrada passam pelo dispositivo e as reflexões são filtradas.

O circulador óptico funciona de forma semelhante ao isolador, mas não descarta os sinais ópticos. Em sua forma mais simples, é um dispositivo de 3 portas que direciona a luz que entra em uma porta para a seguinte. Caso a luz entre pela porta 1 é direcionada para a porta 2, entrando pela porta 2 é direcionada para a 3 (DUTTON, 1998).

Nas simulações os isoladores são utilizados para evitar que as reflexões afetem o desempenho dos lasers, de informação e bombeamento, e os circuladores são utilizados em algumas topologias para refletir os sinais de volta para o amplificador.

3.1.6. Analisador Duplo WDM

O DPWDMA (*Dual Port WDM Analyzer*) é um dispositivo óptico que detecta e calcula a potência óptica, o ruído, a SNR, o ganho, a figura de ruído e comprimento de onda para cada canal WDM inserido. É ligado a saída do multiplexador WDM e a saída do EDFA. Foi ajustado para coletar dados da banda C de transmissão óptica entre 185THz e 200THz de

frequência. O DPWDMA estima a potência do sinal e do ruído baseado na banda de cada entrada (OPTIWAVE, 2017).

3.2. Topologias

3.2.1. Topologias básicas

Na Figura 3-4 apresentamos a primeira topologia utilizada no estudo. Trata-se de uma topologia básica copropagante do EDFA. Um feixe com oito lasers CW (*Continuous Wave*) atua como sinal de informação, estes sinais são configurados com potência de -30dBm no intuito de simular o final do enlace óptico e verificar o estágio de pré-amplificação. Os lasers são configurados na banda C de comunicação óptica e os comprimentos de onda variam de 1552 nm a 1546 nm com espaçamento de 100GHz entre os canais. Os lasers são acoplados a um multiplexador WDM ideal que encaminha o sinal por uma única fibra. Por se tratar de uma topologia copropagante, o laser de bombeamento é colocado no mesmo sentido dos lasers de informação. O bombeamento foi ajustado em 980 nm ou 1480 nm e sua potência de operação varia entre 10 mW e 40 mW. Após cada uma das fontes de luz é posicionado um isolador óptico, para evitar que reflexões prejudiquem o comportamento dos lasers. O conjunto mencionado acima é conectado a um acoplador WDM e em seguida a fibra dopada. Um analisador duplo WDM é conectado na saída do multiplexador após a isolamento e na saída da fibra dopada.

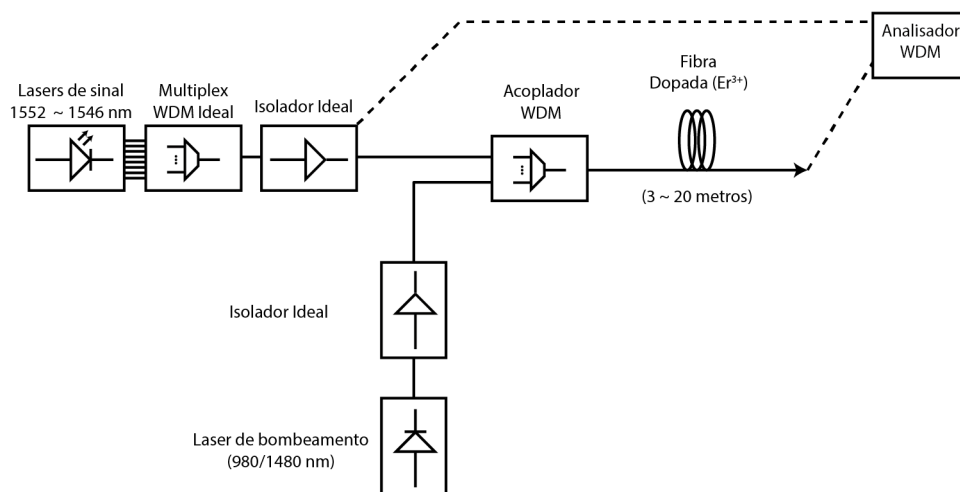


Figura 3-4 Configuração básica do EDFA copropagante. Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 3-5, encontramos a segunda topologia básica utilizada no estudo com o EDFA contra propagante. Os componentes ópticos utilizados são semelhantes, porém muda-se a posição do laser de bombeamento para o sentido contrário dos lasers de informação. O analisador é conectado a saída do multiplexador e ao acoplador óptico utilizado pelo laser de bombeamento.

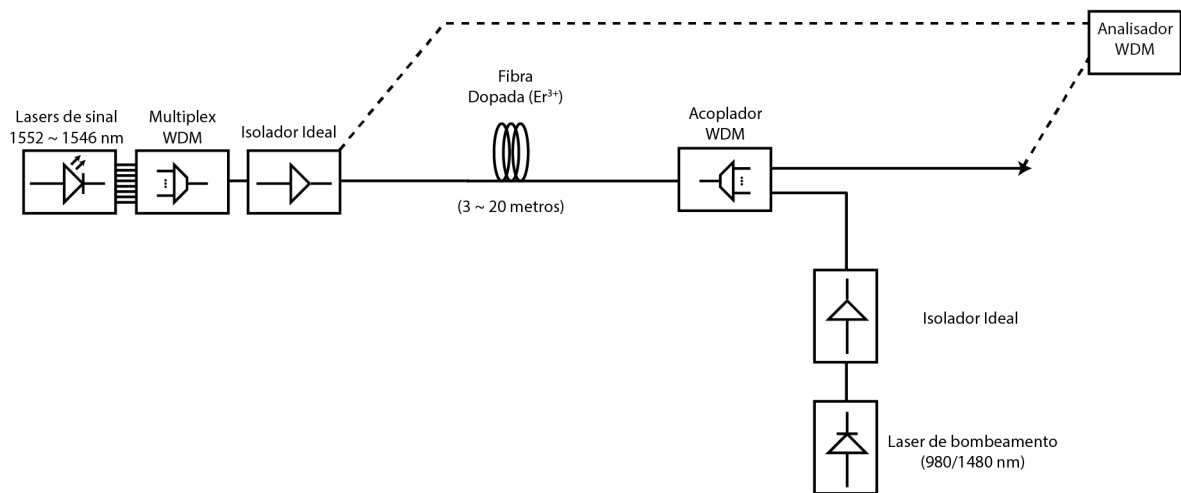


Figura 3-5 Configuração básica do EDFA contra propagante. Fonte: Elaborado pelo autor.

As topologias mencionadas acima foram montadas de quatro formas diferentes durante as simulações. Duas com o comprimento de onda do laser de bombeamento em 980 nm nos sentidos copropagante e contra propagante e duas com 1480 nm de bombeamento também nos dois sentidos.

3.2.2. Topologias com reflexão de bombeamento

A partir dessas duas configurações básicas de amplificação alteramos a topologia acrescentando dispositivos passivos reflexivos em certos pontos. Espera-se que o desempenho da fibra dopada melhore, pois passaremos a ter bombeamento nos dois sentidos aumentando a quantidade de íons de érbio que passam para o estado quântico superior possibilitando a emissão induzida de fótons para amplificação. No primeiro caso, foi adicionado um filtro óptico de Bragg, ou grade de Bragg, para refletir o comprimento de onda do laser de bombeamento. Na Figura 3-6 apresentamos a topologia copropagante modificada com reflexão do bombeamento.

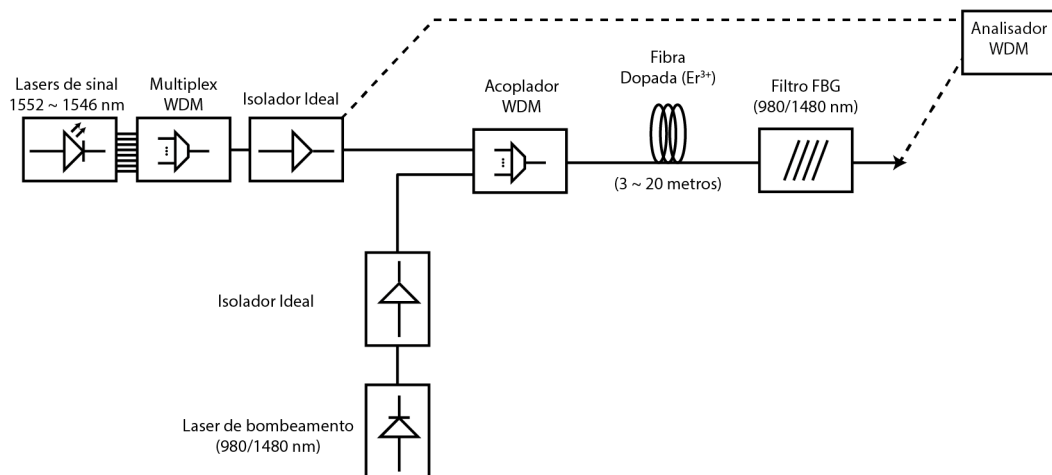


Figura 3-6 Topologia copropagante com reflexão do bombeamento. Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 3-7 apresentamos a topologia contra propagante modificada. O FBG é colocado após o multiplexador dos lasers de informação. Por ser configurado para refletir apenas o comprimento de onda do laser de bombeamento, este filtro não impede a passagem dos sinais de informação para a fibra dopada.

Da mesma forma que na topologia contra propagante básica o laser de bombeamento é colocado no sentido contrário aos de informação, ao passar pela fibra dopada refletirá no FBG e retornará a fibra dopada.

Com essas modificações obtemos mais quatro topologias para simulação. De modo semelhante as topologias básicas temos duas, nos dois sentidos, com 980 nm de bombeamento e duas com 1480 nm de comprimento de onda de bombeamento copropagante e contra propagante.

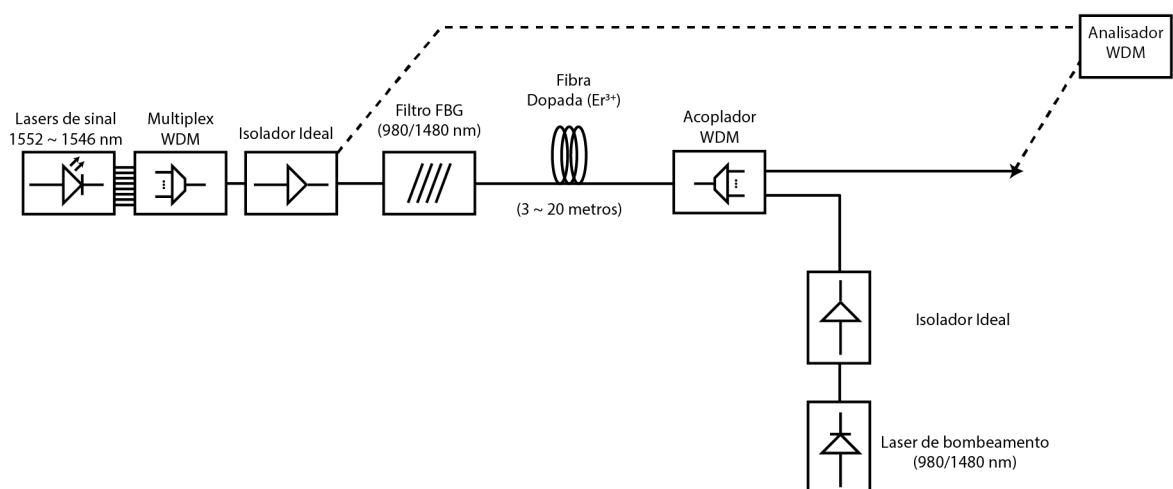


Figura 3-7 Topologia contra propagante com reflexão do bombeamento. Fonte: Elaborado pelo autor

3.2.3. Topologias com reflexão de sinal e bombeamento

As topologias básicas foram modificadas de modo que o sinal e o bombeamento sejam refletidos e passem duas vezes pela fibra dopada. Após o multiplexador dos lasers de informação foi adicionado um circulador óptico ideal. Os sinais provenientes do multiplexador são direcionados para o acoplador WDM e em seguida para a fibra dopada. Os sinais trafegando no sentido contrário são direcionados a saída do sistema. Após a fibra dopada foi adicionado um segundo circulador com as saídas 3 e 2 interligadas. Dessa forma, os sinais que chegam a este circulador são enviados novamente a fibra dopada no sentido contrário. O analisador WDM é conectado a saída do multiplexador e a saída do primeiro circulador óptico. A Figura 3-8 mostra as ligações descritas acima, o laser de bombeamento é acoplado no sentido copropagante neste caso. Espera-se que o desempenho do amplificador seja melhorado, pois com a passagem dupla tem-se um melhor aproveitamento de toda a extensão da fibra dopada. Aumenta-se a quantidade de íons excitados devido a reflexão do bombeamento, que são consumidos pelo sinal, também refletido, no sentido contrário.

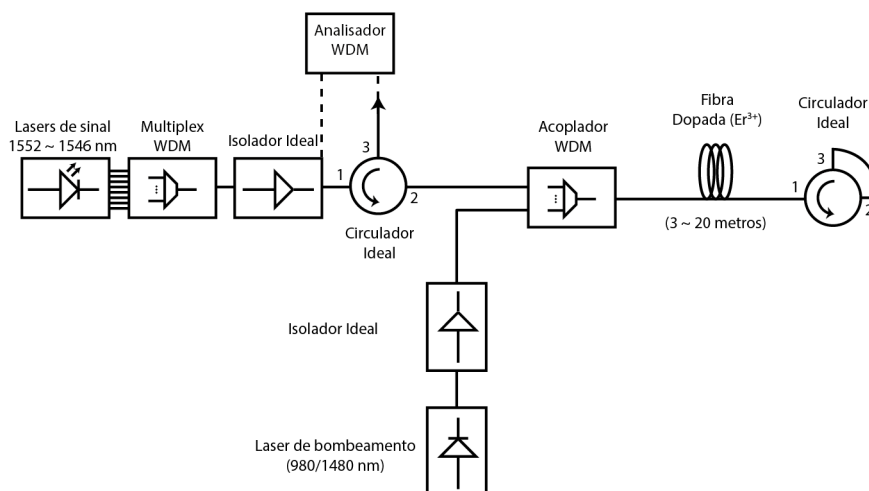


Figura 3-8 Topologia copropagante com reflexão do sinal e do bombeamento. Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 3-9 apresentamos as modificações necessárias para refletir o sinal e o bombeamento no sentido contra propagante. Também são adicionados dois circuladores após o multiplexador e na saída do acoplador WDM. Para que o sinal de bombeamento fosse refletido, um FBG foi colocado após o primeiro circulador óptico.

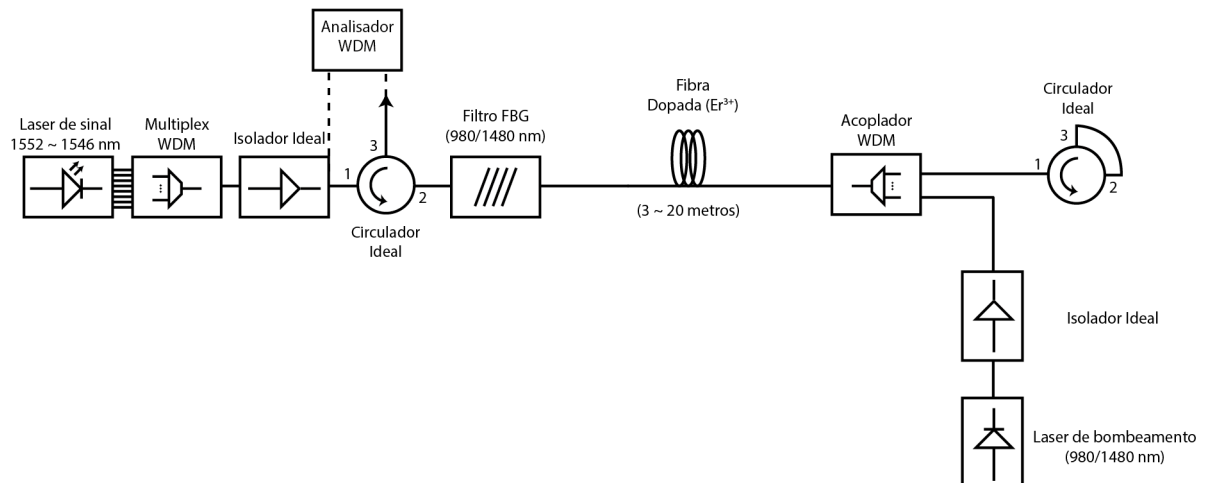


Figura 3-9 Topologia contra propagante com reflexão do sinal e do bombeamento. Fonte: Elaborado pelo autor

Com essas modificações simulamos mais quatro configurações, de forma semelhante aos oito casos anteriores, totalizando doze topologias simuladas. Os resultados de ganho e figura de ruído serão analisados para cada um dos casos apresentados.

3.3. Conclusão

Este capítulo apresentou os dispositivos e as topologias utilizados neste trabalho. Foram apresentadas as características fundamentais de cada dispositivo e sua utilização nos diversos tipos de topologia. A partir das configurações básicas de pré-amplificação do EDFA foram propostas oito topologias com dispositivos passivos de reflexão do bombeamento e do sinal. O conhecimento básico destas topologias será útil no entendimento da análise dos resultados no próximo capítulo.

CAPÍTULO 4

4. Resultados

Neste capítulo apresentaremos a análise dos resultados das simulações utilizadas neste trabalho. Para montagem das topologias foi utilizado o simulador *Optisystem* versão 14 da empresa *Optiwave*.

4.1. Introdução

Amplificadores ópticos são caracterizados por sua eficiência de ganho em função da potência de entrada do sinal e possuem um limiar em que o aumento da potência de entrada não ocasiona nenhum efeito e o ganho satura. O comprimento da fibra dopada torna-se um fator importante para este tipo de amplificadores, sendo escolhido para otimizar o ganho. Se for muito longa pode causar a absorção do sinal de entrada e se muito curta pode não utilizar de forma eficiente o bombeamento que a estimula. (DECUSATIS; DECUSATIS, 2006)

Para se obter um melhor desempenho com o EDFA podemos realizar algumas adaptações e modificações para aumentar o ganho óptico ou diminuir os efeitos da ASE. Pode-se, exemplo, alterar os materiais dopantes utilizados na fabricação da fibra. Outra forma de melhoria seria modificações em suas topologias físicas, alterando a posição dos dispositivos do circuito óptico e adicionando outros componentes. (VALENTE; COELHO, 2007)

Podemos adicionar então componentes passivos ao circuito de modo a melhorar o desempenho do conjunto amplificador. Sendo assim, foram estudadas doze topologias de pré-amplificação diferentes divididas em copropagantes e contra propagantes. Destas topologias serão analisadas o ganho óptico e a figura de ruído. Os resultados de ganho e figura de ruído das topologias básicas e reflexivas serão dispostos em gráficos para facilitar a compreensão dos dados.

4.2. Resultados

As topologias apresentadas no capítulo 3 foram analisadas, considerando o comprimento da fibra dopada e a potência do laser de bombeamento, através da obtenção das figuras de mérito de ganho e de figura de ruído, com o objetivo de obter a melhor configuração para o estágio de pré-amplificação óptica na banda C de comunicação óptica. O comprimento da fibra foi variado de 3 a 20 metros, e as potências de bombeamento analisadas foram de 10, 20 e 40 mW. Esses valores de potência foram escolhidos com base nos lasers de bombeamento disponíveis no mercado. A potência do sinal de informação é fixa em -30 dBm com o objetivo de simular o final do enlace óptico e os comprimentos de onda dos lasers variam de 1552 a 1546 nm com 100GHz de espaçamento entre os canais.

Na Tabela 1 são apresentados os cenários analisados de acordo com as topologias descritas anteriormente. Foram analisados dois tipos de bombeamento: 980 nm e 1480 nm.

Modo de operação	Bombeamento (nm)	Tipo
Copropagante	980	Sem reflexão (Básica)
		Com reflexão do bombeamento
		Com reflexão do sinal e do bombeamento
	1480	Sem reflexão (Básica)
		Com reflexão do bombeamento
		Com reflexão do sinal e do bombeamento
Contra propagante	980	Sem reflexão (Básica)
		Com reflexão do bombeamento
		Com reflexão do sinal e do bombeamento
	1480	Sem reflexão (Básica)
		Com reflexão do bombeamento
		Com reflexão do sinal e do bombeamento

Tabela 1 Configurações das topologias. Fonte: Elaborado pelo autor

4.2.1. Topologias copropagantes

4.2.1.1. Ganho Óptico

Na Figura 4-1 é apresentado o ganho óptico do amplificador em função do comprimento da fibra dopada com érbio utilizando a topologia básica copropagante. A potência de bombeamento configurada em 10 mW com 980 nm de comprimento de onda. São apresentados os ganhos para os oito comprimentos de onda de sinal utilizados na simulação.

O pico de ganho acontece quando a fibra dopada alcança 7 metros de comprimento e fica em torno de 18 dB.

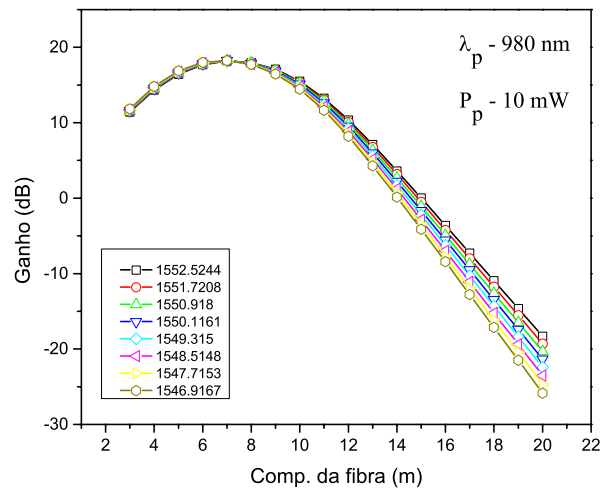


Figura 4-1 Ganho óptico do EDFA em 980nm no sentido copropagante topologia básica com 10 mW de bombeamento. Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 4-2 a potência do laser de bombeamento é alterada para 20 mW e mantém-se o comprimento de onda em 980 nm. Devido a maior potência de bombeamento o pico de ganho é alcançado em 10 metros de fibra dopada com 25 dB. Finalmente na Figura 4-3 a potência do laser de bombeamento é alterada para 40 mW com o comprimento de onda em 980nm e o pico de ganho é alcançado 13 metros de fibra dopada com 29 dB.

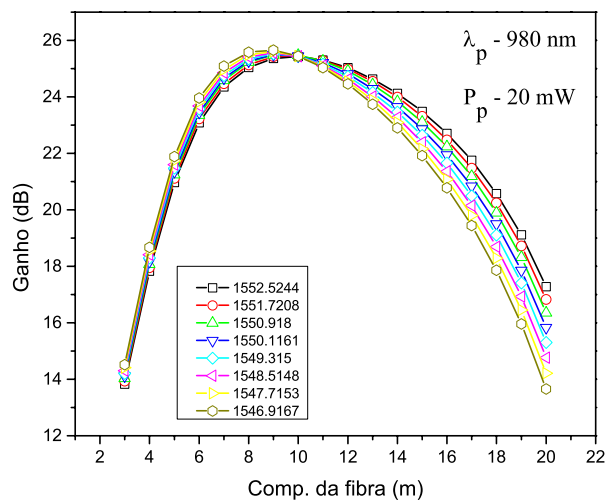


Figura 4-2 Ganho óptico do EDFA em 980nm no sentido copropagante topologia básica com 20 mW de bombeamento. Fonte: Elaborado pelo autor

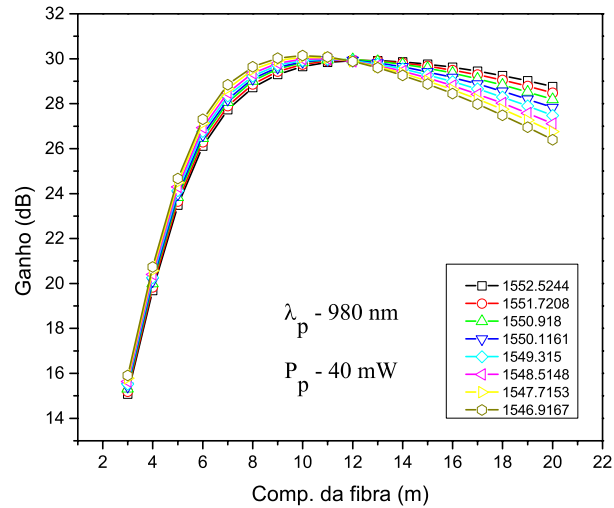


Figura 4-3 Ganho óptico do EDFA em 980nm no sentido copropagante topologia básica com 40 mW de bombeamento. Fonte: Elaborado pelo autor

Em seguida serão mostrados os gráficos para as topologias com reflexão de bombeio e com reflexão de sinal e bombeio. Espera-se que o ganho melhore devido as reflexões e o aumento de íons disponíveis para amplificação e também devido a dupla passagem do sinal pelo amplificador. Na Figura 4-4 é apresentado o ganho óptico para a topologia copropagante com reflexão do bombeamento em (a) e com reflexão do sinal e do bombeamento em (b).

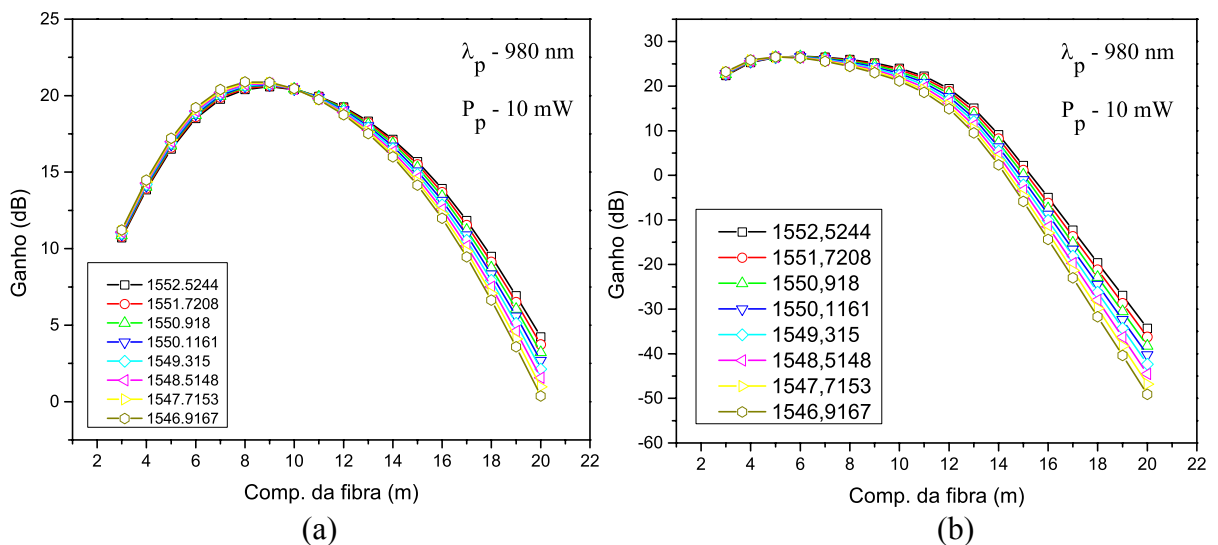


Figura 4-4 Ganho óptico EDFA em 980 nm e 10mW com reflexão do bombeamento (a) e reflexão do sinal e do bombeamento (b). Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 4-4 (a) ao refletir apenas o bombeamento obtemos um pico de ganho em torno de 9 metros de fibra dopada com 20 dB. Em (b) este pico sobe para 26,7 dB com apenas 6 metros de fibra dopada. Comparando com a Figura 4-1, com a primeira topologia adicionando um FBG para reflexão do bombeamento conseguimos melhorar o ganho em 2 dB

e com a dupla passagem, refletindo o sinal e o bombeamento, conseguimos uma diferença de 8 dB com um pedaço de fibra dopada menor, diminuindo consequentemente os custos de instalação.

Na Figura 4-5 são apresentados os ganhos ópticos para as configurações copropagantes em 980 nm de bombeamento com 20 mW de potência para as topologias reflexivas.

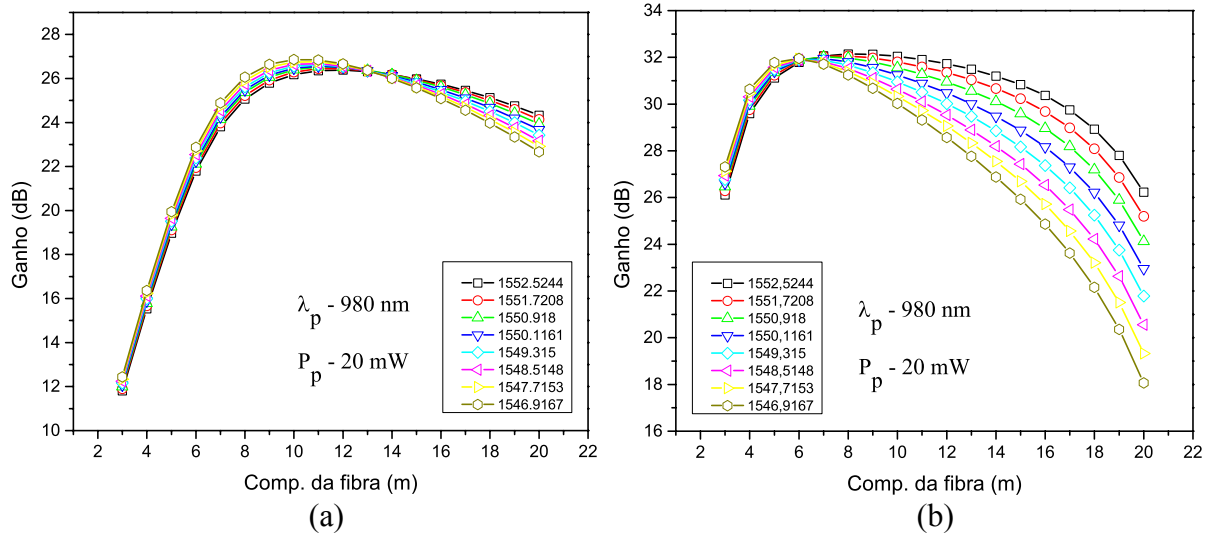


Figura 4-5 Ganho óptico EDFA em 980 nm e 20mW com reflexão do bombeamento (a) e reflexão do sinal e do bombeamento (b). Fonte: Elaborado pelo autor

De forma semelhante ao refletirmos somente o laser de bombeamento na Figura 4-5 (a) obtemos um pico máximo de ganho óptico em torno de 10 metros de fibra dopada com 26 dB. Em (b) este pico de ganho ocorre com 8 metros de fibra dopada em 32 dB, em seguida o ganho decai de forma diferente para cada comprimento onda. Este fato é esperado devido ao espectro de ganho irregular do érbio para os diversos comprimentos de onda. Comparando com a Figura 4-2 que mostra o ganho da topologia básica na mesma situação conseguimos em (a) obter 1 dB de diferença de ganho máximo com o mesmo comprimento de fibra dopada e em (b) uma diferença de 7 dB. Também foi possível diminuir o tamanho da fibra para se alcançar o ganho máximo.

Na Figura 4-6 os gráficos de ganho óptico quando o laser de bombeamento é ajustado com 40 mW são apresentados. O comprimento de onda permanece em 980 nm e novamente é alterado o comprimento da fibra dopada.

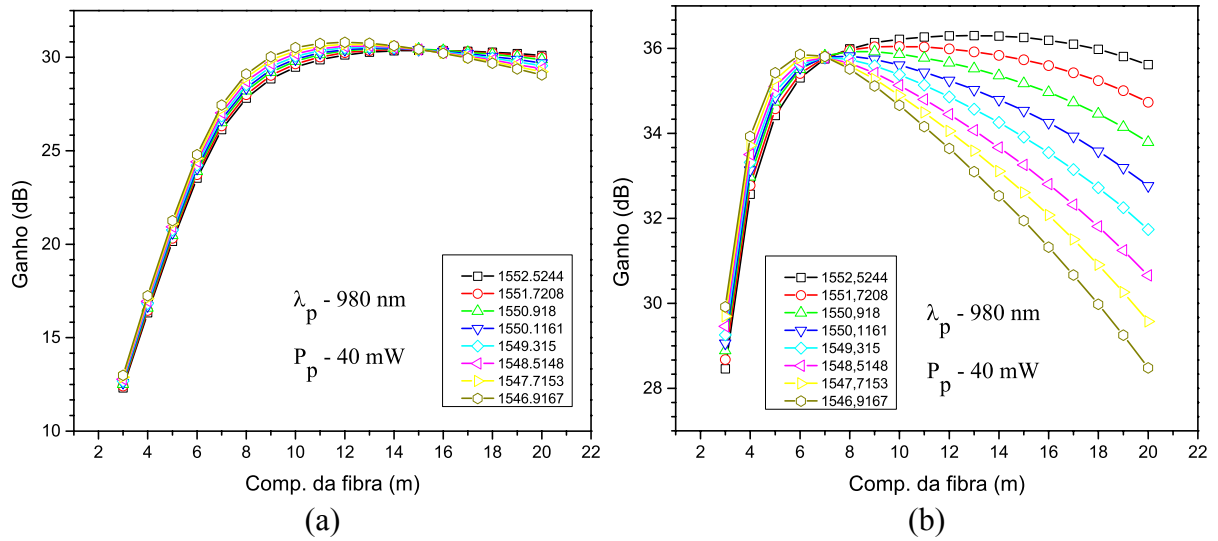


Figura 4-6 Ganho óptico EDFA em 980 nm e 40mW com reflexão do bombeamento (a) e reflexão do sinal e do bombeamento (b). Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 4-6 (a) obtemos um pico máximo de ganho em 29 dB com 13 metros de fibra dopada apenas refletindo o bombeamento e em (b) um pico máximo de 36 dB com 11 metros de fibra dopada, refletindo o sinal e o bombeamento de volta para a fibra dopada. Com o aumento da potência de bombeamento o ganho em (b) após o pico decai de forma ainda mais espaçada para os diferentes comprimentos de onda.

Na Figura 4-7 verificamos o ganho para a topologia básica quando alteramos o comprimento de onda do laser de bombeamento para 1480 nm e ajustamos a potência para 10 mW. Em seguida, nas Figuras 4-8 e 4-9 as potências são ajustadas para 20 mW e 40 mW respectivamente.

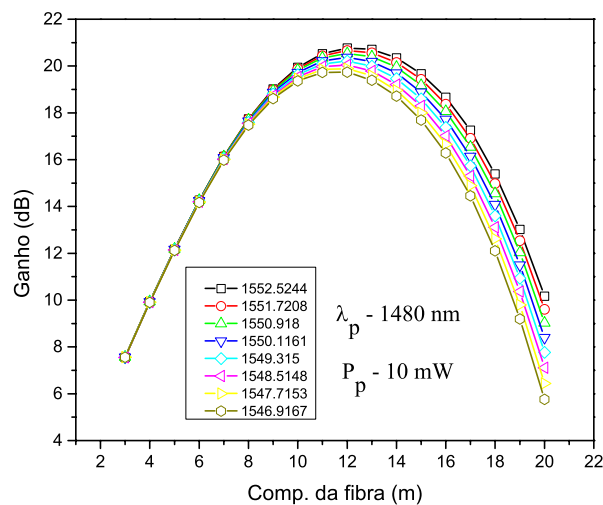


Figura 4-7 Ganho óptico do EDFA em 1480nm no sentido copropagante topologia básica com 10 mW de bombeamento. Fonte: Elaborado pelo autor

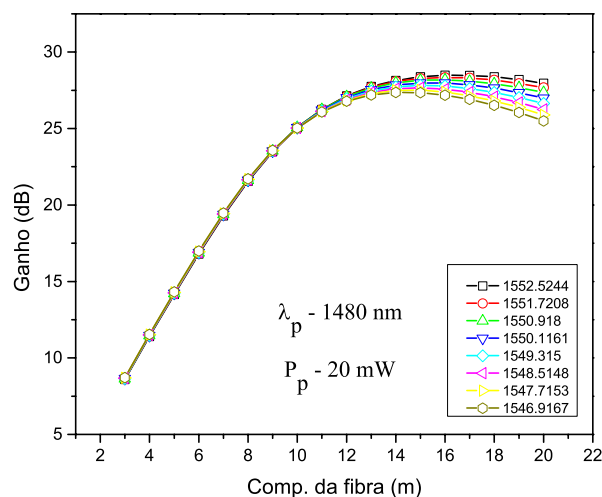


Figura 4-8 Ganho óptico do EDFA em 1480nm no sentido copropagante topologia básica com 10 mW de bombeamento. Fonte: Elaborado pelo autor

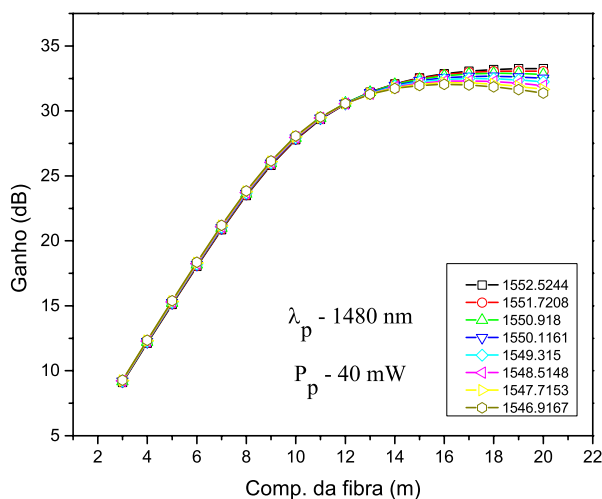


Figura 4-9 Ganho óptico do EDFA em 1480nm no sentido copropagante topologia básica com 40 mW de bombeamento. Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 4-7 obtemos um pico máximo de ganho em 12 metros de fibra dopada com 20 dB. Este ganho cai para 19 dB nos dois últimos comprimentos de onda simulados 1547 nm e 1546 nm. Na Figura 4-8 o ganho óptico máximo ocorre em 16 metros de fibra dopada com 28 dB para os dois primeiros comprimentos de onda, 1552 nm e 1551 nm, e 27 dB para os demais. Por fim na Figura 4-9 o ponto máximo de ganho ocorre em 19 metros de fibra com 33 dB para os comprimentos de onda de 1552 nm e 1551 nm e 32 dB para os demais. Ao alterarmos o comprimento de onda do bombeamento conseguimos mesmo na topologia básica aumentar o ganho do amplificador, mas o tamanho da fibra dopada também teve ser aumentado. Na Figura 4-10 apresentamos os gráficos de ganho para as topologias reflexivas em 1480 nm de bombeamento e 10 mW de potência.

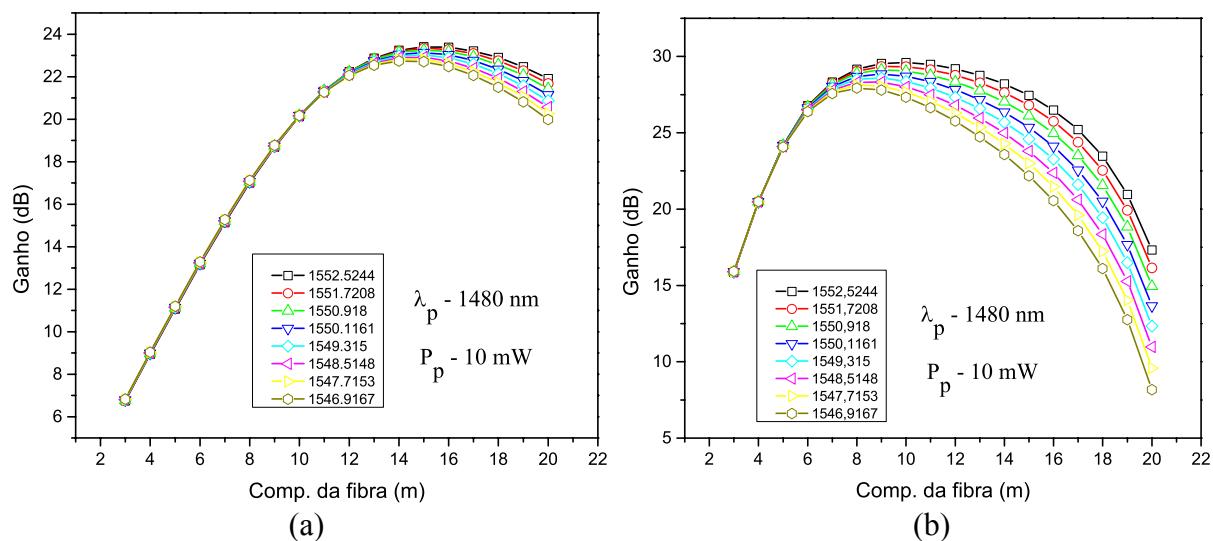


Figura 4-10 Ganho óptico EDFA em 1480 nm e 10mW com reflexão do bombeamento (a) e reflexão do sinal e do bombeamento (b). Fonte: Elaborado pelo autor

Com o bombeamento refletido na Figura 4-10 (a) obtemos um ganho máximo de 23 dB para 14 metros de fibra dopada e em (b) com reflexão do sinal e do bombeamento este máximo varia de 26,7 dB a 26,3 dB para 6 metros de fibra dopada. Nas Figuras 4-11 e 4-12 apresentamos o ganho para as topologias reflexivas utilizando 20 mW e 40 mW de potência de bombeamento respectivamente, o comprimento de onda mantém-se em 1480 nm.

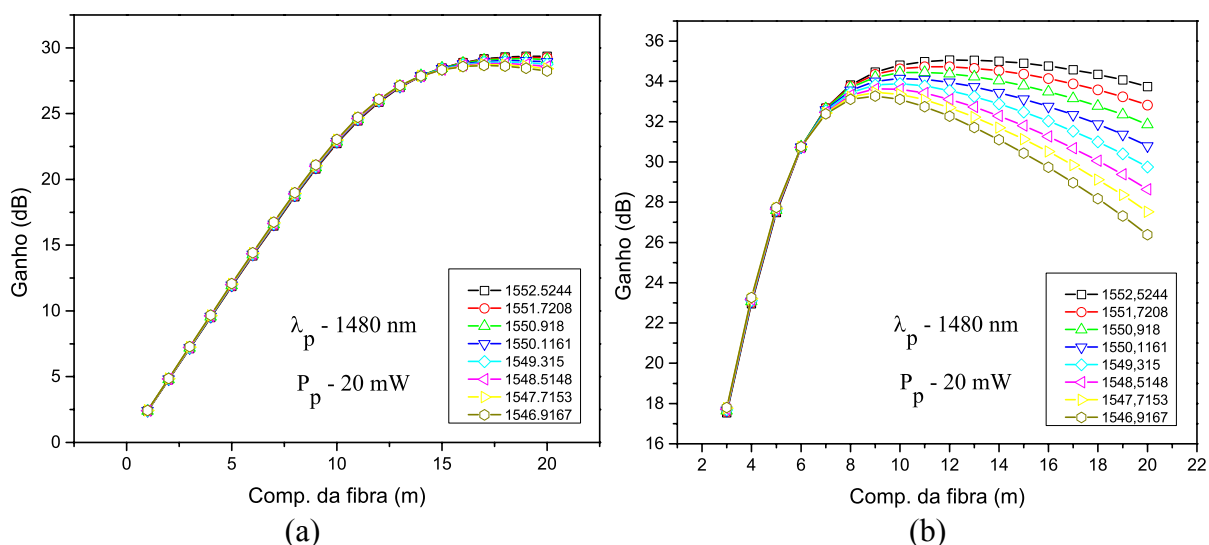


Figura 4-11 Ganho óptico EDFA em 1480 nm e 20mW com reflexão do bombeamento (a) e reflexão do sinal e do bombeamento (b). Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 4-11 (a) obtemos 28 dB de ganho máximo para 16 metros de fibra dopada e em (b) o ganho máximo varia de 33 dB a 35 dB com 12 metros de fibra dopada.

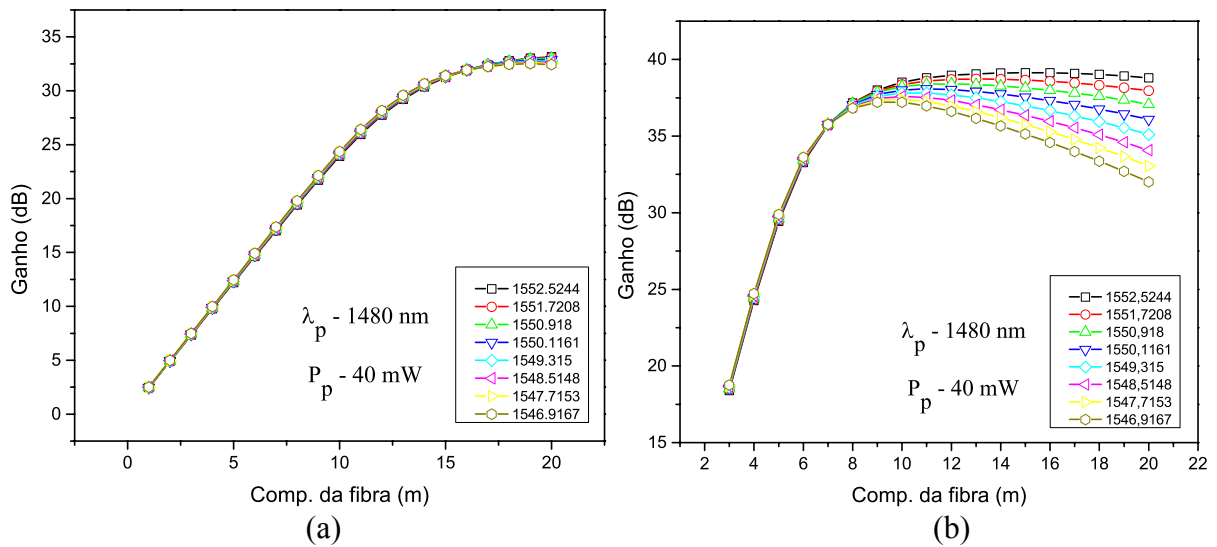


Figura 4-12 Ganho óptico EDFA em 1480 nm e 40mW com reflexão do bombeamento (a) e reflexão do sinal e do bombeamento (b). Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 4-12 (a) o ganho máximo de 33 dB ocorre com 19 metros de fibra dopada. Em (b), este ganho varia de 35 dB a 39 dB com 14 metros de fibra dopada.

4.2.1.2. Figura de Ruído

Nas Figuras 4-13, 4-14 e 4-15 apresentamos as figuras de ruído para as topologias básicas copropagantes com 10 mW, 20 mW e 40 mW de potência de bombeamento e 980 nm de comprimento de onda.

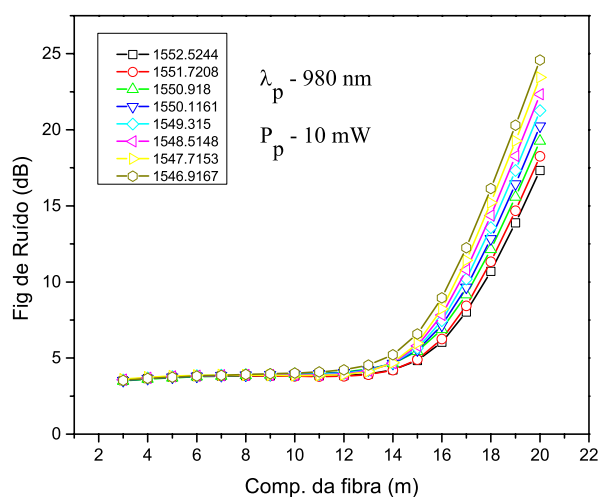


Figura 4-13 Figura de ruído do EDFA em 980nm no sentido copropagante topologia básica com 10 mW de bombeamento. Fonte: Elaborado pelo autor

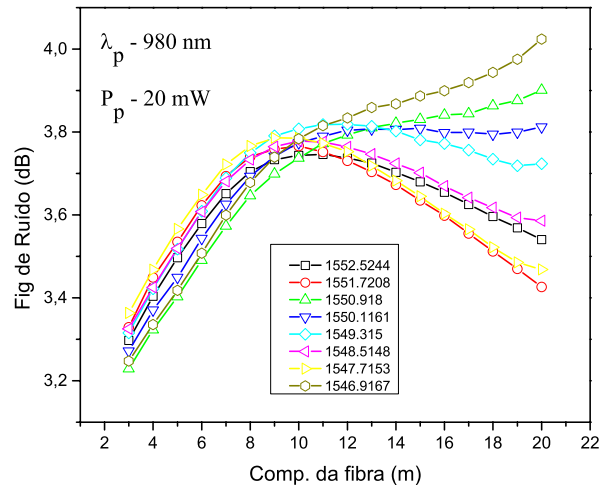


Figura 4-14 Figura de ruído do EDFA em 980nm no sentido copropagante topologia básica com 20 mW de bombeamento. Fonte: Elaborado pelo autor

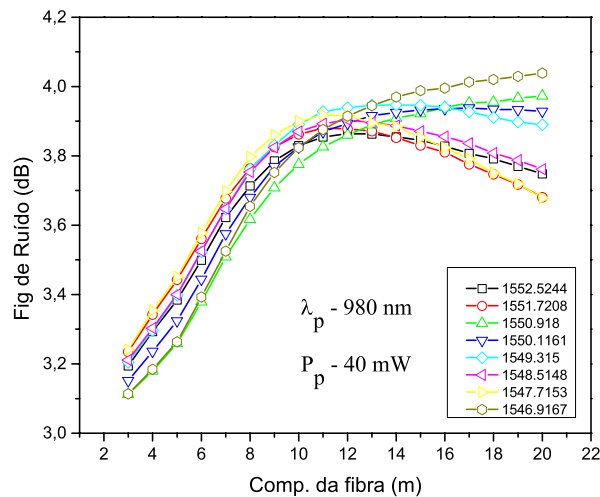


Figura 4-15 Figura de ruído do EDFA em 980nm no sentido copropagante topologia básica com 40 mW de bombeamento. Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 4-13 o a figura de ruído cresce rapidamente após os 13 metros de fibra dopada chegando a 24 dB para 20 metros de fibra dopada. A figura de ruído não é uniforme para os diferentes comprimentos de onda, sendo mais baixa para 1552 nm e mais alta para 1546 nm. Na Figura 4-14 após 10 metros de fibra a figura de ruído começa a cair para alguns comprimentos de onda e na Figura 4-15 este fato ocorre após os 13 metros. Fatos esperados devido a irregularidade do espectro de ganho do EDFA para a banda C de comunicação. Quando a potência de bombeamento é aumentada o ruído demora mais a subir e se mantém abaixo de 5 dB.

Na Figura 4-16 apresentamos as figuras de ruído para as topologias reflexivas com 10 mW de potência de bombeamento e 980 nm de comprimento de onda.

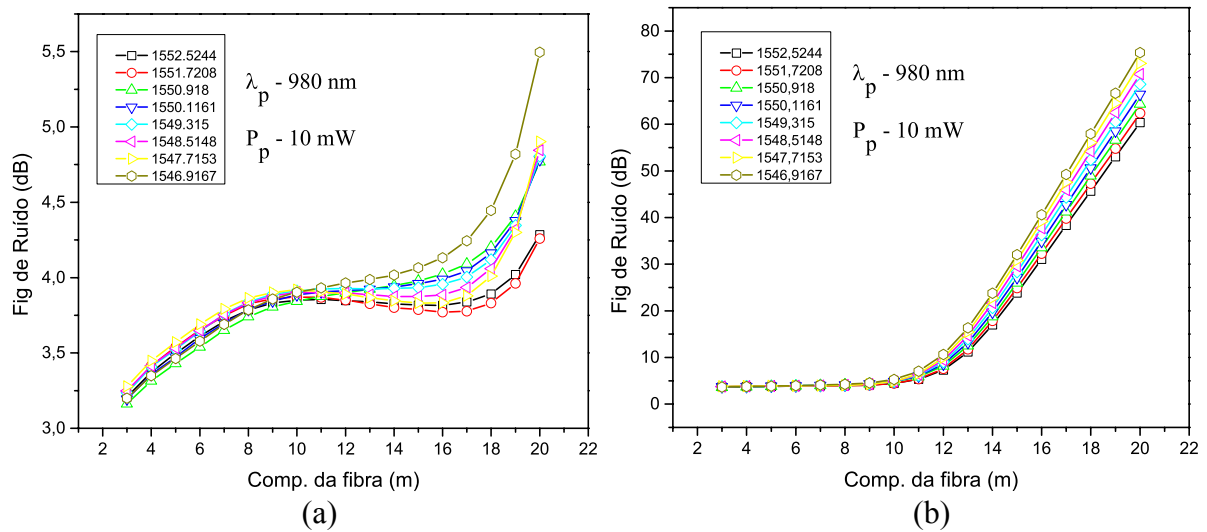


Figura 4-16 Figura de ruído EDFA em 980 nm e 10mW com reflexão do bombeamento (a) e reflexão do sinal e do bombeamento (b). Fonte: Elaborado pelo autor

A figura de ruído para os dois casos, Figura 4-16 (a) e (b), se comporta de forma bastante semelhante a topologia básica. Em (b) o crescimento da figura de ruído ocorre com 10 metros de fibra.

Nas Figuras 4-17 e 4-18 apresentamos as figuras de ruído para as topologias reflexivas com 20 mW e 40 mW, respectivamente, para 980 nm de comprimento de bombeamento.

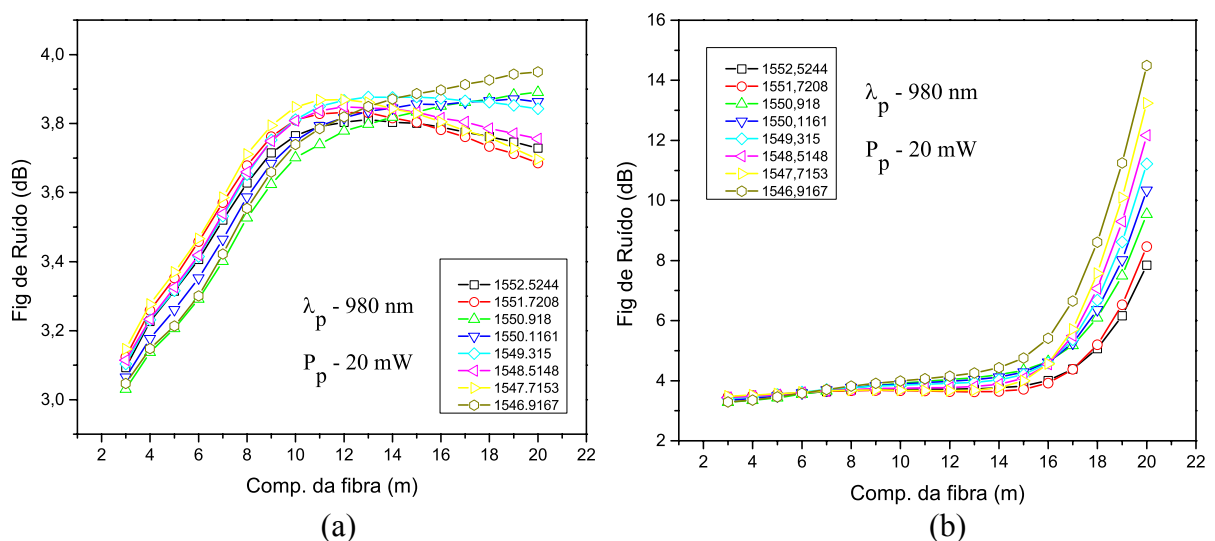


Figura 4-17 Figura de ruído EDFA em 980 nm e 20mW com reflexão do bombeamento (a) e reflexão do sinal e do bombeamento (b). Fonte: Elaborado pelo autor

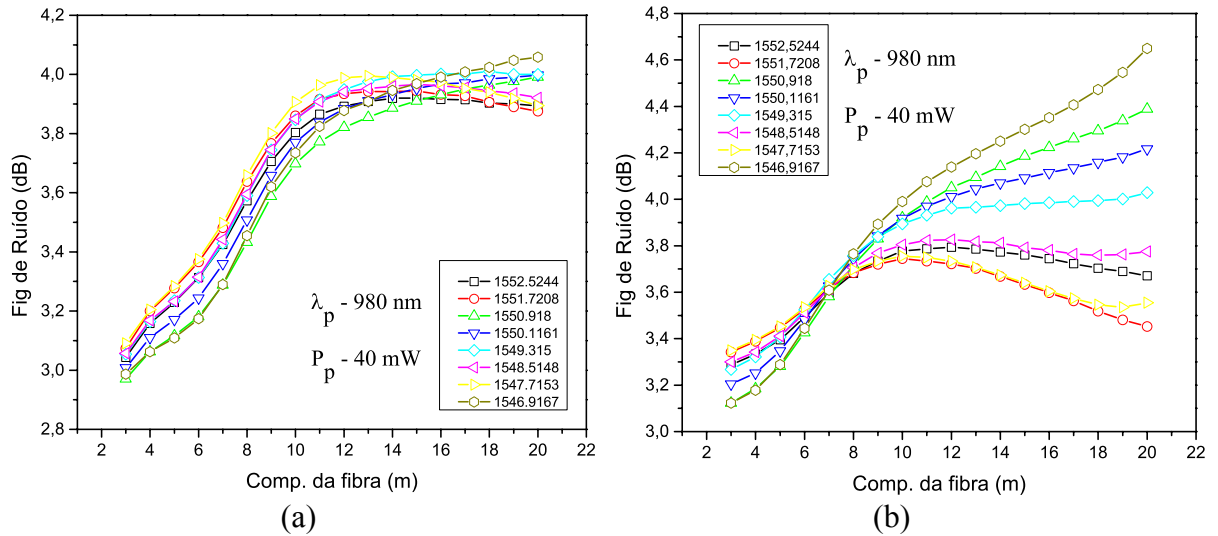


Figura 4-18 Figura de ruído EDFA em 980 nm e 40mW com reflexão do bombeamento (a) e reflexão do sinal e do bombeamento (b). Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 4-17 (a) a figura de ruído se mantém abaixo de 4 dB para todos os comprimentos de onda de forma semelhante a topologia básica. Em (b) há um crescimento rápido após os 15 metros de fibra dopada. Na Figura 4-18 (a) a figura de ruído também se comporta de forma bastante semelhante a topologia básica ficando abaixo dos 4 dB. Na Figura 4-18 (b), após os 10 metros de fibra dopada a figura de ruído decai para alguns comprimentos de onda de sinal utilizados na simulação, mas mantém-se abaixo de 5 dB para todos os casos. Nas Figuras 4-19, 4-20 e 4-21 apresentamos as figuras de ruído para as topologias reflexivas com 10 mW, 20 mW e 40 mW de potência e 1480 nm de comprimento de onda de bombeamento.

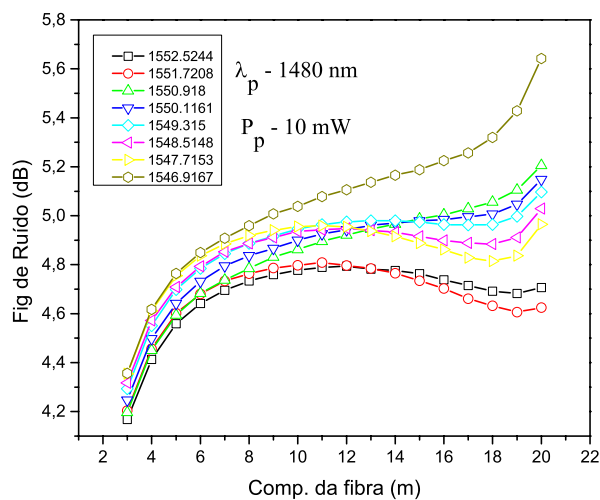


Figura 4-19 Figura de ruído do EDFA em 1480nm no sentido copropagante topologia básica com 10 mW de bombeamento. Fonte: Elaborado pelo autor

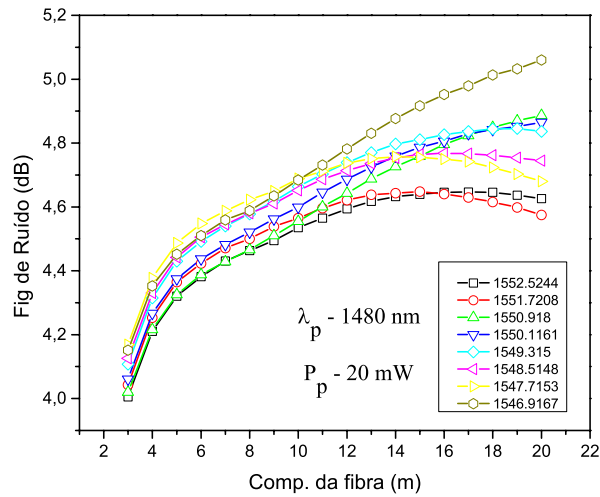


Figura 4-20 Figura de ruído do EDFA em 1480nm no sentido copropagante topologia básica com 20 mW de bombeamento. Fonte: Elaborado pelo autor

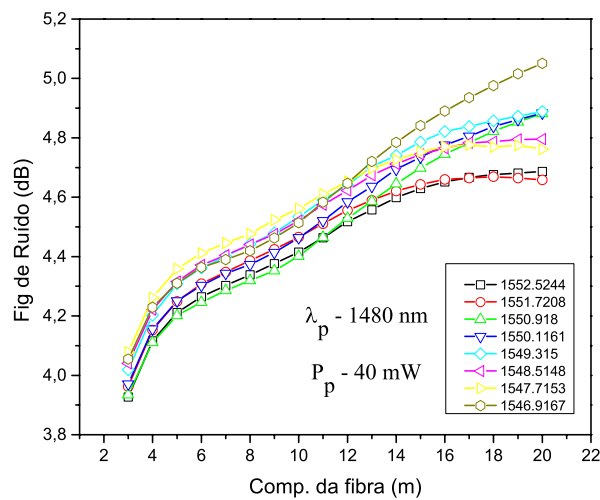


Figura 4-21 Figura de ruído do EDFA em 1480nm no sentido copropagante topologia básica com 40 mW de bombeamento. Fonte: Elaborado pelo autor

Quando utilizamos o bombeamento em 1480 nm um tamanho de fibra dopada é necessário para se atingir o ganho máximo e isso influi na figura de ruído. Nas Figuras 4-19, 4-20 e 4-21 as figuras de ruído crescem de forma mais suave e se mantém abaixo dos 5 dB. O limiar de 5 dB para figura de ruído é bastante utilizado na indústria para definição de amplificadores ópticos.

Na Figura 4-22 apresentamos as figuras de ruído para as topologias reflexivas com 10 mW de potência de bombeamento e 1480 nm de comprimento de onda de bombeamento.

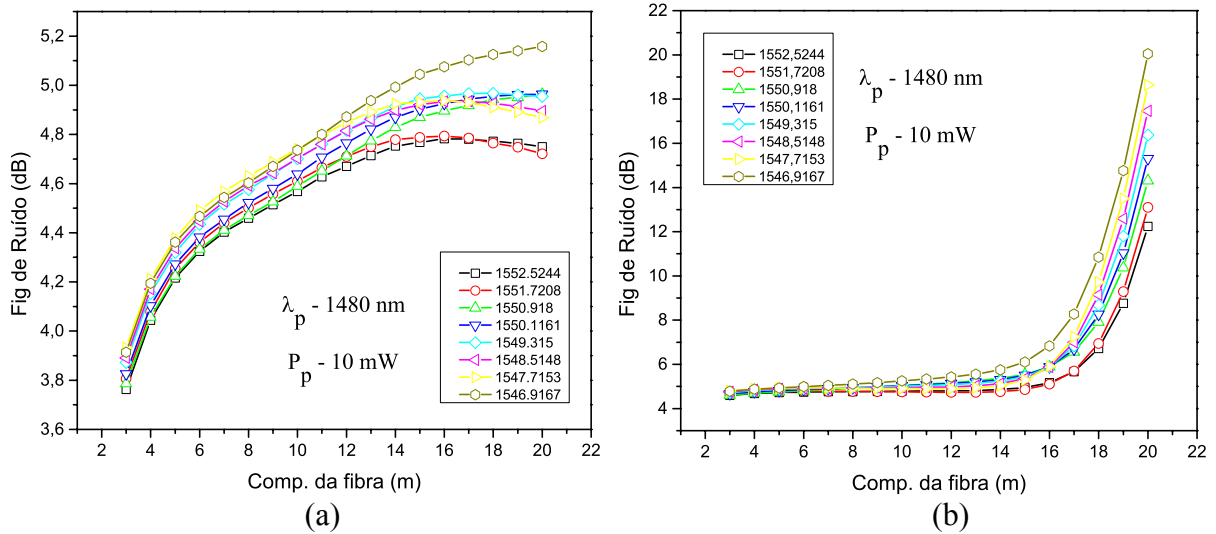


Figura 4-22 Figura de ruído EDFA em 1480 nm e 10mW com reflexão do bombeamento (a) e reflexão do sinal e do bombeamento (b). Fonte: Elaborado pelo autor

O comportamento da figura de ruído na Figura 4-22 (a) acontece de forma semelhante a topologia básica, com crescimento suave e abaixo de 5 dB. Em (b) acontece um crescimento rápido após os 16 metros de fibra dopada.

Nas Figuras 4-23 e 4-24 apresentamos os gráficos de figura de ruído para 20 mW e 40 mW de potência de bombeamento, respectivamente.

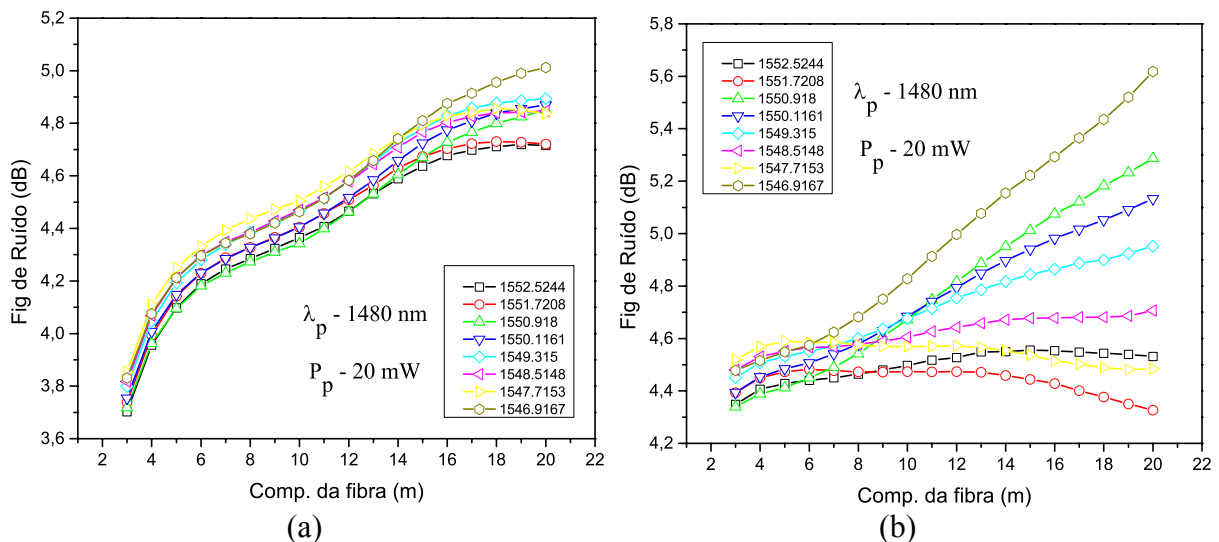


Figura 4-23 Figura de ruído EDFA em 1480 nm e 20mW com reflexão do bombeamento (a) e reflexão do sinal e do bombeamento (b). Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 4-23 (b) a figura de ruído para os comprimentos de onda de sinal cresce de forma diferente chegando a uma diferença de 1 dB para 20 metros de fibra dopada.

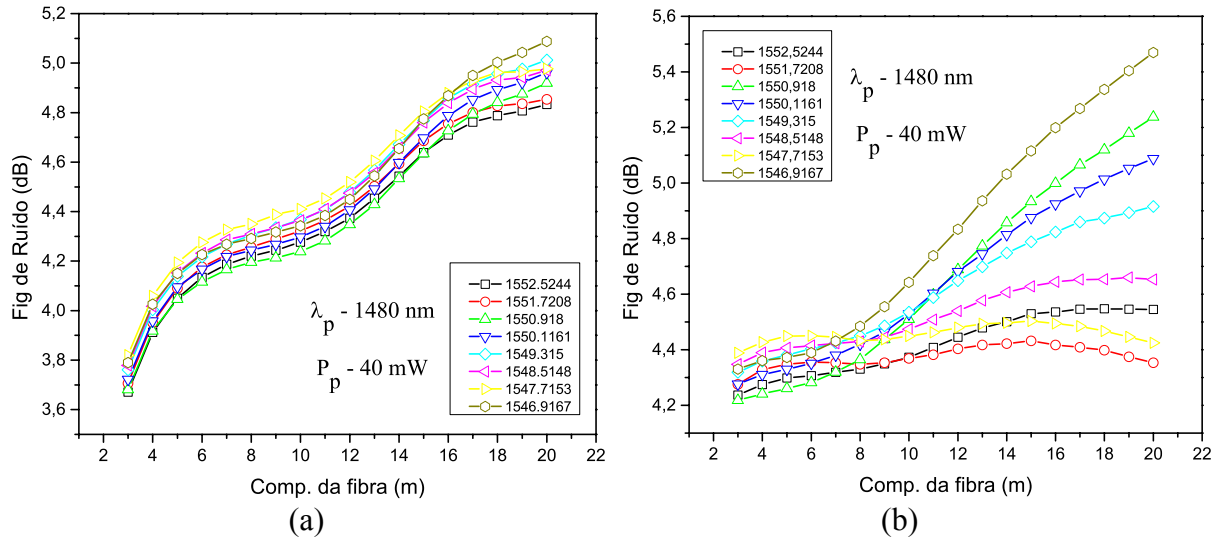


Figura 4-24 Figura de ruído EDFA em 1480 nm e 40mW com reflexão do bombeamento (a) e reflexão do sinal e do bombeamento (b). Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 4-24 (a) o comportamento da figura de ruído acontece de forma semelhante a topologia básica, abaixo de 5 dB. E em (b) ocorre uma diferença de 1 dB a 2 dB entre os comprimentos de onda de sinal utilizados.

Não houveram diferenças significativas entre as topologias básicas e reflexivas para figura de ruído com as topologias copropagantes. Devido a melhora no ganho e a manutenção da figura de ruído em valores bem próximos as topologias básicas, as topologias reflexivas ainda levam vantagem em relação as básicas para montagem dos enlaces ópticos.

As topologias contra propagantes serão analisadas em seguida seguindo a mesma metodologia de apresentação utilizada acima.

4.2.2. Topologias contra propagantes

4.2.2.1. Ganho Óptico

Na Figura 4-25 é apresentado o ganho óptico do amplificador em função do comprimento da fibra dopada com érbio utilizando a topologia básica contra propagante. A potência de bombeamento configurada em 10 mW com 980 nm de comprimento de onda. O pico de ganho acontece quando a fibra dopada alcança 7 metros de comprimento e fica em torno de 18 dB. Os valores de ganho e tamanho da fibra dopada se mantém iguais em comparação a topologia copropagante apresentada anteriormente.

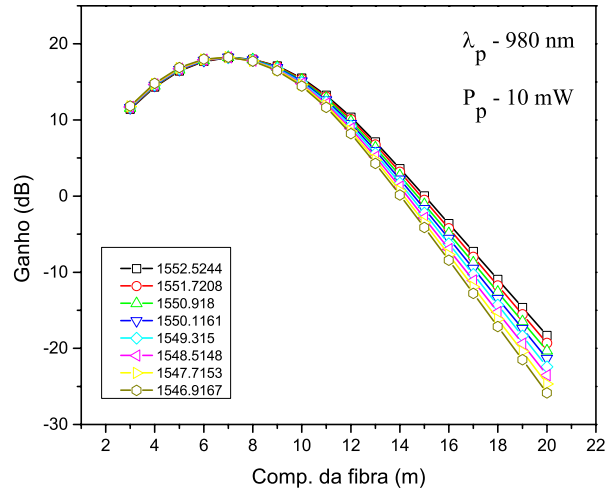


Figura 4-25 Ganho óptico do EDFA em 980nm no sentido contra propagante topologia básica com 10 mW de bombeamento. Fonte: Elaborado pelo autor

Nas Figuras 4-26 e 4-27 o ganho das topologias contra propagantes básicas com 20 mW e 40 mW são apresentados.

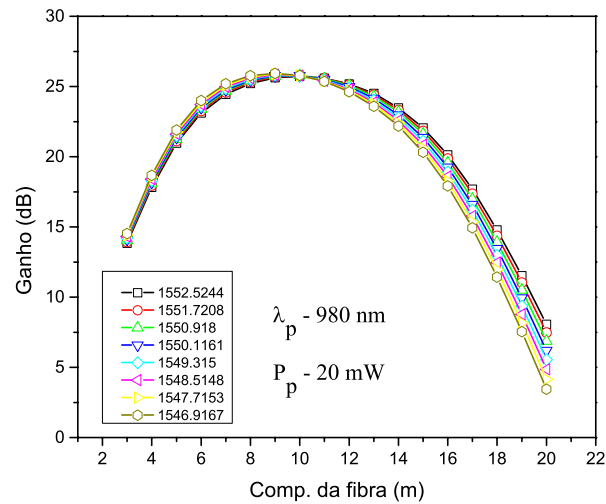


Figura 4-26 Ganho óptico do EDFA em 980nm no sentido contra propagante topologia básica com 20 mW de bombeamento. Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 4-26 o ganho máximo é de 25 dB com 10 metros de fibra dopada com 20 mW de potência de bombeamento. Na Figura 4-27 o pico de ganho acontece em 13 metros de fibra dopada com 30 dB. A medida que a potência de bombeamento cresce o pico se desloca para um maior comprimento de fibra dopada, pois há um maior estímulo de íons. Não há uma diferença de ganho significativa entre os comprimentos de onda para estes três casos.

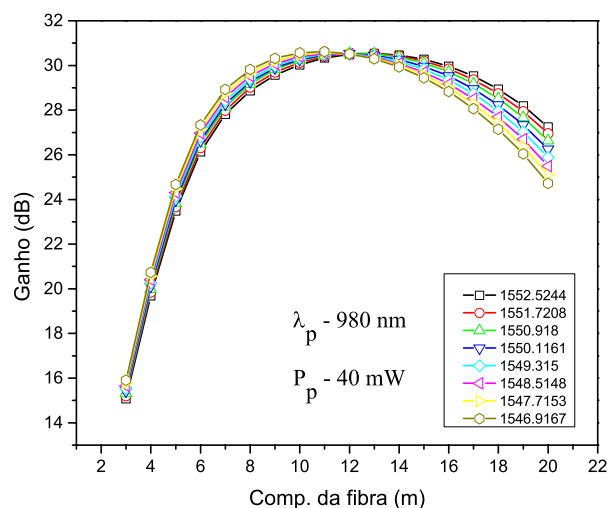


Figura 4-27 Ganho óptico do EDFA em 980nm no sentido contra propagante topologia básica com 40 mW de bombeamento. Fonte: Elaborado pelo autor

Os gráficos para as topologias com reflexão de bombeio e com reflexão de sinal e bombeio são apresentados em seguida. Espera-se que o ganho melhore devido as reflexões e o aumento de íons disponíveis para amplificação e também devido a dupla passagem do sinal pelo amplificador.

Na Figura 4-28 é apresentado o ganho óptico para a topologia contra propagante com reflexão do bombeamento em (a) e com reflexão do sinal e do bombeamento em (b).

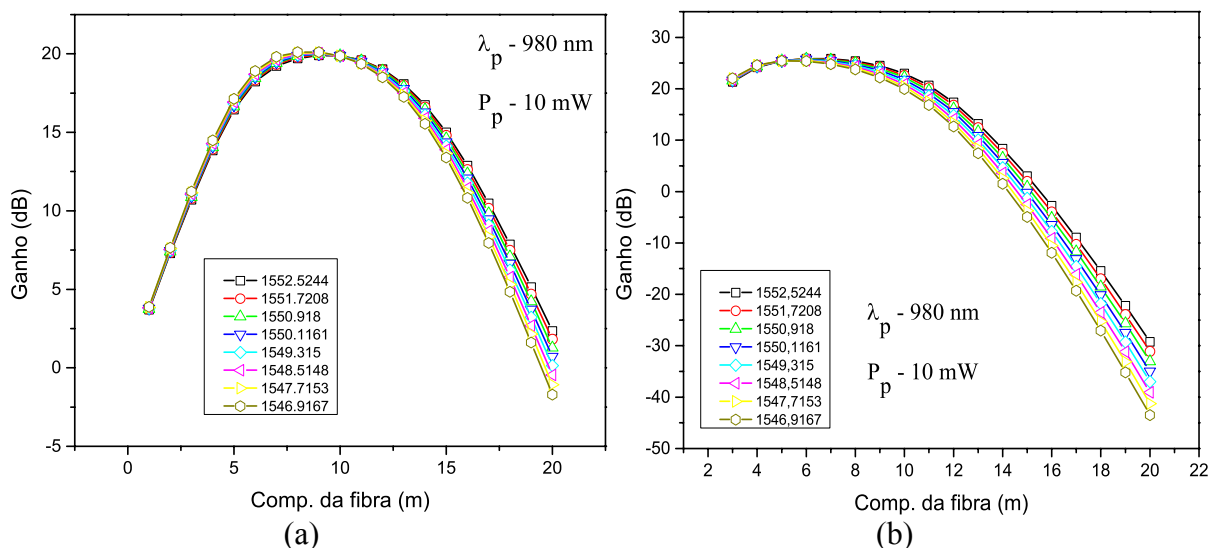


Figura 4-28 Ganho óptico EDFA em 980 nm e 10mW com reflexão do bombeamento (a) e reflexão do sinal e do bombeamento (b). Fonte: Elaborado pelo autor

Com a reflexão do bombeamento o pico de ganho alcançado pela topologia mostrada na Figura 4-28 (a) é de 20 dB com 10 metros de fibra dopada. E em (b) o ganho máximo é de 25 dB com 6 metros de fibra dopada. Há uma melhora de 2 dB no ganho com a reflexão do

bombeamento, porém a fibra dopada utilizada foi maior. Já na configuração de reflexão de sinal e bombeio houve uma melhora de 7 dB e a fibra dopada utilizada foi reduzida.

Nas Figuras 4-29 e 4-30 apresentamos os ganhos para as topologias reflexivas contra propagantes com 20 mW e 40 mW, respectivamente, e comprimento de onda de bombeamento de 980 nm.

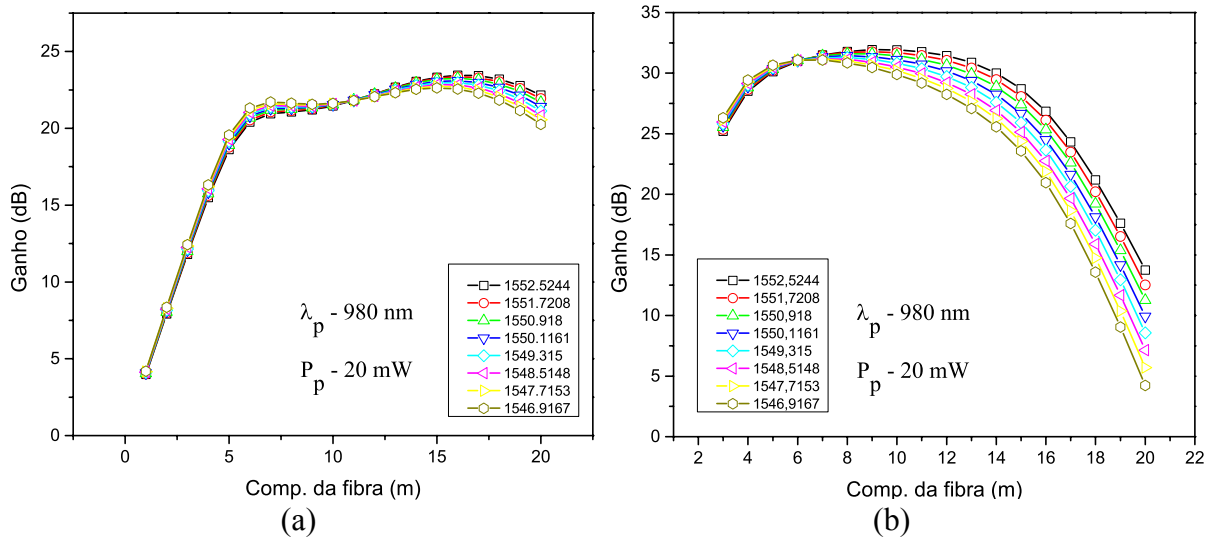


Figura 4-29 Ganho óptico EDFA em 980 nm e 20mW com reflexão do bombeamento (a) e reflexão do sinal e do bombeamento (b). Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 4-29 (a) o pico de ganho é de 22 dB a 23 dB com 16 metros de fibra. Em (b) o ganho máximo é de 30 dB a 32 dB com 10 metros de fibra dopada. Houve uma melhora de 5 dB a 7 dB ao utilizarmos a reflexão do sinal e do bombeio.

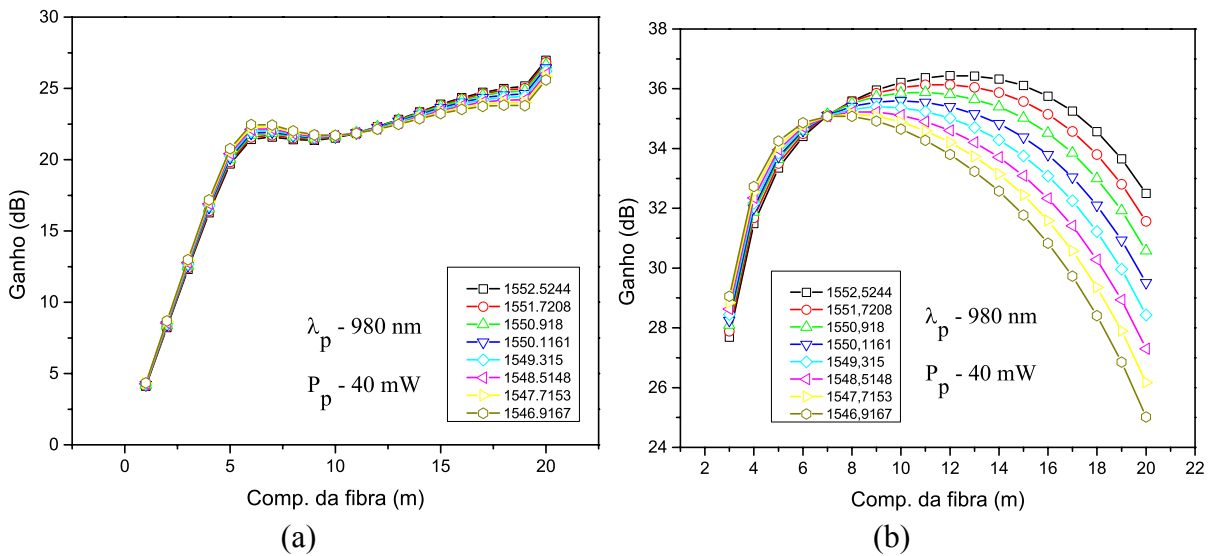


Figura 4-30 Ganho óptico EDFA em 980 nm e 40mW com reflexão do bombeamento (a) e reflexão do sinal e do bombeamento (b). Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 4-30 (a) o ganho máximo foi de 25 a 27 dB em 20 metros de fibra dopada e de 34 dB a 36 dB com 12 metros de fibra dopada na Figura 4-30 (b). A topologia apenas com reflexão de bombeamento não se mostra satisfatória neste caso. Já a topologia com reflexão de sinal e bombeamento apresenta uma melhora de 6 dB a 4 dB dependendo do comprimento de onda do sinal. Na Figura 4-31 verificamos o ganho para a topologia básica contra propagante quando alteramos o comprimento de onda do laser de bombeamento para 1480 nm e ajustamos a potência para 10 mW.

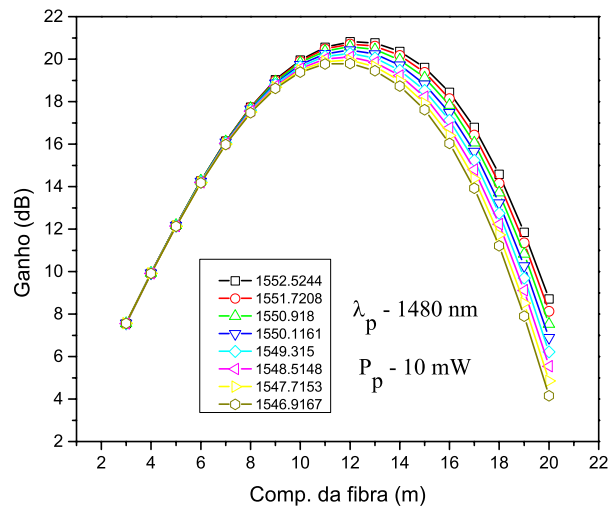


Figura 4-31 Ganho óptico do EDFA em 1480nm no sentido contra propagante topologia básica com 10 mW de bombeamento. Fonte: Elaborado pelo autor

O ganho máximo para a Figura 4-31 é de 20 dB com 12 metros de fibra dopada. Nas Figuras 4-32 e 4-33 as potências são ajustadas para 20 mW e 40 mW respectivamente.

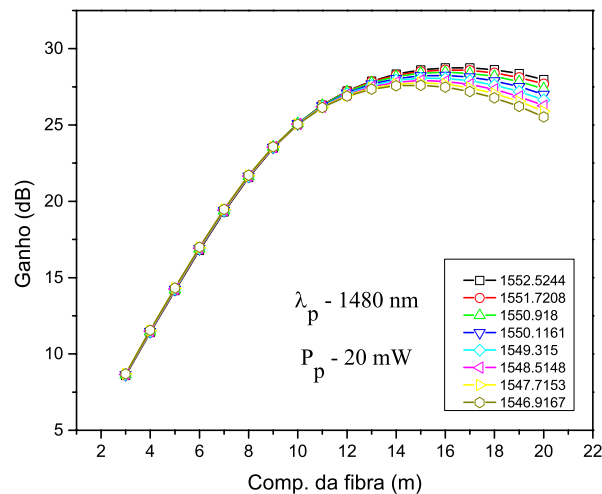


Figura 4-32 Ganho óptico do EDFA em 1480nm no sentido contra propagante topologia básica com 20 mW de bombeamento. Fonte: Elaborado pelo autor

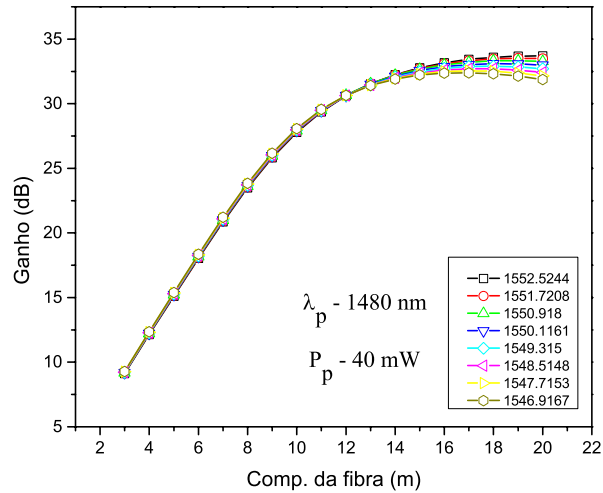


Figura 4-33 Ganho óptico do EDFA em 1480nm no sentido contra propagante topologia básica com 40 mW de bombeamento. Fonte: Elaborado pelo autor

Os ganhos máximos para as Figuras 4-32 e 4-33 foram de 28 dB para 17 metros de fibra e 32dB para 20 metros de fibra dopada. Na Figura 4-34 apresentamos o ganho óptico para a topologia contra propagante reflexiva com 10 mW e 1480 nm de comprimento de onda de bombeamento.

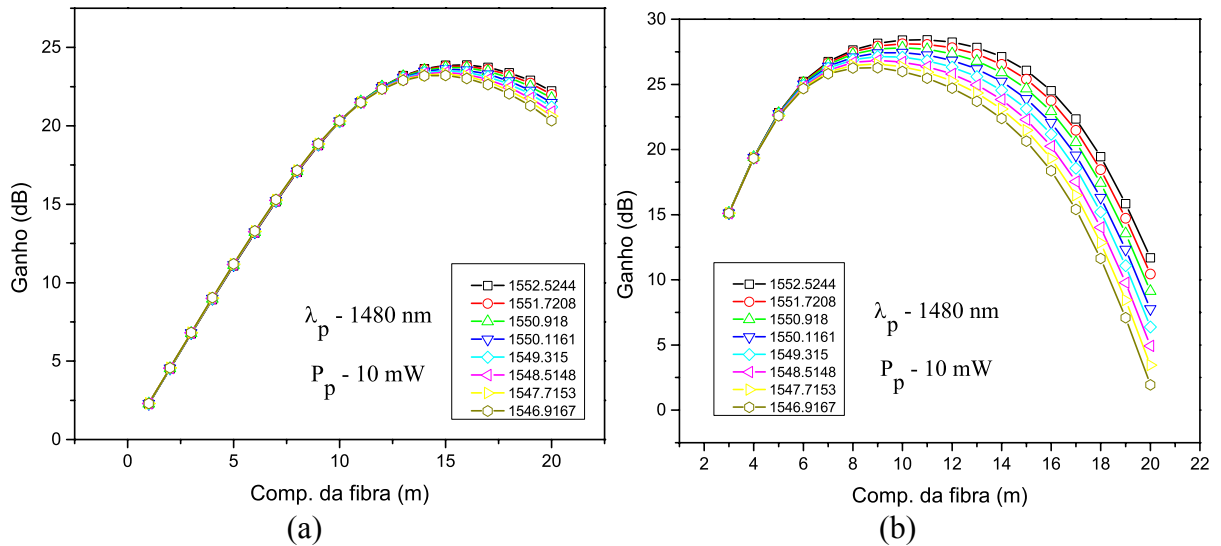


Figura 4-34 Ganho óptico EDFA em 1480 nm e 10mW com reflexão do bombeamento (a) e reflexão do sinal e do bombeamento (b). Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 4-34 (a) o ganho máximo é de 23 dB com 15 metros de fibra. E em (b) o ganho é de 26 dB a 28 dB, com 10 metros de fibra dopada, a depender do comprimento de onda do sinal de entrada. Houve melhora do ganho nos dois casos, porém em (a) houve um aumento do comprimento da fibra dopada em 5 metros. Nas Figuras 4-35 e 4-36 o ganho óptico para as potências 20 mW e 40 mW de bombeamento é analisado.

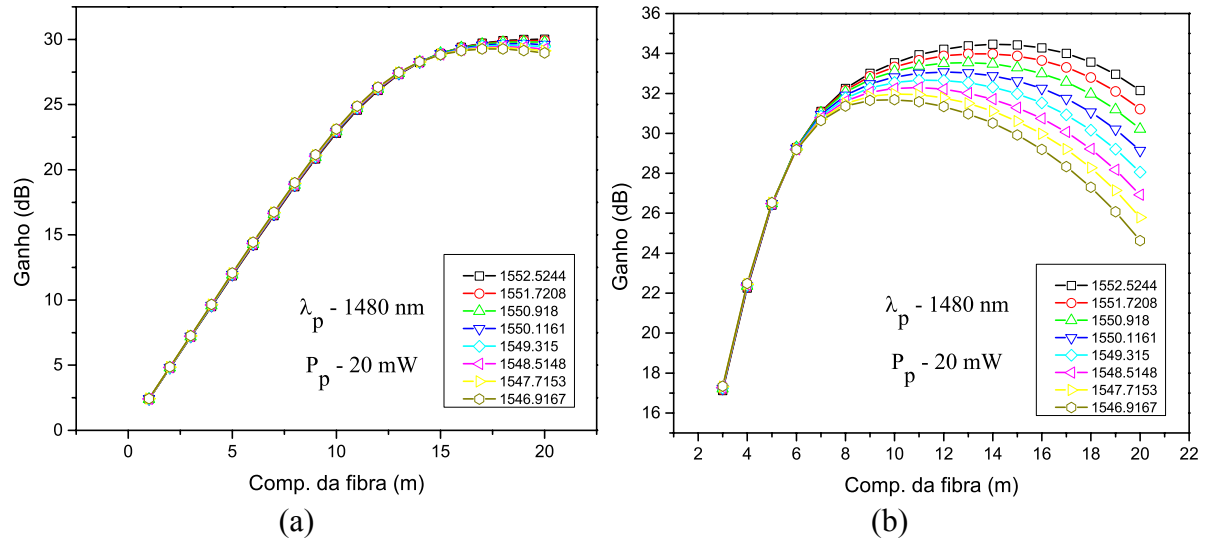


Figura 4-35 Ganho óptico EDFA em 1480 nm e 20mW com reflexão do bombeamento (a) e reflexão do sinal e do bombeamento (b). Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 4-35 (a) o ganho máximo é de 30 dB com 20 metros. E em (b) o ganho é de 30 dB a 34 dB, com 12 metros de fibra dopada, a depender do comprimento de onda do sinal de entrada.

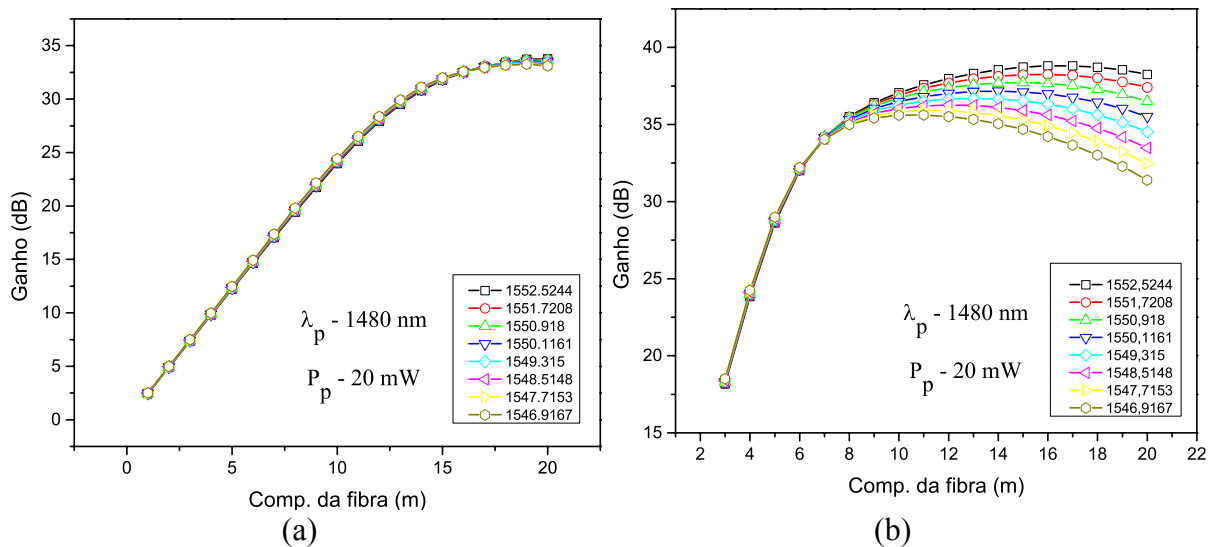


Figura 4-36 Ganho óptico EDFA em 1480 nm e 40mW com reflexão do bombeamento (a) e reflexão do sinal e do bombeamento (b). Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 4-36 (a) o ganho máximo acontece também em 20 metros de fibra com 33 dB. Na Figura 4-36 (b) o ganho máximo varia de 34 dB a 39 dB para 17 metros de fibra dopada. Os resultados de ganho foram satisfatórios para as topologias propostas com aumentos na ordem de 5 a 7 dB para as topologias que refletem o sinal e o bombeio. Topologias contra propagantes

4.2.2.2. Figura de ruído

Nas Figuras 4-37, 4-38 e 4-39 apresentamos as figuras de ruído para as topologias básicas contra propagantes com 10 mW, 20 mW e 40 mW de potência de bombeamento e 980 nm de comprimento de onda.

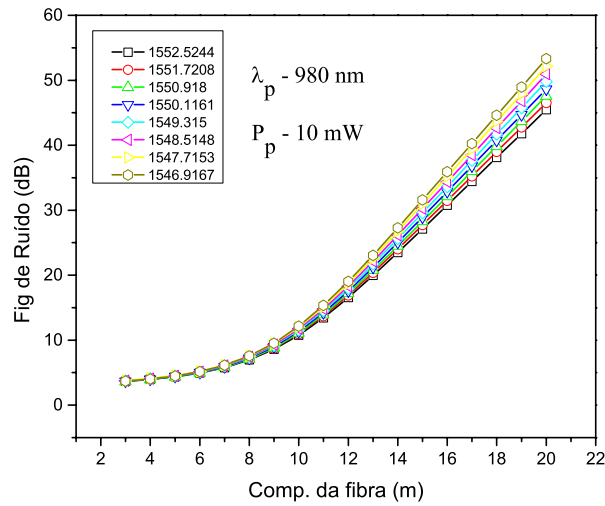


Figura 4-37 Figura de ruído EDFA em 980 nm e 10mW com reflexão do bombeamento (a) e reflexão do sinal e do bombeamento (b). Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 4-37 o ruído cresce rapidamente após os 7 metros de fibra dopada devido à falta de potência de bombeamento necessária para que o efeito de amplificação ocorra. Na Figura 4-38 esse fato ocorre após os 10 metros de fibra.

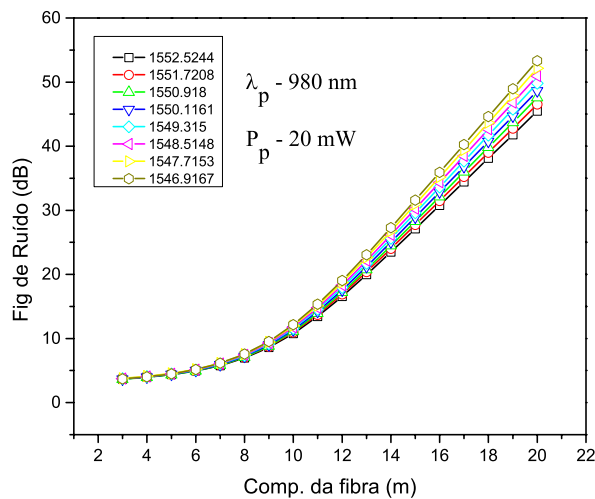


Figura 4-38 Figura de ruído EDFA em 980 nm e 20mW com reflexão do bombeamento (a) e reflexão do sinal e do bombeamento (b). Fonte: Elaborado pelo autor

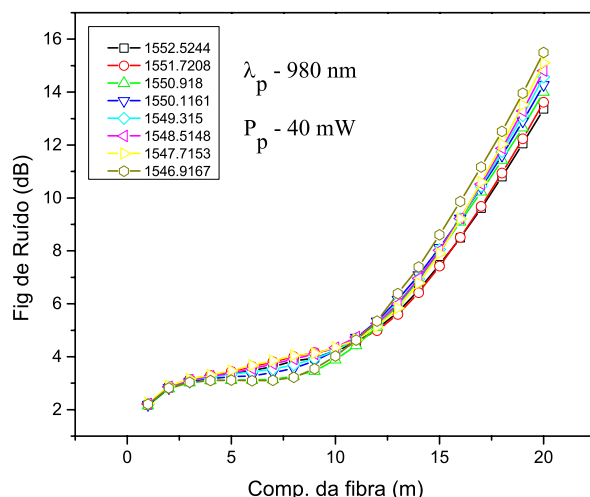


Figura 4-39 Figura de ruído EDFA em 980 nm e 40mW com reflexão do bombeamento (a) e reflexão do sinal e do bombeamento (b). Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 4-39 a figura de ruído começa a crescer mais rapidamente em torno de 12 metros de fibra dopada. Em seguida apresentamos as figuras de ruído para as topologias que possuem reflexão. Na Figura 4-40 os gráficos das topologias com reflexão e 10 mW de potência de bombeamento.

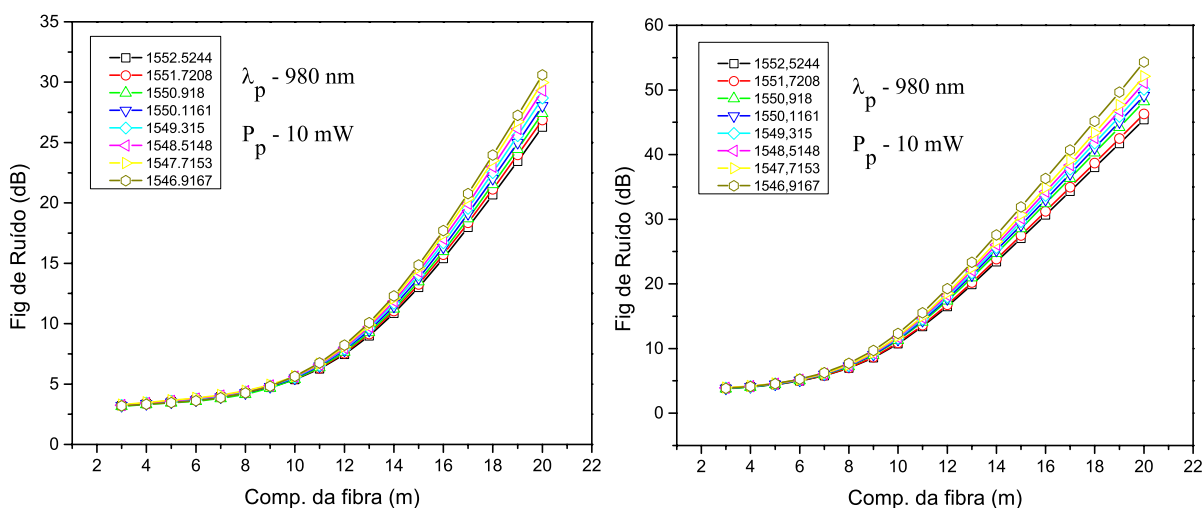


Figura 4-40 Figura de ruído EDFA em 980 nm e 10mW com reflexão do bombeamento (a) e reflexão do sinal e do bombeamento (b). Fonte: Elaborado pelo autor

Os gráficos de figura de ruído apresentados na Figura 4-40 (a) e (b) apresentam valores semelhantes aos da topologia básica com diferença de menos de 1dB para todos os pontos. Na Figura 4-41 e 4-42 apresentamos as figuras de ruído para as topologias reflexivas com 20 mW e 40 mW, respectivamente.

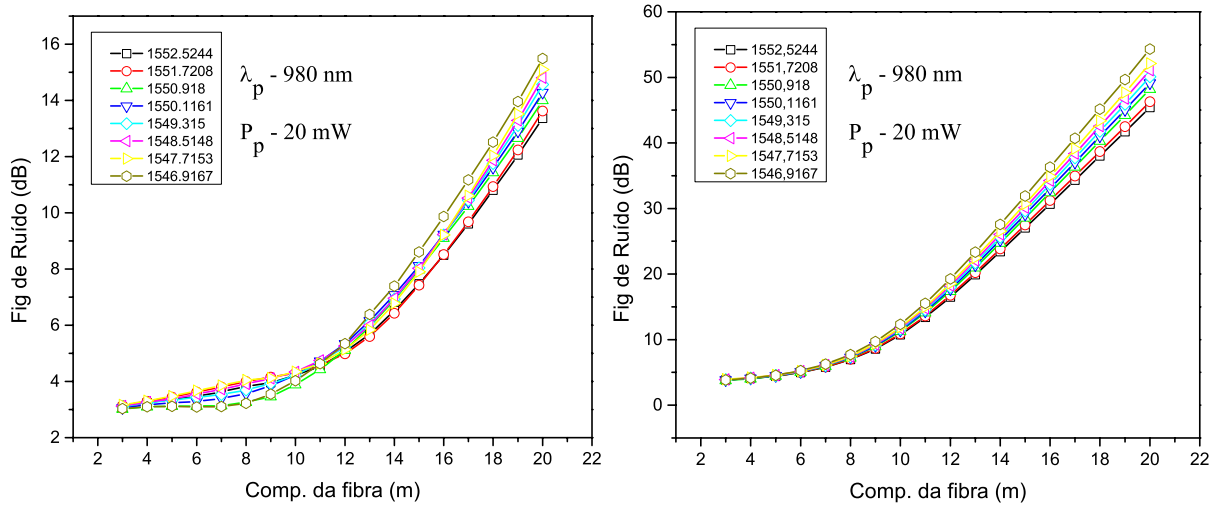


Figura 4-41 Figura de ruído EDFA em 980 nm e 20mW com reflexão do bombeamento (a) e reflexão do sinal e do bombeamento (b). Fonte: Elaborado pelo autor

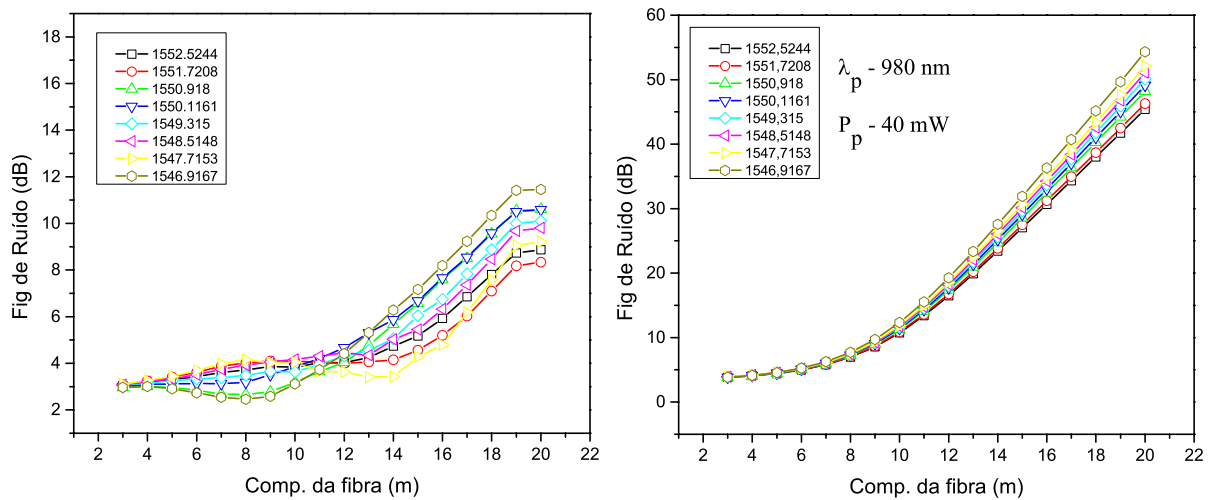


Figura 4-42 Figura de ruído EDFA em 980 nm e 40mW com reflexão do bombeamento (a) e reflexão do sinal e do bombeamento (b). Fonte: Elaborado pelo autor

Da mesma forma da Figura 4-40, as Figuras 4-41 e 4-42 apresentam figuras de ruído bem próximas das topologias básicas com diferenças de menos de 1 dB em todos os pontos. A figura de ruído permanece abaixo de 5 dB nos primeiros metros e quando o bombeamento já não é suficiente para manter a amplificação esse valor cresce rapidamente. Em seguida o comprimento de onda de bombeamento é alterado para 1480 nm.

Nas Figuras 4-43, 4-44 e 4-45 apresentamos as figuras de ruído para as topologias básicas contra propagantes com 10 mW, 20 mW e 40 mW de potência de bombeamento e 1480 nm de comprimento de onda.

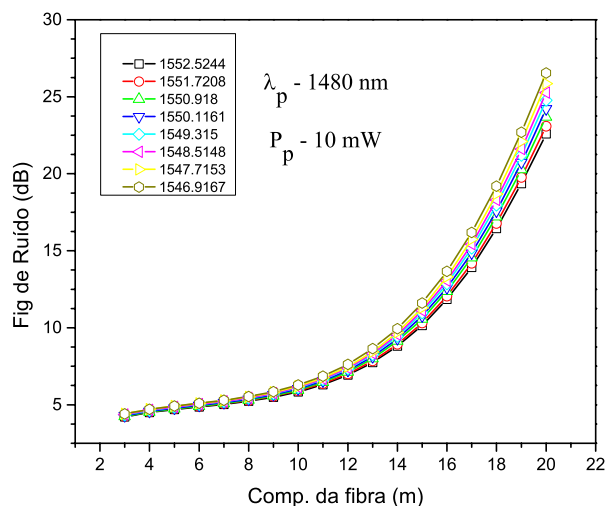


Figura 4-43 Figura de ruído EDFA em 1480 nm e 10mW com reflexão do bombeamento (a) e reflexão do sinal e do bombeamento (b). Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 4-43 a figura de ruído cresce rapidamente após os 10 metros de fibra dopada. Este fato acontece devido a falta de potência de bombeamento necessária para proporcionar a inversão de população em comprimentos maiores. Na Figura 4-44 este fato acontece após 12 metros de fibra dopada. Isso é esperado, pois temos mais potência de bombeamento agindo sobre a fibra dopada.

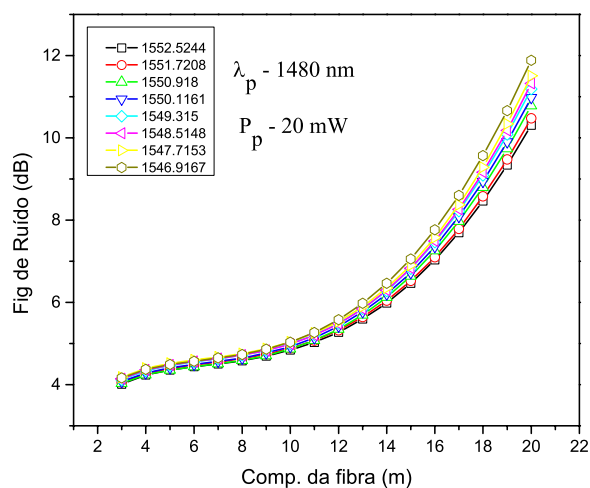


Figura 4-44 Figura de ruído EDFA em 1480 nm e 20mW com reflexão do bombeamento (a) e reflexão do sinal e do bombeamento (b). Fonte: Elaborado pelo autor

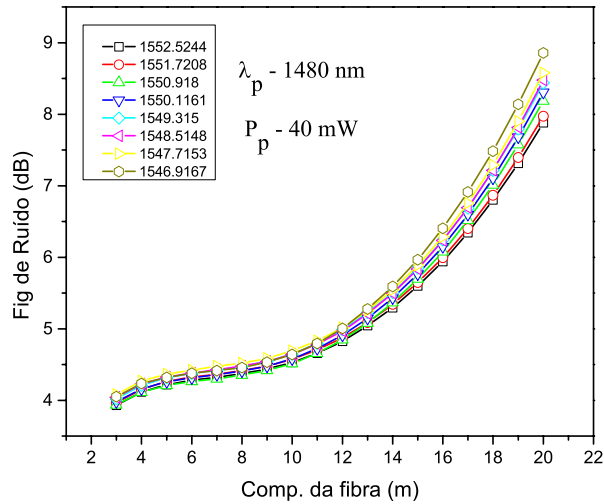


Figura 4-45 Figura de ruído EDFA em 1480 nm e 40mW com reflexão do bombeamento (a) e reflexão do sinal e do bombeamento (b). Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 4-45 este crescimento já acontece por volta dos 14 metros de fibra dopada. Na Figura 4-46 apresentamos o gráfico da figura de ruído para as topologias reflexivas com 10 mW de potência de bombeamento.

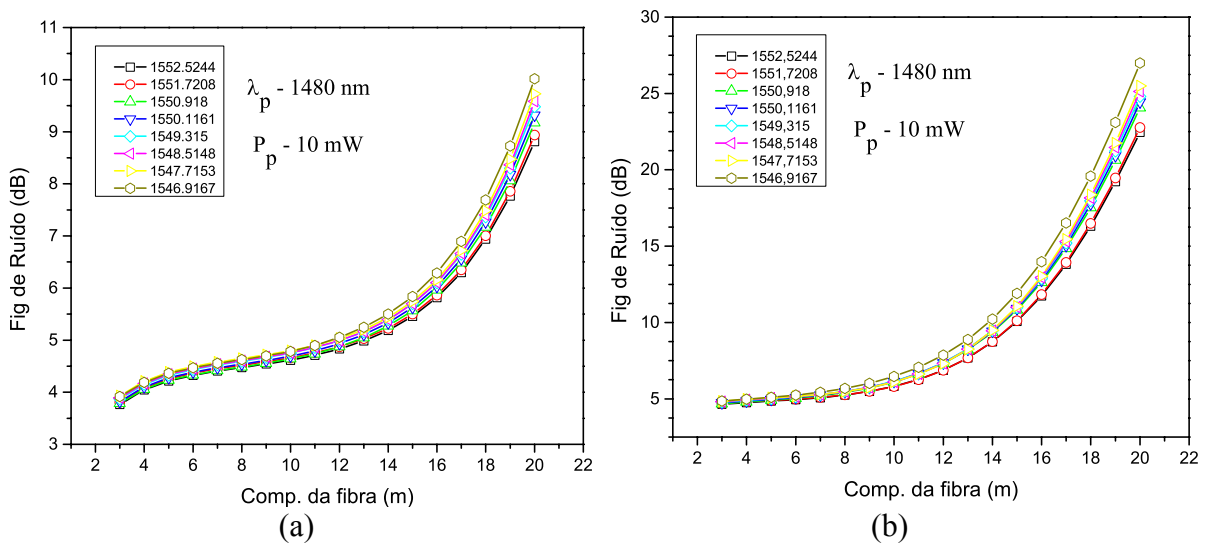


Figura 4-46 Figura de ruído EDFA em 1480 nm e 10mW com reflexão do bombeamento (a) e reflexão do sinal e do bombeamento (b). Fonte: Elaborado pelo autor

A diferença da Figura 4-46 (a) e (b) para a topologia básica apresentada anteriormente não chega a 1 dB e praticamente não há mudanças na figura de ruído alterando a topologia básica e adicionando os componentes passivos reflexivos. Nas Figuras 4-47 e 4-48 a figura de ruído para as potências 20 mW e 40 mW são apresentadas, respectivamente.

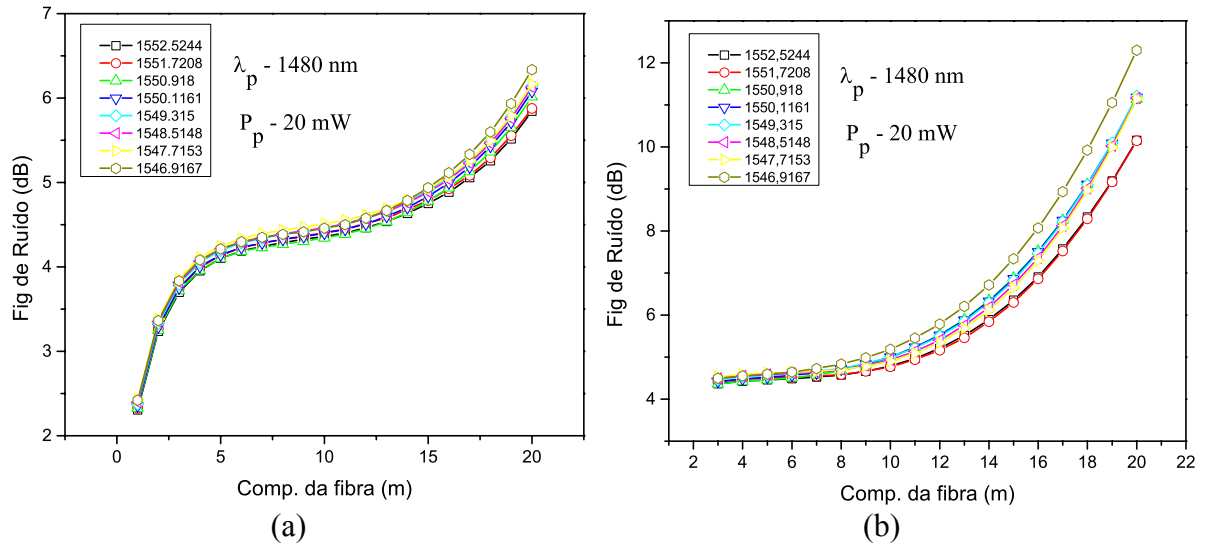


Figura 4-47 Figura de ruído EDFA em 1480 nm e 20mW com reflexão do bombeamento (a) e reflexão do sinal e do bombeamento (b). Fonte: Elaborado pelo autor

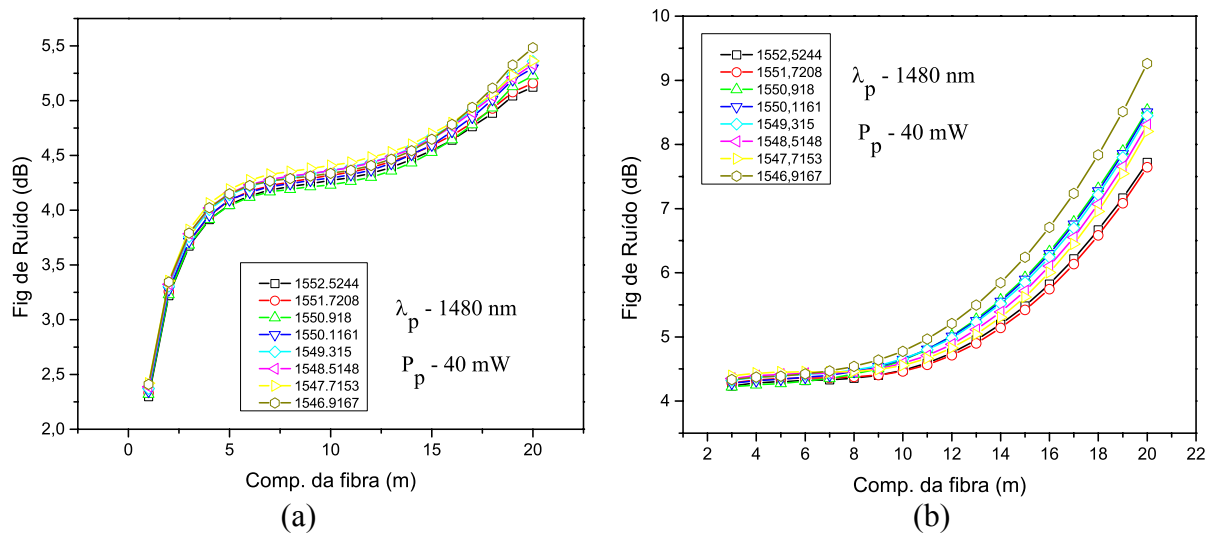


Figura 4-48 Figura de ruído EDFA em 1480 nm e 40mW com reflexão do bombeamento (a) e reflexão do sinal e do bombeamento (b). Fonte: Elaborado pelo autor

As figuras de ruído se apresentam de forma semelhante as topologias básicas com diferenças de menos de 1 dB por teste. Os gráficos mostram as figuras de ruído abaixo de 5 dB, o que torna as topologias interessantes para as indústrias de amplificadores. Na Figura 4-47 (a) o crescimento da figura de ruído se dá em torno de 13 metros de fibra e em (b) em torno de 8 metros. Na Figura 4-48 o crescimento em (a) ocorre a partir dos 10 metros e em (b) a partir dos 7 metros de fibra dopada.

4.3. Conclusão

Neste capítulo analisamos os resultados das topologias utilizadas neste trabalho. Verificou-se uma eficiência maior nas topologias com componentes de reflexão. Ao refletirmos o sinal de bombeamento fazemos com o que mais íons de érbio sejam estimulados e passem para o estado excitado, aumentando assim o ganho óptico. As melhores topologias foram as que utilizavam a reflexão de sinal e bombeio, obtendo diferenças da ordem de 5 dB a 10 dB em alguns casos.

Não foram encontradas grandes diferenças nas figuras de ruído nos dois tipos de topologias, básicas e reflexivas, podendo-se utilizar o componente reflexivo sem maiores prejuízos para o enlace óptico.

CAPÍTULO 5

5. Conclusão

Este trabalho apresentou um estudo de topologias de pré-amplificação utilizando Amplificadores a Fibra Dopada com Érbio (EDFA). A partir de suas topologias básicas copropagante e contra propagante foram adicionados dispositivos ópticos passivos para refletir tanto o bombeamento, como o sinal de informação junto com o bombeamento de volta para o amplificador e aumentar a quantidade de íons disponíveis no estado excitado, maximizando a amplificação do sinal. Com o objetivo de encontrar a melhor configuração para este tipo de amplificação, foram modificados diversos parâmetros do amplificador como tamanho da fibra dopada, potência do laser de bombeamento e comprimento de onda do laser de bombeamento. Os maiores ganhos encontrados utilizavam as topologias copropagantes modificadas com reflexão de sinal e bombeamento. Nestas topologias foi possível aumentar o ganho, mantendo a mesma figura de ruído das topologias básicas e diminuindo o tamanho necessário de fibra dopada do amplificador. Isso acarreta uma redução de custo e melhora da eficiência dos amplificadores.

O Capítulo 2 descreveu os conceitos básicos de funcionamento do EDFA. Foram discutidos os processos gerais de amplificação óptica sendo abordado os dois tipos de emissão que ocorrem. Em seguida, os níveis atômicos do érbio e sua função no processo de amplificação foram comentadas. E por último, algumas características gerais do EDFA como ganho, ASE e a própria fibra dopada.

O Capítulo 3 descreveu os dispositivos ópticos utilizados na montagem do sistema de comunicação e as topologias utilizadas nos testes. Foram apresentados dispositivos passivos como os acopladores WDM, FBGs (*In-Fibre Bragg Grating*) e um laser semi-condutor como dispositivo ativo. As características gerais de cada dispositivo foram mostradas e verificou-se de que modo cada um deles influencia o valor do ganho. As topologias foram apresentadas começando pelas topologias básicas de um EDFA, em seguida foram adicionados dispositivos de reflexão e um estudo comparativo entre estas configurações foi realizado. Assim foi possível testar nove topologias diferentes.

O Capítulo 4 apresentou os resultados de ganho e figura de ruído entre as topologias testadas. Para um dado valor de bombeamento e tamanho da fibra dopada são testadas as

topologias divididas em copropagantes e contra propagantes. Para as topologias copropagantes destacamos as topologias reflexivas que utilizavam a reflexão do sinal e do bombeamento em sua configuração. Os maiores ganhos com 10 mW e 980 nm de comprimento de onda, na topologia copropagante, foram de 26 dB e 6 metros de fibra óptica. Com 1480 nm obtemos um ganho máximo de 29 dB para 9 metros de fibra dopada. Em comparação a topologia básica copropagante a diferença chegou a 12 dB de ganho máximo. Ao alterarmos a potência de bombeamento para 10 mW e 20 mW este fato se repetiu com ganhos entre 32 dB e 40 dB. A topologia que apresentava a reflexão apenas do sinal de bombeamento não apresentou diferenças significativas em relação a topologia básica.

Ao utilizarmos a topologia contra propagante a topologia proposta com reflexão de sinal e bombeamento também se mostrou mais eficaz em relação as outras. Com ganhos máximos entre 15 dB e 38 dB. Enquanto a topologia básica apresentava 7 dB a 33 dB. A topologia contra propagante com reflexão do bombeio se mostrou ineficiente e até pior do que a topologia básica em certos casos. Como quando utilizada em em 980 nm e 40 mW de potência de bombeamento. As figuras de ruído em todos os casos se mostraram bastante semelhantes a topologia básica não havendo diferenças significativas como no ganho óptico. As topologias com reflexão de sinal e bombeamento apresentaram figuras de ruído com cerca de 1 dB a mais do que as topologias básicas.

Concluimos que as topologias com reflexão de sinal e bombeamento podem trazer redução do custo, pois os picos de ganho acontecem com pedaços menores de fibra dopada, e melhora na eficiência do amplificador, com diferença de ganho de 7 dB a 12 dB. As topologias que apresentam maiores ganhos foram as copropagantes.

5.1. Perspectiva de trabalhos futuros

Apresentamos as seguintes propostas para trabalhos futuros:

- Expandir este estudo simulando novas topologias com outros dispositivos ópticos adicionados ao circuito do amplificador.
- Outras configurações do amplificador como amplificador de potência e amplificador de linha
- Utilizar outros tipos de dopagem e variar o nível de dopagem da fibra
- Equalização do amplificador para os comprimentos de onda estudados

Bibliografia

ABU-AISHEH, A.; ALNAJJAR, H. Pre-amp EDFA ASE Noise Characterization for Optical Receiver Transmission Performance Optimization. **Optics Communications**, v. 283, n. 12, p. 2603–2606, 2010.

AGRAWAL, G. P. **Lightwave Technology: components and devices**. [s.l.] John Wiley & Sons, 2001.

AGRAWAL, G. P. **Fiber-Optic Communications Systems**. 3. ed. [s.l.: s.n.]. v. 6

AGRAWAL, G. P. **Sistemas de Comunicação por Fibra Óptica**. 4^a ed. [s.l.] Elsevier B.V., 2014.

BECKER, P. C. Optical Fiber Fabrication. p. 13–42, 1999.

BECKER, P. C.; OLSSON, N. A.; SIMPSON, J. R. Erbium-Doped Fiber Amplifiers. **Erbium-Doped Fiber Amplifiers**, p. 401–427, 1999.

CHEN, S.; LUO, Z.; CAI, D. A demodulation method of Temperature-Spectrum width based on Chirped fiber grating *. **MATEC Web of Conferences**, v. 6012, p. 2–5, 2016.

DECUSATIS, C. J. S.; DECUSATIS, C. M. Chapter 5 Repeaters and Optical Amplifiers. **Fiber Optic Essentials**, p. 111–124, 2006.

DURAK, F. E.; ALTUNCU, A. The effect of ASE reinjection configuration through FBGs on the gain and noise figure performance of L-Band EDFA. **Optics Communications**, v. 386, n. September 2016, p. 31–36, 2017.

DUTTON, H. J. R. Understanding Optical Communications. **International Technical Support Organisation**, v. 1, p. 1–638, 1998.

HALLIDAY, ID.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física 4: Óptica e Física Moderna**. [s.l.] LTC Brasil, 2012.

HEENS, B.; WANG, X. Improvement of the EDFA design for both preamplifier and booster applications. **Proc. Electrotechnical Conference**, p. 1404–1408, 1998.

KABONZO, F. M.; PENG, Y. Adaptive Performance Improvement of Fiber Bragg

Grating in Radio over Fiber System. **Journal of Computer and Communications**, v. 4, n. March, p. 1–6, 2016.

KALER, R.; KALER, R. S. Gain and Noise figure performance of erbium doped fiber amplifiers (EDFAs) and Compact EDFAs. **Optik - International Journal for Light and Electron Optics**, v. 122, n. 5, p. 440–443, 2011.

KAMINOW, I. P. et al. Optical Fiber Telecommunications. **Optical Fiber Telecommunications**, p. 985–1040, 2013.

KATTI, R.; PRINCE, S. All Optical new 3 3 3 reversible logic gate using. **Optical and Quantum Electronics**, v. 48, n. 1, p. 1–18, 2016.

MAO, Q. et al. A theoretical analysis of amplification characteristics of bi-directional erbium-doped fiber amplifiers with single erbium-doped fiber. **Optics Communications**, v. 159, n. 1–3, p. 149–157, 1999.

MORRISON, C. B. et al. LOW-NOISE ERBIUM-DOPED FIBRE AMPLIFIER OPERATING AT 1-54/*m. v. 23, n. 19, p. 1026–1028, 1987.

OPTIWAVE. **Component Library.** Disponível em: <<https://optiwave.com/category/products/system-and-amplifier-design/optisystem/optisystem-downloads/>>. Acesso em: 1 jul. 2017.

RIBEIRO, J. A. J. **Comunicações ópticas**. [s.l.] Érica, 2003.

RIEZNIK, A. A. Study on optimum fiber length for maximum gain in C- and L-band EDFAs. v. 266, p. 546–551, 2006.

SILVA, M. B. C. E. **Estudo de Topologias para otimização do desempenho de amplificadores ópticos a fibra dopada.pdf**. [s.l.] Unicamp, 2000.

VALENTE, T.; COELHO, P. **Análise Experimental de Topologias de Amplificadores Ópticos a Fibra Dopada com Érbio**. [s.l.] Unicamp, 2007.

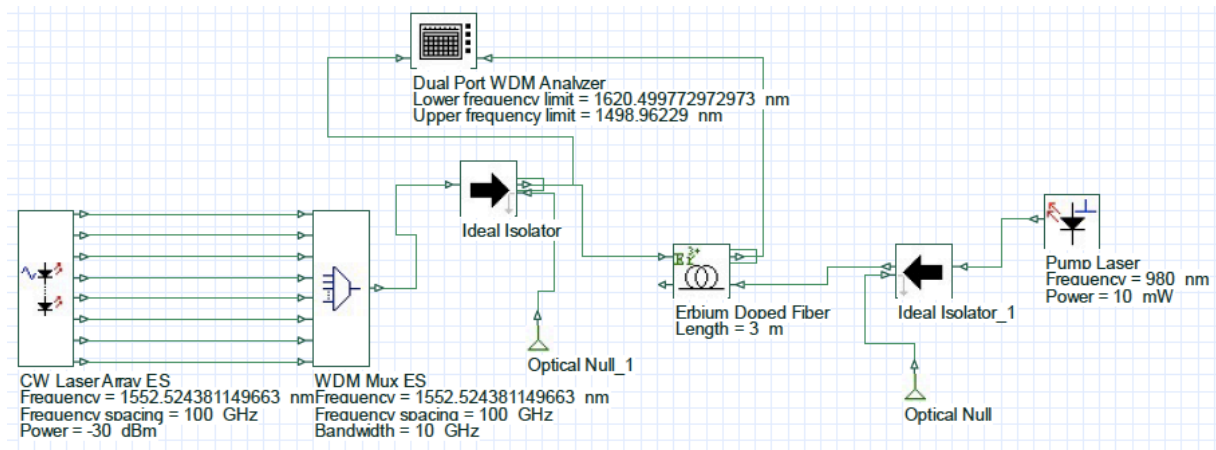
WANG, Y. et al. All optical multi-wavelength single-sideband modulated WDM radio-over-fiber systems by introducing a Sagnac loop filter. **Optical Fiber Technology**, v. 32, p. 36–42, 2016.

ZHANG, A.; HE, J. A dynamic optical arbitrary waveform generator based on cross phase modulation. **Optoelectronics Letters**, v. 12, n. 2, 2016.

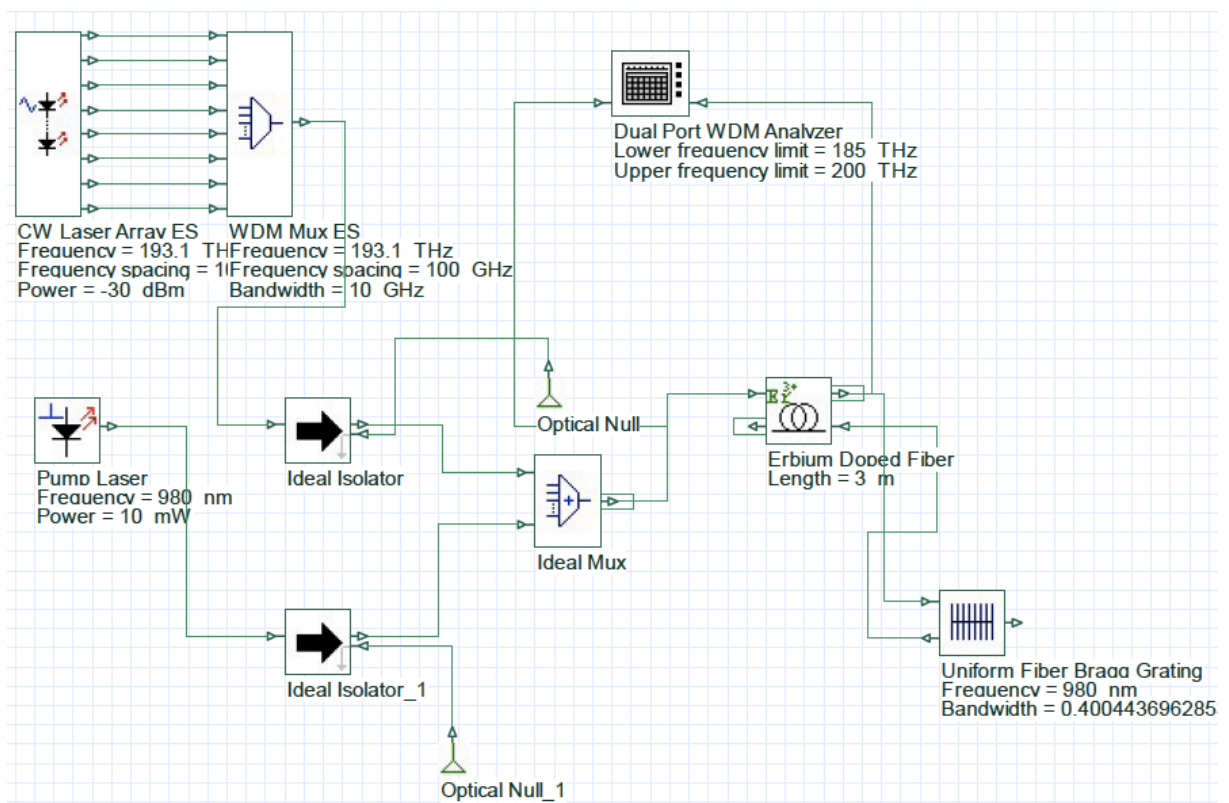
ANEXO A – Topologias Optisystem

A.1 - Topologias copropagantes

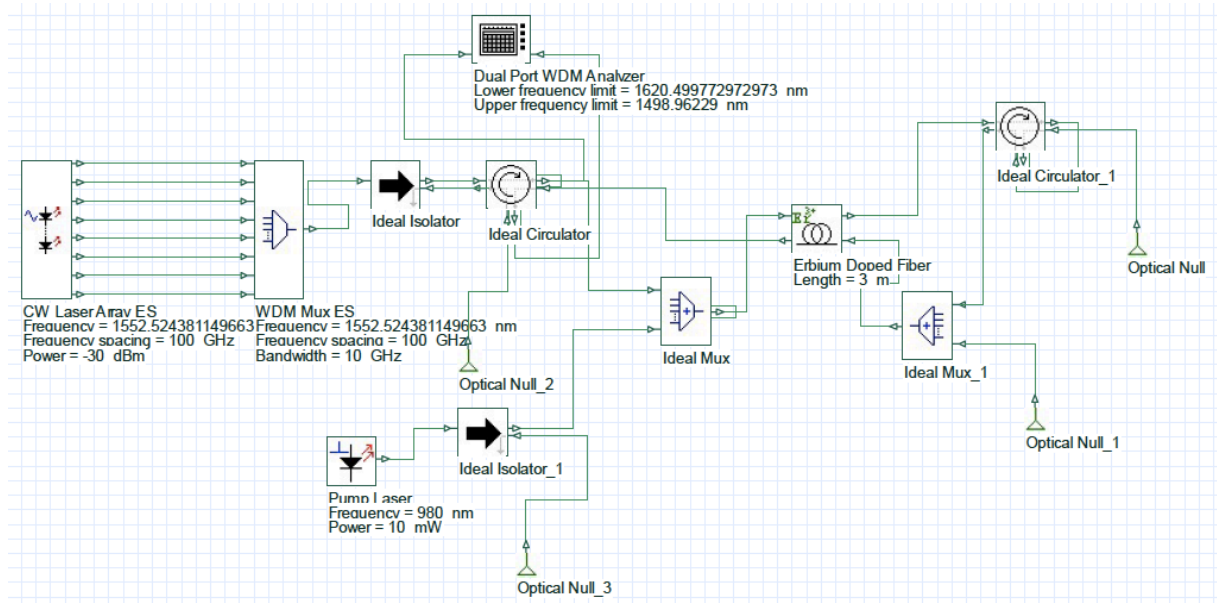
Básica



Reflexão de bombeamento

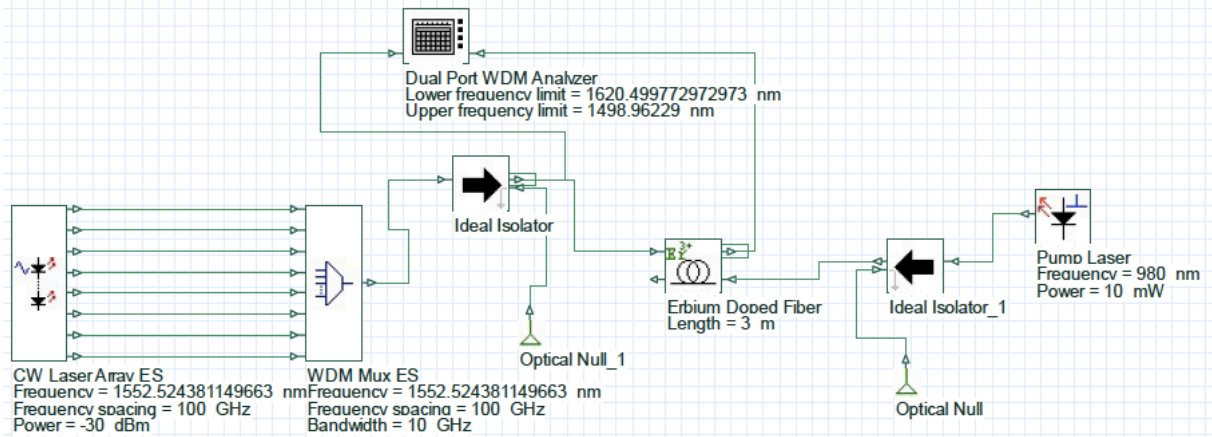


Reflexão de sinal e bombeamento

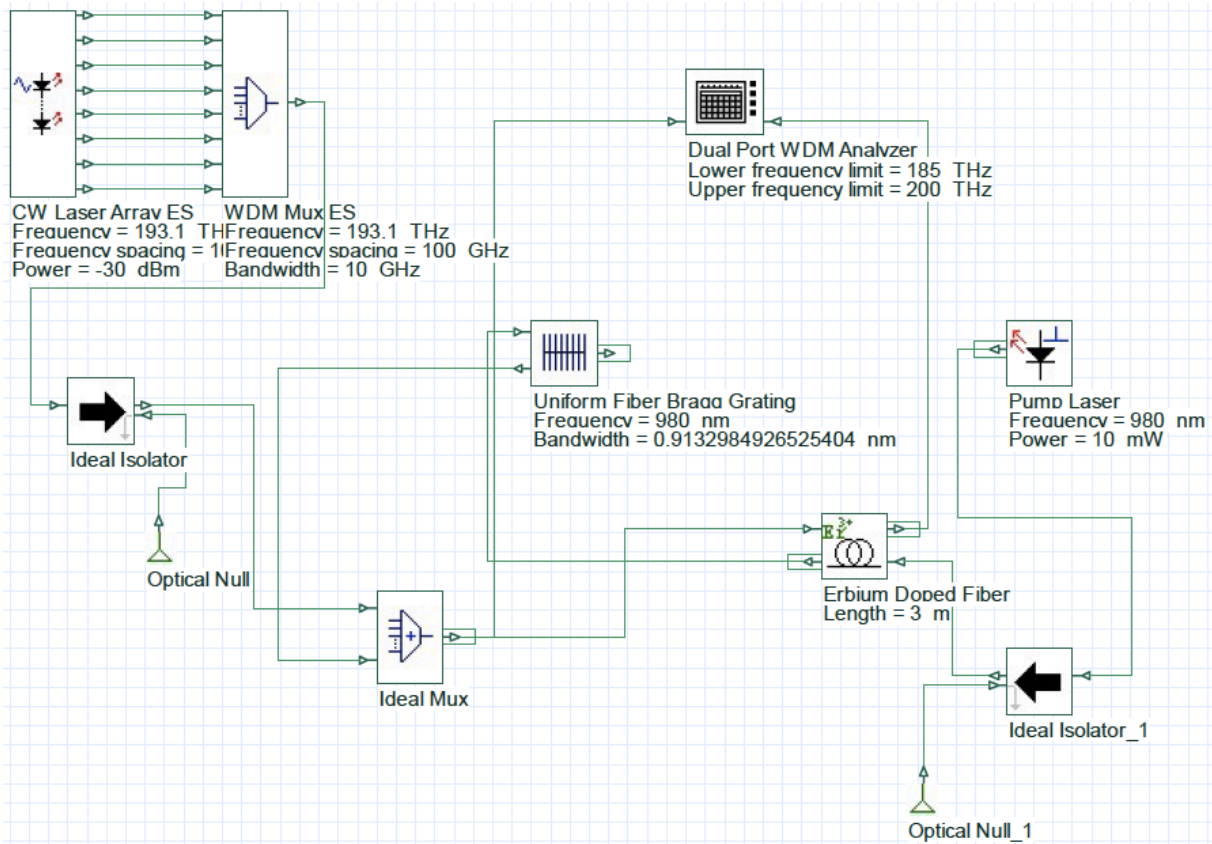


A.2 – Topologias contra propagantes

Básica



Reflexão de bombeamento



Reflexão de sinal e bombeamento

