



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ

IFCE *CAMPUS* FORTALEZA

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
TELECOMUNICAÇÕES – PPGET**

MESTRADO EM ENGENHARIA DE TELECOMUNICAÇÕES

JOÃO PAULO POLICARPO DE SOUSA

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DO AMPLIFICADOR A FIBRA DOPADA COM
ÉRBIO UTILIZANDO RECICLAGEM DE BOMBEAMENTO BASEADO EM
DIAGRAMA DE OLHO E FATOR DE QUALIDADE**

**FORTALEZA
2019**

JOÃO PAULO POLICARPO DE SOUSA

ANÁLISE DE DESEMPENHO DO AMPLIFICADOR A FIBRA DOPADA COM ÉRBIO
UTILIZANDO RECICLAGEM DE BOMBEAMENTO BASEADO EM DIAGRAMA DE OLHO
E FATOR DE QUALIDADE

Dissertação submetida à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Telecomunicações do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará como requisito para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Telecomunicações. Área de concentração: Sistemas de Telecomunicações. Linha de pesquisa: Microondas e Óptica Integrada

Orientador: Prof. Dr. Glendo de Freitas Guimarães

FORTALEZA
2019

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)

S725a Sousa, João Paulo.

ANÁLISE DE DESEMPENHO DO AMPLIFICADOR A FIBRA DOPADA COM ÉRBIO
UTILIZANDO RECICLAGEM DE BOMBEAMENTO BASEADO EM DIAGRAMA DE OLHO E
FATOR DE QUALIDADE / João Paulo Sousa. - 2019.

107 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal do Ceará, Mestrado em Engenharia de
Telecomunicações, Campus Fortaleza, 2019.

Orientação: Prof. Dr. Glendo de Freitas Guimarães.

1. Amplificadores Ópticos. 2. Érbio. 3. Grade de Bragg. 4. Fator de Qualidade. 5.
Diagrama de Olho. I. Título.

CDD 621.382

Fortaleza - CE, 30 de abril de 2019

**ATA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM
ENGENHARIA DE TELECOMUNICAÇÕES**

Aos 30 dias do mês de abril do ano de 2019, às 14 horas, no Auditório Iran Raupp - IFCE, Campus Fortaleza, realizou-se a 56ª (quinqüagésima sexta) Defesa de Dissertação de Mestrado do PPGET, intitulada:

**“ANÁLISE DE DESEMPENHO DO AMPLIFICADOR A FIBRA DOPADA COM ÉRBIO
UTILIZANDO RECICLAGEM DE BOMBEAMENTO BASEADO EM DIAGRAMA DE OLHO E
FATOR DE QUALIDADE”**

de autoria do candidato **João Paulo Policarpo de Sousa**, aluno do Programa/Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Telecomunicações (PPGET) do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE - em nível de Mestrado. A Banca Examinadora esteve constituída pelos professores doutores, sob a presidência do primeiro:

Prof. Dr. Glendo de Freitas Guimarães (IFCE, orientador)

Dr. Alisson da Conceição Ferreira (IFCE)

Prof. Dr. Daniel Xavier Gouveia (IFCE)

Prof. Dr. José Rubens Rodrigues de Sousa (UNIFOR)

Concluídos os trabalhos de apresentação e arguição, o candidato foi aprovado pela Comissão Examinadora. Foi concedido um prazo de **30** dias, para o candidato efetuar as correções sugeridas pela Comissão Examinadora e apresentar o trabalho em sua redação definitiva, sob pena de não expedição do Diploma. E, para constar, foi lavrada a presente ata, que vai assinada pelos membros da Comissão.

Glendo de Freitas Guimarães
Prof. Dr. Glendo de Freitas Guimarães (Orientador)

Alisson da Conceição Ferreira
Dr. Alisson da Conceição Ferreira (IFCE)

Daniel Xavier Gouveia
Prof. Dr. Daniel Xavier Gouveia (IFCE)

José Rubens Rodrigues de Sousa
Prof. Dr. José Rubens Rodrigues de Sousa

Considerações da Banca:

Francisco José Alves de Aquino
Prof. Dr. Francisco José Alves de Aquino
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Telecomunicações do IFCE

Prof. Dr. Francisco José Alves de Aquino
Coordenador do PPGET
IFCE - Campus Fortaleza



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
TELECOMUNICAÇÕES

JOÃO PAULO POLICARPO DE SOUSA

Esta Dissertação foi julgada adequada para a 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:

Glendo de Freitas Guimarães

Prof. Dr. Glendo de Freitas Guimarães (Orientador)
Instituto Federal do Ceará (IFCE), Campus Fortaleza

Alisson da Conceição Ferreira

Dr. Alisson da Conceição Ferreira (IFCE)
Instituto Federal do Ceará (IFCE), Campus Fortaleza

Daniel Xavier Gouveia

Prof. Dr. Daniel Xavier Gouveia (IFCE)
Instituto Federal do Ceará (IFCE), Campus Fortaleza

José Rubens Rodrigues de Sousa

Prof. Dr. José Rubens Rodrigues de Sousa
Universidade de Fortaleza, UNIFOR.

Francisco de Assis de Araújo
Prof. Dr. Francisco de Assis de Araújo
Coordenador do PROET
IFCE - Campus Fortaleza

A Deus.

A minha família.

A todos aqueles que contribuíram com esta obra de forma direta ou indireta.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho tem diversas contribuições, sejam elas pequenas ou grandes, relevantes ou não, mas que não poderiam deixar de ser reconhecidas e, conseqüentemente divulgadas.

Agradeço primeiramente a Deus, que me concede todos dias o dom de viver, de poder estudar, aprender e compartilhar o saber.

A minha família pelo incessante apoio para que eu consiga alcançar meus objetivos.

A minha futura esposa, Lorena Loiola Batista, que me ajudou a ingressar na vida acadêmica, e que até hoje é a minha principal apoiadora, não só nos meus estudos, mas como nas demais etapas de minha vida.

Aos colegas, professores e funcionários do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará.

Ao meu orientador, professor Dr. Glendo de Freitas Guimarães, que me deu a honra de ser seu orientando, onde tive não só o seu apoio intelectual, que por sinal foi além do necessário, mas também pude ter a motivação para nunca desistir dos desafios. Minha sincera gratidão a esse ser humano de coração grandioso, e cabeça invejável.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Telecomunicações – PPGET/IFCE.

“Deus dá as batalhas mais difíceis
aos seus melhores soldados”

- Papa Francisco

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo numérico que investiga o desempenho de um Amplificador a Fibra Dopada com Érbio (EDFA) na função de pré-amplificação, através do uso de uma técnica de reaproveitamento de bombeamento óptico. Estudamos por meio de simulação com o *software Optisystem®* oito cenários distintos de montagem do dispositivo, com modificações realizadas através da utilização de Grade de Bragg como dispositivo óptico passivo para retroalimentar o sistema de amplificação. Analisamos a performance da técnica proposta, comparando cenários que utilizam ou não reciclagem de bombeamento, alterando diversos parâmetros de configuração do dispositivo, como potência do laser de bombeamento, tamanho da fibra dopada, e comprimento de onda do laser de bomba ajustados em 980 nm e 1480 nm. Como resultados do uso da técnica de amplificação, obtivemos melhoria na qualidade do sinal amplificado nos cenários co-propagantes, com um ganho óptico de até 2,5 dB, e elevação de três unidades de Fator Q. Nos cenários contra-propagantes, a técnica usada no amplificador apresentou um aumento de até 3 dB de evolução de ganho óptico, e três unidades a mais de Fator Q. Os Diagramas de Olho mostraram coerência no desenvolvimento do processo de amplificação, provando uma possível viabilidade de construção de um dispositivo eficiente e de menor custo.

Palavras-chave: Amplificadores Ópticos, Érbio, Grade de Bragg, Ganho óptico, Fator de Qualidade, Diagrama de Olho.

ABSTRACT

This work presents a numerical study investigating the performance of an Erbium Doped Fiber Amplifier (EDFA) in the pre-amplification function, through the use of an optical pumping reutilization technique. We studied through simulation with the Optisystem software, eight distinct scenarios of assembling the device with modifications made through the usage of Bragg Grid as a passive optical device to feed back the amplification system. We analyzed the performance of the proposed technique by comparing scenarios using or not recycling pumping by changing various device configuration parameters such as pumping laser power, doped fiber size, and pump laser wavelength set at 980 nm and 1480 nm. As results of the use of the amplification technique, we obtained an improvement in amplified signal quality in the co-propagating scenarios, with an optical gain of up to 2.5 dB, and elevation of three Q-factor units. In the counter-propagating scenarios, the technique used in the amplifier showed an increase of up to 3 dB in optical gain evolution and three more units in Q-Factor. Eye Diagrams showed coherence in the development of the amplification process, proving a feasibility of constructing an efficient device of lower cost.

Keywords: Optical Amplifiers, Erbium, Bragg Grid, Optical Gain, Quality Factor, Eye Diagram.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Configuração básica de um EDFA	23
Figura 2 - Diagrama de níveis de energia do érbio	25
Figura 3 - Dependência espectral da emissão espontânea amplificada em um EDFA.....	27
Figura 4 – Representação do sinal óptico: (a) na entrada do EDFA e (b) após ser amplificado	29
Figura 5 - Simulação do perfil de ganho em função do comprimento de onda para um EDFA.....	30
Figura 6 - Perfil $per(r)$ em função do raio normalizado (r/a_c) , tendo α como parâmetro	33
Figura 7 – Estrutura básica de um laser semiconductor	35
Figura 8 – Processo de realimentação óptica em um laser semiconductor	35
Figura 9 - Princípio de funcionamento de um isolador óptico independente do estado de polarização: (a) o sinal se propaga no sentido da esquerda para a direita; (b) o sinal se propaga no sentido da direita pra esquerda.	37
Figura 10 - Ilustração de uma rede uniforme de Bragg com índice constante de modulação, amplitude e período. Os feixes de onda incidentes, difratados e ralados devem ser combinados no momento a ser conservado.	39
Figura 11 - Espectro de reflexão da Grade de Bragg em função do comprimento de onda.	41
Figura 12 – Principais definições de um Diagrama de Olho	43
Figura 13 – Diagrama esquemático do EDFA com bombeamento co-propagante.	45
Figura 14 – Diagrama esquemático para o EDFA com bombeamento co-propagante refletido.	46

Figura 15 – Diagrama esquemático para o EDFA básico com bombeamento contra-propagante	47
Figura16 – Diagrama esquemático para o EDFA com bombeamento contra-propagante refletido.	48
Figura 17 - Ganho óptico em função da potência de entrada do sinal, comprimento da fibra 2 m, potência de bombeamento como parâmetro configurável testado com valores de 5, 10, 20, 50 e 100 mW. Bombeamento co-propagante e sem reflexão.	49
Figura 18 - Ganho óptico em função da potência de entrada do sinal, comprimento da 4 m, potência de bombeamento como parâmetro configurável testado com valores de 5, 10, 20, 50 e 100 mW. Bombeamento co-propagante e sem reflexão.	50
Figura 19 - Ganho óptico em função da potência de entrada do sinal, comprimento da fibra 6 m, potência de bombeamento como parâmetro configurável testado com valores de 5, 10, 20, 50 e 100 mW. Bombeamento co-propagante e sem reflexão.	51
Figura 20 - Ganho óptico em função da potência de entrada do sinal, comprimento da fibra 8 m, potência de bombeamento como parâmetro configurável testado com valores de 5, 10, 20, 50 e 100 mW. Bombeamento co-propagante e sem reflexão.	52
Figura 21 - Ganho óptico em função da potência de entrada do sinal, comprimento da fibra 10 m, potência de bombeamento como parâmetro configurável testado com valores de 5, 10, 20, 50 e 100 mW. Bombeamento co-propagante e sem reflexão.	53
Figura 22 - Ganho óptico em função da potência de entrada do sinal, comprimento da fibra 2 m, potência de bombeamento como parâmetro configurável testado com valores de 5, 10, 20, 50 e 100 mW. Bombeamento co-propagante e reflexão da FBG.	54
Figura 23 - Ganho óptico em função da potência de entrada do sinal, comprimento da fibra 4 m, potência de bombeamento como parâmetro configurável testado com	

valores de 5, 10, 20, 50 e 100 mW. Bombeamento co-propagante e reflexão da FBG.	55
Figura 24 - Ganho óptico em função da potência de entrada do sinal, comprimento da fibra 6 m, potência de bombeamento como parâmetro configurável testado com valores de 5, 10, 20, 50 e 100 mW. Bombeamento co-propagante e reflexão da FBG	56
Figura 25 - Ganho óptico em função da potência de entrada do sinal, (a) comprimento da fibra 8 m, (b) comprimento da fibra fixada 10 m, potência de bombeamento como parâmetro configurável testado com valores de 5, 10, 20, 50 e 100 mW. Bombeamento co-propagante e reflexão da FBG	57
Figura 26 – Análise comparativa das interações dos cenários 1 e 2 em termos de BER no receptor. (a) Sem reciclagem de bombeamento e (b) Com reciclagem de bombeamento.	58
Figura 27 – Análise de desempenho dos cenários 1 e 2. (a) Ganho óptico e (b) Fator de Qualidade	59
Figura 28 - Análise do Diagrama de Olho com potência do sinal de entrada de -30 dBm, $\lambda_P = 5$ mW e EDFA de 2 m. (a) Sem reciclagem de bombeamento. (b) Com reciclagem de bombeamento autor	60
Figura 29 - Ganho óptico em função da potência de entrada do sinal, comprimento da fibra 2 m, potência de bombeamento como parâmetro configurável testado com valores de 5, 10, 20, 50 e 100 mW. Bombeamento contra-propagante sem reflexão	61
Figura 30- Ganho óptico em função da potência de entrada do sinal, comprimento da fibra 4 m, potência de bombeamento como parâmetro configurável testado com valores de 5, 10, 20, 50 e 100 mW. Bombeamento contra-propagante sem reflexão	62
Figura 31 - Ganho óptico em função da potência de entrada do sinal, comprimento da fibra 6 m, potência de bombeamento como parâmetro configurável testado com valores de 5, 10, 20, 50 e 100 mW. Bombeamento contra-propagante sem reflexão.	63

Figura 32 - Ganho óptico em função da potência de entrada do sinal, comprimento da fibra 8 m, potência de bombeamento como parâmetro configurável testado com valores de 5, 10, 20, 50 e 100 mW. Bombeamento contra-propagante sem reflexão	64
Figura 33 - Ganho óptico em função da potência de entrada do sinal, comprimento da fibra fixada em 10 m, e potência de bombeamento como parâmetro configurável testado com valores de 5, 10, 20, 50 e 100 mW. Bombeamento contra-propagante sem reflexão.....	65
Figura 34 - Ganho óptico em função da potência de entrada do sinal, comprimento da fibra 2 m, potência de bombeamento como parâmetro configurável testado com valores de 5, 10, 20, 50 e 100 mW. Bombeamento contra-propagante com reflexão da FBG.....	66
Figura 35 - Ganho óptico em função da potência de entrada do sinal, comprimento da fibra fixada em 4 m, e potência de bombeamento como parâmetro configurável testado com valores de 5, 10, 20, 50 e 100 mW. Bombeamento contra-propagante com reflexão da FBG	67
Figura 36 - Ganho óptico em função da potência de entrada do sinal, comprimento da fibra fixada em 6 m, e potência de bombeamento como parâmetro configurável testado com valores de 5, 10, 20, 50 e 100 mW. Bombeamento contra-propagante com reflexão da FBG.	68
Figura 37 - Ganho óptico em função da potência de entrada do sinal, comprimento da fibra 8 m, potência de bombeamento como parâmetro configurável testado com valores de 5, 10, 20, 50 e 100 mW. Bombeamento contra-propagante com reflexão da FBG.....	69
Figura 38 - Ganho óptico em função da potência de entrada do sinal, comprimento da fibra 10 m, potência de bombeamento como parâmetro configurável testado com valores de 5, 10, 20, 50 e 100 mW. Bombeamento contra-propagante com reflexão da FBG.	70
Figura 39 - Análise de desempenho dos cenários 3 e 4. (a) Ganho óptico e (b) Fator de Qualidade.....	71

Figura 40 – Análise do Diagrama de Olho para potência do sinal de entrada de - 30 dBm, $\lambda_P = 10$ mW e EDFA de 4 m. (a) Sem reciclagem de bombeamento. (b) Com reciclagem de bombeamento.....	72
Figura 41 - Ganho óptico em função da potência de entrada do sinal, comprimento da fibra 2 m, potência de bombeamento como parâmetro configurável testado com valores de 5, 10, 20, 50 e 100 mW. Bombeamento contra-propagante sem reflexão da FBG.....	73
Figura 42 - Ganho óptico em função da potência de entrada do sinal, comprimento da fibra 4 m, potência de bombeamento como parâmetro configurável testado com valores de 5, 10, 20, 50 e 100 mW. Bombeamento contra-propagante sem reflexão da FBG.....	74
Figura 43 - Ganho óptico em função da potência de entrada do sinal, comprimento da fibra 6 m, potência de bombeamento como parâmetro configurável testado com valores de 5, 10, 20, 50 e 100 mW. Bombeamento contra-propagante sem reflexão da FBG.....	75
Figura 44 - Ganho óptico em função da potência de entrada do sinal, comprimento da fibra 8 m, potência de bombeamento como parâmetro configurável testado com valores de 5, 10, 20, 50 e 100 mW. Bombeamento contra-propagante sem reflexão da FBG.....	76
Figura 45 - Ganho óptico em função da potência de entrada do sinal, comprimento da fibra 10 m, potência de bombeamento como parâmetro configurável testado com valores de 5, 10, 20, 50 e 100 mW. Bombeamento contra-propagante sem reflexão da FBG.	77
Figura 46 - Ganho óptico em função da potência de entrada do sinal, comprimento da fibra 2 m, potência de bombeamento como parâmetro configurável testado com valores de 5, 10, 20, 50 e 100 mW. Bombeamento co-propagante com reflexão da FBG. Fonte: próprio autor.....	78
Figura 47 - Ganho óptico em função da potência de entrada do sinal, comprimento da fibra 4 m, potência de bombeamento como parâmetro configurável testado com valores de 5, 10, 20, 50 e 100 mW. Bombeamento co-propagante com reflexão da FBG.....	79

Figura 48 - Ganho óptico em função da potência de entrada do sinal, comprimento da fibra 6 m, potência de bombeamento como parâmetro configurável testado com valores de 5, 10, 20, 50 e 100 mW. Bombeamento co-propagante com reflexão da FBG	80
Figura 49 - Ganho óptico em função da potência de entrada do sinal, comprimento da fibra 8 m, potência de bombeamento como parâmetro configurável testado com valores de 5, 10, 20, 50 e 100 mW. Bombeamento co-propagante com reflexão da FBG	81
Figura 50 - Ganho óptico em função da potência de entrada do sinal, comprimento da fibra 8 m, potência de bombeamento como parâmetro configurável testado com valores de 5, 10, 20, 50 e 100 mW. Bombeamento co-propagante com reflexão da FBG	82
Figura 51 – Análise do Diagrama de Olho para potência de entrada de -25 dBm, $\lambda_P = 5$ mW e EDFA de 4 m. (a) Sem reciclagem de bombeamento. (b) Com reciclagem de bombeamento	83
Figura 52 - Ganho óptico em função da potência de entrada do sinal, comprimento da fibra 2 m, potência de bombeamento como parâmetro configurável testado com valores de 5, 10, 20, 50 e 100 mW. Bombeamento contra-propagante sem reflexão da FBG	84
Figura 53 - Ganho óptico em função da potência de entrada do sinal, comprimento da fibra 4 m, potência de bombeamento como parâmetro configurável testado com valores de 5, 10, 20, 50 e 100 mW. Bombeamento contra-propagante sem reflexão da FBG	85
Figura 54 - Ganho óptico em função da potência de entrada do sinal, comprimento da fibra 6 m, potência de bombeamento como parâmetro configurável testado com valores de 5, 10, 20, 50 e 100 mW. Bombeamento contra-propagante sem reflexão da FBG	86
Figura 55 - Ganho óptico em função da potência de entrada do sinal, comprimento da fibra 6 m, potência de bombeamento como parâmetro configurável testado com valores de 5, 10, 20, 50 e 100 mW. Bombeamento contra-propagante sem reflexão da FBG	86

Figura 56 - Ganho óptico em função da potência de entrada do sinal, comprimento da fibra 6 m, potência de bombeamento como parâmetro configurável testado com valores de 5, 10, 20, 50 e 100 mW. Bombeamento contra-propagante sem reflexão da FBG	87
Figura 57 - Ganho óptico em função da potência de entrada do sinal, comprimento da fibra 6 m, potência de bombeamento como parâmetro configurável testado com valores de 5, 10, 20, 50 e 100 mW. Bombeamento contra-propagante sem reflexão da FBG	88
Figura 58 - Ganho óptico em função da potência de entrada do sinal, comprimento da fibra 6 m, potência de bombeamento como parâmetro configurável testado com valores de 5, 10, 20, 50 e 100 mW. Bombeamento contra-propagante sem reflexão da FBG	89
Figura 59 - Ganho óptico em função da potência de entrada do sinal, comprimento da fibra 6 m, potência de bombeamento como parâmetro configurável testado com valores de 5, 10, 20, 50 e 100 mW. Bombeamento contra-propagante sem reflexão da FBG	90
Figura 60 - Ganho óptico em função da potência de entrada do sinal, comprimento da fibra 6 m, potência de bombeamento como parâmetro configurável testado com valores de 5, 10, 20, 50 e 100 mW. Bombeamento contra-propagante sem reflexão da FBG	91
Figura 61 - Ganho óptico em função da potência de entrada do sinal, comprimento da fibra 6 m, potência de bombeamento como parâmetro configurável testado com valores de 5, 10, 20, 50 e 100 mW. Bombeamento contra-propagante sem reflexão da FBG	92
Figura 62 – Análise de desempenho dos cenários 7 e 8. (a) Ganho óptico e (b) Fator	93
Figura 63 – Análise do Diagrama de Olho para potência de entrada de -25 d...	94

LISTA DE ABREVIACÕES

ASE	Emissão Espontânea Estimulada (<i>Amplified Spontaneous Emission</i>)
CW	Onda Contínua (<i>Continuous Wave</i>)
dB	Decibel
dBm	Decibel com referência de 1 miliwatt
DWDM	Multiplexação por divisão do Comprimento de onda (<i>Dense Wavelength Division Multiplexing</i>)
EDFA	Amplificador a Fibra Dopada com Érbio (<i>Erbium Doped Fiber Amplifier</i>)
FBG	In Fibre Bragg Grating
ITU-T	União Internacional de Telecomunicações (<i>International Telecommunication Union</i>)
LASER	Amplificação da Luz por Emissão Estimulada da Radiação <i>Light</i> (<i>Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>)
LED	Diodo Emissor de Luz (<i>Light-Emitting Diode</i>)
MCVD	Deposição Modificada De Vapor Químico (<i>Modified Chemical Vapor Deposition</i>)
NF	Figura de Ruído (<i>Noise Figure</i>)
NRZ	Não Retorno Ao Nível Zero (<i>Non Return to Zero</i>)
RZ	Retorno ao Nível Zero (<i>Return to Zero</i>)
SNR	Relação Sinal-Ruído (<i>Signal Noise Ratio</i>)
SOA	Amplificador Óptico Semicondutor (<i>Semiconductor Optical Amplifier</i>)
SWP	Polarizador De Desvio Espacial (<i>Spacial Walk-Off Polarizer</i>)
VAD	Deposição Axial De Vapor (<i>Vapor Axial Deposition</i>)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
1.2 Objetivos	20
1.3 Organização da Dissertação	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	26
3.1 Teoria Do EDFA	26
3.2 Amplificadores Ópticos a Fibra Dopada com Érbio	26
3.3 Mecanismo de Amplificação e Níveis de Energia.....	28
3.4 Características do EDFA.....	32
3.4.1 Ganho óptico	32
3.4.2 Figura de Ruído	35
3.5 Fibra Dopada com Érbio	36
3.6 Dispositivos Ópticos.....	38
3.6.1 Lasers Semicondutores.....	38
3.6.2 Isoladores Ópticos	40
3.6.3 Acopladores WDM.....	41
3.6.4 <i>Fiber Bragg Grating</i> (FBG).....	42
3.6.4.1 Refletividade da Grade de Bragg	44
4 METODOLOGIA	46
4.1 Métodos de avaliação de desempenho	46
4.2 Setups Simulados.....	48
4.2.1 Co-propagante com Grade de Bragg.....	49
4.2.2 Co-propagante sem Grade de Bragg.....	50
4.2.3 Contra-propagante sem Grade de Bragg	50
4.2.4 Contra-propagante com Grade de Bragg	51
5 RESULTADOS.....	53
5.1 Comprimento de onda de bombeamento (980 nm)	53
5.1.1 Cenário 1.....	53
5.1.2 Cenário 2	58
5.1.3 Cenário 3	65

5.1.4 Cenário 4	70
5.2 Comprimento de onda de bombeamento (1480 nm).....	77
5.2.1Cenário 5	77
5.2.2Cenário 6	81
5.2.3 Cenário 7	88
5.2.4 Cenário 8	92
6 CONCLUSÃO	101
6.1Trabalhos Futuros.....	102
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	103
APENDICES	106

1 INTRODUÇÃO

A crescente solicitação dos recursos digitais vem exigindo constantes melhorias e evolução na capacidade de tráfego de dados, isso têm estimulado o meio científico a buscar soluções inovadoras para aumentar a capacidade de transmissão de dados, e encaminhamento da informação. As tecnologias de comunicações ópticas diferem de outras tecnologias pelo fato de oferecerem maiores vantagens como melhor largura de banda disponível, baixas perdas e distorção, entre outras.

No início, os primeiros sistemas de comunicação utilizavam repetidores regeneradores eletrônicos, que recuperavam a amplitude e a forma dos sinais transmitidos, após uma determinada distância da fonte transmissora. O processo de funcionamento destes repetidores consistia em modular o sinal do domínio óptico para o eletrônico, onde o sinal era amplificado e reformulado do domínio eletrônico para o óptico. Tecnicamente falando, o repetidor era eficiente em obter recuperação satisfatória do sinal e aumentar a distância dos enlaces ópticos. Contudo, a complexidade dos circuitos optoeletrônicos dos repetidores, particularmente aqueles projetados para a recuperação de sinais ópticos modulados digitalmente em altas taxas, fazia com que o custo final se tornasse muito alto, inviabilizando a transmissão de multicanais ópticos (vários comprimentos de onda) por fibra (MILO, 2003).

Nesse contexto, técnicas de amplificação do sinal óptico começaram a ser pesquisadas, sem que houvesse mais a necessidade de conversão do sinal óptico em elétrico (SILVA, 2000). Surgem portanto, em meados de 1980, amplificadores ópticos obtidos a partir da dopagem de um fibra óptica, com elementos químicos pertencentes ao grupo das “terras-raras”, dentre estes amplificadores o EDFA (*Erbium Doped Fiber Amplifier* – Amplificador à Fibra Dopada com Érbio) destaca-se como solução para amplificação de sinais ópticos. A utilização deste tipo de amplificação tem como objetivo aumentar o 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).

Desta forma, na transmissão óptica multicanal, onde se adota a tecnologia de multiplexação por divisão em comprimento de onda, cada canal pode ser amplificado com o mínimo de distorções podendo assim utilizar potencialmente a ampla banda de transmissão da fibra óptica. Esta prática aumenta a capacidade efetiva de transmissão e diminui o custo por canal, em relação a sistemas com repetidores. Em média, o limite de alcance de um enlace óptico que não utiliza amplificadores e opera com taxas de transmissão da ordem de Gb/s é de, aproximadamente, 200 km (SUDO, 1997). Contudo, torna-se relevante a utilização de amplificadores ópticos para redes de longo alcance, temos como exemplo os enlaces transoceânicos.

O EDFA, segundo Agrawal (2002), utiliza o elemento químico érbio na sua forma iônica (Er^{3+}) em seu processo de fabricação. Estas partículas atuam ativamente no processo de amplificação do sinal, onde os íons dopantes uma vez estimulados por uma fonte de luz bombeante, são estimulados, retornando assim ao seu nível fundamental, amplificando o sinal opticamente. Inicialmente utilizado na amplificação de luz da banda convencional C (*Conventional Band* - 1530 nm a 1565 nm), estes amplificadores passaram a ser projetados também, no fim dos anos 90, para amplificar os sinais ópticos da banda L (*Long Band* – 1565 nm a 1620 nm) (FREITAS, 2006).

A utilização deste elemento químico com dopante é muito relevante para os sistemas de comunicação óptica, pois é possível amplificar luz na região de comprimento de onda de 1550 nm. Esta região é extremamente importante para os sistemas de comunicações ópticas, pois coincide com a terceira janela de comunicação da fibra óptica, onde as perdas são mais baixas, geralmente em torno de 0,2 dB/km (AGRAWAL, 2002).

Um amplificador óptico, pode ter três tipos de funcionalidade, dependendo da sua localização no sistema: o amplificador de potência, o amplificador de linha e o pré-amplificador. O amplificador de potência, posicionado na saída da transmissão do sistema óptico, é responsável pelo aumento da potência óptica na saída do transmissor, e obtenção de ganho óptico. Os amplificadores de linha, posicionados ao longo do enlace óptico, têm a função de recuperar a amplitude do sinal óptico de forma a compensar as atenuações e dispersão ao longo da propagação na fibra, objetivando o ganho elevado e baixa figura de ruído. Quando esses amplificadores de linha são posicionados ao longo do enlace óptico, mas o sinal chega no receptor com alta taxa de BER, configura-se portanto a possível substituição dos amplificadores de linha

pelos chamados pré-amplificadores ópticos. A inserção do amplificador na entrada do receptor óptico possibilita a recuperação do sinal a nível adequado à sensibilidade do fotodetector, melhorando a sua relação sinal-ruído, além de ter como vantagem o fácil acesso ao amplificador em caso de necessidade de manutenção (KAMINOW; KOCH, 1997).

Atualmente existem diversos fabricantes de amplificadores a fibra dopada com érbio, com vários modelos e especificações diferentes, porém, é necessário manter a continuidade na pesquisa, seja por meio de experimentos utilizando componentes e dispositivos, ou através de simulações computacionais, em busca de novas alternativas e técnicas, ou condições mais adequadas para cada função do amplificador (potência, linha ou pré-amplificação), visando sempre a obtenção de melhores desempenhos, e redução dos custos de fabricação, implementação e manutenção, mesmo antes que testes de campo sejam conduzidos. Portanto, existirá sempre para cada aplicação de amplificador uma configuração ideal.

1.2 Objetivos

O propósito deste trabalho consiste em realizar simulações computacionais para analisar o desempenho de um amplificador óptico a fibra dopada com érbio, que utiliza a técnica de reciclagem de bombeamento através da utilização de Grades de Bragg, baseado em Fator de qualidade e Diagrama de olho.

Objetiva-se realizar um estudo numérico da utilização de EDFA em estágios de pré-amplificação, bem como realizar comparações dos ensaios simulados através dos cenários possíveis configurados com resultados obtidos de simulações e experimentos que utilizaram Grades de Bragg como elemento de estudo em amplificadores ópticos para controle de ganho.

Ao final, visa-se analisar através de Diagrama de Olho, fator de qualidade (*Q-Factor*) e mínimo BER, o ganho óptico obtido através das interações de parâmetros e elementos do EDFA, comparando sempre cenários com e sem reflexão do laser de bombeamento do amplificador, afim de obter a melhor configuração para o amplificador óptico.

1.3 Organização da Dissertação

O Capítulo 2 concentra uma breve revisão bibliográfica sobre diversos estudos de simulação e experimentos que tratam de topologias para otimização da amplificação óptica a partir de EDFA, com diversas utilizações de dispositivos e configurações.

O Capítulo 3 descreve uma revisão sobre os principais fundamentos teóricos utilizados no trabalho. O Capítulo apresenta o amplificador a fibra dopada EDFA, como é construído, seu funcionamento, bem como topologias e configurações existentes. Serão mostrados também alguns dispositivos ópticos a serem empregados no estudo tais como modulador Mach-Zehnder, acoplador WDM, diodo laser, FBGs (*In-Fibre Bragg Grating*).

O Capítulo 4 apresenta a metodologia adotada para a realização do trabalho, definindo algumas topologias que serão utilizadas nas simulações via software *Optisystem*®, bem como opções alternativas de reflexão para configuração de um amplificador básico. Serão testadas diversas características nas condições de pré-amplificação, tais como comprimento da fibra dopada e potência do laser de bombeamento. Também serão apresentados como estas simulações foram feitas.

O Capítulo 5 apresenta os resultados em forma de gráficos, imagens e tabelas, onde serão evidenciados o mérito de ganho óptico, o fator de qualidade Q, a taxa de bit erro, e o diagrama de olho, para todas as topologias e configurações testadas, a fim de verificar qual o melhor cenário possível para um sistema de pré-amplificação.

Por fim, apresentaremos as conclusões obtidas com os resultados do trabalho, além de enumerar sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Atualmente utilizado em sistemas de comunicações ópticas de alta capacidade, o EDFA apresenta funcionalidades de amplificação em larga faixa de canais, com baixa complexidade e baixo custo de implementação. Com isso, são os amplificadores ópticos mais estudados e utilizados.

Os trabalhos a seguir formam a base bibliográfica para o estudo em questão, onde as principais fontes consultadas foram artigos científicos publicados, teses e dissertações, que tratam a respeito do estudo de amplificadores ópticos a fibra dopada em suas diversas configurações e que utilizam dispositivos e métodos avaliativos diversos para a análise do desempenho.

Várias topologias já foram testadas e estudadas utilizando uma nova configuração de amplificador óptico a fim de obter-se ganho mais acentuado. No trabalho *“Improvement of the EDFA design for both preamplifier and booster applications”* os autores propõe uma configuração que através da utilização de dispositivos de loop, (circuladores ópticos) juntamente com um acoplador de relação variável, possibilitou a amplificação coerente de sinais com altas e baixas potências. O funcionamento partia do princípio da taxa de divisão de potências, onde sinais de baixo nível de potência eram refletidos passando novamente pelo processo de amplificação (HEENS; WANG, 1998).

Neste trabalho, onde é utilizado o esquema de topologia EDFA bidirecional, os autores analisaram a influência do comprimento da fibra em conjunto com a potência de entrada para este modelo, bem como as características do ganho óptico em valores e posições distintas de bombeamento. São investigadas também no estudo as figuras de ruído em ambos os sentidos de propagação, com o objetivo de obtenção para a melhor configuração para o modelo (MAO et al, 1999).

Milo (2003) estudou um amplificador a fibra dopada com érbio, onde verificou os fundamentos de seu funcionamento e realizou análises de suas diferentes configurações, para bombeamentos de 980 nm e 1480 nm. Os resultados obtidos mostraram que o desempenho do EDFA depende da topologia do circuito óptico escolhida, e das condições de operação do amplificador e do tipo de fibra dopada utilizada.

Oliveira (2004) avaliou experimentalmente uma técnica de controle de ganho totalmente óptica para EDFA's, partindo do princípio da realimentação óptica de uma parcela do ruído de emissão espontânea amplificada (ASE) do amplificador, que passa a operar como um laser responsável pelo controle do ganho EDFA. O autor concluiu que no EDFA projetado, o valor de atenuação da realimentação óptica de 10 dB, contudo o desempenho do amplificador mostrou-se satisfatório, apresentando um ganho por canal de aproximadamente 22,5 dB (oito canais), com uma variação máxima de ganho de 0,4 dB. O autor ainda indica que o amplificador possui características necessárias para utilização como amplificador de linha e pré-amplificador, capaz de prover ganho constante independente da potência de entrada (OLIVEIRA, 2004).

Segundo Rieznik (2006), existe um comprimento ideal da fibra dopada para obtenção de ganho máximo, com potência de bombeamento fixa para as bandas de comunicação C e L. Entretanto, o autor mostra, através de medições de ganho distribuído, a dependência existente entre o comprimento de onda e a potência do sinal mais presente na banda L. Além disso, são obtidos resultados precisos sobre a obtenção do comprimento ideal de EDFA's para a banda de comunicação L.

Em uma análise experimental de diversas topologias de amplificadores a fibra dopada com érbio (EDFA), resultados foram obtidos mostrando que o desempenho do EDFA não depende apenas da topologia utilizada no circuito óptico, mas também de outros parâmetros como potência de bombeamento, comprimento de EDFA e comprimento de onda do sinal de entrada (COELHO, 2007).

Técnicas de controle eletrônico de ganho em amplificadores EDFA em redes configuráveis proporcionam faixa dinâmica entre 22 dB e 23 dB, valores esses próximos da faixa ideal, fazendo com que a técnica eletrônica de controle de ganho possa ser utilizada em EDFA's de redes reconfiguráveis, como amplificadores de potência ou, até, amplificadores de linha (HERBSTER, 2010).

Kaler (2011) analisa topologias que utilizam amplificadores em cascata, comparando características de ganho ótico e figura de ruído. O autor concluiu que o ganho se torna constante quando o comprimento de ambos os amplificadores ultrapassa os 20 m.

No trabalho "*Compensating spectral loss variations in EDFA amplifiers for diferente modulation formats*", foram analisados o desempenho do sistema óptico

constituído por cadeias de amplificadores EDFA para diferentes formatos de dados, como *non-return-to-zero* (NRZ), *retorno a zero* (RZ) e Manchester. Os efeitos sobre as variações espectrais de perdas produzidas na saída da fibra são analisados, assim como a abertura do diagrama de olho. Os autores concluíram que o formato de modulação NRZ é o mais robusto e indicaram o melhor desempenho no link óptico de longa distância, tanto pela abertura do olho na análise dos diagramas, quanto pelo quesito ruído (MALHOTRA; KALER, 2011).

No artigo “*A study of green wavelength-division multiplexed optical communication systems using cascaded fiber bragg grating*”, é analisado o desempenho de ganho óptico de amplificadores ópticos a fibra dopada de érbio para sistemas WDM (*wavelength-division multiplexed optical communication*), projetados com uso de redes Bragg em cascata (FBG – *Fiber Bragg Grating*), as técnicas foram avaliadas através do cálculo da taxa de bit erro (BER - *bit error rate*), e relação sinal-ruído (SNR - *signal-to-noise ratio*). Os autores concluíram que os métodos relatados, resultam em um baixo BER, menos de 10^{-10} , e um baixo consumo de energia para sistemas WDM (THARWAT et al., 2014).

O trabalho “*Remotely pumped hybrid double-pass L-band optical amplifier utilizing chirped fiber Bragg*” propôs experimentalmente um amplificador de banda L, com duplo bombeamento remoto utilizando técnicas de compensação de dispersão. Os autores utilizaram grades de Bragg como elemento reflexivo do sinal amplificado de volta ao meio ativo, a fim de compensar os efeitos de dispersão e bloquear a emissão espontânea amplificada (ASE) e a potência do *pump* residual. O ganho óptico obtido é de 37,5 dB quando o EDFA é colocado a 150 km do transmissor e 48 km antes do terminal de recepção. O ruído é de 4 dB, e melhor BER de 10^{-52} são alcançados (HALEEM et al, 2014).

Em um artigo recente, “*Eye-diagram and Q factor evaluation of fiber ring laser in lightwave transmission*”, é proposto uma topologia em anel para um amplificador óptico a fibra dopada que opera em banda C, e que contém duas cavidades sub-anel e grades de Bragg atuando como filtro óptico de comprimento de onda. Para análise do sistema utilizado, os pesquisadores foram levados em consideração o fator Q e diagrama de olho. Os pesquisadores concluíram que o melhor desempenho do fator Q foi de 11,08 no comprimento de onda 1541,03 nm, e as perdas de potência de aproximadamente 0,448 dB (LIAW et al, 2016).

Em outro trabalho, intitulado “*The effect of ASE reinjection configuration through FBGs on the gain and noise figure performance of L-Band EDFA*”, os autores demonstram experimentalmente, o aumento de ganho proporcionado por um EDFA na banda L, através da reinjeção de amplificação por emissão espontânea (ASE - *Amplified Spontaneous Emission*) em 1533 nm, usando um FBG (*Fiber Bragg Grating*) simples ou duplo em diferentes configurações. Ou seja, o ruído óptico retroalimenta o amplificador e causa um aumento no ganho. Os resultados foram comparados com o desempenho de EDFA na banda C, também bombeados bidireccionalmente. O melhor desempenho do L-EDFA em 1585 nm e para uma potência de sinal de entrada de -30 dBm foi obtido pela reinjeção bidireccional de ASE em um pico de 1533 nm através de duas grades de Bragg (FBG – *Fiber Bragg Grating*), alcançando um aumento de 4,5 dB de ganho e diminuição de 1 dB em NF. Os autores concluíram que a topologia que utiliza duas FBGs, pode ser utilizada para amplificadores de linha em sistemas DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*) de banda L, devido o ganho significativo aliado a uma baixa figura de ruído (DURAK; ALTUNCU, 2017).

No mesmo ano, os autores do trabalho “*Optimum Location of EDFA based on Eye Diagram, Q-factor and Bit Error Rate Metrics*”, analisaram a melhor localização para otimização de um amplificador EDFA, baseados nas métricas de analisadores de BER utilizando o software *Optisystem*. O modelo de simulação utilizou parâmetros como potência de entrada (dBm), ganho de amplificador (dBm), comprimento do cabo de fibra (km) e coeficiente de atenuação (dB/km). Foram testados cinco diferentes locais de EDFA, e os parâmetros de medição usados para medir a qualidade do sinal recebido no receptor foram o fator Q e a taxa de erro de bit (BER), além das análises de diagrama de olho. Os pesquisadores concluíram que para EDFA localizados a 100 km do transmissor, o desempenho é melhor com o BER mais baixo e o maior diagrama de olho aberto. A partir dessa análise, os mesmos identificaram que os EDFA poderiam ser implementados em sistemas ópticos de longa distância (ELMAK; MUSTAFA, 2017).

Neto (2017) analisou amplificadores a fibra dopada com érbio (EDFA) na posição de pré-amplificação. O autor apresentou soluções de topologias e realizou um estudo de simulação onde foram alterados parâmetros a fim de encontrar a melhor configuração para o amplificador. Concluiu-se nesse trabalho que a topologia que usa

a reflexão do sinal em conjunto com a de bombeamento 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 (NETO, 2017)

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Teoria Do EDFA

Neste capítulo, os amplificadores ópticos a fibra dopada com érbio serão discutidos de forma mais ampla, onde serão abordados conceitos fundamentais acerca dos mecanismos utilizados no processo de amplificação óptica, bem como as características deste dispositivo. Inicialmente serão tratados conceitos e análises teóricas existentes sobre os processos de emissão espontânea e emissão estimulada presentes nos amplificadores ópticos de fibra dopada, os níveis de energia do íon érbio, neste caso o elemento presente no estudo. Além disso, serão explicitadas as características mais relevantes do EDFA durante o processo de amplificação em sistemas ópticos, como ganho óptico, o tipo de fibra dopada com érbio, a figura de ruído, a operação do amplificador sob regime de saturação e a emissão espontânea amplificada.

3.2 Amplificadores Ópticos a Fibra Dopada com Érbio

Em qualquer sistema de transmissão, o objetivo de um amplificador é coletar o sinal que leva a informação, amplifica-lo e devolvê-lo para o canal de transmissão ou para o receptor. Nos sistemas ópticos, um feixe de luz é propagado por meio da fibra óptica, que percorrido certas distâncias, sofre atenuação e espalhamento pela fibra. O amplificador, portanto, eleva a intensidade do sinal contendo informação, possibilitando a comunicação entre lugares mais distantes. As primeiras pesquisas de amplificação a fibra dopada com átomos de terras raras são encontradas em (KOESTER; SNITZER, 1963), porém até os dias atuais há um enorme interesse de pesquisadores em desenvolver mais pesquisas sobre o assunto.

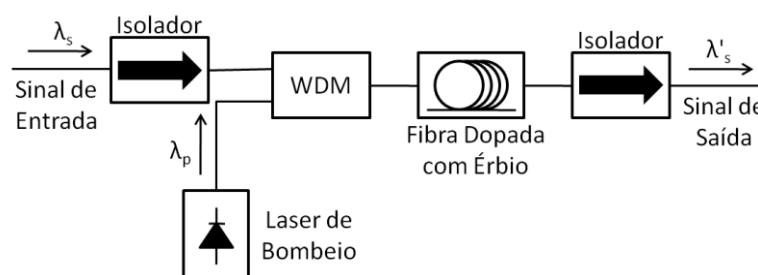
O meio físico onde ocorre o processo de amplificação no EDFA é a fibra dopada com érbio, liberando energia na forma de fótons, em uma faixa de comprimentos de onda em torno de 1550 nm, que coincide com a janela de comunicação onde a fibra apresenta as menores perdas. Para que a fibra dopada com érbio seja apta a fornecer amplificação de sinais em sua faixa de operação, é preciso que os íons de érbio sejam excitados por meio da absorção de alguma forma de energia.

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

O espectro de absorção do érbio possui diversas faixas espectrais que podem ser utilizadas para o bombeamento dos amplificadores. No entanto, por razões referentes ao mercado de lasers semicondutores, apenas duas destas faixas espectrais são utilizadas. Nestas faixas, os comprimentos de onda escolhidos situam-se em 980 nm e 1480 nm. (AGRAWAL, 1992).

Os elementos que constituem a configuração básica de um amplificador óptico a fibra dopada com érbio são a fibra dopada com érbio, o laser de bombeamento, o acoplador WDM, e os isoladores. No entanto, a configuração, o comprimento da fibra dopada e as características destes elementos dependerão da aplicação do amplificador. (OLIVEIRA, 2004).

Figura 1 - Configuração básica de um EDFA.



Fonte: (HERBSTER, 2010).

A Figura 1 ilustra o esquema da configuração básica de um EDFA, bem como os dispositivos utilizados e as respectivas funções que cada um exerce. O acoplador WDM, responsável por acoplar o sinal a ser amplificado juntamente com o sinal de bombeamento simultaneamente na mesma fibra dopada, ou seja, multiplexa os comprimentos de onda. Este dispositivo óptico em sua configuração mais simples é formado por duas portas de entrada e uma saída, combinando comprimentos de onda específicos injetados em sua porta de entrada.

O uso deste tipo de dispositivo vem crescendo em função do seu baixo índice de perdas apresentado. Em acopladores comuns a luz é combinada, porém tem-se uma perda de metade da potência óptica a cada junção. Para sistemas WDM de alto desempenho seriam necessários vários acopladores, consequentemente as perdas acumuladas seriam enormes, inviabilizando o sistema. (DUTTON, 1998).

Pode-se também observar na figura 1, a utilização de isoladores ópticos. Estes dispositivos se caracterizam por permitirem a passagem de luz em apenas uma direção, evitando que reflexões internas voltem pela fibra e comprometam o funcionamento do laser. No EDFA, o isolador óptico é usado para evitar as reflexões oriundas dos conectores de entrada e saída do amplificador. Por fim, temos o *pump laser* ou laser de bombeamento, dispositivo diretamente responsável pela excitação dos íons de érbio, e por proporcionar ganho óptico aos sinais de entrada em torno de 1550 nm.

Os dispositivos mencionados, que representam um estágio básico de configuração de um amplificador óptico, podem ser arrançados de diversas formas, além do que podem ser inseridos demais dispositivos, a fim de obter novas configurações, consequentemente permitindo novas características de operação, ou diferentes aplicações para o amplificador.

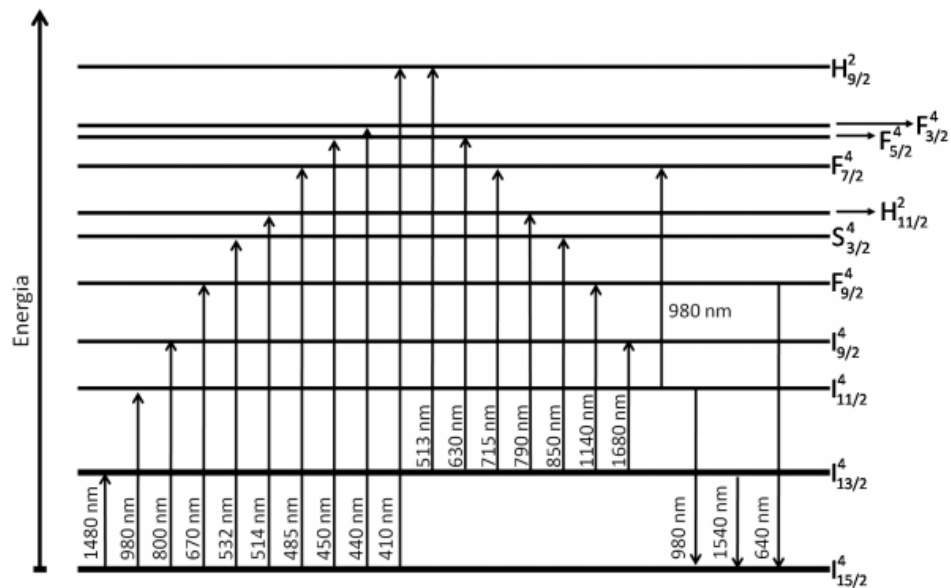
3.3 Mecanismo de Amplificação e Níveis de Energia

No processo de amplificação do EDFA, representados a seguir na figura 2 através de um diagrama de níveis de energia do íon érbio (Er^{3+}), nota-se as transições eletrônicas correspondentes a cada um dos valores mais comuns de comprimento de onda usados no bombeamento, 980 nm e 1480 nm.

A Figura 2 ilustra como acontecem as interações entre os sinais ópticos que propagam na fibra e os íons presentes. Segundo (DESURVIRE; 1994) o nível 1 é denominado de nível fundamental E_1 ($I_{15/2}$), o nível 2 de nível metaestável E_2 ($I_{13/2}$), caracterizado pelo tempo de vida radiativo τ_{21} (s), e o nível 3 denominado de nível de bombeamento E_3 ($I_{11/2}$). As características físicas da fibra, para esta análise, são consideradas constantes. O núcleo é simétrico e composto de vidro de sílica dopada com érbio com densidade N_0 (m^{-3}).

No entanto, na inexistência de um sinal de bombeamento (equilíbrio), as populações de átomos em cada nível de energia podem ser definidas como N_1 , N_2 e N_3 , respectivamente, onde $N_1 > N_2$ e $N_1 > N_3$. Porém, quando existe um sinal de bombeamento, há uma alteração na situação de equilíbrio devido à população de íons dos níveis E_1 poderem absorver os fótons de bombeamento, evoluindo para níveis mais altos de energia.

Figura 2 - Diagrama de níveis de energia do érbio



Fonte: (DESURVIRE, 1994)

De acordo com a lei de Planck, os comprimentos de onda λ que podem permitir tais transições devem obedecer à relação quântica:

$$\lambda = \frac{hc}{\Delta E}, \quad (3.1)$$

onde h é a constante de Planck, c é a velocidade da luz e ΔE é a diferença de energia entre os níveis envolvidos. (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2012).

Porém, os sinais ópticos são geralmente designados por seus comprimentos de onda e menos por suas frequências, para se obter a frequência do sinal óptico a partir do comprimento de onda, pode-se utilizar a Eq. (3.2). Sendo assim, têm-se:

$$\nu = \frac{c}{\lambda} , \quad (3.2)$$

onde c é a velocidade da luz no vácuo e λ o comprimento de onda do sinal óptico. A energia de uma radiação eletromagnética qualquer está associada ao seu comprimento de onda.

No caso do bombeamento de 980 nm, a absorção de fótons pelos portadores provoca transições de E_1 para E_3 . O sistema tende a retornar ao seu estado inicial, portanto os portadores que foram excitados para o nível E_3 tendem a perder sua energia e retornar para o nível fundamental E_1 . Antes disso, parte dos portadores do nível E_3 decaem espontaneamente para o nível metaestável E_2 , perdendo energia na forma de emissões espontâneas não radiativas (DESURVIRE, 1994).

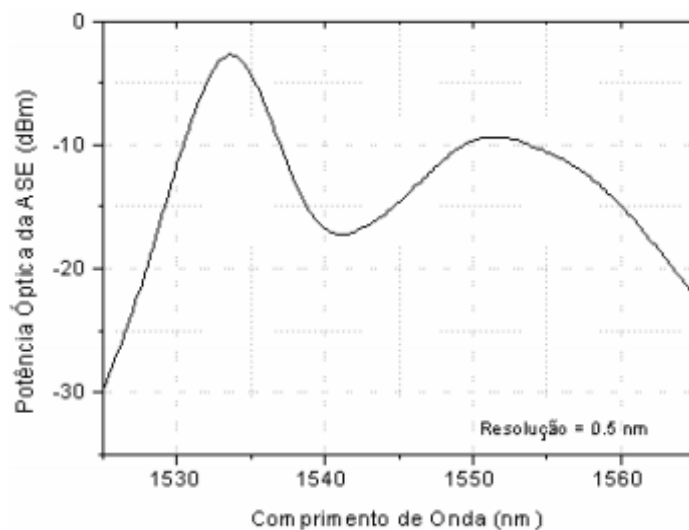
De acordo com (MILO; 2003), o érbio possui uma característica relevante que é o fato de as transições $E_3 \rightarrow E_2$ serem consideravelmente mais rápidas (da ordem de 10^4 vezes) que as transições $E_2 \rightarrow E_1$. Isso implica em uma condição em que a população de portadores do estado fundamental pode ser significativamente reduzida se a potência de bombeamento for alta, tendendo os portadores, se acumularem no estado E_2 . Portanto, o processo de amplificação óptica é garantido através desse processo denominado inversão de população, quando $N_2 > N_1$, tem-se a situação inversa daquela do equilíbrio térmico. A transição dominante de E_2 para E_1 é radiativa, ou seja, os portadores perdem energia através da emissão de fótons estimulados ou espontâneos, em comprimentos de onda em torno de 1550 nm.

No caso, um sinal ao ser acoplado à entrada do amplificador, pode estimular a emissão de fótons coerentes (mesmo comprimento de onda, fase, direção e polarização) ao longo da fibra dopada, produzindo a amplificação óptica desejada. Porém, alguns fótons poderão também ser emitidos quando os portadores decaírem espontaneamente para o nível fundamental. No entanto, referente ao sinal de entrada, estes fótons espontâneos podem ser considerados com um ruído adicional e acabam

sendo elementos indesejados da amplificação. Uma desvantagem do processo de emissão espontânea é o fato de o próprio fóton produzido durante a emissão espontânea na fibra dopada poder estimular o aparecimento de outros fótons. A amplificação do ruído em um EDFA é chamada de emissão espontânea amplificada (*Amplified Spontaneous Emission* - ASE), é responsável por grande parte dos ruídos existentes em um sistema de transmissão que utiliza amplificadores a fibra dopada.

A Figura 3 demonstra o nível de potência óptica da ASE em função do comprimento de onda típico do EDFA. Conforme exposto anteriormente, na relação existente do ganho com o perfil da ASE, nota-se no gráfico uma irregularidade, e se encontra presente em toda a faixa onde o EDFA é capaz de amplificar o sinal óptico. Esta irregularidade nesta amplificação ruidosa que advém do ganho do EDFA torna-se bastante acentuada quando o érbio é o único dopante da fibra.

Figura 3 - Dependência espectral da emissão espontânea amplificada em um EDFA.



Fonte: (OLIVEIRA, 2004)

No bombeamento com comprimento de onda de 1480 nm, a fonte de bombeamento com maior comprimento de onda excita os portadores diretamente para o nível metaestável E_2 . Estas transições dos sub-níveis de menor energia do nível E_1 para os sub-níveis de maior energia do nível E_2 , decorrem da absorção de fótons de bombeamento pelos portadores. Estes por sua vez, tendem a perder energia de forma não radiativa no interior do próprio nível E_2 , resultando em uma quantidade final excitada, permitindo transições no comprimento de onda do sinal. (BECKER; OLSSON; SIMPSON, 1999).

Se o nível de potência de bombeamento for suficiente, irá ocasionar a inversão de portadores, com a ocorrência de decaimentos radiativos do nível E_2 para o nível E_1 . As considerações com relação a ASE do bombeamento de 1480 nm são semelhantes àquelas para o bombeamento de 980 nm. Um dos grandes desafios na pesquisa sobre amplificadores de fibra dopada é reconhecer configurações de amplificadores que maximizem o ganho óptico do amplificador e minimizem a ASE produzida.

3.4 Características do EDFA

3.4.1 Ganho óptico

O ganho é uma das principais características de um amplificador a fibra dopada com érbio, expressado pela razão entre a potência do sinal de saída e a potência do sinal de entrada. Aparentemente, a medida de ganho óptico (dB), não apresenta dificuldades técnicas, porém, no caso do EDFA, fatores específicos podem influenciar o valor final da figura de ganho. Dentre os principais, temos: a topologia de montagem do circuito, comprimento da fibra dopada, potência de bombeamento, potência do sinal a ser amplificado, comprimentos de onda de bombeamento do sinal de entrada, perdas do sistema, dentre vários outros. (BECKER; OLSSON; SIMPSON, 1999).

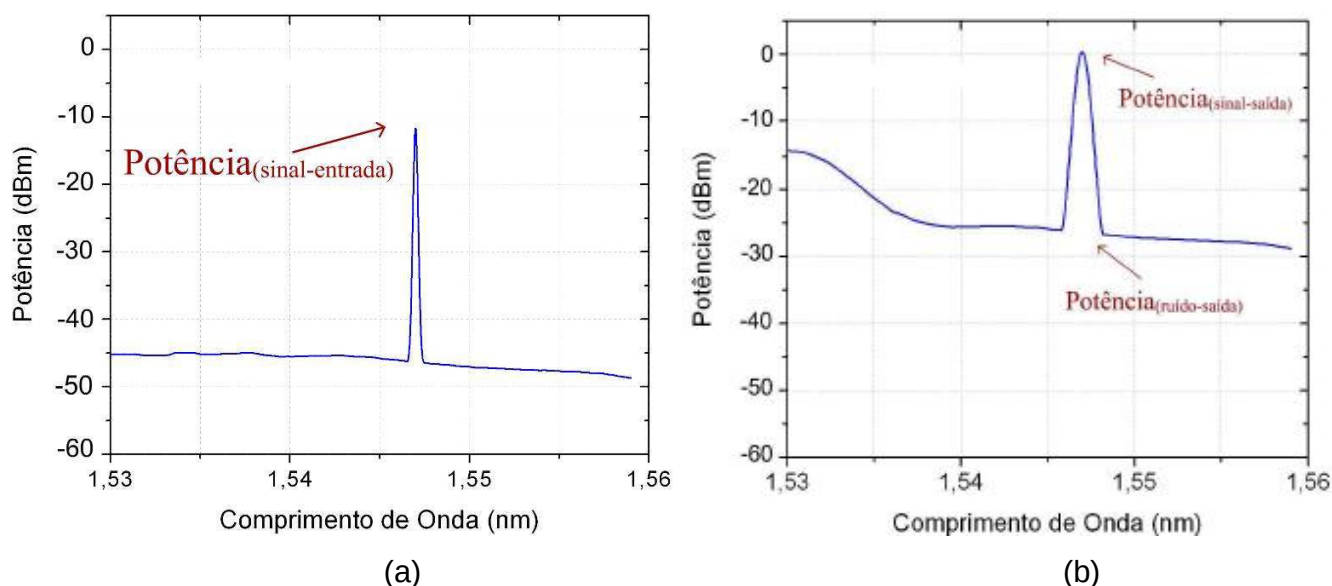
O ganho óptico pode ser definido através da Equação (3.3) onde é expresso na relação logarítmica os valores de potência do sinal de entrada, potência do sinal de saída e evolução da ASE. Este último pode influenciar diretamente as medidas de ganho, pois em alguns casos, essa potência pode suplantear o sinal óptico amplificado.

$$G(dB) = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{\text{sinal-saída}} - P_{\text{ruído-saída}}}{P_{\text{sinal-entrada}}} \right), \quad (3.3)$$

Para melhor compreensão da Equação (3.3), que mostra o ganho óptico obtido através da relação do sinal óptico na entrada com a saída do EDFA após o sinal ser amplificado, destaca-se na Figura (3.3) comparativos de pontos que indicam o sinal de entrada e de saída, além da potência do ruído.

Assim como amplificadores eletrônicos, o EDFA também pode chegar à saturação de ganho. A saturação geralmente acontece quando a potência de entrada do amplificador está em torno de algumas centenas de mW. No entanto, o quantitativo de potência para ocorrer a saturação depende de algumas características de operação do EDFA. Vale ressaltar que a contribuição da ASE não pode ser descartada para a potência de saturação. Exemplificado sistemas em que a potência do sinal de entrada é baixa, o próprio ruído ASE tende a saturar o amplificador.

Figura 4 – Representação do sinal óptico: (a) na entrada do EDFA e (b) após ser amplificado.



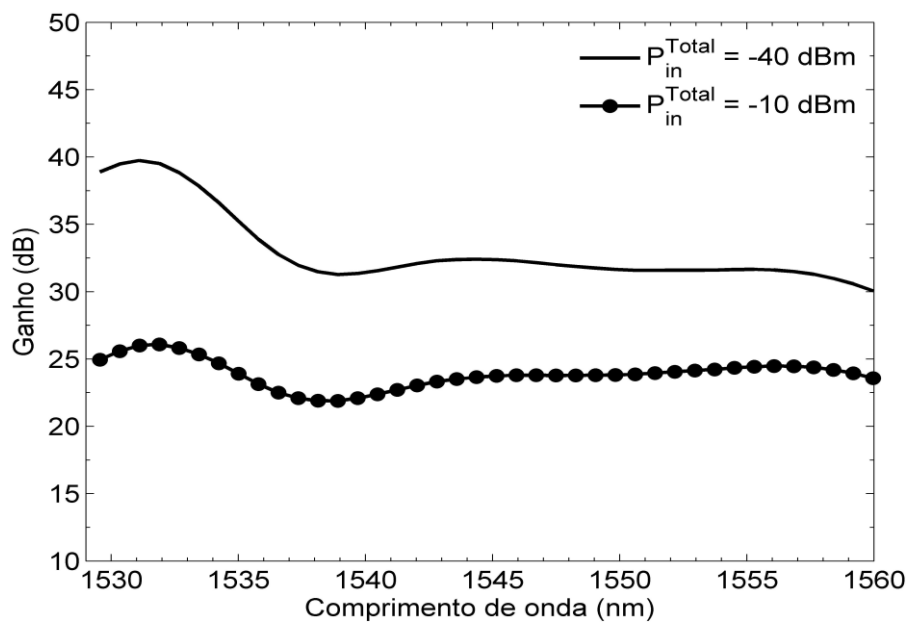
Fonte: (COELHO, 2007)

A Figura 4 ilustra curvas de ganho em função dos comprimentos de onda para dois níveis de potência de entrada, -40 dBm e -10 dBm, baixa potência e potência próxima a região de saturação. Nota-se que o nível de saturação do EDFA proporciona uma maior constância no mérito de ganho. Em contrapartida, na região de menor potência, os valores de ganho do EDFA comparados com a outra curva, é em torno de 15 dB a mais. Pode-se concluir que o ganho na região saturada apresenta uma menor dependência com o comprimento de onda do sinal de entrada, justificada pela auto-saturação do amplificador.

Contudo, o ganho na região de saturação não é parâmetro básico de referência para o amplificador, por ser bastante dependente da potência de entrada. Portanto, quando o fabricante predispõe o valor de ganho, este corresponde ao valor do ganho

de pequeno sinal, pois este parâmetro é independente do nível de potência de entrada do EDFA, tendo uma dependência mais acentuada na potência de bombeamento. Contextualizando, de acordo com a potência do sinal de entrada, o pico de ganho poderá chegar na faixa de 30 dB a 40 dB.

Figura 5 - Simulação do perfil de ganho em função do comprimento de onda para um EDFA.



Fonte: (HERBSTER, 2010)

Neste contexto, podemos concluir que é possível alcançar a obtenção de ganhos um pouco maiores de acordo com a modificação de parâmetros de configuração para o dispositivo, como será exposto no Capítulo adiante. Foram realizadas nesta pesquisa medidas através de simulações para verificação da alteração do ganho no amplificador devido a adaptações no circuito óptico. Além disto, foram feitas diversas interações entre os parâmetros como comprimento da fibra dopada, vários valores de potência de bombeamento e do sinal de entrada, assim como a análise de outros tipos de topologia.

3.4.2 Figura de Ruído

O processo de amplificação óptica do EDFA é acompanhado por um fenômeno degradante conhecido como ASE, que adiciona o ruído, degradando a saída conforme mencionado na secção anterior. Esse processo cresce à medida que os fótons emitidos pelo decaimento espontâneo são amplificados ao longo da EDFA. Com isso, a figura de ruído (NF – *noise figure*) deve ser tido como relevante na caracterização do EDFA, já que é razão entre a relação sinal ruído (SNR – *signal to noise ratio*) da saída do amplificador com a SNR da entrada do amplificador. De acordo com a definição clássica, adotada pela ITU-T (*International Telecommunication Union*), a figura do ruído é definida pela expressão (3.4)

$$SNR = \frac{SNR_{in}}{SNR_{out}}, \quad (3.4)$$

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

Existem diversos métodos de medição para a figura de ruído em um sistema óptico. Entre eles, destaca-se o método com interpolação espectral, onde é necessário que se faça uma interpolação de pontos no espectro do sinal óptico amplificado, com o objetivo de determinar o valor aproximado da potência de ASE. (MOVASSAGHI; JACKSON; SMITH; HALLAM, 1998).

Calcula-se a figura de ruído a partir da Equação (3.5):

$$NF = \frac{P_{ASE}}{h\nu G \Delta\nu} + \frac{1}{G}, \quad (3.5)$$

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

A figura de ruído, é portanto influenciada predominantemente pelo fator de inversão de população n_{sp} , expressamente relacionado entre as taxas de emissão

espontânea e emissão estimulada. Define-se o fator de inversão de população como sendo:

$$N_{sp} = \frac{N_2}{N_2 - N_1} , \quad (3.6)$$

onde N_2 é a densidade eletrônica no estado excitado e N_1 é a densidade eletrônica no estado fundamental. O valor ideal da figura de ruído nos EDFA's é de 3 dB (BECKER; OLSSON; SIMPSON, 1999), assim como em SOA's (KAZOVSKY; BENEDETTO; WILLNER, 1996). Contudo, pode-se concluir que quanto maior a potência de ASE, maior será a figura de ruído, isso implica que, os comprimentos de onda com seção transversal de emissão elevada possuem maior potência de ASE, devido à emissão espontânea.

3.5 Fibra Dopada com Érbio

Os amplificadores EDFA possuem como principal elemento de composição a fibra dopada com érbio. A fibra dopada de érbio é do tipo monomodo, sendo produzida pelas técnicas de deposição modificada de vapor químico (MCVD – *modified chemical vapor deposition*) e pela técnica de deposição axial de vapor (VAD – *vapor axial deposition*), que permitem adicionar érbio uniformemente ao longo de todo núcleo da fibra óptica (BECKER, 1999). A utilização dessas técnicas possibilita a obtenção de altos níveis de controle no índice de refração, durante o processo de elaboração da fibra.

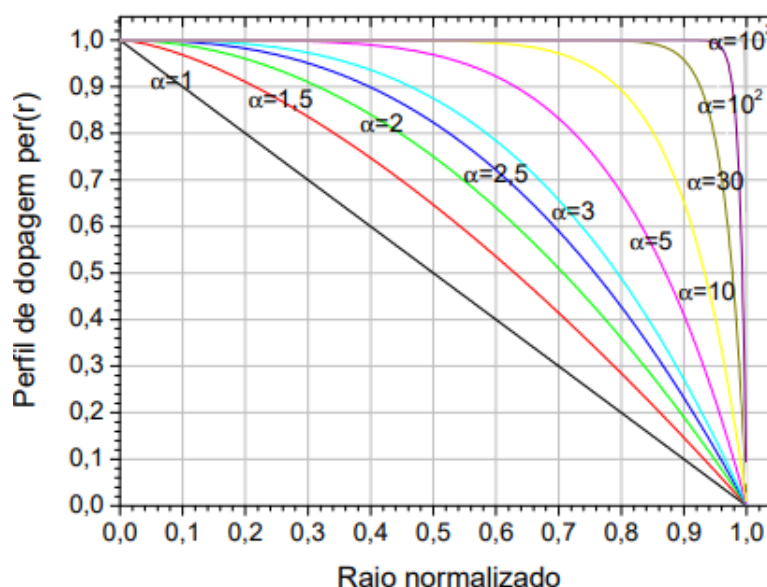
De acordo com Bjarklev (1993), a função utilizada na representação da dopagem da fibra para a modelagem do EDFA pode ser escrita como:

$$per(r) = 1 - \left(\frac{r}{a_c}\right)^\alpha , \quad (3.7)$$

onde α é termo responsável por desviar o perfil de dopagem do padrão ideal (retangular), aproximando a simulação dos resultados obtidos na prática. A figura 6 ilustra o perfil de dopagem em função da distância normalizada em relação ao eixo

óptico da fibra, em alguns valores de α . Conclui-se que a medida que os valores de α aumentam, mais próximo $per(r)$ se torna do perfil degrau ideal, ou seja quando estes tendem ao infinito. Pode-se observar ainda na Figura 6, que para $\alpha = 1000$, obtém-se um perfil semelhante ao de um degrau, em contrapartida quando o valor de $\alpha = 1$, possui um perfil triangular.

Figura 6 - Perfil $per(r)$ em função do raio normalizado (r/a_c), tendo α como parâmetro.



Fonte: (MARTIN, 2007).

Para fibras com baixa concentração de dopagem no núcleo, é necessário que haja uma pequena diferença entre os valores dos índices de refração do núcleo e da casca. Este tipo é normalmente utilizado em aplicações que objetivam alta potência de saída ao invés de ganho óptico, e uma potência de bombeamento mínima. Segundo (COELHO; 2007), a vantagem desse tipo de fibra, é que uma vez aumentando o núcleo, eleva-se o limiar de potência necessário para o bombeamento possa auxiliar no ganho óptico do EDFA. Portanto, para amplificadores de potência, é preferível que a EDFA possua um menor núcleo e um contraste acentuado entre os índices de refração do núcleo e da casca da fibra.

3.6 Dispositivos Ópticos

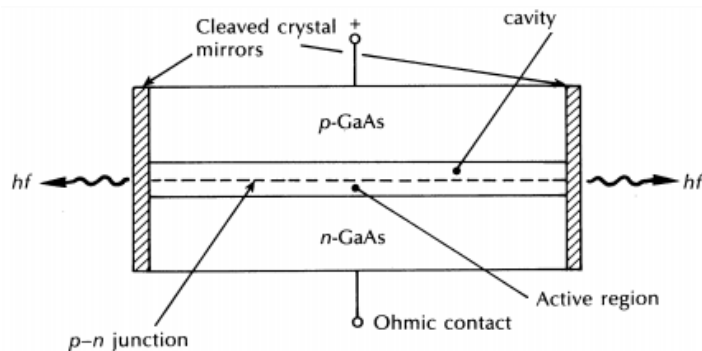
Nesta seção, vamos apresentar alguns dispositivos utilizados na construção dos circuitos ópticos, bem como suas características e os princípios de funcionamento. Basicamente serão comentados sobre os isoladores, os acopladores WDM, lasers semicondutores, grades de Bragg (*Fiber Bragg Grating*).

3.6.1 Lasers Semicondutores

Em sistemas de comunicação óptica, as fontes ópticas mais usadas são o LED (*light-emitting diode*) e o laser (*light amplification by stimulated emission of radiation*). O laser do tipo semicondutor, mais usual no momento, possui algumas vantagens em comparação com o LED, e outros tipos disponíveis comercialmente. O tamanho é uma grande vantagem que o laser semicondutor possui, pois facilita o acoplamento da luz do dispositivo à fibra óptica e a outros dispositivos, tendo em vista que é eficiente na conversão de energia elétrica em energia luminosa. Outras qualidades desse tipo de dispositivo é que o tempo de vida útil é relativamente considerável, a utilização de modulação direta através da variação da corrente de polarização da luz, que permite altas taxas de bits. Por fim, o custo mais baixo do laser semicondutor em comparação com o LED (AGRAWAL, 1995).

Analisando o princípio físico, como mostra a figura 7, o laser possui uma estrutura simples no formato de um paralelepípedo dividido em três camadas, com camadas $p-n$, e um núcleo central entre elas, denominado de região ativa. Este dispositivo é essencialmente um amplificador óptico no interior de uma cavidade refletora, que atinge uma condição de oscilação ocasionada pela reflexão da luz nas faces clivadas dessas cavidades, as quais atuam como semi-espelhos.

Figura 7 – Estrutura básica de um laser semiconductor

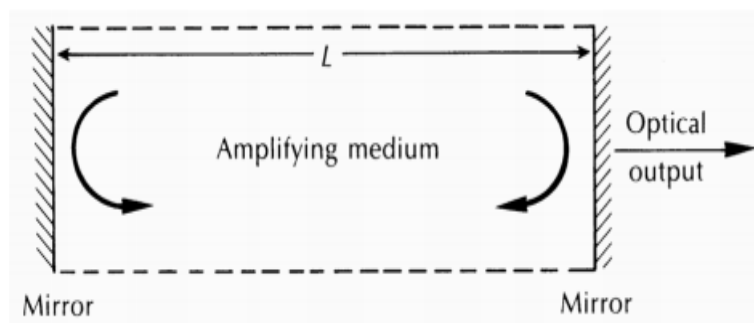


Fonte: (KEISER, 2001).

Os elétrons livres na banda de condução tendem a migrar para banda de valência para ocupar um estado quântico vazio. Para que ocorra efetivamente esse processo, os elétrons precisam liberar a correspondente diferença de energia, como por exemplo, em forma onda eletromagnética, fenômeno conhecido como eletroluminescência. No caso de interação dos elétrons com os fótons presentes na estrutura, configura-se a emissão estimulada.

A figura 8 ilustra um processo existente nos lasers conhecido como realimentação óptica. Este processo ocorre dentro de uma cavidade ressonante espelhada, que permite sintonizar um comprimento de onda desejado afim da obtenção de ganho em apenas um modo longitudinal além de prover uma irradiação coerente, suprimindo os modos restantes. Vale ressaltar que através do ajuste na posição do espelho ΔL é possível selecionar a frequência central de ressonância.

Figura 8 – Processo de realimentação óptica em um laser semiconductor.



Fonte: (KEISER, 1992).

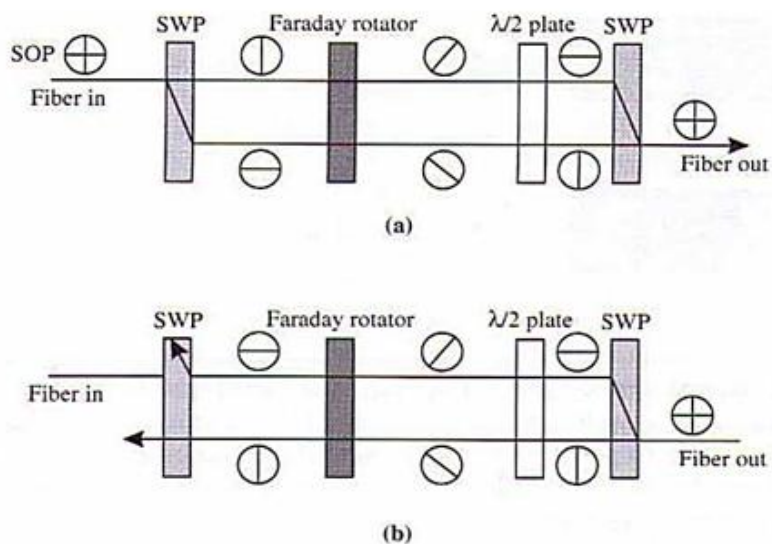
Neste trabalho foram utilizados dois tipos de lasers sintonizados nos comprimentos de onda diferentes nas simulações computacionais, onde um atua na simulação da informação e o outro no bombeamento. O primeiro laser utilizado no projeto para simulação do envio das informações é um laser ideal semiconductor de onda contínua (*Continuous Wave*) com 10 MHz de largura espectral (OPTIWAVE, 2017). 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 trata-se, também de um laser ideal semiconductor, configurado em dois comprimentos de onda distintos, com valores de 980 nm e 1480 nm.

3.6.2 Isoladores 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. Em circuitos de EDFA, o isolador óptico é comumente utilizado imediatamente após o laser de bombeamento e do laser do sinal óptico, porém pode ser usado em outras posições.

Como a luz é lançada com certo estado arbitrário de polarização dentro de um isolador através do sinal de entrada, dentro do isolador, este sinal deverá ser tratado de acordo com alguns componentes de funções específicas. Neste contexto, a figura 9 ilustra um sinal passando por um dispositivo denominado polarizador de desvio espacial (SWP – *Spacial Walk-off Polarizer*), que divide o sinal óptico em dois componentes polarizados ortogonalmente, onde um componente segue no sentido do sinal e o outro é desviado por um caminho alternativo (COELHO, 2007).

Figura 9 - Princípio de funcionamento de um isolador óptico independente do estado de polarização: (a) o sinal se propaga no sentido da esquerda para a direita; (b) o sinal se propaga no sentido da direita pra esquerda.



Fonte: (SHI et al., 2006).

Estes dispositivos utilizam o Efeito Faraday, que através de um girador de polarização do sinal óptico, têm os sinais combinados por outro SWP, posteriormente lançados para o terminal de saída do isolador óptico (FUJII, 1991).

Nas topologias que serão apresentadas em breve e posteriormente simuladas, serão utilizados isoladores ópticos para evitar que as reflexões alterem os resultados.

3.6.3 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, ou seja, o dispositivo consegue sobrepor dois sinais ópticos, advindos de fibras distintas, em uma única fibra óptica. A estrutura mais simples deste acoplador possui duas entradas e uma saída, que têm a função de combinar o sinal óptico de informação a ser amplificado (na faixa de 1550 nm), com o sinal de bombeamento (980 nm ou 1480 nm), dentro de uma única fibra e com baixas perdas.

Portanto, é viável a frequente utilização destes dispositivos em sistemas ópticos de grande capacidade de tráfego, pelo fato dos índices baixos de perdas de

inserção. Contudo, é indispensável que o dispositivo maximize a isolamento entre as bandas, afim de reduzir os efeitos de intermodulação, principalmente quando estiver sendo utilizado como um de-multiplexador (DUTTON, 1998).

Para sistemas de alto desempenho seria necessária a utilização de vários acopladores WDM, com isso as perdas acumuladas seriam muito grandes tornando o sistema inviável. Neste trabalho foi utilizado um acoplador WDM ideal, por isso evitou-se as perdas com acoplamento entre lasers, e efeitos de reflexão e intermodulação indesejados.

3.6.4 *Fiber Bragg Grating* (FBG)

A grade de Bragg de fibra, também chamada de filtro óptico, em sua forma mais simples, consiste em uma secção de fibra monomodo, que permite a modulação periódica do índice de refração através do seu núcleo. Esses filtros ópticos são responsáveis por selecionar comprimentos de onda a serem transmitidos, e comprimentos de onda que retornarão para o sistema, ou seja, reflete os comprimentos de onda ressonantes e transmite os comprimentos de onda não ressonantes.

A condição de funcionamento de uma FBG é satisfatória quando as contribuições de reflexão da luz por parte de cada plano da grade, construtivamente devolvem na direção contrária, um pico retro-refletido com um comprimento de onda específico, definido pelos parâmetros da grade. Essa condição da grade de Bragg é simplesmente um requisito que satisfaz tanto a conservação de energia, quanto a de momento, expresso em $(\hbar\omega_f = \hbar\omega_i)$, onde a energia de conservação requer que a frequência de radiação incidente e a radiação refletida sejam a mesma. (OTHONOS, 1997).

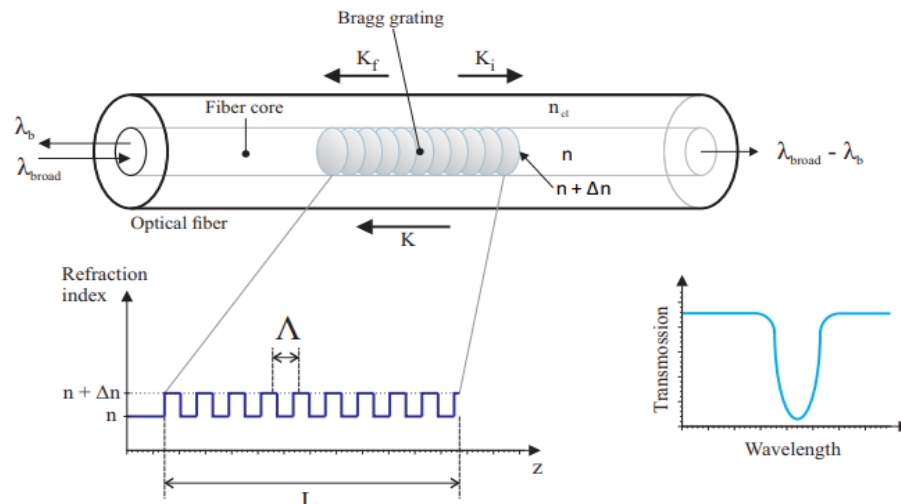
Conforme expresso na Equação (4.1), a conservação de momento requer que o vetor de onda incidente K_i , somado ao vetor de onda de grade K , seja igual ao vetor de onda da radiação dispersa K_f .

$$K_i + K = K_f, \quad (3.8)$$

onde o vetor de onda de grade K , possui uma direção normal para com os planos da

grade, além de uma magnitude $2\pi / \Lambda$, (onde Λ é o espaçamento da grade), como mostra a Figura 10.

Figura 10 - Ilustração de uma rede uniforme de Bragg com índice constante de modulação, amplitude e período. Os feixes de onda incidentes e difratados e devem ser combinados no momento a ser conservado.



Fonte: (PFRIMER, 2013).

Conforme ilustrado na Figura 10, percebemos que o vetor da onda difratada e o vetor da onda incidente, são iguais em amplitude e intensidade, mas direções opostas. Portanto, a condição de conservação do momento torna-se possível em:

$$2 \left(\frac{2\pi n}{\lambda_B} \right) = \left(\frac{2\pi}{\Lambda} \right), \quad (3.9)$$

Podendo ser simplificado para a condição de primeira ordem de Bragg, como mostra a Equação (4.3)

$$\lambda_B = 2n_{eff} \Lambda, \quad (3.10)$$

onde λ_B representa o comprimento de onda da rede de Bragg. Apenas comprimentos de onda muito próximos de λ_B serão refletidos pela grade dentro do núcleo da fibra. Os outros comprimentos de onda serão transmitidos.

3.6.4.1 Refletividade da Grade de Bragg

Uma grade de Bragg dentro de uma fibra óptica tem seu índice de refração dado pela expressão representado na Equação (4.4) (ERDOGAN, 1997).

$$n(z) = \bar{n}(z) + h(z) \cos \left(\frac{2\pi z}{\Lambda} + \phi(z) \right), \quad (3.11)$$

Na expressão da Equação (1.6) z é a variável independente que representa a direção de propagação, $\bar{n}(z)$ representa o valor médio da modulação do índice de refração calculado ao longo do período Λ , $h(z)$ e $\phi(z)$ é a amplitude e a periodicidade da modulação do índice de refração induzida. Se a fase $\phi(z)$ varia ao longo da direção z pode-se dizer que a grade apresenta um *chirp*, o que significa que o período da grade varia ao longo da estrutura. Quando a amplitude $h(z)$ varia ao longo da fibra, os picos laterais do perfil de reflexão podem ser minimizados.

Através da teoria do modo acoplado (LAM; GARSIDE, 1981), que descreveu as propriedades da reflexão de uma grade de Bragg em fibra, a refletividade de uma FBG com amplitude de modulação constante $h(z)$, e período constante é dado pela seguinte expressão:

$$R(l, \lambda) = \frac{\Omega^2 \sinh^2 (sl)}{\left(\frac{\Gamma}{2}\right)^2 \sinh^2 (sl) + s^2 \cosh^2 (sl)}, \quad (3.12)$$

Onde tem-se, $R(l, \lambda)$ representando a refletividade em função do comprimento da grade, l e comprimento de onda λ . O termo Ω é o coeficiente de acoplamento e Γ representa o vetor de onda para determinado comprimento de onda da banda espectral da fonte óptica. O vetor de onda Γ é dado na expressão (4.6) como sendo:

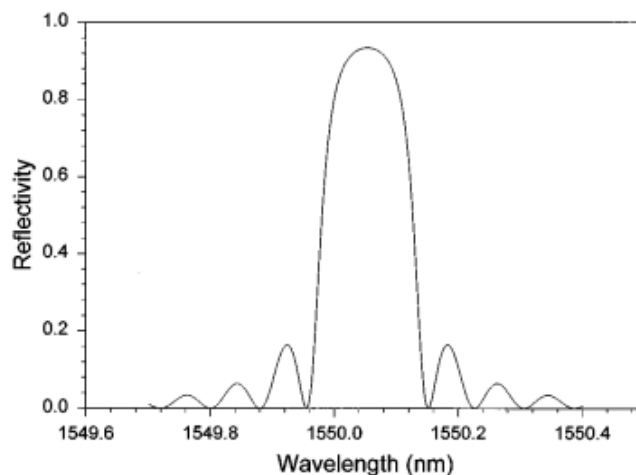
$$\Gamma = \left(2 \frac{\pi n_{\text{eff}}}{\lambda} \right) - \left(\frac{2\pi}{\Lambda} \right), \quad (3.13)$$

No comprimento de onda central da grade de Bragg, não há desvanecimento do detector de ondas, em outras palavras, $\Gamma = 0$. Portanto, a expressão para a refletividade se torna a expressão descrita em 4.7 (ALBERT, 2011).

$$R(l, \lambda) = \tanh^2 (\Omega), \quad (3.14)$$

A refletividade aumenta conforme o índice de refração induzido também aumenta. Da mesma forma que, à medida que o comprimento da grade aumenta, o mesmo acontece com a refletividade resultante. A relação entre a refletividade do espectro em função do comprimento de onda é mostrado na Figura 11. Os lóbulos laterais da ressonância surgem devido as múltiplas reflexões ocorridas nas extremidades opostas da região da grade.

Figura 11 - Espectro de reflexão da Grade de Bragg em função do comprimento de onda.



Fonte: (Othonos, 1997)

Neste capítulo foi exposta uma breve análise teórica sobre o funcionamento do EDFA. Primeiramente, foram discutidos os conceitos fundamentais dos processos de amplificação óptica. Em seguida, foram demonstrados os sistemas de níveis de energia e algumas das características do EDFA foram apresentadas, bem como parâmetros de representação de dopagem da fibra de érbio. Além disso, foram expostos os conceitos e características dos dispositivos utilizados no circuito óptico.

4 Metodologia

O programa *OptiSystem* versão 13.0 foi a ferramenta computacional utilizada nesse estudo, onde ele nos permite que sejam realizadas simulações de sistemas de telecomunicações e de outras aplicações. Para isto, dispõe de várias bibliotecas com diversos componentes utilizados nos sistemas reais, permitindo aos usuários planejar, testar e simular enlaces ópticos na camada de transmissão de redes ópticas modernas (OPTIWAVE, 2010). Os resultados obtidos nas simulações de cada cenário proposto serão avaliados conforme estão dispostos nas seções posteriores.

Neste trabalho, investigamos a performance do amplificador a fibra dopada com érbio, utilizando a técnica de reciclagem de bombeamento através do dispositivo grade de Bragg. A metodologia é disposta em oito cenários distintos, onde as configurações de cada cenário proposto são analisadas separadamente ensaio a ensaio. Foram variados os parâmetros como potência do laser de bombeamento, potência do sinal e o comprimento da fibra dopada, objetivando a obtenção dos ensaios que apresentem os melhores valores de ganho óptico e máximo fator de qualidade (*Q-Factor*). Por fim, foram separadas as situações mais eficientes, do uso da técnica aplicada, a fim de terem os respectivos diagramas de olho na saída comparados, apresentando conseqüentemente a configuração mais coerente para o estágio de pré-amplificação óptica na banda C de comunicação utilizando EDFA.

4.1 Métodos de avaliação de desempenho

A forma mais comum de avaliar o desempenho de um sistema é através da probabilidade de erro binário, BER (*bit error rate*), que quantifica o número de símbolos binários detectados erroneamente relativamente àqueles que foram enviados. De acordo com (Lima, 2003), a probabilidade de erro pode ser descrita de acordo com a Equação (4.1).

$$BER \cong \frac{\exp(-Q^2/2)}{Q\sqrt{2\pi}}, \quad (4.1)$$

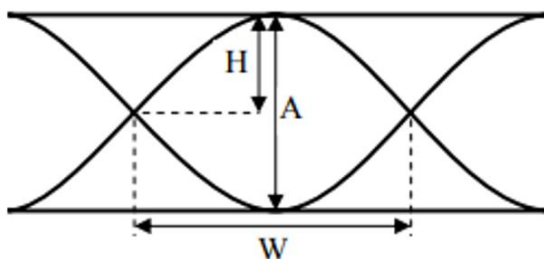
onde Q é considerado o fator de qualidade, sendo entendido como a relação sinal-ruído em termos de amplitudes. O fator de qualidade é dado pela Equação (4.2)

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1 - \sigma_0} , \quad (4.2)$$

Em resumo, o fator Q mede a qualidade de um sinal de transmissão em termos de sua relação sinal-ruído (SNR). Para isso, é preciso levar em consideração os danos causados ao sinal, como, por exemplo, ruído, dispersão cromática e qualquer polarização ou efeitos não lineares, que podem degradar o sinal e, finalmente, causar erros de bit. Em outras palavras, quanto maior o valor do fator Q, melhor o SNR e, portanto, menor a probabilidade de erros de bit (MUKAI et. al., 1982).

Outra maneira de análise do sinal é o diagrama de olho, ferramenta que utiliza a técnica de análise estatística do sinal, basicamente de forma qualitativa. O Diagrama de Olho é obtido através da superposição de certa quantidade de amostras do sinal, colhidas no domínio do tempo, de uma forma que cada símbolo fique sobreposto ao outro. Essas amostras recebidas devem ser sincronizadas de acordo com o sinal transmitido (SKLAR, 2001).

Figura 12 – Principais definições de um Diagrama de Olho



Fonte: (COOMBS, 1995).

Na Figura 12, a distância A representa a abertura do olho, a distância H representa a altura do olho, e a distância W é a chamada largura do olho. O diagrama que apresenta essas distâncias bem definidas será representado por um sinal com baixas taxas de erro.

4.2 Setups Simulados

Quadro 1. Distribuição das configurações simuladas.

Bombeamento (nm)	Sentido do bombeamento	Topologia	Cenário
980	Co-propagante	Sem reflexão de bombeamento	Cenário 1
		Com reflexão de bombeamento	Cenário 2
	Contra-propagante	Sem reflexão de bombeamento	Cenário 3
		Com reflexão de bombeamento	Cenário 4
1480	Co-propagante	Sem reflexão de bombeamento	Cenário 5
		Com reflexão de bombeamento	Cenário 6
	Contra-propagante	Sem reflexão de bombeamento	Cenário 7
		Com reflexão de bombeamento	Cenário 8

Fonte: Próprio autor.

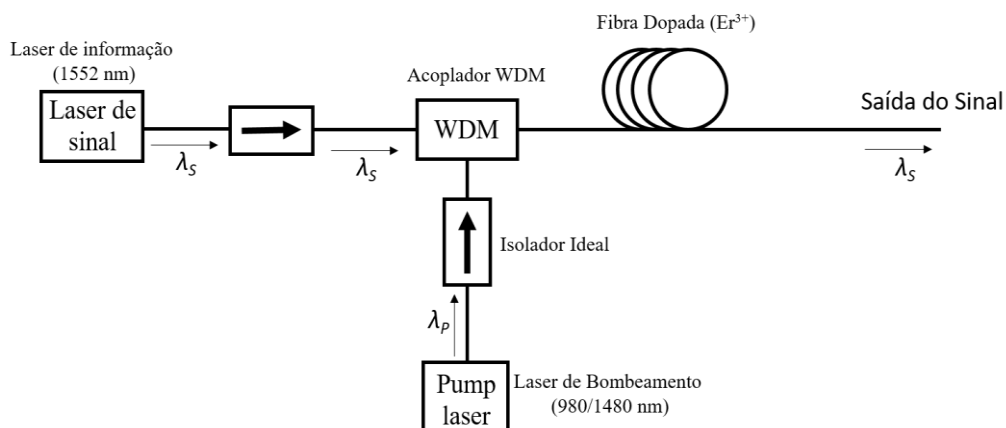
Inicialmente, os testes dividem-se entre os valores utilizados para os comprimentos de onda dos laser de bombeamento, $\lambda_P = 980$ nm e $\lambda_P = 1480$ nm respectivamente, tendo posteriormente o sentido do bombeamento variado em co-propagante e contra-propagante. Para cada topologia, foram simulados diversos níveis de potência dos lasers de bombeamento, com valores de 5 mW, 10 mW, 20 mW, 50 mW e 100 mW, a fim de se obter uma análise mais detalhada da resposta do EDFA. Outro parâmetro também modificado dentro das configurações estudadas foi o comprimento da fibra dopada, tendo sido assumidos os valores de 2 m, 4 m, 6 m, 8 m e 10 m, e potências ópticas do sinal de entrada a ser amplificado com valores de -

30 dBm, -25 dBm, -20 dBm, -15 dBm, -10 dBm, -5 dBm, 0 dBm, 5 dBm e 10 dBm, sendo todos estes fixados com comprimento de onda de 1552 nm. Posteriormente cada cenário configurado é testado novamente para as topologias reflexivas, que passam a receber um dispositivo que irá refletir o sinal de bombeamento. A partir disto, os cenários com e sem reflexão são comparados em termos de ganho e qualidade do sinal na saída do amplificador com análise dos respectivos diagramas de olho.

4.2.1 Co-propagante sem Grade de Bragg

A Figura 13 representa a configuração básica co-propagante do primeiro amplificador EDFA testado. Um laser de onda contínua (*CW – Continuous Wave*) gera um sinal óptico que será modulado externamente por um modulador *Mach-Zehnder*, tendo sua potência ajustada de acordo com os ensaios. O comprimento de onda é fixado em 1552 nm, para simularmos a Banda C de comunicação óptica. O bombeamento inicialmente é colocado no mesmo sentido da propagação do sinal, tendo seu comprimento ajustado em 980 nm, com potências de operação variando entre 5 mW e 100 mW. Isoladores ópticos foram posicionados após os lasers para evitar reflexões indesejadas. Os elementos citados são interligados através de um acoplador WDM, posteriormente conectado a fibra dopada. Os resultados dos testes de simulação dos cenário 1 (980 nm) e cenário 5 (1480 nm) partirão destes setups co-propagantes não reflexivos.

Figura 13 – Diagrama esquemático do EDFA com bombeamento co-propagante.

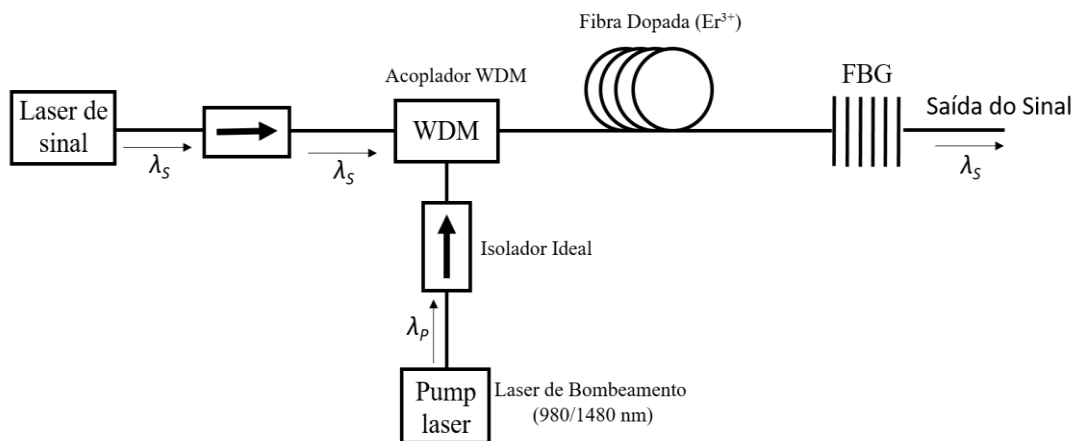


Fonte: próprio autor

4.2.2 Co-propagante sem Grade de Bragg

Na Figura 14 inserimos o dispositivo passivo reflexivo posicionado após a fibra dopada com érbio, a fim de melhorar o desempenho do amplificador. A grade de Bragg terá a função de refletir o comprimento de onda do sinal bombeado, fazendo com que o mesmo retorne pela fibra dopada, elevando novamente os íons do elemento dopante. Espera-se que essa retro-alimentação proporcione uma melhoria no rendimento do amplificador, objetivando consideráveis valores de ganho, sem que o sinal seja degradado, e nem que haja perda de bits. Os resultados dos testes de simulação dos cenários 2 (980 nm) e cenário 6 (1480 nm) são provenientes destes setups co-propagantes com reflexão do sinal de bombeamento.

Figura 14 – Diagrama esquemático para o EDFA com bombeamento co-propagante refletido.



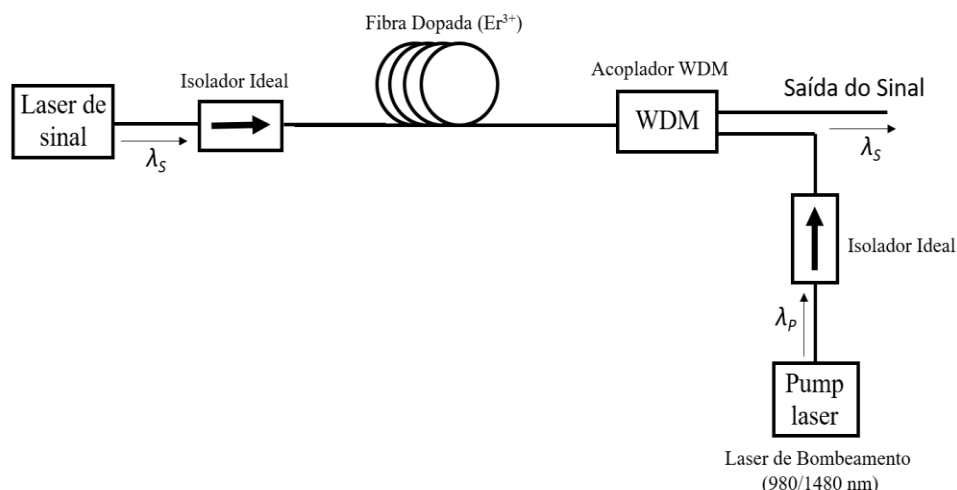
Fonte: próprio autor.

4.2.3 Contra-propagante sem Grade de Bragg

Nesta seção, é apresentada outra configuração básica do EDFA, desta vez, contendo um laser de bombeamento no sentido contrário da propagação do sinal que desejamos amplificar, ou seja, o laser de bombeamento é colocado na extremidade de saída do amplificador. Essa é a modificação mais simples que pode ser feita na configuração original do EDFA. Tal amplificador é mostrado na Figura 15. Os resultados dos testes de simulação dos cenários 3 (980 nm) e cenário 7 (1480 nm)

partirão destes setups contra-propagantes sem a reflexão do sinal de bombeamento pela grade de Bragg.

Figura 15 – Diagrama esquemático para o EDFA básico com bombeamento contra-propagante

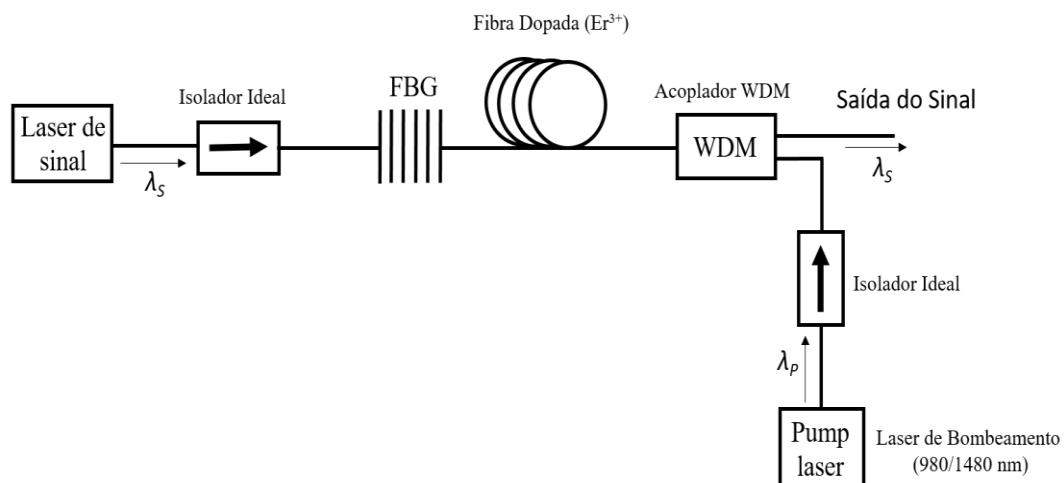


Fonte: próprio autor.

4.2.4 Contra-propagante com Grade de Bragg

Como é possível perceber, na Figura 16 o amplificador é modificado em termos de sentido de bombeamento, onde passa a ser contra a propagação do sinal a ser amplificado. Além disso, é adicionado uma grade de Bragg que irá realimentar o sistema com possíveis potências residuais. A presença da Grade de Bragg após o primeiro isolador do laser de sinal irá refletir apenas o comprimento de onda do laser de bombeamento, deixando passar normalmente os demais sinais pela fibra dopada. Os resultados dos testes de simulação dos cenário 4 e cenário 8 são originados destes setups contra-propagantes e com a presença do dispositivo de reflexão do sinal de bombeamento.

Figura16 – Diagrama esquemático para o EDFA com bombeamento contra-propagante refletido.



Fonte: próprio autor

4 RESULTADOS

Neste capítulo, serão apresentados e discutidos os resultados obtidos através de simulações de alguns cenários possíveis para a montagem de um amplificador óptico utilizando o software *Optisystem* versão 13.0.

5.1 Comprimento de onda do laser de bombeamento (980 nm)

O núcleo de uma EDFA possui íons de érbio, que, ao serem bombeados com um adequado comprimento de onda, provêm ganho óptico por inversão de população, e o espectro de ganho depende do esquema de bombeamento. É possível ter eficiência no bombeamento de EDFA's com o uso de laser semicondutores operando com comprimentos de onda nas proximidades de 0,98 e 1,48 μ m e obter-se ganho de 30 dB, com absorção de apenas 15 dB a 20 mW de potência de bombeamento. (AGRAWAL, 2004).

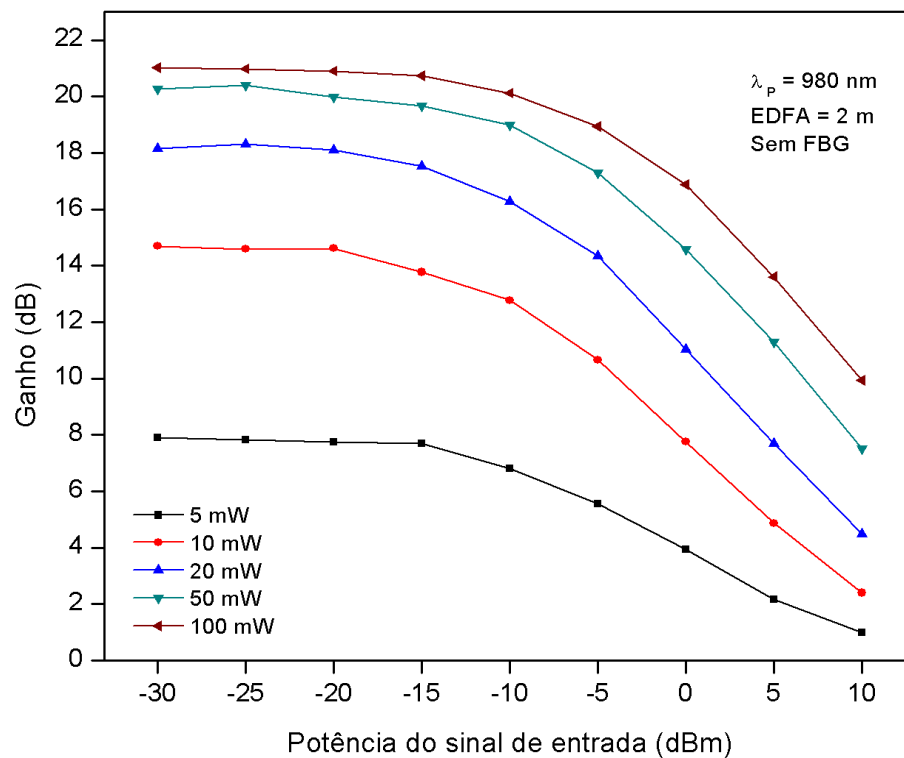
5.1.1 Cenário 1

No ponto de partida das análises, o primeiro cenário a ser pesquisado é o constituído pela configuração básica de um amplificador óptico, que utiliza um laser de bombeamento no mesmo sentido do sinal de entrada, com a ausência do elemento reflexivo. Os dados obtidos foram plotados na forma de gráficos a fim de facilitar a visualização e interpretação.

Os primeiros relacionam o mérito do ganho óptico produzido pelo EDFA com o sinal de entrada, tendo como parâmetro configurável a potência de bombeamento que permuta entre as interações citadas, com valores de 5 mW, 10 mW, 20 mW, 50 mW e 100 mW. Os valores de potência dos sinais de entrada utilizados nas medições variaram de -30 dBm a 10 dBm, intervalados de 5 em 5 níveis de escala, todos eles com comprimento de onda fixo em 1552 nm. Considerando-se também que o ganho do EDFA pode variar em relação aos comprimentos da fibra dopada, as mesmas situações e condições aplicadas para as medições citadas acima, relacionam-se sempre com valores distintos de comprimento da fibra com érbio. Os gráficos de ganho óptico para cada valor de comprimento de fibra (2m, 4m, 6m, 8m e 10m), versus

a potência do sinal entrada, diferenciados por alguns valores de potência do laser de bombeamento, serão representados nas figuras a seguir.

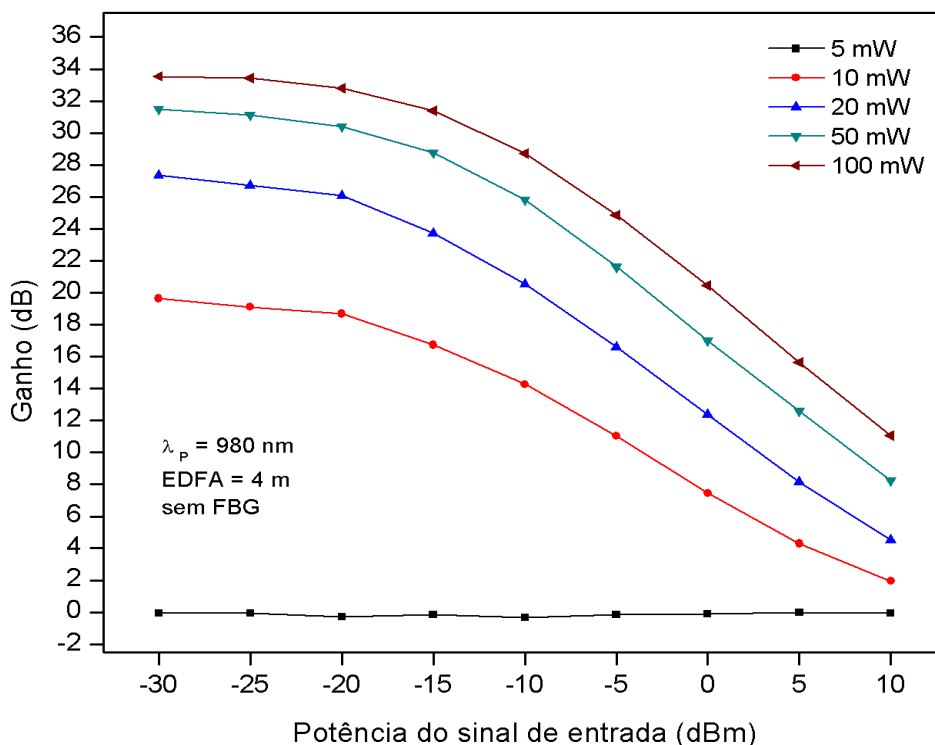
Figura 17 - Ganho óptico em função da potência de entrada do sinal, comprimento da fibra 2 m, potência de bombeamento como parâmetro configurável testado com valores de 5, 10, 20, 50 e 100 mW. Bombeamento co-propagante e sem reflexão.



Fonte: próprio autor.

A Figura 17 nos mostra o mérito de ganho para uma EDFA com comprimento de 2 m, percebe-se as curvas de ganho razoavelmente constantes para valores de potência de entrada menores que -15 dBm, e um certo declínio nas curvas dos valores de ganho quando a potência do sinal é elevada. Esse decaimento pode indicar que o amplificador esteja operando sob regime de saturação. A excessiva quantidade de fótons do sinal de entrada consome grande parte dos portadores no nível metaestável, fazendo com que estes decaiam rapidamente para o estado fundamental, atingindo os níveis de saturação, e reduzindo consequentemente a capacidade de amplificação.

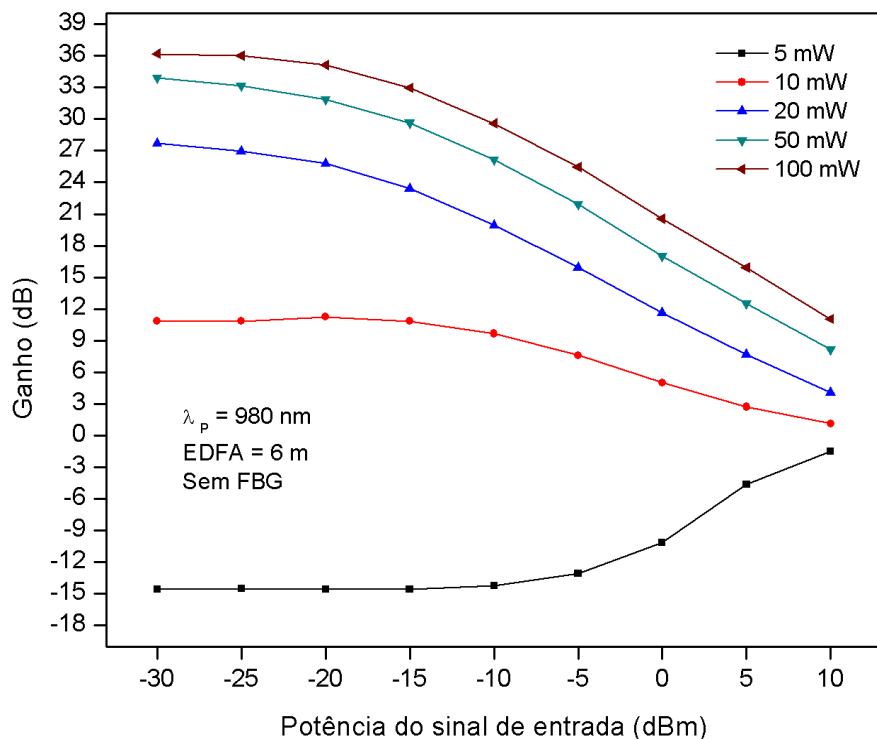
Figura 18 - Ganho óptico em função da potência de entrada do sinal, comprimento da 4 m, potência de bombeamento como parâmetro configurável testado com valores de 5, 10, 20, 50 e 100 mW. Bombeamento co-propagante e sem reflexão.



Fonte: próprio autor.

Seguindo com as análises, observa-se na figura 18, quando o EDFA possui 4 m de comprimento, que os picos de ganho elevam-se consideravelmente comparados com o gráfico anterior que trazia um comprimento de fibra dopada de 2m. Isso mostra a razoável dependência existente entre o ganho da EDFA e o comprimento da fibra dopada. Porém, quando a potência de bombeamento é 5 mW, o ganho é nulo, para esse tamanho de fibra. Além disso, nota-se que, os valores de ganho decaem a partir das potências de entrada maiores que -20 dBm.

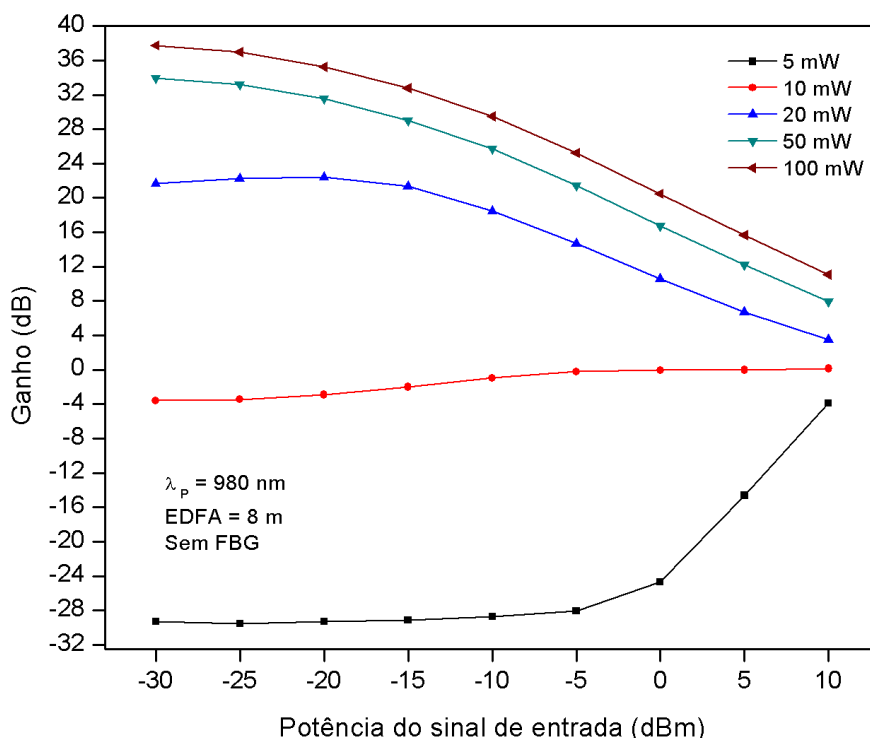
Figura 19 - Ganho óptico em função da potência de entrada do sinal, comprimento da fibra 6 m, potência de bombeamento como parâmetro configurável testado com valores de 5, 10, 20, 50 e 100 mW. Bombeamento co-propagante e sem reflexão.



Fonte: próprio autor.

Na figura 19, o comprimento da fibra é novamente alterado, agora para 6m, consequentemente, os valores de ganho elevam-se quando o bombeamento assume valores de 50 mW e 100 mW. Em contrapartida, a potência de bombeamento de 5 mW não conseguiu inverter a população dos íons em detrimento do tamanho excessivo da fibra para este valor de potência, havendo uma atenuação do sinal na saída do EDFA. Vale salientar neste caso, o comportamento da curva de valores de ganho para o bombeamento de 10 mW, que mostrou-se coerente com a mudança de potência de entrada, configurado em um EDFA com 6 metros.

Figura 20 - Ganho óptico em função da potência de entrada do sinal, comprimento da fibra 8 m, potência de bombeamento como parâmetro configurável testado com valores de 5, 10, 20, 50 e 100 mW. Bombeamento co-propagante e sem reflexão.



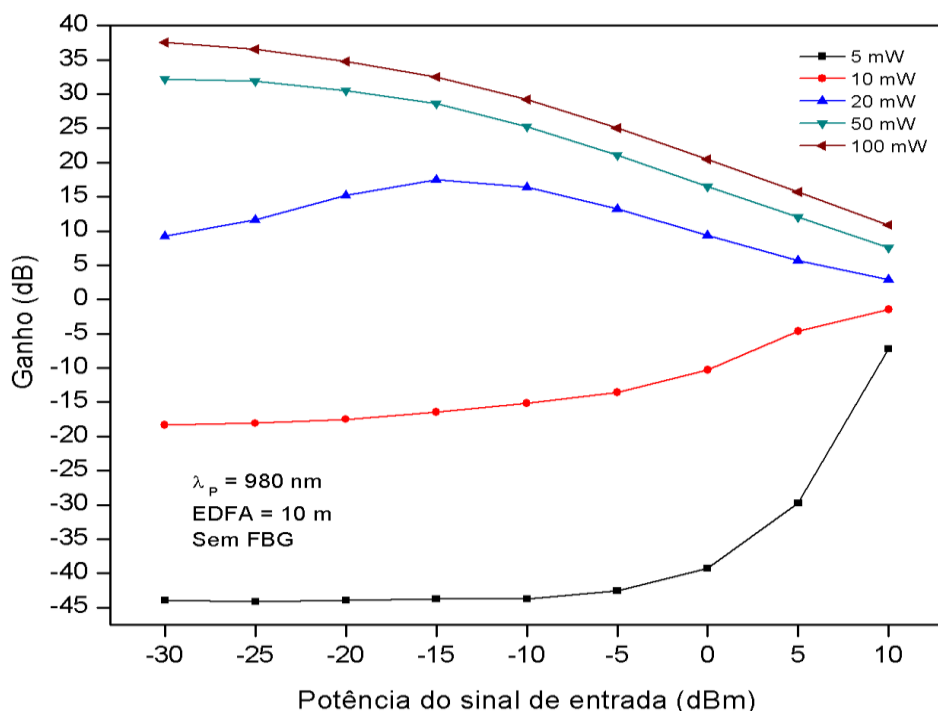
Fonte: próprio autor.

Na figura 20, verificamos que os picos de ganho são maiores para potências de bombeamento de 50 mW e 100 mW, quando a fibra dopada adota valor de 8 m, entretanto há uma perda de eficiência do amplificador em termos de ganho óptico, enquanto o bombeamento é fixado em 20 mW. O comprimento da fibra se mostra excessivo para as potências de bombeamento de 5 mW e 10 mW, tendo em vista que houve perda de potência do sinal do EDFA, onde, possivelmente, houve grandes chances de o sinal de entrada ter sido absorvido ao invés de amplificado.

De forma semelhante, ao aumentarmos o comprimento da EDFA para 10 m, como ilustra a figura 21, os maiores valores testados para potência de bombeamento obtiveram picos ainda maiores, aproximadamente 32 e 37 dB. Enquanto os menores, tem o sinal atenuado. O diferencial em comparação com o gráfico anterior (Figura 19), é que nos valores de ganho para potência de bombeamento de 20 mW, há inicialmente uma evolução do mérito de ganho em patamares de potência do sinal de

entrada menores que -15 dB, em seguida há uma depreciação de valores ao passo que eleva-se a potência de entrada.

Figura 21 - Ganho óptico em função da potência de entrada do sinal, comprimento da fibra 10 m, potência de bombeamento como parâmetro configurável testado com valores de 5, 10, 20, 50 e 100 mW. Bombeamento co-propagante e sem reflexão.



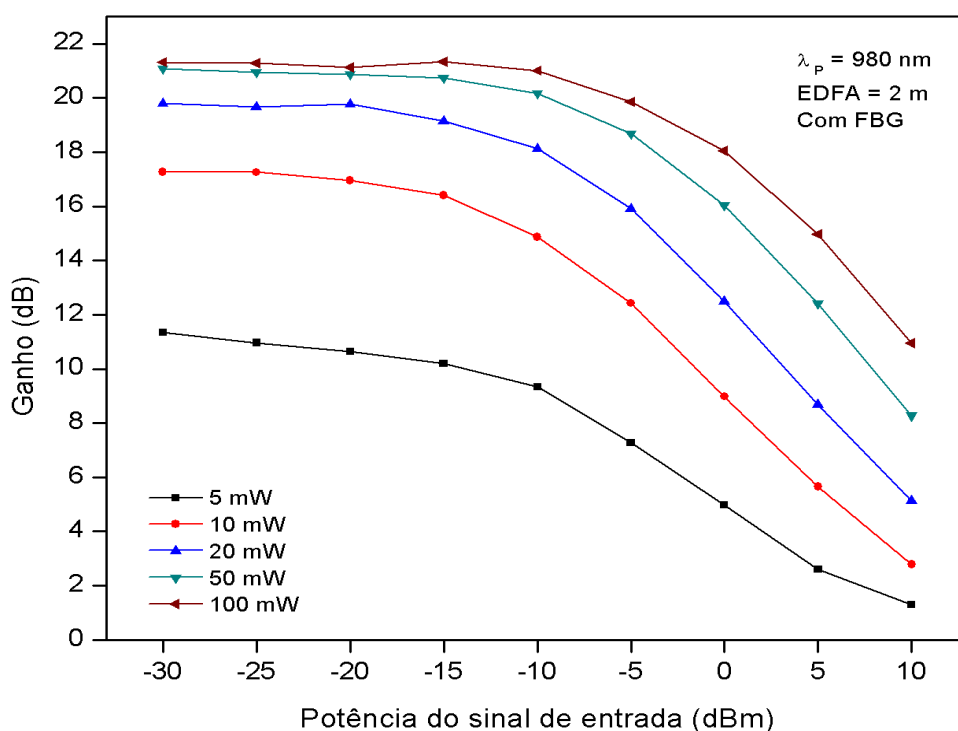
Fonte: próprio autor.

5.1.2 Cenário 2

Em geral, em amplificadores EDFA, uma parcela de potência óptica do bombeamento refletido, pode ser utilizada para aumentar a população de portadores no nível metaestável na região de acoplamento. Com isso, a presente análise (Cenário 2), contempla a presença de uma grade de Bragg, dispositivo fundamental e relevante na pesquisa, responsável por garantir a realimentação óptica através da refletividade de comprimentos de onda específicos conforme os comprimentos de onda do laser. Portanto, para investigarmos este cenário, mantivemos as mesmas características do amplificador anterior, com as mesmas alterações de parâmetros de potência do sinal de entrada e de bombeamento, bem como os valores de comprimento da fibra, até mesmo o sentido do laser de bombeamento, porém agora com a presença do

elemento reflexivo. Os dados obtidos foram plotados na forma de gráficos conforme mostram as figuras a seguir, a fim de facilitar a visualização e interpretação. Os primeiros relacionam o mérito do ganho óptico produzido pelo EDFA com o sinal de entrada, de acordo com cada tamanho de fibra dopada, posteriormente, o fator de qualidade também é explorado assim como diagramas de olho.

Figura 22 – Ganho óptico em função da potência de entrada do sinal, comprimento da fibra 2 m, potência de bombeamento como parâmetro configurável testado com valores de 5, 10, 20, 50 e 100 Mw. Bombeamento co-propagante e reflexão da FBG.

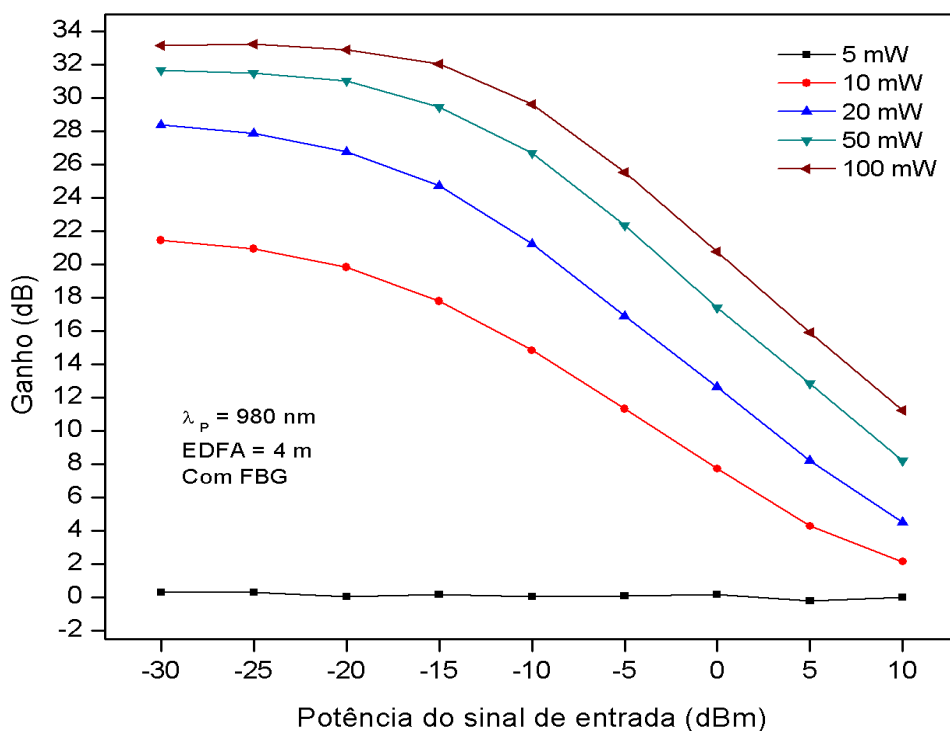


Fonte: próprio autor.

A Figura 22 ilustra que com a utilização da reciclagem de bombeamento, ou seja, o bombeamento residual é refletido de volta pra EDFA, as curvas de ganho comparadas de uma maneira geral com as curvas do cenário 1, possuem formatos semelhantes, porém, os valores obtidos de ganho, superam em alguns casos, os cenários que não usam aproveitamento de bombeamento. Quando o laser é ajustado em 5 mW e 10 mW, os picos atingidos são de 11,5 e 17,5 dB respectivamente, resultando em um aumento de aproximadamente 2,5 dB de ganho em comparação com cenários não reflexivos. Para os demais bombeamentos 20 mW, 50 mW e 100

mW, a melhoria do desempenho é tímida, apresentando aumentos próximos de 1 dB de ganho óptico.

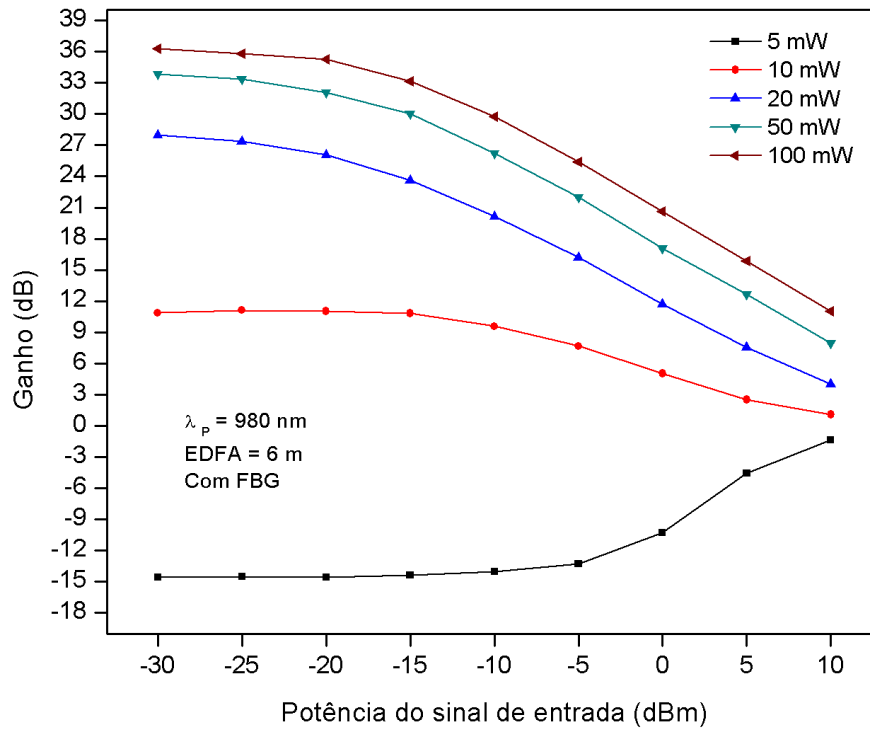
Figura 23 - Ganho óptico em função da potência de entrada do sinal, comprimento da fibra 4 m, potência de bombeamento como parâmetro configurável testado com valores de 5, 10, 20, 50 e 100 mW. Bombeamento co-propagante e reflexão da FBG.



Fonte: próprio autor.

Na figura 23, ilustra o comportamento do ganho quando o comprimento da fibra é ajustado em 4 m. Nessas condições é possível notar uma importante semelhança com o comportamento das curvas para cada valor de potência de bombeamento versus potência de entrada, entretanto, há uma elevação de aproximadamente 1 dB na maioria das interações. No entanto, percebe-se em especial, o desempenho de ganho para bombeamento de 10 mW de potência, que possuem como sinal de entrada, potências entre -30 dBm e -15 dBm.

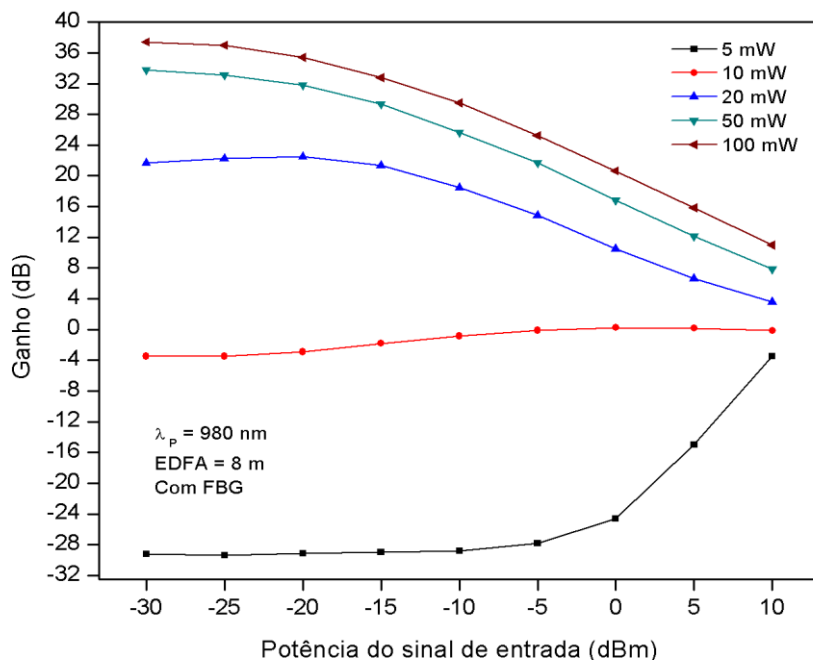
Figura 24 - Ganho óptico em função da potência de entrada do sinal, comprimento da fibra 6 m, potência de bombeamento como parâmetro configurável testado com valores de 5, 10, 20, 50 e 100 mW. Bombeamento co-propagante e reflexão da FBG



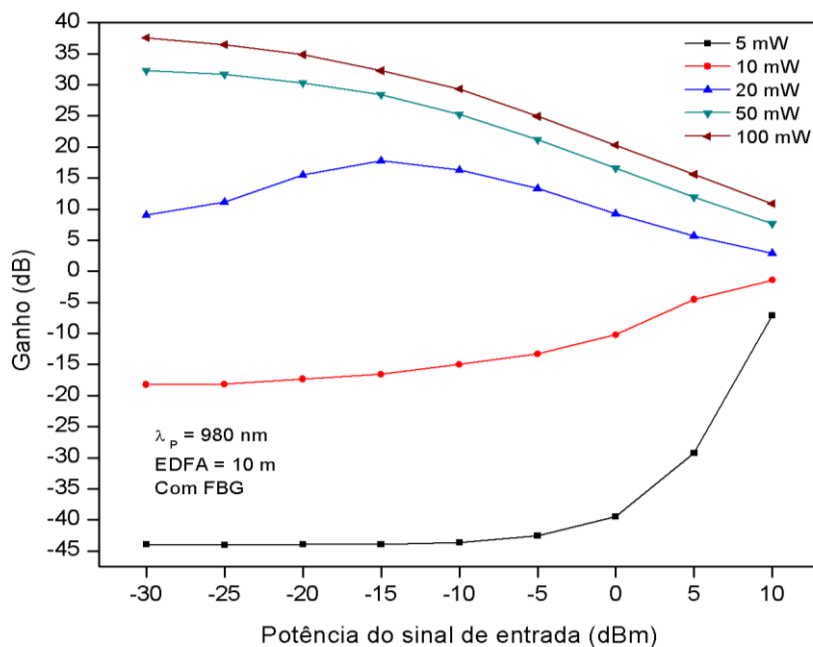
. Fonte: próprio autor.

Podemos observar na figura 24, que com o uso de fibra dopada com menores comprimentos, é possível obter-se maiores valores de aproveitamento de bombeamento residual. Isso acontece, pois a quantidade de bombeamento residual parte do bombeamento óptico acoplado à entrada da EDFA que não é totalmente absorvido. Porém, a utilização de fibras dopadas com comprimentos mais longos, como é no caso das simulações ilustradas nas figuras 25 (a) e (b), a quantidade de bombeamento residual tende a diminuir. Dessa forma, verifica-se que o bombeamento residual é fortemente dependente da potência inicial do laser de bombeamento.

Figura 25 - Ganho óptico em função da potência de entrada do sinal, (a) comprimento da fibra 8 m, (b) comprimento da fibra fixada 10 m, potência de bombeamento como parâmetro configurável testado com valores de 5, 10, 20, 50 e 100 mW. Bombeamento co-propagante e reflexão da FBG.



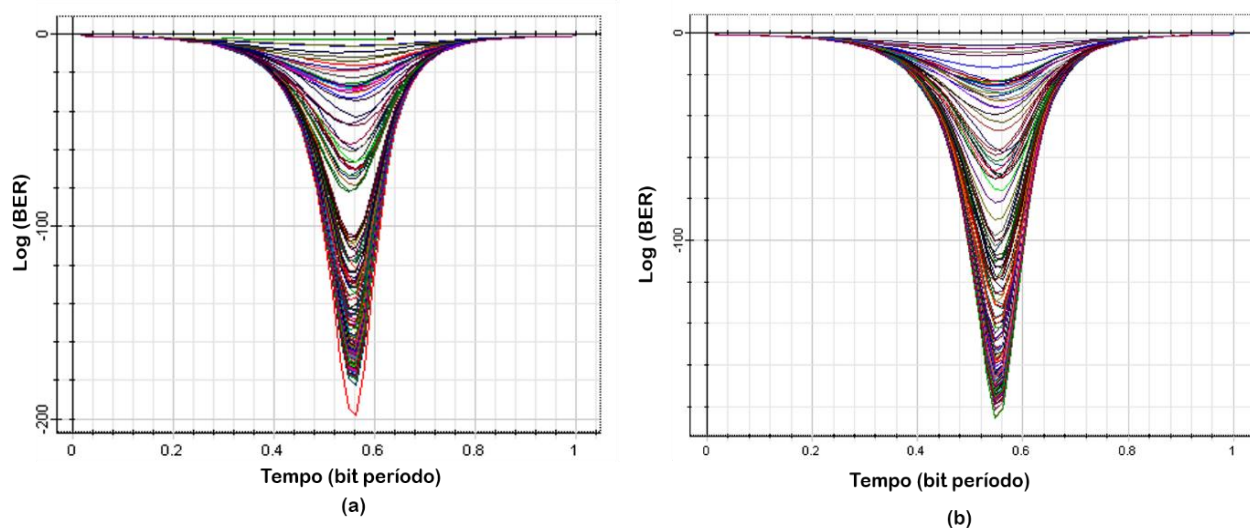
(a)



(b)

Em observância aos resultados obtidos em termos de Ganho Óptico (dB), nota-se que os valores são mais representativos quando temos valores de potência de entrada menores, combinados com tamanhos de fibra dopada maiores, como também potências do laser de bombeamento elevadas. No entanto, é necessário compararmos todos os casos, de acordo com cada configuração, os resultados em termos de qualidade na saída do amplificador, primeiramente com o amplificador sem a utilização da técnica de reciclagem de bombeamento, e quando utilizamos a retroalimentação do ganho obtido através da grade de Bragg. Portanto, investigou-se em termos de comparação, ensaio a ensaio, a evolução da qualidade na saída do sinal nos dois cenários, nos casos mais críticos, em que o amplificador apresentou melhores resultados. Para isso, além da análise minuciosa feita em cada ensaio, utilizamos os gráficos de representação que expressam a razão de erros binários conforme apresenta a Figura 26.

Figura 26 – Análise comparativa das interações em termos de BER no receptor. (a) Sem reciclagem de bombeamento e (b) Com reciclagem de bombeamento. Fonte: próprio autor.

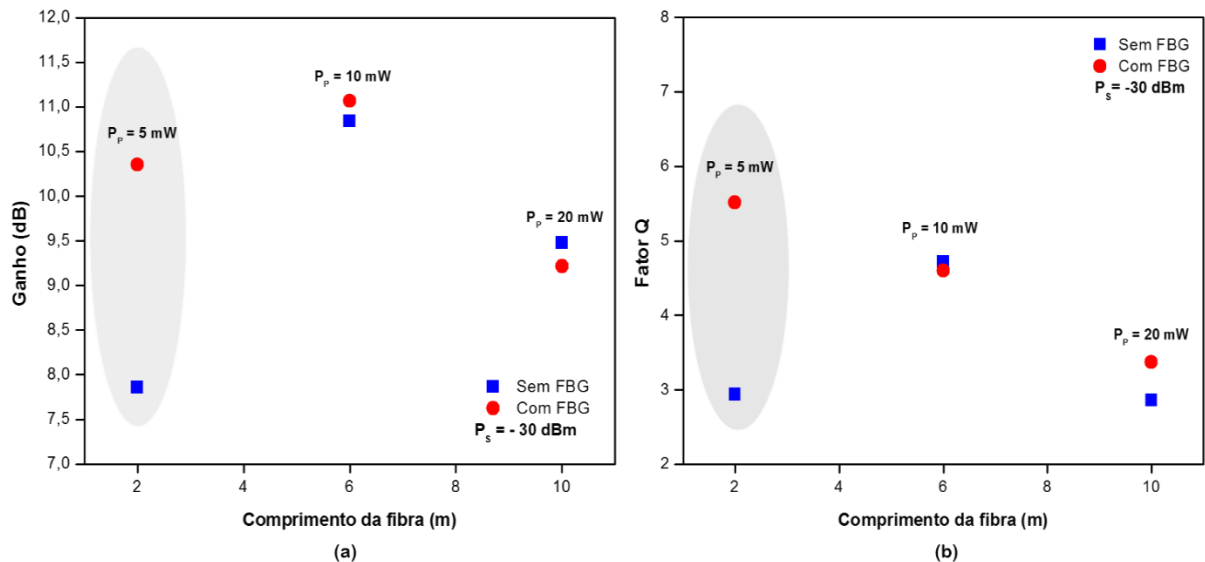


FONTE: próprio autor

Para analisar o desempenho de sistemas digitais, um dos critérios mais utilizados é a taxa de bits errados (*BER - Bit Error Rate*), compreendido como sendo a probabilidade de identificação incorreta de um bit pelo circuito de decisão do receptor, ou seja, é uma função na potência óptica no receptor. Em receptores ópticos,

a potência óptica mínima necessária para que o receptor opere abaixo de uma determinada taxa de erro, é geralmente 10^{-12} ($Q \approx 7$) (AGRAWAL, 2002).

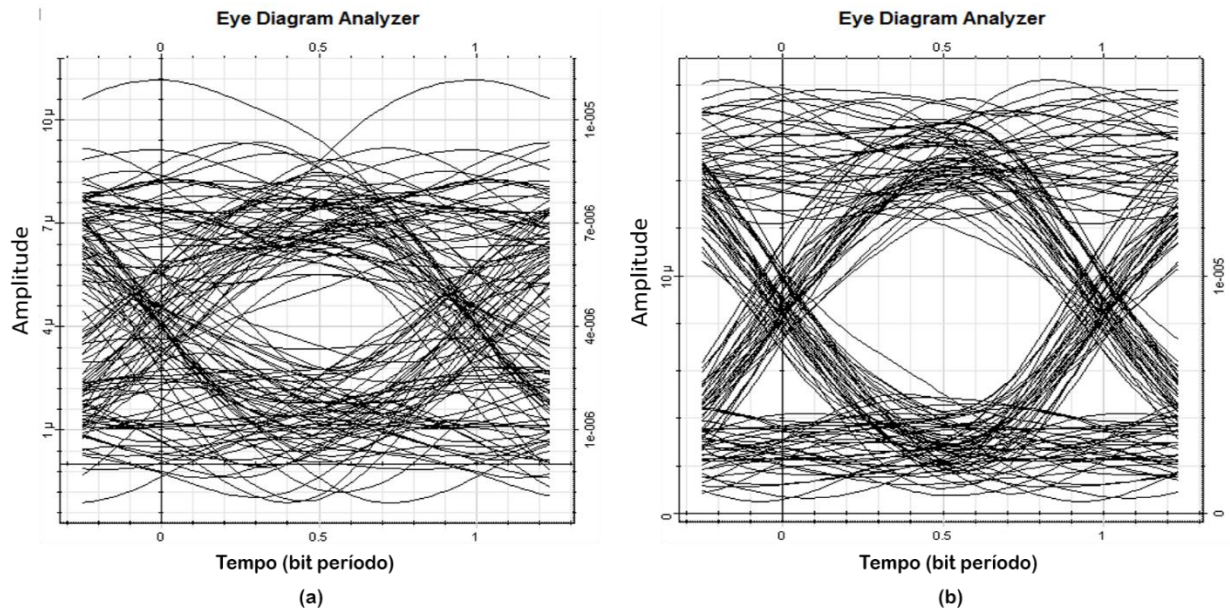
Figura 27 – Análise de desempenho dos cenários 1 e 2. (a) Ganho óptico e (b) Fator de Qualidade



Fonte: próprio autor.

Sabendo que o Fator Q expressa a qualidade de um sinal de transmissão em termos de sua relação sinal-ruído, ou seja, quanto maior o valor do fator Q, melhor o SNR e, portanto, menor a probabilidade de erros de bit, separamos o(s) caso(s) em que o ganho obtido é seguido de uma elevação no fator de qualidade, quando comparados ensaios com e sem reciclagem de bombeamento, vale ressaltar, que utilizando os mesmos parâmetros e configurações. A figura 27 (b) nos mostra que utilizando a reciclagem de bombeamento através do uso da FBG (cenário 2), a simulação se mostrou mais eficaz no caso do uso do *pump laser* de 5 mW e EDFA de 2 metros, onde obteve-se um ganho máximo de 10,3 dB, 2,5 dB a mais que o cenário de configuração básica (cenário 1). Em termos de qualidade, o valor eleva de 3 para 6, em valores aproximados, comprovando a melhoria do sinal de recepção após o aproveitamento de ganho.

Figura 28 - Análise do Diagrama de Olho com potência do sinal de entrada de -30 dBm, $\lambda_P = 5$ mW e EDFA de 2 m. (a) Sem reciclagem de bombeamento. (b) Com reciclagem de ganho.



Fonte: próprio autor.

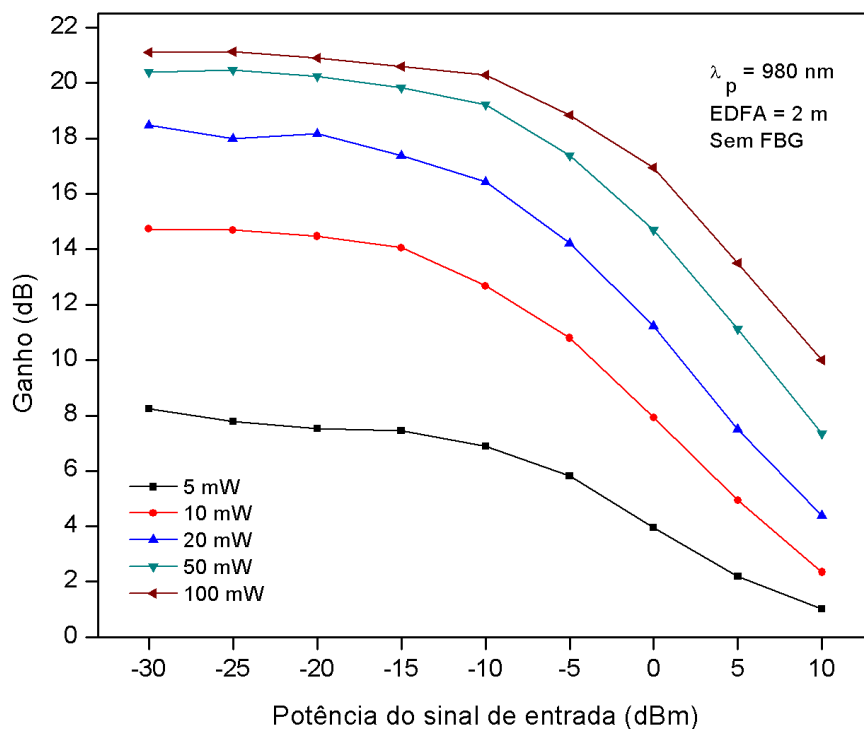
A figura 28 compara os cenários distintos em termos de superposição do sinal de transmissão. O diagrama (a), que representa a melhor situação de simulação do cenário 1, configuração que não utiliza reciclagem de bombeamento, mostra-se bastante ruidoso. Diferentemente do diagrama (b), que já demonstra certa abertura, maior amplitude entre os níveis 0 e 1, porém, ainda distante do ideal.

5.1.3 Cenário 3

Nesta seção apresentam-se os resultados simulados para um amplificador óptico básico, que utiliza um bombeamento contra-propagante. Esta modificação considerada simples pode ser feita na configuração original do EDFA. Trata-se da inversão do sentido de propagação do bombeamento, ou seja, o laser de bombeamento é colocado na extremidade de saída do amplificador, de forma que a sua propagação é contrária à propagação do sinal que se deseja amplificar. Os parâmetros configuráveis continuam os mesmos, modificando-se apenas o sentido do bombeamento e a ausência do dispositivo de reflexão. Os resultados serão

novamente plotados em forma de gráficos conforme figuras a seguir, expondo a figura de ruído, fator de qualidade e diagramas de olho.

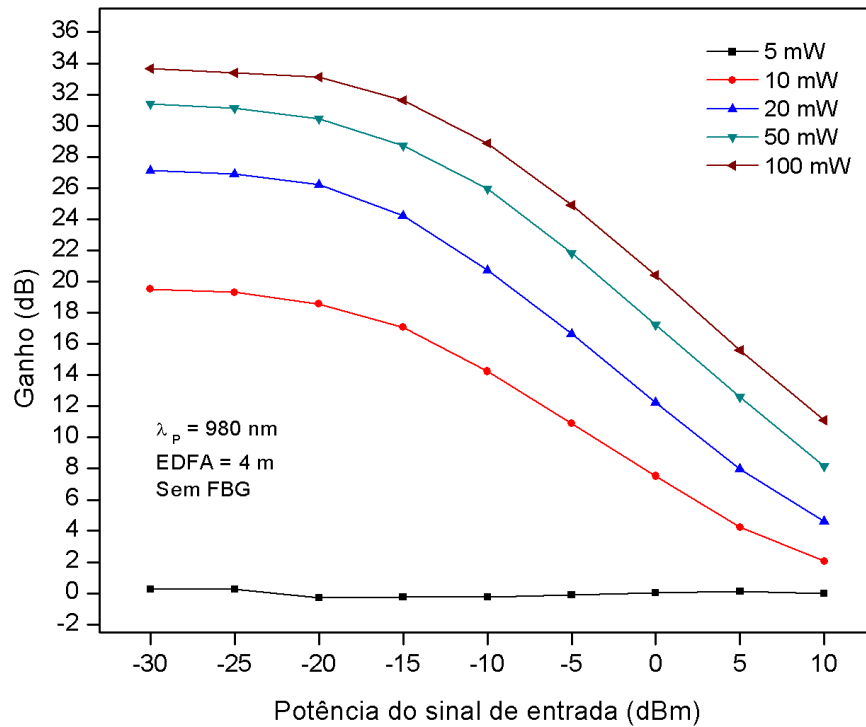
Figura 29 - Ganho óptico em função da potência de entrada do sinal, comprimento da fibra 2 m, potência de bombeamento como parâmetro configurável testado com valores de 5, 10, 20, 50 e 100 mW. Bombeamento contra-propagante sem reflexão.



Fonte: próprio autor.

A figura 29, nos mostra os resultados para o ganho da configuração de um EDFA contra-propagante, para uma fibra com 2 metros, onde, é possível notar as mesmas características nas curvas de ganho, comparados com o gráfico da figura 17, onde o amplificador recebe a configuração básica com o bombeamento co-propagante. No entanto, a diferença entre os valores é mínima, levando uma vantagem imperceptível os níveis de ganho do cenário em questão.

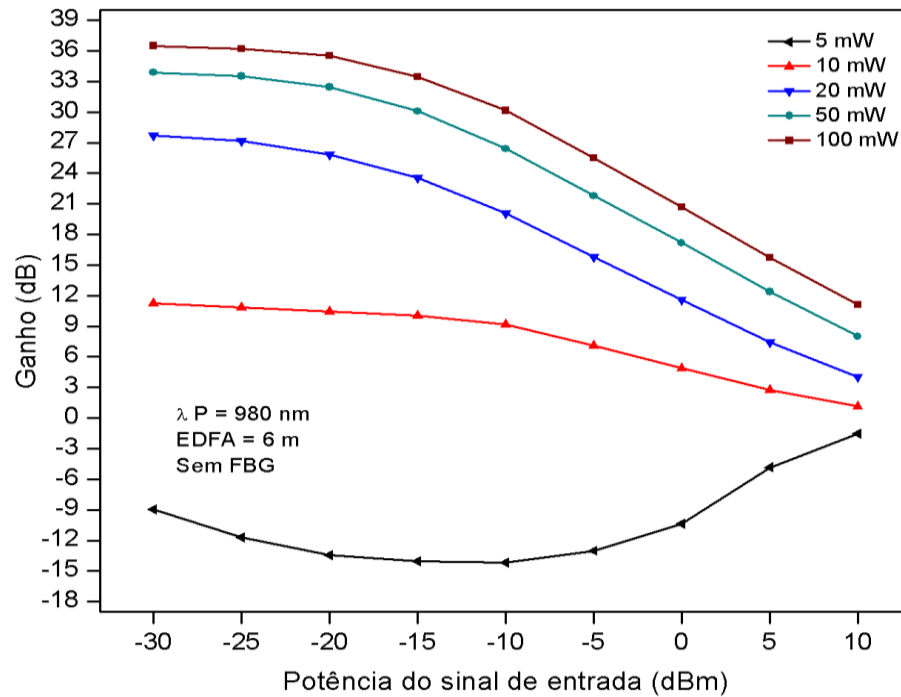
Figura 30- Ganho óptico em função da potência de entrada do sinal, comprimento da fibra 4 m, potência de bombeamento como parâmetro configurável testado com valores de 5, 10, 20, 50 e 100 mW. Bombeamento contra-propagante sem reflexão.



Fonte: próprio autor.

De forma semelhante, nota-se uma expressiva aparência nas curvas de ganho das figuras 29 e 30, de um amplificador com bombeamento contra-propagante e comprimento de 4 metros, em relação aos gráficos equivalentes do Cenário 1 (figuras 17 e 18), que possuem respectivamente os mesmos tamanhos de fibra dopada. Nota-se um ligeiro e inexpressivo aumento no ganho do sinal em relação ao ganho obtido para configuração de EDFA com bombeamento co-propagante. Isso acontece devido o bombeamento contra-propagante permitir que a inversão de população se concentre no interior da fibra, além da necessidade de maior distância necessária que será percorrida pelo sinal. Essa inversão durante o processo de amplificação diminui as chances de saturação do amplificador próximo a sua entrada e, além de melhorar a distribuição dos portadores invertidos.

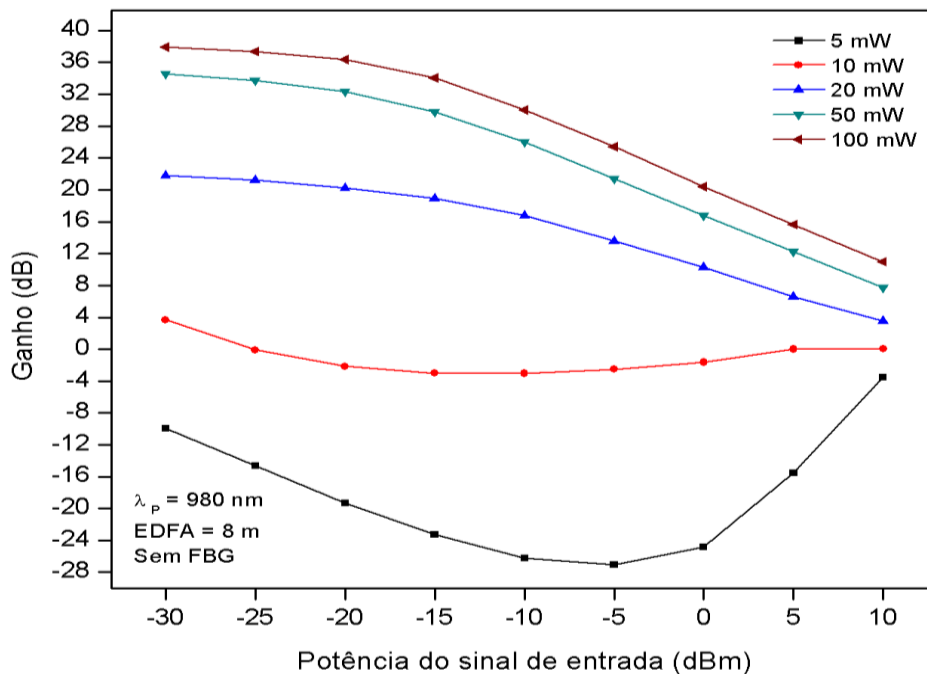
Figura 31 - Ganho óptico em função da potência de entrada do sinal, comprimento da fibra 6 m, potência de bombeamento como parâmetro configurável testado com valores de 5, 10, 20, 50 e 100 mW. Bombeamento contra-propagante sem reflexão.



Fonte: próprio autor.

A figura 31, curiosamente mostra que para potência de bombeamento de 10 mW, para o bombeamento contra-propagante se mostra estável em termos de ganho ópticos para as potências de entrada entre -30 dBm e -10 dBm.

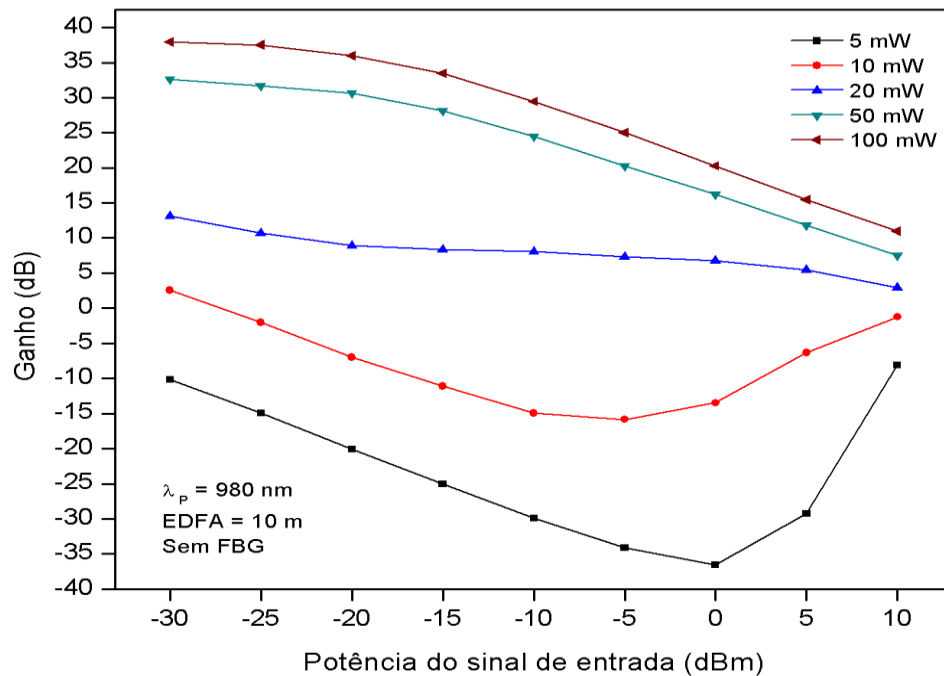
Figura 32 - Ganho óptico em função da potência de entrada do sinal, comprimento da fibra 8 m, potência de bombeamento como parâmetro configurável testado com valores de 5, 10, 20, 50 e 100 mW. Bombeamento contra-propagante sem reflexão.



Fonte: próprio autor.

Pode-se notar na figura 32, que para potências de bombeamento no valor de 5 e 10 mW, perdas de sinal por saturação são ocasionados pelo vasto comprimento fibra, ou seja, para estas potências, o amplificador terá perda de desempenho, tornado o sinal na saída do amplificador ruidoso. Os picos de ganho mostram-se similares aos presentes no cenário co-propagante, com EDFA de 8 metros de comprimento e bombeamentos de 50 e 100 mW.

Figura 33 - Ganho óptico em função da potência de entrada do sinal, comprimento da fibra fixada em 10 m, e potência de bombeamento como parâmetro configurável testado com valores de 5, 10, 20, 50 e 100 mW. Bombeamento contra-propagante sem reflexão.



Fonte: próprio autor.

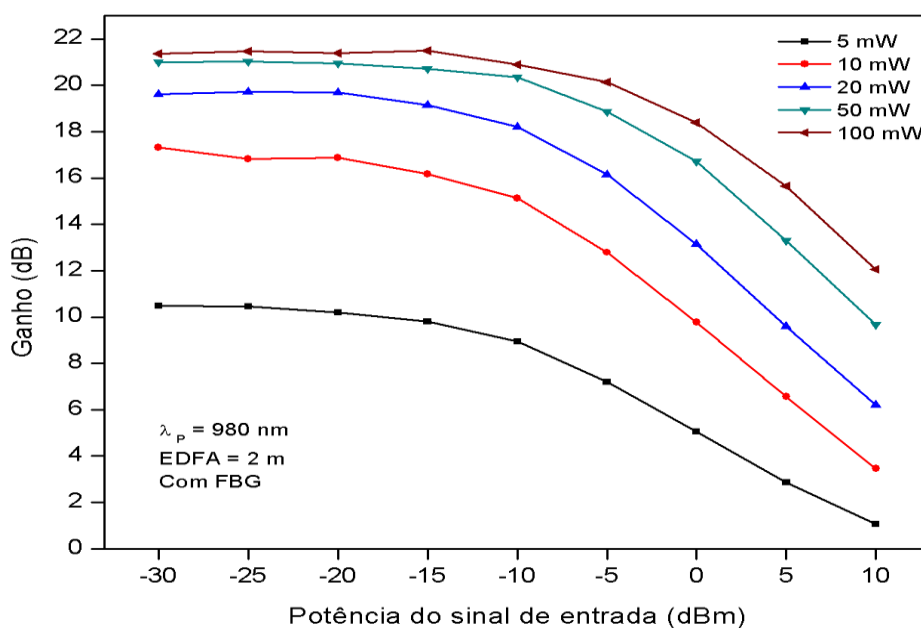
Para finalizar a análise de ganho, a Figura 33 apresenta para o cenário contra-propagante, picos de ganho em torno de 32 e 38 dB, nos casos de bombeamento de 50 e 100 mW, para potência de entrada -30 dBm, valores similares ao cenário co-propagante. Já os menores valores de bombeamento, apresentaram atenuação. Destaca-se as características da curva de ganho para o bombeamento de 20 mW, que mostrou-se coerente de acordo com cada parâmetro de sinal de entrada, apesar de possuir menores valores de resultados de ganho comparado com os valores do cenário 1, que utiliza os mesmos parâmetros, porém com o bombeamento co-propagante.

5.1.4 Cenário 4

Para encerrar as simulações que utilizaram o comprimento de onda de bombeamento 980 nm, os gráficos a seguir demonstram os resultados para o mérito de ganho na topologia contra-propagante, ou seja, configuração que faz uso do

bombeamento na direção contrário do sinal da informação. O cenário em questão, emprega na configuração do amplificador, o uso do dispositivo grade de Bragg, que fará a reflexão das potências residuais do bombeamento de volta para o sistema a fim de reutilizá-los. Os gráficos a seguir ilustram os resultados para o mérito de ganho, e os valores de potência de bombeamento e de sinal testados permanecem os mesmos. As interações simuladas são analisadas para cada valor de comprimento da fibra dopada.

Figura 34 - Ganho óptico em função da potência de entrada do sinal, comprimento da fibra 2 m, potência de bombeamento como parâmetro configurável testado com valores de 5, 10, 20, 50 e 100 mW. Bombeamento contra-propagante com reflexão da FBG.

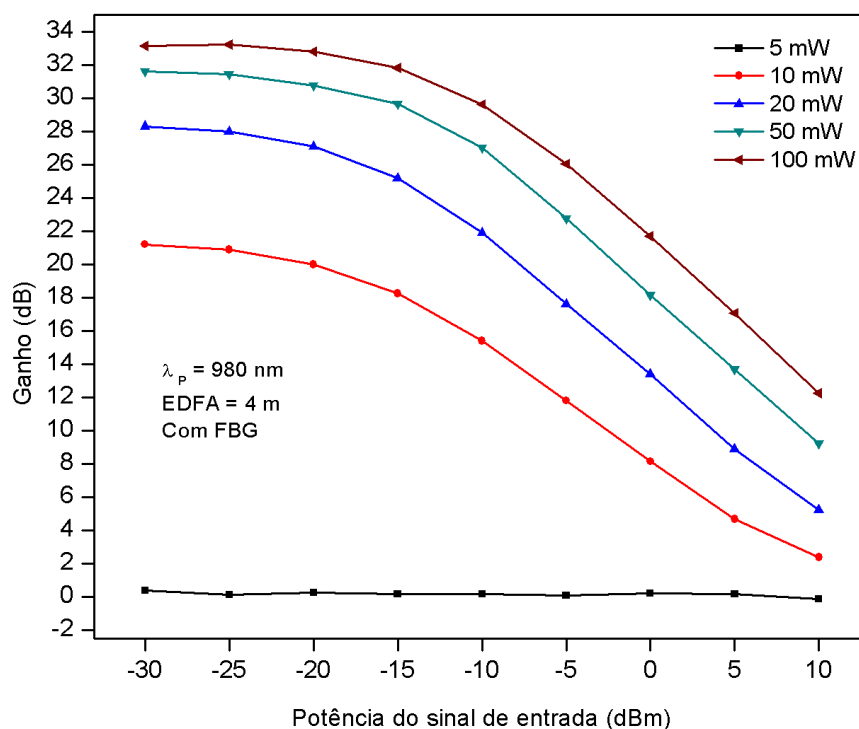


Fonte: próprio autor.

A Figura 34 mostra evidentemente, a evolução de ganho para EDFA's com 2 metros de comprimento em uma topologia contra-propagante reflexiva. Nota-se que nas potências de bombeamento de 5 e 10 mW, os níveis de ganho aumentaram em 2 dB aproximadamente para potências de entrada entre -30 dBm e -15 dBm, em comparação aos níveis do cenário não reflexivo. A principal característica pra esse tipo de configuração é que o L_{opt} é rapidamente alcançado para uma fibra dopada de

comprimento relativamente pequena, apenas aumentando a potência de bombeamento ou a potência do sinal do sistema.

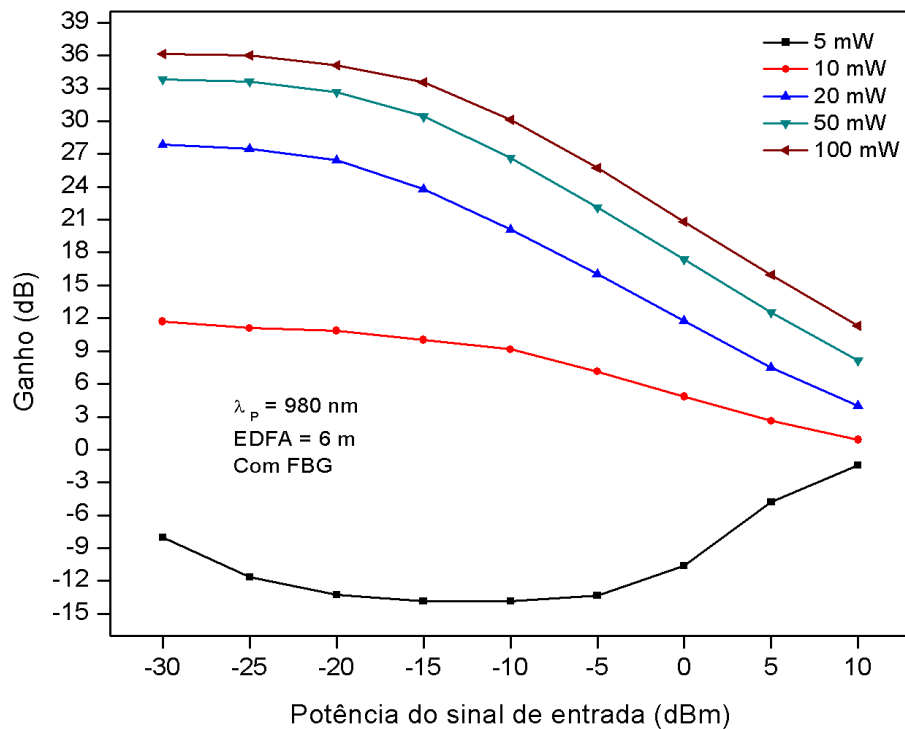
Figura 35 - Ganho óptico em função da potência de entrada do sinal, comprimento da fibra fixada em 4 m, e potência de bombeamento como parâmetro configurável testado com valores de 5, 10, 20, 50 e 100 mW. Bombeamento contra-propagante com reflexão da FBG.



Fonte: próprio autor.

A figura 35, nos mostra que quando o valor de comprimento da fibra dopada é ajustado para 4 metros, o ganho é anulado para todos os valores de potência de entrada, quando o bombeamento é 5 mW. Porém, houve evolução de valores de ganho óptico quando a potência é relativamente baixa, nos casos dos bombeamentos de 10 mW e 20 mW.

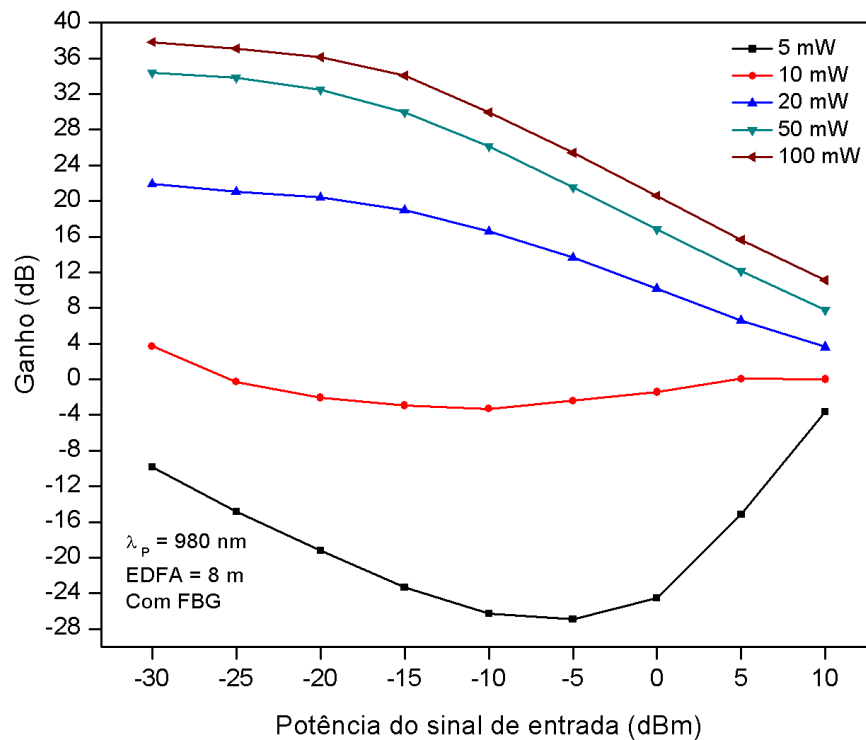
Figura 36 - Ganho óptico em função da potência de entrada do sinal, comprimento da fibra fixada em 6 m, e potência de bombeamento como parâmetro configurável testado com valores de 5, 10, 20, 50 e 100 mW. Bombeamento contra-propagante com reflexão da FBG



Fonte: próprio autor.

A figura 36 possibilita-nos verificar que as características das curvas de ganho para a fibra dopada de 6 metros no cenário contra-propagante, assemelham-se com as da figura 31, quando não há o elemento reflexivo. No entanto, na grande maioria dos ensaios de parâmetros modificados, o rendimento de ganho óptico é levemente superior nos casos deste cenário, principalmente em alguns casos específicos.

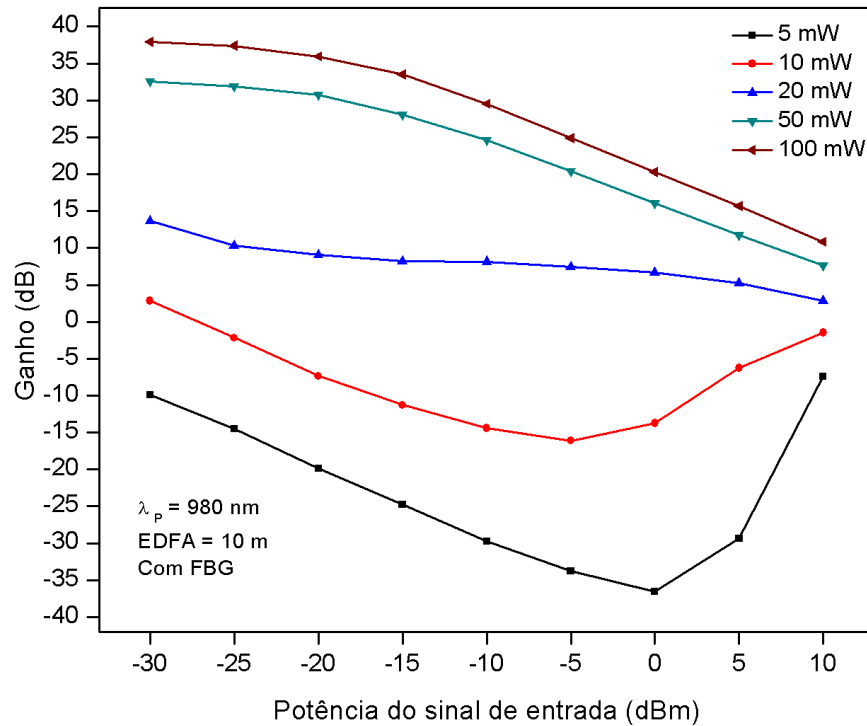
Figura 37 - Ganho óptico em função da potência de entrada do sinal, comprimento da fibra 8 m, potência de bombeamento como parâmetro configurável testado com valores de 5, 10, 20, 50 e 100 mW. Bombeamento contra-propagante com reflexão da FBG.



Fonte: próprio autor.

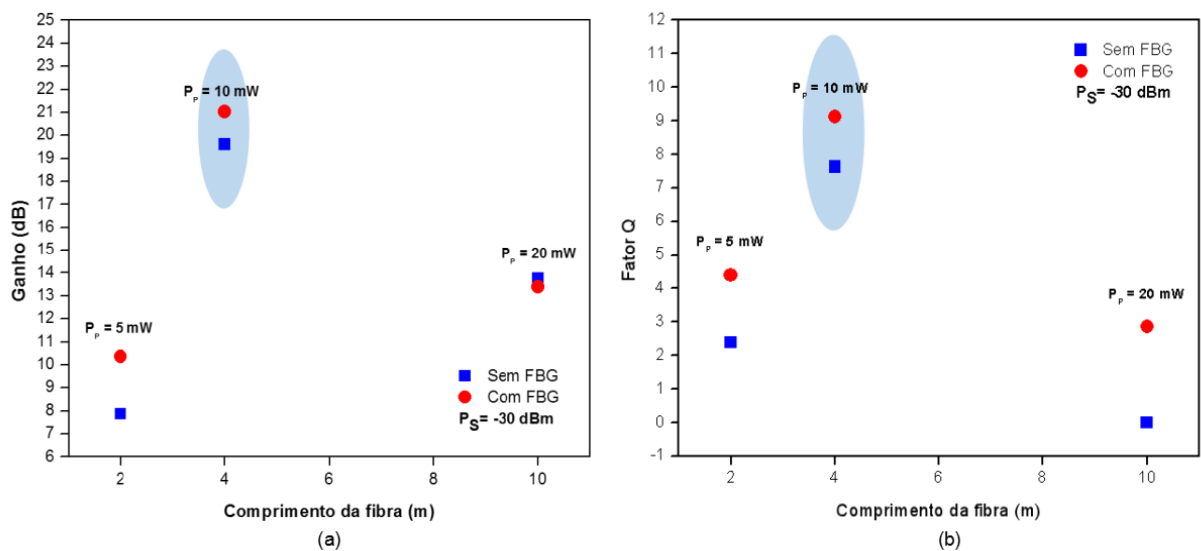
Quando o amplificador tem seus comprimentos alterados para 8 e 10 metros, conforme mostram as figuras 37 e 38, respectivamente, nas condições que o Cenário 4 impôs, percebe-se de forma mais significativa a aparência similar das curvas de ganho, comparados com os do cenário anterior, isso é explicado pelo fato de as potências de bombeamento testadas, não serem capazes de estimular os átomos de érbio composto nestas fibras mais extensas. Entretanto, em casos pontuais, o aproveitamento de potências refletidas pelas grades conseguem ser reaproveitadas pelo sistema.

Figura 38 - Ganho óptico em função da potência de entrada do sinal, comprimento da fibra 10 m, potência de bombeamento como parâmetro configurável testado com valores de 5, 10, 20, 50 e 100 mW. Bombeamento contra-propagante com reflexão da FBG.



Fonte: próprio autor.

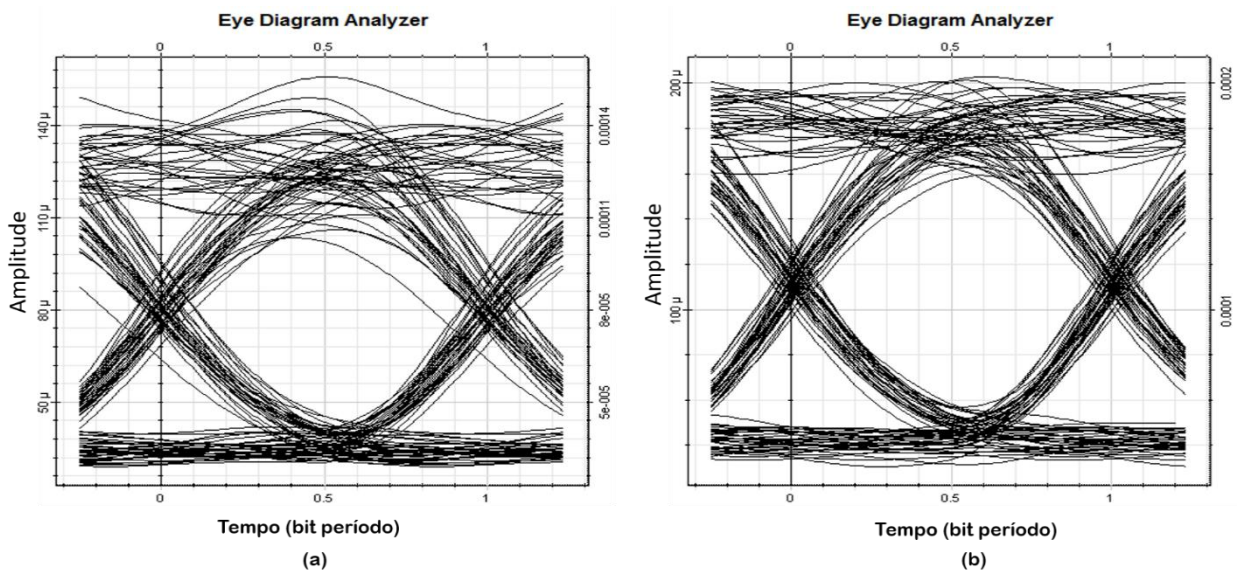
Figura 39 - Análise de desempenho dos cenários 3 e 4. (a) Ganho óptico e (b) Fator de Qualidade



Fonte: próprio autor.

Na figura 39, visualizamos o resultados obtidos de ganho óptico e de fator de qualidade, dos cenários 3 e 4, sendo estes comparados. A técnica de reciclagem de bombeamento destaca-se em uma de três situações existentes, quando o ganho obtido na saída do amplificador atinge o máximo de 21 dB. Essa evolução de 1,5 dB, é obtida após o ganho ser reutilizado através da configuração com caráter reflexivo do amplificador, cuja configuração utilizou *pump laser* de 10 mW de potência e comprimento de fibra dopada de 4 metros. Em se tratando de qualidade, o ensaio em questão obteve uma discreta melhoria, saltou de aproximadamente 7,5 quando o ganho não é aproveitado, para 9, quando utilizamos a grade de Bragg.

Figura 40 – Análise do Diagrama de Olho para potência do sinal de entrada de -30 dBm, $\lambda_P = 10$ mW e EDFA de 4 m. (a) Sem reciclagem de bombeamento. (b) Com reciclagem de bombeamento.



Fonte: próprio autor.

Observamos na figura 40, que o diagrama da direita apresenta maior abertura do olho, mostrando que as perdas existentes no amplificador que retroalimentou o ganho no sistema, diagrama (b), foram menores. Nota-se, que além da diferença na amplitude entre os níveis, a região de margem de ruído é menor no diagrama (a), comprovando que o sinal sofreu maior degradação.

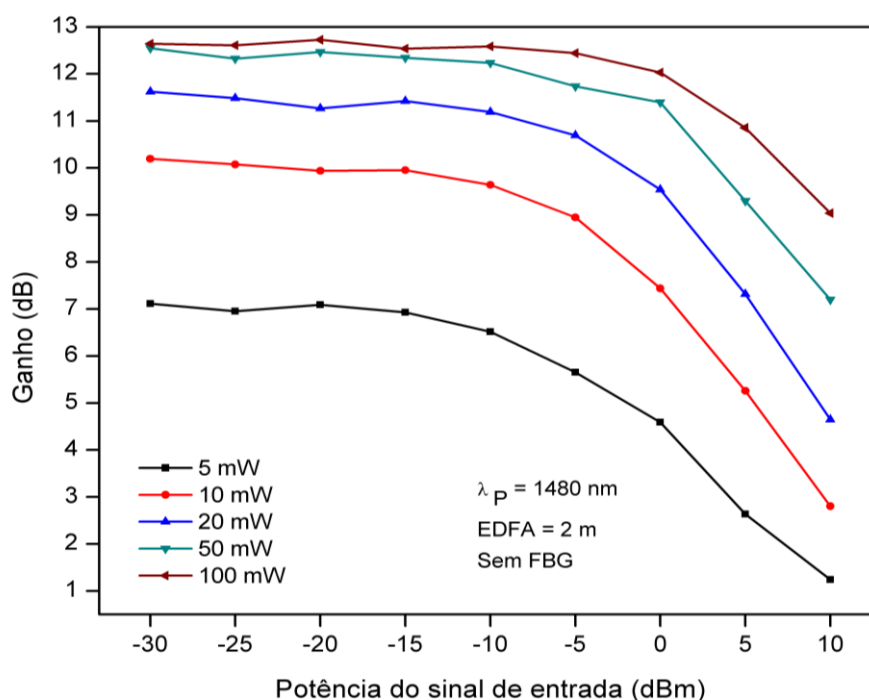
5.2 Comprimento de onda do laser de bombeamento (1480 nm)

Nesta seção são mostrados os resultados das simulações que utilizaram o comprimento de onda de bombeamento de 1480 nm na configuração do amplificador EDFA.

5.2.1 Cenário 5

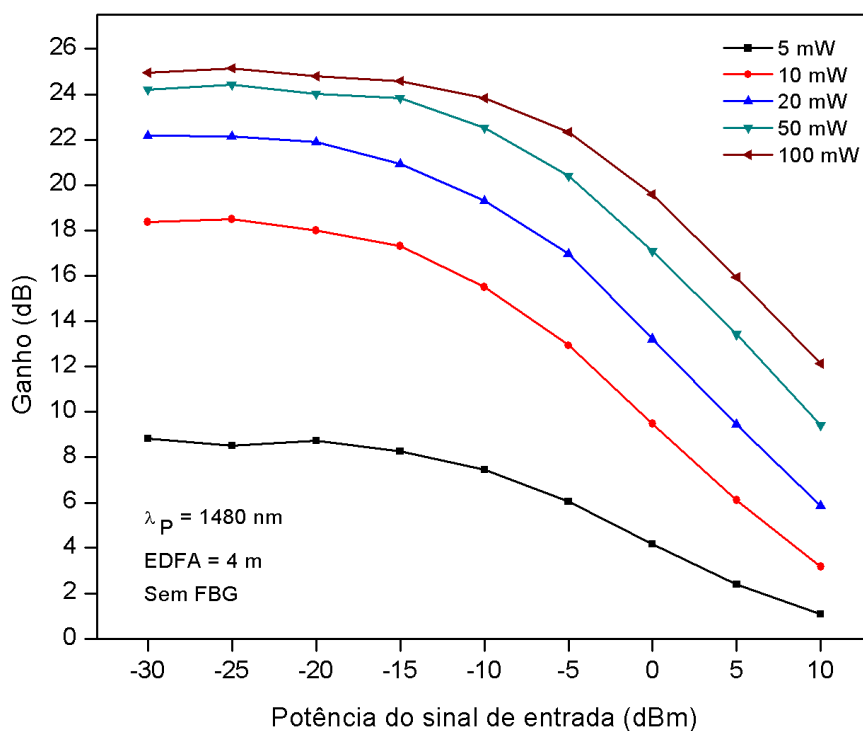
Os gráficos ilustrados nas figuras a seguir, demonstram a relação do mérito do ganho em função da potência do sinal de entrada, com a potência de bombeamento como parâmetro configurável e nas variações de comprimento da fibra dopada em 2, 4, 6, 8 e 10 metros. A configuração deste cenário de amplificação é caracterizada pelo laser de bombeamento posicionado no sentido de propagação do sinal, porém agora com o comprimento de onda em 1480 nm.

Figura 41 - Ganho óptico em função da potência de entrada do sinal, comprimento da fibra 2 m, potência de bombeamento como parâmetro configurável testado com valores de 5, 10, 20, 50 e 100 mW. Bombeamento contra-propagante sem reflexão da FBG.



Na figura 41, é possível comprovar que os valores de potência de bombeamento de 20, 50 e 100 mW, alcançam maiores valores de ganho quando as potência do sinal de entrada são entre -30 dBm e -5 dBm. Com isso, entende-se que para potências relativamente menores os níveis de ganho são satisfatórios. Os picos alcançados de ganho óptico são menores que aqueles alcançados em cenário com outro comprimento de onda do laser de bombeamento.

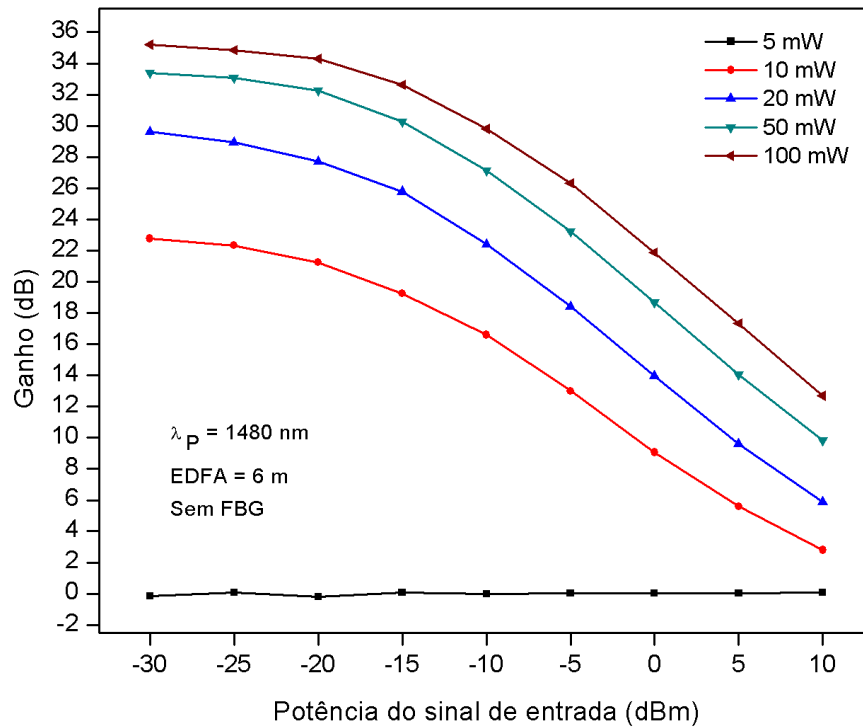
Figura 42 - Ganho óptico em função da potência de entrada do sinal, comprimento da fibra 4 m, potência de bombeamento como parâmetro configurável testado com valores de 5, 10, 20, 50 e 100 mW. Bombeamento contra-propagante sem reflexão da FBG.



Fonte: próprio autor.

Na figura 42, quando o comprimento da fibra é ajustado para 4 metros, é possível observar que os picos de ganho são elevados. Nota-se a relação de dependência existente entre o ganho óptico com o comprimento da fibra dopada. Entretanto, diferentemente do ocorrido a figura 42, quando a fibra dopada possui 2 metros, os declínios das curvas surgem a partir das potências de entrada maiores que -15 dBm.

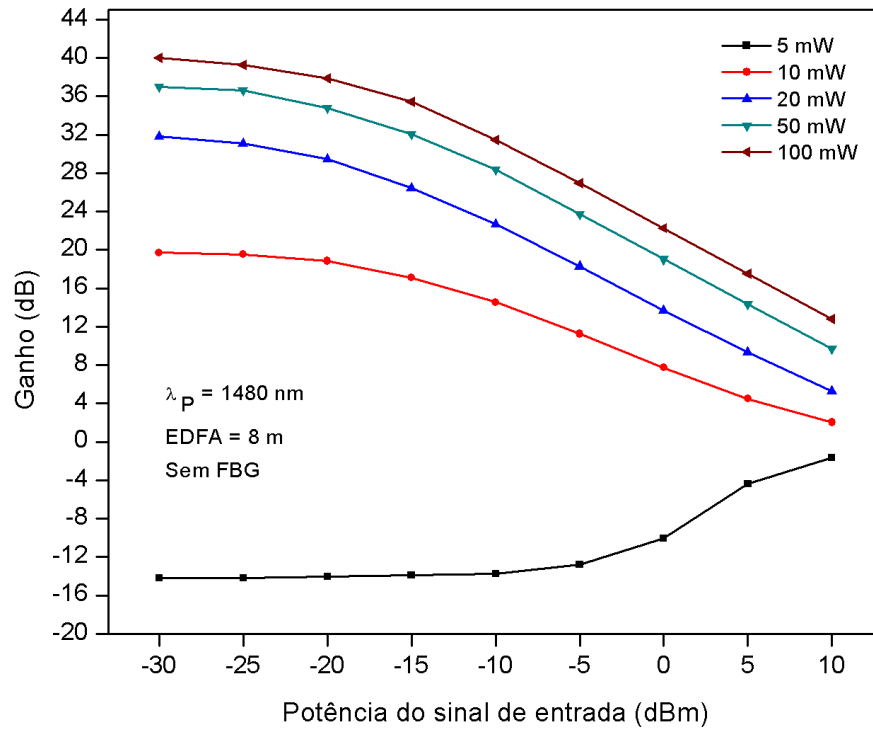
Figura 43 - Ganho óptico em função da potência de entrada do sinal, comprimento da fibra 6 m, potência de bombeamento como parâmetro configurável testado com valores de 5, 10, 20, 50 e 100 mW. Bombeamento contra-propagante sem reflexão da FBG.



Fonte: próprio autor.

Analisando a figura 43, é possível notar que, assim como ocorrido em outros cenários, à medida que aumenta o comprimento da fibra dopada de érbio, as menores potências de bombeamento ficam impossibilitadas de amplificar o sinal a ser propagado. Isso acontece pelo fato de os átomos compostos no núcleo da fibra, desta vez com tamanho consideravelmente maior, não conseguirem ser excitados pela ação da baixa potência do laser, conseqüentemente não conseguindo elevar os níveis de energia, causados pela elevação dos fótons. É o que ocorre quando a potência de bombeamento que teve o valor fixado em 5 mW. Para potências de bombeamento maiores, são alcançados picos de ganho entre 23 e 35 dB para potência de sinal menores.

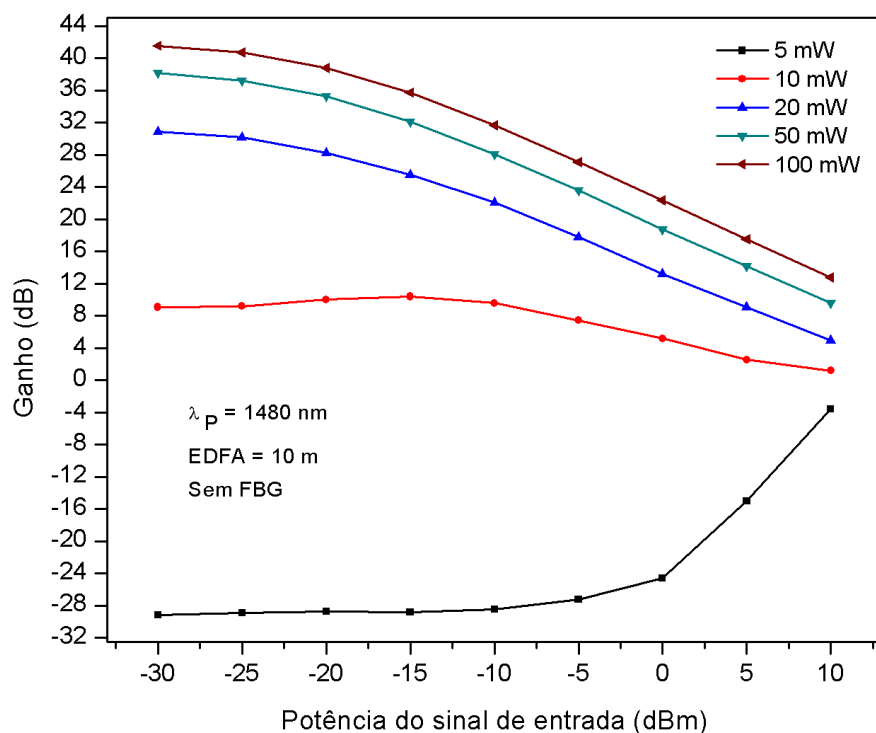
Figura 44 - Ganho óptico em função da potência de entrada do sinal, comprimento da fibra 8 m, potência de bombeamento como parâmetro configurável testado com valores de 5, 10, 20, 50 e 100 mW. Bombeamento contra-propagante sem reflexão da FBG.



Fonte: próprio autor.

A figura 44 nos mostra que houve atenuação para o bombeamento de 5 mW, mas os demais valores para de bombeamento obtiveram ganhos satisfatórios. Vale ressaltar que, em comparação com o comprimento de onda anteriormente testado, esse cenário apresenta maior representatividade no mérito de ganho.

Figura 45 - Ganho óptico em função da potência de entrada do sinal, comprimento da fibra 10 m, potência de bombeamento como parâmetro configurável testado com valores de 5, 10, 20, 50 e 100 mW. Bombeamento contra-propagante sem reflexão da FBG.



Fonte: próprio autor.

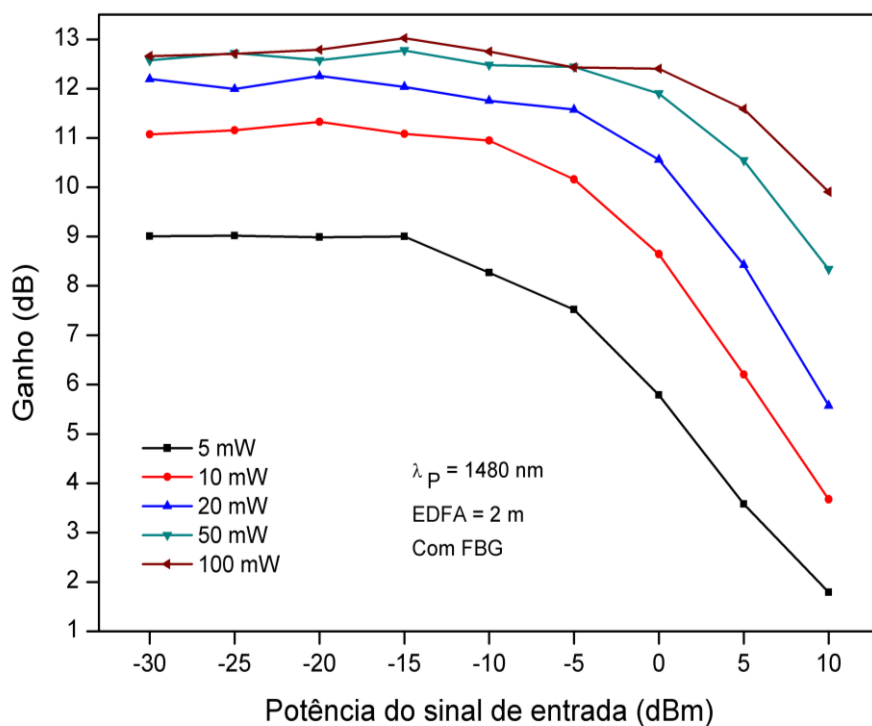
Finalmente, na figura 45, podemos observar o ganho quando o amplificador possui o maior valor de fibra dopada. Em destaque, observa-se a curva de ganho para o bombeamento de 10 mW, que mostrou-se coerente ao longo dos testes para todos os valores de potência de entrada. Foram alcançados picos de ganho óptico em valores de 42 dB aproximadamente. Para potências no valor de 20, 50 e 100 mW de bombeamento, os resultados para valores de ganho óptico são satisfatórios.

5.2.2 Cenário 6

Para este cenário de amplificação, investigamos todos os ensaios possíveis utilizando o comprimento de onda de bombeamento de 1480 nm. Foram mantidas as mesmas características do amplificador anterior, com as mesmas alterações de

parâmetros de potência do sinal de entrada e de bombeamento, bem como os valores de comprimento da fibra, até mesmo o sentido do laser de bombeamento, porém, agora com a presença do elemento reflexivo. Os dados obtidos foram plotados na forma de gráficos conforme mostram as figuras a seguir, a fim de facilitar a visualização e interpretação. Os resultados deste cenário serão comparados com os do cenário não reflexivo.

Figura 46 - Ganho óptico em função da potência de entrada do sinal, comprimento da fibra 2 m, potência de bombeamento como parâmetro configurável testado com valores de 5, 10, 20, 50 e 100 mW. Bombeamento co-propagante com reflexão da FBG

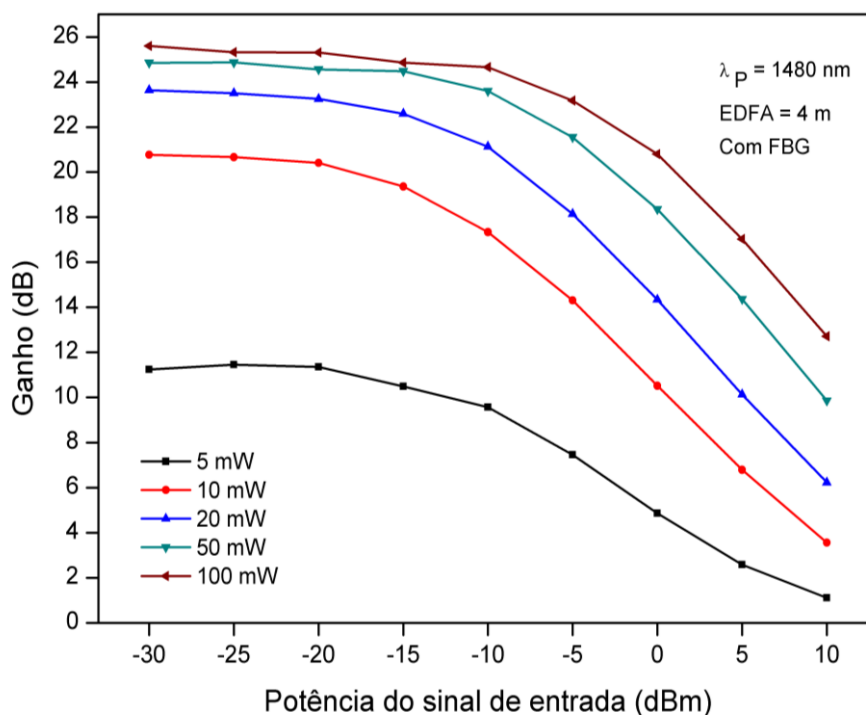


Fonte: próprio autor.

Na figura 46, podemos observar que os níveis de ganho óptico para o comprimento de fibra dopada de 2 metros, são superiores aos níveis do cenário anterior que utiliza o mesmo tamanho de EDFA. Nota-se em especial, os níveis de ganho para potência de bombeamento de 5 mW, apresentam em alguns casos, um aumento em torno de 2 dB em relação ao cenário não reflexivo. Essa melhoria de desempenho no ganho óptico é possível em virtude da utilização da grade de Bragg,

que consegue realimentar o amplificador, através de potências residuais que seriam desperdiçadas. Além disso, vale ressaltar o caso do bombeamento de 100 mW, quando testada com a potência do sinal ajustada em -15 dBm, que apresenta o maior pico de ganho no valor de 13 dB.

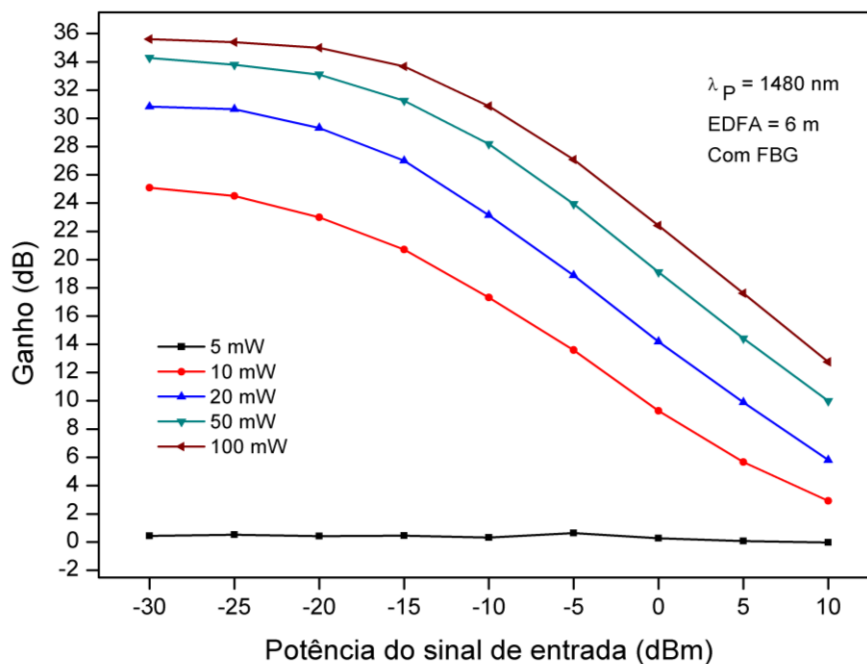
Figura 47 - Ganho óptico em função da potência de entrada do sinal, comprimento da fibra 4 m, potência de bombeamento como parâmetro configurável testado com valores de 5, 10, 20, 50 e 100 mW. Bombeamento co-propagante com reflexão da FBG.



Fonte: próprio autor.

Quando o tamanho da fibra dopada é alterado para 4 metros, as curvas de ganho óptico têm os níveis elevados em relação ao cenário anterior não reflexivo, conforme podemos notar na figura 47. Observa-se a eficiência do amplificador nesse tipo de configuração de retroalimentação, principalmente nos ensaios que possuem potência de bombeamento de 5 mW e 10 mW, que tiveram um aumento de ganho entre 2 e 3 dB a mais que a configuração sem grade de Bragg. A eficiência da retroalimentação em termos de ganho, mantém a eficiência também quando a potência do laser de bombeamento tem o valor ajustado em 10 mW e 20 mW.

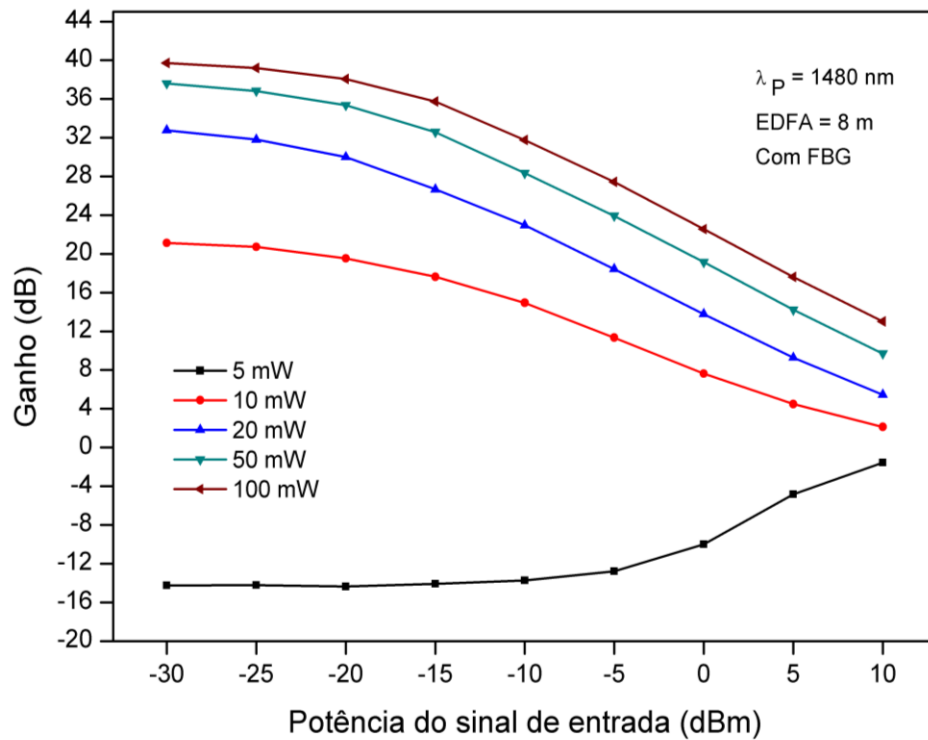
Figura 48 - Ganho óptico em função da potência de entrada do sinal, comprimento da fibra 6 m, potência de bombeamento como parâmetro configurável testado com valores de 5, 10, 20, 50 e 100 mW. Bombeamento co-propagante com reflexão da FBG.



Fonte: próprio autor.

Para a situação do EDFA com 6 metros, como mostra os resultados da figura 48, o bombeamento fixado em 5 mW, causou atenuação no sinal, possivelmente em detrimento do regime de saturação causado pelo extenso comprimento da fibra dopada. Comparados com os resultados do cenário anterior, que não utiliza aproveitamento de potências residuais, os ensaios que tiveram suas potências de bombeamento ajustadas em 50 mW e 100 mW tiveram uma tímida melhoria em termos de ganho, em contrapartida destacaram-se os bombeamentos de 10 mW e 20 mW, que obtiveram níveis de ganho mais consideráveis em aproximadamente 2 dB.

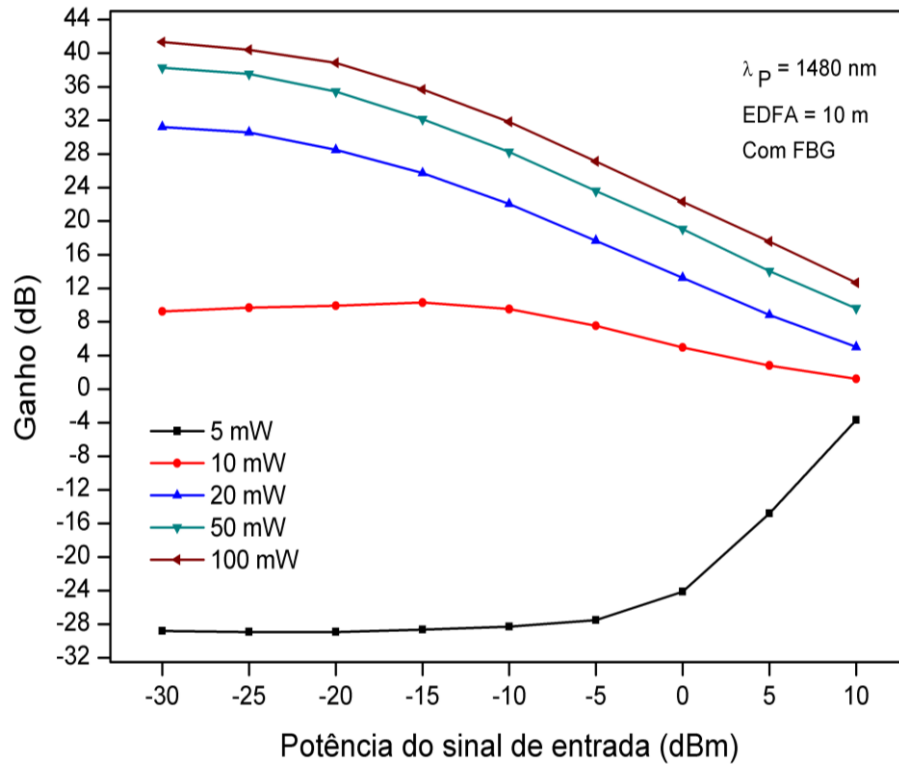
Figura 49 - Ganho óptico em função da potência de entrada do sinal, comprimento da fibra 8 m, potência de bombeamento como parâmetro configurável testado com valores de 5, 10, 20, 50 e 100 mW. Bombeamento co-propagante com reflexão da FBG.



Fonte: próprio autor.

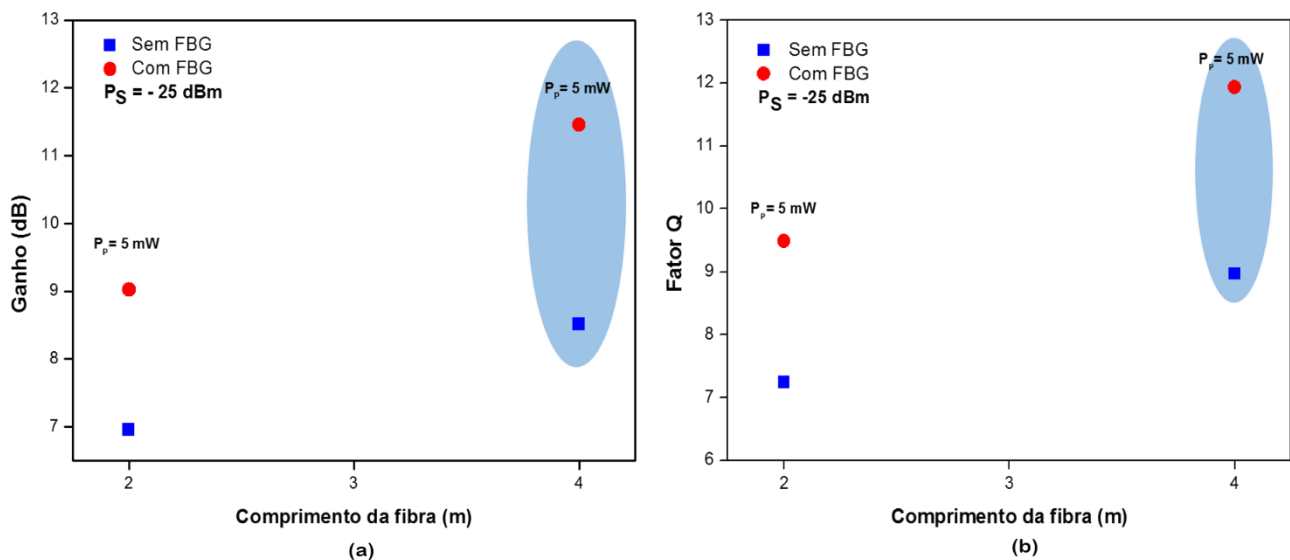
De forma semelhante aos cenários anteriores, as figuras 49 e 50, que utilizam respectivamente os tamanhos de EDFA em 8 e 10 metros, nos mostram uma relevante similaridade com as respectivas configurações nas curvas de ganho dos gráficos do cenário anterior, em que não existe reaproveitamento de potências residuais. Podemos considerar alguns casos específicos, porém, a grande maioria dos ensaios teve eficiência parecida em termos de ganho, comparada com o cenário não reflexivo.

Figura 50 - Ganho óptico em função da potência de entrada do sinal, comprimento da fibra 10 m, potência de bombeamento como parâmetro configurável testado com valores de 5, 10, 20, 50 e 100 mW. Bombeamento co-propagante com reflexão da FBG.



Fonte: próprio autor.

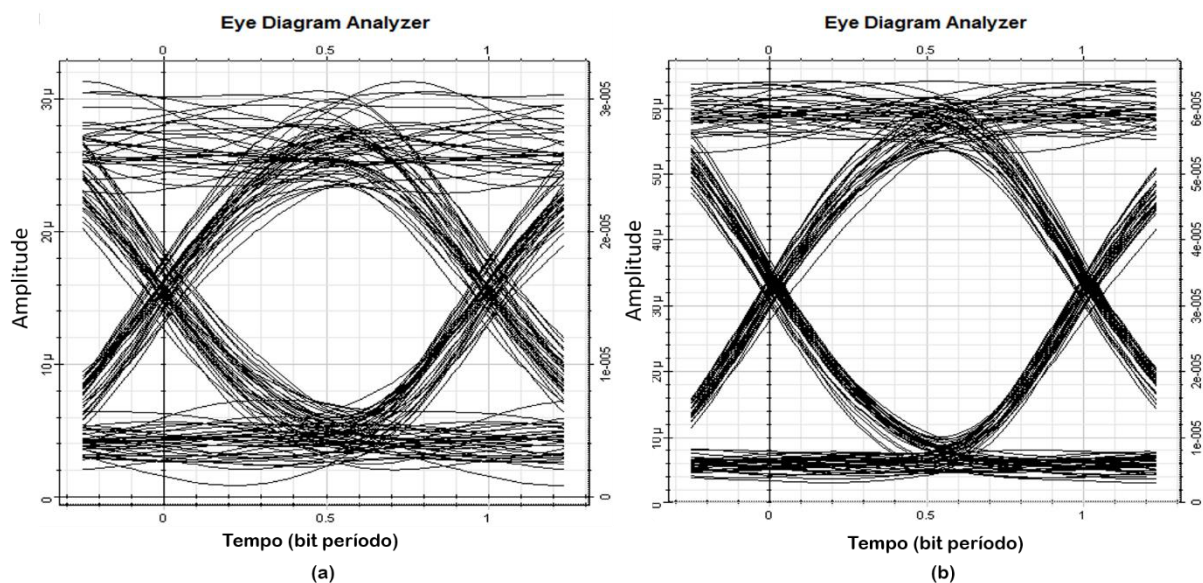
Figura 51 – Análise de desempenho dos cenários 5 e 6. (a) Ganho óptico e (b) Fator de Qualidade



Fonte: próprio autor.

Diferentemente do que foi visto nos ensaios investigados dos cenários anteriores, agora utilizando um laser de bombeamento com comprimento de onda com 1480 nm, a figura 51 ilustra a análise de uma situação em que a simulação encontra uma evolução na qualidade da amplificação, quando a potência do sinal de entrada é -25 dBm. É possível observar que utilizando uma configuração do amplificador em que o *pump laser* tem potência de 5 mW, juntamente com a fibra dopada com comprimento de 4 metros, obtêm-se um resultado significativo em termos de amplificação e qualidade, quando se utiliza a técnica de realimentação de ganho. O ganho máximo atinge um patamar de 11,5 dB, 3 dB de ganho a mais que o cenário de amplificação básica. No quesito fator de qualidade, a evolução encontrada foi de aproximadamente 3 unidades, havendo um salto para 12.

Figura 52 – Análise do Diagrama de Olho para potência de entrada de -25 dBm, $\lambda_P = 5$ mW e EDFA de 4 m. (a) Sem reciclagem de bombeamento. (b) Com reciclagem de bombeamento.



Fonte: próprio autor.

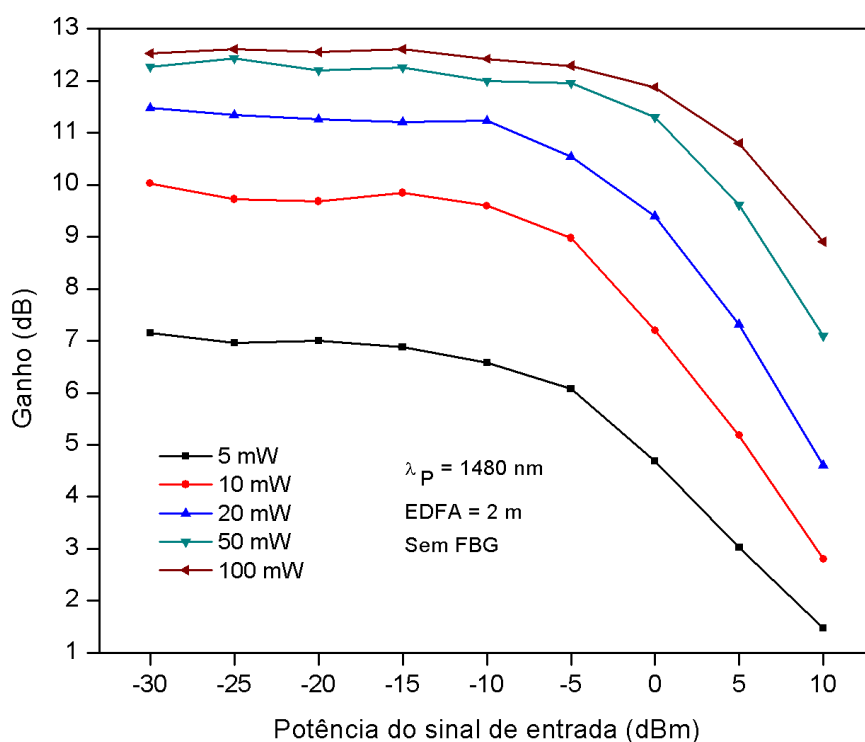
A figura 52 apresenta os respectivos Diagramas de olho, com duas situações distintas, o primeiro utiliza a configuração básica sem a grade de Bragg, o outro utiliza a técnica de reciclagem de bombeamento, no entanto ambos possuem os mesmos parâmetros. O gráfico do lado esquerdo (a) apresentou distorção de amplitude pela relação sinal-ruído, conforme podemos notar na parte superior do diagrama. Em

contrapartida, no diagrama do lado direito (b), apresentou maior abertura no olho, bem como uma superposição mais coerente entre os símbolos, configurando um sinal com baixas perdas.

5.2.3 Cenário 7

Os resultados dos ensaios deste cenário dizem respeito à configuração contra-propagante sem refletividade do laser de bombeamento agora com 1480 nm de comprimento de onda.

Figura 53 - Ganho óptico em função da potência de entrada do sinal, comprimento da fibra 2 m, potência de bombeamento como parâmetro configurável testado com valores de 5, 10, 20, 50 e 100 mW. Bombeamento contra-propagante sem reflexão da FBG.

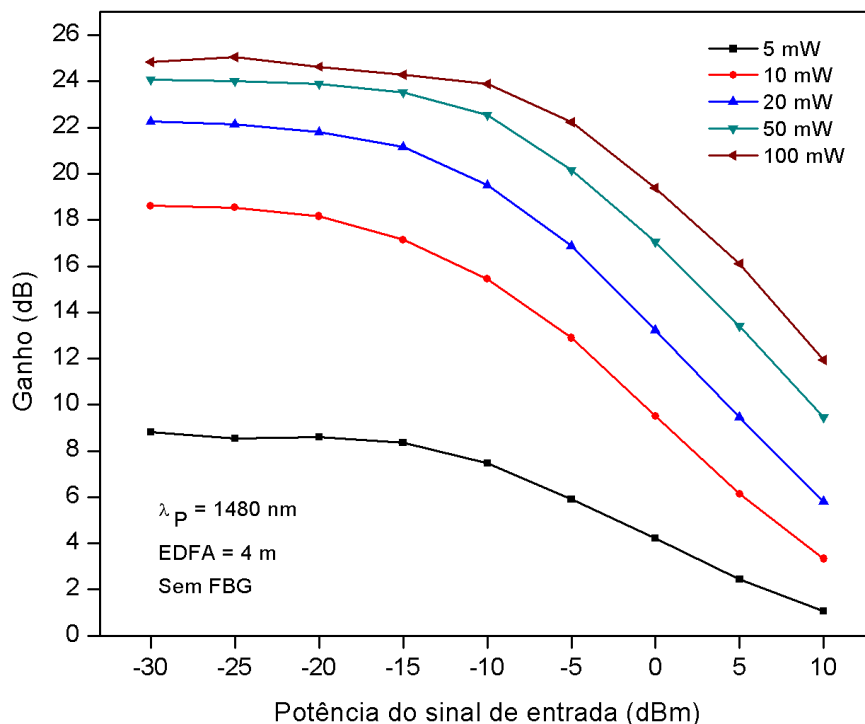


Fonte: próprio autor.

Na figura 53 é possível notar que o comportamento das curvas de ganho em função da potência de entrada do sinal assemelha-se com as da figura de mesmo parâmetro, mostrada no cenário anterior, onde a configuração é de bombeamento co-propagante. Nota-se que neste cenário há mais estabilidade de ganho entre as

potências de entrada de -30 dBm à -10 dBm. De uma forma genérica, esta configuração para o amplificador óptico adquire valores satisfatórios de ganho óptico.

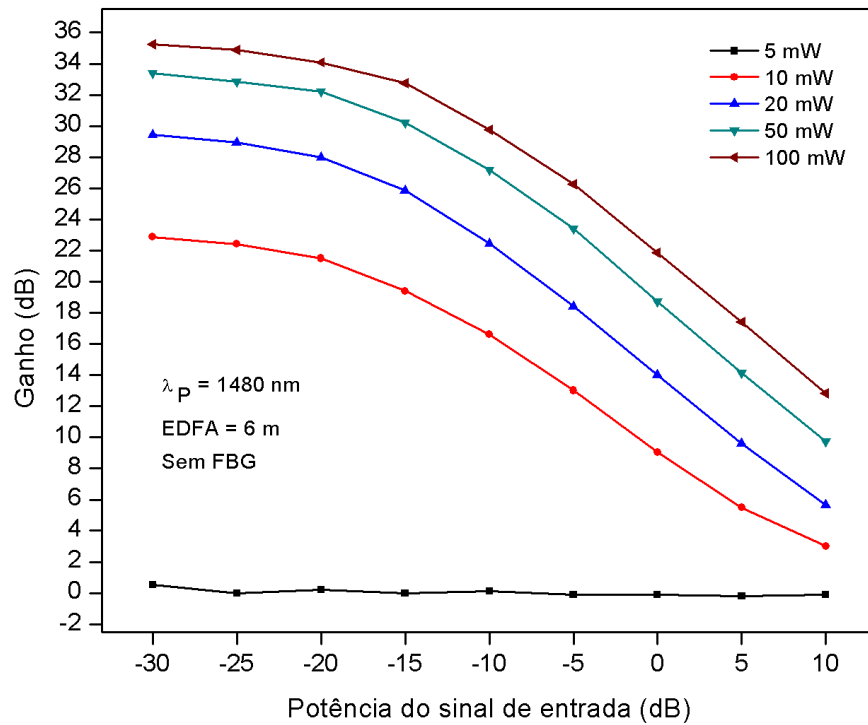
Figura 54 - Ganho óptico em função da potência de entrada do sinal, comprimento da fibra 4 m, potência de bombeamento como parâmetro configurável testado com valores de 5, 10, 20, 50 e 100 mW. Bombeamento contra-propagante sem reflexão da FBG.



Fonte: próprio autor.

Observamos na figura 54 novamente que os valores de ganho são consideráveis, principais quando os ensaios utilizam potências menores. Novamente provando a grande relação entre potência de entrada do sinal e comprimento da fibra dopada. Os valores não são muito diferentes do cenário em que o bombeamento é co-propagante.

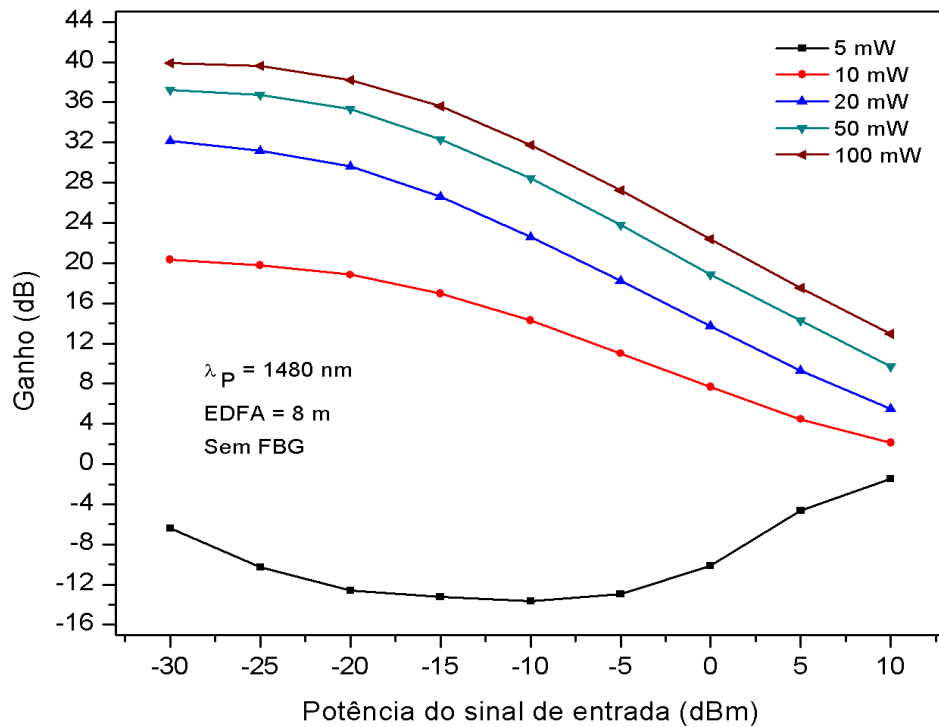
Figura 55 - Ganho óptico em função da potência de entrada do sinal, comprimento da fibra 6 m, potência de bombeamento como parâmetro configurável testado com valores de 5, 10, 20, 50 e 100 mW. Bombeamento contra-propagante sem reflexão da FBG



Fonte: próprio autor.

Novamente conforme demonstrado anteriormente, a figura 55 ilustra resultados importantes de ganho óptico para potências de bombeamento entre 10 mW e 100 mW, e atenuação na saída do amplificador para o menor valor de potência do laser de bombeamento.

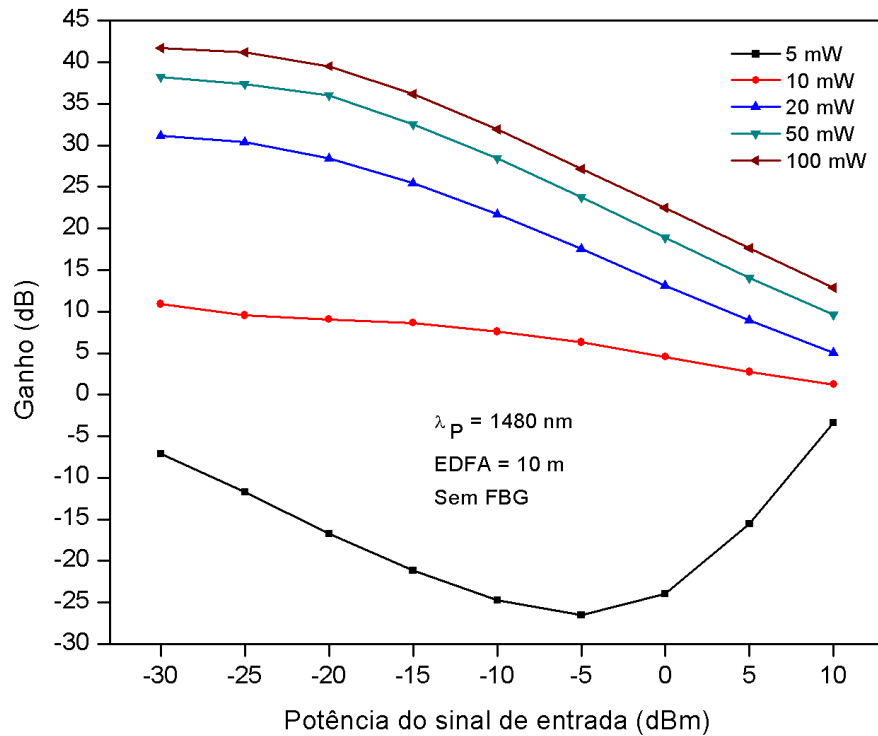
Figura 56 - Ganho óptico em função da potência de entrada do sinal, comprimento da fibra 8 m, potência de bombeamento como parâmetro configurável testado com valores de 5, 10, 20, 50 e 100 mW. Bombeamento contra-propagante sem reflexão da FBG.



Fonte: próprio autor.

Na figura 56, observa-se que quando o comprimento da fibra dopada tem o seu valor modificado para 8 metros, para lasers de bombeamento com 20, 50 e 100 mW alcançam valores entre 20 e 40 dB para potências mais baixas de sinal. Novamente demonstrando a relação entre comprimento da fibra dopada e ganho óptico na saída do amplificador. Potências menores a partir de agora tendem a atenuar o sinal em virtude do regime de saturação. Semelhantemente é o que acontece na figura 57, quando elevamos o comprimento da EDFA para 10 metros.

Figura 57 - Ganho óptico em função da potência de entrada do sinal, comprimento da fibra 10 m, potência de bombeamento como parâmetro configurável testado com valores de 5, 10, 20, 50 e 100 mW. Bombeamento contra-propagante sem reflexão da FBG.

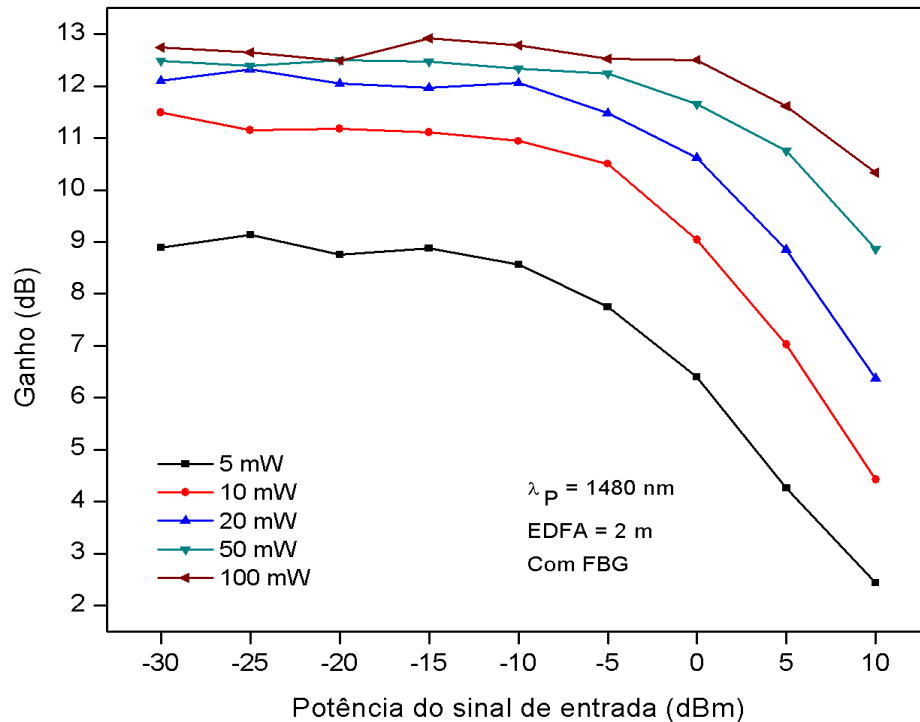


Fonte: próprio autor.

5.2.4 Cenário 8

Nesta seção, a configuração do amplificador é modificada através da presença do dispositivo que reflete potências residuais que passam pela saída do amplificador. Os resultados desses ensaios foram comparados com os anteriores, onde a grade de Bragg não é utilizada, a fim de encontrarmos os melhores casos de desempenho de ganho, assim como também da qualidade deste sinal. Os gráficos a seguir ilustram os dados obtidos nas simulações deste cenário de configuração do amplificador.

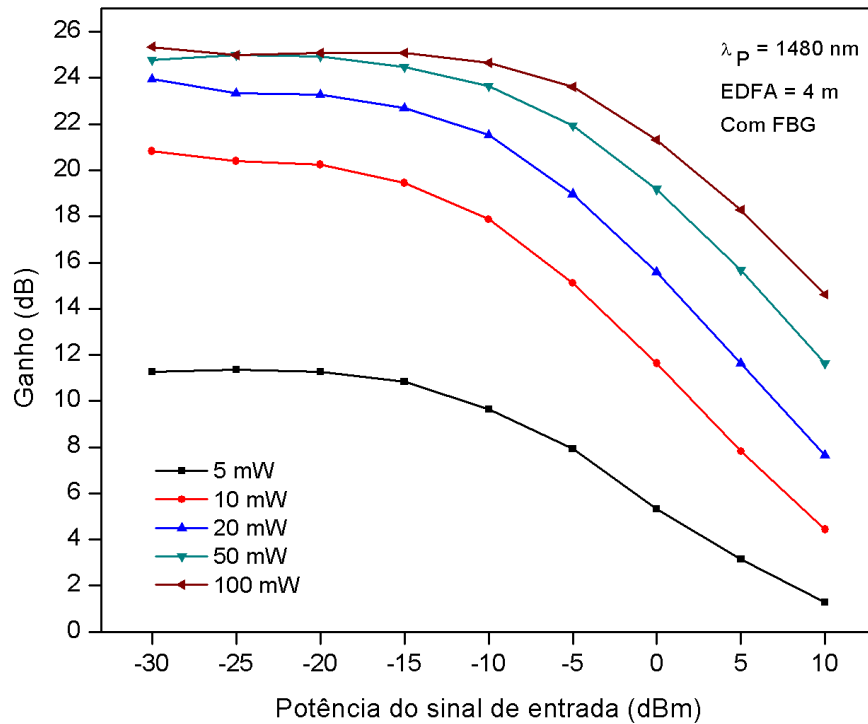
Figura 58 - Ganho óptico em função da potência de entrada do sinal, comprimento da fibra 2 m, potência de bombeamento como parâmetro configurável testado com valores de 5, 10, 20, 50 e 100 mW. Bombeamento contra-propagante com reflexão da FBG.



Fonte: próprio autor.

Iniciamos a análise dos resultados do cenário em questão com a figura 58, que nos mostra uma evolução nos méritos de ganho para na configuração reflexiva. Destacam-se as curvas para potências de bombeamento de 5, 10 e 20 mW, que resultaram em valores de ganho entre 9 e 12 dB aproximadamente. Para as demais potências de bombeamento a evolução também é notória, porém em menor proporção. Com presença da grade de Bragg, as potências residuais que restam no processo de amplificação sofrem reflexão, e são lançadas novamente na fibra dopada, onde serão elevados novamente os seus níveis de energia dos íons de érbio, causando uma nova amplificação no sistema.

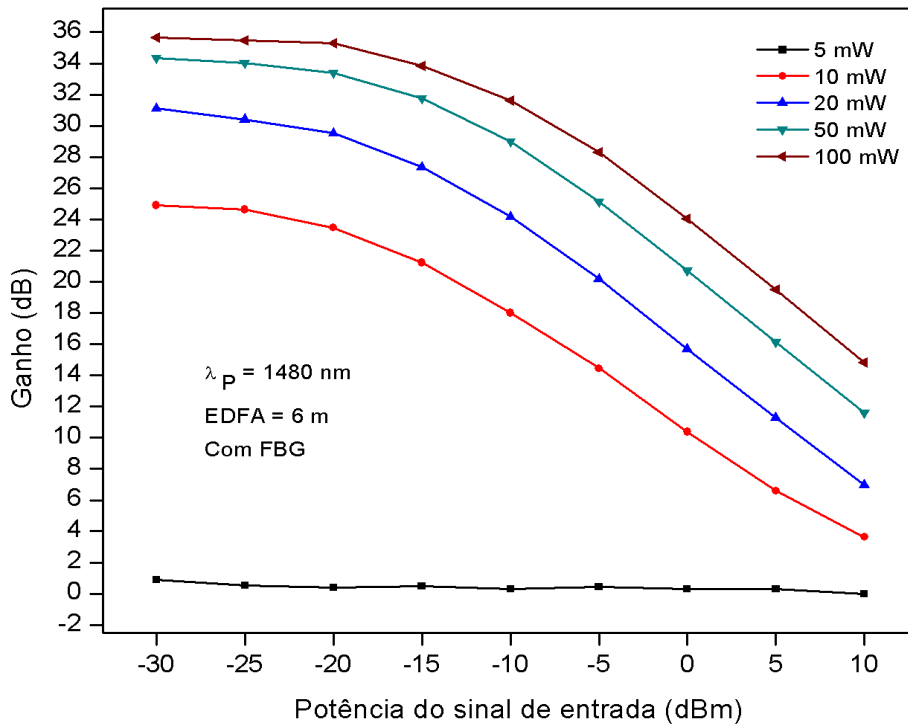
Figura 59 - Ganho óptico em função da potência de entrada do sinal, comprimento da fibra 4 m, potência de bombeamento como parâmetro configurável testado com valores de 5, 10, 20, 50 e 100 mW. Bombeamento contra-propagante com reflexão da FBG.



Fonte: próprio autor.

De forma semelhante, observa-se na figura 59, que as curvas de nível de ganho óptico elevam expressivamente, indicando um melhor desempenho deste cenário de amplificação em relação à configuração sem retroalimentação causada pela grade de Bragg. Obtivemos uma elevação de ganho óptico em torno de 3 dB.

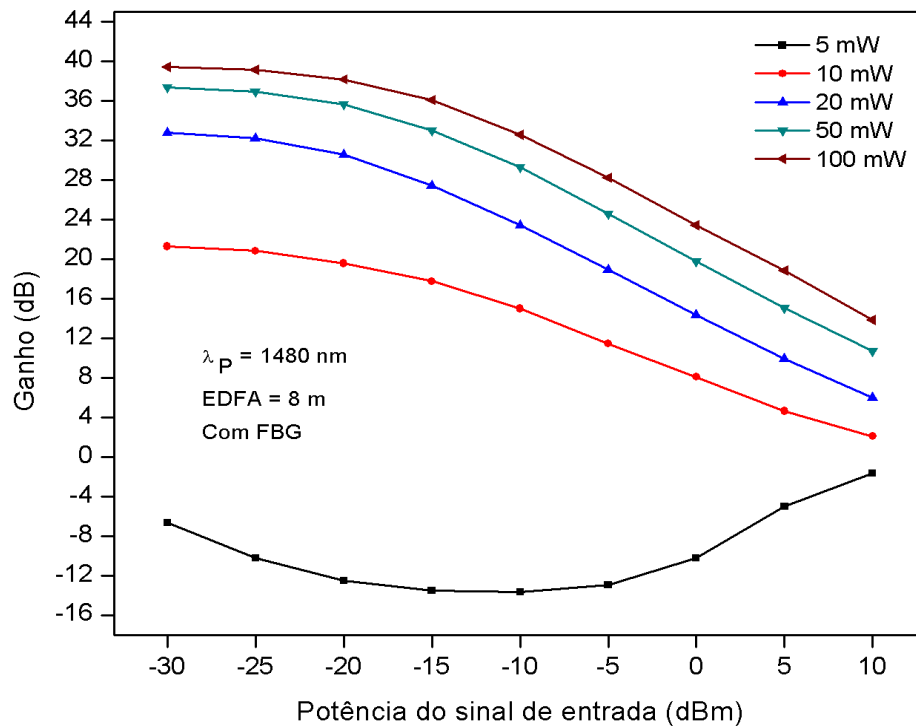
Figura 60 - Ganho óptico em função da potência de entrada do sinal, comprimento da fibra 6 m, potência de bombeamento como parâmetro configurável testado com valores de 5, 10, 20, 50 e 100 mW. Bombeamento contra-propagante com reflexão da FBG.



Fonte: próprio autor.

Na figura 60, quando elevamos o comprimento da fibra dopada, é possível observar que houve atenuação para o ensaio que utilizou a potência de bombeamento no valor de 5 mW. Porém notou-se uma melhoria no desempenho do amplificador para as potências de bombeamento 10 mW e 20 mW. Comparados com cenários anteriores, onde o EDFA teve seu valor modificado para 6 metros, percebeu-se que houve pouca modificação na saída do sinal quando os bombeamentos foram elevados.

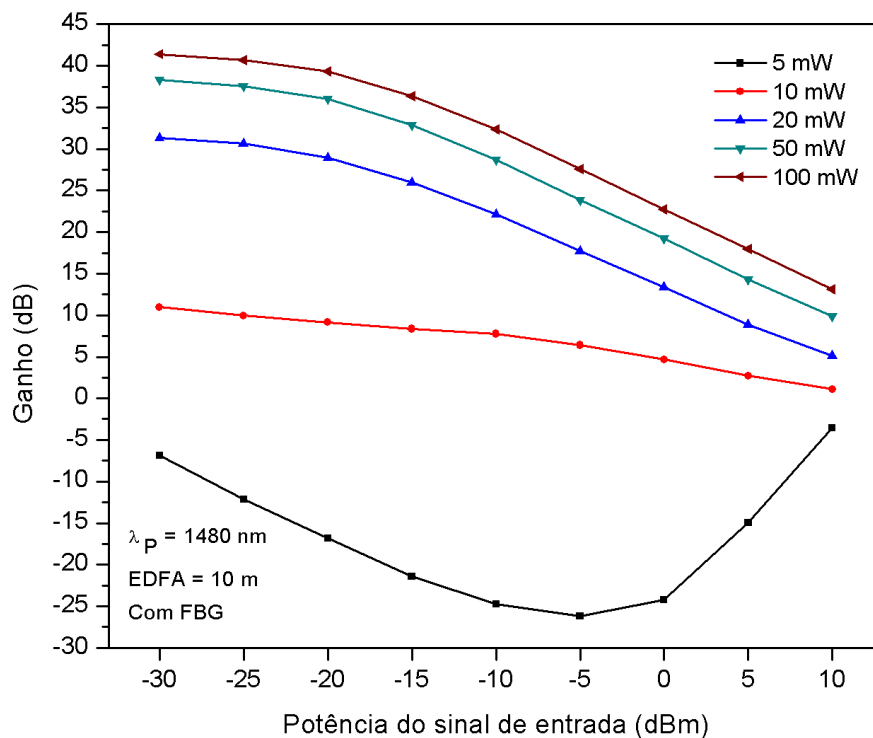
Figura 61 - Ganho óptico em função da potência de entrada do sinal, comprimento da fibra 8 m, potência de bombeamento como parâmetro configurável testado com valores de 5, 10, 20, 50 e 100 mW. Bombeamento contra-propagante com reflexão da FBG.



Fonte: próprio autor.

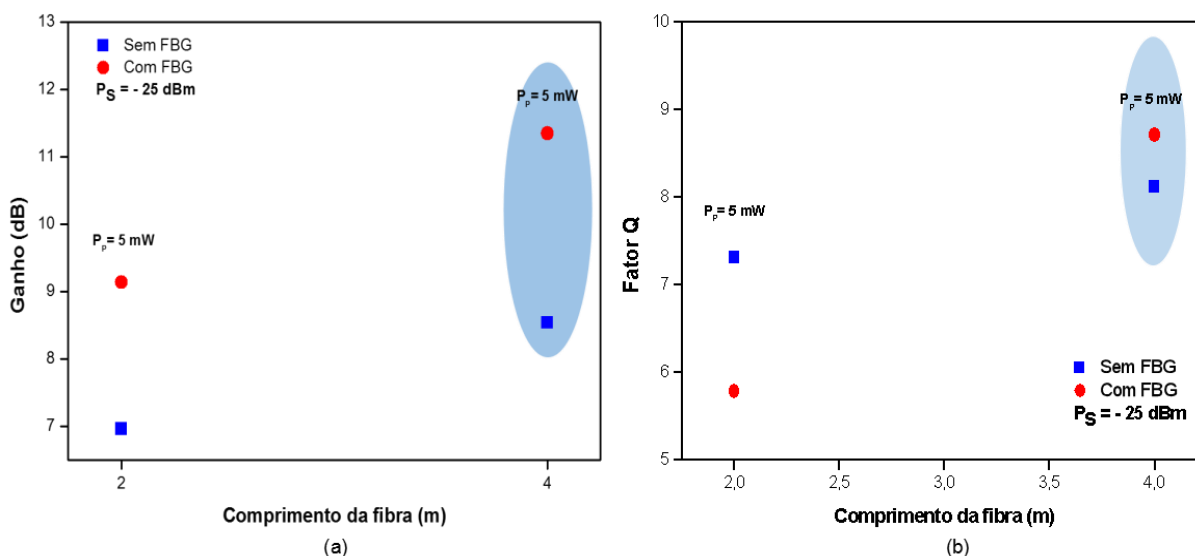
Comparando as figuras 61 e 62, com os gráficos do cenário anterior, que utilizaram os mesmos parâmetros, porém onde o amplificador não utiliza o dispositivo de reflexão, é possível notar uma leve modificação em termos de ganho óptico. Entretanto, entendemos que para a configuração contra-propagante em geral, os ensaios que utilizaram reciclagem de bombeamento mostraram-se mais eficientes em termos de ganho comparados com aqueles que não utilizaram.

Figura 62 - Ganho óptico em função da potência de entrada do sinal, comprimento da fibra 10 m, potência de bombeamento como parâmetro configurável testado com valores de 5, 10, 20, 50 e 100 mW. Bombeamento contra-propagante com reflexão da FBG.



Fonte: próprio autor.

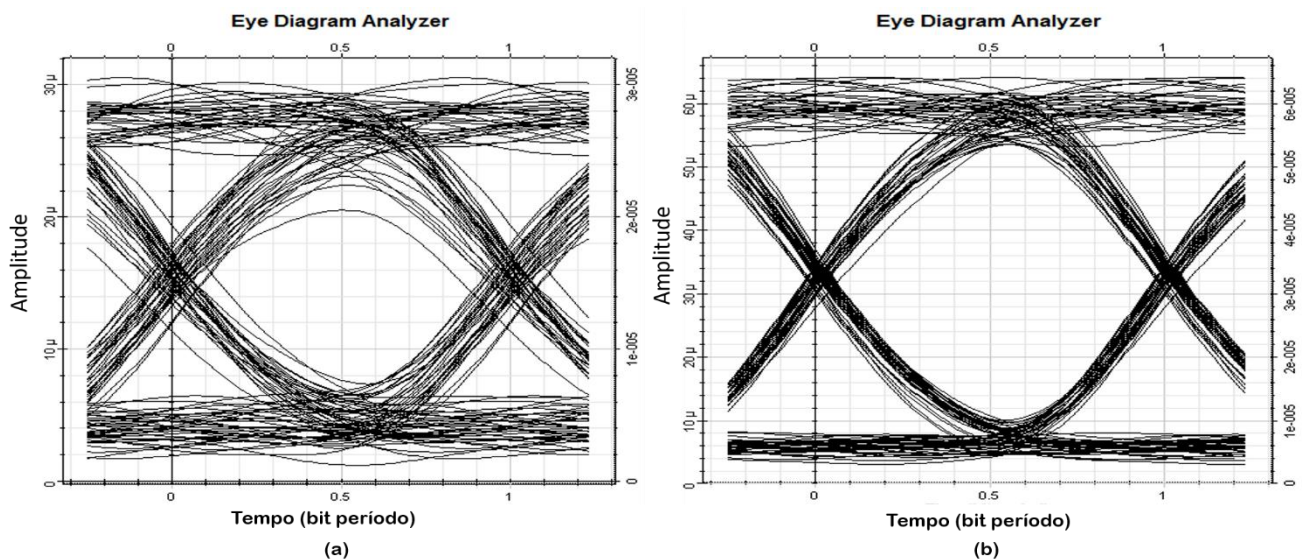
Figura 63 – Análise de desempenho dos cenários 7 e 8. (a) Ganho óptico e (b) Fator de Qualidade



Fonte: próprio autor.

De forma semelhante aos resultados dos cenários anteriores com os quais foram configurados com comprimentos de onda de 1480 nm no laser de bombeamento, os gráficos da figura 63 mostram que a potência de entrada com valor fixado em -25 dBm foi a mais condizente com os ensaios amplificação, de acordo com cada configuração. No entanto, o ensaio que utilizou uma baixa potência de *pump laser* em conjunto com uma EDFA de comprimento de 4 metros, mostrou-se mais eficaz quando aplicamos a técnica de reutilização de ganho a partir de reflexão de sinais já amplificados. A técnica de retroalimentação rendeu um ganho de aproximadamente 3 dB a mais que o cenário sem uso da grade de Bragg. É possível ainda na figura acima verificar que existiu melhoria de qualidade do sinal, alcançando um valor máximo de 9 de *Q fator*.

Figura 64 – Análise do Diagrama de Olho para potência de entrada de -25 dBm, $\lambda_P = 5$ mW e EDFA de 4 m. (a) Sem reciclagem de bombeamento. (b) Com reciclagem de bombeamento.



Fonte: próprio autor.

Na figura 64 o diagrama do ensaio que utilizou a configuração básica, ou seja, sem o elemento reflexivo, mostrou-se mais ruidoso, e com bastantes erros, tendo em vista que sua abertura é pequena, além de apresentar superposições muito discrepantes. O diagrama de olho (b) mostra-nos que com a utilização da técnica de

reciclagem de bombeamento, o sinal é mais coerente, com poucas distorções de amplitude na parte superior, e um *timing jitter* baixo, comprovando uma ótima combinação de símbolos durante a transmissão.

A tabela 2 apresenta os melhores resultados obtidos simulados, em conjunto com os respectivos parâmetros de configuração do amplificador, bem como a comparação do desempenho resultante com do uso da técnica de reciclagem de bombeamento nos amplificadores estudados.

Tabela 2 – Resultados obtidos sintetizados de acordo com os cenários simulados e parâmetros configuráveis.

Cenário	P_s (dBm)	P_p (mW)	Comprimento da Fibra Dopada (m)	Ganho (dB)	Fator Q
1	-30	5	2	7,85	2,93
2	-30	5	2	10,35	5,51
3	-30	10	4	19,62	7,62
4	-30	10	4	21,03	9,12
5	-25	5	4	8,51	8,96
6	-25	5	4	11,45	11,92
7	-25	5	4	8,54	8,12
8	-25	5	4	11,34	8,71

Fonte: próprio autor.

A partir da tabela 2, é possível observar que os resultados obtidos nas simulações são satisfatórios, quando analisamos o desempenho do amplificador que utiliza a técnica proposta.

Nos cenários iniciais que utilizaram o comprimento de onda regulado em 980 nm, o maior rendimento acontece nos casos que utilizaram uma menor potência no sinal de entrada, regulada em -30 dBm. Nos cenários de bombeamento co-propagante, o amplificador se mostra eficaz trabalhando com baixa potência de *pump* e com curto comprimento de fibra dopada. Alcançou-se um ganho de 2,5 dB a mais com o uso da técnica de retroalimentação, porém, a qualidade do sinal ainda não foi satisfatória. Nos cenários de bombeamento contra-propagante, o amplificador necessitou de uma maior potência de bombeamento, 10 mW, e comprimento da fibra ajustado em 4 metros, para melhoria de amplificação. Os ganhos obtidos foram de 2,5

e 2 dB a mais quando utilizou-se a técnica de retroalimentação de ganho, com melhor qualidade na recepção do sinal.

Quando modificamos o comprimento de onda do laser de bomba para 1480 nm, notamos que foi preciso elevar um pouco a potência do sinal de entrada para – 25 dBm, para que o sinal apresentasse melhorias na saída do amplificador. O dispositivo se mostrou mais eficaz trabalhando com baixa potência de *pump*, 5 mW, porém, a fibra dopada de 4 metros mostrou-se mais eficiente em todas as melhores situações. Nos cenários co-propagantes obtivemos ganho a mais de 3 dB, com a técnica de reciclagem de bombeamento, e o sinal na recepção foi pouco degradado. Nos cenários contra-propagantes, o rendimento do ganho óptico foi equivalente, próximo de 3 dB, o fator de qualidade teve uma tímida evolução, demonstrando a mesma qualidade em comparação com a recepção do sinal que não utiliza a grade de Bragg.

O conjunto de características existentes nos diferentes cenários de EDFA propostos, nos permitem sugestões quanto a utilização particular de uma ou outra configuração de EDFA para exercer uma das funções de pré-amplificação em um enlace óptico. No entanto, devemos buscar um dispositivo cuja relação custo-benefício seja satisfatória, ou seja, um dispositivo que apresente um alto desempenho e baixo custo.

Por fim, neste capítulo analisamos os resultados obtidos de vários cenários simulados utilizados neste estudo. Verificou-se uma eficiência maior nos ensaios com componentes de reflexão, ou seja, naquelas que utilizaram a técnica de reciclagem de bombeamento. Ao refletirmos o sinal amplificado, fazemos com que mais íons de érbio sejam reestimulados e passem novamente para um novo estágio de excitação, aumentando assim o ganho óptico. Os melhores resultados obtidos, foram de cenários que utilizaram a reflexão do bombeio contra-propagante no primeiro momento (cenário 4), com comprimento de onda 980nm, obtendo ganho máximo de 21 dB. Posteriormente, ajustando os comprimentos de onda em 1480 nm, o cenário de bombeamento co-propagante (cenário 6), destacou-se com a obtenção de ganho máximo de 11,5 dB. Em termos de qualidade, no geral, nas melhores situações de amplificação analisadas, os sinais na recepção ganharam qualidade, destacando-se o cenário 6, com o maior fator de qualidade, e diagrama de olho mais coerente.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um estudo de um Amplificador a Fibra Dopada com Érbio em estágio de pré-amplificação. Foram realizadas simulações numéricas a partir de cenários co-propagante e contra-propagante, foram adicionados dispositivos ópticos passivos para refletir o sinal do laser de bombeamento de volta para o amplificador afim de aumentar a quantidade de íons disponíveis no estado excitado, maximizando a amplificação do sinal.

Com o objetivo de encontrar a melhor situação possível para o uso da técnica de reciclagem de bombeamento durante a 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, e tamanho da fibra dopada.

Os melhores resultados obtidos foram aqueles que utilizavam em seus dispositivos, reflexão do sinal do laser de bombeio contra-propagante, no primeiro instante, e posteriormente em outro comprimento de onda, bombeamentos co-propagantes, modificados com a inserção da grade de Bragg.

Nos ensaios dos cenários iniciais, cujo comprimento de onda do laser de bomba tinha valor de 980 nm, a proposta do amplificador óptico que utiliza a técnica de reciclagem de bombeamento foi mais precisa para baixas potências de sinais de entrada combinados com baixas potências de laser de bombeamento. Nos ensaios que utilizou a técnica proposta foi possível elevar o ganho e melhorar o fator de qualidade, obtendo-se um sinal amplificado e com menor taxa de erro.

Já nos ensaios seguintes, quando os cenários simulados recebem um ajuste no comprimento de onda do sinal de *pump* para 1480nm, a proposta de melhoria no ganho através da retroalimentação é mais eficiente quando utilizamos potências de entrada do sinal em -25 dBm. A técnica utilizada na montagem do amplificador se mostra ainda mais eficaz, tendo em vista que alcança melhores níveis de ganho óptico e sinal no receptor menos ruidoso

Desta forma, a contribuição deste trabalho, é consolidada na disposição dos resultados obtidos através das análises propostas, mostrando a viabilidade na construção de um dispositivo de amplificação óptica que utiliza menos dispositivos, e trabalha com baixa potência.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados, propomos as seguintes possibilidades para continuidade deste trabalho:

- Analisar experimentalmente do dispositivo utilizando a técnica proposta.
- Utilizar o Túlio como elemento dopante.
- Estudar outras configurações do amplificador como amplificador de potência e amplificador de linha.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

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

AGRAWAL, G. P. **Fiber-optic Communication Systems**, 3 ed. 2002

BECKER, P. C.; OLSSON, N. A.; SIMPSON, J. R. **Erbium-doped fiber amplifiers : fundamentals and technology**. San Diego: Academic Press, 1999.

BJARKLEV, A. **Optical fibre amplifiers: Design and system applications**. Artech House: London, 1993.

COELHO, T. V. P. Análise Experimental de Topologias de Amplificadores Ópticos a Fibra Dopada com Érbio. 2007. 121f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Campinas, 2007.

COOMBS, JR.; CLYDE F. **Electronic Instrument Handbook**, editor in chief. Edition: 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1995.

DESURVIRE, H. W. E. **Desurvire, Erbium-Doped Fiber Amplifiers** - Principles and Applications, 1 ed. John Wiley & Sons: EUA, 1994.

DURAK, F.E., ALTUNCU, A. The effect of pump laser wavelength at 980 nm band on the performance of EDFA. 25th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), p.1-4, 2017.

DUTTON, H.J R. **Understanding Optical Communications**. Internacional Technical Support Organization. v.1, 1998.

ELMAK, E.M.E; MUSTAFA, A.B.N.M. Optimum Location of EDFA based on Eye Diagram, Q-factor and Bit Error Rate Metrics. **Journal of Electronics and Communication Engineering** (IOSR-JECE). v.12, l. 2, p. 01-04, Mar.-Apr. 2017.

ERDOGAN, T. Fiber Grating Spectra. **IEEE Journal of lightwave Technology**, v. 15, n.8, p. 1277 – 1294, augst, 1997.

FREITAS, M. Amplificadores óticos a fibra sob um ambiente dinâmico. 2006. 158f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Espírito Santo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Vitória, 2006.

FUJII, Y. High-isolation polarization-independent optical circulator coupled with single-mode fibres, **J. Lightwave Tech**, vol. 9, no. 4, p. 456-459, 1991.

HALEEM, M.R et al. Remotely pumped hybrid double-pass L-band optical amplifier utilizing chirped fiber Bragg. **Optik**. v. 125, p 620 – 623, 2014.

HEENS, B. et al. Improvement of the EDFA design for both preamplifier and booster applications, MELECON Proceedings of the 1998 9 th Mediterranean Electrotechnical Conference, May 18-20 , vol. 2, p.1404-1408, 1998.

HERBSTER, A. F. **Extensão da Faixa Dinâmica de EDFAs por Compensação da Emissão Espontânea Amplificada no Controle Eletrônico de Ganho**. 2010. 153f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Campinas, 2010.

KALER, R. Gain and Noise figure performance of erbium doped fiber amplifiers (EDFAs) and Compact EDFAs. **Optik**. p.440-443, 2011.

KAMINOW, I.P; KOCH, T.L. **Optical Fiber Telecommunications III**. San Diego: Academic Press, 1997

KOESTER; C. J.; E. SNITZER. Fiber laser as a light amplifier. **J. Opt. Soc. Amer.** , v. 53, p. 515-516, 1963.

LAM, D. K. W; GARSIDE, B. K. Characterization of single-mode optical fiber filters. **Appl. Opt.** v.20, p.440-445, 1981.

LIAW, S.K. et al. Eye-diagram and Q factor evaluation of fiber ring laser in lightwave transmission. **Optical Fiber Technology**. v. 31, p 55 – 60, 2016.

MALHOTRA, Y; KALER, R.S. Compensating spectral loss variations in EDFA amplifiers for different modulation formats. **Optik**, v.122, p 435-439, 2011.

MAO, Q; WANG, J.; SUN, X; ZHANG, M. A theoretical analysis of amplification characteristics of bi-directional erbium-doped fiber amplifiers with single erbium-doped fiber, **Opt. Commun**, v. 159, p. 149-157, 1999.

MILO, S. **Análise de Desempenho de Topologias de Amplificadores Ópticos a Fibra Dopada com Érbio**. 2003. 121f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Campinas, 2003.

MOVASSAGHI, M.K; JACKSON, K; SMITH, V. M; HALLAM, W. J. Noise figure of erbium-doped fiber amplifier in saturated operation, **J. Lightwave Technol.**, v. 16, no. 5, pp. 812-817, 1998.

MUKAI, T. et al. S/N and error rate performance in AlGaAs semiconductor laser preamplifier and linear repeater systems, IEEE Trans. **Microwave Theory And Tech.** v. 30, p 1548 – 1556, 1982.

OLIVEIRA, J. C. R. F. O. **Projeto de EDFAs com Controle Automático de Ganho Totalmente Óptico para Aplicações em Redes WDM**. 2004. 129f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Campinas, 2004.

OPTIWAVE. Photonic Software, 2010.
<https://optiwave.com/category/products/system-and-amplifier/design/optisystem/optisystemdownloads/>

OTHONOS, A. Fiber Bragg Grating, **Review of Scientific Instruments**, v. 68, p 4309 – 4341, 1997.

RIEZNIK, A. A. Study on optimum fiber length for maximum gain in C- and L-band EDFAs. **Optics Communications**, 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.

SKLAR, B. **Digital Communications – Fundamentals and Applications**. Prentice Hall: Los Angeles, 2001.

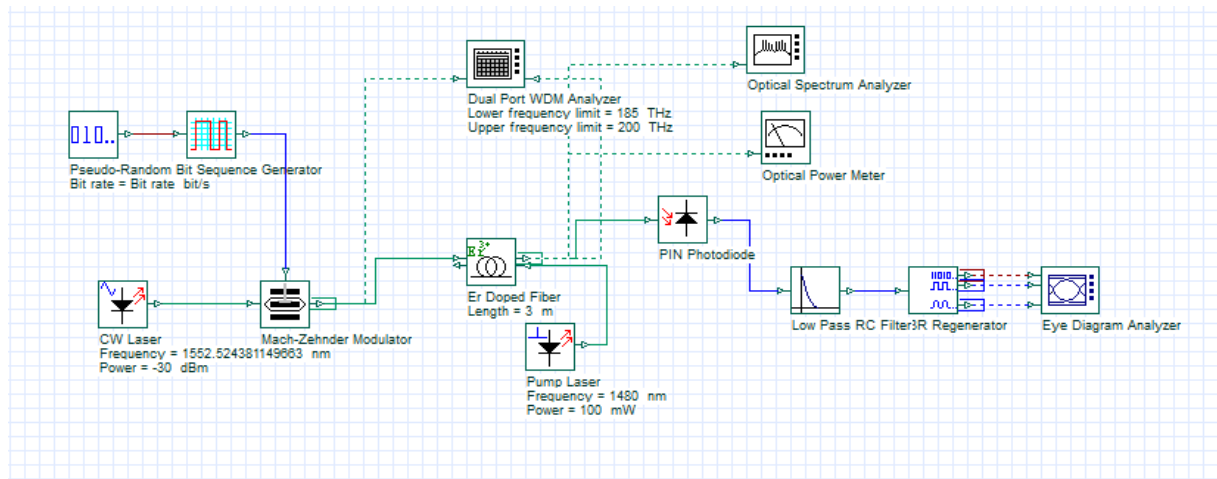
SUDO, S. **Optical Fiber Amplifiers – Material, Devices, and Applications**, 1 ed., Artech House: EUA, 1997.

THARWAT, M. M. et al. A study of green wavelength-division multiplexed optical communication systems using cascaded fiber bragg grating. **Journey Elsevier**. v.20, p.467-472, 2014.

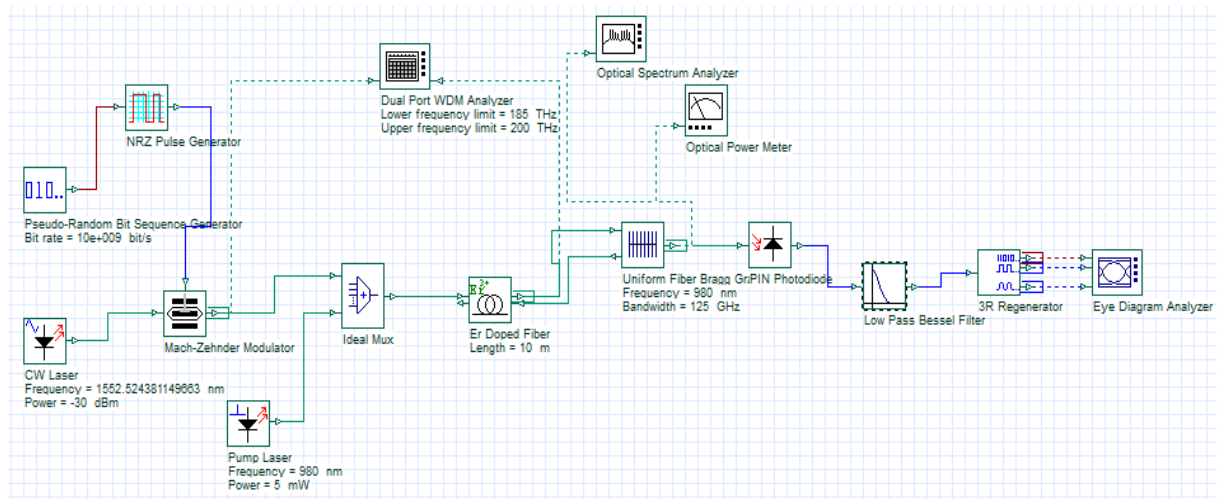
WYSOCKI, P.F et al. Broad-Band Erbium-Doped Fiber Amplifier Flattened Beyond 40 nm Using Long-Period Grating Filter. **Ieee Photonics Technology Letters**, v. 9, n. 10, October,1997.

APENDICES

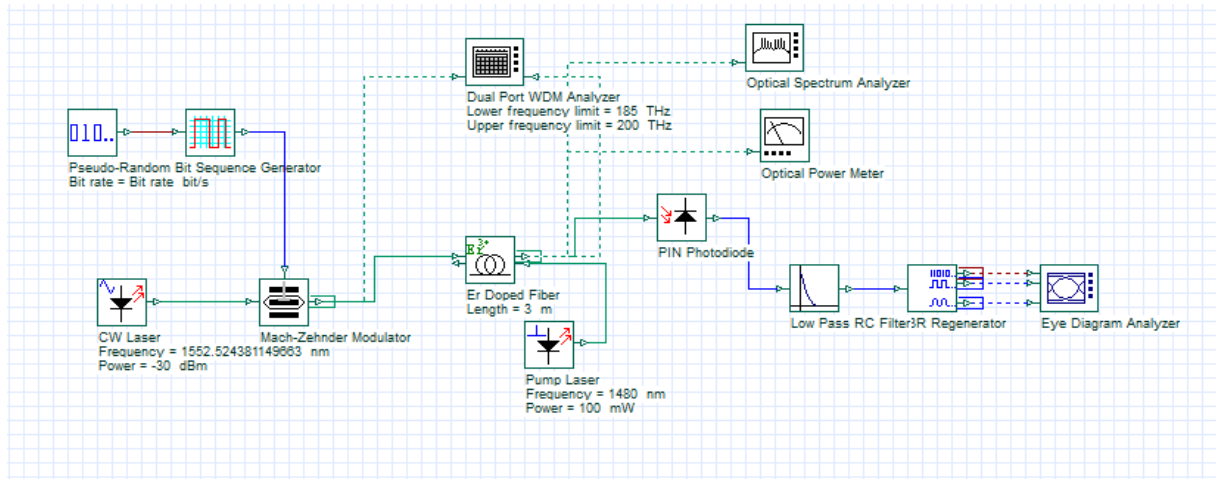
1 Configuração básica do amplificador EDFA com bombeamento co-propagante e sem grade de Bragg



2 Configuração do amplificador EDFA com bombeamento co-propagante e presença da grade de Bragg



3 Configuração básica do amplificador EDFA com bombeamento contra-propagante e sem grade de Bragg



4 Configuração básica do amplificador EDFA com bombeamento contra-propagante e com grade de Bragg

