



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

**Amplificadores Ópticos com Controle Automático de Ganho
para Aplicação em Redes Ópticas Reconfiguráveis**

Júlio César Rodrigues Fernandes de Oliveira

Orientador:

Aldário Chrestani Bordonalli (FEEC)

Co-orientador:

João Batista Rosolem (CPqD)

Composição da Banca Examinadora:

Prof. Dr. Aldário Chrestani Bordonalli – FEEC/UNICAMP – Presidente

Prof. Dr. Murilo Araujo Romero – EESC/USP – São Carlos

Prof. Dr. Hélio Waldman – FEEC/UNICAMP

Prof. Dr. Rui Fragassi Souza – FEEC/UNICAMP

Prof. Dr. Evandro Conforti – FEEC/UNICAMP

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos exigidos para obtenção do grau de Doutor em ENGENHARIA ELÉTRICA.

Campinas, Julho de 2007

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

OL4a Oliveira, Júlio César Rodrigues Fernandes de
Amplificadores ópticos com controle automático de
ganho para aplicação em redes óticas reconfiguráveis / Júlio
César Rodrigues Fernandes de Oliveira. --Campinas, SP:
[s.n.], 2007.

Orientadores: Aldário Chrestani Bordonalli, João Batista
Rosolem

Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas,
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Amplificadores óticos. 2. Controle automático. 3.
Comunicações óticas. 4. Fibras óticas. I. Bordonalli,
Aldário Chrestani. II. Rosolem, João Batista. III.
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
Engenharia Elétrica e de Computação. IV. Título.

Título em Inglês: Optical amplifiers with automatic gain control for
reconfigurable optical network applications

Palavras-chave em Inglês: Optical amplifiers, Automatic control,
Reconfigurable optical networks, Optical fiber

Área de concentração: Telecomunicações e Telemática

Titulação: Doutor em Engenharia Elétrica

Banca examinadora: Murilo Araujo Romero, Hélio Waldman, Rui Fragassi
Souza e Evandro Conforti

Data da defesa: 23/07/2007

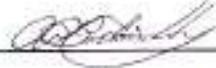
Programa de Pós-Graduação: Engenharia Elétrica

COMISSÃO JULGADORA - TESE DE DOUTORADO

Candidato: Júlio César Rodrigues Fernandes de Oliveira

Data da Defesa: 23 de julho de 2007

Título da Tese: "Amplificadores Ópticos com Controle Automático de Ganho para Aplicação em Redes Ópticas Reconfiguráveis"

Prof. Dr. Aldário Chrestani Bordonali (Presidente): 

Prof. Dr. Murilo Araújo Romero: 

Prof. Dr. Evandro Conforti: 

Prof. Dr. Rui Fragassi Souza: 

Prof. Dr. Hélio Waldman: 

Resumo

A modificação no padrão de tráfego das redes, introduzida pelo avanço das tecnologias de chaveamento óptico e de conversão de comprimento de onda, vem requerendo mudanças nas características dos dispositivos e equipamentos ópticos até então utilizados, uma vez que muitos destes ainda são otimizados para enlaces ponto-a-ponto e deixam de apresentar as funcionalidades necessárias para um funcionamento adequado em redes reconfiguráveis. Em particular, podem ser citados os amplificadores ópticos, em sua maioria amplificadores à fibra dopada com érbio (EDFAs – *erbium doped fiber amplifiers*), que exibem uma forte dependência do ganho com o nível de potência de entrada. Este comportamento se torna um fator limitante devido à aleatoriedade do número de canais na entrada dos amplificadores, exibida pelas redes reconfiguráveis. Dessa maneira, técnicas de controle automático de ganho têm sido propostas no intuito de eliminar este vínculo do ganho do EDFA com a sua potência de entrada, com algumas delas obtendo êxito. No entanto, dentre as técnicas apresentadas, o controle de ganho está sempre associado a uma faixa de operação de potência limitada juntamente a uma faixa dinâmica de controle também limitada, reduzindo assim a aplicabilidade do EDFA controlado a um determinado modo de operação (pré, linha ou *booster*). Com isto, o número de canais a serem inseridos ou retirados na entrada do EDFA fica limitado. Neste trabalho, o desenvolvimento de uma técnica de controle de ganho inovadora, baseada em uma estrutura de controle híbrido de ganho, é apresentado. Esta técnica de controle proporciona uma generalização do controle de ganho de EDFAs, ou seja, através desta obtém-se um EDFA capaz de operar com eficiente controle automático de ganho em qualquer faixa de operação de potência de entrada, com ausência de limitação da faixa dinâmica de controle e supressão de transientes. Como parte das etapas de trabalho, uma técnica de medição sistêmica ultra-rápida, capaz de avaliar o desempenho sistêmico em curtos períodos de tempo e analisar transientes de dispositivos de redes ópticas, foi implementada. Além desta, visando redes reconfiguráveis metropolitanas, um EDFA de dupla passagem, com uma fibra compensadora de dispersão embutida e controle automático de ganho totalmente óptico, foi projetado e caracterizado.

Abstract

The changes in the network traffic pattern as a result of the new optical switching and wavelength conversion technologies have required a transformation on the available optical device and equipment characteristics, since most of them were optimized for fixed optical network operation and lack the necessary functionality to work on reconfigurable networks. In particular, the erbium doped fiber amplifiers (EDFA's) are an example of such a case. Most of the EDFA designs result in an amplifier that presents a strong gain dependency on the input optical power. Unfortunately, this behavior turns out to be a limiting factor in reconfigurable networks, since the number of amplifier coupled channels becomes random. Thus, automatic gain control techniques have been proposed to ease the EDFA gain dependency on the input power. However, the proposed schemes have always associated the gain control to both a limited power operation range and a limited dynamic range so that the EDFA application is restricted to a given operation mode (pre-, in-line, or booster amplification), limiting the number of channels to be added to or dropped from the amplifier input. In this work, the development of a new gain control technique based on a hybrid gain control structure is presented. A generalized EDFA gain control approach is achieved. By assuming that, it is possible to conceive an EDFA that is now capable of presenting an efficient gain control for a wide input power range, along with a wide dynamic control range and absence of transients. As a result of the different stages of this work, a technique for ultra-fast systemic measurements was implemented. With that, the system performance could be evaluated in short time spans by considering different optical network devices. Also, the gain controlled EDFA application to regenerators was investigated. As a result, a double pass all-optical gain controlled EDFA with embedded dispersion compensating fiber was implemented and characterized for applications in metropolitan area optical networks.

À Claudineide, Juarez, Graça, Juliano e Ana Júlia.

Pelo amor e dedicação proporcionados ao longo deste trabalho e de minha vida.

Agradecimentos

Ao Prof. Dr. Aldário C. Bordonalli, pela orientação em toda minha trajetória na pós-graduação, pelas longas discussões e pelas melhorias realizadas em todos os documentos referentes aos EDFAs desenvolvidos por nós ao longo desses anos.

Ao pesquisador Dr. João Batista Rosolem, pelos ensinamentos e constantes discussões na área de comunicações ópticas, pela ativa co-orientação, pela amizade e companheirismo sempre presentes desde minha chegada a Campinas.

Ao pesquisador Dr. Claudio Florida, pelo trabalho conjunto realizado no desenvolvimento da técnica de avaliação sistêmica de transientes de redes ópticas.

À Fundação CPqD, em especial aos pesquisadores: Roberto Arradi, Ronaldo F. da Silva, Antonio A. Juriollo, Luis R. Monte, Sandro M. Rossi e Fábio D. Simões pela ativa contribuição em diferentes partes do desenvolvimento deste trabalho.

A Alberto Paradisi, Rege Romeu Scarabucci e Miriam R. X. de Barros, por incentivarem e proporcionarem a realização deste trabalho no âmbito do projeto GIGA.

A todo o DEE da Universidade Federal de Campina Grande, pela excelente formação proporcionada durante a minha graduação, em especial ao Prof. Dr. José Ewerton P. de Farias, responsável pela minha descoberta do campo das comunicações ópticas.

A Claudineide N. F. de Oliveira, minha esposa, pela sua paciência, companheirismo e incondicional apoio, sem os quais seria impossível a realização deste trabalho.

A meu irmão Juliano, pela ótima pessoa que é, pela sua gratificante companhia, e pela sua incondicional ajuda durante a realização deste trabalho.

Ao meu Pai, Juarez Fernandes de Oliveira, pelo amor à ciência e incansável busca da disseminação do saber, que me contagiaram a seguir o apaixonante caminho da ciência.

Aos eternos amigos Isaac, Gibran, Thiago, Jaidilson, Kleber, Rafael e Marcus, que mesmo de longe sempre me motivaram e torceram pela conclusão desta fase da minha vida.

Sumário

Capítulo 1 Introdução.....	1
Capítulo 2 Técnicas de Controle Automático de Ganho para EDFAs.....	7
2.1 Controle Automático de Ganho Totalmente Óptico.....	8
2.1.1 Realimentação Óptica.....	8
2.1.2 Fatores Limitantes do Controle Automático de Ganho Totalmente Óptico e os Avanços Recentes	11
2.2 Controle Automático Eletrônico de Ganho	17
2.2.1 Controle Eletrônico com Alimentação Adiante (Electronic Feedforward Control).....	18
2.2.2 Controle Eletrônico Realimentado (Electronic Feedback Control).....	22
2.2.3 Controle Eletrônico Combinado (Controle com Alimentação Adiante e Realimentado).....	26
2.3 Controle Automático Híbrido de Ganho	29
2.4 Análise Crítica das Técnicas de Controle Automático de Ganho para EDFAs.....	33
Capítulo 3 Desenvolvimento de um Controle Híbrido de Ganho.....	41
3.1 Avanços na Técnica de Controle Automático Totalmente Óptico	42
3.1.1 Projeto do EDFA	44
3.1.2 Caracterização e Resultados	45
3.2 Desenvolvimento do Controle automático eletrônico de ganho.....	54
3.2.1 Caracterizações Espectral e Temporal do EDFA com AGC Eletrônico.....	54

3.3 Controle Automático Híbrido de Ganho	69
3.3.1 <i>Esquema de Controle Híbrido</i>	71
3.3.2 <i>Análise do Ganho do EDFA com Controle Híbrido.....</i>	73
3.3.3 <i>Figura de Ruído do EDFA com Controle Híbrido</i>	77
3.3.4 <i>Caracterizações Espectral e Temporal do EDFA com Controle Híbrido.....</i>	84
Capítulo 4 Resultados Complementares.....	99
4.1 Método Ultra-Rápido para Análise Sistêmica durante Transientes.....	99
4.1.1 <i>Arranjo Experimental</i>	100
4.1.2 <i>Resultados Experimentais.....</i>	102
4.2 Controle Automático de Ganho Aplicado a EDFAs de Dupla Passagem que incorporam DCFs	108
4.2.1 <i>Introdução.....</i>	109
4.2.2 <i>Circuito Óptico do EDFA de Tripla Função (DP-AGC-EDFA c/ DCF)</i>	110
4.2.3 <i>Caracterização e Resultados Obtidos.....</i>	112
Capítulo 5 Conclusões, Contribuições, Trabalhos Futuros e Publicações.....	119
5.1 Contribuições	121
5.2 Trabalhos Futuros	123
5.3 Publicações Referentes à Tese	123
Referências Bibliográficas	127
Anexo A Teoria Básica dos Amplificadores a Fibra Dopada com Érbio (EDFAs)	137
A.1 Amplificadores a Fibra Dopada com Érbio (EDFAs)	137
A.2 Configuração Básica	139

A.3 Mecanismo de Amplificação	141
A.4 Parâmetros Fundamentais dos EDFAs	144
A.5 Aplicações e Configurações dos EDFAs.....	148
<i>Anexo B Curvas de Ajuste do Bombeio utilizadas no EDFA com Controle Híbrido de Ganho.....</i>	<i>155</i>

Lista de Figuras

Fig. 2.1: Método de controle automático de ganho totalmente óptico utilizando a realimentação óptica.	8
Fig. 2.2: Método de controle automático de ganho totalmente óptico utilizando grades de Bragg. ...	10
Fig. 2.3: Sinal fotodetectado na saída de um EDFA, para um canal sobrevivente: (a) EDFA sem controle de ganho;(b) EDFA com controle automático de ganho totalmente óptico.....	12
Fig. 2.4: Sinal eletrônico resultante da fotodetecção do canal sobrevivente para uma atenuação da realimentação óptica de 10 dB, quando o canal de controle localiza-se em (1) 1535 nm, (2) 1547,7 nm, (3) 1554 nm e (4) 1557 nm, durante a inserção e retirada dos canais a cada 1 ms [21].	14
Fig. 2.5: Controle de ganho eletrônico com alimentação adiante aplicado a um EDFA.....	19
Fig. 2.6: Representação esquemática do controle do enlace (<i>link control</i>) para proteção dos canais sobreviventes, em redes ópticas.	20
Fig. 2.7: Controle de ganho eletrônico com realimentação aplicado a um EDFA.....	23
Fig. 2.8: Estrutura de controle eletrônico de ganho utilizando realimentação baseada na monitoração de em um laser de teste e na atuação em um laser de bombeio [38].	25
Fig. 2.9: Estrutura combinada de controle automático de ganho utilizando controle com alimentação adiante (<i>feedforward</i>) e realimentado (<i>feedback</i>).....	26
Fig. 2.10: Diagrama esquemático de um EDFA com controle automático híbrido de ganho.	30
Fig. 3.1: Diagrama esquemático do AOGC-EDFA projetado.	43
Fig. 3.2. Simulação do ganho e da figura de ruído em função do comprimento para a fibra dopada com érbio utilizada no projeto do AOGC-EDFA.....	44
Fig. 3.3. Função de Transferência do FVOA utilizado.	45
Fig. 3.4: Arranjo experimental utilizado na caracterização do AOGC-EDFA desenvolvido.....	46
Fig. 3.5. Ganho versus potência de entrada para diferentes níveis de atenuação da realimentação óptica.	47

Fig. 3.6. Variação do ganho versus potência de entrada para diferentes níveis de atenuação da realimentação óptica.	48
Fig. 3.7. Figura de ruído versus potência de entrada para o AOGC-EDFA projetado.	49
Fig. 3.8: (a) Comportamento do canal sobrevivente (canal de controle em 1528 nm) após fotodeteção, para diferentes níveis de atenuação da realimentação óptica do AOGC-EDFA e (b) comportamento do canal sobrevivente para quatro diferentes posições do canal de controle na banda C(1 – 1535 nm, 2 – 1545 nm, 3 – 1554 nm e 4 – 1557 nm) com nível de atenuação de realimentação equivalente ao de CA2, em um AOGC-EDFA semelhante ao utilizado em [21].	50
Fig. 3.9 (a): Espectros sobrepostos referentes à saída do AOGC-EDFA desenvolvido: curva azul/escuro apresenta a saída referente a uma entrada composta por 32 canais e curvas vermelhas/claras apresentam os espectros para cada uma das dezesseis posições dos canais sobreviventes utilizados; (b) detalhamento da parte superior dos espectros de saída do AOGC-EDFA.	52
Fig. 3.10: Ganho e variação de ganho do AOGC-EDFA quando submetido a uma entrada composta por 32 canais e por 1 canal.	53
Fig. 3.11: Diagrama esquemático do EDFA com o controle eletrônico construído.	55
Fig. 3.12: Ganho versus comprimento de onda do EAGC-EDFA nos modos de operação $G = 12$ e $G = 20$ dB, para uma variação de potência de entrada de 10 dB em cada respectivo modo de operação.	57
Fig. 3.13: Figura de ruído versus comprimento de onda do EAGC-EDFA nos modos de operação $G = 12$ e $G = 20$ dB, para uma variação de potência de entrada de 10 dB em cada respectivo modo de operação.	57
Fig. 3.14: Potência de saída versus comprimento de onda do EAGC-EDFA nos modos de operação $G = 12$ e $G = 20$ dB, para uma variação de potência de entrada de 10 dB em cada respectivo modo de operação.	58
Fig. 3.16: Espectros de saída do EAGC-EDFA no modo $G = 12$ dB ($P_{in} = -4$ dBm/canal).	60
Fig. 3.17: Ganho e variação de ganho para o EAGC-EDFA ($G = 12$ dB).	61
Fig. 3.18: Espectros de saída do EAGC-EDFA no modo $G = 20$ dB ($P_{in} = -14$ dBm/canal).	62

Fig. 3.19: Ganho e variação de ganho para o EAGC-EDFA ($G = 20$ dB).....	63
Fig. 3.20: Espectros de saída do EAGC-EDFA no modo $G = 20$ dB ($P_{in} = -18$ dBm/canal, 16 canais).....	64
Fig. 3.21: Ganho e variação de ganho para o EAGC-EDFA ($G = 20$ dB, 16 canais).....	65
Fig. 3.22: Resposta temporal da potência total de saída do EDFA com controle de ganho eletrônico, ($G = 20$ dB) para: (a) acréscimos de potência de entrada de 10 dB (acima), 7 dB (meio) e 3 dB (abaixo) e (b) decréscimos de potência de entrada de 10 dB (acima), 7 dB (meio) e 3 dB (abaixo).....	66
Fig. 3.23: Resposta temporal do canal sobrevivente na saída do EDFA com controle de ganho eletrônico, ($G = 20$ dB) para: (a) acréscimo de potência de entrada de 10 dB e (b) decréscimo de potência de entrada de 10 dB.....	67
Fig.3.24: Variação da taxa de erro de bit com a adição de 7 canais.	68
Fig. 3.25: Variação da taxa de erro de bit com a retirada de 7 canais.....	68
Fig. 3.26: Esquema óptico do EDFA com o controle híbrido de ganho implementado.....	71
Fig. 3.27: Ganho versus potência de entrada total (faixa dinâmica) para o EDFA com controle híbrido de ganho, para cinco modos distintos de operação.....	75
Fig. 3.28: Comparação do ganho do EDFA com controle híbrido, quando submetido a apenas o canal sobrevivente e a 2, 4, 8, 16 e 32 canais.....	76
Fig. 3.29: Variação de ganho correspondente às medidas apresentadas na Fig. 3.28.....	77
Fig. 3.30: Figura de ruído versus potência de entrada total do EDFA com controle híbrido de ganho.	79
Fig. 3.31: Figura de ruído na banda C do EDFA com controle híbrido de ganho ($G = 10$ dB).....	81
Fig. 3.32: Figura de ruído na banda C do EDFA com controle híbrido de ganho ($G = 15$ dB).....	82
Fig. 3.33: Figura de ruído na banda C do EDFA com controle híbrido de ganho ($G = 20$ dB).....	82
Fig. 3.34: Figura de ruído na banda C do EDFA com controle híbrido de ganho ($G = 25$ dB).....	83
Fig. 3.35: Figura de ruído na banda C do EDFA com controle híbrido de ganho ($G = 30$ dB).....	83

Fig. 3.37: Espectros de saída do EDFA com controle híbrido de ganho com 32 canais e 1 canal, para o modo de operação $G = 15$ dB: (a) potência de entrada total de +5 dBm (32 canais) e (b) potência de entrada total de -5 dBm (32 canais).....	86
Fig. 3.38: Espectros de saída do EDFA com controle híbrido de ganho com 32 canais e 1 canal, para o modo de operação $G = 20$ dB: (a) potência de entrada total de 0 dBm (32 canais) e (b) potência de entrada total de -10 dBm (32 canais).	87
Fig. 3.39: Espectros de saída do EDFA com controle híbrido de ganho com 32 canais e 1 canal, para o modo de operação $G = 25$ dB.....	88
Fig. 3.40: Espectros de saída do EDFA com controle híbrido de ganho com 32 canais e 1 canal, para o modo de operação $G = 30$ dB.....	88
Fig. 3.41: Resposta temporal do EDFA com controle híbrido no modo de operação $G = 10$ dB com <i>add/drop</i> de 31 canais, controle puramente eletrônico (potência total de +10 dBm para 32 canais e -5 dBm para 1 canal).....	91
Fig. 3.42 (a)-(b): Resposta temporal do EDFA com controle híbrido no modo de operação $G = 15$ dB com <i>add/drop</i> de 31 canais, (a) sem e (b) com o pré-controle óptico para ajuste baseado no controle eletrônico (potência de entrada de +5 dBm para 32 canais e -10 dBm para 1 canal). 93	93
Fig. 3.43: Resposta temporal do EDFA com controle híbrido no modo de operação $G = 15$ dB com <i>add/drop</i> de 31 canais e atuação dos controles óptico e eletrônico e (a) com e (b) sem pré-controle (potência de entrada de -5 dBm para 32 canais e -20 dBm para 1 canal).....	95
Fig. 3.44: Resposta temporal do EDFA com controle híbrido no modo de operação $G = 20$ dB com <i>add/drop</i> de 31 canais utilizando as técnicas de controle óptica e eletrônica (potência de entrada de 0 dBm para 32 canais e -15 dBm para 1 canal).	96
Fig. 3.45: Resposta temporal do EDFA com controle híbrido no modo de operação (a) $G = 25$ dB e (b) $G = 30$ dB com <i>add/drop</i> de 31 canais, utilizando as técnicas de controle óptica e eletrônica (potência de entrada de -20 dBm para 32 canais e -5 dBm para 1 canal e (b) potência de entrada de -27 dBm para 32 canais e -12 dBm para 1 canal).....	97
Fig. 4.1: Arranjo experimental utilizado na implementação do método de análise sistêmica.....	101
Fig. 4.2: Análise sistêmica, através do fator Q, para o EDFA sem controle de ganho.	103
Fig 4.3: Análise sistêmica, através do fator Q, para o AOGC-EDFA.....	104

Fig. 4.4: Análise sistêmica, através do fator Q, para o EAGC-EDFA com alimentação adiante (FF)	106
Fig. 4.5: Análise sistêmica, através do fator Q, para o EAGC-EDFA realimentado (FB).	107
Fig. 4.6: Configuração do EDFA de dupla passagem com controle automático de ganho e compensação de dispersão (DP-AGC EDFA com DCF)	111
Fig. 4.7: Ganho e figura de ruído do DP-EDFA com DCF.	112
Fig. 4.8: Ganho versus potência de entrada total para três distintos níveis de eficiência do canal de controle.	114
Fig. 4.9 Comportamento transiente do canal sobrevivente fotodetectado após a inserção e remoção de 15 canais, considerando o EDFA sem controle de ganho, com controle de ganho e sem DCF e com controle de ganho e DCF com diferentes comprimentos.	115
Fig. 4.10. Análise da BER de um enlace WDM com 100-km utilizando um DP-AGC-EDFA com diferentes módulos de DCF.	117
Fig. A. 1: Configuração básica de um EDFA.	140
Fig. A.2: Diagrama esquemático dos níveis de energia para a fibra dopada com érbio com destaque para as transições ocasionadas pelos bombeios de 980 nm (três níveis) e 1480 nm (dois níveis).	142
Fig. A.3: Dependência espectral da emissão espontânea amplificada em um EDFA.	143
Fig. A.4: Curva de ganho em função da potência do sinal de entrada para um EDFA.	145
Fig. A.5: Curva de ganho em função do comprimento de onda para um EDFA.	146
Fig. A.6: Curva de ganho em função da potência do sinal na saída para um EDFA.	148
Fig. A.7: Posicionamento do amplificador de potência em um enlace óptico.	149
Fig. A.8: Posicionamento do pré-amplificador em um enlace óptico.	150
Fig. A.9: Posicionamento do amplificador de linha em um enlace óptico.	151
Fig. A.10: EDFA com bombeio contra-propagante.	152
Fig. A.11: EDFA com bombeio bidirecional.	152
Fig. A.12: EDFA com dois estágios e bombeios co-propagante.	153

Fig. A.13: EDFA reflexivo com reflexão de bombeio.....	154
Fig. B.1: Pontos experimentais e curva de ajuste para a manutenção do ganho em 10 dB.....	156
Fig. B.2: Pontos experimentais e curva de ajuste para a manutenção do ganho em 15 dB.....	156
Fig. B.3: Pontos experimentais e curva de ajuste para a manutenção do ganho em 20 dB.....	157
Fig. B.4: Pontos experimentais e curva de ajuste para a manutenção do ganho em 25 dB.....	157
Fig. B.5: Pontos experimentais e curva de ajuste para a manutenção do ganho em 30 dB.....	158

Lista de Símbolos e Acrônimos

Símbolos	Descrição
λ	Comprimento de onda do canal de controle
G	Ganho
I_0	Média de bits “0”
I_1	Média de bits “1”
σ_0	Desvio padrão dos bits “0”
σ_1	Desvio padrão dos bits “1”

Acrônimos	Descrição
AEO	Analisador de espectro óptico
AGC	Controle automático de ganho (<i>automatic gain control</i>)
AOGC-EDFA	Amplificador à fibra dopada com érbio com controle automático de ganho totalmente óptico (<i>erbium doped fiber amplifier with all optical gain control</i>)
ASE	Emissão espontânea amplificada (<i>amplified spontaneous emission</i>)
AUT	Aplicação sob teste (<i>application under test</i>)
AO	Acústico-óptico
BER	Taxa de erro de bit (<i>bit error rate</i>)

C.C	Circuito de Controle
CWDM	Multiplexação por divisão em comprimento de onda espaçada (<i>course wavelength division multiplexing</i>)
DEMUX	Demultiplexador
FDE	Fibra dopada com érbio (<i>erbium doped fiber</i>)
EDFA	Amplificador à fibra dopada com érbio (<i>Erbium doped fiber amplifier</i>)
FB	Realimentação (<i>feedback</i>)
FF	Alimentação adiante (<i>feedforward</i>)
FO	Filtro óptico
FOS	Filtro óptico sintonizável
FVOA	Atenuador óptico variável rápido (<i>fast variable optical attenuator</i>)
ITU	União Internacional de Telecomunicações (<i>International Telecommunications Union</i>)
NF	Figura de ruído (<i>noise figure</i>)
OADM	Multiplexador de adição e remoção óptico (<i>optical add-drop multiplexer</i>)
ROADM	Multiplexador de inserção e remoção óptica reconfigurável (<i>reconfigurable optical add-drop multiplexer</i>)
OXC	Cross-connect óptico (<i>optical cross-connect</i>)
PD	Fotodetector (<i>photodetector</i>)
SBS	Espalhamento estimulado de Brillouin (<i>stimulated Brillouin scattering</i>)

SHB	<i>Spectral hole burning</i>
UCL	Unidade de controle do enlace (<i>unit control link</i>)
VOA	Atenuador óptico variável (<i>variable optical attenuator</i>)
WDM	Multiplexação por divisão em comprimento de onda (<i>wavelength division multiplexing</i>)

Capítulo 1

Introdução

As redes ópticas com roteamento por comprimento de onda (*wavelength routing networks*) proporcionam aos sistemas de comunicações um grande aumento em sua flexibilidade e, conseqüentemente, em capacidade de transmissão, que ocorre através da otimização da infra-estrutura disponível de fibras ópticas. Neste tipo de rede, a configuração, a proteção e a restauração de caminhos ópticos são processos dinâmicos e automáticos, realizados através de elementos capazes de promover a inserção e remoção de sinais ópticos, em determinados pontos da rede, proporcionando, assim, um elevado grau de reconfigurabilidade à mesma.

Os elementos responsáveis pela adição e remoção de canais na camada óptica que possibilitaram a implementação das redes com roteamento por comprimento de onda são os insere/deriva ópticos (*add/drop*) e os módulos de conexão cruzada (*cross-connects*). Os *add/drops* são subdivididos em fixos (OADMs – *optical add/drop multiplexers*) e reconfiguráveis (ROADMs – *reconfigurable optical add/drop multiplexers*), onde os OADMs, que atualmente são maioria nas redes ópticas existentes, possuem a função de inserir ou retirar comprimentos de onda (canais) passivamente em um ponto qualquer da rede óptica. Já os ROADMs, que apenas recentemente tornaram-se disponíveis comercialmente, são capazes de prover, além da inserção e retirada de canais, mecanismos de reconfiguração baseados em monitoramento de potência e em chaves ópticas por canal, onde estas são capazes de aprovisionar caminhos ópticos e possibilitar estratégias de proteção na camada óptica. Os *cross-connects*, que geralmente encontram-se nos nós da rede, são dispositivos compostos por chaves ópticas. Estes possuem uma certa

“inteligência”, sendo capazes de restaurar caminhos ópticos ou reconfigurar a rede de acordo com os algoritmos responsáveis por estas tarefas, que se encontram em uma camada superior da rede. Nos *cross-connects*, diferentemente dos ROADMs, cada comprimento de onda utilizado na rede pode ter seu tráfego redirecionado para qualquer um dos outros comprimentos de onda disponíveis, possibilitando, assim, o reuso de comprimentos de onda na rede óptica. A utilização de componentes como ROADMs e *cross-connects* nas redes ópticas tem se tornado cada vez mais freqüente, representando uma tendência. Portanto, necessita-se de uma tecnologia de rede adequada a este novo cenário, onde o provisionamento e proteção das redes são realizados remotamente e os canais são inseridos e removidos de acordo com as necessidades dos clientes.

Entre as tecnologias que necessitam desenvolvimento ou otimização para uma adequada operação no cenário das redes com roteamento por comprimento de onda, os amplificadores ópticos, da maneira como são utilizados nos enlaces ponto-a-ponto, que quase na totalidade são amplificadores a fibra dopada com érbio (EDFA-*erbium doped fiber amplifiers*), apresentam-se como uma das principais limitações para a operação deste tipo de rede. Com a introdução de dispositivos capazes de prover a adição ou remoção de canais e de rotear os canais que chegam a cada nó, o número de comprimentos de onda que se propaga pela fibra pode mudar aleatoriamente, provocando flutuações também aleatórias na potência de entrada dos amplificadores ópticos localizados entre os nós da rede. Os EDFAs utilizados nos enlaces WDM ponto-a-ponto, que normalmente operam no regime de saturação com nível de potência de saída fixa, exibem uma forte dependência do ganho com a potência de entrada. Dessa maneira, os canais transmitidos podem ser submetidos a variações de ganho de alta magnitude, que variam em cada EDFA, de acordo com o número de canais presentes no enlace devido à configuração dinâmica da rede. Portanto, oscilações de ganho com o nível de potência óptica na entrada do amplificador, tornam-se extremamente críticas numa rede óptica onde há comutação e roteamento por comprimento de onda, uma vez que a recepção das mensagens em altas taxas pode ser comprometida devido ao excesso (saturando o fotodetector), falta (além da sensibilidade) ou oscilação de potência óptica dos canais detectados [1-2]. Com o intuito de evitar variações de ganho nos EDFAs utilizados em redes ópticas, a utilização de técnicas de controle automático de ganho se faz forçosamente necessária [3].

Em 1991, no AT&T Bell *Laboratories*, desenvolveu-se a primeira estrutura de controle automático de ganho para um amplificador óptico [4], dando início a uma série de pesquisas relacionadas a este tema na década de noventa. Até os dias atuais, foram propostas diversas técnicas de controle automático de ganho (AGC – *automatic gain control*), entre as quais se destacam as técnicas de controle de ganho totalmente óptica [5-6], as eletrônicas [7-8] e, em menor escala, um controle de ganho que combina ambas as técnicas, denominado controle híbrido [9-10]. Estas técnicas são capazes de minimizar, de maneira eficiente, a dependência do ganho dos EDFAs com a potência de entrada; no entanto, melhorias estão em constante desenvolvimento para torná-las ainda mais eficientes e adequá-las às necessidades das redes com roteamento por comprimento de onda. Em particular, as técnicas de controle de ganho híbridas apresentadas na literatura, possuem o intuito único de supressão das oscilações de relaxação apresentadas pelo controle totalmente óptico, através de um ajuste eletrônico o mais rápido possível. Dessa maneira, estas estruturas híbridas de ganho não alteram em nada as características funcionais do EDFA relacionadas à sua faixa dinâmica de controle e à faixa de potência de operação, mantendo, assim, o controle de ganho do EDFA com as mesmas limitações impostas pelas técnicas ópticas ou eletrônicas, apresentando apenas uma redução nos efeitos da oscilação de relaxação.

No contexto apresentado, onde a necessidade da adequação dos EDFAs representa papel fundamental para a operação adequada das redes com roteamento por comprimento de onda, este trabalho tem como objetivo desenvolver uma técnica de controle híbrida inovadora, que, combinando as técnicas de controle ópticas e eletrônicas, seja capaz de prover uma ampla faixa dinâmica de controle associada a qualquer faixa de operação do EDFA, com supressão dos transientes. Para isto, melhorias nas técnicas de controle de ganho já existentes serão buscadas com o intuito da utilização destas no desenvolvimento do controle híbrido almejado. O intuito principal deste trabalho é, diferentemente do que ocorre com as técnicas existentes, obter um EDFA capaz de operar com controle automático de ganho em qualquer nível de potência de entrada com faixa dinâmica generalizada, tornando-o capaz de operar como amplificador de linha, pré-amplificador ou amplificador de potência (*booster*). A relevância do objetivo a ser alcançado torna-se ainda mais clara quando são analisados fatores como o notório avanço das redes ópticas

reconfiguráveis e os benefícios proporcionados tanto em termos de redução de custo quanto de otimização da infra-estrutura instalada, alcançados com a implantação destas redes.

Para este fim, o Capítulo 2 apresenta as técnicas de controle de ganho de EDFAs em conjunto com os principais resultados obtidos nesta área de pesquisa para cada uma das técnicas de controle discutidas. Também neste capítulo, é realizada uma análise crítica dos principais resultados apresentados na literatura.

No Capítulo 3 é apresentado o desenvolvimento do controle híbrido de ganho proposto, passando pela otimização do controle totalmente óptico, pelo desenvolvimento do controle eletrônico e culminando na obtenção da técnica inovadora de controle híbrido de ganho. Definem-se as contribuições originais obtidas com a solução proposta para o controle automático de ganho de EDFAs. A otimização da técnica de controle totalmente óptica, propiciada pela minimização da presença das oscilações de relaxação e da inclusão de um atenuador óptico variável (VOA - *variable optical attenuator*) no caminho da realimentação óptica, é detalhadamente apresentada. Esta etapa proporcionou um aumento sensível na faixa dinâmica de controle. O desenvolvimento da técnica de controle automático de ganho eletrônico e uma rigorosa análise de seu desempenho, quando aplicada a um EDFA submetido às exigências de uma rede óptica com roteamento por comprimento de onda, são também minuciosamente apresentados. Por fim, apresenta-se e caracteriza-se uma técnica híbrida inovadora de controle de ganho. Esta técnica é baseada em um controle totalmente óptico que apresenta ausência de oscilações de relaxação e extensão da faixa de operação de potência de entrada. Para completar a idéia, um controle eletrônico do laser de bombeio opera para suprir uma faixa complementar de operação de potências de entrada, faixa não possível de ser coberta pelo controle totalmente óptico devido a suas limitações físicas (ausência de ruído para formação do canal de controle). Dessa maneira, cada controle atua associado aos seus limiares de eficiência de controle de ganho, que estão ligados aos níveis de potência de entrada utilizados nos amplificadores. Em outras palavras, o controle híbrido desenvolvido possibilita a operação do EDFA para qualquer faixa de potência de entrada, sendo esta faixa coberta por uma destas técnicas de controle, óptica ou eletrônica. Além disto, pode-se generalizar a faixa dinâmica do EDFA, pois a correção do ganho não está limitada a apenas uma variável interna de controle, podendo este ajuste (correção do ganho) ser realizado via o ajuste da perda da cavidade, ou

através do ajuste da potência do laser de bombeio. Estas características tornam possível a habilitação da operação do EDFA como pré-amplificador, amplificador de linha ou amplificador de potência, além de eliminar o gargalo do número de canais impostos pela faixa dinâmica finita apresentada pelas técnicas de controle de ganho anteriores.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados complementares mais significativos obtidos durante a realização deste trabalho. Estes resultados surgiram de idéias motivadas a partir da visualização das necessidades das redes ópticas reconfiguráveis. Primeiramente, são descritos os passos tomados para a adequação de uma técnica ultra-rápida de medição do desempenho sistêmico de redes ópticas, sendo a mesma utilizada para medidas ao longo dos transientes de EDFAs com e sem controle de ganho. Através da utilização desta técnica, torna-se possível a análise da degradação sistêmica em instantes de tempo pré-determinados, habilitando o conhecimento do impacto sistêmico causado pelos transientes de potência que ocorrem devido às variações no número de canais acoplados aos EDFAs. Além disto, o desenvolvimento de um EDFA de baixo custo e complexidade, com tripla função é apresentado. Este EDFA denominado, DP-AGC-EDFA c/ DCF, é capaz de, através de uma configuração composta por um estágio (bombeio e 3 metros de fibra dopada) e alguns componentes adicionais, proporcionar controle automático de ganho e compensação de dispersão em uma mesma configuração, tornando-se, assim, atrativa a redes ópticas reconfiguráveis por sua alta versatilidade, seu baixo custo e sua simplicidade.

No Capítulo 5, são apresentadas as conclusões do trabalho desenvolvido, suas respectivas contribuições, sugestões para trabalhos futuros e uma lista das publicações associadas a esta tese.

O Anexo A apresenta a teoria básica dos EDFAs, enquanto, no Anexo B, as curvas de ajuste do bombeio utilizadas no controle eletrônico de ganho são apresentadas.

Capítulo 2

Técnicas de Controle Automático de Ganho para EDFAs

Existem diferentes métodos de controle automático de ganho aplicáveis a amplificadores a fibra dopada com érbio. Estes métodos têm por objetivo minimizar os efeitos causados pelas mudanças aleatórias nas potências de entrada dos amplificadores que ocorrem devido à introdução de dispositivos que inserem ou removem canais (*OADMs*), e de dispositivos que alteram o caminho óptico do sinal (*OXC – optical cross-connects*) em redes com roteamento por comprimento de onda.

Como comentado anteriormente, variações na potência de entrada dos EDFAs podem levar o sistema à degradação da taxa de erro de bit (*BER – bit error rate*) dos canais transmitidos devido, por exemplo, ao desalinhamento de potência em relação ao limiar do receptor. Além disto, tais variações podem levar o sistema à degradação da *OSNR*, violando a faixa dinâmica de recepção, e a degradações da transmissão devido à excitação de efeitos não-lineares causados pelos excessos de potência e à interferência entre os canais ópticos. Desta maneira, o ganho dos EDFAs utilizados em sistemas ópticos devem ser estabilizados quando possível, de modo a evitar a presença de grandes flutuações de potência causadas por falha ou reconfigurações da rede. Com este intuito, técnicas de controle de ganho de EDFAs têm sido propostas e demonstradas. Nas seções seguintes, estas técnicas serão descritas, e quando possível, comparadas quanto ao desempenho das mesmas quando aplicadas a um ou a uma cadeia de EDFAs.

2.1 Controle Automático de Ganho Totalmente Óptico

O controle automático de ganho totalmente óptico (AOGC – *all-optical automatic gain control*) é uma das técnicas de controle automático de ganho mais estudadas, sendo uma solução eficiente para a minimização das variações de ganho e dos transientes de potência causados por EDFAs em redes ópticas com roteamento por comprimentos de onda [3], [11-13]. Na literatura, duas formas de obtenção do controle automático de ganho totalmente óptico são descritas. Em ambas, o EDFA é utilizado como meio ativo para a formação de um laser (canal de controle) em um comprimento de onda que se localiza na banda de amplificação do EDFA, diferindo-se pelos componentes utilizados para a formação da realimentação óptica. A seguir, estes métodos são descritos.

2.1.1 Realimentação Óptica

No primeiro método, uma realimentação óptica implementada na forma de um anel (*loop*) permite a formação do canal de controle, conforme mostrado na Fig. 2.1 [11], [14 – 17].

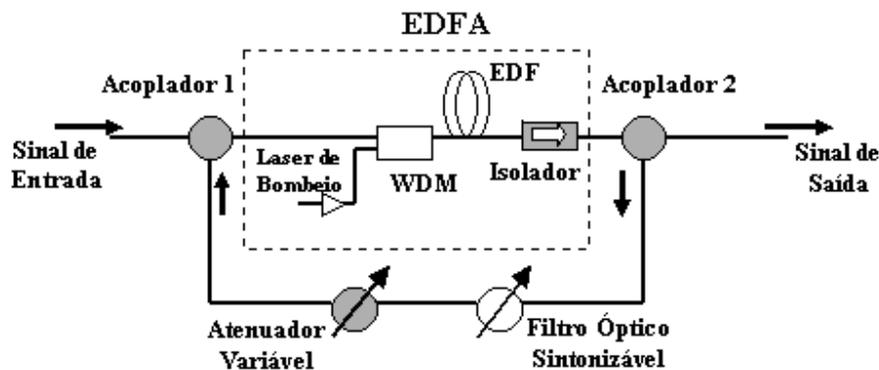


Fig. 2.1: Método de controle automático de ganho totalmente óptico utilizando a realimentação óptica.

Esta técnica de controle se baseia em uma realimentação óptica, onde uma parte do sinal de saída de um EDFA passa por um filtro óptico sintonizável e um atenuador variável,

antes de ser novamente acoplada à entrada do amplificador pelo acoplador 1. Este sinal, juntamente com os canais transmitidos, é então amplificado pelo EDFA e mais uma vez amostrado pelo acoplador 2 para um novo ciclo de realimentação. Após vários ciclos, o sinal realimentado (canal de controle) adquire potência suficiente para suplantar as perdas e começar a competir com os canais transmitidos pelo ganho do EDFA. Assim, para um determinado nível de atenuação da realimentação óptica, o canal de controle se torna dominante em termos de potência óptica e, devido à saturação do amplificador, passa a absorver as variações de ganho provocadas pelas variações da potência óptica na entrada do EDFA, mantendo praticamente invariável o ganho dos demais canais presentes na banda do amplificador. Por fim, a escolha ou a sintonia do comprimento de onda de operação do canal de controle é feita através do filtro óptico sintonizável, a partir do ruído de emissão espontânea amplificado (ASE - *amplified spontaneous emission*) do EDFA.

Os amplificadores ópticos trabalham, em sua maioria, na região de saturação, onde o ganho do amplificador óptico é sensível a variações no nível da potência de entrada do sinal. Assim sendo, quando canais são inseridos, retirados ou tem suas rotas desviadas, por exemplo, por OADMs ou OXCs, a potência de entrada dos amplificadores ópticos varia, causando, assim, mudanças no ganho do amplificador óptico que resultam em excursões dinâmicas de potência nos canais transmitidos, provocando degradações na OSNR, no nível de potência e, conseqüentemente, na BER dos canais transmitidos.

Se a potência na entrada do EDFA é alterada, o ganho do amplificador poderá variar consideravelmente, principalmente se este último estiver operando em um estado de saturação. Portanto, como conseqüência das oscilações de potência, o ganho do canal de controle será menor ou maior dependendo se o número de canais aumenta ou diminui. O mesmo irá acontecer para os canais transmitidos remanescentes (canais sobreviventes). É importante ressaltar que o ganho proporcionado pelo EDFA ao canal de controle é o parâmetro responsável pela sua formação, suplantando as perdas da malha de realimentação, inclusive aquela introduzida pelo atenuador variável. Desta forma, variações na potência do canal de controle irão alterar sua eficiência, provocando modificações na sua potência final proporcionais aos níveis de variação da potência de entrada. Em resumo, pode-se concluir que as variações de potência na entrada do EDFA controlado irão

modificar a potência do canal de controle. Se canais são inseridos, a potência na entrada do EDFA controlado aumenta, diminuindo o ganho por canal e, portanto, a potência do canal de controle que é realimentada ao amplificador. Como a potência do canal de controle diminui, este passará a concorrer menos com os canais transmitidos pelos portadores excitados do nível metastável dos íons de érbio. Conseqüentemente, para os canais transmitidos, a oferta de portadores se torna maior, aumentando, efetivamente, o ganho destes canais e compensando a queda de ganho provocada pela inserção. Já no caso da remoção de canais, a potência de entrada diminui, aumentando o ganho por canal e, também, a potência do canal de controle que é realimentada. Sob esta condição, o próprio canal de controle passa a consumir grande parte dos portadores excitados, reduzindo a oferta para os demais canais a serem amplificados. Como resultado, o ganho por canal é reduzido, compensando o aumento inicial provocado pela redução no número de canais.

O outro método de controle de ganho totalmente óptico, também descrito na literatura, possui o mesmo princípio de funcionamento, no entanto, o laser de controle é obtido através da utilização de grades de Bragg (FBG - *fiber Bragg gratings*) na entrada e na saída do EDFA, [4], [18-20], como mostrado na Fig. 2.2.

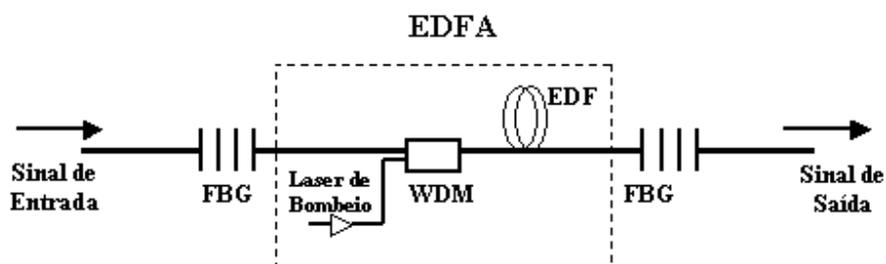


Fig. 2.2: Método de controle automático de ganho totalmente óptico utilizando grades de Bragg.

As grades de Bragg são utilizadas para garantir a realimentação óptica que permite a formação do laser de controle responsável pelo controle de ganho do amplificador. Já o comprimento de onda do laser é determinado pelo pico de refletividade da grade refletora e pelas perdas entre as grades de entrada e saída. Em [19], a caracterização de em EDFA com

controle totalmente óptico baseado em grades de Bragg é apresentado. Resultados muito semelhantes aos obtidos com a estrutura de realimentação pura são obtidos. Características como faixa dinâmica, figura de ruído, tempo de resposta e presença de oscilações durante o transiente, demonstram a eficiência desta técnica de controle e sua semelhança com a cavidade formada pela realimentação óptica apresentada na Fig. 2.1.

Até este ponto, o funcionamento básico do controle totalmente óptico, baseado na realimentação óptica (realimentação pura e com grades de Bragg), foi descrito. Porém, mesmo se mostrando eficiente no controle de ganho do EDFA, a técnica de controle totalmente óptica apresenta algumas características intrínsecas, associadas ao laser de controle, que causam a degradação sistêmica aos canais transmitidos, principalmente durante os transientes de potência que ocorrem imediatamente após a inserção ou remoção de canais. Na seção seguinte, estes fatores limitantes serão descritos. Os avanços científicos mais significativos, na supressão destes, serão apresentados e, ainda, alguns resultados relevantes discutidos.

2.1.2 Fatores Limitantes do Controle Automático de Ganho Totalmente Óptico e os Avanços Recentes

Com a utilização de estruturas totalmente ópticas para controle automático de ganho, verifica-se que alguns fenômenos indesejados introduzem imperfeições no processo de controle, inibindo o funcionamento ideal do EDFA controlado. Os principais fatores limitantes são os fenômenos de *spectral hole burning* (SHB) e das oscilações de relaxação (RO). Estes fenômenos são responsáveis pela diferença entre os valores de ganho dos canais sobreviventes antes e depois de variações de potência na entrada do EDFA e pelos transientes de potência que ocorrem durante o intervalo de restabelecimento dos valores de ganho após as variações da potência de entrada [12-13], respectivamente.

O ganho de um EDFA sem controle automático de ganho mostra uma transição dinâmica de um nível de ganho para outro em resposta à variação da potência de entrada, como ilustrado na Fig. 2.3 (a) para o canal sobrevivente em 1558 nm, onde um EDFA sem controle de ganho é submetido a um sinal de entrada que varia entre 8 canais e 1 canal, estes com potência de entrada por canal de -18 dBm (o canal sobrevivente é caracterizado

pelo canal remanescente na banda de transmissão, independente da remoção ou inserção de canais realizada; sob este canal são realizadas as análises temporais dos EDFAs). No caso de um EDFA com controle automático de ganho totalmente óptico, o método de controle é projetado para que o ganho do EDFA seja mantido, independentemente de variações da potência de entrada. No entanto, a atuação do sistema de controle não é instantânea provocando oscilações amortecidas na potência dos canais sobreviventes. Oscilações estas, que são originárias de mecanismos de troca de portadores entre os canais sobreviventes e o canal de controle, como mostrado na Fig. 2.3 (b) para o canal sobrevivente em 1558 nm. Na Fig. 2.3 (b), o EDFA com controle de ganho totalmente óptico com canal de controle alocado em 1550 nm, é submetido a um sinal de entrada que varia entre 8 canais e 1 canal; estes possuem potência de entrada por canal de -18 dBm.

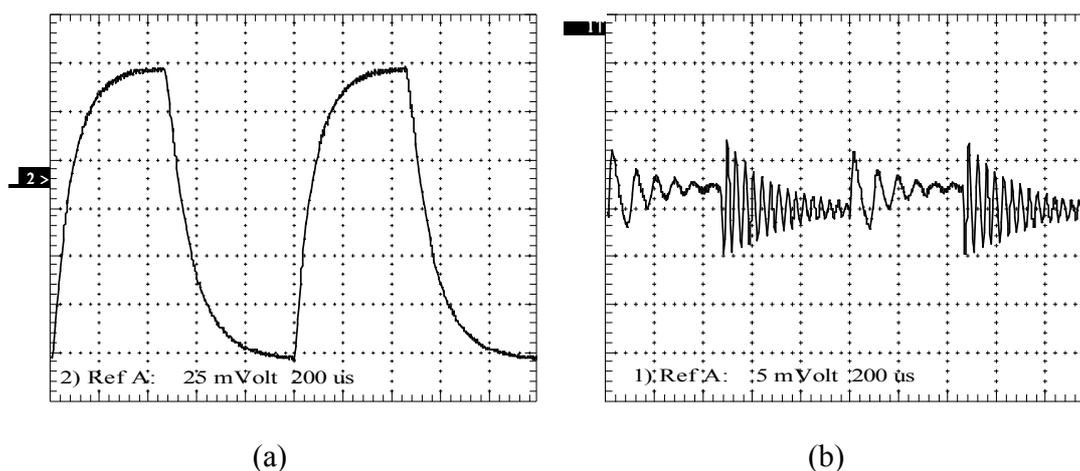


Fig. 2.3: Sinal fotodetectado na saída de um EDFA, para um canal sobrevivente: (a) EDFA sem controle de ganho; (b) EDFA com controle automático de ganho totalmente óptico.

Em particular, a Fig. 2.3 (b) ilustra o comportamento da potência de um dos canais sobreviventes após amplificação com controle totalmente óptico, em duas situações distintas: de remoção (oscilações mais severas) e inserção de canais. Em ambos os casos, verifica-se a presença de oscilações de potência causadas pelas oscilações de relaxação. Contudo, apesar destas oscilações, pode-se observar que a potência de saída, após os

transientes, tende a ser adequadamente corrigida, indicando, assim, que o ganho do canal se mantém muito próximo àquele antes da adição ou remoção de canais. Isto demonstra o funcionamento adequado da técnica de controle. Já a Fig 2.3 (a) ilustra o comportamento para o mesmo EDFA sob as mesmas condições de potência de entrada da Fig. 2.3 (b), porém, com um alto nível de atenuação na realimentação óptica, que impossibilita a formação do canal de controle. Neste caso, verifica-se a grande variação de potência do canal sobrevivente causada pela variação do ganho do EDFA sem controle de ganho (notar que a escala da Fig 2.3 (a) é 5 vezes maior que a da Fig 2.3 (b), enfatizando, ainda mais, a eficiência do controle de ganho).

O outro fator limitante, o *spectral hole burning*, é responsável pela imprecisão na correção de ganho proporcionada pela técnica de controle totalmente óptico. Em outras palavras, quando a inserção ou remoção de canais acontece, o nível de ganho não volta a se estabilizar exatamente em seu valor inicial. Após as oscilações desaparecerem, o nível de ganho se estabelece em um valor maior ou menor que o inicial, dependendo se a potência na entrada diminui ou aumenta. No canal sobrevivente, o efeito de SHB aparece como um degrau no nível de potência de saída do EDFA, que representa a imprecisão no controle de ganho. Assim, o EDFA controlado pela técnica totalmente óptica é penalizado por oscilações de relaxação (oscilações de potência nos transientes) ou pelo SHB (imperfeição no nível de correção de ganho). Com base na Fig 2.4 [21], será discutido como estes efeitos se comportam em um EDFA com controle de ganho totalmente óptico.

A Fig 2.4 apresenta uma detalhada análise da influência da escolha do comprimento de onda do canal de controle em um EDFA com controle automático de ganho totalmente óptico. Com base na configuração apresentada na Fig 2.1, foi utilizado um sinal de entrada que promove a inserção ou retirada de sete de oito canais a cada 1 ms. Para isto, foi utilizada uma chave acústico-óptica, modulada por uma onda quadrada de 500 Hz de frequência, posicionada na saída do multiplexador que une os sete canais. Acoplando estes sete e mais um oitavo canal ao EDFA com controle de ganho, o filtro óptico que se encontra no interior do caminho de realimentação óptica foi sintonizado em quatro posições distintas, observando-se o comportamento de amplificação de um dos oito canais, denominado de canal sobrevivente (1558 nm), às condições de inserção e retirada dos

outros sete canais. Sob estas condições, o espectro de saída do EDFA foi filtrado através de um filtro sintonizado no comprimento de onda do canal sobrevivente e o sinal resultante fotodetectado. O sinal eletrônico resultante foi acoplado a um osciloscópio para obtenção das formas de onda apresentadas na Fig 2.4. Neste caso, utilizou-se uma atenuação de 10 dB na realimentação óptica.

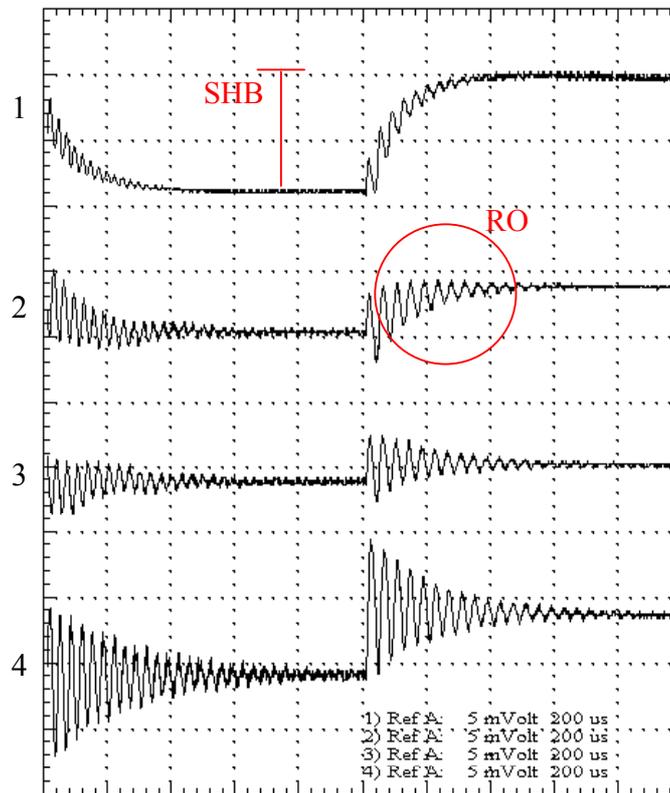


Fig. 2.4: Sinal eletrônico resultante da fotodetecção do canal sobrevivente para uma atenuação da realimentação óptica de 10 dB, quando o canal de controle localiza-se em (1) 1535 nm, (2) 1547,7 nm, (3) 1554 nm e (4) 1557 nm, durante a inserção e retirada dos canais, a cada 1 ms [21].

Na Fig. 2.4, observa-se que a amplitude do canal sobrevivente na saída do EDFA com controle óptico de ganho se comporta de maneira distinta, para os diferentes valores do comprimento de onda do canal de controle, evidenciando, de forma também distinta, os efeitos de SHB (variação da potência pré e pós-transiente) e das oscilações de relaxação. Com o canal de controle operando em 1535 nm (1), é observada uma variação de potência do canal sobrevivente de cerca de 0,45 dB, com a ausência de grandes oscilações periódicas

durante os transientes. Já quando o canal de controle é posicionado em 1547,7 nm (2), observa-se uma diminuição na variação de potência do canal sobrevivente e um aumento das oscilações de relaxação. Aparentemente, a amplitude das oscilações de relaxação permanece inalterada para o canal de controle em 1554 nm (3) se comparado às de (2), mesmo com uma diminuição ainda mais acentuada da variação de potência do canal sobrevivente. No entanto, o efeito destas oscilações, para este comprimento de onda do canal de controle, é maior que para o do caso (2), pois, a partir deste comprimento de onda, o canal de controle passa a competir mais fortemente com o canal sobrevivente pelo ganho do EDFA, diminuindo a potência do canal sobrevivente no receptor. Finalmente, com o comprimento de onda do canal de controle em 1557 nm (4), próximo daquele do canal sobrevivente (1558,8 nm), tanto o degrau quanto as oscilações de relaxação voltam a aumentar e a influenciar negativamente o canal sobrevivente de forma mais acentuada. Analisando a atuação destes dois efeitos, chega-se à conclusão de que quanto mais próximo o comprimento de onda de controle estiver dos canais transmitidos, maior a influência das oscilações de relaxação e menor a influência do SHB, e vice-versa (com exceção para canais de controle alocados a menos de 2 nm dos canais transmitidos). Assim, torna-se impossível escolher um comprimento de onda para o canal de controle que anule a influência de ambos os efeitos simultaneamente.

As penalidades impostas pelos efeitos do SHB e das oscilações de relaxação devem-se a características intrínsecas dos EDFAs. No caso das oscilações de relaxação, ao tempo de resposta dos íons de érbio, e no caso do SHB, à não homogeneidade da dopagem da fibra de érbio. Com o aumento do número de amplificadores no enlace, maiores serão as penalidades às quais o sistema será submetido. Por este motivo, o SHB e as oscilações de relaxação representam os principais fatores limitantes da técnica de controle totalmente óptica. A influência destes efeitos e de técnicas de minimização de suas influências continuam sendo objeto de estudo na literatura.

Em [21], parâmetros de projeto capazes de influenciar o SHB e as oscilações de relaxação foram definidos e otimizados. Como já previsto em simulações [22], um destes parâmetros é a alocação adequada do canal de controle, capaz de influenciar tanto as oscilações de relaxação quanto ao SHB. Outro parâmetro significativo é representado pelo

controle da atenuação da realimentação óptica, que é capaz de controlar a potência do canal de controle (e, portanto, do ganho para os canais transmitidos), proporcionando, dessa maneira, um acréscimo ou uma diminuição da eficácia de controle de ganho, e, conseqüentemente, possibilitando o controle da eficiência do SHB. Ainda em [21], para os comprimentos de onda da banda C, chegou-se a conclusões sobre a melhor posição do canal de controle e propôs-se um procedimento para se obter o melhor valor de atenuação a ser utilizado na realimentação óptica. Através destes, as oscilações de relaxação foram minimizadas, e utilizando-se um critério de variação de ganho menor que 0,5 dB para uma variação de 9 dB na potência de entrada, foi escolhido um valor de atenuação para a realimentação óptica que maximizasse o ganho dos canais transmitidos, controlando a eficiência do SHB (através de um atenuador) para manter a diferença entre o ganho antes e depois da inserção ou retirada, menor que 0,5 dB.

Outras maneiras de minimizar as RO e o SHB foram e estão sendo publicadas. Em uma delas, apresentadas em [15] e [23], um *add/drop* CWDM (*course wavelength division multiplexing*), um espelho rotacionador de Faraday e um circulador óptico na saída são utilizados, sendo o sinal, retroespalhado pela fibra dopada, acoplado ao *add/drop* CWDM, e refletido pelo espelho, retornando à fibra dopada, onde é novamente amplificado, formando na cavidade (espelho-fibra de érbio) um laser de controle, baseado no sinal retroespalhado. Os resultados obtidos mostraram uma eliminação completa das oscilações de relaxação; no entanto, em relação à técnica de controle tradicional (apresentada na Fig 2.1), houve um aumento na eficiência do SHB. Mesmo com o aumento do SHB, a amplitude da variação de ganho faz desta solução uma solução atrativa em termos da minimização das oscilações e do SHB. Porém, fatores como a impossibilidade de controle do valor do ganho do EDFA e a reduzida faixa dinâmica de operação (-10 dBm de potência de entrada total), dificultam a utilização da mesma em redes WDM.

Uma outra forte vertente utilizada na supressão das oscilações de relaxação baseia-se na operação conjunta de um controle eletrônico com realimentação adiante com o controle óptico [24]. Este tipo de técnica de controle é classificada como híbrida, e será contemplada em uma seção posterior, neste mesmo capítulo, onde maiores detalhes do princípio de operação da mesma e da minimização das oscilações de relaxação serão discutidas.

Um outro fator limitante presente apenas em EDFAs com controle automático de ganho baseados na realimentação óptica pura é o espalhamento Brillouin (SBS – *stimulated Brillouin scattering*). Este pode ser provocado pela alta potência do canal de controle, capaz de ultrapassar o limiar deste efeito não-linear na fibra dopada com érbio (aproximadamente 9 dBm para fibras monomodo convencionais). Em [25], o efeito do espalhamento Brillouin é analisado, sendo verificada a penalidade induzida por este efeito, caso seja permitida uma potência de canal de controle superior ao seu limiar. Se tomados os cuidados necessários durante as etapas de controle da atenuação óptica, em conjunto com a escolha do acoplador a ser utilizado na saída da realimentação, esta limitação pode ser completamente removida. No entanto, uma atenção especial deve ser dada a este efeito durante o projeto, mantendo o canal de controle com potência inferior ao limiar de Brillouin, que varia, aumentando na mesma proporção da diminuição do núcleo da fibra. Caso não haja este cuidado e o limiar de Brillouin seja ultrapassado, o desempenho do sistema fica completamente comprometido, como mostrado em [25]. Em [26], um método de supressão deste efeito baseado na utilização de um modulador acústico-óptico modulado por um tom de RF de baixa frequência (10 kHz), é utilizado, alargando a linha do laser de controle e, dessa maneira, ampliando significativamente o limiar do efeito Brillouin.

Além de otimizações nas técnicas de controle visando a minimização dos fatores limitantes citados, a dinâmica dos EDFAs também vem sendo estudada em configurações de amplificadores em outras bandas (S e L) [27-28] e em amplificadores multibanda S+C [29], entre outras. Na próxima seção, as técnicas eletrônicas de controle de ganho serão apresentadas, assim como os recentes avanços obtidos nesta área.

2.2 Controle Automático Eletrônico de Ganho

Além dos métodos de controle de ganho totalmente ópticos para EDFAs, as técnicas de controle automático de ganho baseadas no ajuste da potência do laser de bombeio apresentam-se como uma solução apropriada para a estabilização do ganho de amplificadores ópticos a fibra dopada com érbio. Neste caso, o ajuste é realizado de forma

eletrônica, através de circuitos com alimentação adiante, realimentados ou com combinação de ambos.

2.2.1 Controle Eletrônico com Alimentação Adiante (Electronic Feedforward Control)

O controle eletrônico com alimentação adiante tem como objetivo a manutenção do ganho do EDFA através da atuação no laser de bombeio por meio de um sinal advindo da amostragem da variação da potência óptica de entrada do EDFA, antes do próprio EDFA. Esta se baseia em uma relação entre a variação da potência de entrada e a proporção de atuação no bombeio para a manutenção do ganho desejado. A variação da potência óptica de entrada ocasionada pela adição ou remoção de canais promovida por OADMs ou OXCs é previamente detectada e utilizada como parâmetro de um circuito de controle que, de acordo com o nível da potência de entrada, é capaz de obter a potência de bombeio apropriada para o EDFA. Baseando-se nesta técnica de controle, as primeiras tentativas de controle de ganho eletrônico foram aplicadas a EDFAs [30-31].

Quando esta técnica de controle utiliza um esquema digital de controle, normalmente, uma curva de ajuste da potência de bombeio versus potência de entrada é experimentalmente definida para o valor de ganho desejado, sendo utilizada como referência na concepção do código de um microcontrolador. Já para o controle analógico, o controle pode ser implementado através de uma relação linear entre as potências de entrada e saída [32], baseada na utilização de amplificadores eletrônicos inversores. O controle analógico proporciona um baixo tempo de resposta, normalmente de centenas de microssegundos, enquanto que o controle digital é limitado pelo tempo de processamento do microcontrolador utilizado, normalmente exibindo tempos de resposta na casa de unidades de milissegundos. No entanto, em um controle digital, o ganho desejado pode ser modificado facilmente via uma interface de gerência, adequando o EDFA às mudanças do estado da rede. Já com o controle analógico, uma modificação deste parâmetro iria requerer de um novo projeto de *hardware*. Outras vantagens e desvantagens dos controles digitais e analógicos aplicados à técnica de ganho de EDFAs serão posteriormente apresentadas e analisadas.

A Fig. 2.5 ilustra um exemplo de EDFA com controle de ganho eletrônico com alimentação adiante (digital). O acoplador retira 5% da potência óptica de entrada do EDFA, direcionando-a para o circuito de controle. O circuito de controle é responsável pela medição do nível de potência de entrada, feita através de um fotodetector (PD), e pela atuação no nível da potência de bombeio, que é realizada pelo micro-controlador (μc), por meio de um sinal elétrico proporcional ao nível de potência de entrada. Após o controle do bombeio, o mesmo é acoplado à fibra através de um acoplador (WDM), compondo a entrada do EDFA em conjunto com os sinais transmitidos.

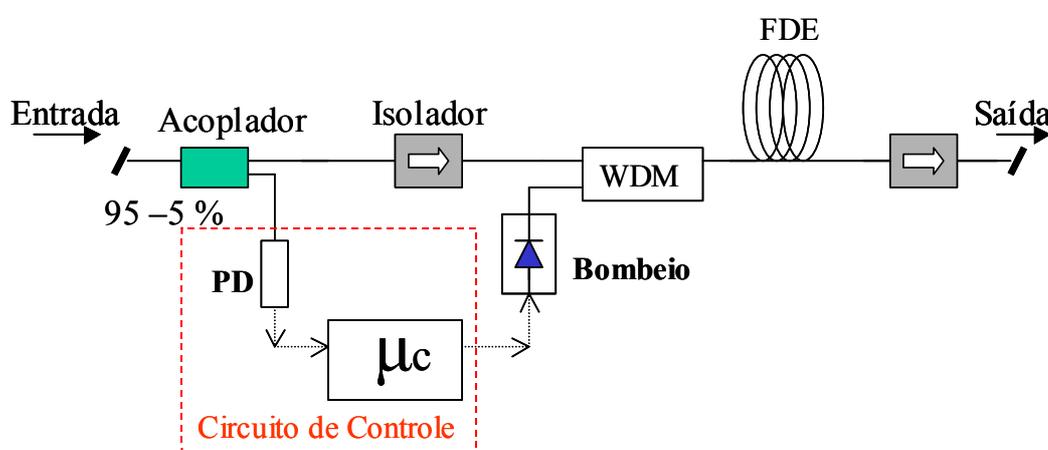


Fig. 2.5: Controle de ganho eletrônico com alimentação adiante aplicado a um EDFA.

Além da variação da potência de entrada, a técnica eletrônica de controle com alimentação adiante pode utilizar, também, a monitoração de potência em um canal de supervisão inserido no nó anterior do enlace da rede. Nesta técnica, um canal de controle (λ_c) é adicionado à entrada do primeiro amplificador óptico do enlace, sendo este mesmo canal retirado antes do próximo nó da rede (neste caso, o acoplador da Fig 2.5 é substituído por um acoplador seletivo em comprimento de onda). A potência do canal de controle é ajustada na entrada do nó, de forma a manter constante a potência total na entrada no EDFA. Este ajuste, quando realizado no primeiro EDFA do enlace, faz com que todos os amplificadores da cascata mantenham constantes suas potências de entrada até a chegada do sinal ao próximo nó da rede. A técnica de controle com alimentação adiante, onde o

ajuste do ganho é realizado através da manutenção da potência de entrada através do ajuste de laser de controle, é conhecida na literatura como *link control* (controle de enlace) [32-35].

A Fig. 2.6 mostra o diagrama experimental de uma estrutura de controle automático de ganho para uma cascata de EDFAs (*link control*), onde o controle é realizado pela adição de um canal extra, sem conteúdo de informação do cliente, que compensa a variação da potência óptica total e estabiliza todos os amplificadores entre sucessivos nós da rede [33]. Na Fig. 2.6, OXC representa o *cross-connect óptico*, UCL a unidade de controle de ganho do enlace, detalhada na mesma figura, PD o fotodetector, C.C. o circuito de controle do canal de controle e λ_c o próprio canal de controle.

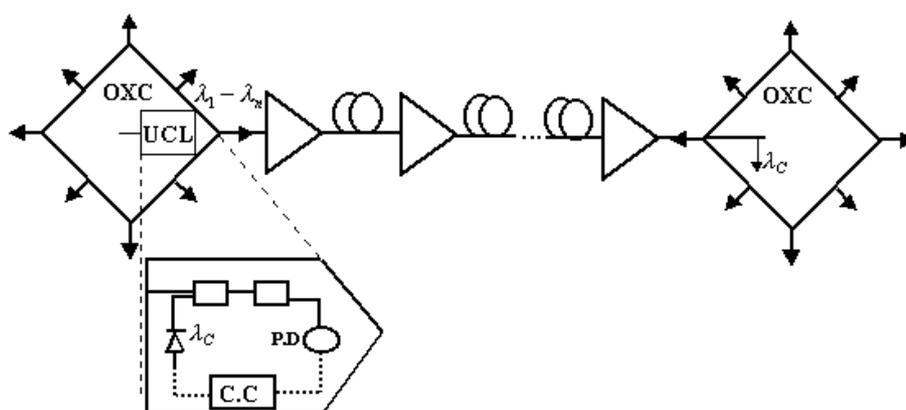


Fig. 2.6: Representação esquemática do controle do enlace (*link control*) para proteção dos canais sobreviventes, em redes ópticas.

Neste tipo de controle, fica claro que a potência de entrada só poderá ser modificada uma vez entre dois nós sucessivos, na entrada do primeiro amplificador após o primeiro nó. Assim, para obtenção do controle do ganho, a potência do sinal de entrada do primeiro amplificador do enlace é medida, sendo depois processada pelo circuito de controle (C.C), que realiza o ajuste necessário para manutenção de um ganho constante. Dessa maneira, se naquele nó canais tiveram suas rotas alteradas, a potência de entrada do primeiro amplificador do enlace diminuirá (em caso de remoção), ocasionando a atuação do controle

no sentido de aumentar a corrente do laser de controle e compensar a potência de entrada de maneira a deixá-la constante; em caso de adição, o processo inverso ocorrerá, ou seja, a corrente do laser de controle é aumentada. Em [35], demonstrou-se que quando apenas um EDFA do enlace possui controle de ganho, uma maior eficiência é obtida controlando o ganho do primeiro EDFA do enlace.

Um outro exemplo de aplicação desta técnica de controle de ganho para um sistema WDM de oito canais foi demonstrado experimentalmente em [33-34]. Nestes, o controle de ganho do EDFA é composto por dois circuitos de controle, um circuito de baixa velocidade, que compensa as mudanças nas perdas dos enlaces, e um segundo circuito que possui uma alta velocidade e mantém constante o ganho do amplificador. Além disto, há um canal de supervisão em 1510 nm. Neste EDFA, a variação da potência de saída do canal sobrevivente foi reduzida a 1%, quando comparada ao EDFA sem controle de ganho. Isto corresponde a 0,17 dB de variação de potência, quando sete dos oito canais são adicionados ou removidos.

Na literatura, a modelagem dos EDFAs com controle de ganho com alimentação adiante também é abordada [36]. É mostrado que através desta técnica de controle, regulando o bombeio proporcionalmente a variações na potência de entrada, para EDFAs com fibras de alta dopagem, pequenas excursões transientes (*overshoots e undershoots*) são obtidas, e menores faixas de excursão do bombeio, em relação aos EDFAs baseados em fibras de baixa dopagem, são necessárias.

As técnicas de controle de ganho de EDFAs com alimentação adiante constituem um mecanismo eficaz na correção do ganho. No entanto, uma faixa dinâmica de controle muito limitada é obtida com esta técnica. A faixa dinâmica de controle é definida como a margem de variação da potência de entrada do EDFA para a qual a manutenção do ganho desejado é alcançada. Quanto maior a faixa dinâmica, uma maior quantidade de canais pode ser adicionada ou removida na rede óptica sem que o ganho do EDFA seja alterado. No caso de EDFAs com ganho controlado através de técnica de alimentação adiante, a faixa dinâmica é limitada pela capacidade de variação na potência de saída proporcionada pela excursão de potência do laser de bombeio. Normalmente, dependendo do projeto do EDFA, a faixa dinâmica proporcionada não supera os 9 dB, o que possibilita, no máximo, a inserção e

retirada de 8 canais. No caso do controle de enlace (*link control*), a faixa dinâmica é ainda mais reduzida, pois o impacto do laser de supervisão na potência total é significativo apenas para baixos níveis de potência de entrada por canal (< -20 dBm).

2.2.2 Controle Eletrônico Realimentado (*Electronic Feedback Control*)

O controle eletrônico realimentado apresenta-se como mais uma alternativa para obtenção do controle automático de ganho. Esta técnica se baseia na manutenção do ganho do EDFA através da monitoração da potência de saída, via realimentação, e da potência de entrada, sendo então obtido o valor do ganho atual que é comparado com o ganho desejado, para o ajuste da corrente de bombeio capaz de mantê-lo constante [37-39]. Nesta técnica, diferentemente do controle com alimentação adiante, a monitoração da potência de entrada é apenas um dos parâmetros necessários para o controle do ganho; assim, nenhuma atuação no bombeio é realizada com base apenas nesta monitoração, se fazendo necessária também a potência de saída, obtida através da realimentação, para o cálculo do ganho do EDFA a ser utilizado no ajuste do bombeio. Estratégias de controle digital e analógica podem ser implementadas utilizando o controle realimentado, porém, em ambas, o controlador utilizado representa papel fundamental no desempenho do esquema de controle. Assim, o projeto do controlador representa um fator de extrema importância para a eficácia do controle de ganho realimentado. Os mais diversos tipos de controladores proporcionais, proporcionais integrais, proporcionais integrais derivativos, além de controladores aplicados a sistemas de controle robusto (H_∞) [40-41], são utilizados no intuito de diminuir o impacto dos transientes e aumentar a eficiência do controle aplicado a EDFAs.

A Fig. 2.7 ilustra a idéia básica do controle de ganho eletrônico realimentado digital de um EDFA (em um controle analógico, um controlador analógico substitui o microcontrolador). Uma parcela do sinal de entrada é retirada pelo acoplador de entrada (95-5%), convertida em corrente elétrica no fotodetector de entrada (PD) e enviada ao microcontrolador (μ_c). Similarmente ao sinal na entrada, um parcela do sinal de saída é retirada pelo acoplador de saída (99-1%), convertida em corrente elétrica no fotodetector de

saída (PD) e enviada ao microcontrolador. Com as informações de potência de entrada e saída, o ganho é calculado no microcontrolador, ajustando-se a potência de bombeio através do controlador digital implementado, para garantir a manutenção do ganho desejado. Existem variações do método de controle de ganho eletrônico de EDFAs com realimentação; no entanto, elas derivam da idéia básica da realimentação apresentada na Fig. 2.7, sejam elas digitais ou analógicas.

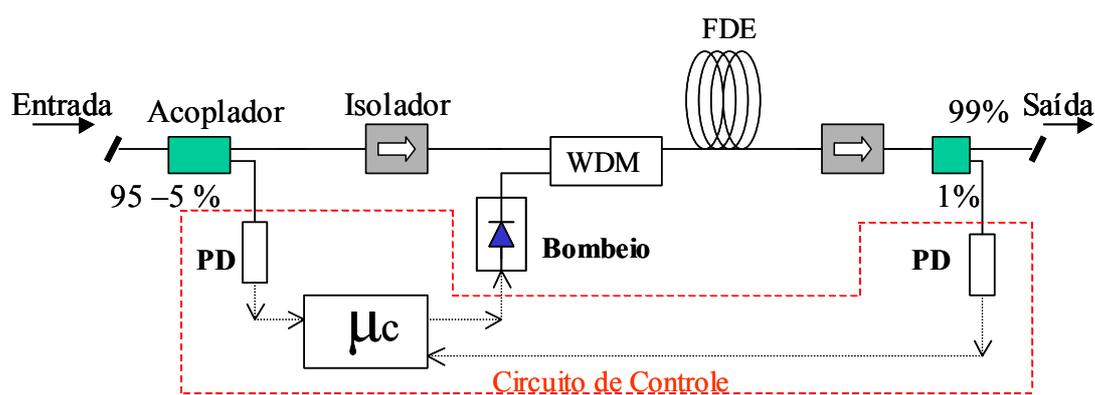


Fig. 2.7: Controle de ganho eletrônico com realimentação aplicado a um EDFA.

O controle de ganho realimentado é claramente a estratégia de controle de ganho eletrônica mais aplicada no que se refere às recentes publicações nesta área. Em [7], utilizando-se o controle realimentado, apresenta-se uma comparação da eficiência desta técnica aplicada a EDFAs baseados em lasers de bombeio de 980 nm e 1480 nm. Verifica-se, nesta comparação, que quando bombeado em 980 nm, o EDFA exibe uma maior variação de ganho; além disto, utilizando o bombeio em 980 nm, a variação de ganho é mais rápida que em 1480 nm. Tempos de resposta da ordem de 12 ms (1480 nm) e 15 ms (980 nm) foram obtidos em [8], utilizando-se o controle realimentado digital, para uma variação de 16 dB na potência de entrada do EDFA (39 canais).

Com o intuito de otimizar as técnicas de controle de ganho de EDFAs às necessidades das redes ópticas, tem-se levado em conta o padrão do tráfego das redes no projeto do controle de ganho dos EDFAs. Dessa maneira, utilizando-se o controle realimentado, têm-se apresentado, nos últimos anos, estratégias de controle de ganho otimizadas para redes

que possuem, por exemplo, rajadas como padrão de tráfego (*optical burst switch networks*) [39]–[42]. Em [39]–[42] é verificado que, utilizando-se um controle com tempo de resposta inferior a 1 microsegundo, suficientemente menor que o tempo de relaxação do EDFA, uma considerável eficiência da técnica de controle e uma significativa supressão nos transientes do EDFA são obtidas para o tráfego em rajadas.

Outra recente aplicação do controle realimentado, visando a adequação das técnicas de controle de ganho às redes ópticas de nova geração, é apresentada em [43]. Neste caso, o controle de ganho é aplicado a EDFAs capazes de amplificar em mais que uma banda (EDFAs multibanda). Em [43], com base em uma estrutura serial para amplificar as bandas C+L, são utilizados quatro estágios de amplificação. Os três estágios amplificam as bandas C e L, e, em um quarto estágio, amplifica apenas a banda L, após a passagem do sinal por um acoplador de banda, sendo, antes da saída do EDFA, novamente combinadas as bandas C e L. Utilizando esta configuração, é verificado que, mesmo sem nenhum controle de ganho, variações na potência dos canais na banda C não interferem no ganho dos canais na banda L, sendo a recíproca verdadeira, ou seja, variações na potência dos canais na banda L não afetam o ganho dos canais na banda C. Assim, demonstra-se que o controle de ganho pode ser realizado utilizando-se as técnicas de controle de ganho realimentadas tradicionais, por banda, monitorando as potências das bandas C e L e atuando, normalmente, no laser de bombeio.

Utilizando uma estratégia de controle digital, os controladores proporcionais (P), proporcionais integrais (PI) ou proporcionais integrais derivativos (PID) formam a base dos controladores utilizados nas técnicas de controle realimentado, para a minimização da variação do ganho dos EDFAs frente às variações na potência de entrada. No entanto, utilizando técnicas de controle robusto [40-41], uma abordagem diferente, capaz de levar em consideração, no projeto do controlador, perturbações na entrada do EDFA, também foi verificada. Isto envolve o projeto de um controlador H_∞ ótimo e sua aplicação a cenários onde há presença de tom piloto (de baixa frequência) sobre os canais transmitidos em redes com padrão de tráfego de rajadas. Foi verificada uma significativa redução nos efeitos de modulação de fase cruzada dos EDFAs, que se deve aos tons pilotos e à inserção ou retirada de canais em redes com tráfego em rajadas. Quando são comparados o controlador

H_∞ com um controlador PID, através de simulações, foram obtidas sensíveis melhorias para as perturbações causadas pelos tons piloto e uma diminuição de canais fantasmas (cerca de 80%), que ocorrem devido à modulação de fase cruzada. Sob diferentes níveis de carregamento de tráfego na rede operando com rajadas, utilizando o controlador H_∞ , os transientes de potência foram reduzidos em até 50%. Dessa maneira, este tipo de controle surge com grande potencial; no entanto, nenhum relato experimental ainda foi publicado, o que ainda deixa em dúvida, em termos de complexidade e flexibilidade, a utilização deste tipo de controle.

Uma outra aplicação do controle realimentado é apresentada em [38]. Nela, o processo de realimentação atua em dois dispositivos, em um laser de teste (*probe laser*) e no laser de bombeio, como mostrado pela Fig 2.8.

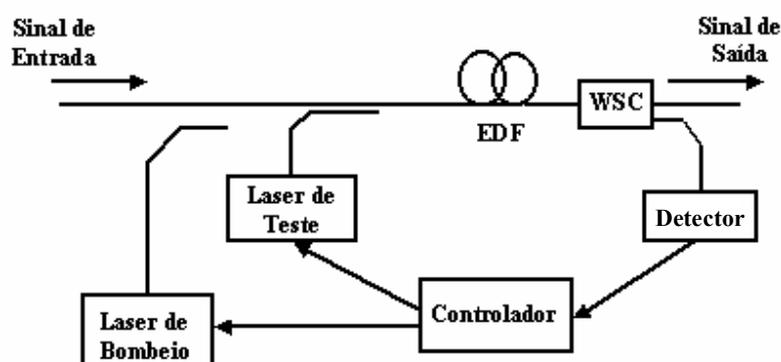


Fig. 2.8: Estrutura de controle eletrônico de ganho utilizando realimentação, baseada na monitoração de um laser de teste e na atuação em um laser de bombeio [38].

À entrada de um EDFA, com bombeio no comprimento de onda de 980 nm, é acoplado um laser de teste em 1572 nm, fora da banda utilizada para a amplificação dos canais. Na saída do amplificador, um acoplador seletivo em comprimento de onda (WSC) separa o sinal de teste dos canais transmitidos, direcionando-o para um fotodetector. Este sinal é detectado e depois processado pelo microcontrolador, que verifica o nível do laser de teste. Se a potência na entrada do EDFA variar, o canal de teste será amplificado com ganho

maior ou menor, sendo esta variação detectada pelo microcontrolador, que determina se há a necessidade de correção da corrente do laser de bombeio, de forma a manter o ganho do EDFA constante.

2.2.3 Controle Eletrônico Combinado (Controle com Alimentação Adiante e Realimentado)

Com o intuito de melhorar o desempenho das técnicas de controle de ganho eletrônico aplicadas a EDFAs, a combinação das técnicas que se baseiam no controle realimentado e com realimentação adiante vêm sendo analisadas. Diferentes estratégias de controle e seus respectivos desempenhos, frente às necessidades das redes WDM, são encontradas na literatura. Significativas melhorias são obtidas em relação ao controle baseado na utilização de apenas uma das técnicas [8]-[44-46].

As técnicas de controle eletrônico combinado se baseiam na utilização de um pré-ajuste do ganho através do controle com alimentação adiante, utilizando o controle realimentado como um ajuste fino capaz de proporcionar um elevado nível de precisão ao controle do ganho dos EDFAs. A Fig. 2.9 ilustra um esquema que apresenta a forma de atuação do controle combinado.

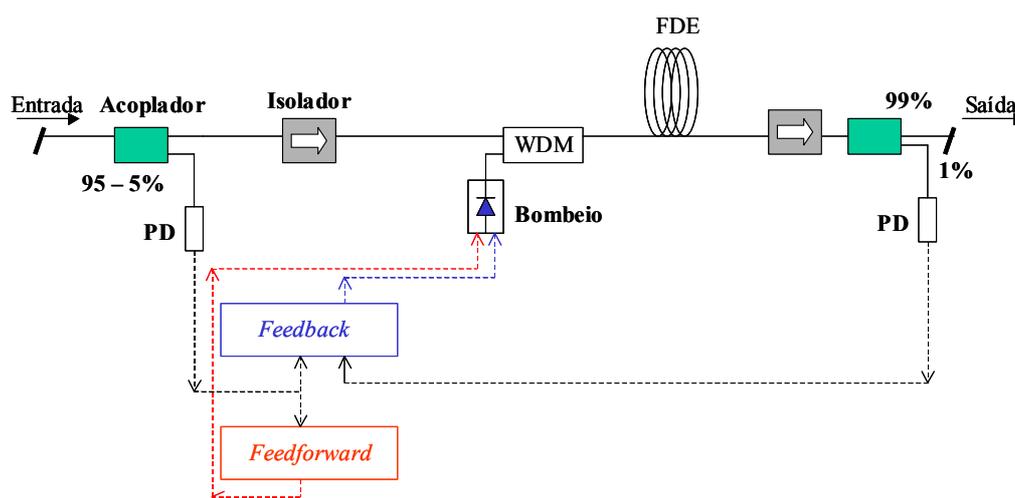


Fig. 2.9: Estrutura combinada de controle automático de ganho utilizando controle com alimentação adiante (*feedforward*) e realimentado (*feedback*).

Como se pode verificar na Fig. 2.9, uma parcela do sinal de entrada é retirado por um acoplador 95-5%, sendo convertida para corrente elétrica através de um fotodetector (PD) e enviada às unidades de controle. Nesse momento, o controle com alimentação adiante é capaz de atuar (após o atraso da eletrônica utilizada) no laser de bombeio, enquanto que o controle realimentado só atua após o recebimento do nível de sinal de saída, este extraído através de um acoplador 99-1%.

Em [8] e [44] são realizadas análises detalhadas referentes ao impacto da escolha do comprimento de onda do laser de bombeio a ser utilizado nos EDFAs. Destas análises, verifica-se que, para o laser de bombeio com comprimento de onda de 980 nm, é necessária uma atuação adiantada em 2 μ s como resposta à variação da potência de entrada, enquanto que, para o bombeio de 1480 nm, a atuação pode ser imediata, sendo obtido o mesmo resultado. Na prática esta diferença significa que para o laser de 980 nm, ocorre, entre a atuação e a resposta do laser, um atraso de 2 μ s, enquanto que o laser de 1480 nm responde em um tempo na casa dos nanosegundos. Esta diferença na dinâmica do ganho é causada pela diferença no número de níveis utilizados pelos íons de érbio para a obtenção do ganho no interior da fibra dopada. O bombeio de 1480 nm utiliza apenas dois níveis, enquanto que o bombeio de 980 nm usa três níveis (onde o estado excitado adicional apresenta um tempo de resposta de poucos microsegundos). Dessa maneira a compensação necessária ao EDFA, com bombeio de 980 nm, é devido a esta transição adicional.

Ainda em [8], uma comparação entre o controle realimentado e o controle combinado é apresentada. É demonstrado que, a atuação conjunta da alimentação adiante, com o controle realimentado é responsável pela precisão do nível de controle. O controle com alimentação adiante é baseado em um ajuste prévio que faz parte do projeto do EDFA que relaciona a variação do bombeio e a potência óptica de entrada, sendo previamente realizado, e responsável pela alta velocidade do controle. Uma redução no tempo de resposta dos EDFAs de 15 ms (controle realimentado) para um tempo inferior a 1 ms é obtida utilizando o controle combinado, para os dois comprimentos de onda de bombeio utilizados, frente à inserção e retirada de 39 canais.

Já em [44], além da análise da dinâmica dos bombeios, o projeto de um controle combinado, com tempo de resposta de 0,3 μ s baseado em um bombeio de 1480 nm, é

demonstrado. Em [44], para EDFAs com bombeio de 980 nm, implementa-se uma linha de atraso óptica de 2 ms baseada em fibra óptica padrão, antes da entrada do EDFA. Esta linha de atraso tem o intuito de proporcionar a atuação no bombeio com o atraso necessário para a anulação da variação de ganho do EDFA. Frente a variações de 15 dB na entrada, com a utilização do atraso, a variação de ganho é suprimida de 0,2 dB para valores inferiores a 0,1 dB. Os amplificadores com bombeio de 980 nm são submetidos a testes em uma rede óptica utilizando até cinco EDFAs. Nestes testes, foi verificada uma sensível melhoria sistêmica quando EDFAs utilizando o atraso foram empregados, proporcionando uma variação máxima inferior a 1 dB após a passagem do sinal pelos cinco amplificadores.

O projeto dos controladores, utilizados tanto no controle com alimentação adiante como no controle realimentado, são discutidos formalmente em [46]. Em [46], o controle dos EDFAs é analisado do ponto de vista da teoria dos sistemas de controle. Como um sistema dinâmico, o EDFA é uma planta composta por duas entradas: entrada de controle, representada pela potência óptica do laser de bombeio; e o sinal de entrada, que pode ser representado por um vetor N-dimensional, composto pelas potências ópticas de cada canal transmitido. Partindo das equações de taxa, o EDFA é descrito na representação de espaço de estados como um sistema multi-variável não-linear. Através desta representação, pode-se perceber que a potência de saída por canal depende diretamente da potência de entrada por canal e do nível médio de inversão de população. Isto mostra que os efeitos da saturação cruzada, frente a mudanças abruptas no número de canais, estão relacionados à variação temporal do nível médio da inversão de população da fibra dopada com érbio. Verifica-se que o ganho total do EDFA é uma média ponderada dos coeficientes de ganho de cada canal. Assim, controlando-se o ganho total, de modo a mantê-lo constante, pode-se garantir que cada canal na saída permanecerá com potência constante. Utilizando o modelo de espaço de estados apresentado em [46], onde a potência de entrada é vista como a perturbação ao sistema e a potência de bombeio é vista como a entrada de controle, obtêm-se as constantes da representação de espaço de estados, que proporcionam o ajuste da potência de bombeio para mudanças abruptas da potência de entrada. Utilizando uma formulação matemática relativamente simples e baseando-se em uma configuração de EDFA composta de um primeiro estágio com controle por alimentação adiante, seguido de

um atenuador óptico variável e um segundo estágio com um controle combinado, são definidos os controladores utilizados e analisados os resultados obtidos. Este trabalho apresenta uma abordagem didática e eficiente para a construção de controladores, que pode ser aplicada a qualquer tipo de controle eletrônico que se necessite implementar.

Para a técnica de controle eletrônico combinado, assim como para as demais técnicas de controle apresentadas, também é analisado o efeito da transmissão em rajada para redes WDM [45]. Um controle combinado, como apresentado em Fig. 2.9, é utilizado, sendo analisado o impacto transiente causado pelo controle de ganho em resposta às variações de potência de entrada com o cascadeamento de EDFAs. Também, verifica-se a influência das rajadas no comportamento do controle de ganho dos EDFAs. Foi verificado que o controle de ganho combinado efetivamente minimiza as excursões de ganho das rajadas ópticas, exibindo uma variação máxima de ganho de 1 dB, quando aplicado a uma rede com seis EDFAs. Quando múltiplos canais chegam ao EDFA ao mesmo tempo e interagem com outras rajadas, os EDFAs demonstram uma grande variação de ganho, não se apresentando preparados para este tipo de situação. Porém, em uma configuração real de rede, a possibilidade de diversas rajadas chegarem ao mesmo instante nos EDFAs é bem remota [45].

2.3 Controle Automático Híbrido de Ganho

Através da junção dos métodos de controle totalmente óptico e eletrônico em uma só estrutura, o controle automático de ganho híbrido de EDFAs é obtido. A idéia por trás disto é a de maximizar a eficiência do controle de ganho através da união das qualidades de ambos os métodos de controle. Como mostrado anteriormente, o método de controle totalmente óptico, apesar de ser capaz de controlar o ganho dos EDFAs, apresenta algumas imperfeições causadas principalmente devido às oscilações de potência que ocorrem logo após a inserção ou retirada de canais. No entanto, a duração destes transientes é maior que o tempo de resposta dos circuitos eletrônicos analógicos, tornando possível assim a redução das oscilações de relaxação do método totalmente óptico por meio da utilização de um controle eletrônico rápido, anterior ao controle óptico. As propostas de controle híbrido encontradas na literatura utilizam o controle eletrônico apenas com o intuito de

minimização das ROs [10], [47-49]. Utilizando-se a estrutura híbrida, tanto as variações de potência quanto os níveis de bombeio necessários podem ser minimizados em relação aos métodos de controle totalmente ópticos e eletrônicos apresentados anteriormente. A Fig. 2.10 apresenta, de forma esquemática, uma configuração básica de um controle híbrido [47] (VOA – atenuador óptico variável, TOF – filtro óptico sintonizável).

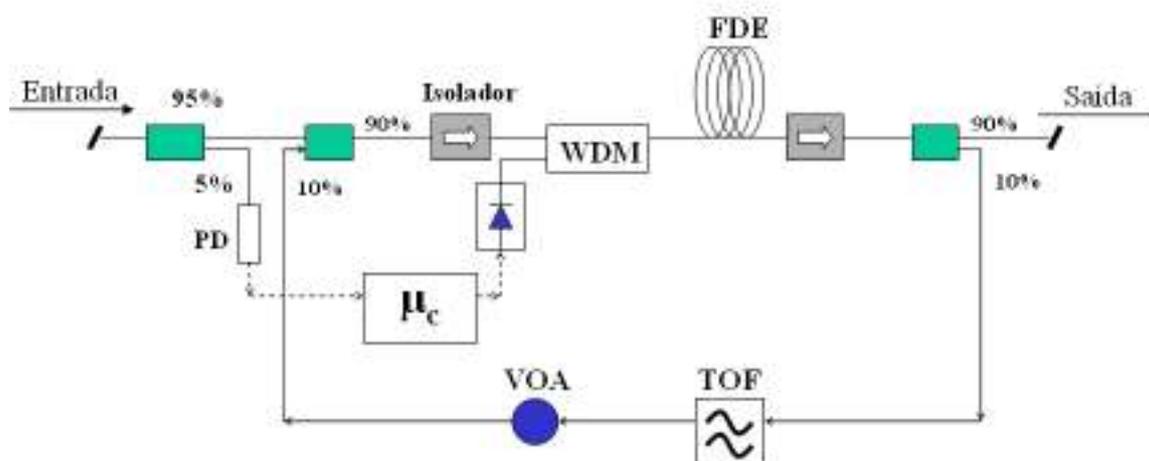


Fig. 2.10: Diagrama esquemático de um EDFA com controle automático híbrido de ganho.

Usualmente, como na Fig. 2.10, o controle híbrido de ganho dos EDFAs é realizado através da utilização da realimentação óptica em conjunto com o controle eletrônico de alimentação adiante [47-49]. Em [50-51], o mesmo controle é realizado utilizando uma realimentação óptica externa.

O primeiro relato da técnica híbrida de controle foi apresentado em [47]. Uma estrutura híbrida composta de uma realimentação óptica e de um controle eletrônico analógico, com alimentação adiante de um dos lasers de bombeio, foi utilizada. O circuito de realimentação óptica permitiu a formação de um laser de controle no comprimento de onda de 1565 nm. Para uma estabilização do laser de controle mais rápida, utilizou-se um circuito de alimentação adiante do qual fez parte um fotodetector e um amplificador elétrico. Uma amostra do sinal na entrada do EDFA é fotodetectada, amplificada e adicionada à corrente de polarização do bombeio. Através do circuito analógico projetado, as variações na potência de entrada do EDFA, que causam variação no seu ganho, provocam variações

inversamente proporcionais na potência de bombeio, estabilizando mais rapidamente o ganho do EDFA. Ainda em [47], a análise experimental verificou que as variações de potência no transiente, para o controle híbrido, apresentaram uma redução na amplitude das oscilações de relaxação quando comparada ao controle puramente óptico (sete de oito canais foram utilizados na inserção e retirada).

Em [48], através de um estudo teórico, pôde-se concluir que a estrutura híbrida pode ser considerada uma solução para obter a diminuição das amplitudes das oscilações de potência causadas pelas oscilações de relaxação do laser. No entanto, verificou-se que a diminuição nas amplitudes é extremamente dependente do tempo de resposta do circuito eletrônico com alimentação adiante. Como exemplo da dependência da flutuação de potência com o tempo de resposta do circuito eletrônico de um EDFA com controle de ganho híbrido, verificou-se uma variação de potência de 0,1 dB para um tempo de resposta de 1 μ s num sistema de 40 canais. No entanto, para um tempo de resposta de 4 μ s, a variação de potência é da ordem de 0,45 dB, equivalente à variação máxima obtida utilizando-se apenas a estrutura de controle de ganho totalmente óptica.

Uma estratégia diferente de controle híbrido é apresentada em [10]. Através da utilização de dois circuladores ópticos (ao invés de acopladores), o laser de controle é obtido através da ASE retroespalhada do estágio de amplificação. Assim, a ASE retroespalhada pelo estágio de amplificação é desviada para o laço de realimentação pelo circulador do estágio de entrada, passando por um filtro óptico (escolha do comprimento de onda de controle), por um acoplador óptico (que utiliza uma parte da potência para o circuito de controle), por um atenuador óptico (controle de potência do canal de controle) e, por fim, pelo circulador de saída. Neste caso, o controle com alimentação adiante se baseia na monitoração de potência do canal de controle e, não, na monitoração direta da potência de entrada. O desempenho obtido foi semelhante ao de um EDFA com controle totalmente óptico; no entanto, obteve-se um menor nível de figura de ruído. Esta característica se deve ao fato do menor consumo de potência causado pela utilização do baixo nível de potência de realimentação da ASE retroespalhada.

Além das análises convencionais utilizadas no projeto das técnicas de controle de ganho de EDFAs que compõem a técnica híbrida, em [49] é analisado o efeito da inserção de uma linha de atraso óptico entre o circuito de alimentação adiante e a realimentação óptica. É verificado que a inserção do atraso modifica a fase da resposta transiente do EDFA, provocando, se bem dimensionado, uma redução nas oscilações de potência durante os transientes, assim como uma leve redução no tempo de resposta do EDFA. Porém, a utilização de atraso óptico requer um segmento de fibra muito longo, dificultando, assim, a utilização desta solução (aproximadamente 1 km para 5 μ s de atraso).

O controle óptico através de realimentação óptica externa, aplica-se apenas a EDFAs já instalados e que não possuem o controle automático de ganho. Através da utilização dos pontos de monitoração de entrada e saída encontrados nos amplificadores comerciais, é acoplado um aparato contendo um filtro óptico e um atenuador variável à saída de monitoração. A saída do atenuador é acoplada à monitoração de entrada para a formação de um canal de controle capaz de manter constante o ganho do EDFA. Em [50-51], baseando-se em um aparato que possui um fotodetector para a medição do nível de potência que advém da entrada de monitoração, foi analisado um controle composto por uma alimentação adiante e uma realimentação óptica externa. Verificou-se analiticamente que, para este tipo de estrutura, existem pontos de alocação do canal de controle que causam instabilidade ao EDFA, gerando auto-oscilações no espectro de ganho (também verificadas experimentalmente). Além disto, foi definido que a região de operação que satisfaz o critério de estabilidade do espectro de ganho é obtida para uma alocação do canal de controle acima de 1568,5 nm.

Outros métodos de redução das oscilações de relaxação foram propostos, como em [52-53], onde é utilizada uma realimentação dupla, com a formação de lasers de controle em diferentes comprimentos, localizados nas laterais opostas da banda de amplificação [52], e um absorvedor saturável que controla o nível de potência de saída [53]. No entanto, os resultados obtidos não proporcionaram ganhos significativos em relação aos apresentados pelas técnicas que aqui foram apresentadas.

2.4 Análise Crítica das Técnicas de Controle Automático de Ganho para EDFAs

Nas seções anteriores deste capítulo, foram apresentadas as técnicas de controle de ganho de EDFAs, com ênfase nos principais resultados encontrados na literatura da área. Nesta seção, será realizada uma análise criteriosa de cada técnica de controle de ganho, destacando-se os pontos fracos e os benefícios trazidos por cada uma delas, assim como comparações entre as técnicas apresentadas. O intuito desta seção é identificar, através da análise das técnicas de controle, a que melhor se aplica às exigentes necessidades das redes WDM. No entanto, além das técnicas apresentadas, a proposição de novas configurações para o controle de ganho, assim como a utilização de ajustes nas técnicas existentes também será apresentada e discutida, sempre levando em conta as necessidades das redes com roteamento por comprimento de onda.

Como discutido anteriormente, as recentes necessidades de reconfigurabilidade demandadas pelas redes ópticas proporcionaram uma profunda modificação no comportamento estático antes apresentado pelas mesmas. Através da inserção de tecnologias como os ROADMs, *cross-connects*, *transponders* sintonizáveis e outras, as necessidades das redes ópticas foram alteradas, apresentando, agora, uma necessidade de adequação à dinâmica de alocação dos circuitos ópticos, apresentadas pelas redes com roteamento por comprimento de onda. Como em qualquer sistema de comunicação óptica de média ou longa distância, os amplificadores ópticos representam parte fundamental da rede. Dessa maneira, a necessidade de adequação dos amplificadores ópticos aos novos requisitos da rede óptica torna-se estritamente necessária.

Diversas técnicas de controle de ganho foram anteriormente apresentadas; no entanto, tendo a rede óptica reconfigurável como ponto de vista, pergunta-se: qual seria o amplificador óptico (EDFA) ideal para a nova geração de redes com roteamento por comprimento de onda? Considerando um EDFA convencional, capaz de prover ganho suficiente para vencer as perdas do enlace, do ponto de vista da rede óptica, a principal necessidade imposta é a manutenção do ganho independentemente da potência de entrada. Outras imposições como baixo nível de figura de ruído, altos níveis de potência de saída e

supressão de transientes são também essenciais. As tecnologias de controle de ganho encontradas, tanto na literatura como comercialmente, apresentam soluções que atendem apenas em parte as especificações necessárias. Não existe uma solução, entre as apresentadas anteriormente, capaz de prover o controle de ganho de EDFAs para qualquer faixa de potência de entrada ou faixa dinâmica de controle. O controle de ganho baseado nas técnicas de controle existentes exige que, em uma rede óptica, sejam necessários EDFAs com diferentes técnicas de controle de ganho por aplicação (*booster*, linha e pré-amplificador), para poder cobrir com eficiência o controle de ganho necessitado pelas redes com roteamento por comprimento de onda. Normalmente, para EDFAs operando com alta potência, são utilizadas técnicas de controle eletrônicas (alimentação adiante ou realimentadas). Em EDFAs operando como amplificadores de linha, todas as técnicas anteriormente apresentadas podem ser utilizadas; no entanto, deve ser levado em conta o nível do sinal de entrada, especialmente quando utilizando as técnicas totalmente ópticas. E para aplicação como pré-amplificadores, as técnicas totalmente ópticas são as mais apropriadas; controles eletrônicos são possíveis se a faixa de operação for modificada. Dessa maneira, em resposta à pergunta feita anteriormente, o EDFA ideal para as redes com roteamento por comprimento de onda deve possuir controle de ganho para uma faixa dinâmica que cubra todos os níveis de potência necessários para operação da rede, em uma única aplicação do EDFA. Assim o amplificador controlado se tornaria capaz de operar com controle de ganho eficiente se sua função de amplificação fosse de potência, de pré-amplificação ou de linha, com supressão de transiente, baixa figura de ruído e alta potência de saída.

Como base nos requisitos do EDFA mais adequado para uma rede com roteamento por comprimento de onda descritos acima, a seguir, realiza-se uma análise de cada uma das técnicas de controle apresentadas, assim como propostas de possíveis soluções para a maximização da obtenção destes requisitos.

As técnicas de controle totalmente ópticas foram alvo de intensa pesquisa no fim dos anos 90 (1997-1999). Este tipo de técnica de controle torna-se atrativa devido ao seu baixo custo e relativa facilidade de implementação. No entanto, os problemas ocasionados pelo *spectral hole burning* e pelas oscilações de relaxação dificultam o funcionamento ideal

deste método, por permitir oscilações na potência dos canais sobreviventes durante transientes, além de imperfeições no controle do nível absoluto do ganho. Mesmo com estes fatores limitantes, a técnica totalmente óptica continua atrativa devido à sua eficiência no controle do ganho, e por este motivo ainda é muito estudada, com propostas de melhoria no seu desempenho sendo freqüentemente publicadas. Uma maneira de tornar este método de controle ainda mais atrativo e eficiente é o desenvolvimento de soluções capazes de diminuir a influência das oscilações de relaxação e do *spectral hole burning*. Os recentes resultados obtidos mostram a possibilidade de eliminação das oscilações de relaxação, mantendo em níveis aceitáveis (variação de ganho menor que 0,5 dB) os efeitos causados pelo SHB através de diferentes métodos. Entre os resultados já descritos, destacam-se a utilização de acopladores CWDM e a alocação do canal de controle em 1535 nm. No entanto, ambos apresentam ausência de requisitos fundamentais para uma operação adequada em redes com roteamento por comprimento de onda.

Utilizando acopladores CWDM, além da impossibilidade de ajuste no ganho do EDFA após a fabricação, uma larga ocupação de espectro (1522 a 1538 nm) necessária para formação do laser de controle, assim como uma restrita faixa dinâmica com potência de entrada máxima de -10 dBm, dificulta a utilização desta técnica de controle. Através de uma análise detalhada da alocação do canal de controle na banda C, o comprimento de onda de 1535 nm em conjunto com a escolha apropriada do nível de realimentação óptica foi definido, através de análises sistêmicas, como a situação de projeto que minimiza os efeitos das oscilações e do SHB. No entanto, a ocupação da banda C com um canal de controle e uma faixa dinâmica restrita (permitindo uma potência máxima de entrada de -10 dBm) são os pontos negativos desta abordagem.

As soluções totalmente ópticas de controle de ganho, mesmo demonstrando uma sensível evolução nos últimos anos, não são capazes ainda de suportar as necessidades impostas pelas redes WDM. O principal fator limitante é a faixa dinâmica proporcionada, que depende do nível de ASE do EDFA, que, por sua vez, diminui com o aumento da potência de entrada, impossibilitando assim a formação do canal de controle e, conseqüentemente, causando ausência de controle de ganho. Assim, acredita-se ser necessária uma abordagem diferente para esta técnica de controle, podendo a mesma ser

utilizada em conjunto com outras técnicas de controle, para uma solução robusta, adequada às necessidades das redes com roteamento por comprimento de onda.

Outra técnica de controle automático de ganho de EDFAs utiliza um controle eletrônico com realimentação adiante. Nesta técnica, é necessária apenas a realização da medida da potência de entrada de EDFA para um ajuste preciso do nível de bombeio que mantém o ganho constante. Devido a este fato, a complexidade de implementação desta técnica é reduzida em comparação a outras técnicas de controle de ganho eletrônicas. Para um funcionamento adequado deste método, deve-se implementar um circuito eletrônico de alta velocidade, com tempos de resposta da ordem de poucos microsegundos. O controle é realizado através de variações da potência de bombeio causadas pela detecção de uma amostra do sinal de entrada do EDFA, previamente ao seu acoplamento no amplificador. Fatores que podem contribuir para a degradação do desempenho deste método são as variações sofridas pelo perfil de ganho do amplificador, que podem ocorrer devido à excessivas variações de temperatura e ao desgaste dos lasers de bombeio, não compensadas pelo circuito de controle do bombeio. Outra limitação é a faixa dinâmica estreita resultante da dependência que a eficiência do controle de ganho apresenta em relação à necessidade de linearidade da variação da potência de entrada com o ganho, para um correto ajuste do bombeio. Dessa maneira, o controle eficiente baseado na alimentação adiante é obtido apenas na região onde o EDFA reflete linearmente a variação de potência de entrada no ganho, normalmente quando saturado. Assim este tipo de controle apresenta deficiência em termos de faixa dinâmica, não podendo ser utilizado adequadamente para aplicações de baixas e médias potências de entrada, apesar do rápido e eficaz mecanismo de controle dentro de sua faixa dinâmica.

Além do controle eletrônico automático com alimentação adiante, destaca-se como uma solução eficiente, para o controle de ganho de amplificadores ópticos o controle eletrônico realimentado. Neste método de controle de ganho, como se faz uso de uma realimentação, é possível utilizar uma amostra da potência de saída do amplificador como um parâmetro de entrada do circuito de controle. Diferentemente do outro método de controle eletrônico já apresentado, o ganho do amplificador é constantemente monitorado, o que o torna imune a penalidades advindas de mudanças no perfil de ganho do amplificador causadas por fatores

externos. A monitoração do ganho é possível graças à utilização de um laser de teste na entrada do amplificador. Recentemente, o controle realimentado vem sendo amplamente empregado, com resultados satisfatórios apresentados em aplicações voltadas para o controle de EDFAs em redes com tráfego de rajadas, assim como no controle de EDFAs multibanda. Outra potencial aplicação, sob investigação, é a utilização do controle robusto (H_∞), capaz de otimizar o projeto do controlador a ser utilizado nos EDFAs. A técnica de controle realimentada, apresenta como uma vantagem significativa, o fato de estar, durante todo o ciclo de vida do EDFA, monitorando seu ganho e atuando para a sua manutenção. Porém, por ser um controle realimentado, uma das maiores dificuldades de implementação é causada pela necessidade de uma modelagem precisa do EDFA, além da definição de uma função de transferência apropriada para a otimização do controlador a ser projetado.

Utilizando controladores tradicionais (P, PI e PID) e com base na modelagem conhecida dos EDFAs, a técnica de controle realimentada tem proporcionado uma alta eficiência no que diz respeito ao controle de ganho. Porém, a faixa dinâmica de controle é limitada pelo nível de variação da potência de saída causada pela completa excursão do laser de bombeio (normalmente inferior a 10 dB). Dessa maneira, os controles eletrônicos realimentados podem operar de maneira eficiente em qualquer faixa de potência de entrada, porém, estando sempre limitados a uma faixa dinâmica estreita, ligada ao nível de variação na potência de saída causada pelo esquema de bombeio do EDFA.

O controle eletrônico combinado, composto da alimentação adiante seguido por um controle realimentado, tem sido também amplamente utilizado. Neste caso, a eliminação das oscilações de relaxação fica a cargo da alimentação adiante, cabendo ao controle realimentado a precisão e a manutenção do ganho do EDFA durante sua operação. Como se pode verificar também neste tipo de controle, a faixa dinâmica do EDFA é restringida pela atuação do bombeio. Dessa maneira, pode-se concluir que, assim como as técnicas totalmente ópticas, as técnicas de controle eletrônicas apresentadas possuem uma grande eficiência no controle de ganho de EDFAs. No entanto, devido à restrita faixa dinâmica proporcionada por estas técnicas, torna-se inviável a utilização de uma solução de amplificação única na obtenção dos requisitos de controle de ganho necessários às redes com roteamento por comprimento de onda.

A última estrutura de controle automático de ganho abordada foi a estrutura híbrida, estrutura esta que combina a técnica de controle de ganho totalmente óptica com o controle eletrônico. Como verificado anteriormente, a estrutura de controle de ganho totalmente óptica, baseada na realimentação óptica, possui algumas limitações. No entanto, devido à sua simplicidade estrutural ela continua sendo uma técnica muito atrativa, e diversas tentativas de melhoria no seu desempenho estão sendo propostas, mas não estão ainda consolidadas. O controle de ganho híbrido surgiu como uma destas técnicas propostas para minimizar as penalidades que ocorrem nas estruturas de controle automático de ganho totalmente óptico. A estrutura híbrida adiciona ao controle totalmente óptico um circuito eletrônico com alimentação adiante que é responsável por uma rápida estabilização da potência do canal de controle, proporcionando à estrutura totalmente óptica uma sensível redução nas amplitudes das oscilações de relaxação. Um detalhe importante para o funcionamento adequado desta técnica é que a mesma depende consideravelmente do tempo de resposta do circuito eletrônico. Quanto mais rápida é a resposta do circuito eletrônico, melhor o seu desempenho e vice-versa. Como os tempos de resposta exigidos, para que o controle híbrido apresente melhoria em relação ao controle totalmente óptico, são da ordem de poucos microsegundos, o custo necessário para a implementação do mesmo aumenta consideravelmente, devido à necessidade de componentes eletrônicos capazes de proporcionar tempos de respostas apropriados ao circuito de controle. Além do custo, a faixa dinâmica obtida neste tipo de controle nada difere em relação às mencionadas anteriormente. O controle com alimentação adiante é utilizado estritamente como solução para a redução das oscilações de relaxação, não apresentando alteração nenhuma na faixa dinâmica de controle ou na faixa de operação de potências de entrada do EDFA.

Assim, após a análise das principais técnicas de controle de ganho, conclui-se que, considerando as técnicas até então apresentadas na literatura, não é possível obter-se uma solução única de controle de ganho que atenda às necessidades dos EDFAs para aplicação em redes com roteamento por comprimento de onda. Detectada esta necessidade, neste trabalho, serão realizadas investigações experimentais detalhadas com o intuito de se apresentar uma solução única, que torne capaz a utilização, de forma eficiente, dos EDFAs com controle automático de ganho. Nos próximos capítulos serão descritos os passos na

busca deste controle automático de ganho “generalizado”, que possibilita a operação otimizada do EDFA em redes ópticas. Outros resultados relacionados ao controle de ganho e à análise do impacto transiente em redes ópticas, realizados ao longo da busca deste controle de ganho generalizado, e que apoiaram o seu desenvolvimento, são também abordados.

Capítulo 3

Desenvolvimento de um Controle Híbrido de Ganho

Este capítulo tem como principal objetivo a descrição experimental em conjunto com a descrição do processo de elaboração de uma nova técnica de controle automático de ganho de EDFAs, que é a técnica de controle híbrido de ganho. Esta é capaz de proporcionar uma solução única de amplificação para redes ópticas reconfiguráveis, obedecendo aos requisitos necessários para este tipo de rede, estendendo as faixas dinâmicas e de operação do EDFA independentemente de sua aplicação (*booster*, linha ou pré-amplificador), habilitando assim a generalização do uso do EDFA com controle de ganho em redes ópticas. Para alcançar este objetivo, avanços científicos e tecnológicos nas características de operação de técnicas já existentes são necessários. Conjuntamente, faz-se necessário a elaboração de uma técnica de controle de ganho que, através da atuação conjunta de diferentes métodos seja capaz de proporcionar, baseado em uma nova arquitetura de controle, a generalização da operação dos EDFAs em rede ópticas, tornando-os independente do nível de sinal de entrada e da faixa dinâmica de controle.

A inovação se baseou na construção de um esquema de controle de ganho baseado em um arranjo híbrido, que utiliza os controles totalmente óptico e eletrônico. Contrário ao que já foi proposto na literatura, o controle eletrônico não foi utilizado para a minimização das oscilações de relaxação. O principal parâmetro a ser alcançado com esta nova técnica foi o aumento da faixa dinâmica de controle de ganho do EDFA. O acoplamento de forma serial das faixas dinâmicas do controle óptico e eletrônico, proporcionados pelo controle híbrido de ganho proposto, é essencial para tornar viável a habilitação de uma faixa ampla o suficiente para controlar o ganho do EDFA independentemente da potência de entrada, per-

mitindo a operação do amplificador com controle de ganho como amplificador de potência (*booster*), amplificador de linha ou pré-amplificador. A minimização das oscilações de relaxação, assim como o desenvolvimento de um rápido e eficiente controle eletrônico digital, também representou parte fundamental deste desenvolvimento.

Inicialmente, na Seção 3.1, o controle totalmente óptico foi analisado, implementado e caracterizado, com o intuito de se descobrir uma maneira eficaz de eliminação das oscilações de relaxação, em conjunto com tentativas de aumento da faixa dinâmica proporcionada por esta técnica de ganho. Em seguida, na Seção 3.2, na busca do desenvolvimento de uma técnica de controle híbrida, EDFAs com controle eletrônico de ganho são analisados, implementados e caracterizados. As técnicas de controle realimentado e com alimentação adiante são, na seqüência, acopladas ao controle totalmente óptico, para assim se definir, com base em experimentos que reproduzem as condições encontradas em uma rede com roteamento por comprimento de onda, qual das técnicas eletrônicas melhor se adapta ao propósito do controle híbrido desejado.

3.1 Avanços na Técnica de Controle Automático Totalmente Óptico

Para a obtenção de uma técnica de controle híbrido capaz de proporcionar controle de ganho para o EDFA operando como *booster*, linha ou pré-amplificador, primeiramente, implementou-se o projeto de uma técnica de controle de ganho totalmente óptica. Contrário às técnicas de controle de ganho encontradas na literatura, as prioridades para o controle aqui desenvolvido se baseiam nos seguintes requisitos: obtenção de uma faixa dinâmica capaz de proporcionar a operação do EDFA com controle de ganho para aplicação em amplificação de linha e pré-amplificação (potência de entrada máxima em torno de 0 dBm) e uma considerável supressão das oscilações de relaxação. Em [54-56], são apresentados resultados de análises experimentais realizadas no intuito de se obter requisitos de operação desejados para a técnica de controle totalmente óptica.

Qualquer amplificador óptico convencional, quando saturado, apresenta variações de ganho caso a sua potência de entrada seja modificada dinamicamente. Em um EDFA com controle automático de ganho totalmente óptico (AOGC-EDFA - *all optical gain control*

erbium doped fiber amplifier), a técnica de controle de ganho é projetada para manter o ganho constante mesmo quando o EDFA opera sob mudança constante na potência de entrada. No entanto, o amplificador é incapaz de responder instantaneamente às transferências de potência ocorridas entre o canal de controle e os canais transmitidos. Conseqüentemente, isto leva a flutuações no nível da população de portadores do nível metaestável do érbio, causando, até a estabilização, oscilações de potência (ROs) que são transmitidas aos canais que transportam informação. O transiente do EDFA possui duração típica da ordem de centenas de microsegundos, tornando-se mais rápido quanto maior for o número de EDFAs no enlace óptico. As oscilações de relaxação são uma característica intrínseca e um dos fatores limitantes da técnica de controle automático de ganho totalmente óptica. As variações de potência causadas por estas oscilações podem comprometer a sensibilidade do receptor ou até mesmo induzir a saturação do fotodetector. Um outro fator limitante em AOGC-EDFAs é o SHB, o qual pode produzir uma imprecisão na correção do ganho, dependendo do espaçamento entre o canal de controle e o canal transmitido. Ambos estes efeitos limitantes podem ser significativamente suprimidos por uma escolha apropriada do comprimento de onda do canal de controle e pela otimização do nível de atenuação da realimentação óptica, como citado no Capítulo 2.

A Fig. 3.1 ilustra, de forma esquemática, o AOGC-EDFA desenvolvido. Pode-se verificar que, diferentemente da Fig. 2.1, são utilizados *add/drops* fixos ao invés de um filtro óptico para a seleção do canal de controle. Além disto, na realimentação óptica é utilizado um atenuador óptico variável controlado por tensão (FVOA – *fast variable optical attenuator*) ao invés de um atenuador controlado manualmente.

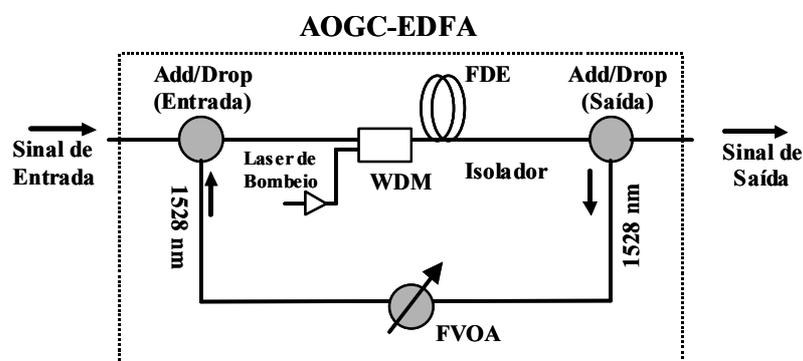


Fig. 3.1: Diagrama esquemático do AOGC-EDFA projetado.

Com a inserção do FVOA, em conjunto com a escolha apropriada do comprimento de onda de controle, esperava-se propiciar ao EDFA um ajuste de ganho em diversos valores fixos, mantendo pequenas as variações de ganho com ausência de oscilações de relaxação, frente a severas variações da potência de entrada. Desejava-se também, através da utilização do FVOA, a obtenção de uma relação entre a atenuação do VOA e a potência de entrada do EDFA. Assim, o nível de potência do canal de controle seria otimizado, melhorando o nível da figura de ruído e fazendo com que a mesma apresente valores compatíveis aos de EDFAs comerciais, eliminando dessa maneira, mais um dos fatores limitantes do controle totalmente óptico.

3.1.1 Projeto do EDFA

Inicialmente, para o projeto do AOGC-EDFA, realizou-se um conjunto de simulações que tinham como objetivo estabelecer o comprimento necessário de fibra dopada com érbio para a maximização do ganho e minimização da figura de ruído do amplificador. A Fig. 3.2 ilustra o ganho por canal e a figura de ruído em função do comprimento da fibra dopada (OFS - MP980), obtidos com as simulações realizadas no simulador OASIX. Na simulação, foram considerados oito canais igualmente espaçados de 2,5 nm, compreendidos entre 1538 e 1558,5 nm. Foi adotado um único estágio de amplificação, com um laser de bombeio co-propagante de 120 mW de potência e comprimento de onda de 980 nm.

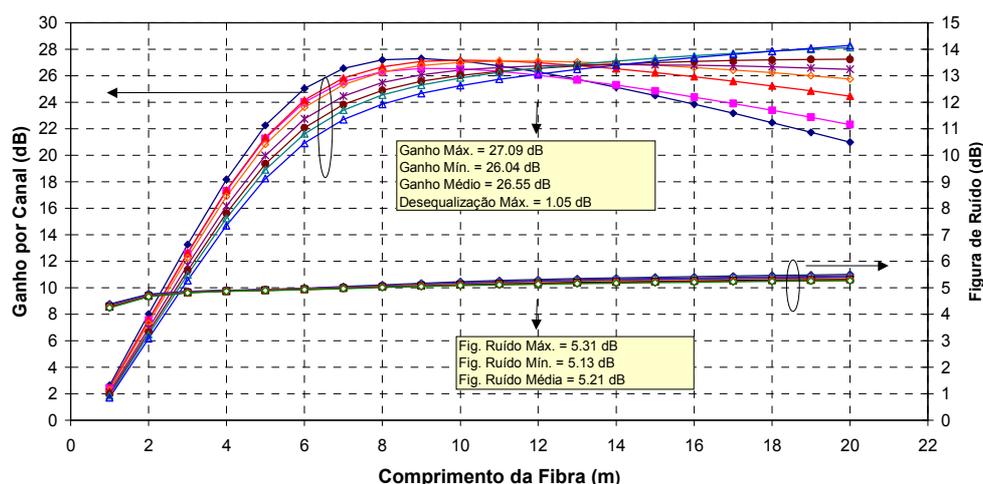


Fig. 3.2. Simulação do ganho e da figura de ruído em função do comprimento para a fibra dopada com érbio utilizada no projeto do AOGC-EDFA.

A partir da análise da Fig. 3.2, pode-se concluir que uma fibra de 12 m de comprimento seria a mais adequada para o amplificador, exibindo um ganho médio de 26 dB, desequalização entre todos os canais inferior a 1 dB e nível médio de figura de ruído de 5,2 dB.

Com relação ao dispositivo de controle da atenuação na realimentação óptica, o FVOA, uma detalhada análise prévia também foi realizada. A correta utilização do FVOA proporciona um grau de liberdade na escolha do valor do ganho fixo de operação do amplificador. Isto pode ser obtido através da variação precisa e rápida da atenuação no interior da realimentação óptica. O FVOA possui um tempo de resposta de 40 μ s, além de dimensões reduzidas, apropriadas para o projeto em questão. A relação atenuação versus tensão aplicada no dispositivo é ilustrada na Fig. 3.3. Como pode ser visto, o nível da atenuação pode variar mais de 40 dB em função da tensão aplicada. Os valores hexadecimais contidos na Fig. 3.3 correspondem à palavra que deve ser escrita no conversor digital/análogo (D/A) da placa de controle para a obtenção do nível de atenuação mostrado.

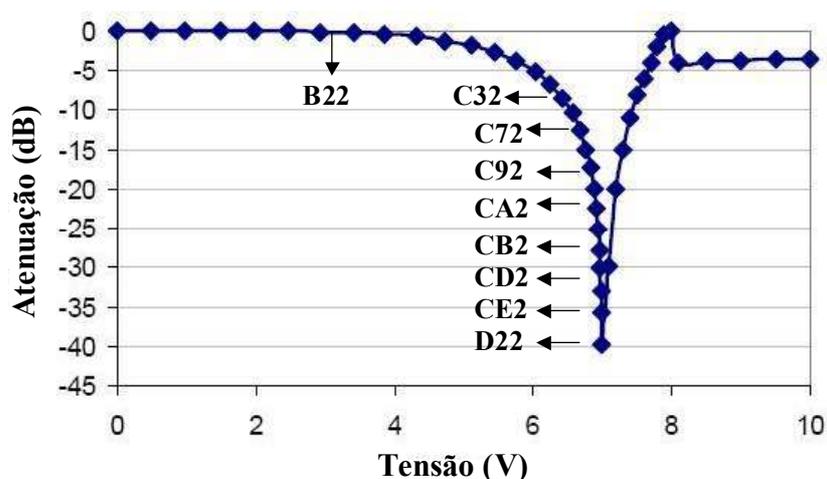


Fig. 3.3. Função de Transferência do FVOA utilizado.

3.1.2 Caracterização e Resultados

Quando submetido a variações na potência de entrada, o AOGC-EDFA tende a manter o nível de ganho constante, independentemente do número de canais. No entanto, antes da

estabilização de ganho, os canais sobreviventes são submetidos a intensas oscilações de ganho que resultam da instabilidade temporária do canal de controle. Este tempo de estabilização dura aproximadamente 100 μ s e é causado pelo tempo de resposta finito dos íons de érbio na fibra dopada. Estas oscilações de ganho podem ser profundamente suprimidas se o canal de controle for alocado corretamente [59]. De fato, esta supressão pode ser obtida se o canal de controle é mantido, ao menos, a 8 nm de distância em relação aos canais transmitidos [21].

Uma detalhada análise do canal de controle demonstrou uma grande eficiência na supressão das oscilações de relaxação, quando o mesmo é alocado em 1528 nm. Além disto, pode-se obter a mesma faixa dinâmica de controle, já que este comprimento de onda exibe a mesma amplitude da densidade espectral de ASE, se comparado àquela obtida em 1535 nm. Utilizando este comprimento de onda, além da supressão das oscilações de relaxação, é possível utilizar quase a totalidade da banda C, a partir de 1536 nm, para a alocação dos canais transmitidos, sem penalidade devido à potência drenada pelo canal de controle.

O arranjo experimental utilizado na caracterização do AOGC-EDFA, com o FVOA, na realimentação óptica é ilustrado na Fig. 3.4.

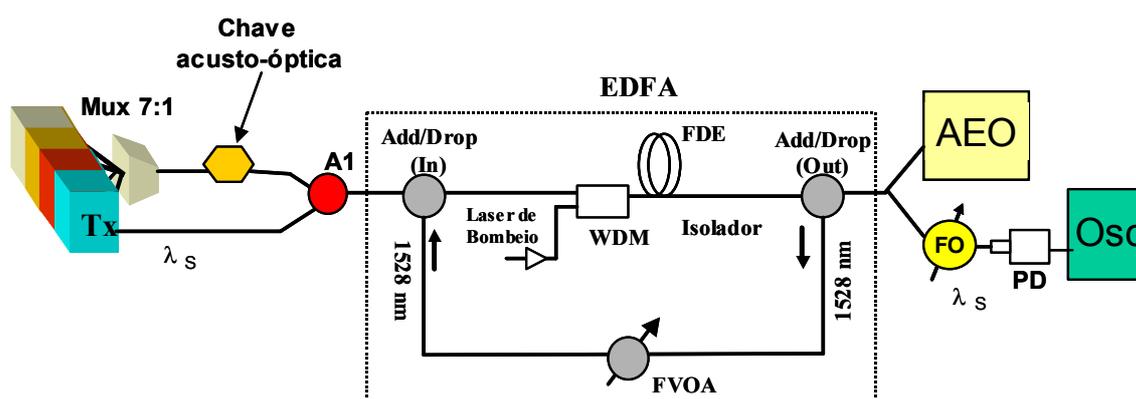


Fig. 3.4: Arranjo experimental utilizado na caracterização do AOGC-EDFA desenvolvido.

Na Fig. 3.4, o sinal de entrada é composto pela luz emitida por oito lasers na banda C, espaçados de 200 GHz, com o último canal em 1558,5 nm. Em particular, um deles, que é

adotado como canal sobrevivente (1558,5 nm), não passa pelo multiplexador 7:1, sendo sobreposto aos demais pelo acoplador de entrada (A1), após atenuação apropriada. Quando necessária, a inserção e retirada de 7 canais, utiliza um gerador de pulso externo que modula uma chave acústico-óptica. Na análise do sinal de saída, são empregados um analisador de espectro óptico (AEO), para análise espectral, e uma estrutura formada por um filtro óptico (FO) sintonizado no canal sobrevivente, um fotodetector e um osciloscópio, para análise temporal.

A potência do sinal de entrada foi, então, variada através da inserção e retirada de 7 dos 8 canais, sendo então caracterizada a resposta do AOGC-EDFA em função do ganho e da variação de ganho apresentados pelo canal sobrevivente, com o auxílio do AEO. A Fig. 3.5 ilustra o ganho, por canal, em função da potência de entrada. Como pode ser observado, o EDFA apresenta valores praticamente fixos de ganho que podem ser ajustados entre 16 e 23 dB para o projeto em questão. Estes diferentes níveis de ganho fixo são obtidos através da variação da atenuação da realimentação óptica, proporcionando, assim, um controle na precisão do ganho do EDFA. O aumento dos níveis de atenuação gera um aumento do ganho a ser proporcionado pelo EDFA.

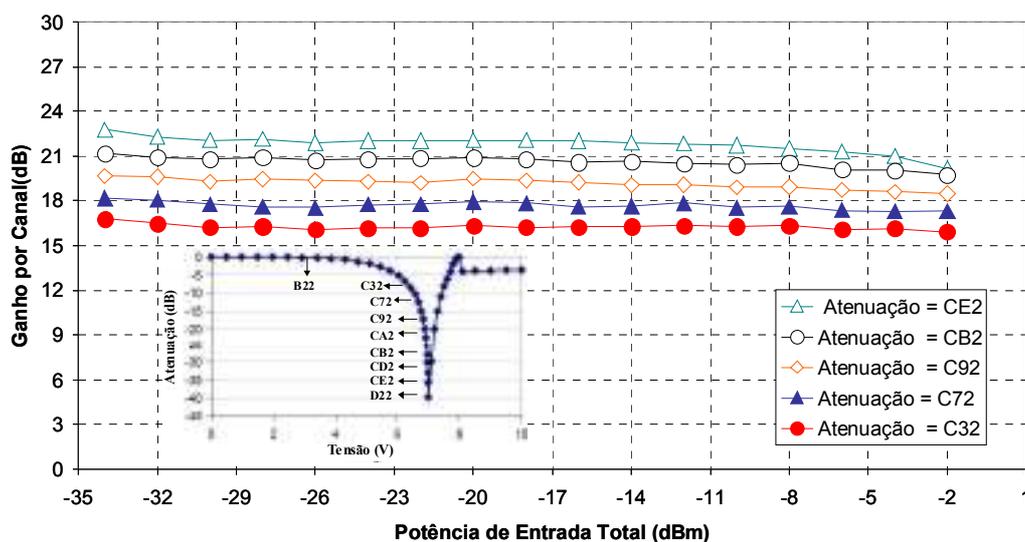


Fig. 3.5. Ganho versus potência de entrada para diferentes níveis de atenuação da realimentação óptica.

A Fig. 3.6 ilustra a variação de ganho no canal sobrevivente em função da potência de entrada, quando sete de oito canais são retirados ou adicionados à entrada do EDFA, tendo a atenuação como parâmetro. Como se pode verificar, para níveis menores de atenuação, a variação do ganho se mantém inferior a 0,5 dB, até em torno de -2 dBm de potência total de entrada. No entanto, para níveis maiores de atenuação a variação de ganho se torna superior a 0,5 dB, ultrapassando assim o critério de eficiência de controle de ganho seguido neste trabalho.

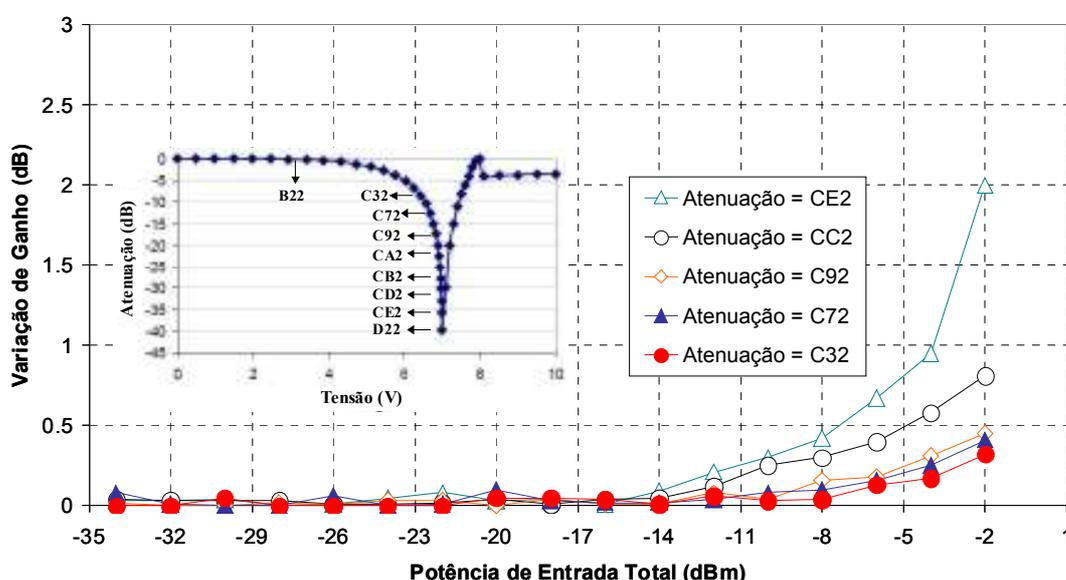


Fig. 3.6. Variação do ganho versus potência de entrada, para diferentes níveis de atenuação da realimentação óptica.

Em AOGC-EDFAs com atenuadores fixos convencionais, é esperado que a figura de ruído aumente em relação à de um EDFA equivalente que não possua controle automático de ganho. Este comportamento está relacionado ao valor da atenuação na realimentação óptica, que, como é fixa independentemente do nível de entrada, mantém o canal de controle com a mesma atenuação. Desta maneira, quando variado o nível de entrada do EDFA, o canal de controle pode se encontrar com excesso ou falta de potência, causando aumento da figura de ruído ou ausência de controle de ganho. Se a atenuação é corretamente ajustada através de um dispositivo capaz de atenuar de acordo com o nível de ganho desejado ou com a variação da potência de entrada, é possível obter um EDFA com,

aproximadamente, a mesma figura de ruído que a um de EDFA convencional. Neste caso torna-se possível manter constante a eficiência do canal de controle, não removendo ou proporcionando ganho em excesso aos canais presentes na banda de transmissão com a variação da potência de entrada ou a variação do ganho. Com o preciso controle da atenuação proporcionado pelo FVOA, obtiveram-se níveis de figura de ruído inferiores a 6 dB, para uma potência de entrada menor que -8 dBm, como ilustrado na Fig. 3.7. É importante mencionar que os pontos medidos, referentes à figura de ruído da Fig. 3.7, foram tomados considerando valores de atenuação que maximizam o ganho do EDFA, e mantendo, ao mesmo tempo, a variação de ganho possível sempre inferior a 0,5 dB.

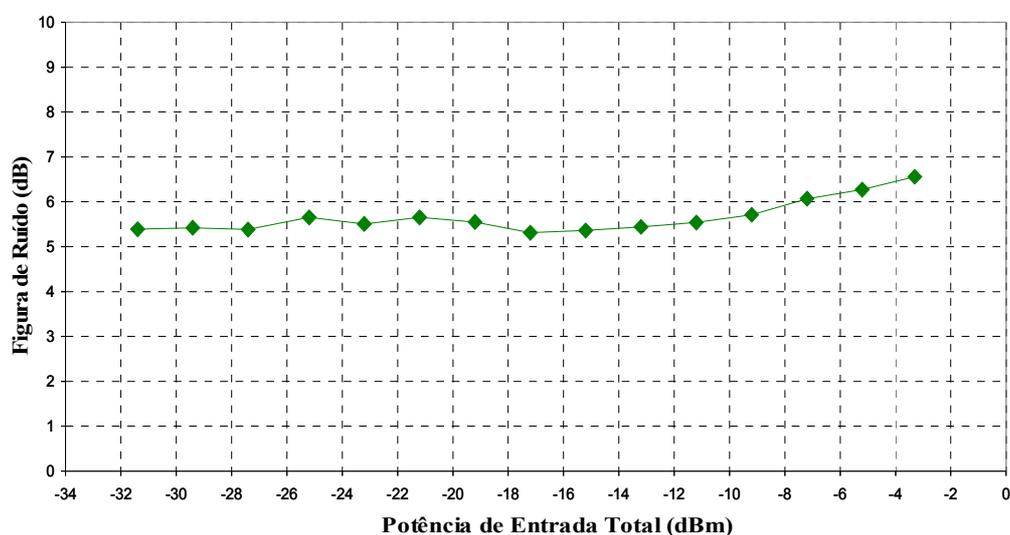


Fig. 3.7. Figura de ruído versus potência de entrada para o AOGC-EDFA projetado.

Terminadas as análises utilizando o AEO, o canal sobrevivente foi fotodetectado após passar pelo EDFA, enquanto submetido à inserção e retirada periódica de sete canais. A Fig. 3.8 mostra os resultados para quatro diferentes níveis de atenuação do FVOA. Pode-se observar a forte supressão das oscilações de relaxação nos sinais observados na Fig 3.8(a) em relação àqueles da Fig. 3.8(b), mesmo durante os transientes. Isto se deve ao fato do canal de controle estar alocado em 1528 nm (Fig 3.8(a)), posição fora da banda C, ao contrário do que está mostrado na Fig 3.8(b). O posicionamento em 1528 nm permite a

formação do canal de controle com nível de ASE suficientemente alto, no entanto, a condição de separação do canal sobrevivente mais próximo que 8 nm (os canais transmitidos devem ser alocados acima de 1536 nm), verificada em [21], deve ser atendida.

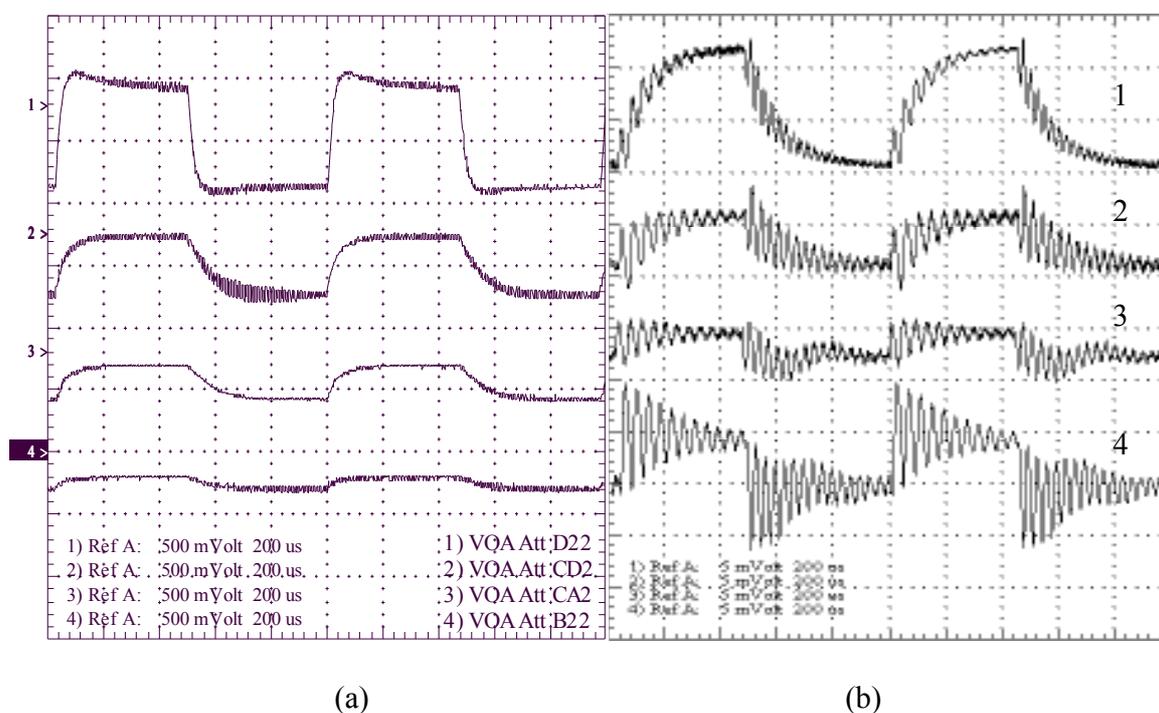


Fig. 3.8: (a) Comportamento do canal sobrevivente (com canal de controle em 1528 nm) após fotodeteção, para diferentes níveis de atenuação da realimentação óptica do AOGC-EDFA e (b) comportamento do canal sobrevivente para quatro diferentes posições do canal de controle na banda C (1 – 1535 nm, 2 – 1545 nm, 3 – 1554 nm e 4 – 1557 nm) com nível de atenuação de realimentação equivalente ao de CA2, em um AOGC-EDFA semelhante ao utilizado em [21].

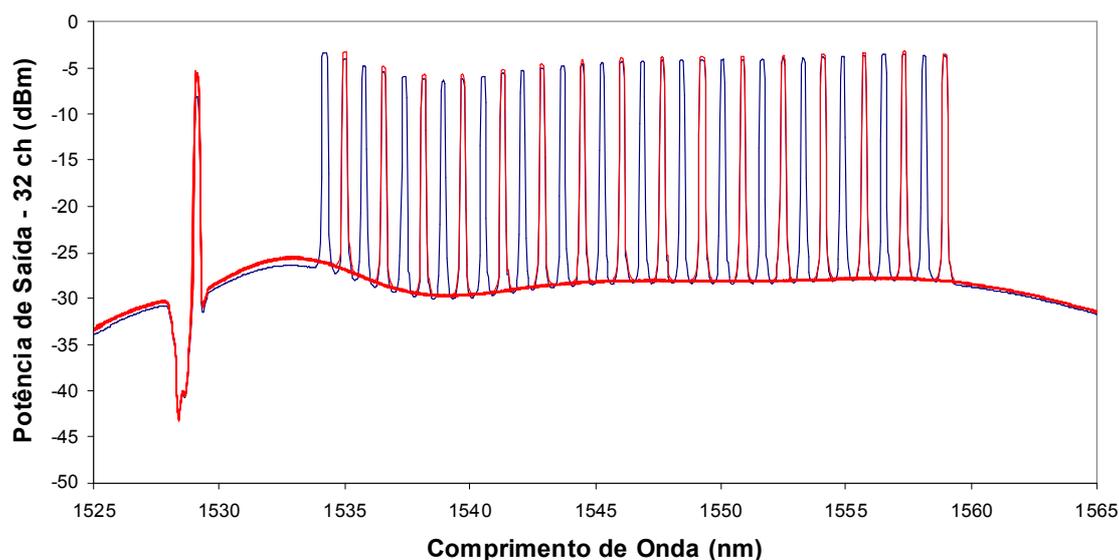
Ainda na Fig. 3.8(a), a curva 4 (B22 - praticamente sem atenuação), exibe uma variação muito pequena na potência do canal sobrevivente. No entanto, quando o nível de atenuação é aumentado, como na curva 3 (CA2), curva 2 (CD2) e curva 1 (D22), respectivamente, as variações de potência tornam-se maiores. Para ilustrar a magnitude, o nível de atenuação proporcionado pelo código em hexadecimal CA2 produz uma variação de ganho máxima de 0,5 dB para uma potência de entrada total de -2 dBm e um ganho fixo de 20 dB. É importante mencionar que, durante o projeto, buscou-se a redução da influência das ROs,

em detrimento do SHB. A razão para isto veio de observações experimentais em testes sistêmicos (medidas de BER), onde se verificou que efeitos do SHB são bem menos problemáticos que os das oscilações de relaxação, causando penalidades inferiores a uma ordem de grandeza, quando a variação de ganho é mantida em 0,5 dB. A Fig 3.8 (b) exibe uma análise realizada em [21], que pode ser utilizada para comparação com a Fig. 3.8 (a) para demonstrar a eficiência obtida na eliminação das oscilações de relaxação. Em um experimento com o mesmo número de canais, com o mesmo nível de inserção e retirada e com o canal sobrevivente em 1558 nm, o sinal na saída do EDFA, para o canal sobrevivente, foi analisado para quatro posições do canal de controle: 1535 nm (curva 1), 1545 nm (curva 2), 1554 nm (curva 3) e 1557 nm (curva 4). Na Fig. 3.8(b), foi utilizado um nível de atenuação capaz de manter uma eficiência de controle de 0,5 dB frente à inserção e retirada de sete canais para as quatro curvas, com o nível absoluto de atenuação equivalente ao fornecido pelo código CA2. A comparação entre ambas as figuras demonstra, claramente, a eficiência da utilização do comprimento de onda de 1528 nm na eliminação das oscilações de relaxação. Comparando a curva 3 da Fig. 3.8 (a) às curvas da Fig. 3.8 (b), que estão exatamente sob as mesmas condições, exceto pelo fato da alocação do canal de controle, é demonstrada a eliminação das oscilações na potência de saída e, conseqüentemente, no ganho do AOGC-EDFA. O fato das escalas de tensão apresentarem diferentes valores ocorreu porque as medidas foram obtidas em diferentes etapas do trabalho, sendo, dessa forma, o nível de potência, antes do fotodetector, ajustado para uma melhor visualização do efeito das ROs em cada experimento.

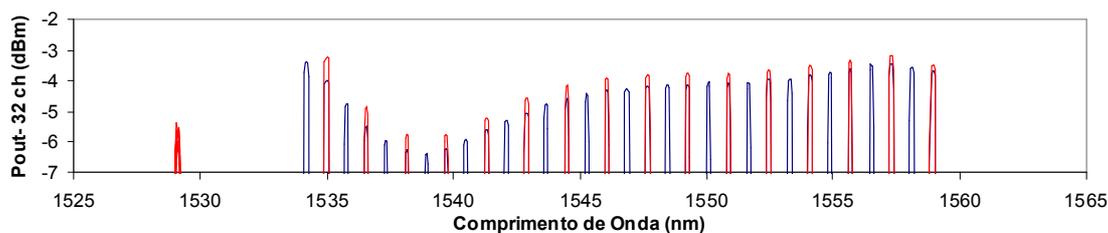
Seguindo na caracterização do AOGC-EDFA desenvolvido, além das análises referentes à ampliação da faixa dinâmica e da eliminação das oscilações de relaxação, também foi verificada a eficiência do controle de ganho, alocando canais sobreviventes ao longo de toda banda C. Utilizando um sinal de entrada composto, agora, por 32 canais na banda C (1534,25 nm até 1558,98 nm) e mantendo o arranjo experimental apresentado na Fig. 3.4, o AOGC-EDFA foi submetido à inserção e retirada de 31 canais. A potência de entrada por canal utilizada foi de -25 dBm/canal, o que corresponde a uma potência de entrada total de -10 dBm (32 canais).

Na realização deste experimento, dezesseis diferentes posições para o canal sobrevivente (1535,04 nm até 1558,98 nm, espaçados de 1,6 nm) foram utilizadas. A Fig.

3.9(a) ilustra dezessete espectros sobrepostos, um corresponde à saída do EDFA com os 32 canais e os outros aos espectros individuais de saída do EDFA para cada uma das dezesseis posições do canal sobrevivente. O canal à esquerda do espectro, no comprimento de onda de 1528 nm, é o canal de controle formado pela realimentação óptica utilizada. Para facilitar a visualização da figura, a parte superior dos espectros é mostrada em detalhe, na Fig. 3.9 (b).



(a)



(b)

Fig. 3.9 (a): Espectros sobrepostos referentes à saída do AOGC-EDFA desenvolvido: curva azul/escuro apresenta a saída referente a uma entrada composta por 32 canais e curvas vermelhas/claras apresentam os espectros para cada uma das dezesseis posições dos canais sobreviventes utilizados; **(b)** detalhamento da parte superior dos espectros de saída do AOGC-EDFA.

Como se pode verificar na Fig. 3.9, mesmo frente à inserção ou retirada de 31 canais, o nível de potência do canal sobrevivente permanece praticamente o mesmo. Isto ocorre independentemente do comprimento de onda do canal sobrevivente, o que demonstra que os resultados referentes ao controle de ganho totalmente óptico, aqui desenvolvido, podem ser generalizados, em termos da eficiência do controle de ganho, para canais sobreviventes operando na totalidade da banda C.

Na Fig. 3.10, os valores de ganhos para as dezesseis diferentes posições do canal sobrevivente são mostrados em função do comprimento de onda em duas situações, quando 32 e apenas 1 canal são acoplados à entrada do AOGC-EDFA. Também na Fig. 3.10, as variações de ganho para as dezesseis posições analisadas são apresentadas. Verifica-se uma desigualização máxima no ganho de 2 dB ao longo de toda a banda C, que pode ser removida, se necessário, com a utilização de filtros equalizadores de ganho. Quanto à variação de ganho, o máximo verificado foi de 0,65 dB em toda banda C, demonstrando ainda mais claramente a eficiência do controle de ganho desenvolvido.

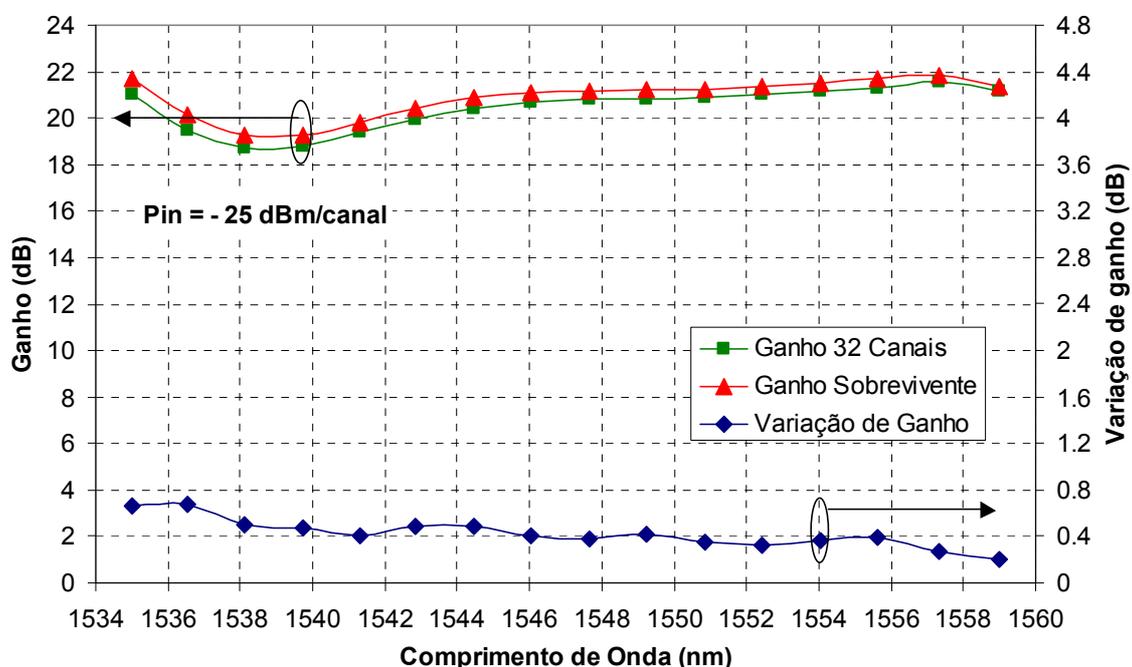


Fig. 3.10: Ganho e variação de ganho do AOGC-EDFA quando submetido a uma entrada composta por 32 canais e por 1 canal.

O projeto e a caracterização de um AOGC-EDFA, utilizando um FVOA na realimentação óptica foi apresentado. Este EDFA é capaz de operar com diferentes valores fixos de ganho por meio de ajustes no nível de atenuação do FVOA, proporcionado via *software* de gerência do amplificador. Este amplificador pode operar como pré-amplificador ou amplificador de linha para sinais de entrada de até -8 dBm, mantendo uma variação máxima de ganho de 0,5 dB com um intervalo de ajuste do ganho fixo que varia entre 16 e 23 dB. Utilizando-se menores níveis de atenuação, a operação como *booster* torna-se possível para sinais de entrada abaixo de -2 dBm, proporcionando níveis de ganho que podem variar entre 16 e 19 dB, mantendo a variação de ganho abaixo de 0,7 dB, quando da inserção ou retirada de 31 dos 32 canais. Desta forma, o AOGC-EDFA desenvolvido mostra-se uma escolha apropriada para redes ópticas metropolitanas e de longa distância, devido às suas características de ganho independente da potência de entrada, ausência de oscilações de relaxação e supressão de transientes.

3.2 Desenvolvimento do Controle Automático Eletrônico de Ganho

Nesta seção são apresentados o projeto e a caracterização de um EDFA com controle eletrônico de ganho. Diferentemente do controle totalmente óptico apresentado anteriormente, onde foram propostas soluções originais para a otimização do método de controle, o objetivo a ser alcançado nesta etapa é o da implementação de diferentes tipos de controle eletrônico digital, analisando-os por meio de caracterizações espectrais e temporais, para definição de uma arquitetura que seja capaz de proporcionar os requisitos desejados. A faixa dinâmica e o tempo de resposta complementares ao controle óptico anteriormente apresentado, são requisitos essenciais no caminho para a obtenção do controle híbrido proposto.

3.2.1 Caracterizações Espectral e Temporal do EDFA com AGC Eletrônico

O desenvolvimento de um EDFA com controle automático de ganho utilizando uma técnica de controle eletrônico, que se baseia em um controle digital das potências dos lasers de bombeio em resposta às variações de potência de entrada do EDFA, é aqui apresentado.

O desempenho do EDFA com controle de ganho eletrônico, frente a situações encontradas em uma rede óptica com roteamento por comprimento de onda, é analisado através de experimentos que simulam a inserção e retirada de canais na entrada do amplificador. Juntamente com isto, situações sistêmicas são investigadas por meio da taxa de erro de bits, onde a influência da posição do canal sobrevivente ao longo da banda C e as características da resposta temporal do amplificador são também verificadas.

Em EDFAs com controle de ganho eletrônico, o ganho do amplificador é controlado através da atuação na potência de um ou mais lasers de bombeio. Através de um circuito de controle que monitora as potências de entrada e de saída do EDFA, o ganho é obtido e, caso haja uma diferença em relação ao ganho desejado, as potências dos lasers de bombeio são ajustadas de forma a manter o ganho do EDFA constante. A variação residual de ganho do amplificador é determinada, principalmente, por três fatores: resposta do ganho do amplificador às variações no sinal de entrada, antes do ajuste do bombeio; resposta da eletrônica de controle; e velocidade da mudança do ganho do amplificador devido à atuação no bombeio. Destes três fatores, o tempo de resposta do circuito eletrônico é o único independente dos processos físicos ocorridos na fibra dopada com érbio. Os outros dois fatores variam em função do ganho, da potência e do comprimento de onda do bombeio e do nível de potência e da alocação dos canais [8].

A Fig. 3.11 ilustra o diagrama esquemático do EDFA com eletrônico construído.

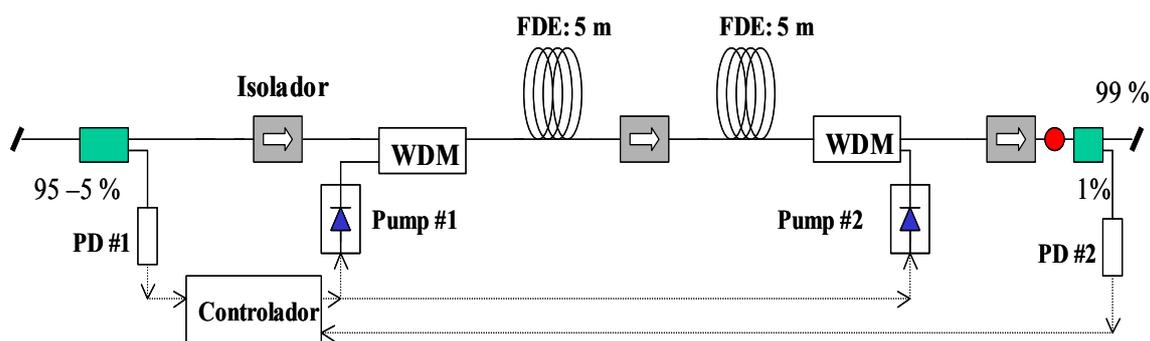


Fig. 3.11: Diagrama esquemático do EDFA com controle eletrônico construído.

O EDFA com controle automático eletrônico de ganho atua de maneira a controlar digitalmente as potências dos lasers de bombeio por meio de um microcontrolador. O

EDFA possui uma potência de saída de +17 dBm, com dois estágios de amplificação, onde um foi bombeado na direção co-propagante (pump#1) e o outro contra-propagante (pump#2), sendo otimizado para operar como amplificador de potência (*booster*) permitindo até +5 dBm de sinal de entrada.

Devido ao fato do controle do ganho ser realizado pelo ajuste dos lasers de bombeio, não é possível a correção de ganho para variações na potência de entrada superiores a 11 dB, que representa uma variação máxima de 12 canais. Isto ocorre porque os lasers de bombeio possuem um máximo e um mínimo bem definidos de potência de operação e a implementação do *firmware* garante a operação destes apenas dentro destes limites. Portanto, variações de ganho superiores à capacidade de correção dos bombeios não serão completamente corrigidas, e sim apenas minimizadas até o ponto de máximo ou mínimo de operação do bombeio. Dessa maneira, a operação do EDFA com controle eletrônico de ganho EAGC-EDFA (*electronic automatic gain controlled erbim doped fiber amplifier*) foi subdividida em regiões, denominadas “modos de operação”, sendo a operação do EDFA para duas delas, $G = 12$ dB e $G = 20$ dB, apresentadas. Cada modo de operação é capaz de garantir o ganho G , por canal, durante toda a extensão de sua região de operação, que é dada em termos da potência total de entrada do amplificador. Para o modo $G = 12$ dB, a região de operação do EDFA está entre -6 e +5 dBm, ao passo que, para o modo $G = 20$ dB, está entre -16 e -5 dBm.

As Fig. 3.12 a 3.14 demonstram a operação do EAGC-EDFA para os modos $G = 12$ dB e $G = 20$ dB em toda extensão da banda C, utilizando um laser sintonizável, frente a uma variação de 10 dB na potência do sinal de entrada.

Na Fig. 3.12 pode-se verificar que, independentemente do nível de potência inicial de entrada, os ganhos do EDFA se mantêm aproximadamente em 20 dB ou 12 dB, com uma variação máxima de 0,6 dB, frente a uma variação de 10 dB na potência de entrada. Na Fig. 3.13, apresenta-se o comportamento da figura de ruído (*Noise Figure*) do EDFA, onde são verificados baixos níveis de figura de ruído para $G = 20$ dB e maiores níveis para $G = 12$ dB, como já esperado, devido aos maiores níveis de potência de entrada aos quais os canais no modo $G = 12$ dB são submetidos.

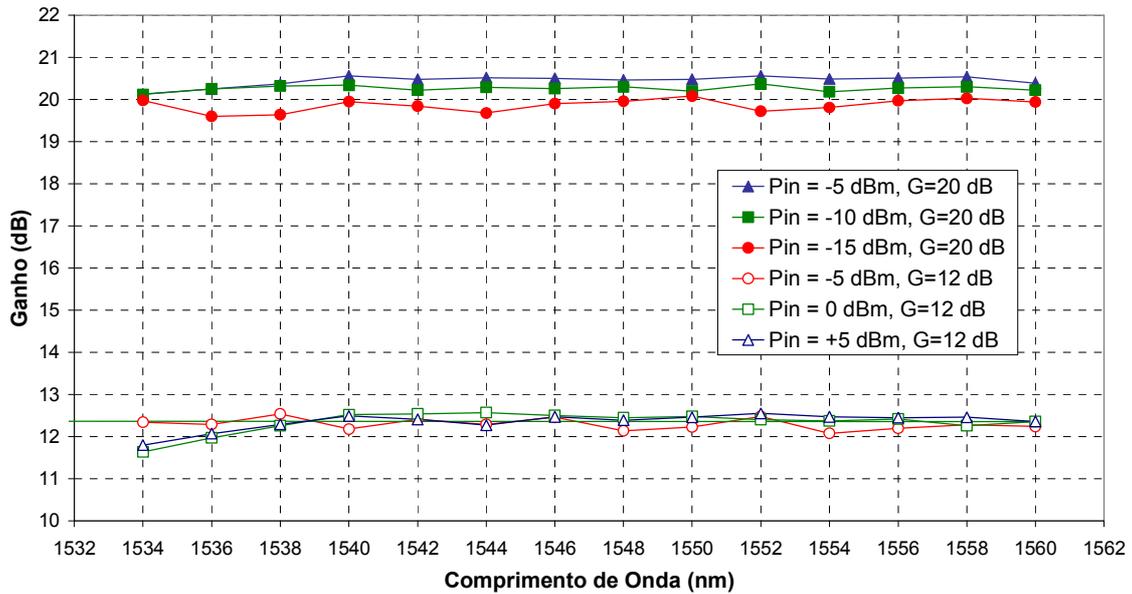


Fig. 3.12: Ganho versus comprimento de onda do EAGC-EDFA nos modos de operação $G = 12$ e $G = 20$ dB, para uma variação de potência de entrada de 10 dB em cada respectivo modo de operação.

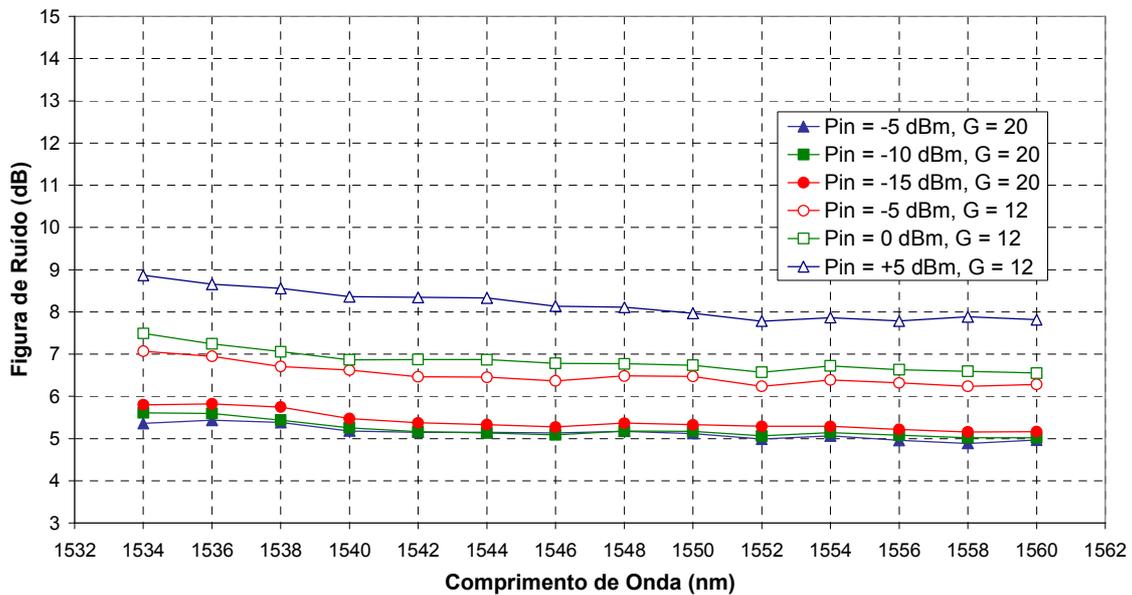


Fig. 3.13: Figura de ruído versus comprimento de onda do EAGC-EDFA nos modos de operação $G = 12$ e $G = 20$ dB, para uma variação de potência de entrada de 10 dB em cada respectivo modo de operação.

Na Fig. 3.14, o comportamento da potência de saída em cada um dos modos é apresentado. Analisando-se a figura, pode-se perceber a atuação dos lasers de bombeio frente às variações da potência de entrada. Ou seja, no modo $G = 20$ dB, para uma potência total de entrada de -5 dBm, o EDFA exibe aproximadamente $+15$ dBm na saída; neste mesmo modo, para uma potência de -15 dBm, o EDFA exibe uma potência de saída de, aproximadamente, $+5$ dBm, mostrando a atuação do controle nos bombeios, de modo a manter o ganho do EDFA constante.

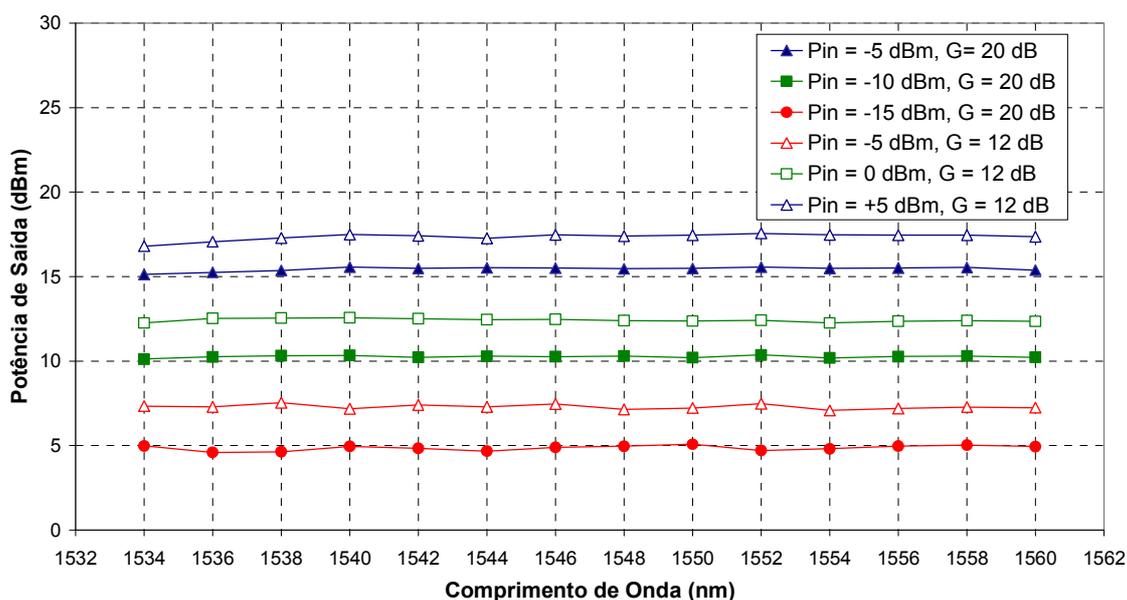


Fig. 3.14: Potência de saída versus comprimento de onda do EAGC-EDFA nos modos de operação $G = 12$ e $G = 20$ dB, para uma variação de potência de entrada de 10 dB em cada respectivo modo de operação.

3.2.1.1 Análise do Canal Sobrevivente

Como citado anteriormente, a potência na entrada do EDFA varia de maneira dinâmica e aleatória em função da inserção e ou da retirada de canais nos nós de rede. Com o intuito de analisar a influência desta adição ou remoção dinâmica de canais, utilizou-se o arranjo experimental apresentado na Fig. 3.15.

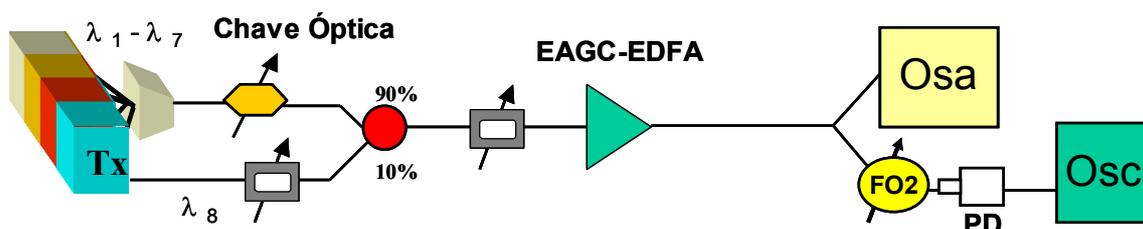


Fig. 3.15: Arranjo experimental utilizado nas análises de desempenho do EAGC-EDFA projetado.

O EAGC-EDFA foi submetido, inicialmente, à retirada de 7 canais e analisou-se a resposta do canal sobrevivente quando este é sintonizado ao longo da banda C, comparando-a, para cada comprimento de onda, com o caso onde todos os canais estavam sendo transmitidos. Foram utilizados, inicialmente, oito canais modulados a 10 Gb/s, igualmente espaçados (grade ITU) ao longo da banda C, sete deles sendo inseridos e retirados através de uma chave óptica com tempo de resposta de 180 ns. O canal sobrevivente (que não passa pela chave) é sobreposto aos demais canais após um multiplexador, sendo todos adaptados à entrada do EAGC-EDFA.

Para a análise do canal sobrevivente, através do analisador de espectro óptico (AEO), foram coletados os espectros do sinal na saída do EDFA, com todos os canais, e, depois, apenas com o canal sobrevivente. No intuito de analisar a influência da posição do canal sobrevivente, o mesmo é sintonizado em cada uma das oito posições dos canais transmitidos, sendo realizada a remoção dos demais canais para cada posição do canal sobrevivente. Nas Fig. 3.16 e 3.18, os espectros do sinal na saída do EAGC-EDFA, para $G = 12$ dB e $G = 20$ dB, são apresentados, respectivamente. Em cada uma destas figuras, encontram-se nove espectros de saída do EDFA, um referente à saída do EDFA com todos os oito canais transmitidos e outros oito referentes às saídas do EDFA apenas com a presença do canal sobrevivente em cada uma das oito posições dos canais transmitidos. Como se pode verificar, em ambos os casos, o amplificador, com controle de ganho, minimiza de forma eficiente a variação de ganho induzida pela retirada de sete dos oito canais que, sem controle, seria de 9 dB. Nas Fig. 3.17 e 3.19, as variações de ganho, assim como o comportamento do perfil de ganho do EDFA, são analisadas.

Como se pode verificar na Fig. 3.16 (com detalhe para a parte superior do espectro) e mais claramente na Fig. 3.17, como esperado, no modo de operação $G = 12$ dB e com todos os canais presentes (potência de entrada total de +5 dBm, ou seja, potência de entrada por canal de -4dBm), a desqualificação de ganho na banda C (*tilt*) é aproximadamente 4 dB, nível este razoável, quando comparado a amplificadores comerciais que apresentam uma desqualificação mais acentuada para o mesmo nível de potência de entrada.

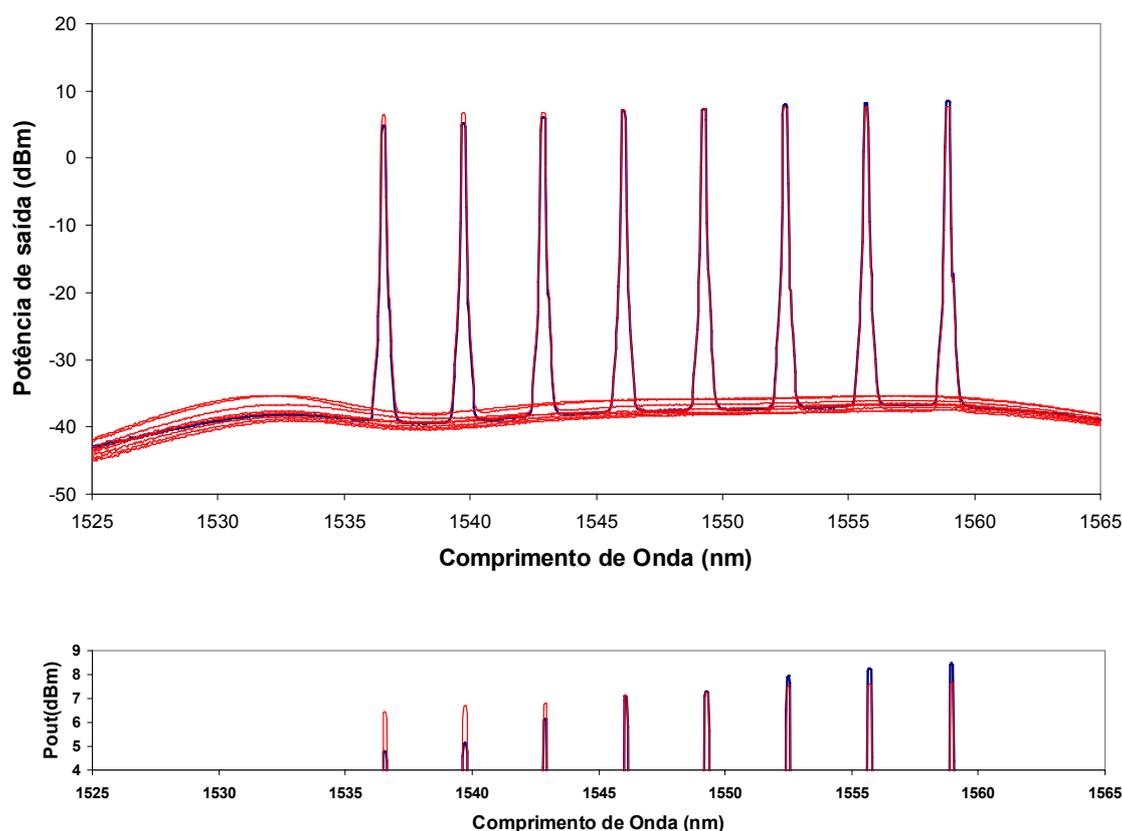


Fig. 3.16: Espectros de saída do EAGC-EDFA no modo $G = 12$ dB ($P_{in} = -4$ dBm/canal).

Pode-se verificar na Fig. 3.17 que, para comprimentos de 1542 nm a 1559 nm, o ganho do canal sobrevivente apresenta uma variação máxima de 1 dB em relação ao ganho desejado ($G = 12$ dB), com *tilt* também inferior a quando todos os canais estão presentes na banda C. Na Fig. 3.17 verifica-se que os comprimentos de onda abaixo de 1542 nm exibem variação de ganho maior que 1 dB. Este tipo de variação ocorre devido ao alto *tilt* a que o EDFA é submetido para altos níveis de potência de entrada. Como neste caso, comparou-se

o ganho para o EDFA em níveis de saturação bem distintos (9 dB de diferença entre a entrada composta por 1 canal e por 8 canais); esta variação torna-se maior devido à diferença do *tilt* em ambas situações. Em um EDFA eletrônico, operando como *booster*, uma solução comum para a redução deste efeito é a utilização de um filtro equalizador de banda. No entanto, neste trabalho, que tem como intuito a obtenção de uma nova arquitetura híbrida, serão procuradas outras formas de diminuição do *tilt*, principalmente durante a fase de projeto do comprimento da fibra dopada, pois a utilização de filtros equalizadores de ganho inserem uma alta perda no comprimento de onda de 1528 nm, reduzindo, assim, a eficiência do controle totalmente óptico (1528 nm foi selecionado para atuação como canal de controle na técnica totalmente óptica).

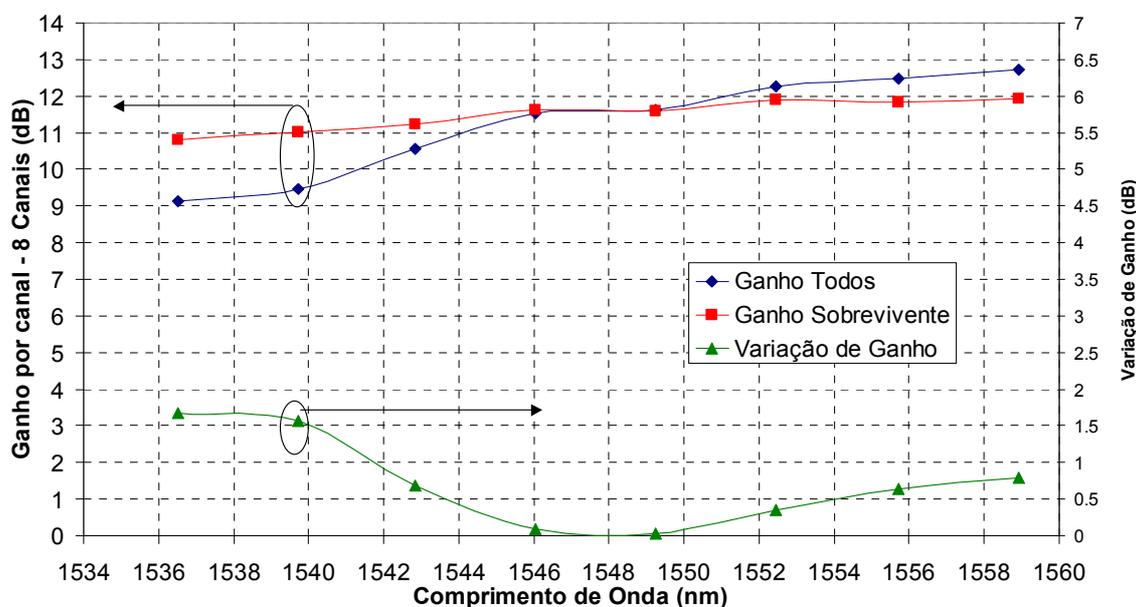


Fig. 3.17: Ganho e variação de ganho para o EAGC-EDFA ($G = 12$ dB).

Nas Fig. 3.18 e 3.19, o espectro de saída do EAGC-EDFA, o ganho e a variação de ganho para o modo de operação $G = 20$ dB são ilustrados, respectivamente. Como se pode verificar, ao longo da banda C há uma grande concordância entre o ganho dos canais quando todos ou apenas um é acoplado à entrada do EDFA. Na Fig. 3.18 um maior detalhamento é dado à parte superior do espectro, mostrando o nível de potência por canal em ambas as situações analisadas. Como resultado disto, verifica-se uma variação de ganho

menor que 1 dB ao longo da banda, frente à variação de 9 dB à qual o nível de potência de entrada do EDFA é submetido. Neste modo de operação, foram utilizados oito canais com potência de -14 dBm, resultando numa potência de entrada total de -5 dBm.

Pode-se verificar que, independentemente da posição do canal sobrevivente, o EAGC-EDFA minimiza, de forma significativa, a variação de ganho do EDFA. No entanto, para altas potências de entrada, prefere-se que a alocação dos canais transmitidos pela banda C seja feita para comprimentos de onda superiores a 1540 nm. Isto pois, quanto maior a desigualização de ganho do EDFA, maiores serão as dificuldades para a eficiente correção do ganho e maiores serão as necessidades da utilização de equalizadores de ganho na saída do nó da rede óptica.

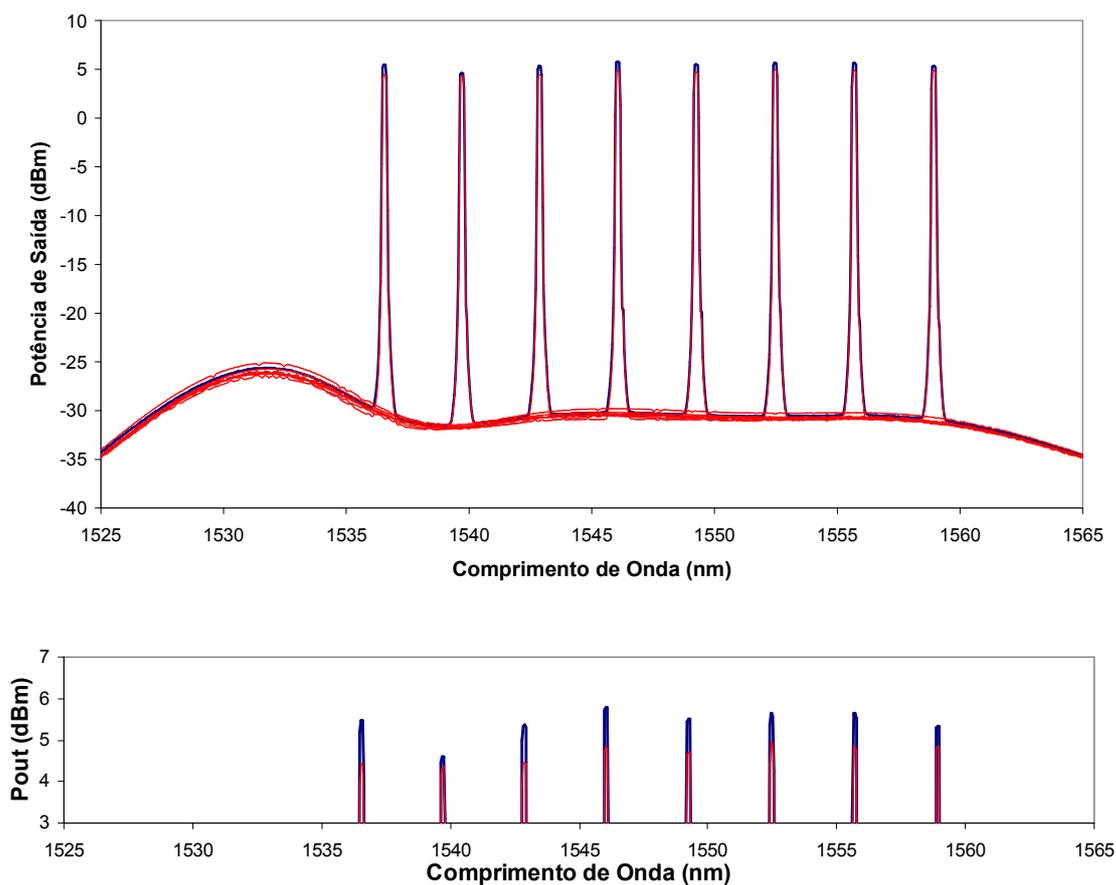


Fig. 3.18: Espectros de saída do EAGC-EDFA no modo $G = 20$ dB ($P_{in} = -14$ dBm/canal).

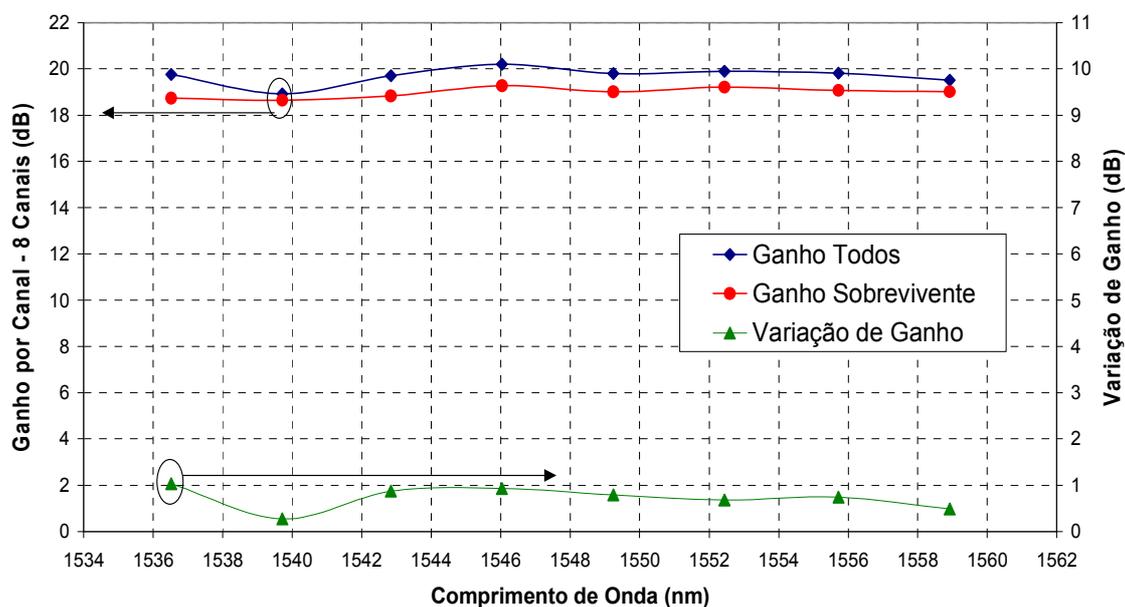


Fig. 3.19: Ganho e variação de ganho para o EAGC-EDFA ($G = 20$ dB).

As Fig. 3.20 e 3.21 apresentam os resultados quando dezesseis canais com uma potência de entrada de -18 dBm/canal são utilizados seguindo os mesmos procedimentos anteriores (Fig. 3.18 e 3.19). Pode-se verificar a boa eficiência do controle de ganho utilizado, quando 16 canais são transmitidos. Verifica-se também que há uma maior discrepância entre os valores do ganho antes e após a remoção dos 15 canais, principalmente em torno da região de 1530 nm. Este fato pode ser explicado devido ao aumento do nível de sinal de entrada ocorrido pelo acréscimo de oito canais (em comparação com o caso anterior). Isto faz com que o nível de ASE seja reduzido, configurando, assim, um aumento no erro do cálculo do ganho realizado, já que a base para este cálculo é as potências totais de entrada e saída do EDFA. No cálculo do ganho do EDFA, o ganho é obtido através da subtração (em unidades logarítmicas) entre a potência total de saída e a potência total de entrada. Dessa maneira, como o nível de ASE do EDFA depende do nível do sinal de entrada, quanto maior a remoção ou adição de canais, maior o erro no cálculo do ganho para as diferentes situações de entrada. Este comportamento acontece devido à diferença de ASE entre as situações, que não será levada em conta pelo fato do fotodetector medir apenas o nível de potência total do sinal. Este erro no cálculo do ganho é uma limitação intrínseca da técnica de controle

eletrônica, fazendo com que quanto maior o número de canais, maior a possibilidade de erro no cálculo do ganho do EDFA. Este erro pode ser minimizado através de um esquema de compensação, realizado via *firmware* de controle dos lasers, porém não pode ser eliminado.

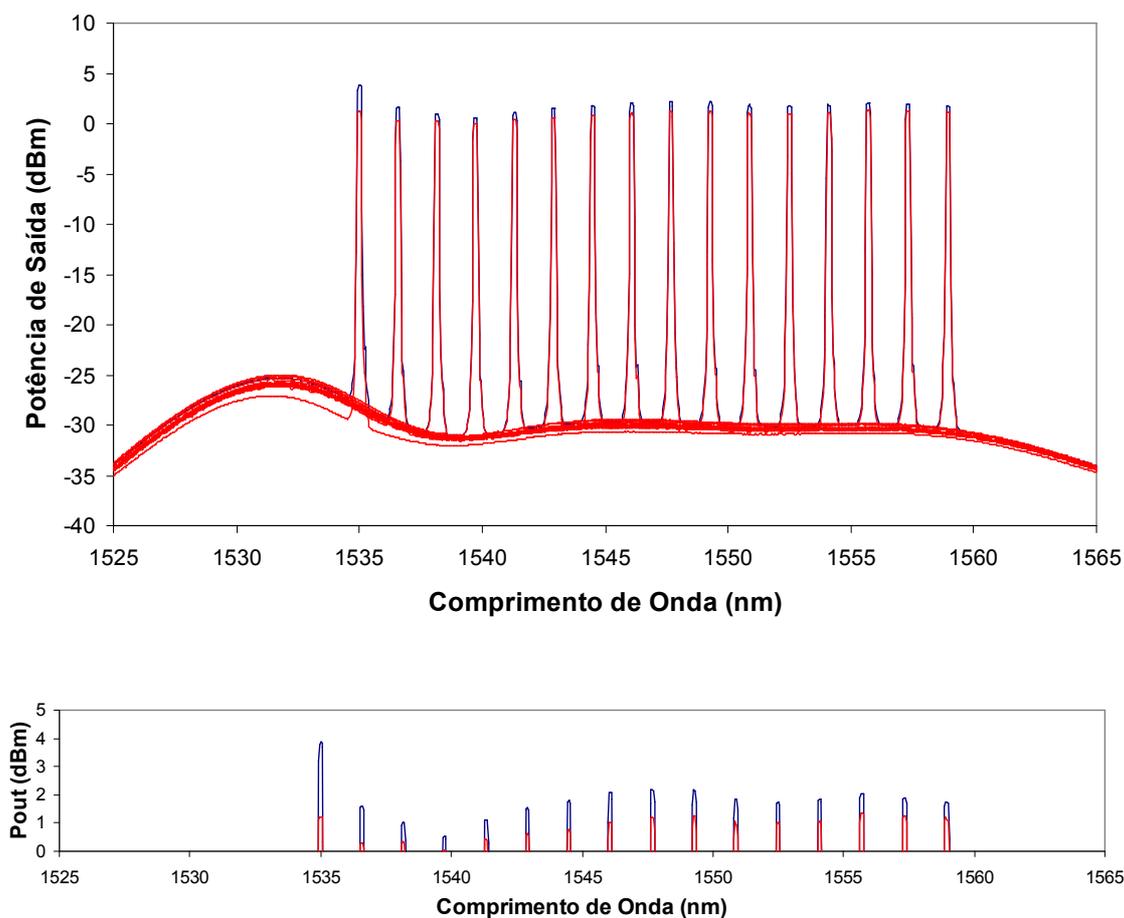


Fig. 3.20: Espectros de saída do EAGC-EDFA no modo $G = 20$ dB ($P_{in} = -18$ dBm/canal, 16 canais).

3.2.1.2 Tempo de Resposta e Análise Sistêmica (BER) do EAGC-EDFA

Utilizando-se o arranjo experimental, ilustrado pelo diagrama da Fig. 3.15, a resposta temporal do EAGC-EDFA foi analisada. Para tanto, o mesmo mecanismo de adição e remoção de sete dos oito canais foi utilizado; no entanto, foram feitas duas análises distintas para o sinal de saída do amplificador. Primeiro, a saída do EDFA foi acoplada a um fotodetector para análise da variação da potência de saída total do EDFA em resposta à

variação da potência de entrada, Fig. 3.22. Por fim, a saída do EDFA foi filtrada no comprimento de onda do canal sobrevivente escolhido, 1558,98 nm, sendo, então, acoplada ao fotodetector para uma análise semelhante, Fig. 3.23.

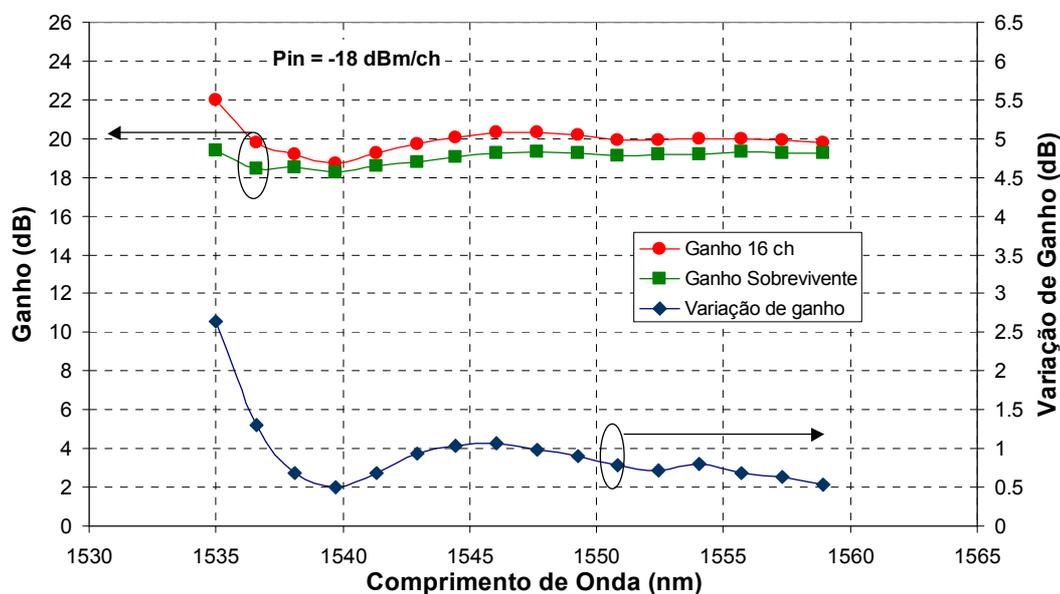


Fig. 3.21: Ganho e variação de ganho para o EAGC-EDFA ($G = 20$ dB, 16 canais).

Como citado, a variação de ganho em um EDFA com controle automático eletrônico de ganho depende de processos físicos (tempo de decaimento e nível de inversão de população) da fibra dopada com érbio, sendo apenas o tempo de resposta do circuito eletrônico independente destes processos físicos [8]. Dessa maneira, no EDFA com controle eletrônico de ganho projetado, um grande esforço foi realizado na otimização do tempo de resposta do *firmware* de controle. Foi obtido um tempo de resposta, para o circuito eletrônico, de aproximadamente 2 ms, sendo que a este valor deve ser somado o tempo necessário para a estabilização do ganho, devido aos processos físicos da fibra dopada.

Para as análises seguintes, o EAGC-EDFA foi ajustado para operar com $G = 20$ dB e níveis de potência de entrada variando entre -14 dBm (1 canal) e -5 dBm (oito canais). Nas Fig. 3.22 (a) e (b), verifica-se a variação da potência de saída frente às variações na potência de entrada.

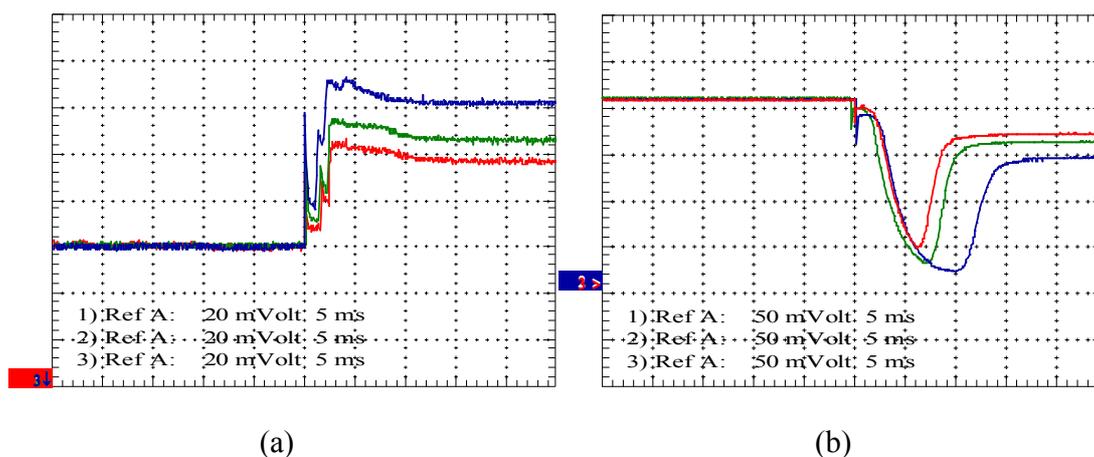


Fig. 3.22: Resposta temporal da potência total de saída do EDFA com controle de ganho eletrônico, ($G = 20$ dB) para: (a) acréscimos de potência de entrada de 10 dB (acima), 7 dB (meio) e 3 dB (abaixo) e (b) decréscimos de potência de entrada de 10 dB (acima), 7 dB (meio) e 3 dB (abaixo).

Como se pode observar na Fig. 3.22 (a) (inserção), quanto maior a variação na potência de entrada, maior o ajuste realizado na potência de saída, e, como consequência, maior o nível de potência de bombeio. Isto ocorre pois, com o aumento da potência de entrada, o ganho nos canais diminui e, dessa forma, o controle atua aumentando a potência do bombeio, para manter o ganho desejado constante. Na Fig. 3.22 (b) (remoção), é verificado um comportamento contrário ao caso anterior, ou seja, neste caso, quanto maior o decréscimo na potência de entrada, maior o decréscimo na potência de bombeio.

No que diz respeito ao tempo de resposta, verifica-se na Fig. 3.22 (a), que, em 10 ms, o EDFA estabiliza a potência de saída no nível adequado para a manutenção do ganho, independentemente da magnitude da variação. Já na Fig. 3.22 (b), verifica-se que o tempo de resposta depende da magnitude da variação de potência de entrada, possuindo um tempo de resposta de, aproximadamente, 15 ms para uma variação de 10 dB e de 8 ms para uma variação de 3 dB.

É provável que este tempo de resposta mais lento e variável, observado na retirada de canais, se deve ao fato de que, quando o nível de bombeio do EDFA é diminuído, o tempo levado para a despopulação do nível meta-estável depende da amplitude da diminuição do bombeio. Portanto, variações menores levam a tempos menores. Outra consideração é que quando ocorre a diminuição do bombeio, os portadores que já estavam no nível meta-

estável apresentam um tempo de queda maior (tempo de relaxação varia de 1 a 10 ms) que o tempo de inversão de população dos portadores, que ocorre quando do aumento do nível de bombeio (neste caso o processo é praticamente instantâneo).

Na Fig. 3.23, apenas o canal sobrevivente é analisado. Desta maneira, como se pode observar nas Fig. 3.23 (a) e (b), o nível de potência do canal sobrevivente é praticamente o mesmo antes e após o transiente de correção de ganho do EDFA, demonstrando, assim, a eficácia do método de controle utilizado. Com relação ao tempo de resposta, como esperado, nada muda em comparação ao obtido na Fig. 3.22. Dessa maneira, para uma variação de 10 dB (retirada de canais), um tempo de resposta máximo de 15 ms é verificado, enquanto que, na adição de canais, 2 ms são necessários para manter a variação do ganho inferior a 0,5 dB.

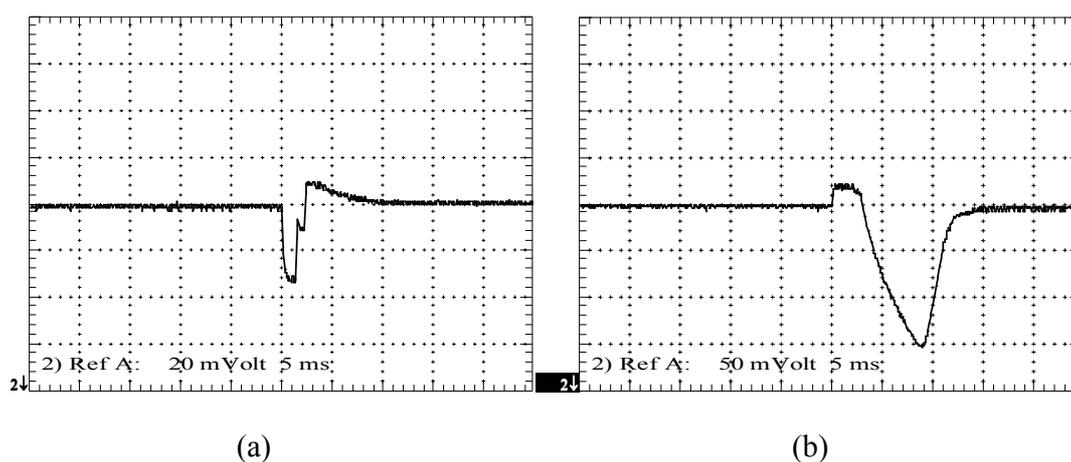


Fig. 3.23: Resposta temporal do canal sobrevivente na saída do EDFA com controle de ganho eletrônico, ($G = 20$ dB) para: (a) acréscimo de potência de entrada de 10 dB e (b) decréscimo de potência de entrada de 10 dB.

Na realidade, o ganho do canal sobrevivente, após a correção de ganho, pode variar em até 1 dB (vide Fig. 3.17 e 3.19). As Fig. 3.24 e 3.25 ilustram o impacto desta variação tanto para a adição, Fig. 3.24, quanto para a remoção, Fig. 3.25, de sete canais.

Os dados apresentados nas Fig. 3.24 e 3.25, foram coletados de modo que, inicialmente, a taxa de erro fosse mantida em 10^{-9} . Após seis medidas nesta taxa, sete canais foram inseridos e retirados, verificando-se o impacto sistêmico deste procedimento. Uma variação

máxima de uma ordem de grandeza para mais (inserção) e para menos (retirada) é verificada para este sistema, que utiliza oito lasers modulados a 10 Gb/s. Desta maneira, pôde-se verificar que o EAGC-EDFA praticamente anula, em termos de taxa de erros, os efeitos da inserção e retirada de canais, sendo, portanto, um dispositivo adequado para utilização em redes ópticas WDM.

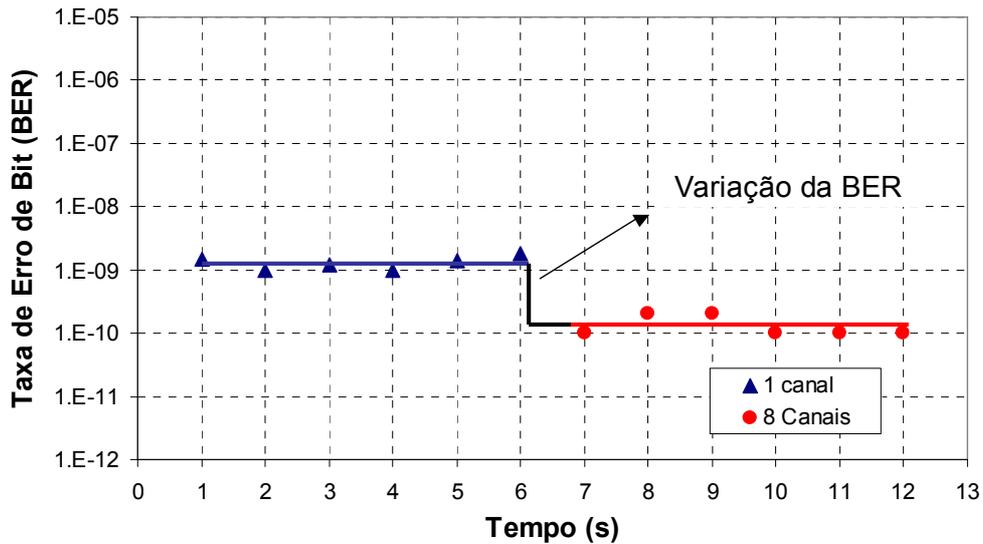


Fig.3.24: Variação da taxa de erro de bits com a adição de 7 canais.

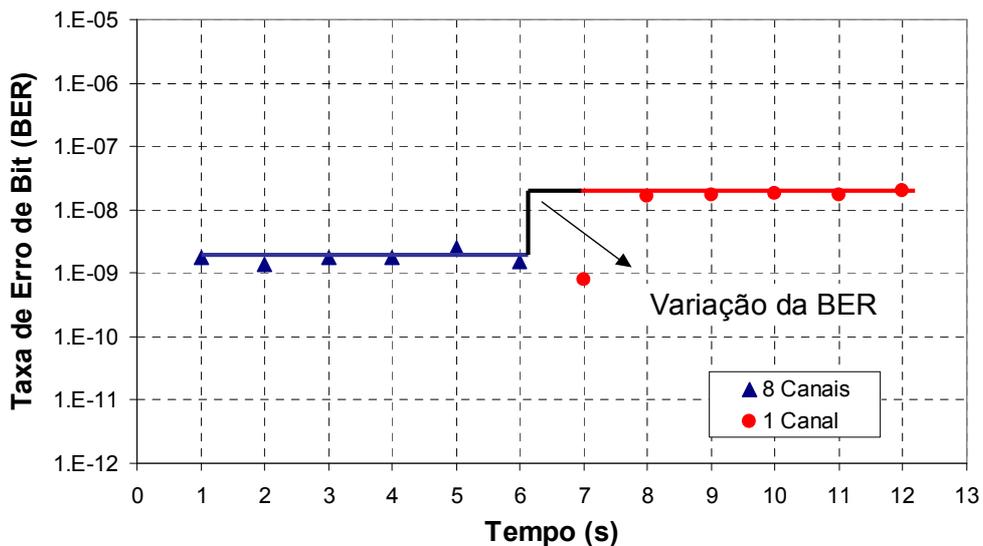


Fig. 3.25: Variação da taxa de erro de bits com a retirada de 7 canais.

As medidas de desempenho de um EDFA, desenvolvido com controle automático eletrônico de ganho, foram apresentadas. Verificou-se que o EDFA apresenta um controle de ganho eficiente (variação de ganho inferior a 1 dB) ao longo da banda C, frente às variações de potência de entrada de 9 a 12 dB. O valor de ganho proporcionado pelo EDFA foi ajustado em dois valores distintos, onde, para níveis de potência de entrada compreendidos entre +5 e -5 dBm, utiliza-se um ganho fixo de 12 dB, e para valores de potência de entradas entre -14 dBm e -5 dBm, utiliza-se um ganho fixo de 20 dB. Foi analisado o impacto da alocação do canal sobrevivente ao longo da banda C, onde observou-se que, independentemente da posição do canal sobrevivente, o EDFA consegue proporcionar variações no ganho inferiores a 1 dB com tempo de resposta máximo de 15 ms. Por fim, verificou-se que, utilizando este EDFA, a BER exibe uma variação máxima de uma ordem de grandeza frente à inserção ou à retirada de sete dos oito canais na entrada do amplificador. Por estes fatores, o EAGC-EDFA projetado apresenta potencial para aplicação em redes ópticas reconfiguráveis, podendo ser utilizado, inclusive, como amplificador de potência (*booster*).

Quanto às necessidades exigidas para o controle híbrido, este EDFA as atendeu parcialmente. Em termos de faixa dinâmica, mesmo ela sendo restrita, obteve-se o resultado esperado para a cobertura da região de operação como *booster*. Caso seja possível acoplar esta faixa dinâmica àquela do AOGC-EDFA, ambas as técnicas podendo operar em conjunto no EDFA, proporcionando uma faixa dinâmica de entrada de -45 dBm até +5 dBm. No entanto, o tempo de resposta máximo de 15 ms ficou aquém do esperado. Porém, em conjunto com a operação do controle óptico, espera-se, com a utilização do canal de controle diminuir consideravelmente este tempo.

3.3 Controle Automático Híbrido de Ganho

Como mencionado em diversas ocasiões anteriores, o desenvolvimento de um EDFA com controle de ganho híbrido, capaz de prover faixa dinâmica de controle para qualquer nível de potência de entrada, é o principal objetivo deste trabalho. Procurou-se, assim, generalizar a utilização dos métodos de controle, obtendo uma única estratégia que habilite o EDFA a operar em uma rede WDM executando funções de pré-amplificador, amplificador de linha ou amplificador de potência. Para alcançar este objetivo, o controle

de ganho totalmente óptico otimizado e anteriormente apresentado é utilizado em conjunto com um controle eletrônico com alimentação adiante, similar ao já apresentado. Para este último, o tempo máximo de resposta eletrônica ficou inferior a 4 ms, sendo o elemento de controle apenas um laser de bombeio com potência de 360 mW (ao invés dos dois bombeios de 120 mW utilizados na seção anterior). Diferentemente das técnicas de controle híbridas apresentadas na literatura, o intuito não é o de utilizar um controle eletrônico com a resposta mais rápida possível, para assim diminuir o impacto das oscilações de relaxação; neste trabalho, a minimização das oscilações de relaxação foi obtida através da otimização do controle automático de ganho totalmente óptico (alocação do canal de controle em 1528 nm). Dessa maneira, o que se busca é utilizar, de forma serial, ambos os métodos de controle em um mesmo EDFA, proporcionando o acoplamento de suas faixas dinâmicas, e, dessa forma, obter um EDFA capaz de operar com controle de ganho eficiente para qualquer nível de potência de entrada.

O desenvolvimento do controle híbrido de ganho é composto por fases pré-definidas, onde, até este ponto, duas delas já foram descritas:

i) A otimização do controle de ganho totalmente óptico, obtendo-se a minimização das oscilações de relaxação e um sensível aumento na faixa dinâmica, causada devido à utilização do FVOA na realimentação óptica.

ii) O projeto de um esquema que emprega a técnica de controle eletrônica, capaz de prover o controle de ganho para potências de entrada imediatamente acima do limiar obtido no controle totalmente óptico.

Para obtenção do controle híbrido de ganho, capaz de generalizar a operação dos EDFA em redes ópticas, as fases de definição do esquema óptico-eletrônico de controle, do desenvolvimento do *firmware* de controle e da caracterização do EDFA com controle híbrido de ganho, além das já apresentadas, representam papel fundamental no desenvolvimento da técnica híbrida aqui proposta. A seguir, o esquema de controle proposto e a caracterização do EDFA com controle híbrido serão detalhadamente apresentados. Quanto ao *firmware* de controle, no decorrer do trabalho suas funcionalidades serão descritas de maneira a ajudar na compreensão da nova técnica de controle de ganho proposta.

3.3.1 Esquema de Controle Híbrido

Na procura por um esquema de controle capaz de acoplar o controle totalmente óptico e o controle eletrônico, diversas tentativas foram feitas. O esquema de controle que melhor se adaptou às necessidades exigidas pelas técnicas a serem acopladas e à interação que se faz necessária entre elas, é apresentado na Fig. 3.26.

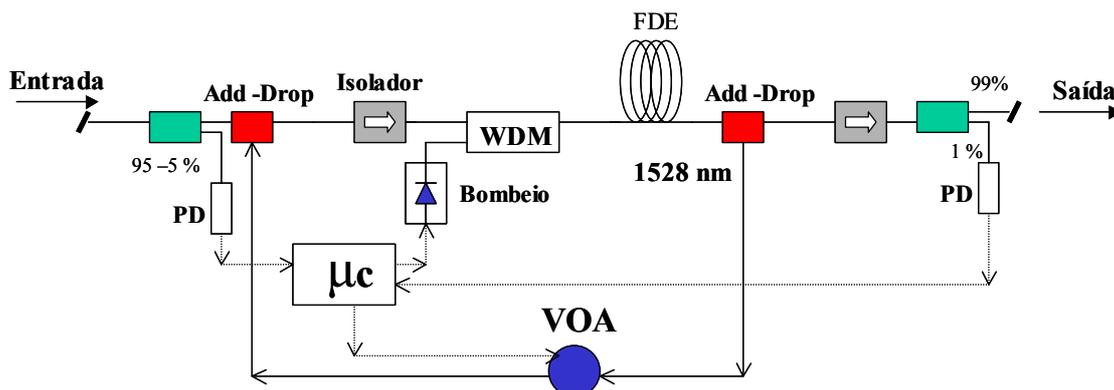


Fig. 3.26: Esquema óptico do EDFA com controle híbrido de ganho implementado.

O sinal de entrada é, inicialmente, dividido por um acoplador 95-5% em dois caminhos: a porta de 5% é conectada a um fotodetector, que converte o sinal óptico na corrente elétrica enviada ao microcontrolador para o cálculo do valor do sinal de entrada; a porta de 95% é conectada a um dos dois *add/drop* centrados no comprimento de onda de 1528 nm, o qual faz parte do laço de realimentação óptica responsável pela formação do canal de controle. O *add/drop* de entrada possui outras duas portas adicionais, uma exclusiva para a entrada do sinal de realimentação no comprimento de onda de 1528 nm (0,5 nm de largura de banda), e a outra, seguida por um isolador, que permite que o sinal de entrada e o sinal de controle se dirijam a um acoplador WDM. O isolador tem a função de evitar que o sinal retroespalhado que advêm da fibra dopada com érbio, assim como possíveis reflexões nas emendas, causem instabilidade ao sinal de entrada do EDFA. Após o acoplador WDM, que é responsável pela união dos sinais de bombeio e de entrada, encontra-se um segmento de 5 metros de fibra dopada com érbio (OFS-R37103). Após a fibra dopada, o sinal amplificado é conectado ao segundo *add/drop* (de saída), responsável pela amostragem do sinal utilizado na realimentação óptica. Em outras palavras, o *add/drop* de saída filtra o ruído

ASE no comprimento de onda de 1528 nm e o envia por uma de suas portas para o circuito óptico de realimentação. A porta restante do *add/drop* é conectada ao isolador de saída. Entre os dois *add/drop*, no laço de realimentação, um atenuador óptico variável (VOA) é utilizado para o controle da potência que circula na malha de realimentação, ou seja, para se ajustar a eficiência do canal de controle. Após o isolador de saída, o sinal amplificado passa por um acoplador 99-1%, onde a porta de 1% é conectada a um fotodetector que, de maneira idêntica ao circuito de detecção da entrada, monitora eletricamente o sinal de saída. Quanto à porta de 99%, esta representa a saída do EDFA.

Até este ponto, descreveu-se o caminho do sinal de entrada e algumas funcionalidades dos componentes utilizados. Porém, nenhuma menção foi feita sobre a maneira como o controle de ganho óptico e eletrônico atuam na realização do controle de ganho proposto. O controle totalmente óptico é formado pela realimentação óptica apresentada. No entanto, o controle de ganho se dá a partir do laser (canal) de controle formado no comprimento de onda de 1528 nm, que compete pelo ganho do EDFA com os canais transmitidos e absorve majoritariamente as variações de entrada, devido ao seu alto nível de potência em relação aos demais canais. Já para o controle eletrônico, os circuitos de fotodetecção de entrada e de saída fornecem informação ao microcontrolador para os cálculos das potências de entrada e saída, e, conseqüentemente, do ganho do EDFA. A partir da leitura atual do valor de ganho do EDFA e conhecendo-se o valor de ganho fixo desejado que, neste caso, é passado pelas interfaces *ethernet/serial*, o microcontrolador atua na correção da potência do laser de bombeio, caso haja diferença entre estes valores. Para tanto, utilizam-se duas possíveis abordagens. Uma delas está baseada numa estrutura de controle proporcional ao erro no valor de ganho, onde se faz necessário mais de um ciclo de ajuste até a completa correção do valor do ganho. A outra, feita através de uma curva de ajuste previamente relacionada ao ganho desejado (corrente de bombeio versus potência de entrada), onde dessa maneira, o valor da corrente de bombeio é exatamente calculada para cada valor de potência de entrada. Além do controle do bombeio, o microcontrolador também pode atuar no valor de atenuação do VOA, ajustando o valor de ganho desejado, em níveis fixos pré-determinados e alimentados pelas interfaces de comunicação.

Com o intuito de facilitar a compreensão são apresentados, a seguir, maiores detalhes sobre o modo de operação e a interação entre os controles óptico e eletrônico; estes serão

fornecidos em conjunto com a apresentação dos resultados de caracterização do EDFA com controle híbrido de ganho.

3.3.2 Análise do Ganho do EDFA com Controle Híbrido

Com o intuito de obter uma faixa dinâmica suficiente para proporcionar a operação do EDFA com controle híbrido como pré-amplificador, amplificador de linha ou amplificador de potência (*booster*), a utilização conjunta das técnicas de controle se deu de uma maneira diferente da encontrada na literatura. O controle eletrônico não foi utilizado apenas como um redutor das oscilações de relaxação exibidas pelo controle totalmente óptico, o que não altera a faixa dinâmica do EDFA (define-se este tipo de controle híbrido como paralelo, pois ambas as técnicas atuam sob a mesma faixa dinâmica). O controle híbrido, proposto neste trabalho, opera de forma serial, ou seja, o controle totalmente óptico é responsável pelo controle de ganho do EDFA para potências de entrada até -14 dBm, sendo o ganho controlado eletronicamente para potências de entrada acima deste valor. Desta maneira, as faixas dinâmicas proporcionadas por estas duas técnicas passam a ser acopladas, e complementares, proporcionando um EDFA com ganho controlado com faixa dinâmica superior a 33 dB, como ilustrada na Fig. 3.27.

A caracterização do ganho do EDFA com controle híbrido se baseia na utilização de um sistema WDM de 32 canais, compreendidos entre 1534,25 nm e 1558,98 nm. Um atenuador variável colocado antes do EDFA permite a variação da potência de entrada para análise do comportamento de ganho (Fig. 3.27).

Antes de se apresentar os resultados da caracterização do EDFA com controle híbrido de ganho, é importante que o modo de operação do EDFA seja descrito em maiores detalhes. O EDFA proposto é capaz de operar com eficiente controle de ganho em cinco diferentes valores de ganho fixo, denominados modos de operação, $G = 10, 15, 20, 25$ e 30 dB. A escolha do modo de operação é realizada através de uma interface com o usuário, que pode ser *ethernet* ou serial, onde este escolhe a opção de ganho que melhor se adequa à sua rede óptica. Depois de escolhido o ganho desejado, o controle híbrido de ganho o mantém constante dentro da faixa dinâmica associada a cada modo de operação, utilizando

para isto ou o controle óptico ou o eletrônico. Do ponto de vista do usuário ou da rede, a utilização de uma ou outra técnica de controle é indiferente, pois o processo de controle é totalmente automático, não necessitando qualquer interferência externa na busca do ganho desejado. Se as características da rede sofrerem mudanças no futuro, o modo de operação pode ser revisto sem a necessidade de troca do amplificador.

A definição da faixa dinâmica associada a cada modo de operação é inicialmente realizada através da definição do seu limite superior. Como o EDFA proposto exibe uma potência de saída máxima de +20 dBm, o limite superior de cada faixa dinâmica é definido pela diferença entre a potência máxima de saída e o ganho do modo de operação. Já o limite inferior é definido pela mínima potência de entrada com a qual o ganho pode ser mantido no valor desejado.

A Fig. 3.27 ilustra a faixa dinâmica de cada um dos cinco modos de operação do EDFA, com controle híbrido de ganho, que foi construído. Utilizando 32 canais WDM acoplados a um atenuador óptico variável e medindo-se o ganho sob o canal alocado em 1544,56 nm (canal sobrevivente) com um passo de atenuação de 1 dB, em cada modo de operação, foram obtidas as curvas apresentadas na Fig. 3.27. A escolha de 1544,56 nm como canal sobrevivente não possui nenhum motivo específico significativo, pois para o controle híbrido desenvolvido (no qual o canal de controle encontra-se alocado em 1528 nm), foi verificado que a posição do canal sobrevivente não influencia o desempenho do sistema.

Na Fig. 3.27 verifica-se que, para $G = 10$ dB a faixa dinâmica associada está compreendida entre +10 dBm e -14 dBm, com controle puramente eletrônico dentro de toda a faixa. O controle óptico não é capaz de ampliar esta faixa dinâmica devido ao baixo valor do ganho, neste modo. Mesmo eliminando-se toda a atenuação que o VOA provoca no caminho de realimentação, com o intuito de aumentar a potência do canal de controle e diminuir, assim, o ganho proporcionado aos canais sobreviventes, o valor de ganho possível com esta técnica supera os 10 dB. Portanto, para este modo de operação, a faixa dinâmica máxima se limita a 24 dB. Já para os demais modos de operação $G = 15, 20, 25$ e 30 dB, o limite superior continua sendo definido pela diferença entre a potência de saída máxima e o ganho desejado. No entanto, o controle totalmente óptico é capaz de manter o ganho para potências inferiores a -15 dBm. Na Fig. 3.27, o limite inferior de -28 dBm de potência total

de entrada foi escolhido (32 canais a -43 dBm/canal) pois, nesta situação, verificou-se que o EDFA já se encontrava fora da região de saturação. Como comentado anteriormente, o sinal de entrada foi atenuado a um passo de 1 dB, do limite superior da faixa dinâmica até -28 dBm. Para os modos de operação em questão, em torno -14 dBm, o controle deixou de ser eletrônico e passou a ser óptico, exibindo a formação do laser de controle em 1528 nm. Percebe-se, na Fig. 3.27, um pequeno degrau no valor de ganho para os modos de operação $G = 15, 20, 25$ e 30 dB quando há o chaveamento de uma técnica de controle para a outra (potência total inferior a -14 dBm), este degrau, inferior a 0,5 dB, se deve ao fato do valor de atenuação enviado pelo microcontrolador ao VOA proporcionar um ganho levemente diferente do anteriormente ajustado pelo controle eletrônico. No entanto, ambos possuem uma variação inferior a 0,5 dB em torno do ganho desejado.

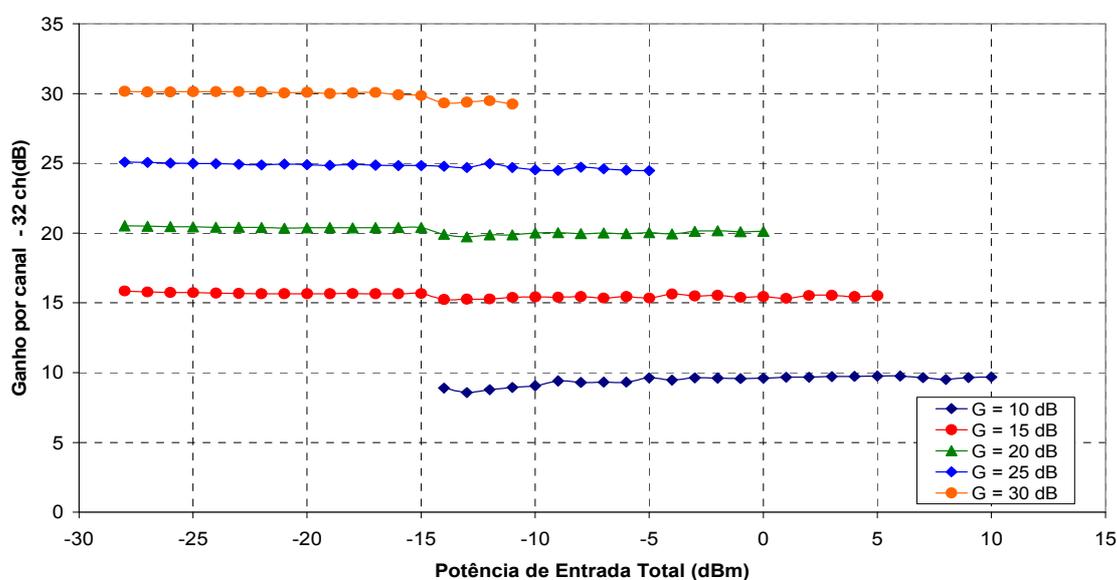


Fig. 3.27: Ganho versus potência de entrada total (faixa dinâmica) para o EDFA com controle híbrido de ganho, para cinco modos distintos de operação.

Na Fig.3.28 apresenta-se o comportamento do EDFA com a entrada composta por até 32 canais. A idéia de se generalizar para uma quantidade qualquer de canais entre 1 e 32, é a de mostrar a viabilidade de operação do amplificador, se houver a necessidade de reconfiguração do sistema até 32 canais. Ao invés de atenuar a potência dos 32 canais, a análise aqui apresentada se baseia na remoção de canais de maneira a provocar um passo de

3 dB de redução de potência de entrada. Assim, com o ajuste inicial da potência por canal em -5 dBm, tem-se para 32 canais, uma potência de +10 dBm. Após a retirada de 16 canais, a potência total cai para +7 dBm e assim sucessivamente até restar 2 canais, quando a potência total será de -2 dBm. A Fig. 3.28 apresenta o ganho por canal em cada modo de operação obedecendo às condições descritas acima. Os símbolos geométricos com o interior sem preenchimento representam o ganho obtido quando apenas 1 canal é submetido à entrada do EDFA em cada um dos modos de operação. Já os símbolos geométricos com preenchimento representam o ganho para o número de canais (N°) apresentados no eixo das abscissas da Fig. 3.28, para cada modo de operação. Assim, verifica-se que apenas pequenas variações de ganho ocorrem independentemente do número de canais na entrada do EDFA com controle híbrido. Na Fig. 3.29 são apresentadas as variações de ganho exibidas entre cada um dos pontos da Fig. 3.28.

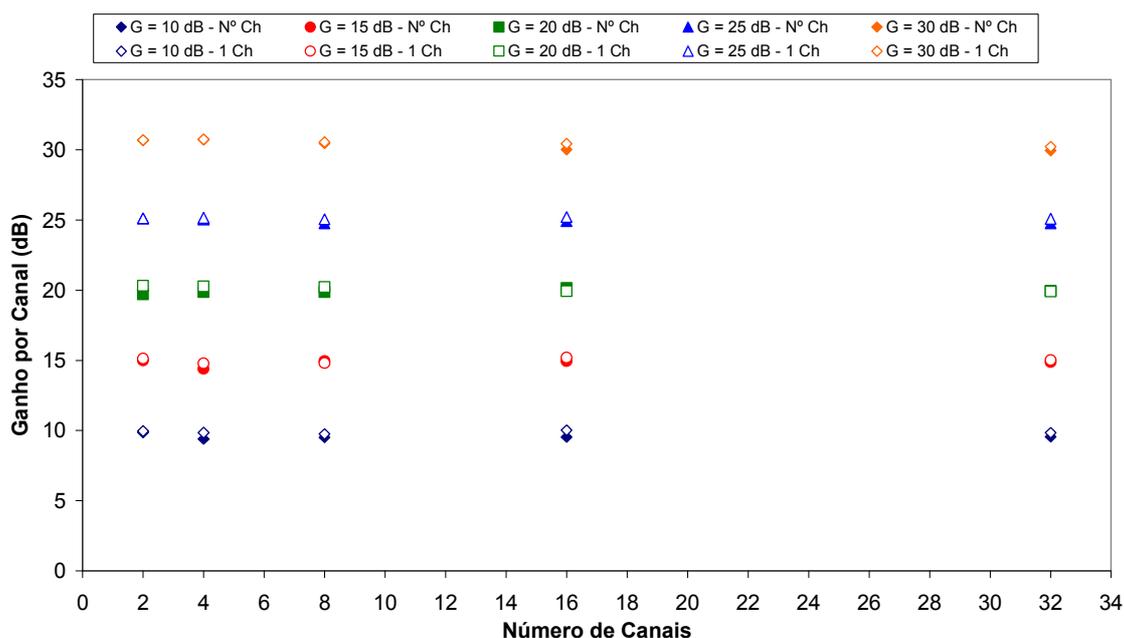


Fig. 3.28: Comparação do ganho do EDFA com controle híbrido, quando submetido a apenas o canal sobrevivente e a 2, 4, 8, 16 e 32 canais.

Analisando a Fig 3.29, verifica-se que uma variação máxima de 0,6 dB é encontrada para $G = 20$ dB, quando o número de canais é variado de 2 para 1. Para todas as demais condições, a variação observada permaneceu abaixo de 0,5 dB, demonstrando a eficiência

do controle de ganho híbrido proposto, independentemente do número de canais, para qualquer modo de operação, dentro de sua faixa dinâmica.

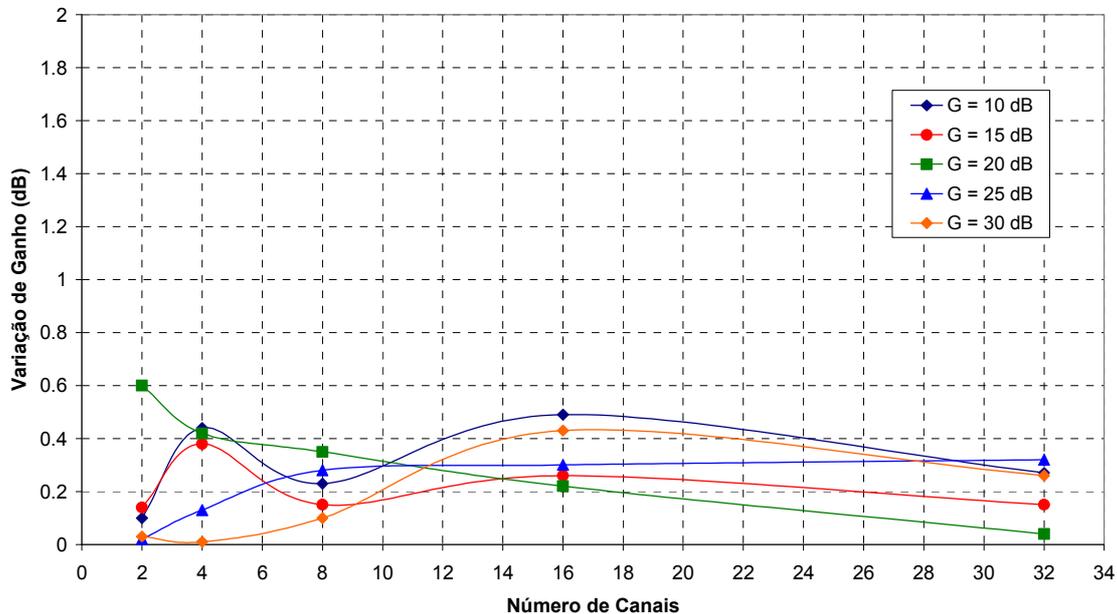


Fig. 3.29: Variação de ganho correspondente às medidas apresentadas na Fig. 3.28.

3.3.3 Figura de Ruído do EDFA com Controle Híbrido

A figura de ruído é um parâmetro utilizado para quantificar a degradação da qualidade do sinal devido à inserção de ruído pelo amplificador. O ruído gerado pelo amplificador consiste do batimento sinal-espontâneo originado da mistura da luz coerente do sinal com a luz incoerente da emissão espontânea amplificada (quando estes possuem a mesma polarização), do batimento espontâneo-espontâneo (batimento de componentes co-polarizados de ASE), da interferência de múltiplos caminhos (MPI – *multi path interference*, flutuações de fase e frequência do sinal refletido em vários pontos do amplificador), e, por fim, do ruído balístico (*Shot Noise*, natureza quantizada dos fótons) [60]. A figura de ruído do EDFA, com controle híbrido de ganho proposto, é obtida através da equação (3.1):

$$NF = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_{ase}}{G \cdot h \cdot f \cdot B_o} \right) + \frac{1}{G} \quad (3.1)$$

onde P_{ase} representa o nível de ASE no comprimento de onda sob análise (W), G representa o ganho ao qual foi submetido o comprimento de onda (linear), h é a constante de Planck ($6,626 \times 10^{-34}$ J.s), f representa a frequência correspondente ao comprimento de onda sob análise (Hz) e B_o é a banda óptica (Hz), calculada através de:

$$B_o = \Delta f = \frac{c}{\lambda^2} \cdot \Delta \lambda \quad (3.2)$$

onde c é a velocidade da luz, expressa em (m/s), λ representa o comprimento de onda do sinal analisado (m) e $\Delta \lambda$ a resolução utilizada no analisador de espectro óptico, para a obtenção da medida (m).

O processo de caracterização de um EDFA consiste, no mínimo, do conhecimento do comportamento do ganho e da figura de ruído. Nesta seção, a figura de ruído do EDFA com controle híbrido proposto é analisada em função da variação da potência de entrada (Fig. 3.30) e, também, ao longo de toda extensão da banda C, para os cinco valores de ganho de operação do EDFA (Fig. 3.31 a Fig. 3.35). O EDFA foi submetido a um sinal de entrada composto por 32, 16, 8, 4, 2 e 1 canal, tomando o canal no comprimento de onda de 1544,56 nm como canal sobrevivente, a Fig. 3.30 ilustra o comportamento da figura de ruído em função da potência de entrada.

Como se pode verificar na Fig. 3.30, a figura de ruído para $G = 10$ dB é bem superior às demais. Isto é esperado, devido ao maior nível de sinal na entrada para este modo. No entanto, para mesmos níveis de potências de entrada, outros modos ($G = 15, 20$ ou 25 dB) exibem valores bem inferiores de figura de ruído. Isto se deve ao fato de que, para $G = 10$ dB, necessita-se de uma grande redução no valor da potência de bombeio do EDFA para a manutenção do ganho. No entanto, como o comprimento da fibra no EDFA é invariável (5 metros), a excessiva diminuição do bombeio faz com que o mesmo seja rapidamente

consumido nos primeiros metros da fibra, tornando o restante do comprimento da fibra um atenuador para o sinal amplificado. Além disto, o nível de ASE é maximizado, diminuindo assim a potência na saída e, conseqüentemente, aumentando a figura de ruído. Para os demais modos, como a diminuição de bombeio, necessária para a manutenção do ganho, torna-se menor para maiores valores de ganho, o nível de figura de ruído torna-se, também, menor.

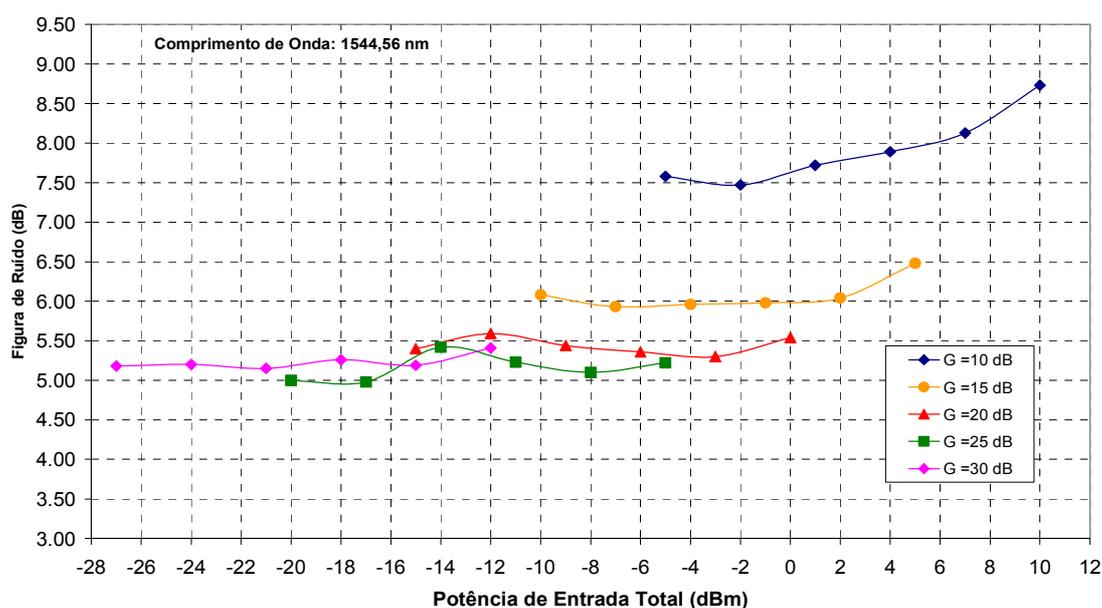


Fig. 3.30: Figura de ruído versus potência de entrada total do EDFA com controle híbrido de ganho.

Em particular observa-se na Fig. 3.30 que, para o modo de operação $G = 15$ dB, o nível de figura de ruído apresenta uma sensível redução em relação ao de $G = 10$ dB. Exibindo uma figura de ruído máxima de 6,5 dB para uma potência de entrada de +5 dBm e inferior a 6 dB para valores de potência abaixo de 0 dBm, se equivalendo ao nível de figura de ruído usual dos *boosters*. Quando os modos são analisados com ganho mais elevados, continuamos verificando a tendência decrescente da figura de ruído, com uma figura de ruído máxima de 5,5 dB para uma potência de entrada de 0 dBm.

Outro fato importante a ser analisado na Fig. 3.30, é a ausência de qualquer efeito que cause acréscimo à figura de ruído quando o controle passa de eletrônico para óptico (-14 dBm). É esperado, e confirmado pela literatura [2], que a formação do canal de controle

produz um aumento no nível de figura de ruído, já que este compete por ganho com os canais sobreviventes, diminuindo assim o ganho a estes proporcionados e, conseqüentemente, aumentando a figura de ruído. No entanto, no EDFA com o controle de ganho proposto, o VOA ajustável que se encontra no interior da malha de realimentação é responsável pelo envio do valor de atenuação associado a cada modo de ganho quando o controle óptico é acionado, diferentemente das propostas encontradas na literatura [11], onde o canal de controle possui uma excessiva eficiência devido ao fato da não utilização de atenuação na realimentação, ou de se utilizar uma atenuação fixa que só é ótima para um nível de ganho. Para o EDFA proposto, o valor de atenuação é previamente analisado, e escolhido de modo a maximizar o valor do ganho do EDFA, exibindo uma variação de ganho inferior a 0,5 dB, e dessa maneira anulando o efeito do acréscimo da figura de ruído quando da ação do controle de ganho totalmente óptico, como verificado na Fig. 3.30.

As Fig. 3.31 a 3.35 ilustram o comportamento da figura de ruído ao longo da banda C, com a entrada do EDFA proposto composta por 32, 16, 8, 4, 2, e 1 canal, nos cinco modos de operação $G = 10, 15, 20, 25$ e 30 dB. Como comentado anteriormente, na análise do ganho, a máxima potência de entrada fica delimitada pela diferença entre a potência de saída máxima (+20 dBm) e o ganho desejado. Dessa maneira, para $G = 10$ dB, a máxima potência de entrada é de +10 dBm, o que resulta em um espectro de entrada composto por 32 canais com -5 dBm. Para $G = 15$ dB, a máxima potência de entrada é +5 dBm resultando em 32 canais com -10 dBm, e assim sucessivamente para os demais modos.

Na Fig. 3.31, para $G = 10$ dB e um controle puramente eletrônico, se pode verificar um alto nível de figura de ruído, principalmente no início da banda. Como comentado anteriormente, a diminuição excessiva do bombeio para a obtenção deste ganho é um fator preponderante para este comportamento. No entanto, outro efeito acentuado, causado por esta diminuição de bombeio é a desigualização (*tilt*) do nível de ganho na banda C. Com isto, o amplificador proporciona maiores ganhos no final da banda C e menores ganhos no início da banda, fazendo, assim, com que a figura de ruído possua um alto nível no início da banda (ausência de ganho) e um nível menor no fim da banda (maiores ganhos). Na Fig. 3.31, observa-se claramente o efeito da acentuação da desigualização do EDFA, onde variações de figura de ruído de, aproximadamente, 2 dB são apresentadas ao longo da banda. Este modo de ganho, $G = 10$ dB, possui um elevado nível de figura de ruído, o que

dificulta a sua utilização em redes ópticas WDM, sendo os modos de ganho mais elevados mais apropriados para operação neste tipo de redes.

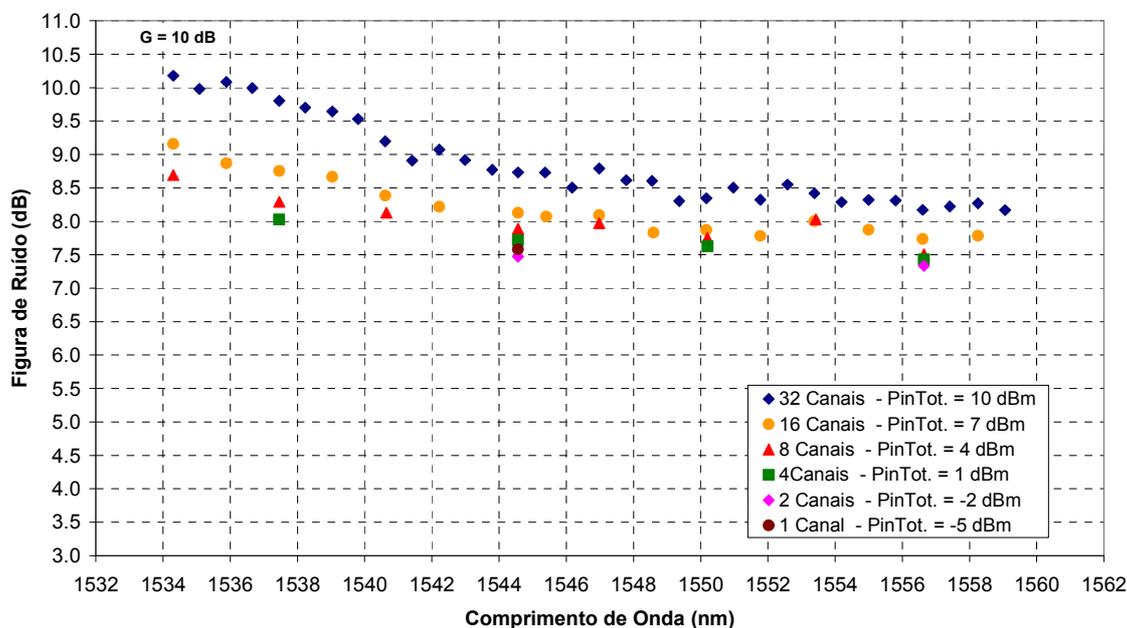


Fig. 3.31: Figura de ruído na banda C do EDFA com controle híbrido de ganho ($G = 10$ dB).

Na Fig. 3.32, a figura de ruído do EDFA com controle híbrido de ganho é apresentada no modo de operação $G = 15$ dB. Pode-se verificar que, neste modo de operação, o EDFA já apresenta níveis de figura de ruído dentro dos padrões de operação em redes ópticas, exibindo um valor máximo de 6,7 dB ao longo de toda extensão da banda C, para uma potência de entrada de +5 dBm.

Nas Fig. 3.33 a 3.35, para os ganhos $G = 20, 25$ e 30 dB, a figura de ruído do EDFA permanece abaixo de 6 dB ao longo da banda C, independentemente do nível de potência de entrada, e cai ainda mais para menores níveis de potência, exibindo, em média uma figura de ruído de 5,5 dB. Para estes modos, a mudança do controle eletrônico para o controle óptico ocorre sem nenhum efeito significativo no que diz respeito à figura de ruído. Os níveis de figura de ruído exibidos posicionam o EDFA proposto no mesmo patamar de figura de ruído dos EDFAs comerciais, sem controle de ganho, e com melhor

desempenho quando comparado aos EDFAs que também apresentam as técnicas convencionais de controle automático de ganho, principalmente os ópticos.

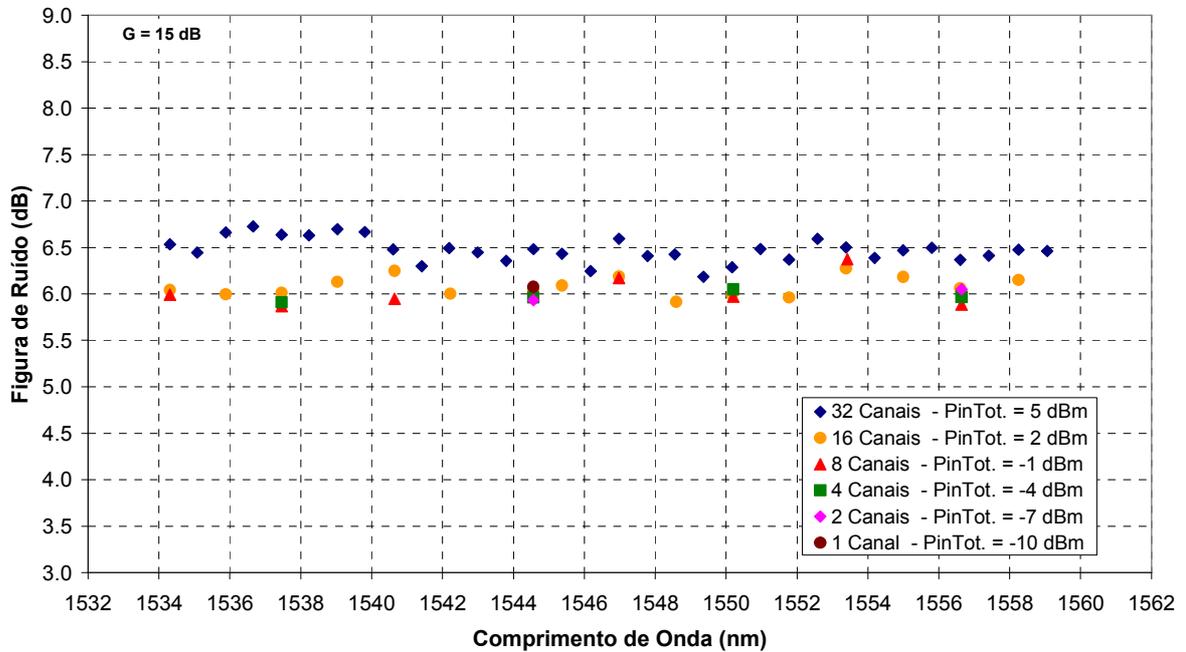


Fig. 3.32: Figura de ruído na banda C do EDFA com controle híbrido de ganho (G = 15 dB).

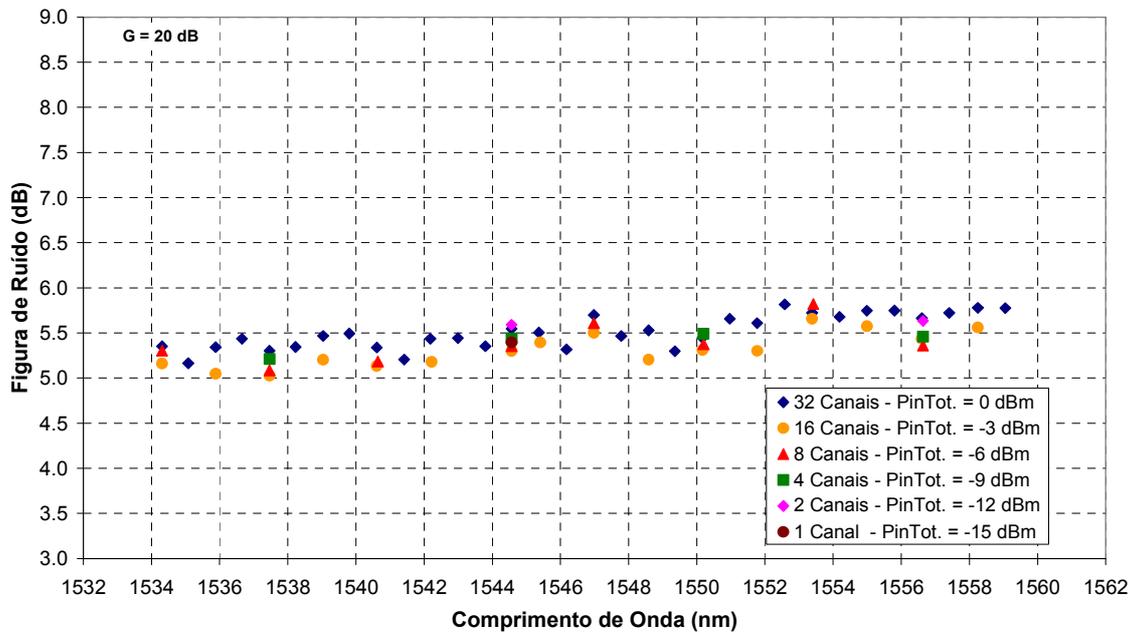


Fig. 3.33: Figura de ruído na banda C do EDFA com controle híbrido de ganho (G = 20 dB).

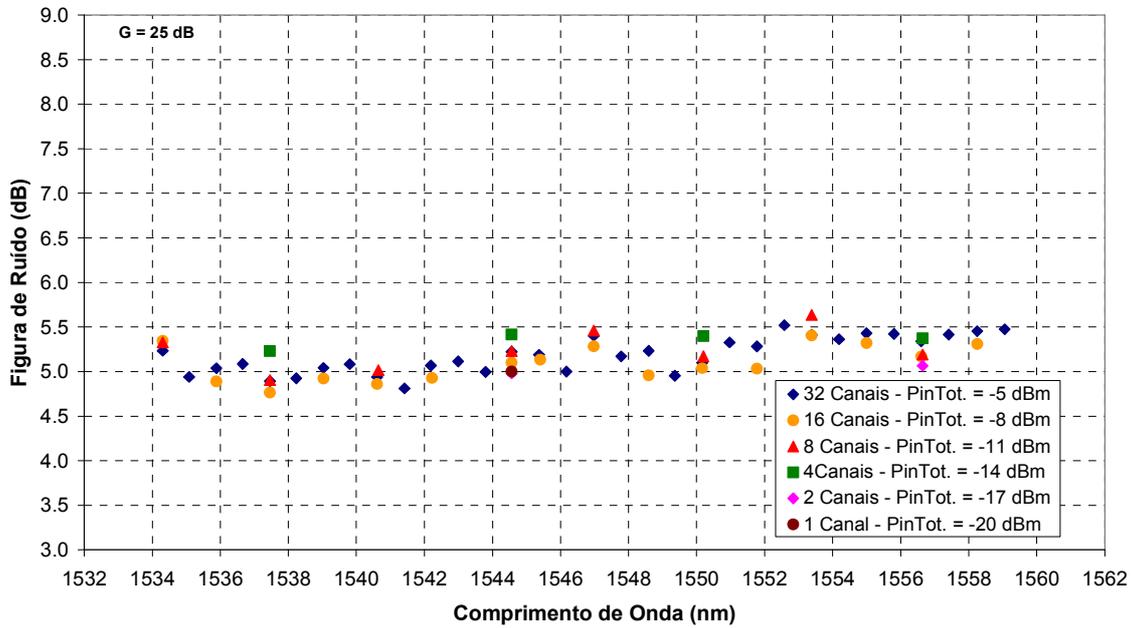


Fig. 3.34: Figura de ruído na banda C do EDFA com controle híbrido de ganho ($G = 25$ dB).

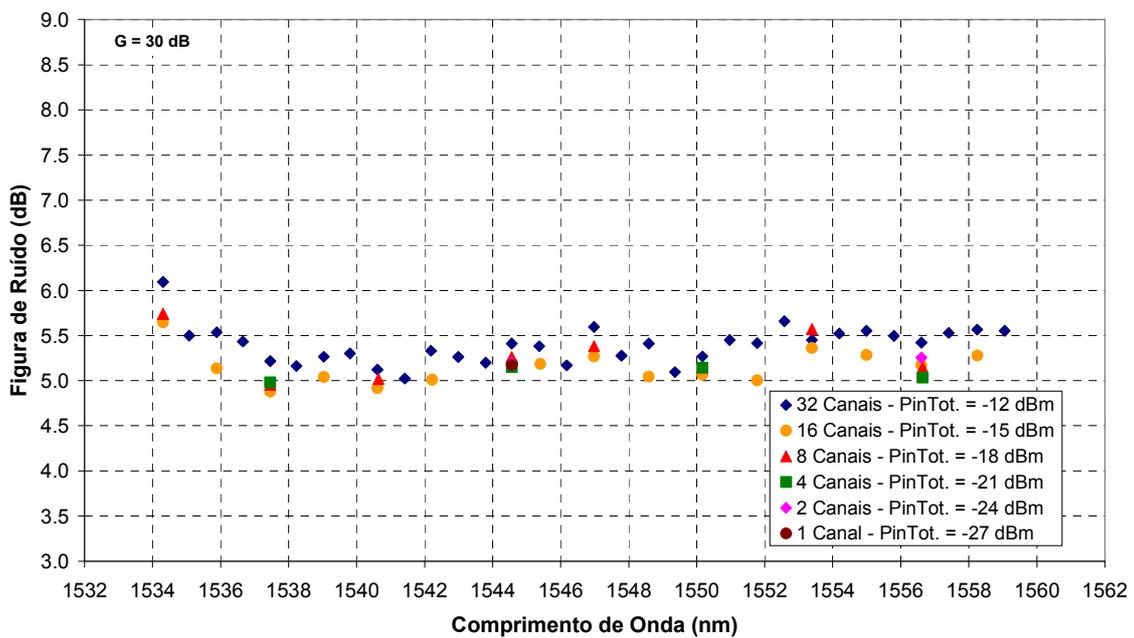


Fig. 3.35: Figura de ruído na banda C do EDFA com controle híbrido de ganho ($G = 30$ dB).

3.3.4 Caracterizações Espectral e Temporal do EDFA com Controle Híbrido

No intuito de realizar uma completa caracterização do EDFA com o controle híbrido de ganho, nesta seção são apresentados os resultados obtidos na caracterização espectral e temporal do EDFA, que consiste das análises dos espectros de saída e do tempo de resposta para manutenção do ganho, respectivamente, em cada um dos modos de operação do EDFA propostos.

3.3.4.1 Análise Espectral

A análise espectral foi conduzida com o intuito de se observar a manutenção do ganho pelo EDFA proposto, para um sistema WDM de 32 canais. Nas Fig. 3.36 a 3.40 os espectros de saída do EDFA são apresentados, para cada modo de operação ($G = 10, 15, 20, 25$ e 30 dB), com a entrada do EDFA composta por 32 canais, e após a remoção de 31 canais. O canal sobrevivente foi utilizado no comprimento de onda de $1544,68$ nm. Podem-se, então, visualizar os efeitos causados no espectro de saída pela técnica de controle de ganho utilizada, desde a redução do bombeio, causada pelo controle eletrônico, passando pela formação do canal de controle e culminando na interação entre ambos, nos casos onde a remoção dos canais leva a uma queda do nível de potência de entrada para um valor inferior a -14 dBm (troca automática da técnica de controle).

Na Fig. 3.36, para o modo de ganho $G = 10$ dB, observa-se que o espectro de saída apresenta um elevado *tilt*, devido ao baixo nível de potência de bombeio. O valor médio de ganho de 10 dB é calculado utilizando-se os valores de potência total de entrada e saída. Devido ao *tilt*, os canais no início da banda experimentam ganho inferior (mínimo de 6 dB) aos dos canais no fim da banda (máximo de 13 dB). Como comentado anteriormente, o *tilt* ocorre devido à ausência de bombeio e, também, ao excesso de potência óptica na entrada do EDFA ($+10$ dBm). Em uma situação real de operação, este sinal de entrada poderia ser atenuado, entrando no EDFA com uma potência máxima de 0 dBm ou 5 dBm, propiciando, assim, uma potência de saída por canal mais alta e com menor figura de ruído. A utilização de um equalizador de banda poderia reduzir este *tilt*; no entanto, o mesmo não foi utilizado por ser danoso aos demais modos de operação (filtro estático), já que seu funcionamento adequado depende da definição da faixa dinâmica de potência de entrada do EDFA (faixa

de aproximadamente 8 dB), o que torna inviável a utilização no EDFA proposto, por este apresentar uma faixa dinâmica superior a 33 dB, e operar em uma faixa de operação de potência de entrada superior a 50 dB.

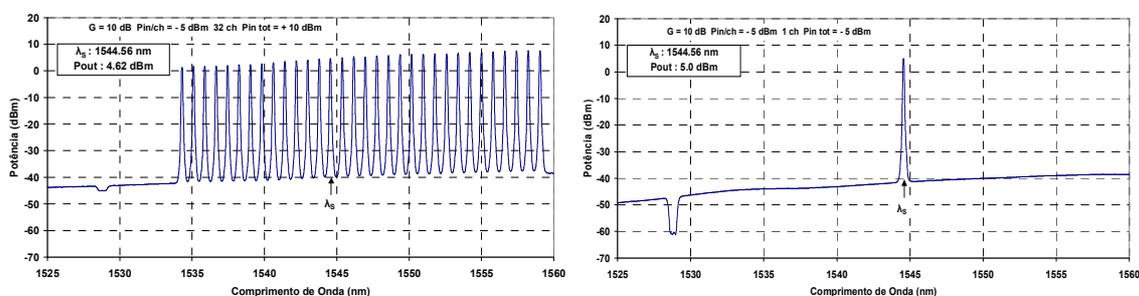


Fig. 3.36: Espectros de saída do EDFA com controle híbrido de ganho com 32 canais e 1 canal para o modo de operação $G = 10 \text{ dB}$.

Ainda na Fig. 3.36, apesar da desigualização obtida, pode-se notar que o valor do ganho do canal sobrevivente é mantido praticamente constante, mesmo frente à retirada de 31 canais, que corresponde a uma variação de potência de entrada de 15 dB. O canal sobrevivente apresenta um ganho de 9,82 dB, quando dividindo a banda com os demais 31 canais e quando sozinho de 10 dB, exibindo, assim, uma variação de ganho de 0,18 dB. Neste caso, o controle de ganho realizado é puramente eletrônico, pois a potência é variada de +10 dBm para -5 dBm, potência ainda superior a -14 dBm. Dessa maneira, os espectros de saída apresentados na Fig. 3.36 representam a saída em regime permanente, após o ajuste do bombeio para a manutenção do ganho desejado. O que ocorre durante a atuação até a manutenção do ganho, o transiente, será alvo da próxima seção.

Na Fig. 3.37, os espectros de saída apresentados são referentes ao modo de operação $G = 15 \text{ dB}$. São ilustradas duas situações para este mesmo modo de operação. Em uma delas, há apenas a atuação do controle eletrônico de ganho. Na outra, faz-se necessária a utilização dos controles eletrônico e totalmente óptico para o controle de ganho. Na Fig. 3.37 (a), verifica-se um ganho médio ao longo da banda C de 15 dB, com um *tilt* inferior ao apresentado quando $G = 10 \text{ dB}$. A potência por canal é de -10 dBm, totalizando, para os 32 canais uma potência total de +5 dBm. O canal sobrevivente passa de 14,88 dB para 15,22 dB após a retirada dos 31 canais e o conseqüente reajuste do bombeio (controle apenas eletrônico). Portanto, a variação de ganho do canal sobrevivente foi de 0,34 dB,

demonstrando a eficácia do controle eletrônico de ganho em utilização. Na segunda situação apresentada, na Fig. 3.37 (b), a potência por canal é de -20 dBm por canal, totalizando uma potência de entrada para os 32 canais de -5 dBm (controle eletrônico). Assim, quando retirados 31 canais a potência de entrada cai para -20 dBm, que, por ser inferior à -14 dBm, força o controle de ganho através do controle totalmente óptico.

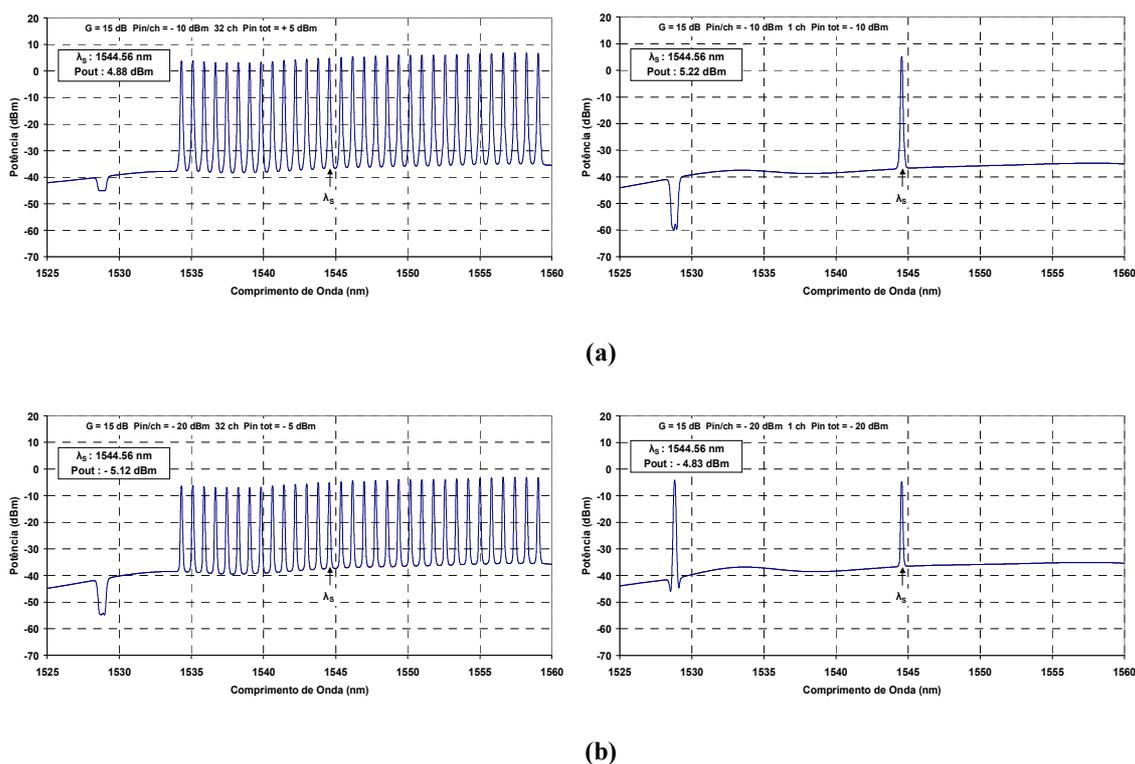


Fig. 3.37: Espectros de saída do EDFA com controle híbrido de ganho com 32 canais e 1 canal, para o modo de operação $G = 15$ dB: (a) potência de entrada total de +5 dBm (32 canais) e (b) potência de entrada total de -5 dBm (32 canais).

Na Fig. 3.37 (b), verifica-se que, com os 32 canais, o ganho obtido pelo canal sobrevivente é de 14,88 dB. Já quando os 31 canais são retirados, o ganho deste canal sobe para 15,17 dB, exibindo uma variação de ganho de 0,29 dB. Quando os 31 canais são retirados, nota-se a presença do canal de controle em 1528 nm. Nesta situação o microcontrolador é responsável por fixar a potência de bombeio no máximo (360 mW) e, também, por enviar ao VOA o valor de atenuação necessária para a manutenção do ganho desejado (15 dB). Verifica-se, mais uma vez, a eficiência do controle de ganho. No entanto,

agora, mostra-se que o controle continua eficiente mesmo frente à variação da técnica de controle. Analogamente à Fig. 3.37, a Fig. 3.38 apresenta os espectros de saída, porém, para o modo de ganho de $G = 20$ dB. Em ambas as situações apresentadas a retirada dos 31 canais leva à necessidade da troca da técnica de controle para a manutenção do ganho desejado.

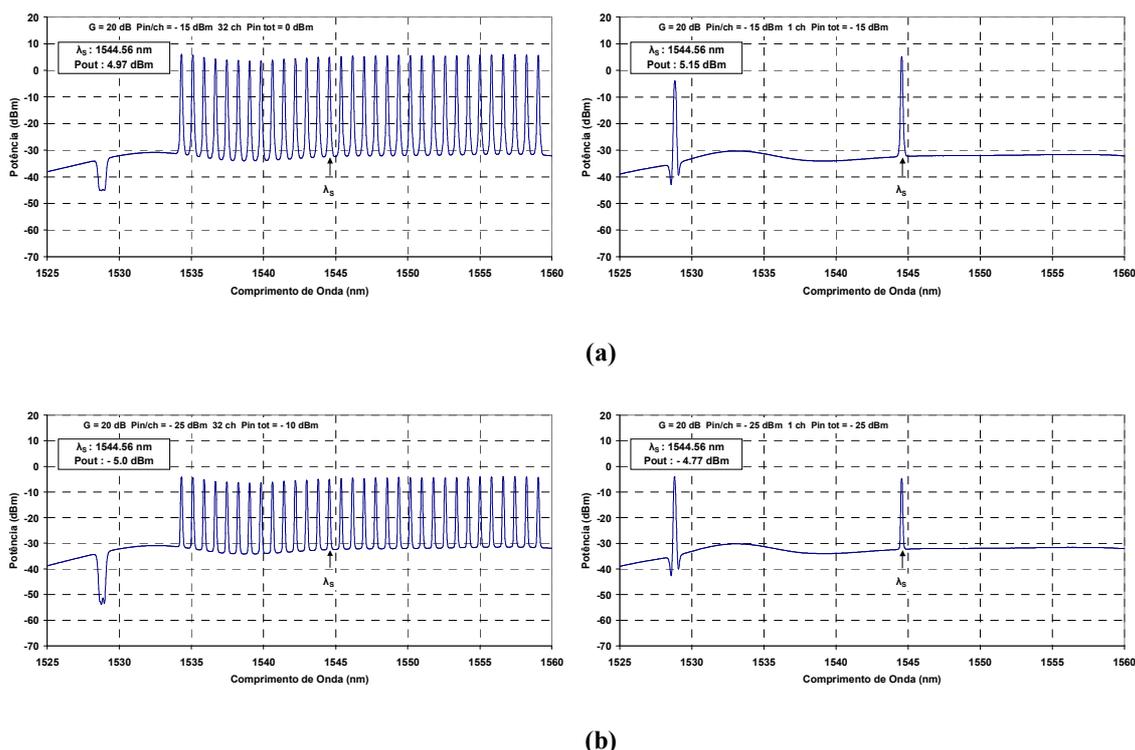


Fig. 3.38: Espectros de saída do EDFA com controle híbrido de ganho com 32 canais e 1 canal, para o modo de operação $G = 20$ dB: (a) potência de entrada total de 0 dBm (32 canais) e (b) potência de entrada total de -10 dBm (32 canais).

A Fig. 3.38 (a) apresenta os resultados para uma potência por canal de -15 dBm, totalizando, para os 32 canais, uma potência de entrada de 0 dBm. Assim, quando retirados os 31 canais, a potência de entrada cai para -15 dBm, abaixo do limite de -14 dBm, o que promove o chaveamento da técnica de controle de ganho do EDFA. Antes de analisar a eficiência do ganho, vale a pena ressaltar a grande redução do *tilt* para este modo de operação, fazendo com que todos os canais na banda C sejam submetidos a um ganho de aproximadamente 20 dB. Verifica-se que o ganho do canal sobrevivente, quando dividindo

a banda de transmissão com os demais 31 canais, é de 19,97 dB, subindo para 20,15 dB com a transmissão de apenas um canal (variação de ganho de 0,18 dB). Neste caso, com o controle totalmente óptico, verifica-se a presença do canal de controle em 1528 nm. Na Fig. 3.38 (b), a potência de entrada por canal é reduzida para -25 dBm, totalizando -10 dBm de potência total para os 32 canais. Verifica-se um ganho de 20 dB para o canal sobrevivente quando a entrada é composta por 32 canais, subindo para 20,23 dB quando 31 canais são retirados, exibindo, assim, uma variação de ganho de 0,23 dB. Nas Fig. 3.39 e 3.40, os espectros de saída para os modos de operação $G = 25$ dB e $G = 30$ dB são apresentados, respectivamente. Em ambos os casos, os controles eletrônico (32 canais) e totalmente óptico (1 canal) são acionados. Para $G = 25$ dB, os canais possuem uma potência de entrada de -20 dBm, totalizando uma potência de entrada de -5 dBm, com 32 canais, e, de -20 dBm com apenas um canal. Da Fig. 3.39, calcula-se um ganho de 24,81 dB para o canal sobrevivente, com 32 canais transmitidos, subindo para 24,84 dB quando 31 canais são retirados do sistema (variação de ganho de 0,04 dB).

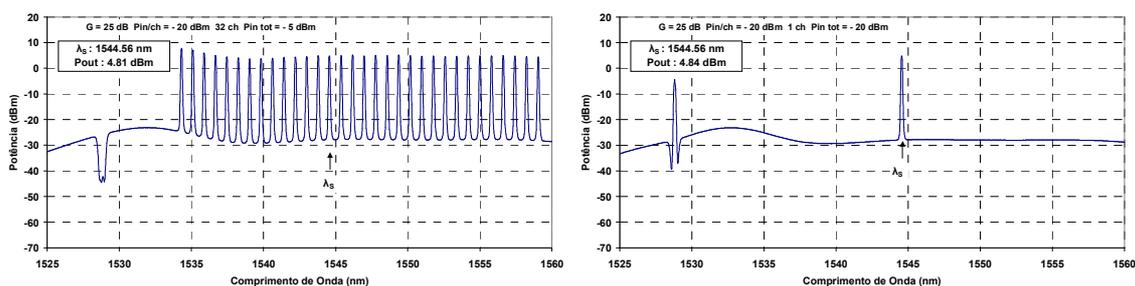


Fig. 3.39: Espectros de saída do EDFA com controle híbrido de ganho com 32 canais e 1 canal, para o modo de operação $G = 25$ dB.

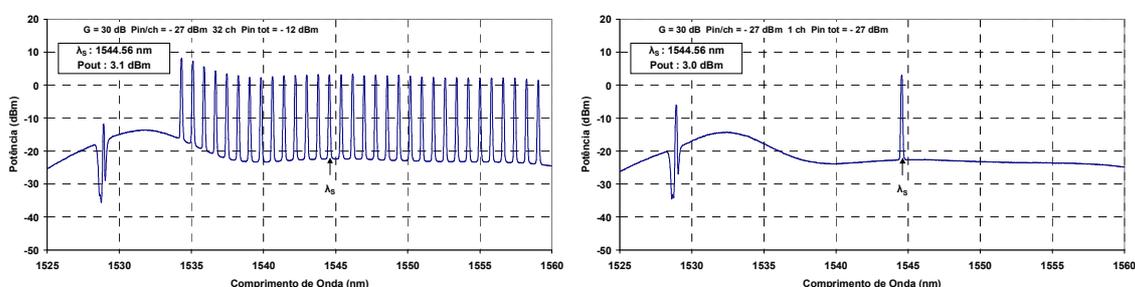


Fig. 3.40: Espectros de saída do EDFA com controle híbrido de ganho com 32 canais e 1 canal, para o modo de operação $G = 30$ dB.

Na Fig. 3.40, para $G = 30$ dB, os canais de entrada têm uma potência por canal de -27 dBm, totalizando assim um sinal de entrada de -12 dBm, com 32 canais transmitidos. Verifica-se que o ganho proporcionado ao canal sobrevivente é de 30,1 dB antes da retirada de 31 canais, quando se reduz a 30 dB (variação de ganho de 0,1 dB). Assim, da mesma forma que para os modos de operação anteriores, a eficiência do EDFA no controle de ganho foi confirmada, sendo apresentada com base nos espectros de saída em cada um dos modos de operação do EDFA. Ainda analisando a Fig. 3.40, pode-se verificar a presença de um pequeno canal de controle em 1528 nm. Isto ocorre devido ao fato da potência total (-12 dBm) proporcionar um nível de ASE suficientemente elevado, habilitando a formação do canal de controle, e não permitindo, mesmo com a máxima atenuação do VOA na realimentação, que o ganho na cavidade óptica seja inferior às perdas, proporcionando, assim, a formação de um incipiente canal de controle, que, como verificado, não é capaz de evitar o correto ajuste de ganho pela técnica eletrônica. É importante notar, também, que a escolha do canal sobrevivente não se baseou em nenhuma análise prévia dos resultados, sendo este apenas escolhido por estar no meio da banda C. Os resultados, em termos da variação de ganho obtida, podem ser generalizados ao longo de toda a banda C, exceto para altos níveis de *tilt* (maior que 5 dB).

3.3.4.2 Análise Temporal ou Transiente

A caracterização temporal, ou transiente, do EDFA com controle híbrido de ganho, consiste na análise do comportamento transiente da potência de saída e, conseqüentemente, do ganho, quando há variações abruptas na potência de entrada do amplificador. Dessa maneira, definido um modo de ganho desejado, o alvo da análise é caracterizar a resposta proporcionada pelo EDFA ao canal sobrevivente dada uma variação de potência de entrada, até a estabilização do ganho no valor ou próximo do valor de operação do modo. Para isto, com base em um arranjo experimental similar ao apresentado na Fig. 3.15, porém com 32 canais, e utilizando como amplificador o EDFA proposto, foi realizada a caracterização temporal através da inserção e remoção de 31 canais, para cada um dos modos de operação.

Os espectros de saída apresentados na análise da seção anterior correspondem aos espectros de saída em regime permanente, pós-transientes. Nesta seção, na análise

temporal, será dada ênfase à análise do comportamento transiente nas mesmas condições apresentadas na seção anterior. Antes de se apresentar a análise transiente, é importante ressaltar o comportamento típico das técnicas de controle a serem utilizadas. No EDFA híbrido, a técnica de controle de ganho eletrônica utilizada se baseia em uma alimentação adiante, como apresentado na Seção 3.3, que necessita de um pré-ajuste para cada um dos modos de operação. Este pré-ajuste consiste da obtenção e gravação no microcontrolador de uma curva de potência de bombeio versus potência de entrada ao longo da extensão da faixa dinâmica do controle eletrônico, para cada um dos modos de operação ($G = 10, 15, 20, 25$ e 30 dB). Dessa maneira, conhecido o ganho desejado, ao se monitorar a potência de entrada e utilizando-se a curva previamente obtida, o microcontrolador ajusta a potência do laser de bombeio para o valor que resulte no ganho desejado em um único passo, sem a necessidade de seguidas iterações até a convergência. O tempo de resposta máximo típico, obtido utilizando este tipo de controle, varia entre 12 e 15 ms. Após a otimização do circuito eletrônico utilizado na Seção 3.3, foi obtido um tempo de resposta entre de 2 ms e de 4 ms. Quanto ao controle totalmente óptico, o seu impacto transiente é severamente reduzido, devido à alocação do canal de controle no comprimento de onda de 1528 nm, eliminando assim as oscilações de relaxação. Dessa maneira, o impacto transiente causado pelo controle totalmente óptico é representado apenas pelo tempo de recombinação dos íons de érbio no interior da fibra dopada, que é de, aproximadamente, 150 μ s.

Primeiramente, o EDFA foi submetido a uma potência de entrada por canal de -5 dBm, totalizando +10 dBm, no modo de operação $G = 10$ dB. Como o limiar para controle óptico é de -14 dBm, e após a retirada de 31 canais, a potência de entrada é ainda de -5 dBm, o controle realizado neste caso é puramente eletrônico. Dessa maneira, o controle do ganho em 10 dB se dá apenas devido à influência no ajuste do laser de bombeio. Neste caso, a atenuação do VOA utilizado na realimentação óptica é ajustada para o valor máximo para evitar a formação do canal de controle, que, para este nível de potência de entrada, não apresenta influência no controle de ganho. Na Fig. 3.41, ilustra-se a resposta temporal do canal sobrevivente pós-fotodeteção, para os casos de inserção e remoção de 31 canais (*add/drop*), respectivamente.

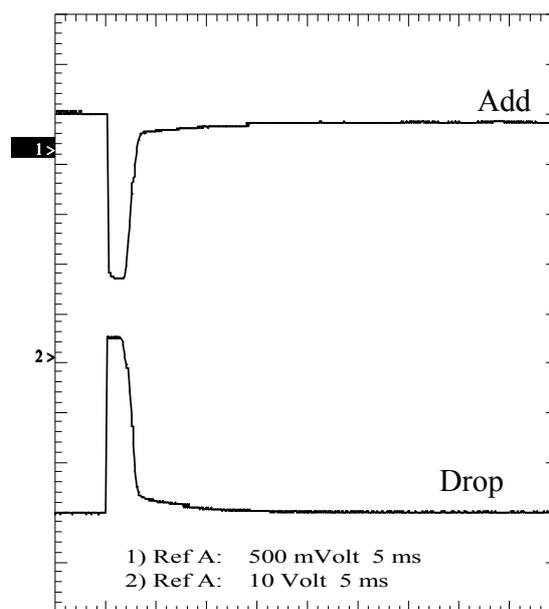


Fig. 3.41: Resposta temporal do EDFA com controle híbrido no modo de operação $G = 10$ dB com *add/drop* de 31 canais, controle puramente eletrônico (potência total de +10 dBm para 32 canais e -5 dBm para 1 canal).

Como se pode verificar, uma variação severa de ganho ocorre durante o transiente, sendo o ganho apropriadamente estabilizado através do ajuste do bombeio após 4 ms. Este comportamento é explicado pelo fato do controle de ganho não atuar em sincronia com a inserção e ou retirada dos canais. Isto ocorre devido ao tempo necessário para o microcontrolador realizar os cálculos e atuar no controle, fazendo com que o amplificador opere sem controle de ganho até a correção do bombeio. Em outras palavras, como se pode verificar na Fig. 3.41, quando canais são inseridos, o EDFA saturado responde com o nível de ganho adequado à nova potência de entrada, e o mesmo nível inicial de bombeio. Somente após o microcontrolador calcular a parcela de corrente de controle e a enviar ao laser de bombeio é que o ganho começa a cair ou aumentar após adição ou remoção de canais, respectivamente. O que se pode concluir da Fig. 3.41 é que o EDFA proposto, apesar de proporcionar uma sensível redução no tempo de resposta em relação ao EDFA-EAGC apresentado na Seção 3.3, quando operando com controle puramente eletrônico no modo $G = 10$ dB, apresenta um *overshoot/undershoot* de potência elevado (aproximadamente 12 dB), quando 31 canais são removidos. Este comportamento pode

causar a perda de sincronismo do sinal que trafegar na rede óptica através da saturação do receptor (uma variação de 0,44 dB/volt foi obtida durante a realização destas medidas). Um fato relevante a ser verificado na Fig. 3.41 é a grande diferença entre os níveis de amplitude da variação de ganho durante os transientes de adição e de remoção dos canais. A curva que representa o comportamento da adição dos canais foi obtida na escala de 500 mV/div (11,2 dB), enquanto que, para a remoção, é utilizada uma escala de 10 V/div (5,11 dB). A diferença de amplitude é explicada considerando-se os níveis de bombeio e de saturação em que se encontra o EDFA em cada situação. Os diferentes níveis de bombeio e de saturação levam o EDFA a ter comportamentos distintos para a resposta de ganho versus potência de entrada. Na adição de canais (*add*), por exemplo, este comportamento é responsável pelo fato da variação de potência de entrada não ser integralmente transferida à saída do amplificador, uma vez que o EDFA não apresenta ganho negativo na região de saturação.

Quando operando com controle eletrônico, a atenuação do VOA, na realimentação óptica, foi inicialmente ajustada para o valor máximo, evitando, assim, a formação do canal de controle (para os níveis de sinal de entrada em questão, a influência do canal de controle na manutenção do ganho é desprezível). No entanto, através de análises experimentais, verificou-se que, mesmo se o controle óptico não apresentasse um controle de ganho eficaz, se ativo, este poderia ser útil na redução dos *overshoots* verificados utilizando o controle puramente eletrônico. Ou seja, observou-se que, mesmo para potências superiores a -14 dBm, se, ao invés de se ajustar a atenuação do VOA no valor máximo, de modo a anular o canal de controle, esta poderia ser ajustada com um valor de atenuação capaz de proporcionar um canal de controle de baixa eficiência, que não reduzisse o ganho dos canais transmitidos em mais de 0,5 dB; tornava-se possível, quando da retirada de canais, que o controle óptico auxiliasse de modo inverso o controle do ganho. Em outras palavras, o excesso de ganho provocado pela transição de potência óptica de entrada era absorvido pelo canal de controle até a atuação no bombeio ser realizada. Este fenômeno, batizado de “pré-controle” óptico, é tão mais eficaz quanto maior o número de canais na banda, durante a retirada (*drop*) de canais. Por outro lado, quando a potência de entrada é baixa, composta por poucos canais, quanto maior a inserção (*add*) menor a eficiência do “pré-controle” óptico.

Para o ganho $G = 10$ dB, Fig. 3.41, o “pré-controle” não apresentou nenhum efeito devido ao excessivo nível de potência de entrada (+10 dBm). Isto se deve à uma grande depleção do nível de ASE que torna inviável, mesmo para um baixo nível de atenuação do VOA, a formação de um canal de controle. No entanto, para os demais modos de operação este “pré-controle” demonstrou uma eficiência acima da expectativa com relação à supressão do *overshoot* de potência. A partir do modo de operação $G = 15$ dB, já foi possível o ajuste do VOA para a realização do “pré-controle” garantindo *overshoots* inferiores a 1 dB, como está ilustrado nas Fig. 3.42 a 3.46.

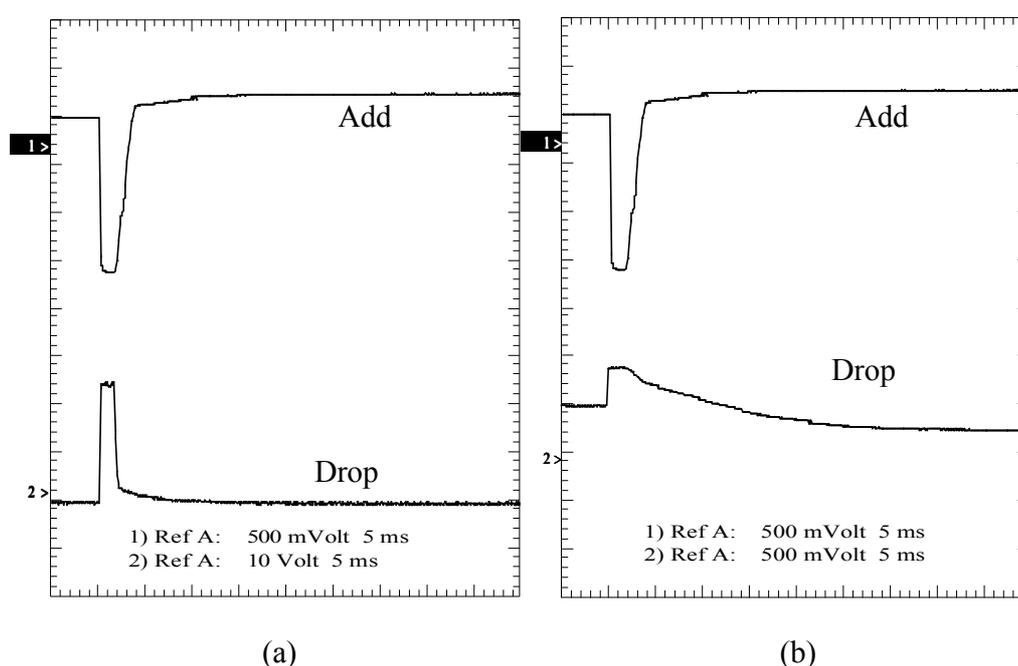


Fig. 3.42 (a)-(b): Resposta temporal do EDFA com controle híbrido no modo de operação $G = 15$ dB com *add/drop* de 31 canais, (a) sem e (b) com o pré-controle óptico, para ajuste baseado no controle eletrônico (potência de entrada de +5 dBm para 32 canais e -10 dBm para 1 canal).

Na Fig. 3.42 apresentam-se as saídas correspondentes ao canal sobrevivente para o EDFA com controle híbrido de ganho proposto (a) sem o “pré-controle” óptico, e (b) com o “pré-controle” óptico (VOA com atenuação suficiente para a formação de um “pequeno” canal de controle). Na análise da Fig. 3.42, a potência de entrada por canal foi de -10 dBm, implicando, assim, em uma potência de entrada máxima de +5 dBm. Dessa maneira, isto faz com que apenas o controle eletrônico atue (níveis de potência envolvidos são superiores

à -14 dBm); verifica-se, na Fig. 3.42 (a), um comportamento muito semelhante ao observado na Fig. 3.41, com uma pequena redução no *overshoot* (durante o *drop*), devido à diminuição do nível de saturação (escala se mantém em 10 V/div). Já na Fig. 3.42 (b), onde há a presença do “pré-controle” óptico, ocorre uma drástica redução na amplitude do *overshoot* após a retirada dos 31 canais, demonstrando-se, assim, a eficácia da estratégia utilizada. Com relação à adição de canais (*add*), como esperado, o comportamento se manteve inalterado. Isto se deve ao fato da impossibilidade de atuação do “pré-controle” causada pela ausência de ASE, devido ao alto nível de saturação alcançado com os 32 canais na banda de transmissão.

As Fig. de 3.43 a 3.46 apresentam o comportamento do canal sobrevivente fotodetectado frente à inserção e retirada de 31 canais, para os modos de operação $G = 15$ dB, 20 dB, 25 dB e 30 dB. No entanto, em todas as situações ilustradas nestas figuras, haverá a troca da técnica de controle utilizada no EDFA, sendo a troca do controle óptico para o eletrônico utilizada na inserção de 31 canais (*add*), e na troca do controle eletrônico para o óptico na retirada de 31 canais (*drop*).

Na Fig. 3.43, observa-se o comportamento do canal sobrevivente fotodetectado com o modo de ganho em $G = 15$ dB, onde se utilizou uma potência de entrada de -20 dBm por canal, compondo um sinal de entrada com -5 dBm, quando os 32 canais estão presentes na banda de transmissão (a) sem, e (b) com, o “pré-controle” óptico. Deve-se lembrar que, antes da inserção, o controle do único canal na banda (canal sobrevivente) é realizado pelo canal de controle, estando o bombeio em seu nível máximo de potência.

No caso da Fig. 3.43 (a), sem o “pré-controle” óptico, observam-se variações de ganho insignificantes tanto na inserção quanto na remoção dos canais, o que demonstra a eficiência da técnica de controle híbrida utilizada. Analisando a Fig. 3.43 (b) pode-se verificar que, após a inserção de canais a potência do canal sobrevivente sofre um leve aumento, ao invés da diminuição de ganho obtido nos casos anteriores, que se deve ao efeito do canal de controle, que absorve a maior parte da variação de potência. Como a potência nesta situação é de -5 dBm a técnica de controle é modificada para a técnica eletrônica, que, após seu tempo de resposta (4 ms), atua reduzindo o bombeio e reajustando para o ganho desejado. Analisando o comportamento da remoção (*drop*) de 31 canais,

apresentado na Fig. 3.43 (b), e lembrando que, antes da remoção dos 31 canais, a potência de entrada total de entrada é -5 dBm, e portanto, se faz uso do controle eletrônico; observa-se que a potência do canal sobrevivente aumenta ligeiramente imediatamente após a remoção dos canais, o que se deve ao “pré-controle” óptico utilizado. Porém, para que ocorra a mudança do controle eletrônico para o controle óptico, a potência do laser de bombeio vai ao seu valor máximo ao mesmo tempo em que a atenuação do VOA é controlada para proporcionar o ganho desejado. Este duplo ajuste tende a aumentar o tempo de resposta para acima e 4 ms, porém mantém os *overshoots* e *undershoots* na saída do EDFA, com níveis inferiores a 0,5 dB. Este comportamento demonstra toda a capacidade da técnica de controle híbrida na supressão de transientes.

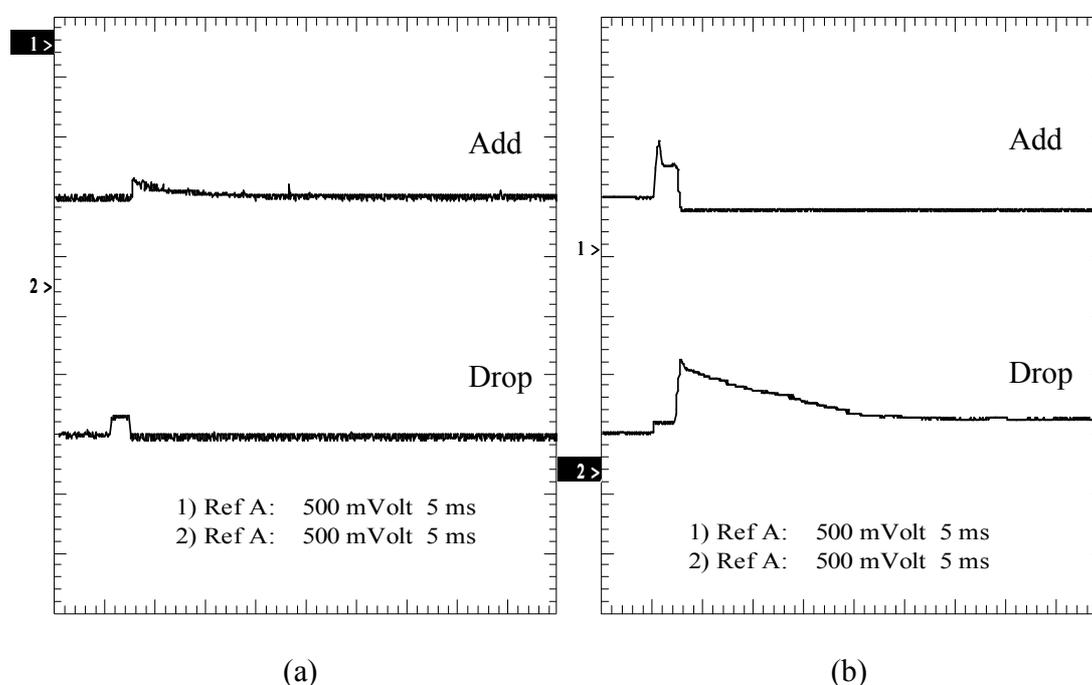


Fig. 3.43: Resposta temporal do EDFA com controle híbrido no modo de operação $G = 15$ dB com *add/drop* de 31 canais e atuação dos controles óptico e eletrônico e (a) sem e (b) com pré-controle (potência de entrada de -5 dBm para 32 canais e -20 dBm para 1 canal).

Pode-se concluir que o “pré-controle” só é útil quando o EDFA se encontra muito saturado e operando apenas com o controle eletrônico. Portanto, como os demais modos ainda a serem analisados apresentam níveis de saturação mais baixos que os até aqui analisados, e necessitam de ambas as técnicas de controle, o “pré-controle” será

desconsiderado (VOA é ajustado para a máxima atenuação durante controle eletrônico). Dessa maneira, ficou definido que o pré-controle só se torna útil para os modos de operação $G = 10$ dB e $G = 15$ dB, quando os níveis potência de entrada são superiores a -14 dBm. Nas Fig. 3.44 e 3.45, comportamentos semelhantes aos anteriores podem ser observados, onde é verificado um impacto inferior a $0,5$ dB no controle do ganho do canal sobrevivente, mesmo durante os transientes. Nos dois casos, o ganho do EDFA é controlado de forma eficiente e com uma grande supressão de transientes.

Com base na caracterização temporal apresentada, pode-se verificar que, exceto para o modo de ganho de 10 dB, o EDFA com controle híbrido de ganho proposto apresenta uma grande eficiência no controle de ganho e na supressão de transientes, mesmo quando exposto às condições extremas de inserção e retirada de canais em uma rede óptica. A técnica de controle híbrida de ganho habilita este amplificador a operar em qualquer aplicação necessária em uma rede óptica, seja como *booster*, amplificador de linha ou pré-amplificador, devido à sua vasta faixa dinâmica (maior que 33 dB).

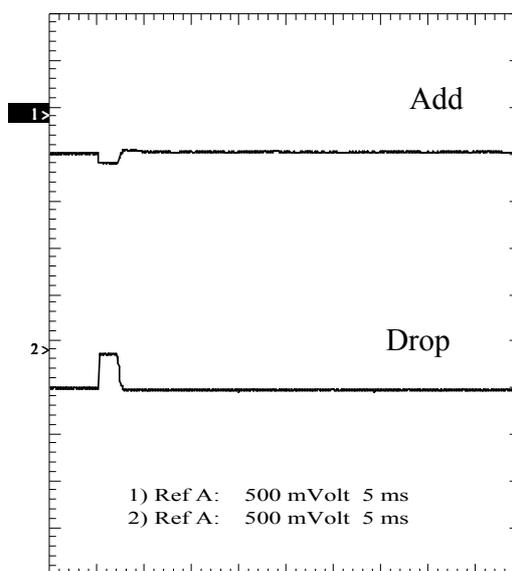


Fig. 3.44: Resposta temporal do EDFA com controle híbrido no modo de operação $G = 20$ dB com *add/drop* de 31 canais utilizando as técnicas de controle óptica e eletrônica (potência de entrada de 0 dBm para 32 canais e -15 dBm para 1 canal).

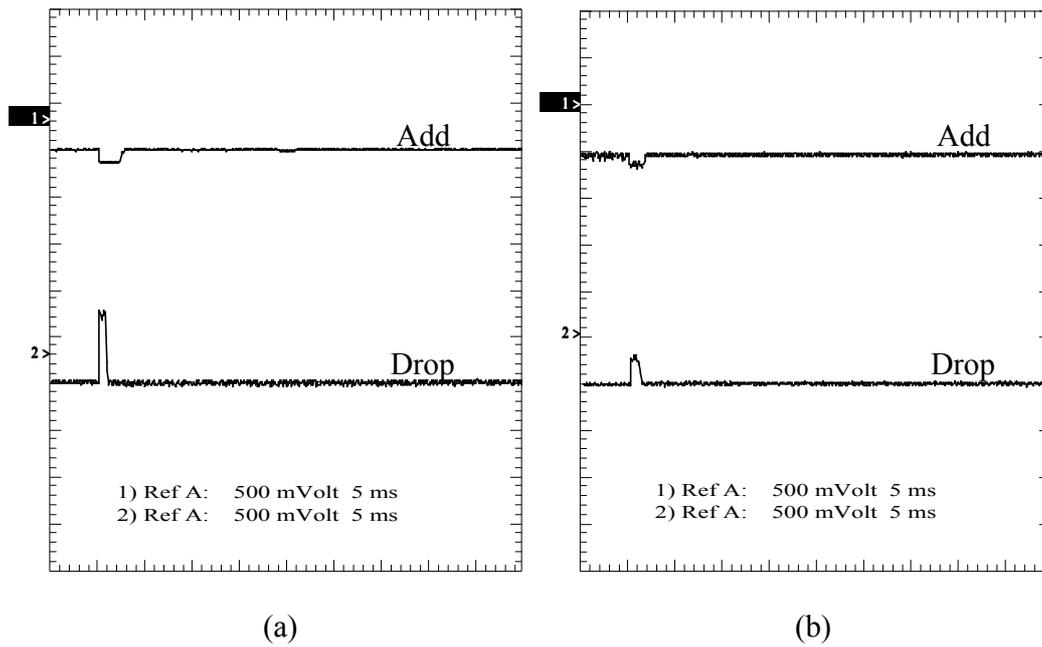


Fig. 3.45: Resposta temporal do EDFA com controle híbrido no modo de operação (a) $G = 25$ dB e (b) $G = 30$ dB com *add/drop* de 31 canais, utilizando as técnicas de controle óptica e eletrônica; (a) potência de entrada de -20 dBm para 32 canais e -5 dBm para 1 canal e (b) potência de entrada de -27 dBm para 32 canais e -12 dBm para 1 canal.

Capítulo 4

Resultados Complementares

O desenvolvimento de uma técnica híbrida capaz de proporcionar uma solução única de amplificação para as redes WDM é o objetivo principal, mas não o único tópico que foi abordado durante as etapas deste trabalho. Outros estudos, motivados a partir da identificação de necessidades impostas às redes ópticas reconfiguráveis, foram realizados. Dois destes estudos foram levados à fase de desenvolvimento e serão neste capítulo abordados. Primeiramente é demonstrado um método de medição sistêmica ultra-rápido de alta resolução, capaz de investigar o impacto sistêmico de qualquer transiente de potência de uma rede óptica, inclusive os causados pelos EDFAs com controle de ganho. Em seguida, o desenvolvimento de uma técnica de controle automático de ganho totalmente óptico aplicada a uma configuração de EDFA baseada em dupla passagem, com compensação de dispersão através de DCFs embutidas no EDFA, é apresentada.

4.1 Método Ultra-Rápido para Análise Sistêmica durante Transientes

Os EDFAs com controle automático de ganho produzem transientes de potência nos canais sobreviventes independentemente da técnica de controle utilizada, como apresentado no Capítulo 3. Estes transientes tornam-se mais rápidos e com maiores excursões de potência quando diversos EDFAs são utilizados em cascata, como em redes ópticas com roteamento por comprimento de onda [61]. Nesta seção, apresenta-se um método ultra-rápido de medição sistêmica que foi desenvolvido para avaliar o desempenho sistêmico de uma rede óptica reconfigurável sujeita aos transientes de potência provocados pela inserção

e retirada de canais na entrada de EDFAs com controle automático de ganho. Este processo é importante para uma real avaliação da quantificação do grau de penalidade que a amplitude e a duração destes transientes podem trazer ao sistema que usa EDFAs com controle de ganho, e justifica os esforços para a redução dos mesmos no projeto do EDFA com controle híbrido de ganho. O método desenvolvido foi utilizado para avaliar os transientes de EDFAs sem controle de ganho, com controle totalmente óptico, com controle eletrônico de alimentação adiante e com controle eletrônico realimentado.

Como já mencionado, todas as técnicas de controle de ganho de EDFAs exibem transientes de potência, que se diferem pela duração e amplitude das oscilações introduzidas pela dinâmica do controle. Estes transientes podem ser cada vez mais rápidos e com maiores amplitudes, aumentando proporcionalmente ao número de EDFAs no enlace, tornando-se assim incapazes de serem verificados utilizando as tradicionais técnicas de medição sistêmica (BER) baseadas em uma média de erros em um longo tempo de duração. Através do método aqui proposto, procura-se viabilizar a medida sistêmica durante o transiente, sendo a mesma aplicável a qualquer análise transiente de uma rede óptica e não apenas aos transientes do EDFA. Esta técnica baseia-se na medição do fator Q, que é realizada através da contagem de erros dos bits (“zeros” e “uns”) em diferentes níveis de potência na chegada do medidor, sendo posteriormente calculado o fator Q.

4.1.1 Arranjo Experimental

O arranjo experimental utilizado é apresentado na Fig. 4.1. Oito canais na banda C, compreendidos entre 1547,72 e 1558,98 nm e espaçados de 200 GHz, compõem o sinal de entrada acoplado ao amplificador sob teste (AUT – *amplifier under test*). Sete de oito canais são inseridos e retirados por meio de uma chave acústico-óptica (AO) controlada pelo gerador de pulso 1. A chave acústico-óptica é submetida a uma modulação do tipo liga-desliga, com período definido pela necessidade do AUT. O canal sobrevivente, alocado em 1558,98 nm (canal 8) e modulado por um gerador de padrão utilizando uma sequência pseudo-aleatória de $2^{23}-1$, sendo, na saída do AUT, separado por um demultiplexador (DEMUX). Após a demultiplexação, uma amostra do sinal do canal sobrevivente referente

à saída de 10% de um acoplador 90%-10%, é enviada a um fotodetector de entrada do circuito de recuperação de relógio (eventualmente passando por um atenuador variável para evitar excesso de potência). Os 90% restantes do sinal são acoplados a um segundo acoplador 90%-10%. Após este segundo acoplador, 10% do sinal óptico de saída é fotodetectado, com o sinal elétrico resultante sendo acoplado aos osciloscópios 1 e 2. O osciloscópio 1, a partir do sinal elétrico, produz um sinal de *trigger* para o gerador de pulso 2, o qual gera um pulso de gatilho sincronizado em relação à resposta do AUT para que a medida de BER possa ser realizada com um atraso de tempo adequado e dentro do período desejado. O osciloscópio 2 permite monitorar a resposta óptica do AUT em conjunto com as amostras do gerador que controla a inserção e retirada de canais (gerador 1) e os pulsos de controle (gerador 2). Os outros 90% do sinal advindos do acoplador 2 são convenientemente atenuados (ATT) e enviados para um fotodetector PIN, cuja fotocorrente é utilizada para a medida do fator Q através da operação do medidor de BER em modo de rajada.

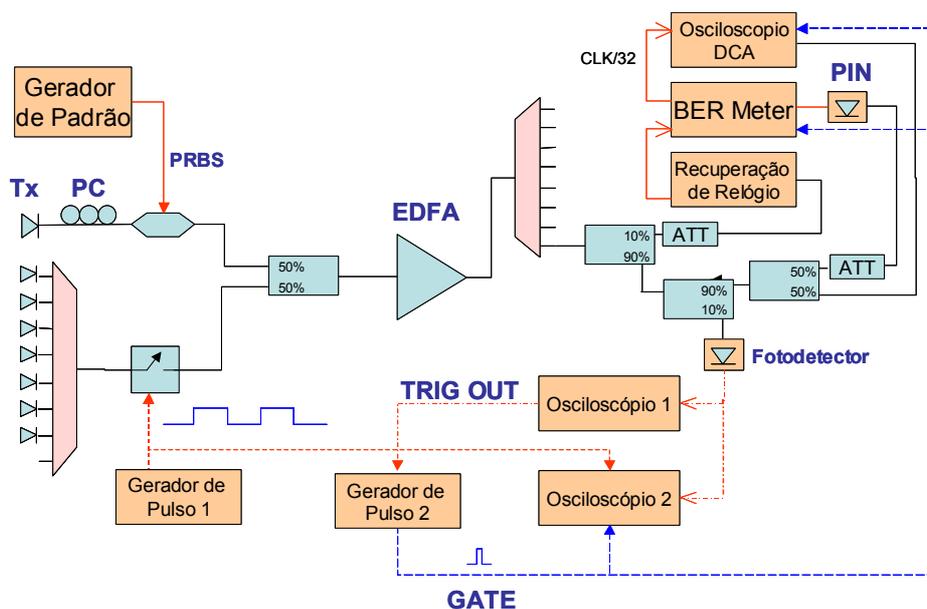


Fig. 4.1: Arranjo experimental utilizado na implementação do método de análise sistêmica.

Na análise do comportamento transiente de EDFAs com controle de ganho, utilizou-se, como AUT: um EDFA com controle de ganho totalmente óptico; um EDFA com controle automático eletrônico de ganho baseado em alimentação adiante; e um EDFA com controle

automático eletrônico de ganho realimentado. Através de modificações no *firmware* do microcontrolador utilizado no EAGC-EDFA, habilita-se a operação de alimentação adiante assim como a técnica de controle realimentada. Também é possível, através da fixação do nível dos bombeios no máximo (são utilizados dois bombeios, ver Fig. 3.11), fazer com que o mesmo EDFA opere sem nenhum controle de ganho, o que será útil como base de comparação para as técnicas de controle a serem analisadas.

Ambos os EAGC-EDFA, com alimentação adiante e realimentado, operam como amplificadores de potência, tendo sua entrada composta por oito canais com uma potência de entrada por canal de -4,3 dBm, resultando em uma potência de entrada total de +4,7 dBm. Quanto ao AOGC-EDFA utilizado, o mesmo foi descrito anteriormente naquele capítulo (ver Fig. 3.1). Como citado anteriormente, este só opera com eficiência em termos de controle de ganho para potência de entrada inferior à -2 dBm, devido à baixa eficiência da ASE quando sinais de entrada de alta potência são acoplados. Assim, o AOGC-EDFA analisado possui características de operação semelhantes às de um amplificador de linha, tendo sua entrada composta por oito canais que exibem uma potência de -20 dBm por canal, totalizando -11 dBm de potência de entrada total.

4.1.2 Resultados Experimentais

Durante os experimentos, a inserção e a retirada dos canais são controladas pela duração do pulso de controle (gerador de pulsos 1). O ajuste do intervalo de chaveamento é adequado a cada tipo de técnica de controle à qual o EDFA é submetido. A duração do intervalo de medição do fator Q é determinada pela duração do pulso gerado no gerador de pulsos 2. Como já mencionado, este pulso é utilizado como referência para o medidor de BER operar no modo de rajadas (medidas acontecem apenas durante o intervalo deste pulso). A duração deste pulso de controle depende do tempo de resposta exibido pela técnica de controle utilizada no EDFA.

Primeiramente, para se criar uma base de comparação em relação à eficiência do controle de ganho obtida pelas técnicas de controle a serem testadas, o método foi aplicado para a observação do comportamento transiente de um EDFA sem controle de ganho

(EDFA sem AGC), Fig. 4.2. A inserção e retirada de sete de oito canais foi controlada pela chave acústico-óptica, modulada por uma onda quadrada de 500 μs de período. O pulso de controle foi ajustado para 10 μs de duração, sendo o mesmo sintonizado ao longo do tempo, tomando como base a potência de saída do canal sobrevivente (curva azul/escuro) na Fig. 4.2. Através de um programa em *Labview*, a sintonia do pulso foi controlada no tempo e as medidas de BER foram coletadas durante o intervalo após a sintonia do pulso. Obtiveram-se, então, para diversos níveis de potência óptica, as medidas no medidor de BER correspondentes ao intervalo de tempo onde o pulso foi sintonizado. Através destas medidas, pode-se determinar a média e o desvio padrão dos bits “1” e dos bits “0”. Assim através da equação (3.1), onde I_1 , σ_1 e I_0 , σ_0 representam, respectivamente, a média e o desvio padrão dos bits “1” e “0”, obtem-se o valor do fator Q.

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (4.1)$$

A Fig. 4.2 ilustra os resultados da análise para o canal sobrevivente (1558,98 nm) após o EDFA sem controle de ganho.

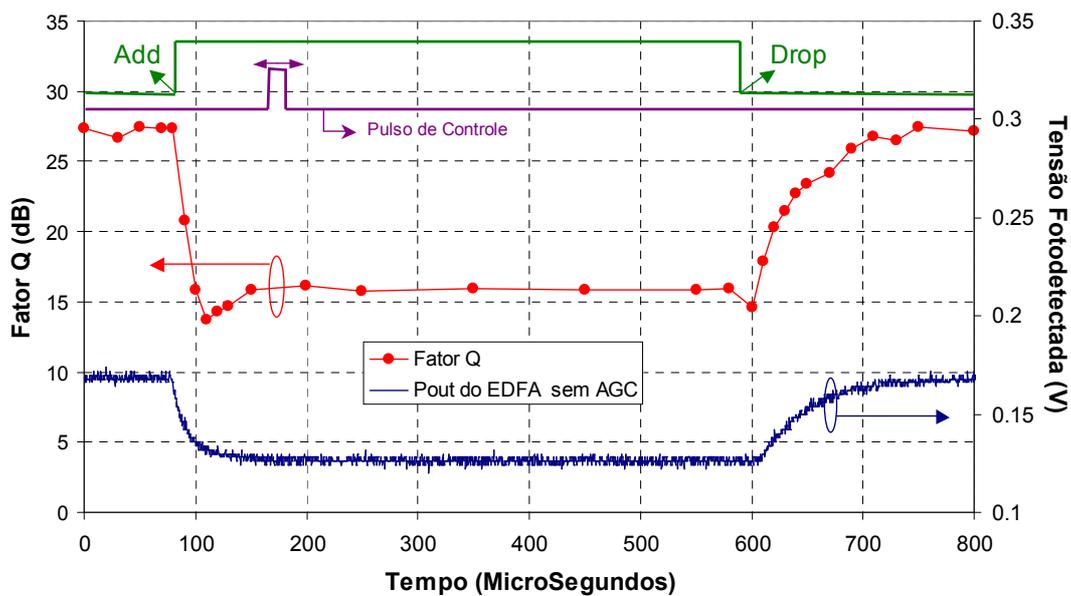


Fig. 4.2: Análise sistêmica, através do fator Q, para o EDFA sem controle de ganho.

Como pode ser verificado na Fig. 4.2, antes dos canais serem inseridos na entrada do EDFA (curva que apresenta a adição e a remoção), o fator Q medido estava em torno de 27 dB (curva com círculos). Quando os canais são inseridos (adição - *add*), diminuindo assim rapidamente o nível de potência do canal sobrevivente (curva azul/escuro), o fator Q medido chega a um mínimo de 13,71 dB, alcançando 16 dB após 50 μ s. Quando os canais são retirados (remoção - *drop*), o fator Q reduz-se a 14,6 dB antes de retornar aos 27 dB após 100 μ s. O pulso de controle de 10 μ s utilizado nas medições é ilustrado na segunda curva de cima para baixo. Analisando-se a Fig. 4.2, conclui-se que o comportamento do fator Q está diretamente relacionado à forma com que a potência óptica de saída do canal sobrevivente varia. A variação de 13 dB no fator Q, frente à inserção e retirada de canais, exibe claramente o severo impacto de curta duração causado pela ausência de controle de ganho nos EDFAs. Tal comportamento poderia, por exemplo, induzir perdas em sistemas onde os canais WDM transportam pacotes, como nas redes IP/WDM.

Utilizando as mesmas configurações (duração dos pulsos de controle), o desempenho sistêmico do mesmo canal sobrevivente em termos do fator Q foi analisado considerando o EDFA com controle automático de ganho totalmente óptico, Fig. 4.3.

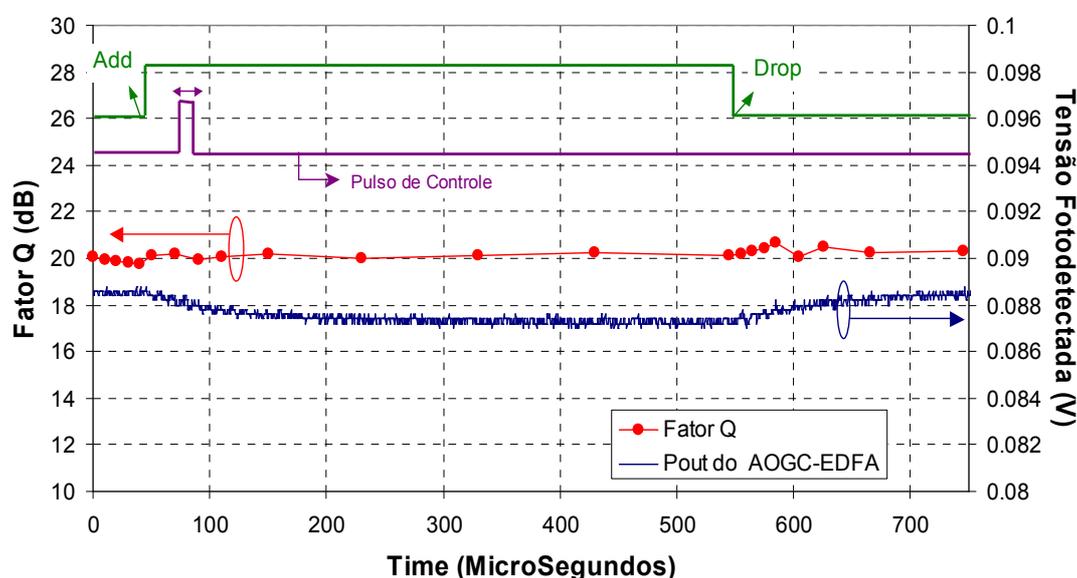


Fig 4.3: Análise sistêmica, através do fator Q, para o AOGC-EDFA.

A Fig. 4.3 ilustra os resultados obtidos para o AOGC-EDFA, onde se procurou minimizar a influência das oscilações de relaxação em um amplificador com ganho de 20 dB e com variações de ganho menores que 0,5 dB, frente à inserção e retirada de sete dos oito canais.

Verifica-se claramente na Fig. 4.3 (curva com círculos) que o impacto sistêmico causado pela inserção e retirada dos canais é extremamente reduzido, quando comparado àquele do EDFA sem AGC. O fator Q medido ao longo do ciclo de inserção e retirada dos canais manteve-se praticamente constante em 20 dB.

Na seqüência, aplicou-se o método para a análise da resposta do canal sobrevivente após um EDFA com controle automático eletrônico de ganho, nos modos de alimentação adiante (*feedforward* – FF) e realimentado (*feedback* – FB), operando como amplificador de potência. O EAGC-EDFA utiliza um microprocessador que controla a potência de bombeio mantendo constante o ganho do EDFA de acordo com a monitoração de suas potências de entrada, de saída, ou de ambas. Para o controle com alimentação adiante (FF), que monitora apenas a potência de entrada, como já foi comentado no Capítulo 3, é necessária a obtenção e a gravação prévia, no microcontrolador, da curva de potência de bombeio versus potência de entrada para o ganho desejado. Já no controle realimentado (FB), o EDFA monitora as potências de entrada e saída. No microcontrolador, o ganho do EDFA é calculado e comparado ao ganho desejado. Em seguida, um sinal de controle é enviado ao laser de bombeio para atuar no ganho de modo a manter o valor desejado (são necessárias algumas interações até a estabilização do ganho). Ambos os métodos de controle eletrônico exibem tempos de atraso, devidos ao tempo de processamento do microprocessador. Foi observado que os tempos de resposta obtidos com os controles eletrônicos são duas ordens de grandeza superiores ao do AOGC-EDFA analisado (são necessárias dezenas de milissegundos para a estabilização do ganho).

Utilizando um pulso de controle de 1 ms e modulando a chave óptica com uma frequência de 200 Hz, o fator Q do canal sobrevivente foi medido para o EAGC-EDFA (FF e FB). Para o controle com alimentação adiante (FF), a Fig. 4.4 mostra as severas penalidades durante os transientes. Novamente, o fator Q demonstrou uma grande concordância com a potência de saída do canal sobrevivente. Também fica claro que o

impacto durante a remoção dos canais é mais intenso que durante a inserção. Em ambos os casos (inserção e remoção), durante os primeiros 3,5 ms, o controle de ganho não atua devido ao processamento do circuito eletrônico de controle.

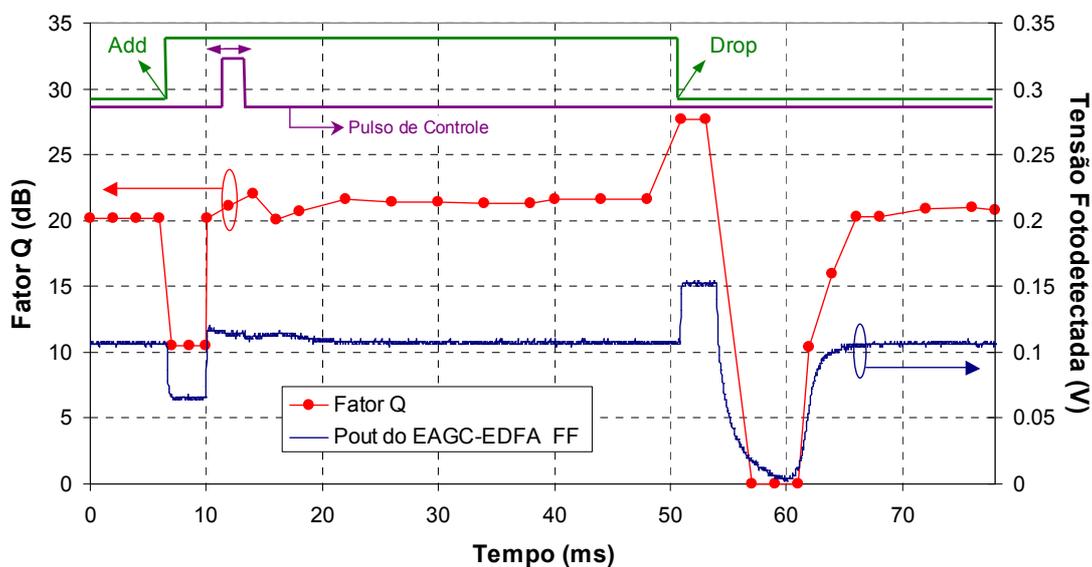


Fig. 4.4: Análise sistêmica, através do fator Q, para o EAGC-EDFA com alimentação adiante (FF).

Verifica-se, na Fig. 4.4, que o fator Q medido é reduzido de 20 dB para 11 dB após a inserção de canais, o que também causa um decréscimo no ganho do canal sobrevivente. Um acréscimo de 6 dB é verificado após a remoção dos canais. Com relação à adição dos canais, após 4 ms, o fator Q é reestabilizado no patamar inicial dos 20 dB. Já com relação à remoção de canais, o ganho é controlado corretamente após 12 ms, quando o fator Q medido retorna ao patamar dos 20 dB. No intervalo compreendido entre 3,5 ms e 9 ms após a remoção dos canais, uma completa ausência de potência é detectada no canal sobrevivente, causando inclusive a perda de sincronismo no medidor de BER utilizado. O desempenho deste tipo de controle compromete a sua utilização em redes com roteamento por comprimento de onda. No entanto, mais uma vez, o método de medição mostrou-se eficaz, representando fielmente o resultado esperado que advem da análise da potência de saída do canal sobrevivente. Como já apresentado no Capítulo 3, o desempenho do controle de ganho eletrônico com alimentação adiante, utilizado no controle híbrido, foi

sensivelmente melhorado. As amplitudes das oscilações, assim como o tempo de resposta, foram aperfeiçoadas, inclusive, utilizando o pré-controle óptico para redução dos efeitos causados na remoção dos canais.

A Fig. 4.5 ilustra as medidas do fator Q para o canal sobrevivente utilizando o EAGC-EDFA com a técnica realimentada. Intencionalmente, um controlador proporcional ao erro de passo fixo em 1 mW de potência de bombeio foi utilizado no intuito de se ter um controle com um maior número de interações, para assim analisar a evolução do fator Q ao longo do transiente. Um tempo de resposta de 40 ms foi obtido, ficando claro, na curva de potência de saída, as pequenas atuações no bombeio representadas por pequenos degraus. O comportamento do fator Q seguiu novamente o perfil da potência de saída do EDFA, variando de 18,9 dB para 20,1 dB após a inserção e a retirada de canais, respectivamente. Esta diferença é causada pelos 0,5 dB de tolerância admitidos no controle de ganho projetado.

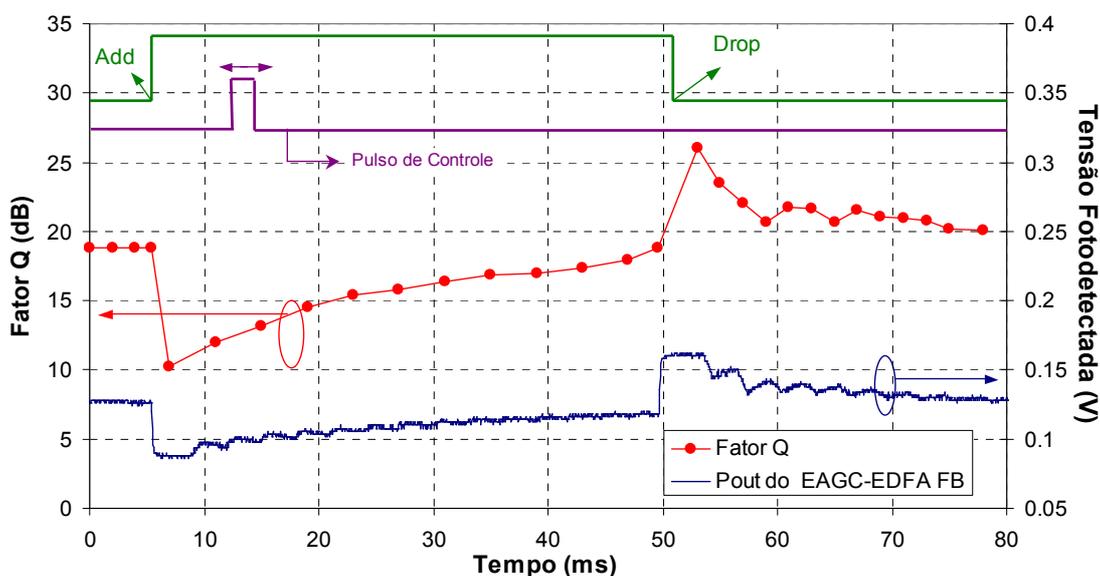


Fig. 4.5: Análise sistêmica, através do fator Q, para o EAGC-EDFA realimentado (FB).

Utilizando diferentes técnicas de controle de ganho, assim como um EDFA com a ausência delas, investigou-se o impacto sistêmico através do fator Q causado pelos transientes dos EDFAs após a inserção ou remoção de canais para um dado canal

sobrevivente. Além da descrição do método de medição sistêmica ultra-rápido (através do arranjo experimental), foi observado que o controle automático de ganho totalmente óptico apresenta um desempenho adequado para operação como um amplificador de linha ou pré-amplificador, exibindo uma alta eficiência no controle de ganho, com reduzidas oscilações de potência durante os transientes causados pela inserção e remoção de canais na entrada do EDFA. Já para o controle de ganho eletrônico, projetado para operação de alta potência nos modos de alimentação adiante e realimentado, foram observados tempos de resposta lentos, capazes de produzir um severo impacto nos sistemas que utilizam este tipo de EDFA. Dessa maneira, conclui-se que o AOGC-EDFA apresenta uma solução eficaz para operação como amplificador de linha ou pré-amplificador; no entanto, se for necessária a operação como amplificador de potência, ainda são necessários ajustes na técnica eletrônica utilizada para evitar penalidades durante os transientes do EDFA. Ajustes estes que não foram alvo deste trabalho, ou seja, algumas melhorias foram realizadas e são apresentadas no Capítulo 3; porém, a otimização da resposta do circuito eletrônico não foi contemplada, cabendo a este trabalho o desenvolvimento de uma técnica eletrônica capaz de acoplar a sua faixa de operação com a proporcionada pelo controle óptico, assim como possuir uma faixa dinâmica capaz de atuar de maneira complementar. A otimização do tempo de resposta, denominada supressão de transientes, deverá ser realizada utilizando processadores digitais de sinais (DSP) ou microprocessadores de altíssimo desempenho, e constituem uma das propostas de trabalho futuro a serem apresentadas neste trabalho.

4.2 Controle Automático de Ganho Aplicado a EDFAs de Dupla Passagem que incorporam DCFs

A aplicação do método de controle totalmente óptico a um EDFA de dupla passagem, que incorpora fibra compensadora de dispersão (DCF - *dispersion compensation fiber*), também foi analisada durante este trabalho. Identificou-se a possibilidade de adicionar o controle de ganho à configuração apresentada em [62], tornando-a ainda mais atrativa e habilitando o seu uso em redes com roteamento por comprimento de onda. O intuito é o de prover um EDFA de dupla passagem (utilizando poucos metros de fibra dopada), que seja

capaz, além de compensar a dispersão do enlace (através da incorporação de uma DCF), de controlar o ganho do EDFA. Ao integrar todas estas funcionalidades, ter-se-á obtido um amplificador de tripla função (amplificação, reformatação e controle de ganho), por meio de uma configuração com custo reduzido e de baixa complexidade de montagem. Este amplificador foi caracterizado e testado utilizando um sistema de 10 Gb/s de 100-km de extensão, composto por 16 canais DWDM na banda C.

4.2.1 Introdução

Amplificadores a fibra dopada com érbio (EDFAs) têm sido alvo de diversas análises e melhorias desde sua concepção, no fim da década de 80. Uma breve lista certamente mencionará o desenvolvimento de novos tipos de fibras dopadas com érbio, incluindo fibras de alta concentração de íons, primeiramente utilizadas para banda L [63], tão quanto as fibras com vários núcleos (*depressed cladding*) para aplicações na banda S [64]. Em conjunto com a disponibilidade de lasers de bombeio de 980-nm com encapsulamento mini-DIL, estes avanços permitiram o surgimento de novas configurações com melhoria de desempenho de ganho e figura de ruído, compensação de dispersão cromática embarcada e operação multi-banda [65].

O controle automático de ganho, realizado através de técnicas ópticas ou eletrônicas, foi outra importante característica adicionada aos EDFAs nos últimos anos [66]-[55]. De fato, o controle de ganho torna-se essencial em amplificadores saturados quando freqüentes variações de ganho são induzidas por variações de potência óptica que ocorrem devido à reconfiguração da rede ou operações de *add/drop* nos canais ópticos. Para combinar todas estas funções, amplificação, controle de ganho, e compensação de dispersão, em um único circuito de amplificação, uma estrutura muito complexa e de custo excessivo se faz necessária, se baseada nas tradicionais configurações de EDFAs com duplo estágio. Como alternativa, foi proposto e demonstrado uma nova configuração de EDFA capaz de executar todas as funções descritas com base em uma configuração de dupla passagem. Uma importante vantagem relacionada aos amplificadores de dupla passagem é o fato de necessitarem de uma menor quantidade de componentes, para executar a mesma função que as configurações de duplo estágio bombeadas bidirecionalmente, causando assim uma

sensível diminuição no custo dos amplificadores. Com base na pesquisa bibliográfica realizada, esta é a primeira tentativa de incorporar todas estas três funcionalidades mencionadas em uma configuração de baixo custo e sem complexidade. O principal alvo de aplicação são as redes DWDM metropolitanas, onde a utilização do padrão 10G Ethernet e a reconfigurabilidade vem crescendo em larga escala.

4.2.2 Circuito Óptico do EDFA de Tripla Função (DP-AGC-EDFA c/ DCF)

O circuito óptico do EDFA de dupla passagem simples, de baixo custo e multifuncional, com controle automático de ganho (DP-AGC-EDFA - *double pass automatic gain control* EDFA) com DCF, é mostrado na Fig. 4.6. O circulador #1 foi utilizado na entrada do amplificador para acoplar a luz (1→2), assim como para retirar o sinal após a passagem pelo EDFA (2→3). Um *add/drop* no comprimento de onda de 1528 nm, constituído de três portas, foi posicionado após o circulador #1 com a função de formar o canal (laser) de controle necessário à técnica de controle automático de ganho totalmente óptico escolhida. Em uma das portas de saída do *add/drop*, foi colocado um atenuador óptico (A) seguido por um espelho rotacionador de Faraday (FRM – *Faraday rotator mirror*). Um circuito de amplificação padrão é posicionado após o *add/drop*. Um segundo circulador (#2) é colocado após o trecho de fibra dopada com érbio, conectando-a à fibra compensadora de dispersão (DCF). Como consequência, a luz retroespalhada, gerada pela passagem do sinal de saída da fibra dopada (amplificada uma vez) na DCF, é removida do circuito de amplificação pelo isolador do circulador #2, que provê uma isolação de 45 dB entre as portas 3 e 2 (3→2). Desta maneira, o sinal que é acoplado ao EDFA pelo circulador #1 passa pelo *add/drop*, em seguida é amplificado na fibra dopada com érbio pela primeira vez e acoplado, via circulador #2, à DCF (2→3). Após ser reformatado na DCF (sofrendo uma perda devido à perda de inserção da DCF) o sinal retorna ao estágio de amplificação através do circulador #2 (1→2), onde é novamente amplificado (compensando inteiramente a perda da DCF). Após a segunda amplificação, sinal mais ASE são acoplados ao *add/drop*, que, agora, seleciona uma faixa do ruído (ASE) em torno do comprimento de onda de 1528 nm e a direciona para o atenuador óptico e espelho. O espelho por sua vez, reflete e redireciona a amostra de ASE de volta para o estágio de

amplificação, formando assim a cavidade do laser de controle no comprimento de onda de 1528 nm. Quanto ao sinal transmitido (banda C), após as duas passagens (ida e volta) pela fibra dopada, este passa pelo *add/drop* e é acoplado ao circulador #1 (2→3), constituindo o sinal de saída do EDFA de dupla passagem com controle de ganho e compensação de dispersão.

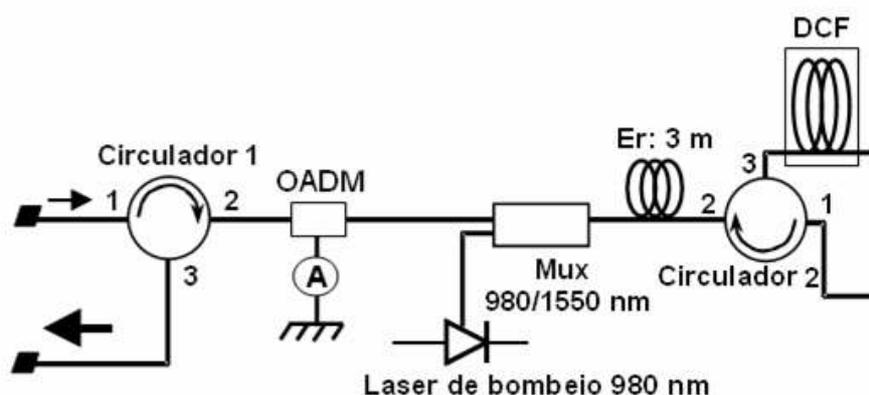


Fig. 4.6: Configuração do EDFA de dupla passagem com controle automático de ganho e compensação de dispersão (DP-AGC EDFA com DCF).

Um laser de bombeio de 120 mW no comprimento de onda de 980 nm foi utilizado para bombear um segmento de fibra dopada com érbio de alta concentração (HC-EDF – *High concentration erbium doped fiber*), a qual apresenta um pico de absorção de 16-24 dB/m em torno do comprimento de onda de 1530 nm. O comprimento selecionado para a fibra foi de 3 metros, sendo esta escolha determinada por simulações realizadas no software OASIX v.3.1. Não foi utilizado filtro de equalização. Nos experimentos, foram utilizados três diferentes módulos de DCFs, com dispersões negativas de 380 ps/nm (perda de inserção de 3 dB para os 4,87 km de comprimento), 680 ps/nm (perda de inserção de 6 dB para os 8,5 km de comprimento), e 1600 ps/nm (perda de inserção de 11 dB para os 20 km de comprimento).

4.2.3 Caracterização e Resultados Obtidos

O DP-AGC-EDFA com DCF foi inicialmente caracterizado sem o efeito do controle de ganho, o atenuador A com a atenuação máxima, impedindo a formação do canal de controle. A análise foi conduzida em termos de ganho e figura de ruído, utilizando 16 canais na banda C. Os canais foram alocados entre 1534,22 nm a 1558,99 nm, espaçados de 200 GHz. O conjunto de medidas, apresentado de forma gráfica na Fig. 4.7, foi obtido para três valores de potência de entrada por canal (-10, -20 e -30 dBm), utilizando o módulo de compensação de dispersão de 690 ps/nm. Mesmo com a DCF, o amplificador proporcionou valores satisfatórios de ganho. Considerando a região mais plana da banda C na saída do amplificador (1544 nm a 1560 nm), foram obtidos valores de ganho de 28 e 20 dB para as potências de entrada por canal de -30 e -20 dBm, respectivamente. A figura de ruído correspondente ficou entre 6 e 7 dB. Só para o caso onde a potência de entrada por canal é de -10 dBm, totalizando uma potência de entrada total de + 2 dBm, o ganho e a figura de ruído do DP-EDFA com DCF são significativamente degradados.

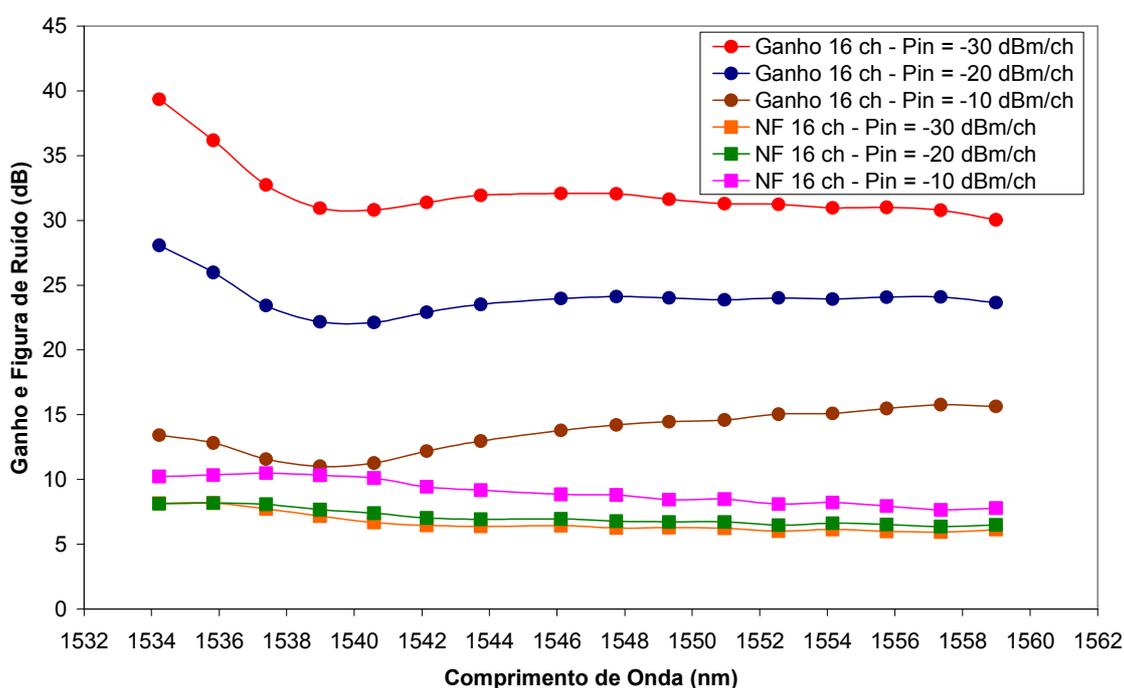


Fig. 4.7: Ganho e figura de ruído do DP-EDFA com DCF.

Como citado anteriormente, pode-se verificar que o DP-EDFA com DCF proporciona uma variação de ganho de aproximadamente 8 dB quando o nível do sinal de entrada varia de 10 dB/canal, exibindo assim a dependência do ganho com o nível do sinal de entrada. Esta característica do EDFA pode causar severas penalidades se o amplificador é utilizado em redes DWDM reconfiguráveis, causando saturação dos detectores na recepção (acréscimo de ganho), ou até mesmo excedendo o limite de detecção dos detectores (diminuição de ganho). Assim, torna-se necessário para a adequação deste tipo de amplificador às redes reconfiguráveis, a implementação de uma técnica de controle de ganho capaz de minimizar a dependência do ganho com a potência de entrada. Para o DP-EDFA com DCF proposto, como citado anteriormente, utilizou-se a técnica de controle totalmente óptico, cujo laser (canal) de controle tem sua eficiência controlada pelo atenuador óptico (AO) situado entre o *add/drop* e o espelho (Fig. 4.6).

Para a escolha do comprimento de onda do canal de controle, foram tomadas como base análises prévias realizadas [55-56], sendo o comprimento de 1528 nm escolhido pelo fato do mesmo minimizar os efeitos das oscilações de relaxação, devido ao maior distanciamento entre o canal de controle e os canais transmitidos. De fato, a escolha de um canal de controle fora da banda C permite, no mínimo, um acréscimo da utilização da banda C em 7 nm (dado que, na literatura relata-se que o canal de controle deve-se localizar em 1535 nm e guardar um espaçamento mínimo do primeiro canal da banda de 7 nm, para garantir uma penalidade sistêmica inferior a 1 dB). Além disto, a alta eficiência da ASE no comprimento de onda de 1528 nm para o EDFA utilizando fibra de alta dopagem contribui para que se possa assegurar uma maior faixa de potência de entrada com eficiente controle de ganho.

A Fig.4.8 ilustra o comportamento do ganho do amplificador proposto em função da potência de entrada total do DP-AGC EDFA com DCF e controle de ganho, para três diferentes níveis de atenuação da realimentação óptica, ou seja, distintas eficiências de controle de ganho. As medidas foram realizadas para o canal #10 (1550,22 nm), não possuindo esta escolha uma razão específica, já que todos os demais canais exibem comportamento similar.

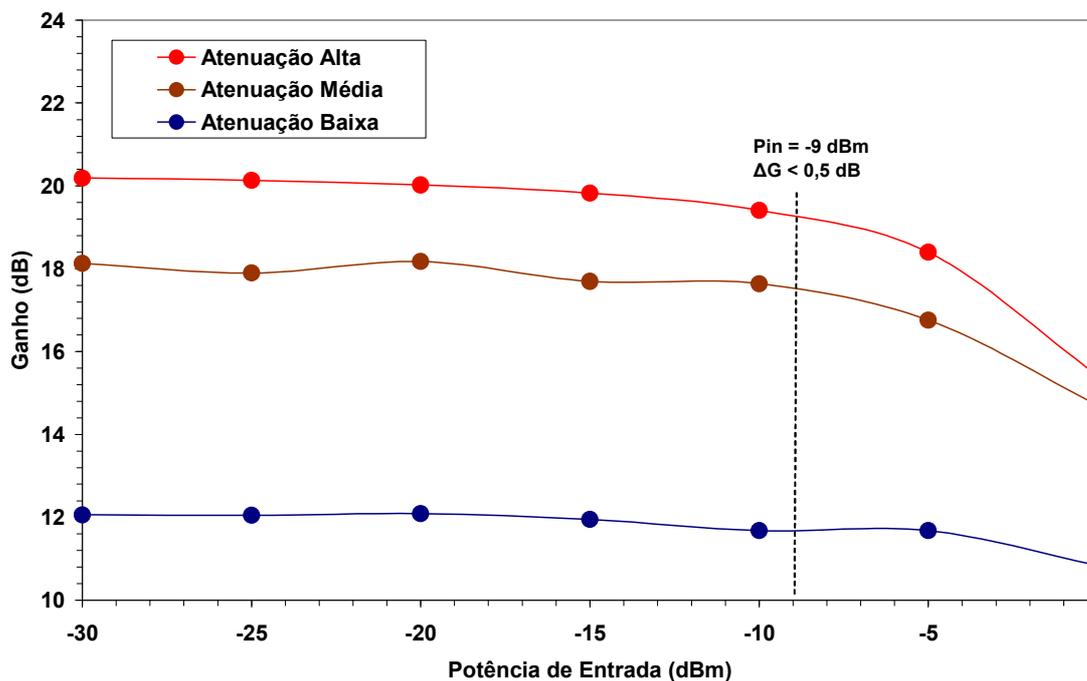


Fig. 4.8. Ganho versus potência de entrada total para três distintos níveis de eficiência do canal de controle do DP-AGC-EDFA com DCF.

Em contraste com resultados apresentados na Fig. 4.7, o amplificador com controle automático de ganho apresenta um desempenho superior em termos de variação de ganho, mantendo o ganho com variação inferior à 0,5 dB para potências de entrada até -9 dBm. Maiores valores de ganho para os canais transmitidos são possíveis de serem obtidos aumentando-se o nível de atenuação da realimentação óptica. No entanto, para isto, é reduzida a eficiência do canal de controle devido à sua diminuição de potência. Por outro lado, o aumento excessivo da eficiência do canal de controle pode levar o sistema a penalidades devido ao SHB. Assim, verifica-se na Fig. 4.8 que o ganho do DP-AGC-EDFA com DCF mantém-se praticamente invariável, independente da potência de entrada (até -9 dBm), mostrando a eficiência do método de controle de ganho, e, ainda, que o ganho pode ser ajustado para valores entre 12 e 20 dB, através da escolha do nível de atenuação presente na realimentação óptica.

Até este ponto, o DP-AGC-EDFA com DCF foi analisado quanto ao desempenho de ganho, variação de ganho e figura de ruído. A seguir, o comportamento transiente deste

amplificador será analisado. Para isto, foi utilizado um arranjo experimental composto por 16 canais, onde 15 deles são modulados por uma onda quadrada com uma frequência de 1 kHz simulando, assim, a inserção e retirada de 15 de 16 canais. O único canal que não é modulado (canal sobrevivente em 1550,22 nm) é acoplado aos demais canais, após um ajuste de atenuação prévio para garantir a mesma potência dos demais. Na saída do amplificador, o sinal sobrevivente é fotodetectado, sendo, então, analisado no domínio temporal, Fig. 4.9.

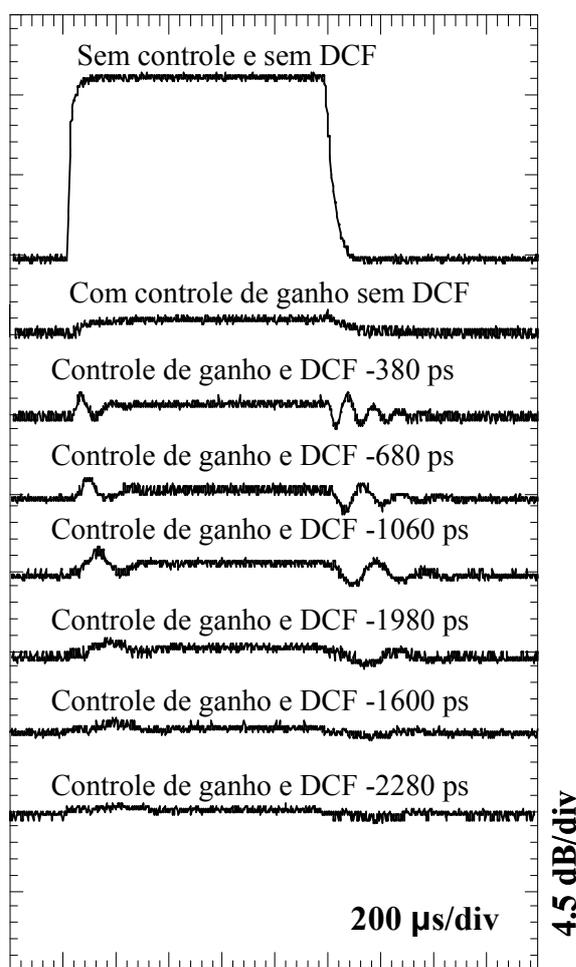


Fig. 4.9 Comportamento transiente do canal sobrevivente fotodetectado após a inserção e remoção de 15 canais, considerando o EDFA sem controle de ganho, com controle de ganho e sem DCF e com controle de ganho e DCF com diferentes comprimentos.

A Fig. 4.9 ilustra as formas de onda fotodetectadas para o canal sobrevivente em três diferentes cenários de amplificação: sem controle de ganho e sem DCF, com controle de

ganho e sem DCF e por fim, com controle de ganho e diversas combinações de comprimento de DCFs. Sem controle de ganho, a forma de onda detectada exibe uma forte variação de potência e, conseqüentemente, de ganho, quando ocorrem a inserção e a retirada de canais, como já era esperado. A variação de 12 dB na potência de entrada do EDFA causada pela inserção e retirada de 15 canais é quase completamente transferida à saída do EDFA, proporcionando uma severa variação de ganho de magnitude de 9,1 dB. Em contraste, quando o EDFA possui controle de ganho (com ou sem DCF), a potência do canal sobrevivente permanece praticamente inalterada frente à adição e remoção de canais, demonstrando a eficiência da técnica de controle de ganho utilizada. Continuando a análise da Fig. 4.9, são verificadas oscilações transientes no sinal fotodetectado quando se faz uso da DCF. Percebe-se também que, com o aumento do comprimento da DCF, as amplitudes das oscilações diminuem. Não há registros anteriores sobre a observação destas oscilações. Sua origem está associada ao excessivo comprimento da cavidade responsável pela formação do laser de controle, que é aumentada com a utilização da DCF. Portanto, devido ao aumento da cavidade, o tempo total de percurso (*round trip*) na cavidade aumenta significativamente, fazendo com que o processo de correção de ganho se torne mais lento devido ao maior tempo que o canal de controle necessita para a estabilização. Como se pode verificar, quanto maior o trecho de DCF, e, conseqüentemente, maior a cavidade, mais lento se torna o transiente. Com o aumento excessivo da DCF, o efeito se torna de mais difícil visualização devido à alta atenuação imposta pela DCF ao sinal, passando a afetar (reduzir) o nível de ganho do amplificador.

Completando a caracterização do amplificador proposto, a Fig. 4.10 ilustra o desempenho sistêmico do DP-AGC-EDFA com DCF através da análise da taxa de erro sob o canal sobrevivente (1550,22 nm). Neste caso, os 16 canais foram modulados externamente por uma seqüência binária pseudoaleatória de $2^{23}-1$, provida por meio de um gerador de padrão de taxa 10 Gb/s. A análise foi realizada em três condições: *back-to-back*, DP-AGC-EDFA sem DCF, e com o DP-AGC-EDFA com DCF inserido na metade de um enlace de 100 km de fibra padrão para três diferentes valores de compensação de dispersão (380, 680 e 1600 ps/nm).

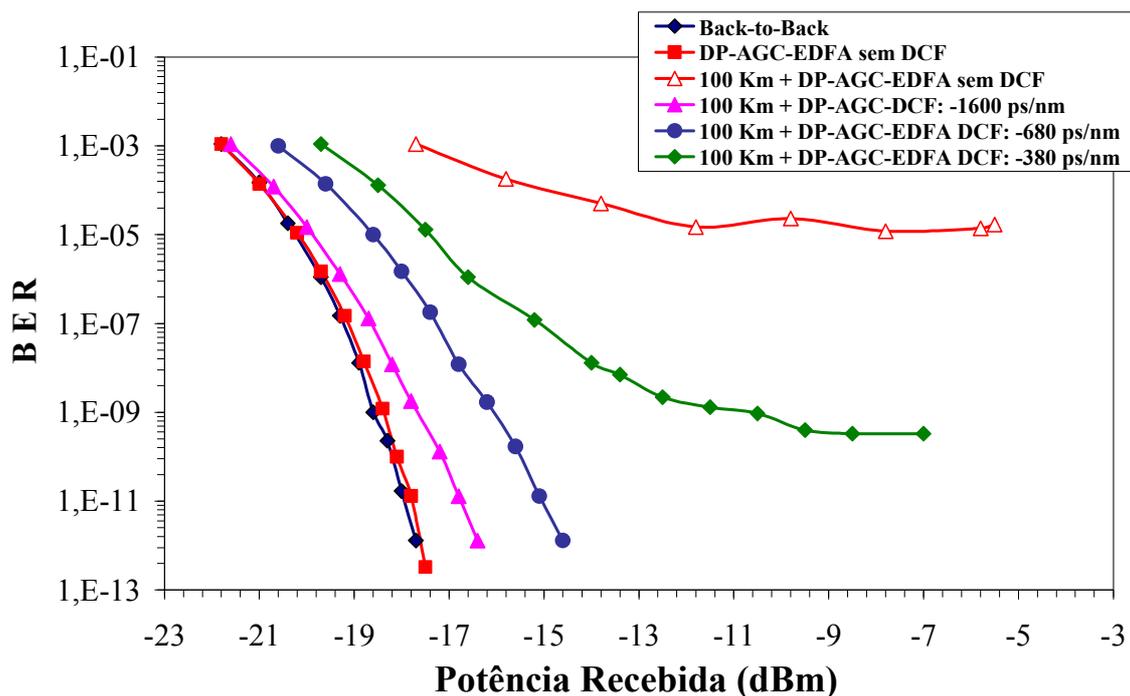


Fig. 4.10. Análise da BER de um enlace WDM com 100-km utilizando um DP-AGC-EDFA com diferentes módulos de DCF.

De acordo com a Fig. 4.10, verifica-se que o enlace de 100 km sem DCF exibe uma severa penalidade, exibindo um patamar de erro (*floor*) independente do nível de potência no receptor, o que deixa claro a penalidade introduzida pela dispersão cromática da fibra (~ 18 ps.nm/km) em um sistema de 10 Gb/s. Utilizando-se os módulos de DCF, o desempenho do sistema apresenta uma melhoria progressiva com o aumento da compensação de dispersão. De fato, com o módulo de DCF de 1600 ps/nm, a dispersão é quase que completamente compensada e o desempenho sistêmico torna-se próximo à condição de *back-to-back*, apresentando uma penalidade inferior a 1 dB.

O DP-AGC-EDFA com DCF proposto apresenta uma nova configuração de EDFA de dupla passagem e com DCF, na qual foi inserido, com mínimo acréscimo de componentes, um esquema de controle automático de ganho totalmente óptico. Um sistema DWDM de 16 canais a 10 Gb/s foi utilizado para permitir a caracterização do amplificador sob as mais severas condições de operação das redes ópticas, promovendo *add/drop* de todos os canais, exceto o sobrevivente. Um desempenho adequado em termos de variação de ganho foi

obtido: menor que 0,5 dB frente *add/drop* de 15 canais, para potências de entrada inferiores à -9 dBm. Também, a utilização de DCF no interior do amplificador para minimização da dispersão acumulada no enlace mostrou-se eficiente, além de proporcionar a visualização de um novo comportamento transiente causado pelo acréscimo no comprimento da cavidade. Por fim, a análise sistêmica do amplificador submetido a um enlace de 100 km apresentou um excelente desempenho, eliminando quase que completamente os efeitos da dispersão cromática acumulada e amplificando o sinal com uma suficientemente baixa adição de ruído. Assim, a configuração simples e de custo reduzido e multifuncional do DP-AGC-EDFA com DCF faz deste um bom candidato para uso em redes metropolitanas de alta capacidade.

Capítulo 5

Conclusões, Contribuições, Trabalhos Futuros e Publicações

Nesta tese, apresentou-se uma técnica de controle automático de ganho aplicada a amplificadores a fibra dopada com érbio, capaz de generalizar a aplicação deste fundamental dispositivo às redes ópticas. Utilizando de forma “serializada” as técnicas de controle de ganho totalmente óptica e eletrônica, foi possível implementar uma técnica de controle híbrida capaz de controlar o ganho do EDFA independentemente do nível do sinal de entrada ou do número de canais. Assim, a técnica de controle híbrida de ganho obtida proporciona ao EDFA a operação como amplificador de potência (*booster*), amplificador de linha ou pré-amplificador, generalizando a utilização da técnica de controle e habilitando as redes ópticas a uma sensível redução de custo e melhoria de operação. Utilizando a técnica de controle híbrida desenvolvida, os amplificadores da rede óptica se tornam independentes das atualizações da rede (aumento do número de canais instalados ou reconfigurações de rotas): isto ocorre devido a uma faixa dinâmica de controle superior a 33 dB, capaz de prover controle de ganho para sinais de entrada compreendidos desde a região de pequenos sinais do EDFA, até +10 dBm.

Os passos fundamentais para obtenção do controle híbrido de ganho se iniciaram com a otimização do controle automático de ganho totalmente óptico, onde foram minimizadas as oscilações de relaxação e aumentada a faixa dinâmica até -2 dBm por meio da utilização de um VOA na realimentação óptica. Em seguida, desenvolveu-se uma técnica de controle eletrônica capaz de controlar o ganho do EDFA para níveis de potência de entrada entre -14 dBm e +10 dBm por meio do ajuste da potência óptica do bombeio. Por fim, um cuidadoso projeto de união destas técnicas de controle foi implementado, acoplando as faixas

dinâmicas proporcionadas por cada uma delas, sem esquecer da supressão de transientes e da minimização do nível de figura de ruído.

Todos os EDFAs desenvolvidos nesta tese tiveram seu comportamento espectral e temporal analisados através de um cuidadoso processo de caracterização. Assim, verificou-se que o EDFA com controle híbrido, além da faixa dinâmica superior a 33 dB, apresentou um elevado nível de supressão de transiente, obtido ou através da utilização do controle totalmente óptico, para potências inferiores a -14 dBm, ou quando utilizando o controle eletrônico, através da utilização do conceito de pré-controle óptico, capaz de reduzir de forma significativa a amplitude da variação de potência, mesmo quando o ganho é controlado eletronicamente através da atuação no laser de bombeio.

Nesta tese, além do controle híbrido de ganho e das otimizações nas demais técnicas de controle utilizadas, outros resultados significativos foram apresentados. O desenvolvimento de uma técnica de medição sistêmica capaz de avaliar quantitativamente o impacto durante os transientes foi realizado. Através desta técnica de medição é possível avaliar qualquer transiente nas redes ópticas e não apenas os transientes causados pelos EDFAs. Dessa maneira, esta se torna uma importante ferramenta para o melhor conhecimento do impacto transiente em redes ópticas, e, conseqüentemente, torna possível mensurar o impacto sistêmico de qualquer equipamento a ser utilizado em uma rede reconfigurável. Outro importante resultado obtido nesta tese foi a incorporação do controle automático de ganho totalmente óptico a uma estrutura de amplificador óptico de dupla passagem com compensação de dispersão embutida. Através deste, se torna possível a utilização em redes metropolitanas de um EDFA capaz de prover as funções de controle de ganho, compensação de dispersão e amplificação do sinal, através de uma configuração de baixo custo e baixa complexidade. Os resultados obtidos para este DP-AGC-EDFA com DCF mostram a eficácia deste amplificador para sistemas de até 100 km operando em 10 Gb/s, onde os efeitos da atenuação, da dispersão e da variação de ganho foram quase que completamente compensados, com uma penalidade inferior a 1 dB.

5.1 Contribuições

A seguir serão enumeradas, na visão do autor, as principais contribuições desta tese:

i) Minimização das oscilações de relaxação e aumento da banda de amplificação do controle automático de ganho totalmente óptico através da alocação do canal de controle em 1528 nm.

O comprimento de onda de 1528 nm, que é simétrico ao de 1535 nm em relação ao pico de ASE do EDFA, proporcionou, devido à mesma magnitude de ASE, a mesma eficiência de formação do controle observada para 1535 nm. No entanto, com o canal de controle em 1528 nm, foi possível diminuir o impacto das oscilações de relaxação devido ao maior afastamento com os canais transmitidos, aumentando ainda a banda de transmissão, pois canais podem ser alocados a partir de 1535 nm, garantindo uma penalidade causada pela proximidade com o laser de controle inferior a 1 dB.

ii) Aumento da faixa dinâmica da técnica de controle totalmente óptica através da inserção de um atenuador óptico variável na realimentação óptica.

Para a técnica de controle de ganho totalmente óptico operar de maneira eficiente, se faz necessária a presença da ASE para a formação do canal de controle. Em todos os relatos anteriores ou não é utilizada, ou se utiliza uma atenuação fixa no interior da realimentação óptica para ajustar a eficiência do canal de controle, evitando assim que este retire ganho em demasia dos canais transmitidos. Porém, o fato da utilização de uma atenuação fixa limita o EDFA em termos de faixa dinâmica (em torno de -10 dBm), pois a atenuação ótima depende do nível de ganho desejado e da potência do sinal de entrada. Dessa maneira, utilizando um atenuador óptico variável na realimentação óptica, pôde-se aumentar significativamente a faixa dinâmica. Isto ocorre devido ao fato de, para um ganho desejado, é possível atuar na atenuação como resposta à variação de potência de entrada, de modo a manter constante o nível de ASE que circula na realimentação, e, conseqüentemente, a eficiência do laser de controle. Com isto, obteve-se um acréscimo de

faixa dinâmica que garante um eficaz controle de ganho (variação menor que 0,5 dB frente à variação no sinal de entrada de 12 dB) para uma potência de entrada de até -2 dBm.

iii) Controle Híbrido de Ganho

Através da junção do controle totalmente óptico otimizado com um controle eletrônico desenvolvido para controle do ganho de altos níveis de potência de entrada, foi possível o acoplamento das faixas dinâmicas associadas a cada uma destas técnicas, de modo transparente. Em outras palavras, o projeto de atuação do controle híbrido de ganho no EDFA, seja óptico ou eletrônico, determinado pelo nível de potência de entrada, entrega à rede óptica um amplificador capaz de oferecer o nível de ganho solicitado, independente do número de canais ou de reconfigurações na rede, para qualquer modo de operação do EDFA (*booster*, linha ou pré-amplificação). A supressão de transiente e o baixo nível de figura de ruído também foram características obtidas para o EDFA com controle híbrido de ganho desenvolvido.

iv) Desenvolvimento de uma técnica de medição ultra-rápida capaz de avaliar sistemicamente o transiente em redes ópticas.

Técnica de medição capaz de analisar sistemicamente, de forma qualitativa, os efeitos dos transientes em redes ópticas.

v) Amplificador óptico com dupla passagem controle automático de ganho e compensação de dispersão

O desenvolvimento de um EDFA com dupla passagem capaz prover controle de ganho e compensação de dispersão embutida através de DCFs foi realizado. Além de todas estas funcionalidades, o EDFA é desenvolvido com base em uma configuração de baixo custo e de baixa complexidade, tornando-o atrativo a sistemas metropolitanos.

5.2 Trabalhos Futuros

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

- i) Utilização de um VOA com resposta mais linear dentro da realimentação óptica com o intuito de melhorar a precisão da atenuação desejada.
- ii) Projeto de um controlador capaz de reduzir o tempo de resposta e os *overshoots/undershoots* do controle eletrônico digital.
- iii) Análise de outros circuitos ópticos utilizando o controle híbrido de ganho desenvolvido.
- iv) Aplicação da técnica de medição ultra-rápida na análise dos efeitos do cascadeamento de EDFAs e, também, de outros equipamentos utilizados em redes ópticas.
- v) Estudo dos fatores limitantes já estabelecidos na literatura para as técnicas de controle ópticas e eletrônicas, através da técnica híbrida de controle. Acredita-se fortemente que, devido ao fato desta técnica possuir um grau de liberdade a mais que as anteriores, que se baseiam ou no ajuste do bombeio, ou no ajuste da atenuação, há possibilidade de melhoria no desempenho espectral e temporal do EDFA. O estabelecimento de novos limitantes, melhorando o desempenho do EDFA, ou até mesmo a remoção destes limitantes através da utilização da técnica híbrida de controle de ganho também são esperados.

5.3 Publicações Referentes à Tese

J. C. R. F. Oliveira, J. B. Rosolem e A. C. Bordonalli, “All-optical gain controlled EDFAs with fast variable optical attenuator for WDM network applications”, Anais de Frontiers in Optics, FiO’2005, Tucson, Arizona, Estados Unidos, 2005.

J. C. R. F. Oliveira, J. B. Rosolem, R. F. Silva, L. R. Monte, R. Arradi, A. A. Juriollo e A. C. Bordonalli, “An all-optical gain controlled EDFA using a fast variable optical

attenuator”, Anais da International Microwave and Optical Conference, IMOC’2005, Brasília, Brasil, 2005.

J. C. R. F. Oliveira, S. M. Rossi, J. B. Rosolem, L. R. Monte, R. Arradi, C. Floridia, M. R. X. Barros e A. C. Bordonalli, “EDFA com controle automático de ganho eletrônico para aplicações em redes WDM”, Anais do XXII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, SBrT’2005, Campinas, Brasil, 2005.

J. C. R. F. Oliveira, J. B. Rosolem e A. C. Bordonalli, “Design characteristics of all-optical gain controlled EDFAs for WDM network applications”, *Microwave Opt. Technol. Lett.*, vol. 48, nº 6, pp 1222-1225, 2006.

J. C. R. F. Oliveira, J. B. Rosolem, R. F. Silva e A. C. Bordonalli, “Gain controlled EDFA with extended dynamic gain range”, Anais de Frontiers in Optics, FiO’2006, Rochester, Nova Iorque, Estados Unidos, 2006.

J. C. R. F. Oliveira, C. Floridia, S. M. Rossi, J. B. Rosolem e A. C. Bordonalli, “Evaluation of transient dynamic impact in gain controlled EDFAs”, Anais do International Telecommunications Symposium, ITS’2006, Fortaleza, Ceará, Brasil, 2006.

J. C. R. F. Oliveira, R. F. Silva, S. M. Rossi, R. Arradi, A. A. Juriollo, J. B. Rosolem e A. C. Bordonalli, “EDFA com controle automático de ganho híbrido e faixa estendida para operação como booster, linha ou pré-amplificador”, Anais do 12º Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica e 7º Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, MOMAG’2006, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, 2006.

J. C. R. F. Oliveira, J. B. Rosolem, A. A. Juriollo, M. A. Romero e A. C. Bordonalli, “Cost-effective multi-functional EDFA for metropolitan area networks”, Anais de Optical Amplifiers and Their Applications, OAA’2006, Whistler, British Columbia, Canadá, 2006.

J. C. R. F. Oliveira, J. B. Rosolem, A. A. Juriollo, M. A. Romero e A. C. Bordonalli, “Cost-effective double pass EDFA with embedded DCF and all-optical gain control for WDM network applications”, *Opt. Eng.*, SPIE, (no prelo).

J. C. R. F. Oliveira, S. M. Rossi, R. F. Silva, J. B. Rosolem e A. C. Bordonalli, “An EDFA Hybrid Gain Control Technique for Extended Input Power and Dynamic Gain

Ranges with Suppressed Transients”, International Microwave and Optical Communication Conference 2007 (IMOCC’2007), Salvador, Bahia, Brasil, (no prelo).

Referências Bibliográficas

[1] S. Kuwano e H. Wematsu, “Two-fiber unidirectional OADM ring system for L-band”, em *Anais de NFOEC 2000*, pp. 74-85, 2000, Denver, Estados unidos.

[2] D. Richards, J. Jackel, e M. Ali, “A theoretical investigation of dynamic all-optical automatic gain control in multichannel EDFAs and EDFAs cascades,” *IEEE J. of Select. Topics Quantum Electron.*, vol. 3, no. 4, pp. 1027-1036, 1997.

[3] Q. Yu e C. Fan, “Simple dynamic model of all-optical gain-clamped erbium-doped fiber amplifiers”, *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 17, no. 7, pp. 1166-1171, 1999.

[4] M. Zirngibl, “Gain control in erbium-doped fibre amplifiers by an all optical feedback loop”, *Electron. Lett.*, vol. 27, no. 7, pp. 560-561, 1991.

[5] S. Y. Ko, M. W. Kim, D. H. Kim, S. H. Kim, J. C. Jo e J. H. Park, “Gain control in erbium-doped fibre amplifiers by tuning centre wavelength of a fibre Bragg grating constituing resonant cavity”, *Electron. Lett.*, vol. 34, no. 10, 1998.

[6] J. C. R. F. Oliveira, J. B. Rosolem e A. C. Bordonalli, “ Design Requirements of All-Optical Gain Controlled EDFAs for WDM Network Applications”, em *Anais do Frontiers in Optics 2004*, Rochester, Estados Unidos.

[7] A. V. Tran, C. Chae, R. S. Tucker e Y.J. Wen, “EDFA Transient Control Based on Envelope Detection for Optical Burst Switched Networks”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 17, no. 1, pp. 226-228, 2005.

[8] C. Thian e S. Kinoshita, “Analysis and Control of Transient Dynamics of EDFA Pumped by 1480- and 980-nm Lasers”, *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 21, no. 8, pp. 1728-1734, 2003.

- [9] M. Fukutoku e M. Jinno, “Pump power reduction of optical feedback controlled EDFA using electrical feedforward control”, em *Anais da Optical Amplifiers and their Applications Conference*, pp. 32-35, 1998, Colorado, Canadá.
- [10] M. Hashimoto, M. Yoshida e H. Tanaka, “The characteristics of WDM systems with Hybrid AGC EDFA in the photonics network”, em *Anais da OFC'2002*, pp. 517-518, 2002, Anaheim, Estados Unidos.
- [11] J. Chung, S. Y. Kim e C. J. Chae, “All-optical gain-clamped EDFAs with different feedback wavelengths for use in multiwavelength optical networks”, *Electron. Lett.*, vol. 32, no. 23, pp. 2159-2161, 1996.
- [12] G. Luo, J. L. Zyskind, Y. Sun, A. K. Srivastava, J. W. Sulhoff, C. Wolf e M.A. Ali, “Performance degradation of all-optical gain-clamped EDFA's due to relaxation-oscillations and spectral-hole burning in amplified WDM networks”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 9, no. 10, pp. 1346-1348, 1997.
- [13] G. Luo, J. L. Zyskind, J. A. Nagel e M. A. Ali, “ Experimental and theoretical analysis of relaxation-oscillations and spectral hole burning effects in all-optical gain-clamped EDFA's for WDM networks”, *J. Lightwave Technol.*, vol. 16, no. 4, pp. 527-533, 1998.
- [14] G. Luo, J. L. Zyskind, Y. Sun, A. K. Srivastava, J. W. Sulhoff, C. Wolf e M. A. Ali, “Relaxation oscillations and spectral hole burning in laser automatic gain control of EDFAs”, em *Anais da OFC'97*, pp.130-131, 1997, Dalas, Estados Unidos.
- [15] J. T. Ahn and K. H. Kim, “All-optical gain-clamped erbium-doped fiber amplifier with improved noise figure and freedom from relaxation oscillation”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 16, no. 1, pp. 84-86, 2004.
- [16] M. Karásek e J. A. Vallés, “Analysis of channel addition/removal response in all-optical gain-controlled cascade of erbium-doped fiber amplifiers”, *J. Lightwave Technol.*, vol. 16, no. 10, pp. 1795-1803, 1998.
- [17] A. Yu e M. J. O'Mahony, “Design and modeling of laser-controlled erbium-doped fiber amplifiers”, *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 3, no. 4, pp. 1013-1018, 1997.

[18] B. Choi and C. Kim, "An Application of a Smart Optical Amplifier to the Bidirectional Transmission," em *Anais do ICACT'2006*, pp. 1074-1079, 2006, Phoenix Park, Korea.

[19] D.H. Thomas and J.P. von der Weid, "Dynamic Gain Fluctuations in All-Optic Ring-Laser Gain-Clamped Erbium-Doped Fiber Amplifiers," *Microwave Opt. Technol. Lett.*, vol. 44, no. 1, pp. 77-80, 2005.

[20] C. Kim, H. Yoon, S. Lee, C-H. Lee e Y. Chung, "All-Optical gain controlled bi-directional add-drop amplifier using fiber Bragg gratings," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol.12, pp. 894-896, no. 7, 2000.

[21] J. C. R. F de Oliveira, *Projeto de EDFAs com Controle de Ganho Totalmente Óptico para Aplicações em Redes WDM*, dissertação de mestrado, UNICAMP, Campinas, SP, 2004, (<http://libdigi.unicamp.br/document/?code=vtls000322036>).

[22] D. Richards, J. Jackel e M. Ali, "A theoretical investigation of dynamic all-optical automatic gain control in multichannel EDFAs and EDFAs cascades," *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.*, vol. 3, no. 4, pp. 1027-1036, 1997.

[23] J. T. Ahn, H. Seo, W. J. Chung, B. J. Park e K. H. Kim, "Characterization of an ASE Reflector-Based Gain-Clamped Erbium-Doped Fiber Amplifier", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 17, no. 3, 2005.

[24] H. S. Chung, H. H. Lee, J. C. Lee, M. J. Chu e J. H. Lee, "Reduction of relaxation oscillations in optical automatic gain clamped EDFA using fast electronic feedforward", *Electron. Lett.*, vol. 38, no. 5, pp. 215-217, 2002.

[25] Q. Yu, L. Zhou e C. Fan, "Stimulated Brillouin scattering of the compensating signal in all optical link-controlled amplifier systems", *Anais da OFC'99*, pp. 304-306, 1999, San Diego, Estados Unidos.

[26] Y. Chen, L. Zhang, Z. Jiang, Q. Yu e C. Fan, "Suppression of stimulated Brillouin scattering induced by the compensating signal in all-optical gain-clamped EDFA", em *Anais de International Conference on Communication Technology 2000 (ICCT 2000)*, pp 203-205, 2000, San Diego, Estados Unidos.

- [27] S. R. Luthi, M. T. Carvalho, e A. S. L. Gomes, “Transient gain behavior in 1050/1550-nm dual-wavelength pumped TDFAs”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 17, no. 5, pp. 995-997, 2005.
- [28] S. W. Harun, N. M. Samsuri e H. Ahmad, “Partial gain-clamping in two-stage double-pass L-band EDFA using a ring resonator”, em *Anais de International Conference on Semiconductor Electronics*, 3 pp., 2004, Scotland, UK.
- [29] T. Sakamoto, S. Aozasa, M. Yamada e M. Shimizu, “Hybrid fiber amplifiers consisting of cascaded TDFA and EDFA for WDM Signals,” *J. Lightwave Technol.*, vol. 24, no. 6, pp. 2287-2295, 2006.
- [30] C. R. Giles e E. Desurvire, “Transient gain and crosstalk in erbium-doped fibre amplifiers”, *Opt. Lett.*, vol. 14, no. 16, pp. 880-882, 1989.
- [31] E. Desurvire, M. Zirngibl, H. Presby e D. Di Giovanni, “Dynamic gain compensation in saturated erbium-doped fiber amplifiers”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 3, no. 5, pp. 453-455, 1991.
- [32] A. Bianciotto, A. Carena, V. Ferrero e R. Gaudino, “EDFA gain transients: experimental demonstration of a low cost electronic control,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 15, no. 10, pp. 1351-1353, 2003.
- [33] A. K. Srivastava, J. L. Zyskind, Y. Sun, J. Ellson, G. Newsome, R. W. Tkach, A. R. Chraplyvy, J. W. Sulhoff, T. A. Strasser, C. Wolf e J.R. Pedrazzani, “Fast-link control protection of surviving channels in multiwavelength optical networks”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 9, no.12, pp. 1667-1669, 1997.
- [34] S. Y. Park, H. K. Kim, Gap. Y. Lyu, S.M. Kang e S-Y. Shin, “Dynamic gain and output power control in gain-flattened Erbium-Doped fiber amplifier”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 10, no. 6, pp. 787-789, 1998.
- [35] S. Y. Kim, J. Chung e B. Lee, “Dynamic performance of the all-optical gain-controlled EDFA cascade in multiwavelength optical networks”, *Electron. Lett.*, vol. 33, no. 17, pp. 1475-1477, 1997.

[36] S. Sergeyev, S. Popov e A. T. Friberg, “Migration-assisted upconversion in high-concentration EDFA with electronic feed-forward gain control”, em *Anais da Quantum Electronics and Laser Science Conference*, pp. 1358-1360, 2005, San Jose, Estados Unidos.

[37] K. Jones, B. Flintham, J. Drake e H. Lebreton, “Gain control and transient suppression in long wavelength band EDFA modules”, em *Anais da ECOC'99*, pp. 152-153, 1999, Nice, França.

[38] N. Jolley, F. Davis e J. Mun, “Out-of-band electronic gain clamping for a variable gain and output power EDFA with low dynamic gain tilt”, em *Anais da OFC'97*, pp.134-135, 1997, Dallas, Estados Unidos.

[39] K. Okamura, E. Otani, T. Yoshikawa, T. Uchino, M. Fukushima e N. Kagi, “Optical burst amplification using EDFA with fast feedback control”, em *Anais da OFC'05*, 3 pp., 2005, Anaheim, Estados Unidos.

[40] Y. Taing e L. Pavel, “An EDFA H_∞ controller for suppression of power excursions due to pilot tones and network traffic”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 18, no. 18, pp. 1916-1918, 2006.

[41] Y. Taing e L. Pavel, “Application of H_∞ control on pilot tones in erbium-doped fiber amplifiers”, em *Anais do OAA 2005*, artigo ME15, Budapeste, Hungria.

[42] E. Otani, T. Okinawa, K. Okamura, T. Yoshikawa, T. Uchino e N. Kagi, “Amplification of WDM burst signals using EDFA with a fast feedback control”, em *Anais do LEOS 2005*, pp.298-299, 2005, Sydney, Australia.

[43] Q. Jiang, X. Liu, Q. Wang e X. Feng, “Dynamically gain control in the serial structure C + L wide-band EDFA”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 16, no. 1, pp. 87-89, 2004.

[44] H. Nakagi, Y. Nakai, M. Shigematsu e M. Nishimura, “Development of high-speed automatic gain controlled erbium-doped fiber amplifiers,” *SEI Technical Review*, no. 56, pp. 23-26, 2003.

[45] A. Lieu, C. Thian e T. Naito, “Transmission and interactions of WDM burst signals in cascaded EDFAs”, em *Anais da OFC 2006*, artigo OTuD5, 2006, Anaheim, Estados Unidos.

[46] L. Pavel, “Control design for transient power and spectral control in optical communication networks”, em *Anais do Conference on Control Applications*, pp. 451-422, 2003, Istanbul, Turquia.

[47] M. Fukutoku e M. Jinno, “Pump power reduction of optical feedback controlled EDFA using electrical feedforward control”, em *Anais da OAA 2005*, pp. 32-35, 1998, Colorado, Canadá.

[48] H. S. Chung, H. H. Lee, J. C. Lee, M. J. Chu e J. H. Lee, “Reduction of relaxation oscillations in optical automatic gain clamped EDFA using fast electronic feedforward”, *Electron. Lett.*, vol. 38, no. 5, pp. 215-217, 2002.

[49] H. S. Chung, S. H. Chang, H. Park, H. J. Lee e M. Chu, “Effect of optical delay on the suppression of the power transient excursion in a combined gain-controlled erbium-doped fiber amplifier”, *ETRI J.*, vol. 25, no. 6, pp 531-534, 2003.

[50] S. Sergeyev, E. Vanin e G. Jacobsen, “Gain-clamped dynamics in EDFA with combined electronic feed-forward-optical feedback control”, em *Anais da OFC 2002*, pp. 518-519, 2002, Anaheim, Estados Unidos.

[51] S. Sergeyev, E. Vanin e G. Jacobsen, “Theoretical model of instability-free operation for erbium-doped fiber amplifier with a combined gain control system”, em *Anais da OFC 2003*, pp. 19-20, Anaheim, Estados Unidos, 2003.

[52] Y. Liu e M. F. Krol, “Transient gain control in EDFA’s by dual-cavity optical automatic gain control”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 11, no. 11, pp. 1381-1383, 1999.

[53] G. J. C Wang, “Optical gain control of erbium-doped fiber amplifiers with a saturable absorber”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 12, no. 5, 483-485, 2000.

[54] J. C. R. F Oliveira, J. B. Rosolem, R. F. Silva, L. R. Monte, R. Arradi, A. A. Juriollo e A. C. Bordonalli, “An all-optical gain controlled EDFA using a fast variable optical attenuator”, em *anais do IMOC’05*, pp. 538-541, 2005, Brasília, Brasil.

- [55] J. C. R. F. Oliveira, J. B. Rosolem e A. C. Bordonalli, “Design characteristics of all-optical gain controlled EDFAs for WDM network applications”, *Microwave Opt. Technol. Lett.*, vol. 48, no. 6, pp. 1222-1225, 2006.
- [56] J. C. R. F. Oliveira, J. B. Rosolem e A. C. Bordonalli, “All-Optical Gain Controlled EDFAs with Fast Variable Optical Attenuators for WDM Network Applications”, em *Anais do Frontiers in Optics '05*, 2005, Tucson, Estados Unidos.
- [57] J. C. R. F. Oliveira, S. M. Rossi, J. B. Rosolem, L. R. Monte, R. Arradi, C. Floridia, M. R. X. de Barros e A. C. Bordonalli, “EDFA com controle automático de ganho eletrônico para aplicações em redes WDM,” em *Anais do SBrT'05*, Campinas, Brasil, 2005.
- [58] J. C. R. F. Oliveira, C. Floridia, S. M. Rossi, J. B. Rosolem e A. C. Bordonalli, “Evaluation of transient dynamic impact in gain controlled EDFAs,” em *Anais do ITS'06*, 2006, Fortaleza, Brasil.
- [59] J. C. R. F. Oliveira, A. C. Bordonalli e J. B. Rosolem, “Design requirements of all-optical gain controlled EDFAs for WDM network applications”, em *Anais do Frontiers in Optics '04*, 2004, Rochester, Estados Unidos.
- [60] C. J. A. Bastos-Filho, “Amplificadores Ópticos para Sistemas de Comunicação Multicanais de Alta Capacidade”, Tese de Doutorado, UFPE, Setembro, 2005.
- [61] W. S. Wong, H-S. Tsai, C-J. Chen, H. K. Lee, e M-C. Ho, “Novel Time-Resolved Measurements of Bit-Error-Rate and Optical-Signal-Noise-Ratio Degradations due to EDFA Gain Dynamics in a WDM Network”, em *Anais da OFC'02*, pp. 515-516, 2002, Anaheim, Estados Unidos.
- [62] J. B. Rosolem, A. A. Juriollo e M. A. Romero, “Polarization analysis in double-pass erbium-doped fiber amplifiers with an embedded-DCF module”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 16, no. 8, pp. 1828-1830, 2004.
- [63] D. R. Zimmerman e L. H. Spiekman, “Amplifiers for the masses: EDFA, EDWA, and SOA amplifiers for metro and access applications”, *J. Lightwave Technol.*, vol. 22, no. 1, pp. 63-70, 2004.

- [64] M.A. Arbore, Y. Zhou, G. Keaton e T. Kane, “36dB gain in S-band EDFA with distributed ASE suppression”, em *Anais do OAA'02*, paper PD-4-1, 2002, Vancouver, Canadá.
- [65] J. B. Rosolem, A. A. Juriollo, R. Arradi, A. D. Coral, J. C. R. F. Oliveira e M. A. Romero, “S-C-L Triple-Band Double-Pass Erbium-Doped Silica Fiber Amplifier With an Embedded DCF Module for CWDM Applications”, *J. Lightwave Technol.*, vol. 24, no. 10, pp. 3691-3697, 2006.
- [66] A. K. Srisvastava, Y. Sun, J. L. Zyskind, J. W Sulhoff, C. Wolff e R. W. Tkach, “Fast gain control in erbium-doped fiber amplifier”, em *Anais do Optical Amplifiers Applications*, OAA'96, 1996.
- [67] A. L. Schawlow e C. H. Townes, “Infrared and optical masers”, *Physical Review*, vol. 112, pp. 1940-1949, 1958.
- [68] C. J. Koester e E. A. Snitzer, “Amplification in a fiber laser”, *Appl. Opt.*, vol. 3, no. 10, pp. 1182, 1964.
- [69] R. J. Mears, L. Reekie, I. M. Jauncey e D.N Payne, “Low-noise erbium doped fibre amplifier operating at 1.54 μm ”, *Electron. Lett*, vol. 23 ,no. 19, pp. 1024-1028, 1987.
- [70] E. Desurvire, J. R. Simpson e P. C. Becker, “High gain erbium-doped travelling wave fiber amplifier”, *Opt. Lett.*, vol.12, no.11, pp. 888-890, 1987.
- [71] E. Desurvire, *Erbium-Doped Fiber Amplifiers - Principles and Applications*, 1st ed., Ed.: John Wiley & Sons, Nova Iorque, EUA, 1994.
- [72] S. Milo, Análise de Desempenho de Topologias de Amplificadores Ópticos a Fibra Dopada com Érbio, Dissertação de Mestrado, UNICAMP, Campinas, SP, 2003.
- [73] P. C. Becker, N. A. Olsson e J. R. Simpson, *Erbium-Doped Fiber Amplifiers – Fundamentals and Technology*, 1st ed., Academic Press, EUA, 1999.
- [74] M. R. X. de Barros e J. B. Rosolem, Amplificadores Ópticos a Fibra Dopada com Érbio, caderno de treinamento, CPqD - Telecom & IT Solutions, Brasil, 2000.
- [75] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, 2nd. ed., Academic Press, San Diego, CA, 1995.

[76] K. Kikuchi, “Enhancement of optical-amplifier noise by nonlinear refractive index and group-velocity dispersion of optical fibers”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 5, no. 2 pp. 221-223, Feb. 1993.

[77] M. Murakami e S. Saito. “Evolution of field spectrum due to fiber-nonlinearity-induced phase noise in in-line optical amplifier systems”, *IEEE Photon. Technol Lett.*, vol. 4, no. 11, pp. 1269-1272, 1992.

[78] A. Bjarklev, *Optical Fiber Amplifiers: Design and System Applications*, 1st. ed., Artech House, EUA, 1993.

Anexo A

Teoria Básica dos Amplificadores a Fibra Dopada com Érbio (EDFAs)

Neste apêndice, as características básicas dos amplificadores ópticos a fibra dopada com érbio são apresentadas. Parte-se de um breve histórico dos EDFAs, passando por sua configuração básica, seu mecanismo de amplificação, a introdução de seus parâmetros fundamentais, a descrição de suas aplicações, até se chegar, por fim, a outras configurações utilizadas.

A.1 Amplificadores a Fibra Dopada com Érbio (EDFAs)

A primeira descrição teórica do efeito da amplificação da luz foi realizada em 1958 [67] com a demonstração dos *masers* (*microwave amplified stimulated emission radiation*) que são lasers de microondas. A primeira análise das características de ganho de amplificadores a fibra dopada com íons da família das terras raras ocorreu com a demonstração deste tipo de dispositivo em 1964 [68]. No entanto, só em 1987 ocorreu a descoberta do processo de amplificação óptica através de lasers a fibra dopada com o íon da família das terras raras érbio [69–70]. A descoberta dos amplificadores a fibra dopada com érbio e a forma rápida com que esta tecnologia amadureceu, geraram uma infinidade de aplicações que revolucionaram o cenário das telecomunicações em todo o mundo. Antes do advento dos EDFAs, os sistemas de transmissão óptica de longo alcance consistiam de um transmissor e

um receptor unidos por trechos de fibra óptica interconectados por repetidores que promoviam a regeneração, a reformatação e o resincronismo do sinal, repetidores estes conhecidos como repetidores 3R (*retiming, reshaping, regeneration*). Nestes repetidores, a recuperação do sinal é feita através da conversão do sinal óptico para o domínio elétrico, onde este é, então, amplificado, resincronizado e reformatado para o formato de pulso desejado, antes de ser reconvertido para o domínio óptico. Este processo é possível de ser realizado apenas para um comprimento de onda, com uma taxa fixa de transmissão e um formato fixo de modulação por repetidor. Por estes motivos, sistemas com mais de um canal transmitido (WDM) necessitam de um repetidor por canal, e qualquer melhoria na taxa de transmissão ou mudança no formato de modulação exige a troca dos repetidores. Com o aumento da transmissão óptica multicanal, o custo destes sistemas (WDM), quando baseados em repetidores, tornaram-se bastante elevados tornando proibitivo em termos de custo a implementação de sistemas multicanais. Dessa maneira, fazia-se necessário uma tecnologia de amplificação que fosse capaz de amplificar diversos sinais ópticos na janela de baixa atenuação das fibras com baixos níveis de interferência entre os canais, daí emergiu, como uma solução em potencial, os EDFAs.

A amplificação proporcionada pelos EDFAs opera em uma ampla faixa de comprimentos de onda em torno de 1550 nm, que coincide com a janela de comunicação onde a fibra apresenta as menores perdas. Além disto a amplificação é feita de forma transparente à taxa de transmissão e ao formato de modulação. Devido a esta banda de operação e à sua localização espectral, os EDFAs tornaram-se uma tecnologia de importância estratégica, habilitando a implementação de enlaces ópticos com múltiplos comprimentos de onda, ou seja, enlaces do tipo WDM. A transmissão WDM provocou um aumento significativo no volume de informação transmitido, além de gerar uma maior flexibilidade na transmissão da informação nas redes ópticas, pois, devido à sua utilização nos sistemas ópticos, as distâncias entre os nós foram mais facilmente superadas. No que diz respeito à transparência dos EDFAs quanto à taxa de transmissão e formatos de modulação, pode-se dizer que esta característica possibilitou transmissão simultânea de diversos serviços na rede óptica, além do fato de possibilitar atualizações no sistema óptico sem necessidade da troca do equipamento repetidor.

A.2 Configuração Básica

Os elementos básicos que constituem um amplificador óptico a fibra dopada com érbio são, a fibra dopada com érbio, o laser de bombeio, o acoplador WDM e os isoladores, como ilustrado na Fig. A.1, que apresenta a configuração básica de um EDFA. No entanto, a configuração, o comprimento da fibra dopada e as características destes elementos dependerão da aplicação do amplificador.

O meio físico onde ocorre o processo de amplificação do EDFA é a fibra dopada com érbio que, libera energia na forma de luz na região em torno de 1550 nm. Portanto, para que a fibra dopada com Érbio seja capaz de prover a amplificação de sinais em sua faixa de operação, é necessário que os íons de Érbio que compõem a sua estrutura sejam excitados através da absorção de alguma forma de energia. Para tanto, a fonte de energia utilizada é a luz proveniente dos chamados lasers de bombeio, lasers semicondutores que operam em comprimentos de onda específicos que coincidem com uma das faixas do espectro de absorção do érbio.

O espectro de absorção do érbio fornece diversas faixas espectrais que podem ser utilizadas para o bombeio 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.

Na Fig. A.1 encontra-se ilustrado o esquema da configuração básica de um EDFA. Os dispositivos utilizados são a seguir descritos, assim como a função que cada um deles exerce no EDFA. O acoplador multiplexador de comprimento de onda, também denominado acoplador WDM, é utilizado para que se possa acoplar o sinal que se deseja amplificar e o bombeio simultaneamente na fibra dopada com érbio. Este acoplador é um dispositivo óptico com três ou quatro portas, projetado para combinar dois comprimentos de onda específicos injetados em suas portas de entrada. No caso dos EDFAs, os acopladores WDM utilizados para acoplar o sinal e o bombeio são os acopladores 980/1550 nm ou 1480/1550 nm, de acordo com a fonte de bombeio e a faixa do sinal a ser amplificado. Ainda, na Fig. A.1, observa-se o emprego dos isoladores ópticos na entrada e na saída do amplificador. Os isoladores ópticos são dispositivos que apresentam uma baixa perda no sentido de propagação e perdas muito altas no sentido contrário ao de propagação,

permitindo dessa maneira a passagem de luz em apenas um sentido. No EDFA o isolador óptico é utilizado para evitar as reflexões advindas dos conectores de entrada e saída do amplificador, evitando assim instabilidade no perfil de ganho do EDFA e, conseqüentemente, conseguir menores valores de figura de ruído. Quanto maior o ganho do amplificador maior a necessidade da utilização dos isoladores ópticos, pois as reflexões dos conectores e o retroespalhamento crescem com o aumento da potência de saída do EDFA. A fibra dopada com érbio é o meio ativo responsável pela amplificação do sinal. O ganho proporcionado pelo amplificador depende fortemente das características da fibra que está sendo utilizada. Fatores como a concentração de Érbio, a perda nos conectores de entrada e saída da fibra, a abertura numérica, o índice de refração, entre outros, determinam o perfil de ganho dos EDFAs. Por fim, o laser de bombeio, como mencionado anteriormente, é responsável pela excitação dos íons de érbio de tal modo a habilitar o meio ativo, a fibra dopada com érbio, a proporcionar ganho aos sinais em torno de 1550 nm. Posteriormente, ainda neste anexo, o processo de amplificação será mais cuidadosamente detalhado.

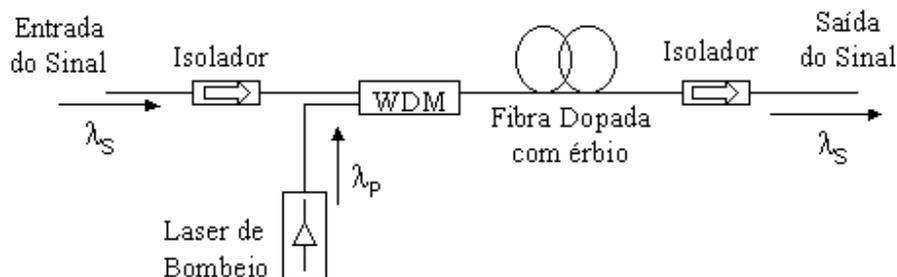


Fig. A. 1: Configuração básica de um EDFA.

Os dispositivos apresentados na Fig. A.1 podem ser rearranjados de diversas formas, gerando, com o seu rearranjo, ou com a adição de novos dispositivos ópticos, como os espelhos de Faraday e os circuladores ópticos, outras configurações de EDFA. Cada uma destas configurações propicia características particulares de operação permitindo assim a adequação do amplificador para diferentes aplicações. Exemplos de diferentes configurações de EDFAs serão apresentados ao longo deste apêndice.

A.3 Mecanismo de Amplificação

O processo de amplificação nos amplificadores a fibra dopada com érbio pode ser mais facilmente compreendido utilizando o modelo do diagrama de níveis de energia apresentado na Fig. A.2. Este diagrama mostra as transições eletrônicas que ocorrem durante o processo de amplificação, para os comprimentos de onda de bombeio de 980 nm e 1480 nm. Com o bombeio em 980 nm, tem-se um sistema de três níveis de energia, E_1 , E_2 e E_3 , que são denominados de nível fundamental, metaestável e de bombeio, respectivamente. Na ausência de bombeio ou de sinal (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, na presença de bombeio, a situação de equilíbrio pode ser alterada devido à população de íons dos níveis E_1 poderem absorver os fótons de bombeio passando para níveis de energia mais altos.

Para o bombeio operando no comprimento de onda de 980 nm, a absorção de fótons pelos portadores provoca, preferencialmente, transições do tipo de E_1 para E_3 . No entanto, como a tendência do sistema é a de retornar ao seu estado inicial de equilíbrio, os portadores excitados ao nível E_3 tendem a perder sua energia e retornar indireta ou diretamente para o nível fundamental E_1 . Apesar de decaimentos diretos ocorrerem, a maior parte dos portadores que foram excitados de E_1 para E_3 decai espontaneamente para o nível metaestável E_2 , liberando energia na forma de emissões espontâneas não radiativas [71]. Como as transições do nível E_3 para o nível E_2 são aproximadamente 10^4 vezes mais rápidas que as transições de E_2 para E_1 , para potências de bombeio suficientemente altas, a população de portadores do estado fundamental pode ser significativamente reduzida, tendendo os portadores, como um todo, a se acumularem no nível metaestável E_2 . Quando a população de portadores no nível metaestável (N_2) superar a população de portadores no nível fundamental (N_1), está configurado o processo denominado inversão de população, que garante a obtenção da amplificação óptica.

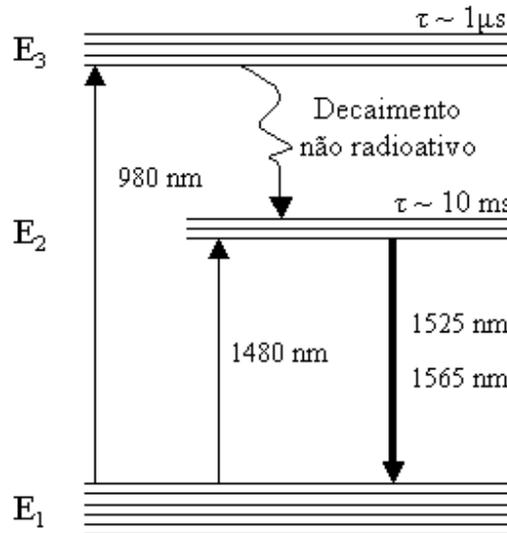


Fig. A.2: Diagrama esquemático dos níveis de energia para a fibra dopada com érbio com destaque para as transições ocasionadas pelos bombeios de 980 nm (três níveis) e 1480 nm (dois níveis).

Já a transição dominante de E₂ para E₁ 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. Assim, caso se acople um sinal à entrada do amplificador, este poderia estimular a emissão de fótons com mesmo comprimento de onda, fase, direção e polarização, ao longo da fibra dopada, numa reação em cadeia, produzindo a amplificação óptica desejada. Por um outro lado, fótons também podem ser emitidos por decaimentos espontâneos do nível metaestável para o nível fundamental, com comprimento de onda, fase, direção e polarização totalmente aleatórios. O problema da geração de fótons espontâneos é que estes são capazes de estimular o surgimento de outros fótons, de forma que o processo de amplificação não se limita apenas ao sinal de entrada, mais também, aos fótons aleatórios gerados pelo processo de emissão espontânea. Por este motivo, os fótons gerados por emissão espontânea são considerados ruídos indesejados neste processo de amplificação óptica. Ao processo de amplificação do ruído em um EDFA dá-se o nome emissão espontânea amplificada, (ASE - *amplified spontaneous emission*), que configura uma importante fonte de ruído nos sistemas de transmissão que utilizam EDFAs [72].

A Fig. A.3 ilustra o nível de potência óptica da ASE em função do comprimento de onda típico de um EDFA. Verifica-se que o perfil da ASE, que, de certa forma, representa

também o perfil de ganho em função do comprimento de onda do EDFA é irregular, e que se encontra presente em toda a faixa onde o EDFA é capaz de amplificar o sinal óptico. Esta irregularidade no perfil da ASE (e, conseqüentemente, do ganho) do EDFA torna-se bastante acentuada quando o érbio é o único dopante da fibra, como mostrado na Fig. A.3. Com o intuito de promover uma maior uniformidade no perfil de ganho do EDFA, as fibras atuais têm utilizado outros dopantes além do érbio, dopantes como o germânio, o alumínio dentre outros, que proporcionam uma equalização pronunciada do ganho principalmente entre os comprimentos de onda de 1540 a 1558 nm.

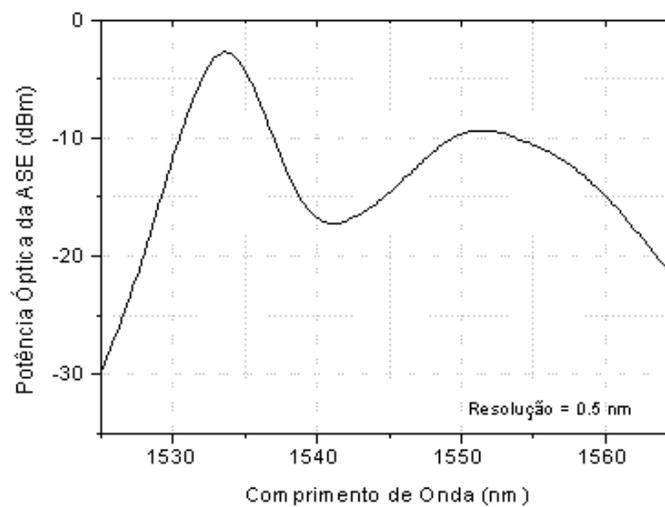


Fig. A.3: Dependência espectral da emissão espontânea amplificada em um EDFA.

A outra opção de bombeio, ilustrada na Fig. A.2, é o bombeio em 1480 nm. Para este comprimento de onda de bombeio, o processo de amplificação pode ser representado por um sistema de dois níveis, onde se verifica que, para uma determinada potência de bombeio capaz de provocar a inversão de população ($N_2 > N_1$) os portadores do nível fundamental (E_1) são diretamente excitados ao nível metaestável (E_2). Mais precisamente, estas transições ocorrem para os portadores dos sub-níveis de menor energia do nível E_1 , que, ao absorverem os fótons de bombeio, são excitados para os sub-níveis de maior energia do nível E_2 . Os portadores excitados tendem a perder energia de forma não radiativa no interior do próprio nível E_2 , resultando em uma população excitada final que permite transições em torno do comprimento de onda do sinal [73].

A.4 Parâmetros Fundamentais dos EDFAs

Três parâmetros básicos de importância fundamental na caracterização dos EDFAs são, o ganho, a figura de ruído e a potência de saída. Os valores destes parâmetros são determinantes para definição da localização dos EDFAs ao longo dos enlaces de comunicações ópticas.

Ganho

O ganho é um parâmetro do EDFA que depende de uma série de características de operação do amplificador, tais como, concentração do dopante (Érbio) na fibra, comprimento da fibra dopada, potência de entrada do sinal, potência de bombeio injetada, topologia empregada, entre outras. A Fig. A.4 mostra uma curva de ganho em função da potência de entrada típica de uma EDFA, para um determinado nível de bombeio aplicado. Através desta curva é facilmente verificado que, para baixos níveis de potência de entrada do sinal, o ganho do amplificador é praticamente constante. No entanto, a partir de um determinado ponto, o acréscimo da potência na entrada provoca uma sensível redução no ganho do amplificador, demonstrando que o ganho do amplificador depende do nível de potência de entrada.

O cálculo do ganho de um amplificador óptico (em decibéis, dB) é definido como o logaritmo da razão entre as potências do sinal na saída e entrada do amplificador, (em mW) como mostrado na equação (A.1) [74]:

$$G(\text{dB}) = 10 \times \log \left(\frac{P_S (\text{mW})}{P_E (\text{mW})} \right) \quad (\text{A.1})$$

onde, P_S representa a potência do sinal na saída e P_E a potência do sinal na entrada do amplificador.

Como pode ser observado na Fig. A.4, para potências de entrada abaixo de um determinado nível, o ganho do amplificador é praticamente constante. A região onde isto

ocorre é denominada de região de operação linear do amplificador, sendo o ganho nesta região chamado de ganho de pequeno sinal. Com o aumento da potência de entrada, o ganho começa a diminuir devido ao efeito de saturação. O ganho nesta região não é utilizado como parâmetro básico de referência para o amplificador, já que esse sistema é fortemente dependente da potência de entrada. Portanto, quando o valor do ganho de um EDFA é fornecido pelo fabricante, ou referenciado sem outra informação adicional, este corresponde ao valor do ganho de pequeno sinal, pois este parâmetro é independente do nível de potência de entrada do EDFA.

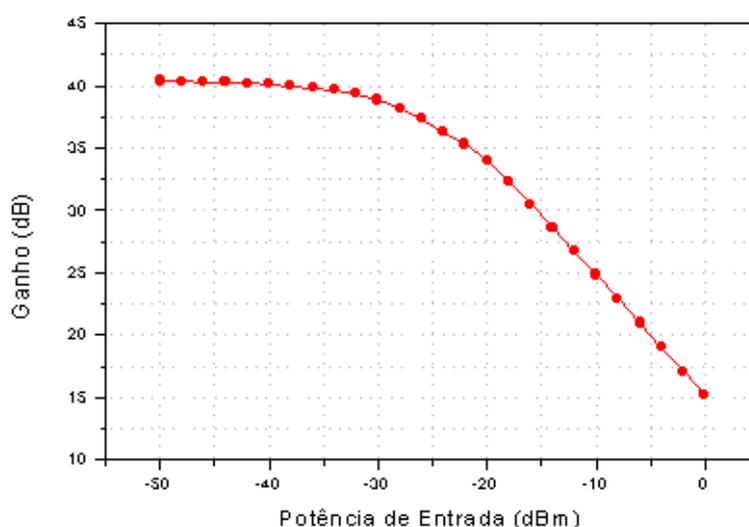


Fig. A.4: Curva de ganho em função da potência do sinal de entrada para um EDFA.

Um outro importante dado de caracterização de um EDFA é a curva de ganho em função do comprimento de onda. Como já observado na Fig. A.4, o amplificador tende a responder de forma diferente à amplificação. Desta forma, fica aparente a dependência do ganho com o comprimento de onda do sinal de entrada. A Fig. A.5 apresenta a curva de ganho em função do comprimento de onda para dois níveis de potência de entrada, -35 dBm e -15 dBm, onde o primeiro se encontra na região de pequenos sinais e o segundo na região de saturação. Como pode ser verificado, quanto mais saturado estiver o EDFA, mais plano é o perfil de ganho do amplificador. No entanto, na região de pequenos sinais o valor do ganho do EDFA é bem superior àquele na região de saturação, resultado este já

observado na curva de ganho em função da potência de entrada, Fig. A.4. Pode-se concluir, então, que o ganho na região saturada apresenta uma menor dependência com o comprimento de onda do sinal de entrada.

As curvas de ganho em função da potência de entrada e de ganho em função do comprimento de onda, Fig. A.4 e Fig. A.5, respectivamente, são curvas muito utilizadas na caracterização de qualquer EDFA.

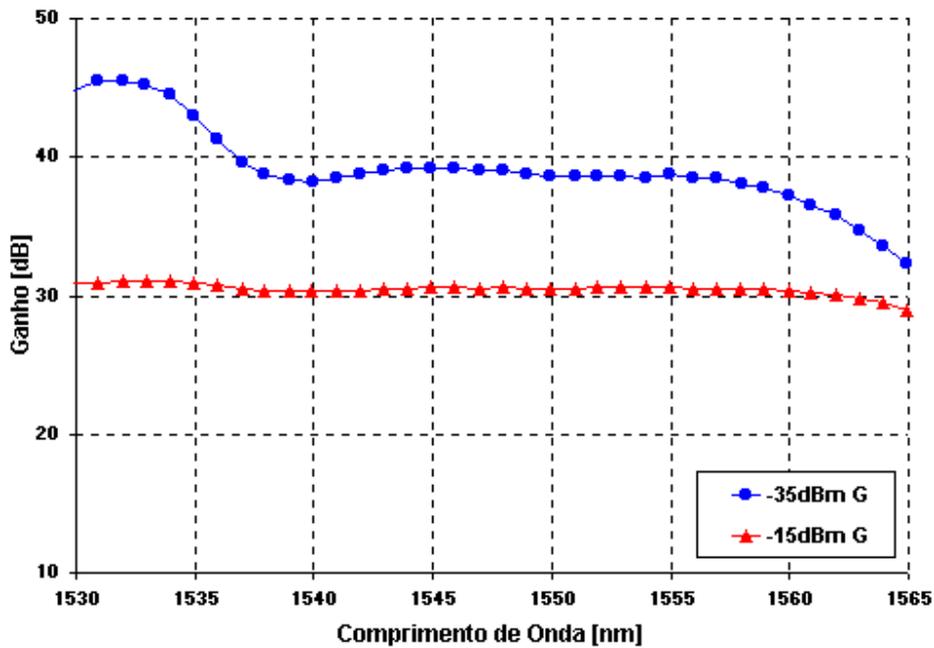


Fig. A.5: Curva de ganho em função do comprimento de onda para um EDFA.

Figura de Ruído

A figura de ruído (NF – *noise figure*) indica numericamente a quantidade de ruído adicionada ao sinal pelo amplificador. No caso do EDFA, a figura de ruído leva em consideração a principal fonte de ruído introduzida pelo amplificador, que é a ASE emitida pela fibra dopada com érbio. A figura de ruído definida por:

$$NF = \frac{SNR_E}{SNR_S} \quad (A.2)$$

onde, SNR_E é a relação sinal/ruído na entrada e SNR_S é a relação sinal/ruído na saída do amplificador.

A figura de ruído pode ser medida de diversas formas. Uma delas, comumente utilizada, e distinta da anteriormente descrita na Seção 3.3.3, consiste em medir o nível de ASE no comprimento de onda do sinal. Para isto, é realizada uma média entre o nível de ASE medido à direita e à esquerda do comprimento de onda do sinal (P_{ASE}), sendo a figura de ruído dada pela equação A.3 [74].

$$NF = 10 \times \log \left(\frac{P_{ASE}}{h\nu(G-1)\Delta\nu} \right) \quad (A.3)$$

onde, G é o ganho do amplificador, h é a constante de Planck, ν é a frequência óptica do sinal, e $\Delta\nu$ é a largura de banda óptica (resolução do osciloscópio) utilizada para medir a ASE.

O ruído ASE gerado em um EDFA pode, em muitos casos, ser o fator limitante do desempenho de um enlace de comunicações ópticas. Em alguns sistemas o próprio ruído ASE tende a saturar o amplificador, causando problemas na amplificação dos canais a ponto de degradar a relação sinal/ruído na saída do amplificador. O valor ideal da figura de ruído nos EDFAs é de 3 dB. No entanto, na prática, a figura de ruído dos EDFAs fica em torno de 4 a 8 dB [75]. A inserção de ruído causada pelo amplificador deteriora o desempenho de sistemas de comunicações via fibras ópticas, podendo até inviabilizar a transmissão. O problema do ruído é particularmente crítico quando os sistemas operam na região de dispersão anômala da fibra, devido à excitação de um fenômeno não linear conhecido como instabilidade de modulação (MI – *modulation instability*) [75] que aumenta o ruído do amplificador [76], degradando a relação sinal/ruído óptica do sinal [77].

Potência de Saída

A potência de saída de um amplificador é a potência amplificada, para uma determinada potência na entrada do amplificador. Uma outra definição importante é a potência de saída saturada, que corresponde à potência medida na saída do amplificador relativa a uma queda de 3 dB (compressão de ganho) em relação ao ganho de pequeno sinal do amplificador. Para se obter a potência de saída saturada de um EDFA, deve-se primeiramente medir a curva de ganho em função da potência de saída. A partir desta, observa-se a potência de saída para qual o ganho cai 3 dB. A Fig. A.6 ilustra um exemplo de curva de ganho em função da potência de saída. Nesta figura, em particular, a potência de saída saturada é 12 dBm enquanto que a potência de saída máxima é de 15 dBm.

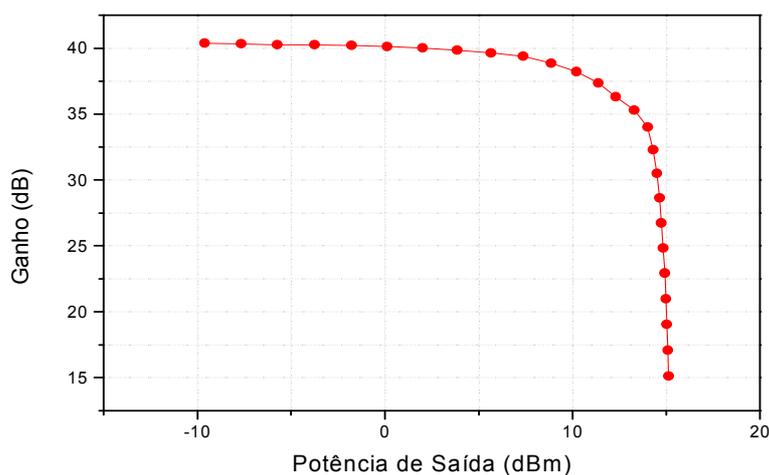


Fig. A.6: Curva de ganho em função da potência do sinal na saída para um EDFA.

A.5 Aplicações e Configurações dos EDFAs

Os EDFAs podem ser utilizados, basicamente, de três formas distintas, que diferem entre si pelas suas funções no sistema de comunicações ópticas e pela posição dos amplificadores em relação à linha de transmissão. As três formas básicas de aplicação dos amplificadores ópticos são: amplificador de potência (*booster*), amplificador de linha e pré-

amplificador. As Fig. A.7, A.8 e A.9, mostram esquemas de enlaces com os amplificadores sendo utilizados em cada uma das aplicações citadas.

Amplificador de Potência

Os amplificadores de potência localizam-se na saída dos transmissores e possuem como função, aumentar a potência do sinal de entrada da fibra. Nestes amplificadores, o parâmetro de maior importância é a potência de saída, pois eles operam na condição de saturação de ganho. Simplificadamente, quanto maior a potência injetada na fibra, mais longo pode ser o enlace antes do primeiro ou próximo receptor. No entanto, a partir de um limite de potência, começam a aparecer efeitos não lineares que causam degradação do sinal e inserem penalidades ao sistema.

Os amplificadores de potência operam com sinais de entrada cujas potências giram em torno de 0 dBm. Nesta condição, os amplificadores operam em regime de saturação, de forma que seu ganho é baixo, se comparado ao valor possível para pequenos sinais. No entanto, esses amplificadores possuem baixo nível de ASE, uma vez que o alto nível do sinal de entrada reduz o ganho da emissão espontânea. Atualmente existem amplificadores de potência que possuem potências de saída de até 36 dBm, porém valores típicos de potência de saída estão em torno de 17 dBm.

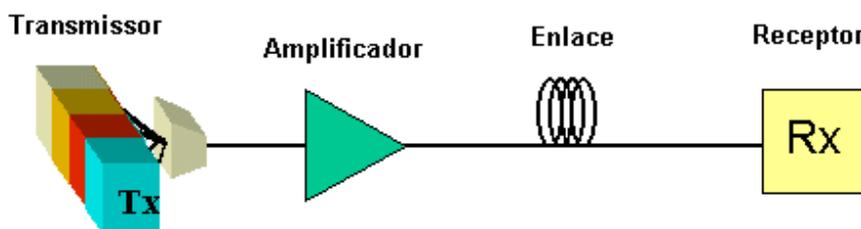


Fig. A.7: Posicionamento do amplificador de potência em um enlace óptico.

Pré-Amplificador

Os pré-amplificadores são EDFAs que têm como característica principal uma baixa inserção de ruído ao sinal. Os mesmos são posicionados logo à frente dos receptores

ópticos de forma a aumentar a sensibilidade do receptor, graças à baixa inserção de ruído. Os pré-amplificadores operam na região linear da curva de ganho dos amplificadores (região de pequenos sinais). Nestes amplificadores, o parâmetro principal de projeto é a figura de ruído, uma vez que se está interessado na amplificação de sinais de baixa potência, com o maior ganho e menor influência da ASE possíveis.

Como operam na região do ganho de pequenos sinais, os pré-amplificadores apresentam alto ganho e baixa potência de saída quando comparado aos amplificadores de potência. Além disso, o nível de ASE nos pré-amplificadores é maior do que nos amplificadores de potência. Os valores de potência de entrada são da ordem de -40 dBm.

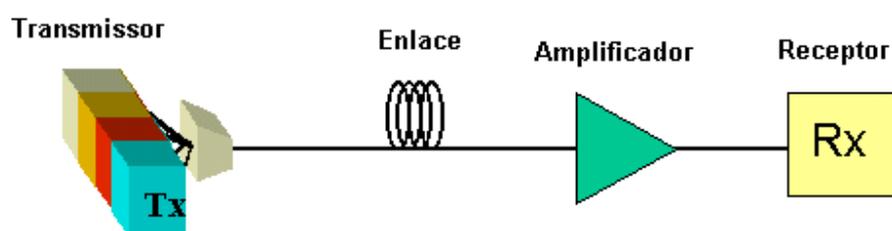


Fig. A.8: Posicionamento do pré-amplificador em um enlace óptico.

Amplificador de Linha

Os amplificadores de linha são amplificadores de baixo ruído posicionados ao longo da linha de transmissão que compensam a atenuação devido à propagação do sinal através da fibra óptica (Fig. A.9). Estes amplificadores são projetados para terem alto ganho, de forma a manter o maior espaçamento possível entre estes dispositivos. Por outro lado, eles devem também apresentar uma baixa figura de ruído (porém, normalmente, maior que a dos pré-amplificadores), para evitar o acúmulo da ASE ao longo da linha de transmissão, que pode comprometer a recepção.

Os amplificadores de linha apresentam valores de ganho e de potência de saída intermediários entre os *booster* e pré-amplificadores. Valores típicos para o sinal de entrada são da ordem de -20 dBm.

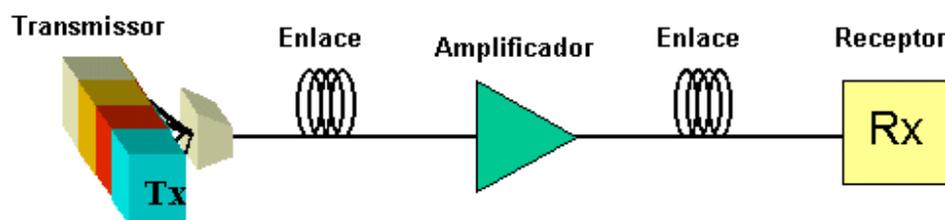


Fig. A.9: Posicionamento do amplificador de linha em um enlace óptico.

Configurações dos EDFAs

Em busca de um melhor desempenho para os amplificadores, mudanças e adaptações têm sido realizadas em sua topologia, que vão desde mudanças nas características de dopagem das fibras, capazes de proporcionar aumento e maior uniformidade ao ganho, até alterações nos circuitos ópticos dos amplificadores, capazes de adequar o funcionamento do mesmo a uma aplicação específica. A alteração dos circuitos ópticos dos amplificadores é realizada através de modificações na posição de elementos utilizados e com a inserção de novos elementos na montagem do amplificador.

Existem algumas configurações de EDFA que diferem no posicionamento do laser de bombeio em relação ao sinal a ser amplificado. Nelas, o bombeio pode ser co-propagante, contra-propagante ou bidirecional.

A Fig. A.1 ilustra a configuração básica de um EDFA, também conhecida como configuração com bombeio co-propagante, uma vez que o sinal e o bombeio se propagam no mesmo sentido. Esta configuração é indicada para o caso de pré-amplificadores, pois apresenta uma baixa figura de ruído, podendo, também, ser utilizada como amplificador de linha.

A configuração com bombeio contra-propagante, é mostrada na Fig. A.10. Nesta configuração, o acoplador fica localizado na saída da fibra dopada, com o bombeio se propagando no sentido contrário ao sinal. Este tipo de EDFA maximiza a potência de saída do amplificador, devido à maior concentração de bombeio na saída da fibra dopada. Desta maneira, esta configuração torna-se indicada para utilização como amplificador de potência (*booster*).

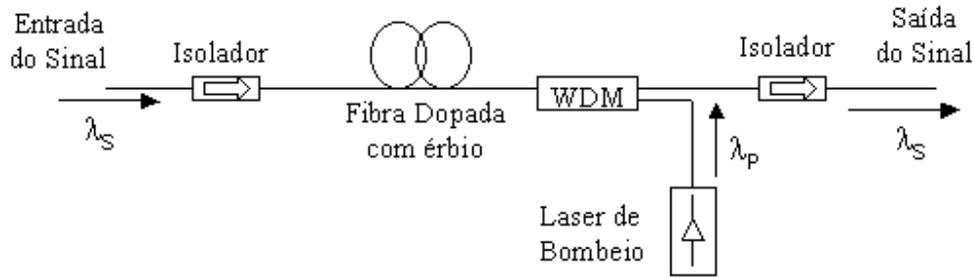


Fig. A.10: EDFA com bombeio contra-propagante.

Já a configuração de EDFAs com bombeio bidirecional, ilustrada na Fig. A.11, é resultado da propagação do bombeio nas duas direções possíveis: co e contra-propagante.

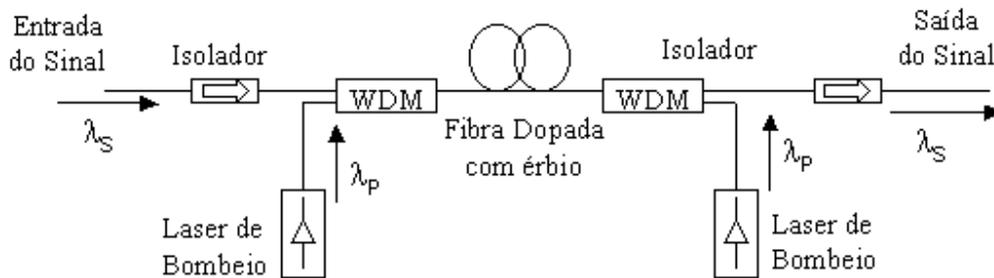


Fig. A.11: EDFA com bombeio bidirecional.

Para implementação do amplificador com bombeio bidirecional, são necessários dois acopladores WDM, para acoplar o bombeio e o sinal em ambas as extremidades da fibra. Esta configuração pode também ser implementada com apenas um laser de bombeio e um divisor de potência (*splitter*) dividindo uma parte da potência para cada uma das extremidades da fibra. O amplificador com bombeio bidirecional apresenta alto ganho e alta potência de saída, podendo ser utilizado como amplificador de potência ou amplificador de linha.

Idealmente, um amplificador deveria apresentar um alto ganho com baixa figura de ruído. No entanto, nenhuma das configurações para o EDFA apresentadas até aqui possui estas características. Uma maneira de se chegar próximo às características de um amplificador ideal é a de se conjugar a operação das configurações discutidas anteriormente

em um só amplificador. Isto pode ser feito utilizando-se mais de um estágio de fibra dopada com érbio com as mais diversas variações de propagação para o bombeio. A este amplificador dá-se o nome de amplificador de múltiplos estágios.

A vantagem de se usar um amplificador de múltiplos estágios é a de se poder fazer uma redução do nível de ruído entre os estágios através do uso de um filtro ou de um isolador óptico. Utilizando-se o filtro, o mesmo é sintonizado no comprimento de onda do sinal, permitindo a redução do nível de ASE. Assim, o sinal terá um ganho maior no estágio seguinte, já que se minimiza o acoplamento de ASE na entrada do próximo estágio. Da mesma forma o isolador atua no sentido de bloquear a propagação da ASE retroespalhada proveniente do segundo estágio, evitando, assim, a redução do ganho no primeiro estágio devido à diminuição de potência de ASE no mesmo, evitando assim sua saturação.

Várias formas de projetar amplificador de múltiplos estágios são conhecidas. A Fig. A.12 ilustra um dos casos possíveis de amplificador de múltiplos estágios, que é um amplificador de dois estágios com dois bombeios co-propagantes.

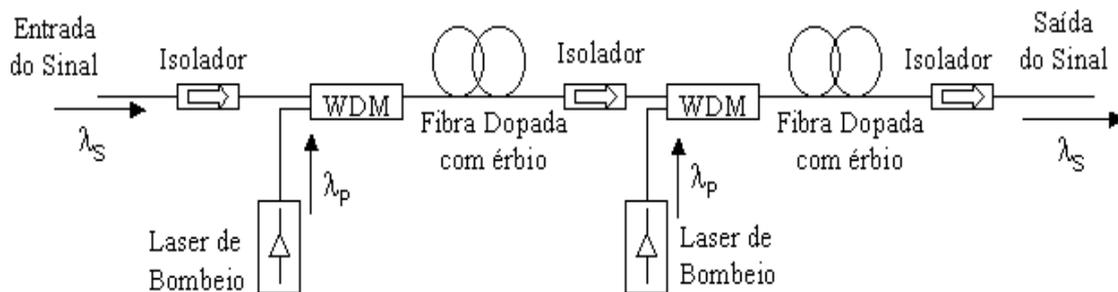


Fig. A.12: EDFA com dois estágios e bombeios co-propagante.

Com o intuito de reaproveitar o bombeio e/ou amplificar ainda mais sinais que já passaram pela fibra dopada com érbio, algumas configurações de amplificadores passaram a apresentar elementos reflexivos em sua topologia. O elemento refletor é geralmente posicionado nas extremidades do EDFA e pode ser desde uma clivagem apropriada da fibra acrescida de uma camada refletora até uma grade de difração [72]. Assim, com estes dispositivos refletores torna-se possível redirecionar o bombeio, ou sinal, ou ambos novamente para o interior de um mesmo EDFA, otimizando a alta capacidade da fibra

dopada com érbio, com o potencial de atingir resultados superiores aos das outras configurações. Os amplificadores reflexivos têm como principal característica o aumento do ganho em relação às configurações convencionais [78].

Existe uma série de configurações que fazem uso de elementos reflexivos em sua estrutura. A Fig. A.13 ilustra uma destas configurações, que é o amplificador reflexivo com reflexão de bombeio.

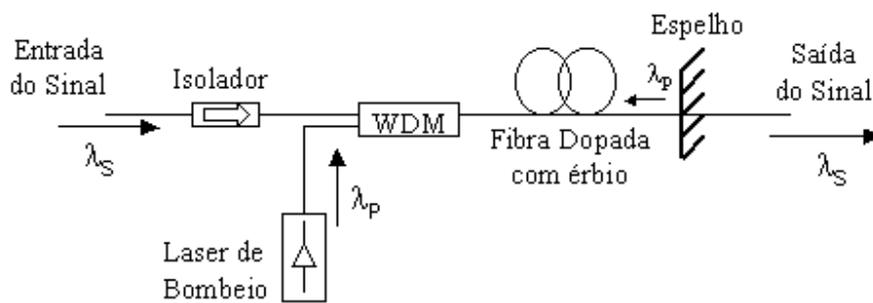


Fig. A.13: EDFA reflexivo com reflexão de bombeio.

Anexo B

Curvas de Ajuste do Bombeio utilizadas no EDFA com Controle Híbrido de Ganho

Como já comentado anteriormente nesta tese, por diversas vezes, a técnica de controle híbrida de ganho proposta se baseia na junção de um controle totalmente óptico otimizado, com um controle eletrônico com alimentação adiante (*feedforward*). Neste anexo é apresentada a caracterização em cada um dos modos de operação do EDFA proposto, exibindo de forma gráfica o valor de tensão de ajuste de bombeio necessária para a manutenção do ganho desejado ao longo da faixa dinâmica do modo de operação. Conhecidas as tensões de ajuste, são obtidas curvas de ajuste (*fits*) que se aproximam da resposta obtida experimentalmente, tendo seus polinômios geradores correspondentes inseridos no *firmware* de operação do EDFA e gravadas no microcontrolador utilizado.

Dessa maneira, para níveis de potências de entrada superiores à -14 dBm o controle do ganho é realizado através da monitoração da potência de entrada, utilizando os polinômios apresentados nas Fig. B.1, B.2, B.3, B.4 e B.5, onde o eixo das abscissas (x) representa a potência de entrada total, e o eixo das ordenadas (y) representa o nível de tensão a ser ajustado sob o laser de bombeio. Como se pode verificar, um grande acordo entre o comportamento experimental e as curvas geradas pelos polinômios de ajuste é obtido, garantindo assim a eficiência do controle de ganho eletrônico utilizado, como mostrado previamente na caracterização do EDFA com controle híbrido de ganho proposto.

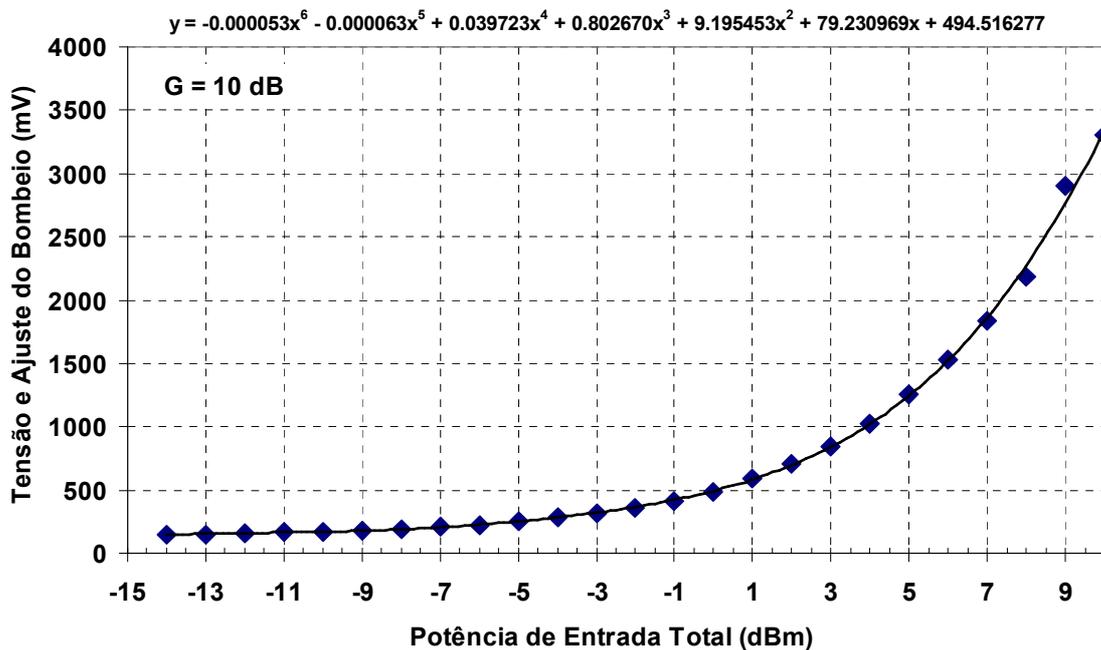


Fig. B.1: Pontos experimentais e curva de ajuste para a manutenção do ganho em 10 dB.

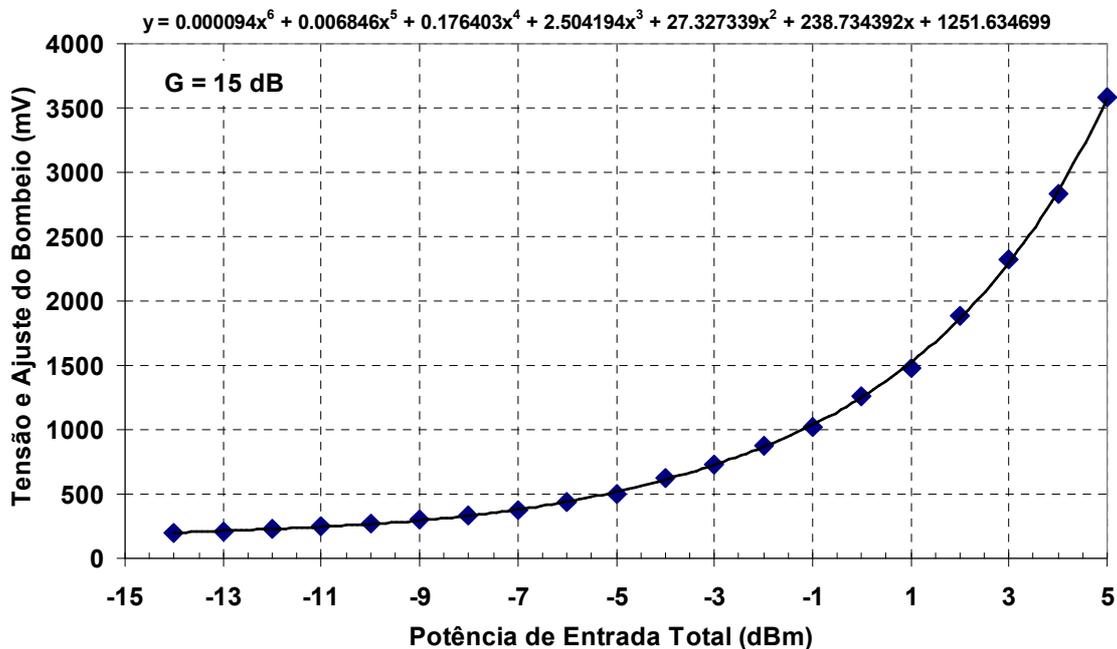


Fig. B.2: Pontos experimentais e curva de ajuste para a manutenção do ganho em 15 dB.

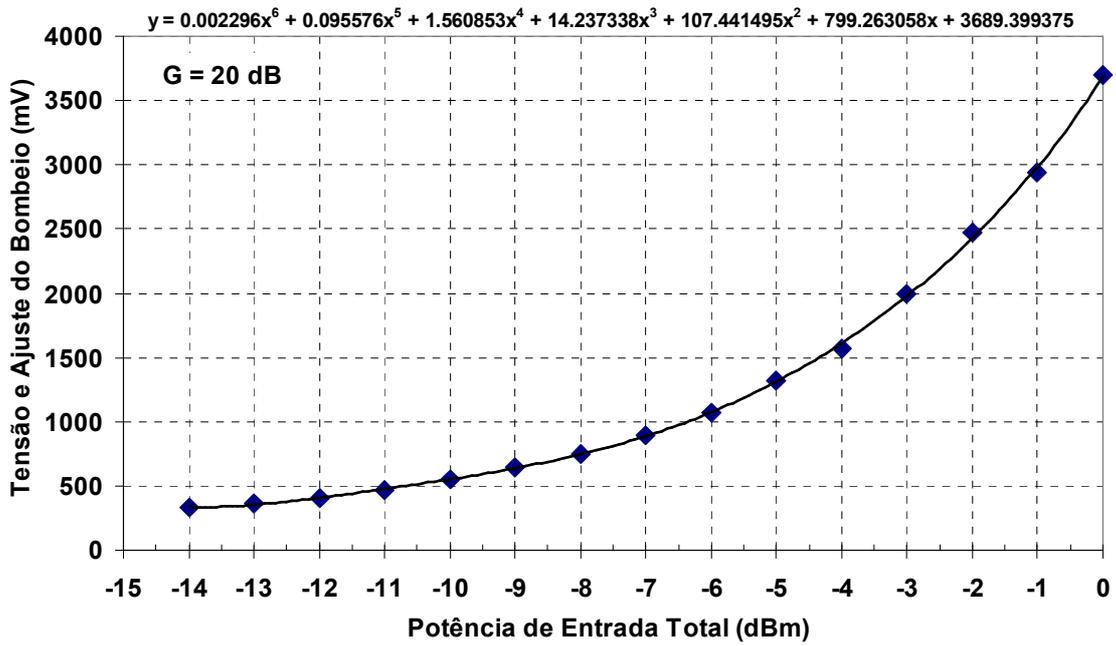


Fig. B.3: Pontos experimentais e curva de ajuste para a manutenção do ganho em 20 dB.

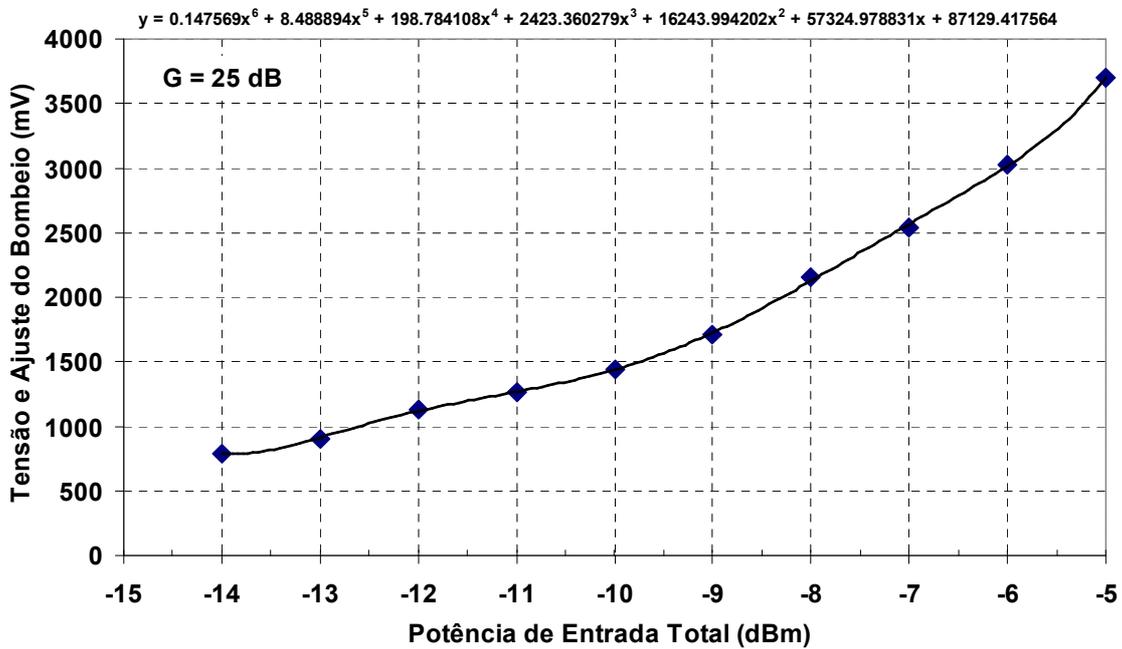


Fig. B.4: Pontos experimentais e curva de ajuste para a manutenção do ganho em 25 dB.

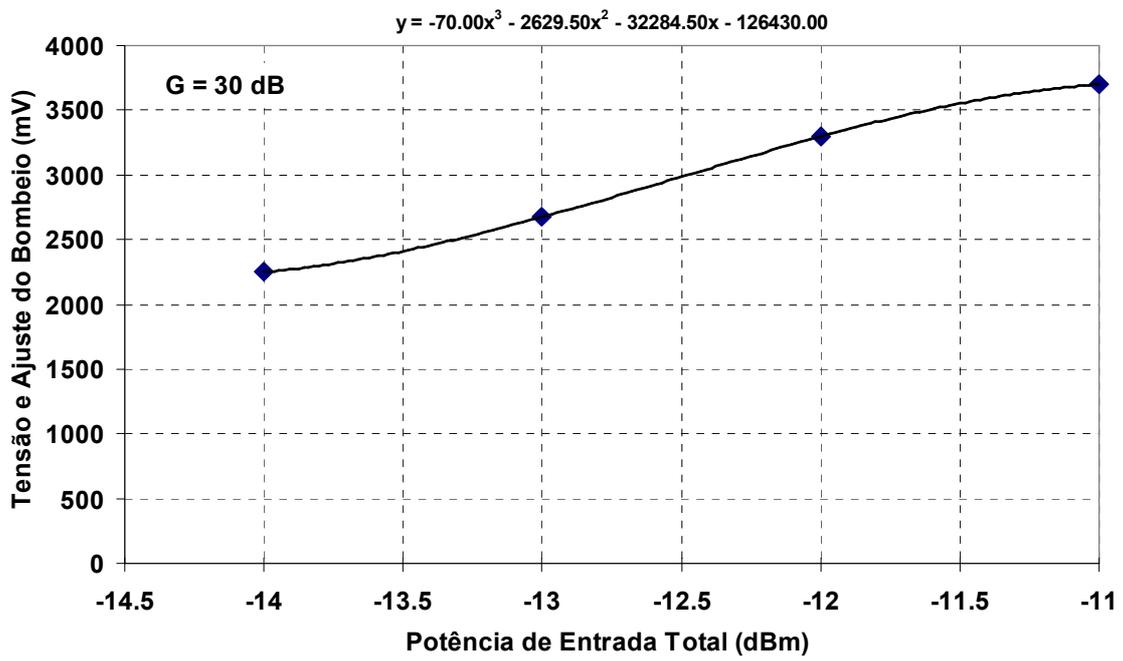


Fig. B.5: Pontos experimentais e curva de ajuste para a manutenção do ganho em 30 dB.