



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

**Projeto de EDFAs com Controle Automático de Ganho
Totalmente Óptico para Aplicações em Redes WDM**

Júlio César Rodrigues Fernandes de Oliveira

Orientador:

Aldário Chrestani Bordonalli (FEEC)

Composição da Banca Examinadora:

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

Prof. Dr. Amílcar Careli César – EESC/USP/ São Carlos

Prof. Dr. Rui Fragassi Souza – FEEC/UNICAMP

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

Campinas, Julho de 2004

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

OL4p

Oliveira, Júlio César Rodrigues Fernandes de
Projeto de EDFAs com controle automático de ganho
totalmente óptico para aplicações em redes WDM / Júlio
César Rodrigues Fernandes de Oliveira. --Campinas, SP:
[s.n.], 2004.

Orientador: Aldário Chrestani Bordonalli.
Dissertação (mestrado) - 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. Universidade Estadual de
Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de
Computação. III. Título.

Resumo

A variação na potência da entrada em amplificadores ópticos a fibra dopada com Érbio (EDFAs) induz alterações em seu ganho. No caso de sistemas ou redes WDM onde o número de canais acoplados ao amplificador varia, o ganho torna-se dependente do número de canais que estão sendo transmitidos, especialmente se o amplificador opera saturado. Este trabalho apresenta o desenvolvimento e a avaliação experimental de uma técnica de controle de ganho totalmente óptica para EDFAs. Esta técnica de controle baseia-se na realimentação óptica de uma parcela do ruído de emissão espontânea amplificada (ASE) do amplificador, que passa a operar como um laser responsável pelo controle do ganho EDFA. A escolha do comprimento de onda do sinal de controle e do valor da atenuação utilizada na malha de realimentação óptica é de importância crítica para a eficiência do controle de ganho a ser obtido através desta técnica. Um dos objetivos da avaliação experimental foi a investigação da influência destes parâmetros no projeto do amplificador controlado, de modo a otimizar o seu desempenho. Além disto, após a inserção do amplificador controlado em um sistema WDM de oito canais, observou-se a influência que a atenuação e a alocação do canal de controle tem sobre o desempenho do sistema, quando o amplificador é submetido a diferentes níveis de potência de entrada decorrentes da transmissão de um diferente número de canais.

Abstract

Optical power variations at erbium doped fiber amplifiers (EDFAs) input cause gain variations. In WDM systems or networks, the number of channels varies, and the gain becomes dependent of the number of channels transmitted, especially if the amplifiers operate in saturated regime. This work presents the development and experimental evaluation of an all-optical gain control technique for EDFAs. This control technique is based on an optical feedback of the amplified spontaneous emission (ASE), making the amplifier to operate as a laser, which provides automatic gain control to the EDFA. The choice of signal control wavelength and value of optical feedback attenuation is of critical importance for the gain control efficiency to be obtained through this technique. In the experimental evaluation, we have investigated the influence of these parameters on the amplifier control in order to optimize amplifier design performance. We have evaluated the amplifier control system performance in an eight channel WDM system as a function of the optical feedback attenuation and control channel allocation for different input power levels associated to different number of transmitted channels.

Dedico este trabalho a minha família.

Ao meu pai, Juarez Fernandes, pelo exemplo de vida e pelo eterno incentivo à ciência e valorização do saber, à minha mãe, Maria das Graças, pelo amor e dedicação inestimáveis para minha formação pessoal, e a meus irmãos, Juliano e Ana Júlia, pelo amor, apoio e companheirismo que sempre me proporcionaram.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, quero agradecer a João Batista Rosolem, pesquisador de telecomunicações da Fundação CPqD, não apenas pela sua imprescindível contribuição para realização deste trabalho, mais também pelo amigo e posso sinceramente dizer mais que um amigo, praticamente um pai, desde a minha vinda para Campinas.

Ao meu orientador Prof. Dr. Aldário Chrestani Bordonalli, pela orientação durante o mestrado e pelas correções e melhorias realizadas neste trabalho e nos artigos publicados.

Ao Prof. Dr. José Ewerton por ser o responsável pela minha descoberta das comunicações ópticas, e a todo o DEE da Universidade Federal de Campina Grande, pela formação de qualidade que me foi proporcionada.

A Antonio Amauri Juriollo, Técnico de Laboratório da Fundação CPqD, não só pela contribuição durante a realização deste trabalho, mais também pela sua amizade e seu companheirismo desde a minha chegada à Campinas.

A Miriam Regina Xavier Barros, pesquisadora de telecomunicações da fundação CPqD, pelas contribuições e pela importância que o entusiasmo demonstrado no tema deste trabalho me proporcionaram para a realização do mesmo.

A todo o pessoal da Gerência de comunicações ópticas da Fundação CPqD pelo constante apoio e pelo ótimo ambiente de trabalho. Em especial agradeço a Roberto Arradi, Alberto Paradisi, Fábio Donati, Marcos Salvador, Sandro Rossi, Eduardo Mobilon e Ronaldo Ferreira.

A minha noiva, Claudineide Oliveira, pelo amor, companheirismo, e pelo apoio que me foi proporcionado, indispensável para a minha vinda para Campinas.

Aos meus amigos de longa data, Thiago, Jaidilson, Isaac, Gibran, Rafael e ao meu primo Marcus, que mesmo distantes sempre me motivaram para a realização deste sonho.

Aos amigos da república Lindomberg, Júnior, Christian, Vagner e Adeilton, pela amizade e pelos momentos de diversão.

A CAPES pelo suporte financeiro.

Sumário

<i>Resumo</i>	<i>iii</i>
<i>Abstract</i>	<i>v</i>
<i>Agradecimentos</i>	<i>ix</i>
<i>Sumário</i>	<i>xi</i>
<i>Lista de Figuras</i>	<i>xiii</i>
<i>Lista de Símbolos e Abreviaturas</i>	<i>xix</i>
Capítulo 1 Introdução	1
Capítulo 2 EDFAs em Redes Ópticas	7
2.1 Introdução	7
2.2 Amplificadores a Fibra Dopada com Érbio (EDFAs)	11
2.2.1 Configuração Básica	13
2.2.2 Mecanismo de Amplificação	15
2.2.3 Parâmetros Fundamentais dos EDFAs	18
2.2.4 Aplicações e Configurações dos EDFAs	23
2.2.5 Comprimento de onda de Bombeio	28
2.3 Fenômenos Dinâmicos em Redes Ópticas utilizando EDFAs	29
2.3.1 Impacto Relativo à Variação da Relação Sinal Ruído Óptica (OSNR)	31
2.3.2 Impacto Relativo à Interferência (Crosstalk) Óptica	32
2.3.3 Impacto Relativo aos Efeitos Não-Lineares da Fibra	32
2.4 Modelagem da Resposta Dinâmica dos EDFAs	35

Capítulo 3 Técnicas de Controle Automático de Ganho para EDFAs ...	47
3.1 Introdução	47
3.2 Controle Automático de Ganho Totalmente Óptico.....	48
3.2.1 Fatores Limitantes do Controle Automático de Ganho Totalmente Óptico..	51
3.3 Controle Automático de Ganho Eletrônico	60
3.3.1 Controle Eletrônico com Alimentação Adiante (Electronic Feedforward Control)	60
3.3.2 Controle Eletrônico Realimentado (Electronic Feedback Control)	62
3.3.3 Controle automático de ganho eletrônico para um enlace de EDFAs.....	64
3.5 Controle Automático de Ganho Híbrido	67
3.6 Considerações Sobre as Técnicas de Controle de ganho de EDFAs.....	70
Capítulo 4 Análises e Resultados Experimentais.....	75
4.1 Introdução	75
4.2 Controle Automático de Ganho Totalmente Óptico.....	76
4.2.1 Arranjo experimental e resultados preliminares	77
4.2.2 Atenuação da Realimentação Óptica.....	80
4.2.3 Alocação do Canal de Controle.....	88
4.3 Análise Sistêmica do EDFA-CAGTO.....	100
4.3.1 Análise Estática	102
4.3.2 Análise Dinâmica.....	111
4.4 Conclusões da Análise Experimental	116
Capítulo 5 Conclusão	119
Referências Bibliográficas	123

Lista de Figuras

Fig. 2.1: Nó de uma rede com chaveamento, combinando um <i>Cross-Connect</i> Óptico e uma chave eletrônica.	9
Fig. 2. 2: Configuração básica de um EDFA.	14
Fig. 2.3: 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).	16
Fig. 2.4: Dependência espectral da emissão espontânea amplificada em um EDFA.	17
Fig. 2.5: Curva de ganho em função da potência do sinal de entrada para um EDFA.	19
Fig. 2.6: Curva de ganho em função do comprimento de onda para um EDFA.	20
Fig. 2.7: Curva de ganho em função da potência do sinal na saída para um EDFA.	22
Fig. 2.8: Posicionamento do amplificador de potência em um enlace óptico.	23
Fig. 2.9: Posicionamento do pré-amplificador em um enlace óptico.	24
Fig. 2.10: Posicionamento do amplificador de linha em um enlace óptico.	25
Fig. 2.11: EDFA com bombeio contra-propagante.	26
Fig. 2.12: EDFA com bombeio bidirecional.	26
Fig. 2.13: EDFA com dois estágios e bombeios co-propagantes.	27
Fig. 2.14: EDFA reflexivo com reflexão de bombeio.	28
Fig. 2.15: Diagrama de três níveis para a fibra dopada com érbio.	36
Fig. 2.16: Evolução das excursões de potência, experimentais (linha contínua), e simuladas (linha tracejada), para o canal sobrevivente localizado em 1554 nm para 7 diferentes valores de potência do canal sobrevivente proporcionais à potência total [6].	45

Fig. 2.17: Evolução das excursões de potência, experimentais (linha contínua), e simuladas (linha tracejada), para 4 diferentes comprimentos de onda do canal sobrevivente. Os canais modulados encontram-se em 1557,2 nm e possuem a mesma potência de entrada do canal sobrevivente [6].	45
Fig. 3.1: Método de controle automático de ganho totalmente óptico, utilizando a realimentação óptica.	48
Fig. 3.2: Método de controle automático de ganho totalmente óptico, utilizando grades de Bragg.	51
Fig. 3.3: Potência de Saída do canal sobrevivente em um amplificador com controle automático de ganho totalmente óptico [56].	52
Fig. 3.4: Variação relativa da potência do canal sobrevivente na saída do EDFA controlado, com laser de controle em 1534 nm [46].	53
Fig. 3.5: Variação relativa da potência do canal sobrevivente na saída do EDFA controlado, com o laser de controle em 1547 nm [46].	54
Fig. 3.6: Variação relativa da potência do canal sobrevivente na saída do EDFA controlado, com laser de controle em 1555 nm [46].	54
Fig. 3.7: Potência de saída referente à da retirada dos quatro de oito canais, quando são retirados instantaneamente (tracejado), e quando são retirados em 100 μ s (linha cheia)[56].	56
Fig. 3.8: Resposta transiente quando um, quatro e sete canais são retirados [56].	56
Fig. 3.9: Flutuações de potência em uma cadeia de EDFAs [50].	57
Fig. 3.10: Potência de um dos canais de um sistema WDM amplificado por uma cascata de EDFAs, após a inserção de canais com controle de ganho exercido sobre todos amplificadores [58].	58
Fig. 3.11: Potência de um dos canais de um sistema WDM amplificado por uma cascata de EDFAs, após a inserção de canais, com o controle de ganho exercido sobre o primeiro amplificador [58].	58
Fig. 3.12: Controle de ganho eletrônico com alimentação adiante aplicado a um EDFA.	61
Fig. 3.13: Arranjo experimental para o EDFA com controle eletrônico com alimentação adiante. A: Atenuador controlado por tensão. C ₁ : Acoplador para o canal de supervisão. C ₂ : Acoplador com derivação de 5%. C ₃ : Acoplador para o bombeio. F: Filtro para supressão de ASE. I: Isolador [60].	61
Fig. 3.14: Controle de ganho eletrônico com realimentação aplicado a um EDFA.	63

Fig. 3.15: Estrutura eletrônica de controle automático de ganho utilizando a realimentação [62]. ..	64
Fig. 3.16: Representação esquemática do controle do enlace para proteção dos canais sobreviventes, em redes ópticas [64].	65
Fig. 3.17: Espectro do sinal transmitido através do enlace (sinal + canal de controle) [64].	66
Fig. 3.18: Variações de potência do enlace, quando cinco dos sete canais WDM são retirados e adicionados, com uma frequência de 1 kHz [64].	67
Fig. 3.19: EDFA com controle automático de ganho híbrido [5].	68
Fig. 3.20: Resposta transiente de potência do canal sobrevivente: (a) 7 de 8 canais são retirados, (b) 7 canais são adicionados [5].	69
Fig. 3.21: Transientes do canal sobrevivente em um OAGC e em um HGC [65].	69
Fig. 3.22: Variações de potência do sinal em um HGC EDFA em função do tempo de resposta do circuito eletrônico [65].	70
Fig. 4. 1: Esquema do arranjo experimental utilizado em parte dos experimentos.	77
Fig 4.2: Variação do sinal fotodetectado do canal sobrevivente na saída do EDFA-CAGTO, observado no osciloscópio, para diferentes níveis de atenuação da realimentação óptica.	79
Fig. 4.3 (a)-(b): Espectros de saída do EDFA-CAGTO com oito e um canais transmitidos, respectivamente, para uma atenuação da realimentação óptica de (a) 1 dB, (b) 30 dB.	80
Fig. 4.4: Ganho e variação do ganho em função da atenuação da realimentação óptica, com o canal de controle em 1535 nm e potência de entrada de -20 dBm/canal, para dois, quatro e oito canais.	83
Fig. 4.5: Ganho e variação do ganho em função da atenuação da realimentação óptica, com o canal de controle em 1535 nm e potência de entrada de -25 dBm/canal, para dois, quatro e oito canais.	83
Fig. 4.6: Ganho e variação do ganho em função da atenuação da realimentação óptica, com o canal de controle em 1547 nm e potência de entrada de -20 dBm/canal, para dois, quatro e oito canais.	86
Fig. 4.7: Ganho e variação do ganho em função da atenuação da realimentação óptica, com o canal de controle em 1547 nm e potência de entrada de -25 dBm/canal, para dois, quatro e oito canais.	86

Fig. 4.8 : Medida equivalente da variação temporal de potência no canal sobrevivente, com o canal de controle em 1535 nm, para valores de atenuação da realimentação óptica de (a) 1,5 dB, (b) 10 dB, (c) 12,5 dB e (d) 25 dB.	89
Fig. 4.9: Medida equivalente da variação temporal de potência no canal sobrevivente, com o canal de controle em 1547,7 nm, para valores de atenuação da realimentação óptica de (a) 1,5 dB, (b) 10 dB, (c) 12,5 dB e (d) 25 dB.....	91
Fig. 4.10: Medida equivalente da variação temporal de potência no canal sobrevivente, com o canal de controle em 1554 nm, para valores de atenuação da realimentação óptica de (a) 1,5 dB, (b) 10 dB, (c) 12,5 dB e (d) 25 dB.	93
Fig. 4.11: Medida equivalente da variação temporal de potência no canal sobrevivente, com o canal de controle em 1557 nm, para valores de atenuação da realimentação óptica de (a) 1,5 dB, (b) 10 dB, (c) 12,5 dB e (d) 25 dB.	94
Fig. 4.12: Espectro de saída do EDFA controlado, $P_{in} = -20$ dBm/canal e atenuação da realimentação óptica igual a 10 dB, (a) canal de controle em 1535 nm, (b) canal de controle em 1557 nm.	96
Fig. 4.13: Variações da potência do canal sobrevivente para uma atenuação da realimentação óptica de 10 dB, quando o canal de controle localiza-se em, 1535 nm (1), 1547,7 nm (2), 1554 nm (3) e 1557 nm (4), durante a inserção e retirada dos canais a cada 500 μ s.	97
Fig. 4.14: Variações da potência do canal sobrevivente para uma atenuação da realimentação óptica de 10 dB, quando o canal de controle localiza-se em, 1535 nm (1), 1547,7 nm (2), 1554 nm (3) e 1557 nm (4), durante a inserção e retirada dos canais a cada 1ms.	99
Fig. 4.15: Arranjo experimental utilizado na análise sistêmica do EDFA com controle automático de ganho totalmente óptico.	101
Fig. 4.16: BER em função da atenuação da realimentação óptica com a potência de entrada de -20 dBm/canal e canal de controle em 1535 nm.....	103
Fig. 4.17: BER em função da atenuação da realimentação óptica com a potência de entrada de -25 dBm/canal e canal de controle em 1535 nm.....	104
Fig. 4.18: Degradação da sensibilidade do EDFA com controle automático de Ganho totalmente óptico em função do comprimento de onda do canal sobrevivente, $P_{in} = -20$ dBm/canal.....	105
Fig. 4.19 (a)-(d): Bits recebidos para diferentes posições do canal de controle: (a) 1535 nm, (b) 1547,7 nm, (c) 1554 nm e (d) 1557 nm.	106

Fig. 4.20: Diagramas de olho relativos ao canal sobrevivente, para o canal de controle em (a) 1535 nm, (b) 1547,7 nm, (c) 1554nm e (d) 1557nm, com a atenuação da realimentação óptica em 10 dB.	108
Fig. 4.21: Taxa de erro de bit associada a cada comprimento de onda do canal de controle na banda C, com atenuação da malha de realimentação de 10 dB.....	110
Fig. 4.22: Potência do canal sobrevivente associada a cada comprimento de onda do canal de controle na banda C, com atenuação da malha de realimentação de 10 dB.	111
Fig. 4.23: Análise dinâmica da BER com o canal de controle em 1535 nm.	113
Fig. 4.24: Análise dinâmica da BER com o canal de controle em 1547,7 nm.	113
Fig. 4.25: Análise dinâmica da BER com o canal de controle em 1554 nm.	114
Fig. 4.26: Análise dinâmica da BER com o canal de controle em 1558 nm.	115

Lista de Símbolos e Abreviaturas

Símbolo	Descrição
λ	Comprimento de onda
λ_c	Canal de controle
${}^4I_{15/2}$	Nível fundamental
${}^4I_{13/2}$	Nível metaestável
${}^4I_{11/2}$	Nível de bombeio
N_0	População total de portadores no núcleo da fibra
N_i	Nível de energia associado ao índice i
$\langle N_2 \rangle$	População dos íons de érbio no nível 2
nm	Nanometro
G	Ganho
P_s	Potência de saída
P_E	Potência de entrada
P_{ASE}	Potência de ASE
h	Constante de Planck
ν	Frequência óptica
$\Delta\nu$	Intervalo de frequência centrado em ν
R_{ij}	Taxa de absorção de bombeio entre os níveis i e j
W_{ij}	Taxa de emissão estimulada entre os níveis i e j
A_i	Taxa de emissão espontânea do nível i
A_{ij}	Taxa de emissão espontânea do nível ij
A_{ij}^R	Taxa de emissão espontânea radiativa entre os níveis i e j
A_{ij}^{NR}	Taxa de emissão espontânea não-radiativa entre os níveis i e j

L	Comprimento da fibra
K	Número de comprimentos de onda propagando na fibra
τ_0	Tempo de fluorescência do nível metaestável

Símbolo

Descrição

y_i	Constante de emissão estimulada
α_i	Constante de absorção
$n(f)_{sp}$	Fator de ruído na mesma frequência
ρ	Densidade dos íons de érbio
S	Área da secção transversal da fibra dopada com érbio
ζ	Parâmetro de saturação

Abreviatura

Descrição

AEO	Analisador de Espectro Óptico
AGC	Controle Automático de Ganho (<i>Automatic Gain Control</i>)
ASE	Emissão Espontânea Amplificada (<i>Amplified Spontaneous Emission</i>)
ATM	Modo de Transferência Assíncrono (<i>Asynchronous Transfer Mode</i>)
BER	Taxa de Erro de Bit (<i>Bit Error Rate</i>)
C.C	Circuito de Controle
dB	Decibel
DEMUX	Demultiplexador
DFB	Realimentação distribuída (<i>Distributed Feedback</i>)
DS	Dispersão deslocada (<i>Dispersion shifted</i>)
DXC	Cross-connects digitais (<i>Digital Cross-connects</i>)
EDF	Fibra Dopada com Érbio (<i>Erbium Doped Fiber</i>)

EDFA	Amplificador a fibra dopada com érbio (<i>Erbium doped fiber amplifier</i>)
EDFA – CAGTO	Amplificador a Fibra Dopada com Érbio com Controle Automático de Ganho Totalmente Óptico

Abreviatura	Descrição
ESA	Absorção no estado excitado (<i>Excited State Absorption</i>)
FO	Filtro óptico
FWM	Mistura de quarto ondas (<i>Four Wave Mixing</i>)
GbE	Gigabit Ethernet
Gb/s	Gigabit por segundo
HGC	Controle de ganho híbrido (<i>Hybrid Gain Control</i>)
IP	Protocolo de Internet (<i>Internet Protocol</i>)
ITU	União Internacional de Telecomunicações (<i>International Telecommunications Union</i>)
MUX	Multiplexador
NF	Figura de ruído (<i>Noise Figure</i>)
OADM	Multiplexador óptico de adição e remoção (<i>Optical Add-Drop Multiplexer</i>)
OAGC	Controle Automático de Ganho Totalmente Óptico (<i>All-optical automatic gain control</i>)
OSA	Analizador de espectro óptico (<i>Optical Spectrum Analyzer</i>)
OSNR	Relação sinal ruído óptica (<i>Optical Signal Noise Ratio</i>)
OXC	Cross-connect óptico (<i>Optical Cross-Connect</i>)
PD	Fotodetector (<i>Photodetector</i>)
PDG	Ganho dependente da polarização (<i>Polarization Dependent Gain</i>)
PDH	Hierarquia Digital Plesiócrons (<i>Plesiochronous Digital Hierarchy</i>)
PMD	Dispersão de modo de polarização (<i>Polarization mode dispersion</i>)

SBS	Espalhamento estimulado de Brillouin (<i>Stimulated Brillouin Scattering</i>)
SDH	Hierarquia digital síncrona (<i>Synchronous Digital Hierarchy</i>)
SHB	<i>Spectral Hole Burning</i>
SNR	Relação sinal ruído (<i>Signal Noise Ratio</i>)
SPM	Automodulação de fase (<i>Self phase modulation</i>)

Abreviatura	Descrição
SOA	Amplificador óptico semicondutor (<i>Semiconductor Optical Amplifier</i>)
SRS	Espalhamento estimulado Raman (<i>Stimulated Raman Scattering</i>)
Tb/s	Terabit por segundo
UCL	Unidade de controle do enlace (<i>Unit Control Link</i>)
WDM	Multiplexação por divisão em comprimento de onda (<i>Wavelength Division Multiplexing</i>)
WSC	Acoplador seletivo em comprimento de onda (<i>Wavelength Selective Coupler</i>)
XPM	Automodulação de Fase (<i>Self Phase Modulation</i>)

Capítulo 1

Introdução

A introdução de serviços banda larga e o crescimento e a difusão da Internet elevaram substancialmente a demanda pelo tráfego de informação, exigindo uma maior capacidade das redes de transmissão. Neste contexto, a tecnologia WDM apareceu como solução para o aumento do tráfego, habilitando os enlaces ópticos a operar em taxas de transmissão agregadas acima de alguns Tb/s. Com o aumento do tráfego nas redes ópticas, surgiu também a necessidade de desenvolvimento de técnicas adequadas para o gerenciamento deste tráfego, tornando-se necessário realizar o roteamento e a comutação com níveis de granularidade adaptados às altas taxas de transmissão exigida do sistema ao sistema. Como consequência destas necessidades, as redes ópticas têm gradualmente migrado para redes onde o roteamento e a comutação são realizados no próprio domínio óptico, dispensando o processamento que ocorre em nós onde estas funcionalidades são executadas eletronicamente, após conversão optoeletrônica. Assim, diversas alterações em diferentes camadas das redes ópticas tiveram que ser implementadas para as adaptar aos requisitos exigidos pela rede totalmente óptica.

O primeiro passo em direção a uma rede totalmente óptica foi dado com a introdução do OADM (*optical add/drop multiplexer*) e do OXC (*optical crossconnect*), dispositivos esses responsáveis pela comutação e roteamento dinâmicos dos comprimentos de onda. A introdução destes dispositivos coloca a rede óptica em um nível mais elevado de reconfigurabilidade, possibilitando-se a adição ou remoção de canais (*add/drop*) ou o desvio destes (OXC) em cada nó. Desta maneira, o número de comprimentos de onda que se propagam pela fibra pode mudar aleatoriamente, provocando flutuações,

também aleatórias, na potência de entrada de amplificadores ópticos localizados entre os nós da rede.

Quando canais são inseridos ou retirados, seja por reconfigurações ou falhas na rede, a potência na entrada dos EDFAs varia, podendo gerar alterações sensíveis no ganho do amplificador que opera, normalmente, em regime saturado. Portanto, as 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 de comprimento de onda, uma vez que a recepção das mensagens em altas taxas pode ser comprometida devido ao excesso, falta ou oscilação de potência óptica dos canais detectados por um nó. No intuito de evitar variações de ganho nos EDFAs utilizados em redes totalmente ópticas, a utilização de técnicas de controle automático de ganho se tornou necessária [1].

Em uma rede óptica com roteamento de comprimento de onda que utiliza EDFAs, o controle automático do ganho do EDFA se torna de fundamental importância para o funcionamento adequado da rede. Neste tipo de rede óptica, os canais são inseridos ou retirados entre os nós, provocando alterações na potência de entrada dos EDFAs que se localizam, geralmente, entre os nós ou no próprio nó da rede. Estas variações de potência aliadas ao fato dos amplificadores trabalharem na região de saturação levam o EDFA, sem controle de ganho, a proporcionar ganho dependente do número de canais. Dessa maneira, o mesmo canal pode ser mais ou menos amplificado na rede dependendo do número de canais na entrada dos EDFAs que se encontram na rota deste mesmo canal, causando graves penalidades à transmissão devido à saturação do receptor (altas potências) ou à sensibilidade do receptor (baixas potências). Utilizando-se EDFAs com controle automático de ganho, as variações da potência em sua entrada não serão capazes de causar variações significativas na potência dos canais transmitidos, habilitando, assim, a rede óptica a operar sem degradações significativas relativas à inserção e retirada de canais.

Em 1991, no AT&T Bell *Laboratories*, desenvolveu-se o primeiro amplificador óptico com controle automático de ganho totalmente óptico [2], dando início a uma série de pesquisas relacionadas a este tema na década de noventa. É importante salientar que, mesmo na década de noventa, quando as redes ópticas com roteamento de comprimento de onda ainda não haviam sido implementadas, a preocupação com a resposta dinâmica do

EDFA e as formas de a controlar vêm sendo pesquisadas. Trabalhos posteriores demonstraram outras técnicas de controle automático de ganho para EDFAs [3–5]. O grande interesse em se pesquisar o controle de ganho para EDFAs se deve ao fato das redes ópticas serem, desde o início da transmissão via fibras ópticas, uma configuração de transmissão atraente e de visíveis vantagens em relação aos enlaces ponto a ponto. Nesse contexto, o advento dos EDFAs tornou possível a concepção de redes ópticas otimizadas para o domínio óptico, principalmente se algumas características intrínsecas deste tipo de amplificadores fossem contornadas. Dentre estas características, a principal era a dependência do ganho com a potência de entrada.

Levando-se em consideração o exposto anteriormente, este trabalho tem como objetivo promover uma ampla análise experimental da técnica de controle automático de ganho totalmente óptico, visando traçar conclusões relativas ao projeto de EDFAs que utilizam esta técnica para aplicações em redes WDM totalmente ópticas. Para tanto, a técnica em questão será aplicada a um EDFA comercial através de uma realimentação óptica composta por acopladores, um atenuador e um filtro óptico sintonizável. Os principais parâmetros que afetam o desempenho da técnica de controle são identificados e detalhadamente analisados, para ilustrar a dependência do seu desempenho em relação a estes parâmetros. É importante salientar que, dentre as análises conduzidas, implementou-se pela primeira vez, uma análise sistêmica que considera o EDFA com o controle de ganho projetado em um enlace WDM que simula o comportamento de inserção e remoção de canais de redes WDM totalmente ópticas.

O Capítulo 2 apresenta uma introdução às redes ópticas com roteamento de comprimento de onda baseadas em EDFAs. A teoria dos EDFAs, considerando a sua topologia básica, o seu mecanismo de amplificação, e os seus parâmetros fundamentais são também apresentados neste capítulo. Na sequência, outras topologias de EDFAs são mostradas e diferentes tipos de aplicações deste amplificador são comentados. Ainda neste capítulo, os fenômenos dinâmicos relativos às redes ópticas baseadas em EDFAs também são discutidos, sendo por fim apresentado um estudo sobre a modelagem da resposta dinâmica de EDFAs.

No Capítulo 3 apresentam-se, diversas técnicas de controle automático de ganho. Com base na literatura as técnicas de controle de ganho de EDFAs podem ser divididas em totalmente óptica, eletrônica e híbrida. Quando possível, estas foram comparadas em termos de desempenho, custo e simplicidade de montagem.

Da análise realizada no Capítulo 3, identifica-se que a técnica de controle de ganho totalmente óptica, apesar de possuir um elevado potencial para o controle do ganho do EDFA, apresenta alguns fatores limitantes que impedem o aumento de eficácia de seu desempenho. Verificou-se, também, que os efeitos causados por estes fatores limitantes (Oscilações de Relaxação e *Spectral Hole Burning*) já haviam sido bastante estudados (principalmente em simulações) estando bem definidos como os mesmos limitavam o funcionamento desta técnica de controle. No entanto, verificou-se que soluções para a minimização dos efeitos causados por estes fatores limitantes foram muito pouco estudadas, e que, as existentes, baseiam-se em simulações e não apresentaram resultados visando a aplicação prática do EDFA. Dessa maneira identificou-se então a possibilidade de minimizar a influência dos efeitos dos fatores limitantes a esta técnica de controle ganho, através da otimização dos parâmetros fundamentais desta técnica de controle, que são atenuação da realimentação óptica e a alocação do canal de controle. Assim, a análise experimental deste trabalho baseou-se na análise da influência dos parâmetros fundamentais com o intuito de descobrir os valores dos mesmos que otimizam o desempenho do EDFA, assim como em uma detalhada análise sistêmica do EDFA em diversas condições de controle.

O Capítulo 4 foi dedicado à montagem do aparato experimental, às medidas e à análise dos resultados relativos à técnica de controle automático de ganho totalmente óptico. Este capítulo divide-se, basicamente, em duas partes. Na primeira, realiza-se a análise da influência dos parâmetros fundamentais para a construção da técnica de controle de ganho totalmente óptico (atenuação da realimentação óptica e a alocação do canal de controle). Durante esta, diversos experimentos são realizados para observar como o valor absoluto do ganho e suas possíveis variações se comportam em relação à atenuação da realimentação óptica e à posição do canal de controle, inclusive em situações onde a potência óptica na entrada do EDFA controlado é bruscamente variada. O impacto das oscilações de relaxação e do *spectral hole burning* (SHB) com a variação da posição do canal de controle também

são observadas. Ainda no Capítulo 4, realiza-se uma análise sistêmica que considera o EDFA sobre o qual foi aplicada a técnica de controle automático de ganho totalmente óptico. Neste caso, o EDFA sob análise é inserido em um enlace WDM de oito canais modulados a uma taxa de 2,5 Gb/s. O desempenho sistêmico é avaliado através de medidas de taxa de erro de bits (BER – *bit error rate*) e de penalidade de potência no receptor. Numa primeira etapa, realiza-se uma análise estática, sem adição ou remoção de canais, onde medidas de taxa de erro são realizadas de modo a ilustrar a penalidade inserida pela alocação do canal de controle, assim como pela atenuação da realimentação óptica. Na sequência passa-se a considerar a adição e remoção de canais (análise dinâmica), onde é analisada a inserção de penalidade em termos da taxa de erro, frente à inserção de canais na banda de transmissão.

No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros.

Os resultados obtidos foram aceitos para publicação em duas conferências internacionais e duas conferências nacionais. Abaixo se encontram listadas as quatro publicações:

J. C. R. F de Oliveira, A. C. Bordonalli e J. B. Rosolem, “All-Optical Gain Controlled EDFA: Design and System Impact”, *Lecture Notes in Computer Science Conference/Book ICT’04, LNCS 3124*, pp.727-734, Springer.

J. C. R. F de Oliveira, A. C. Bordonalli e J. B. Rosolem, “Design Requirements of All-Optical Gain Controlled EDFAs for WDM Network Applications”, *Frontiers in Optics’04*, no prelo.

J. C. R. F de Oliveira, A. C. Bordonalli e J. B. Rosolem, “Impacto da Atenuação da Realimentação Óptica em EDFAs com Controle de Ganho Totalmente Óptico”, *MOMAG’04*, no prelo.

J. C. R. F de Oliveira, A. C. Bordonalli e J. B. Rosolem, “Impacto da Alocação do Canal de Controle em EDFAs com Controle Automático de Ganho Totalmente Óptico”, *SBRT’04 – Simpósio Brasileiro de Telecomunicações*, no prelo.

Capítulo 2

EDFAs em Redes Ópticas

Neste capítulo, apresentam-se alguns aspectos de redes ópticas com roteamento de comprimento de onda, nas quais os EDFAs são dispositivos essenciais para sua implementação. A teoria básica, assim como as propriedades dos EDFAs, também são apresentadas. Discutem-se os fenômenos dinâmicos presentes nestas redes, e as maneiras como estes podem afetar o desempenho dos sistemas de transmissão. Por fim é apresentado um estudo da modelagem da resposta dinâmica dos EDFAs.

2.1 Introdução

A crescente demanda de tráfego iniciada na década de 90 de forma abrupta, pelo advento da popularização da internet, ocasionou um crescimento exponencial no tráfego das redes de comunicações. Nos dias de hoje, o tráfego em redes de comunicações continua em crescimento, em uma taxa menor, mas que tende a aumentar cada vez mais devido à utilização de serviços que necessitam de vasta largura de banda, serviços como teleconferência, processamento em tempo real, transmissão de alta definição, entre outros. Este crescente volume de tráfego impõe novas demandas tanto na tecnologia de transmissão quanto no desenvolvimento das redes de transporte da informação [6].

O desenvolvimento da tecnologia de multiplexação por divisão em comprimento de onda (WDM - *wavelength division multiplexing*) proporcionou um enorme crescimento na capacidade de transporte de informação dos sistemas de comunicações ópticas. Este crescimento foi em grande parte proporcionado pelo advento da amplificação óptica, mais precisamente pelo desenvolvimento dos amplificadores a fibra dopada com érbio (EDFAs –

erbium doped fiber amplifiers) que são dispositivos capazes de amplificar múltiplos comprimentos de onda sem causar interferência entre eles, habilitando, desta maneira, a transmissão de vários comprimentos de onda na mesma fibra, e, conseqüentemente, proporcionando um grande aumento na capacidade de transmissão dos sistemas ópticos, já que possibilitaram o aumento da taxa de transmissão na mesma proporção do aumento do número de canais transmitidos na fibra [7-8].

Nas redes de transporte atuais os comprimentos de onda que se propagam em enlaces de fibra amplificados terminam necessariamente em nós com comutação eletrônica, também conhecidos como DXC (*Cross Connects* Digitais) [9]. Com o crescimento do número de comprimentos de onda e da taxa de transmissão, a capacidade de comutação necessária nos nós com comutação eletrônica é também multiplicada. Dessa maneira torna-se necessário uma grande taxa de acréscimo no tamanho e na velocidade de processamento da comutação eletrônica, os quais são dificilmente capazes de serem obtidos, sendo possíveis apenas através de tecnologias eletrônicas ainda bastantes dispendiosas, elevando bastante o custo da rede.

Geralmente, uma grande parte do tráfego que chega no nó da rede está em trânsito, sendo assim desnecessária a sua conversão para a forma eletrônica e o seu respectivo processamento. No entanto, em redes baseadas em comutadores eletrônicos, toda a informação que chega no nó é convertida para o domínio elétrico, processada, e só depois passada adiante, limitando bastante a capacidade de transmissão rede. A tecnologia óptica é capaz de proporcionar uma maior otimização da largura de banda através da possibilidade de alocar os comprimentos de onda que se encontram em trânsito no nó em comprimentos de onda específicos que não passarão nem pela conversão nem pelo processamento eletrônico, sendo esta alocação dos comprimentos de onda realizada através da comutação óptica. Desta maneira a quantidade de tráfego que é processada eletronicamente pelo nó passa a ser mais bem gerenciada, sendo processado apenas o tráfego correspondente aos comprimentos de onda que têm como endereço final o respectivo nó. Outra vantagem significativa obtida utilizando-se a tecnologia óptica nos *cross-connects* (OXC – *optical cross connects*) é que são necessários comutadores eletrônicos com capacidades bem inferiores às que os mesmos deveriam possuir nos *cross-connects* eletrônicos (DXCs) para

operar a mesma quantidade de tráfego, proporcionando assim vantagens significativas em termos de custo e confiabilidade do nó composto pelos OXCs [11].

O fato dos canais que estão em trânsito não serem convertidos para o domínio elétrico é obtido pela introdução do roteamento no domínio óptico (comprimento de onda) realizado pelos OXCs. Como ilustrado na Fig. 2.1, um OXC possui uma configuração com múltiplas portas, com fibras de entrada e saída conectadas entre si que são capazes de redirecionar os comprimentos de onda de qualquer porta da entrada para qualquer porta de saída, de acordo com a configuração da rede. Além disto, cada OXC pode estar conectado a um ou mais comutadores eletrônicos (*electronic switches*). A Fig. 2.1 ilustra um OXC em conjunto com a chave eletrônica.

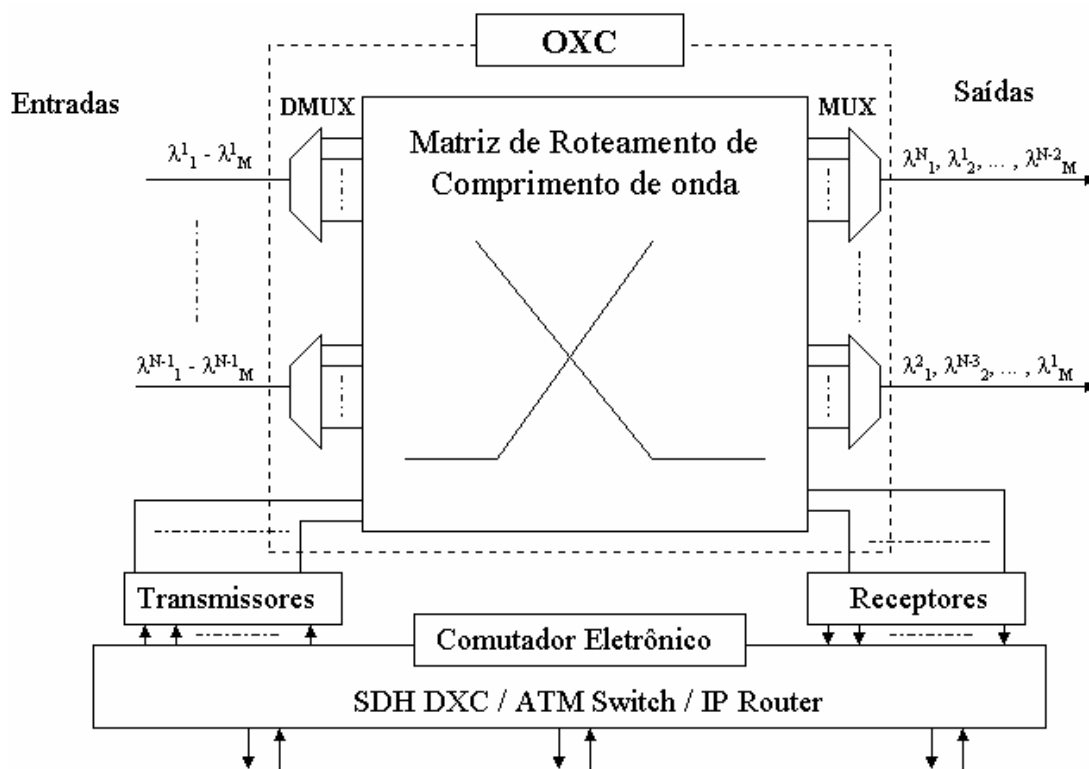


Fig. 2.1: Nó de uma rede com chaveamento, combinando um *Cross-Connect* Óptico e uma chave eletrônica.

Nas redes baseadas nos OXCs, o fato do roteamento acontecer no domínio óptico, sem a necessidade de conversão opto-eletrônica e, conseqüentemente, do processamento do sinal eletrônico, diferentes tipos de protocolos e taxas de transmissão podem ser acomodadas no mesmo OXC. Isto ocorre pois, no domínio óptico, apenas a luz modulada é transmitida, sendo esta luz independente de qualquer que seja o protocolo, que só passará a ser uma preocupação quando a luz for convertida para o domínio elétrico, pois, neste momento, a informação é organizada em quadros (*frames*) antes de ser transmitida, respeitando o formato de seu respectivo protocolo. A transparência, frente aos protocolos de transmissão, permite a transmissão e o roteamento de todos os protocolos de chaveamento/roteamento que existem nas camadas eletrônicas, a Hierarquia Digital Síncrona (SDH – *synchronous digital hierarchy*), a Hierarquia Digital Plesiócrons (PDH – *plesyochronous digital hierarchy*), Protocolo de Internet (IP – *Internet Protocol*), Modo de Transferência Assíncrono (ATM – *Asynchronous Transfer Mode*) e Gigabit Ethernet (GbE) [12]. Dessa maneira, é possível que a informação a ser transmitida possa ser mapeada em comprimentos de onda específicos, sendo os mesmos roteados através de OXCs com esta funcionalidade, evitando assim a necessidade de conversão do comprimento de onda para o domínio eletrônico até o nó de destino.

A implementação de redes ópticas com roteamento de comprimento de onda é uma tecnologia com bastante potencial. No entanto, apesar de muito testada em laboratório, poucas redes comerciais com esta funcionalidade estão presentes no mercado. Isto se deve ao fato do seu desenvolvimento estar estritamente relacionado com o desenvolvimento da rede com configurações mais complexas, nas quais um grande número de OXCs podem ser acomodados de modo que a rede cubra uma grande área geográfica. Esta dificuldade está relacionada a problemas de implementação da rede tais como, a interferência entre os canais (*crosstalk* óptico) causada pelas portas dos OXCs, a acumulação de ruído devido ao EDFA, dispersão cromática, a dispersão de modo de polarização (PMD – *polarization mode dispersion*), aos efeitos não-lineares, aos filtros ópticos, à não-planicidade do espectro do ganho do EDFA, entre outros [13-14]. Porém, nos últimos anos as tecnologias de transmissão óptica, de filtragem e de chaveamento óptico se desenvolveram, e continuam se desenvolvendo, de forma muito rápida, sendo capazes de resolver alguns dos problemas

citados anteriormente, habilitando, assim, a implementação de redes com roteamento de comprimento de onda mais complexas.

As redes ópticas com roteamento de comprimento de onda, hoje encontradas comercialmente, baseiam-se em simples arquiteturas, onde as vantagens do roteamento óptico superam as limitações.

2.2 Amplificadores a Fibra Dopada com Érbio (EDFAs)

A primeira descrição teórica do efeito da amplificação da luz foi realizada em 1958 [15] 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 [16]. 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 [17–18]. 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.

Existem hoje outras tecnologias de amplificação óptica com vasta aplicabilidade nos sistemas de comunicações ópticas. Dentre elas, destacam-se os amplificadores Raman e os amplificadores ópticos semicondutores, denominados SOAs (*semiconductor optical amplifiers*), tecnologias estas anteriores ao desenvolvimento dos EDFAs. No entanto, em relação aos EDFAs, ambos possuem ao menos uma desvantagem fundamental que inviabiliza seu desempenho em sistemas de transmissão de canais WDM de alta capacidade. No caso dos amplificadores Raman, os níveis de bombeio necessários para alcançar os valores de ganho oferecidos EDFAs são muito altos e inviáveis comercialmente. Por exemplo, lasers diodo com até 1 W de bombeio são utilizados em amplificadores Raman. Dadas estas dificuldades, os amplificadores Raman são empregados principalmente como um dispositivo de amplificação complementar àquela fornecida pelos EDFAs nos sistemas ópticos [19–20]. Já o SOA, que é muito utilizado como chave óptica,

quando utilizado como amplificador apresenta alguns problemas como, alta perda de inserção, alta figura de ruído, sensibilidade à polarização, e, principalmente, uma elevada intermodulação durante a amplificação de sinais WDM [21].

2.2.1 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. 2.2, 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. 2.2 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. 2.2, 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, proporcionando 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 de 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 capítulo, o processo de amplificação será mais cuidadosamente detalhado.

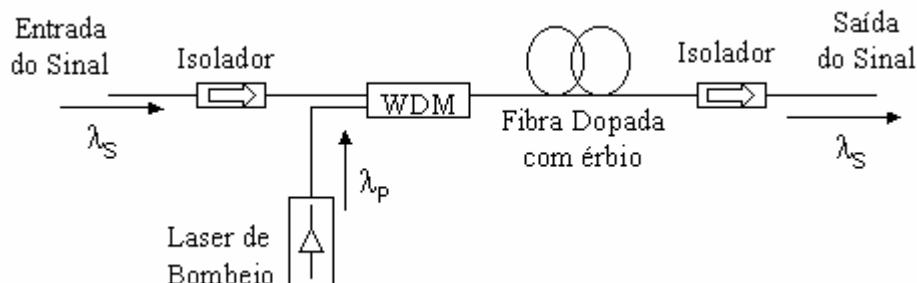


Fig. 2. 2: Configuração básica de um EDFA.

Os dispositivos apresentados na Fig. 2.2 podem ser arranjados 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 apresentadas ao longo deste capítulo.

2.2.2 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. 2.3. 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 decaem espontaneamente para o nível metaestável E_2 , liberando energia na forma de emissões espontâneas não-radiativas [22]. 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.

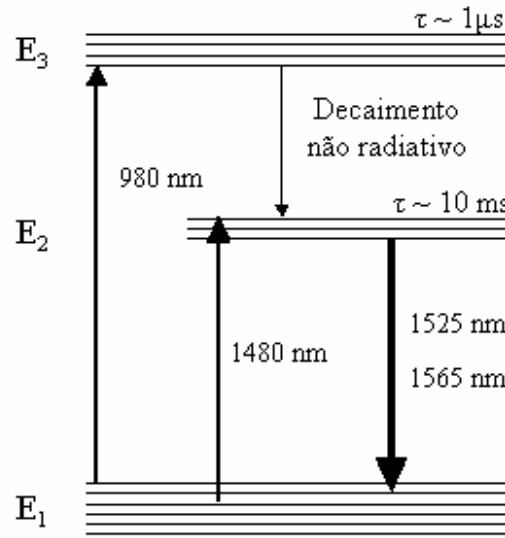


Fig. 2.3: Diagrama esquemático dos níveis de energia para a fibra dopada com érbio com destaque para as transições ocasionadas pelos bombeios de 980 nm (três níveis) e 1480 nm (dois níveis).

Já a transição dominante de E_2 para E_1 é radiativa, ou seja, os portadores perdem energia através da emissão de fótons estimulados ou espontâneos, em comprimentos de onda em torno de 1550 nm. Assim, caso se acople um sinal à entrada do amplificador, este poderia estimular a emissão de fótons com o mesmo comprimento de onda, fase, direção e polarização, ao longo da fibra dopada, numa reação em cadeia, produzindo a amplificação óptica desejada. Por 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 [23].

A Fig. 2.4 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. 2.4. 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, alumínio, dentre outros, que proporcionam uma equalização pronunciada do ganho, principalmente entre os comprimentos de onda de 1540 a 1558 nm.

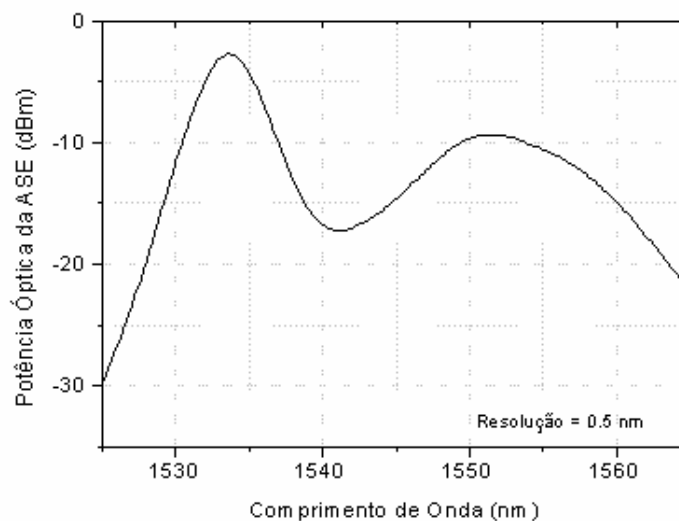


Fig. 2.4: Dependência espectral da emissão espontânea amplificada em um EDFA.

A outra opção de bombeio, ilustrada na Fig. 2.3, 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 da banda de nível E_2 , resultando em uma população excitada final que permite transições em torno do comprimento de onda do sinal [24].

2.2.3 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.

2.2.3.1 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, entre outras. A Fig. 2.5 mostra uma curva de ganho em função do nível de potência de entrada típica de um EDFA, para um determinado nível fixo 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 decibel, dB) é definido como 10 vezes o logaritmo da razão entre as potências do sinal na saída e na entrada do amplificador (em mW), equação (2.1) [25]:

$$G(dB) = 10 \times \log \left(\frac{P_s(mW)}{P_E(mW)} \right), \quad (2.1)$$

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. 2.5, 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.

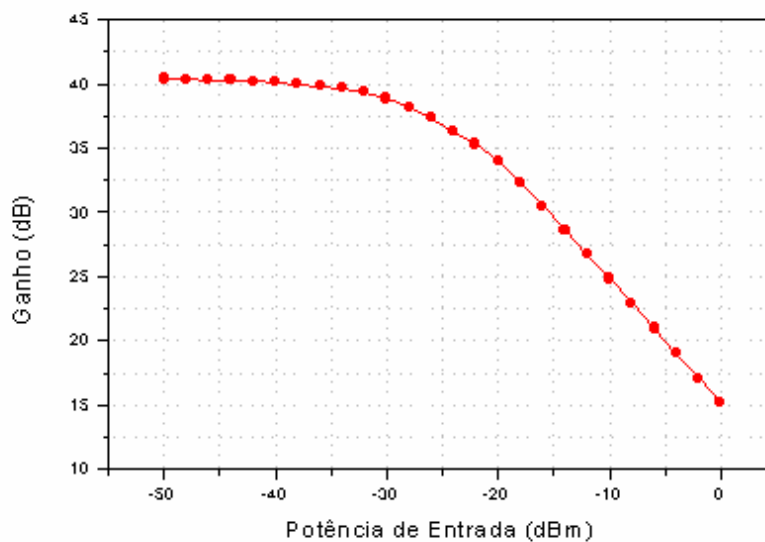


Fig. 2.5: Curva de ganho em função da potência do sinal de entrada para um EDFA.

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. 2.4, 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. 2.6 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. 2.5. 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. 2.5 e Fig. 2.6, respectivamente, são curvas muito utilizadas na caracterização de qualquer EDFA.

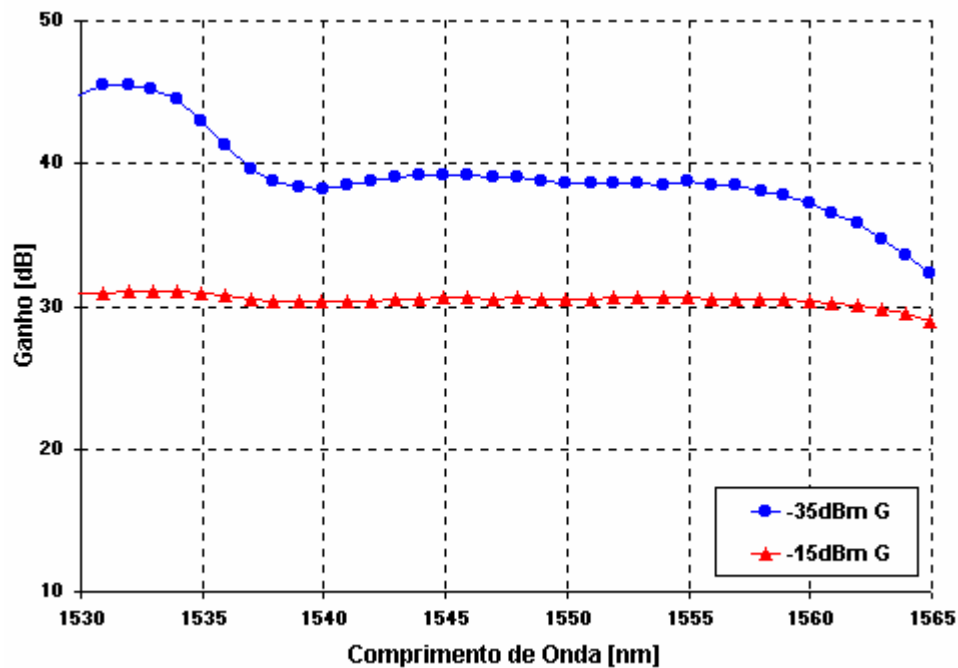


Fig. 2.6: Curva de ganho em função do comprimento de onda para um EDFA.

2.2.3.2 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 é definida por :

$$NF = \frac{SNR_E}{SNR_S}, \quad (2.2)$$

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, 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 (2.3).[25]

$$NF = 10 \times \log \left(\frac{P_{ASE}}{h\nu(G-1)\Delta\nu} \right), \quad (2.3)$$

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 analisador de espectro) 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 [21]. No entanto, na prática, a figura de ruído dos EDFAs fica

em torno de 4 a 8 dB [26]. 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*) [26] que aumenta o ruído do amplificador [27], degradando a relação sinal ruído óptica [28].

2.2.3.3 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 após 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 a qual o ganho cai 3 dB. A Fig. 2.7 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.

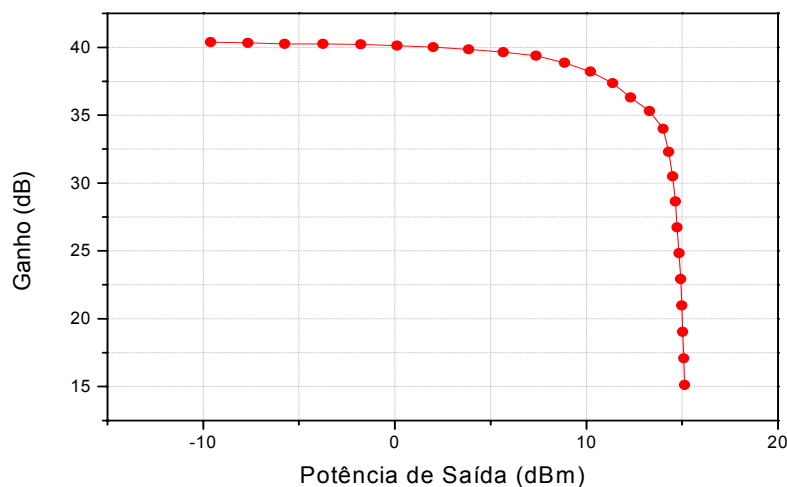


Fig. 2.7: Curva de ganho em função da potência do sinal na saída para um EDFA.

2.2.4 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 Figs. 2.8, 2.9 e 2.10, mostram esquemas de enlaces com os amplificadores sendo utilizados em cada uma das aplicações citadas.

2.2.4.1 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 devem operar 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 ou amplificador. 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 estão 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, também, o ganho para a 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.

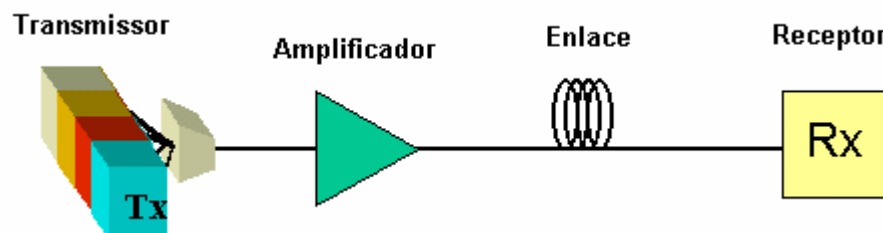


Fig. 2.8: Posicionamento do amplificador de potência em um enlace óptico.

2.2.4.2 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 a 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 ao mesmo amplificador operando com alta potência. Porém, o nível de ASE nos pré-amplificadores é maior do que nos amplificadores de potência. Os valores típicos de potência de entrada são da ordem de -40 dBm.

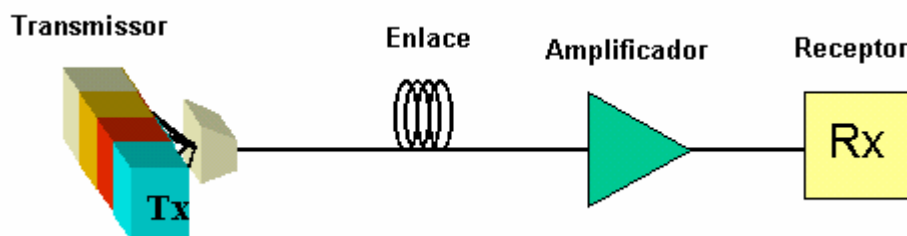


Fig. 2.9: Posicionamento do pré-amplificador em um enlace óptico.

2.2.4.3 Amplificador de Linha

Os amplificadores de linha são amplificadores de baixo ruído posicionados ao longo da linha de transmissão que procuram compensar a atenuação devido à propagação do sinal através da fibra óptica. 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 será maior que a dos pré-amplificadores), para evitar o acúmulo excessivo da ASE ao longo da linha de transmissão de forma a comprometer a recepção.

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

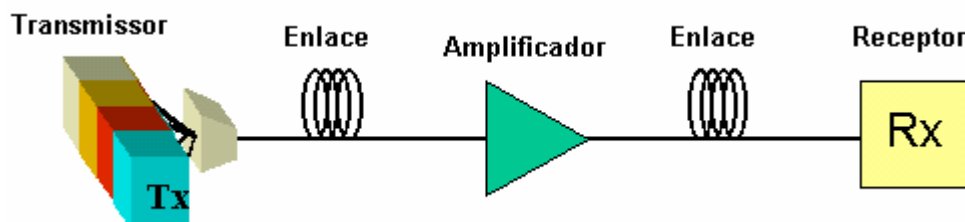


Fig. 2.10: Posicionamento do amplificador de linha em um enlace óptico.

2.2.4.4 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 da 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. 2.2 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. 2.11. Nesta configuração, o acoplador é 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*).

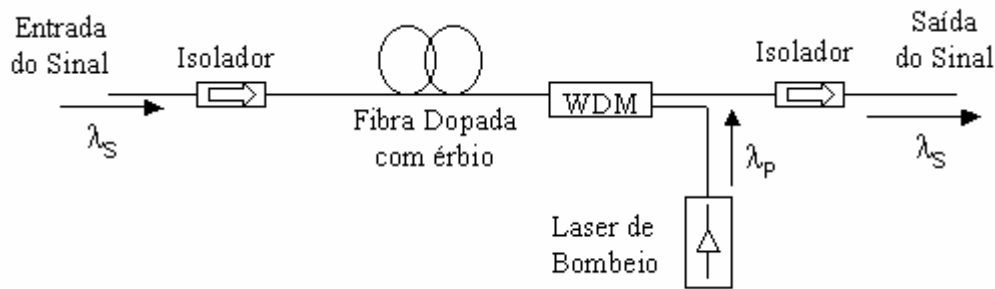


Fig. 2.11: EDFA com bombeio contra-propagante.

Já a configuração de EDFAs com bombeio bidirecional, ilustrada na Fig. 2.12, é resultado da propagação do bombeio nas duas direções possíveis: co e contra-propagante.

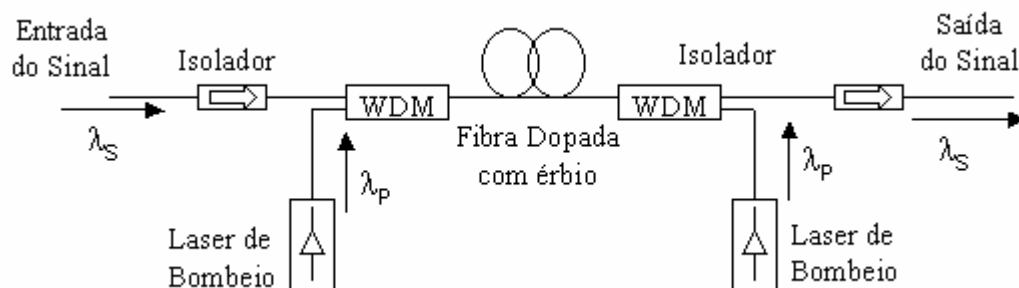


Fig. 2.12: EDFA com bombeio bidirecional.

Para implementação do amplificador com bombeio bidirecional, são necessários dois acopladores WDM, para acoplar o bombeio com 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 o mesmo 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 conjugando-se 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 sua saturação.

Várias formas de projetar amplificador de múltiplos estágios são conhecidas. A Fig. 2.13 ilustra um dos casos possíveis de amplificador de múltiplos estágios, que é um amplificador de dois estágios com dois bombeios co-propagantes.

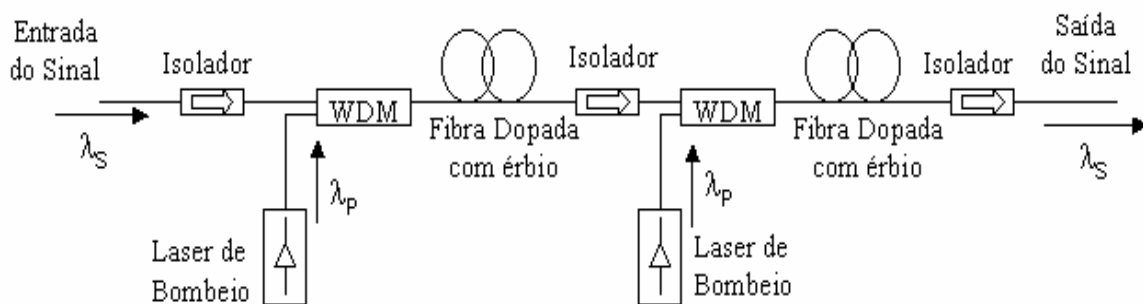


Fig. 2.13: EDFA com dois estágios e bombeios co-propagantes.

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 [23]. 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 [29].

Existe uma série de configurações que fazem uso de elementos reflexivos em sua estrutura. A Fig. 2.14 ilustra uma destas configurações, que é o amplificador reflexivo, com reflexão de bombeio.

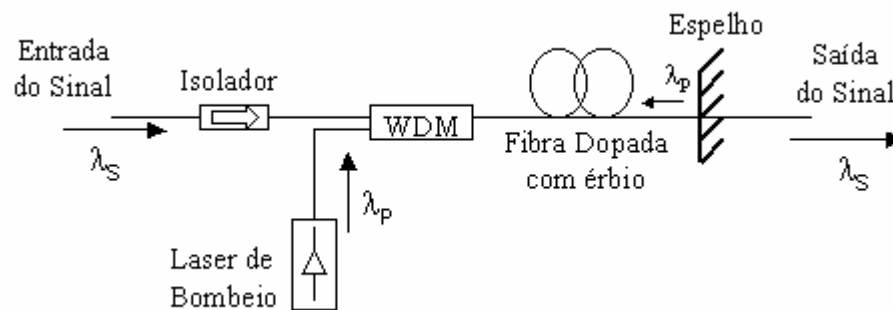


Fig. 2.14: EDFA reflexivo com reflexão de bombeio.

2.2.5 Comprimento de onda de Bombeio

Os EDFAs comerciais utilizam como fontes de bombeio diodo lasers nos comprimentos de onda de 980 nm e 1480 nm. Porém, a aplicação destes tipos de bombesios em EDFAs resulta em diferentes características que serão discutidas nesta seção.

Nos primeiros EDFAs, o comprimento de onda de bombeio de 1480 nm foi o mais utilizado na operação dos amplificadores. Isto ocorreu pois os lasers neste comprimento de

onda já estavam bem desenvolvidos, sendo fabricados a partir de algumas mudanças na composição do material do laser de sinal localizado em 1550 nm. Porém, mais recentemente, foram observadas uma série de vantagens relativas a operação e ao projeto do amplificador com o bombeio no comprimento de onda de 980 nm. Primeiramente, destaca-se o fato do modo transversal em 980 nm ser menor que em 1480 nm, fazendo com que uma maior parte do bombeio esteja confinada no núcleo da fibra. Como a dopagem da fibra se resume à região do núcleo, isto faz com que a absorção de bombeio em 980 nm seja maior que aquela para 1480 nm, possibilitando a utilização de uma fibra mais curta (para o mesmo desempenho) na fabricação do amplificador, diminuindo seu custo final.

A operação com bombeio em 980 nm diminui as absorções de estado excitado indesejadas (ESA – *excited state absorption*), que acontecem em torno do comprimento de onda de 1550 nm e se faz bem mais presente quando se utiliza o bombeio em 1480 nm. A ESA provoca uma redução na relação sinal ruído. Como consequência, a figura de ruído de amplificadores bombeados em 980 nm pode chegar a ser até 2 dB menor do que a figura de ruído de amplificadores bombeados em 1480 nm. Existem também vantagens do uso do bombeio em 980 nm que não estão relacionadas à fibra dopada com érbio. Por exemplo, os amplificadores bombeados em 980 nm possuem um menor consumo de energia e a razão de extinção de acopladores WDM 980/1550 é maior que aquela de acopladores WDM 1480/1550.

No entanto, algumas desvantagens para a operação com bombeio em 980 nm também existem. Uma delas é o fato de que as fibras monomodo em 980 nm apresentam diâmetro do núcleo menor, e com isso as perdas por curvatura em 1550 nm são maiores. Esta desvantagem se reflete na montagem do amplificador, devido à necessidade de um maior cuidado ao posicionar a fibra dopada, evitando curvaturas de diâmetro pequeno que possam causar penalidades devido à curvatura.

2.3 Fenômenos Dinâmicos em Redes Ópticas utilizando EDFAs

Em sistemas ópticos, os EDFAs geralmente operam no regime de saturação de ganho, onde seu ganho, para uma potência de bombeio fixa, depende fortemente da potência total

de entrada, como ilustrado na Fig. 2.5. Conseqüentemente, quando há a variação da potência de entrada dos EDFA, devido à variação da potência dos canais ou do número de canais acoplados, o ganho do EDFA varia causando uma alteração na potência de todos os canais amplificados, até que uma nova condição de balanceamento entre os processos de emissão e absorção possa ser alcançada. Este fenômeno é chamado de saturação cruzada do ganho e o mesmo resulta da natureza não-homogênea do ganho do EDFA [6].

O intervalo de tempo entre os dois estados de regime permanente (por exemplo, antes e depois da adição ou remoção de canais) é chamado de “período transiente” e as variações dinâmicas que ocorrem na potência óptica durante este período são conhecidas como transientes ópticos de potência. A taxa na qual o ganho do EDFA varia, resultante da mudança de potência do sinal de entrada ou de bombeio durante o período transiente, é determinada pelo tempo de vida do nível E_2 e pela potência de saída saturada [30]. As constantes de tempo da saturação do ganho e da recuperação do ganho, para os EDFAs, são da ordem de poucas centenas de microsegundos [31]. EDFAs para redes ópticas que operam com vários canais, possuem, caracteristicamente, altos níveis de potência de saída, o que reduz as constantes de tempo para a ordem de dezenas de microssegundos [32].

Os efeitos dos transientes de potência óptica têm atraído a atenção dos engenheiros de sistemas ópticos desde os primeiros anos de desenvolvimento dos sistemas de transmissão que utilizam EDFAs [33]. Para sistemas ponto-a-ponto, o controle dos transientes de potências são necessários no caso de mudanças instantâneas na potência de entrada dos EDFAs, ocasionadas por falha do laser de bombeio, ou da introdução de novos canais durante a ampliação da capacidade do enlace, capazes de elevar instantaneamente o nível de potência a centenas de miliwatts. Entretanto, nos sistemas ponto-a-ponto, estas modificações ocorrem após intervalos de tempo muito longos, de forma que a necessidade de controle do ganho ou da potência de saída não apresenta importância significativa. Porém, em redes ópticas com roteamento de comprimento de onda, existem considerações adicionais relacionadas ao comportamento dinâmico dos EDFAs. Neste tipo de sistema, a potência óptica que se propaga através de um enlace com amplificação pode variar como resultado de vários tipos de eventos, tais como reconfiguração de roteamento, adição de novos comprimentos de onda durante a expansão do sistema ou falha de equipamento. Em uma rede com roteamento de comprimento de onda, um número diferente de comprimentos

de onda se propaga por diferentes caminhos. Os comprimentos de onda em cada fibra são distribuídos por OXCs/OADMs para várias portas de saída, de acordo com a configuração de roteamento. Quando comprimentos de onda que se propagam na rede são adicionados ou removidos de um determinado ramo da rede, sua potência é subtraída ou adicionada ao novo caminho de conexão afetando, assim, a potência total que se propaga por diferentes fibras.

No fim da década de 90, os pesquisadores na área de redes ópticas focaram suas atenções aos efeitos dinâmicos, analisando com grande detalhe a influência das variações de potência ocasionadas pela inserção e remoção de canais no desempenho das redes [34]. Em um cenário futuro, onde pacotes ópticos serão mapeados diretamente para os comprimentos de onda disponíveis, as rajadas do tráfego de pacotes poderão causar variações na potência total lançada nas conexões de fibra [2], levando à saturação cruzada do ganho, efeito similar ao induzido pela inserção ou remoção de canais em redes com comutação de circuito (*circuit switched networks*). Variações dinâmicas de potência removem o sistema do estado de regime permanente para o qual o mesmo é otimizado, degradando o desempenho dos canais. Existem várias maneiras pelas quais as variações dinâmicas de potência podem afetar o desempenho de transmissão dos sistemas. Nesta seção algumas delas serão abordadas.

2.3.1 Impacto Relativo à Variação da Relação Sinal Ruído Óptica (OSNR)

As flutuações dinâmicas de potência causam mudanças na potência do sinal, na potência de ASE, e conseqüentemente, na relação sinal ruído óptica (OSNR). O aumento ou redução da OSNR está diretamente ligado à melhoria ou a deteriorização do desempenho da taxa de erro de bit (BER – *bit error rate*) no receptor. Em ambos os casos, variações na potência de entrada podem também causar altas penalidades devido ao desalinhamento do limiar do receptor [35]. Uma ampla redução na potência do receptor pode fazer com que se opere abaixo do nível mínimo de sensibilidade do receptor. Por outro lado, um grande acréscimo de potência pode induzir não-linearidades na resposta do receptor e leva-lo à saturação, degradando, assim, o desempenho do sistema.

2.3.2 Impacto Relativo à Interferência (Crosstalk) Óptica

O *crosstalk* em enlaces WDM ponto-a-ponto é causado pela imperfeição dos filtros do receptor ou do filtro do pré-amplificador. Esta imperfeição permite que potências dos canais adjacentes passem pelo filtro junto com o sinal a ser detectado, causando uma diminuição na relação sinal ruído, e, conseqüente, degradação da BER. Este tipo de *crosstalk* é denominado de “aditivo” devido à adição de potência ao sinal recebido, e o mesmo pode ser reduzido pelo uso de filtros mais seletivos com múltiplos estágios.

As redes ópticas contêm um grande número de dispositivos ópticos como, comutadores, filtros, demultiplexadores e multiplexadores que são constituintes dos nós responsáveis pelo roteamento e comutação dos canais. No entanto, nenhum destes dispositivos é capaz de evitar completamente a imperfeição na supressão dos comprimentos de ondas adjacentes, caracterizando a existência do *crosstalk*. Como os dispositivos são baseados em diferentes tecnologias e, portanto apresentam diferentes eficiências de supressão, o *crosstalk* passa a apresentar uma dependência com a tecnologia de fabricação utilizada na construção dos dispositivos.

Como no caso da relação sinal ruído óptica, o aumento do *crosstalk* deteriora a taxa de erro de bit do sistema; quanto maior for o *crosstalk*, maior a penalidade a que o sistema será submetido.

2.3.3 Impacto Relativo aos Efeitos Não-Lineares da Fibra

Os principais efeitos não-lineares, capazes de degradar o desempenho de um sistema de transmissão por fibras ópticas, são o espalhamento estimulado de Brillouin (SBS – *stimulated brillouin scattering*), o espalhamento estimulado Raman (SRS – *stimulated raman scattering*), a auto-modulação de fase (SPM), a modulação cruzada de fase (XPM) e a mistura de quatro ondas (FWM). Cada um deles tem um limiar de ocorrência e um impacto diferenciado nos sistemas de comunicações ópticas. Em particular, o limiar de ocorrência está fortemente associado ao nível de potência que se propaga na fibra. Devido a este fato, as variações dinâmicas de potência que ocorrem nos canais transmitidos em redes ópticas com roteamento de comprimento de onda, podem elevar os níveis de potência na fibra e, assim, excitar efeitos não-lineares que deterioram o desempenho dos sistemas.

No espalhamento estimulado de Brillouin, uma onda de alta potência propagando em uma determinada direção, proporciona uma estreita banda de ganho, com largura espectral de 20 MHz, para a luz que se propaga no sentido contrário. Devido a uma largura espectral muito estreita, este efeito não é capaz de acoplar potência a mais de um canal WDM, já que o espaçamento entre estes canais na grade do ITU é superior a 20 MHz. Para lasers com largura de linha bastante estreita e modulados externamente, o SRS não é significativo para potências abaixo de 9 dBm [36]. Porém, este limiar pode ser excedido no caso de falhas que provoquem a retirada de canais transmitidos, uma vez que a potência dos canais sobreviventes, após a amplificação, poderia exceder os limites de potência necessários para a ocorrência do SBS.

O espalhamento estimulado Raman (SRS) difere do SBS devido ao fato da transferência de potência ocorrer em ambas direções, co e contra-propagante, e no interior de uma faixa espectral muito maior, em torno de 100 nm. Dependendo do comprimento de onda de bombeio utilizado esta faixa pode muito bem estar localizada na região de 1500 nm. Em sistemas WDM, devido ao SRS, a potência dos menores comprimentos de onda é repassada para os maiores comprimentos de onda, levando a uma degradação da relação sinal ruído óptica dos primeiros. Quando alguns comprimentos de onda que se propagam no enlace são perdidos por qualquer que seja o motivo, a potência dos comprimentos de onda sobreviventes aumenta rapidamente na proporção do número de comprimentos de onda perdidos devido ao efeito da saturação cruzada do ganho. Dessa forma, se os canais sobreviventes continuarem ocupando a mesma largura espectral, o aumento de potência poderá contrabalançar com o efeito Raman. No entanto, se a banda ocupada pelos canais WDM é reduzida, o efeito Raman pode ser anulado, desbalanceando, desta forma, a potência dos canais e causando redução da relação sinal ruído óptica (OSNR – *optical signal to noise ratio*).

Alguns efeitos não-lineares capazes de inserir penalidade, devido às características dinâmicas da rede, ocorrem devido à dependência do índice de refração com a intensidade de potência óptica nas fibras de sílica. Esta dependência causa a modulação da fase do campo elétrico do sinal óptico propagante proporcionalmente à sua correspondente potência óptica. Devido ao fato da modulação de fase ser atribuída à potência do próprio sinal, este fenômeno é conhecido como automodulação de fase (SPM – *self phase modulation*). O

deslocamento de fase torna-se maior de acordo com o aumento da distância de propagação do pulso em um enlace com amplificação. A variação de fase torna-se significativa próxima a 90 graus, quando o produto potência-comprimento efetivo total do sistema se aproxima de 1 W.km. Supondo um pulso com perfil temporal do tipo gaussiano, o início e o fim do pulso possuem intensidades mais baixas sendo, assim, submetidos a um índice de refração diferente daquele a que é submetido a região central do pulso, provocando a auto modulação de fase do pulso e implicando na geração de novas frequências, determinadas pela derivada do perfil temporal do pulso. A geração de novas frequências alarga o espectro do pulso, mas não altera o perfil temporal do mesmo [37]. Este alargamento espectral do pulso pode resultar em penalidades devido ao processo de filtragem óptica, pois o pulso é alargado espectralmente, pela distorção causada pela dispersão cromática, degradando a OSNR do sistema e, conseqüentemente, levando-o à degradação da BER.

O efeito da SPM começa a se tornar considerável quando a potência de um comprimento de onda torna-se muitas vezes maior que o valor ao qual o mesmo foi projetado para operação. Para que isto ocorra é necessário que todos, menos um ou dois canais em uma transmissão WDM, sejam perdidos, o que ocasiona um aumento abrupto na potência dos canais sobreviventes, excedendo o limiar de potência da SPM. Este comportamento é possível de ocorrer em redes ópticas com roteamento de comprimento de onda. Por exemplo, vários comprimentos de onda em uma mesma fibra podem chegar ao nó de cross-conexão, sendo que, na fibra de saída, apenas um destes canais está presente. Se este canal chega a um EDFA, ele será muito mais amplificado que no caso de estar dividindo a banda de amplificação com os outros canais.

Se a modulação do índice de refração é causada pelo excesso de potência de um outro canal do sistema WDM, o efeito que ocorre neste caso é a modulação de fase cruzada (XPM – *cross phase modulation*). Neste caso, as penalidades impostas ao sistema são semelhantes às provocadas pela SPM. No entanto, o *crosstalk* se configura como a principal penalidade inserida por este efeito.

Outro efeito não-linear apresentado pelas fibras dopadas com sílica é a mistura de quatro ondas (FWM – *Four Wave Mixing*), que ocorre principalmente em fibras de dispersão deslocada (DS – *dispersion shifted*), que possuem dispersão nula na banda de transmissão dos canais WDM. Neste efeito, a mistura dos campos de dois ou mais

comprimentos de onda de um sistema WDM geram novas componentes de campo em novas frequências que podem, também, se localizar na mesma banda de transmissão. Quanto maior o número de canais transmitidos, maior o número de componentes gerados pela FWM [36]. Em sistemas WDM igualmente espaçados (em comprimento de onda) as componentes geradas pela FWM localizam-se muito próximas aos canais transmitidos, provocando um alto nível de *crosstalk* que faz com que, no receptor, o sinal e as componentes geradas se misturem, produzindo um ruído interferométrico capaz de inserir séria penalidade ao sistema. O nível de *crosstalk* inserido pelas componentes geradas pelo FWM cresce proporcionalmente com o quadrado da potência do sinal que o gerou. No entanto, ele é inversamente proporcional ao quadrado da dispersão e da quarta potência do espaçamento entre os canais [38]. Para minimizar os efeitos da FWM, é necessário posicionar o canal em uma região com um valor elevado de dispersão e um grande espaçamento entre os canais. As penalidades causadas pela FWM, no que diz respeito ao acréscimo de potência aos canais transmitidos, crescem mais rapidamente que o *crosstalk* devido a XPM. No entanto, a forte dependência com o espaçamento entre canais e com a dispersão proporciona a oportunidade de supressão da penalidade devido a FWM a pequenos valores, proporcionando ainda uma larga margem para variação de potência [36].

2.4 Modelagem da Resposta Dinâmica dos EDFAs

Nesta seção, serão discutidos os modelos teóricos, baseados em simulação utilizados para descrever a resposta dinâmica dos EDFAs. Primeiramente será apresentado o equacionamento clássico para um sistema de três níveis, onde se identificam os mecanismos que permitem a amplificação de sinais ópticos pelo EDFA. Na sequência, apresenta-se o modelo utilizado para a modelagem da resposta dinâmica de EDFAs, realizada por Y. Sun em 1996 [39–40], e as respectivas atualizações que permitem adequá-lo ao tráfego das redes ópticas atuais [41]. Por fim uma validação para o modelo da resposta dinâmica do EDFA é apresentada, tomando como base experimentos realizados por Dimopoulos, onde os resultados referentes ao modelo são comparados a resultados experimentais [6].

A Fig. 2.15 mostra um diagrama de um sistema de três níveis de energia. Nesta secção, este diagrama será utilizado como base para a apresentação das equações de taxa que descrevem o comportamento das populações atômicas no EDFA, considerando o bombeio operando em 980 nm.

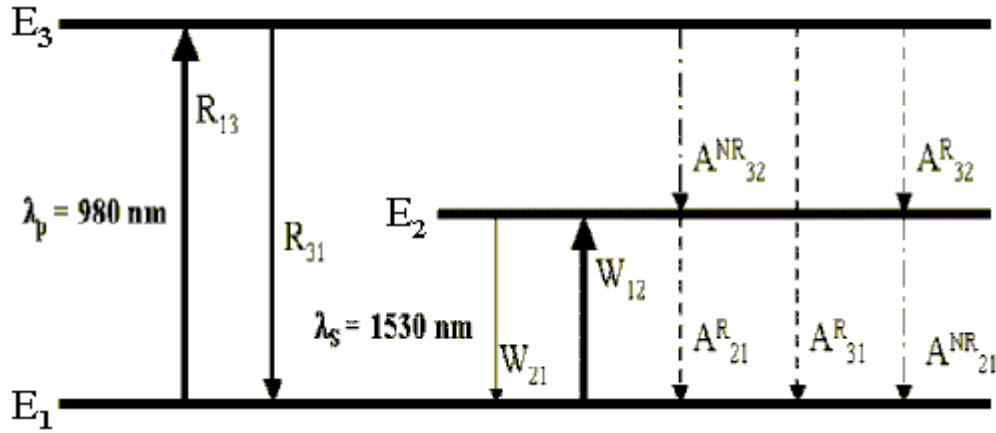


Fig. 2.15: Diagrama de três níveis para a fibra dopada com érbio.

Para esta análise, apenas o núcleo da fibra é adotado como composto de vidro de sílica dopada com érbio. Além disto, as dimensões físicas da fibra são consideradas invariantes ao longo de seu comprimento. A Fig. 2.15 mostra o diagrama de três níveis de energia para a fibra dopada com érbio, indicando as transições mais relevantes entre estes níveis. Nas transições que envolvem o comprimento de onda de bombeio, existem três possíveis transições. A primeira, quando os portadores do nível E_1 absorvem energia do bombeio e são excitadas para o nível E_3 , a segunda quando os portadores do nível E_3 decaem estimuladamente para o nível E_1 , e a terceira quando o decaimento do nível E_3 para o nível E_1 é espontâneo. Estas transições estão representadas na Fig. 2.15 pelas taxas de absorção de bombeio R_{13} , de emissão estimulada de bombeio R_{31} e de emissão espontânea radiativa de bombeio A_{31}^R , respectivamente. Para as transições que envolvem o comprimento de onda do sinal transmitido, podem-se identificar a absorção do sinal, representada pela taxa de absorção de sinal W_{12} , a emissão estimulada de sinal, representada pela taxa de emissão estimulada de sinal W_{21} , e a emissão espontânea de sinal, representada pela taxa de emissão espontânea radiativa de sinal A_{21}^R . Ainda com referência à Fig. 2.15, as outras transições

possíveis de ocorrer podem ser de forma radiativa, representada pela taxa de emissão radiativa entre os níveis 3 e 2, A_{32}^R , de forma não-radiativa, representada pelas taxas de transição não radiativa entre os níveis 3 e 2, A_{32}^{NR} , e entre os níveis 2 e 1, A_{21}^{NR} . Tomando a população total de portadores dos íons de érbio no núcleo da fibra como N_0 (m^{-3}), tem-se:

$$N_0 = N_1 + N_2 + N_3 , \quad (2.4)$$

onde N_1 , N_2 e N_3 , representam as populações de portadores nos estados de energia fundamental, metaestável e de bombeio, respectivamente. Quando o sistema de três níveis é excitado através do bombeio, os portadores de nível 1 migram para o nível 3. Num estado de energia mais alto, os portadores tendem a voltar à situação de origem, decaindo indiretamente (através de níveis de energia intermediários) ou diretamente para a condição de equilíbrio, retornando ao nível fundamental. Como ilustrado na Fig. 2.15, existem duas possibilidades para o decaimento dos portadores. O decaimento não-radiativo e o decaimento radiativo. Partindo-se de população de portadores do nível 3, definem-se as taxas de emissão espontânea radiativa, A_3^R , e não-radiativa, A_3^{NR} , do nível 3, como [22]:

$$A_3^R = A_{32}^R + A_{31}^R \quad (2.5a)$$

$$A_3^{NR} = A_{32}^{NR} \quad (2.5b)$$

No caso do érbio, pode-se considerar que a transição predominante, do nível 3, é do tipo não-radiativa, de forma que $A_{32}^{NR} \gg A_3^R$ e $A_{31}^R \cong 0$. Se a taxa de emissão espontânea total do nível 3, A_3 , for definida como $A_3 = A_3^{NR} + A_3^R$, então:

$$A_3 \cong A_{32}^{NR} = A_{32} , \quad (2.6)$$

onde o índice “NR” foi descartado pelo fato da emissão não-radiativa ser a transição predominante. De maneira análoga, a taxa de emissão espontânea total, do nível 2, é dada por:

$$A_2 = A_{21}^R + A_{21}^{NR} \quad (2.7)$$

Considerando novamente o érbio, pode-se observar que as emissões espontâneas do nível 2 são predominantemente radiativas. Assim, o termo A_{21}^{NR} , de (2.7) pode também ser desconsiderado, de forma que:

$$A_2 \cong A_{21}^R = A_{21} \quad (2.8)$$

onde o índice “R” foi desconsiderado pelo fato da emissão radiativa ser a transição predominante.

De acordo com as equações descritas nesta seção, lembrando-se que a densidade de átomos no interior do núcleo é considerada constante ao longo da fibra dopada, ou seja, considerando a fibra com perfil homogêneo e tomando, como base, a Fig. 2.15, pode-se obter as equações de taxa para os três níveis de energia que estão envolvidos no mecanismo de amplificação [22]:

$$\frac{dN_1}{dt} = -R_{13}N_1 + R_{31}N_3 + A_{21}N_2 + W_{21}N_2 - W_{12}N_1 \quad (2.9)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = A_{32}N_3 - A_{21}N_2 + W_{12}N_1 - W_{21}N_2 \quad (2.10)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = R_{13}N_1 - R_{31}N_3 - A_{32}N_3 \quad (2.11)$$

Em (2.9), pode-se observar que a variação temporal dos portadores do nível 1 diminui por absorção, devido à presença do bombeio ($R_{31}N_1$) e do sinal ($W_{12}N_1$), porém aumenta com os decaimentos estimulados do bombeio ($R_{31}N_3$) e do sinal ($W_{21}N_2$) e com o decaimento espontâneo do nível 2 ($A_{21}N_2$). Em (2.10), a variação temporal dos portadores do nível 2 aumenta devido às emissões espontâneas não-radiativas do nível 3 para o nível 2 ($A_{32}N_3$) e à absorção do sinal que se propaga pela fibra dopada ($W_{12}N_1$). Por outro lado, as emissões espontâneas do nível 2 para o nível 1 ($A_{21}N_2$) e as emissões estimuladas pelo sinal ($W_{21}N_2$) contribuem de forma inversa para a variação dos portadores do nível 2. Por fim, em (2.11), a variação temporal dos portadores do nível 3 sofre um acréscimo devido a presença dos portadores excitados pelo bombeio ($R_{13}N_1$), porém, decai devido às emissões espontâneas no comprimento de onda de bombeio ($R_{31}N_3$) e às emissões não-radiativas do nível 3 para o nível 2 ($A_{32}N_3$).

Os modelos de análise do estado estacionário supõem que a densidade de portadores nos três níveis de energia são invariantes ao longo do tempo. Assim as variações temporais do sistema de equações diferenciais (2.9) a (2.11) são anuladas, obtendo um sistema de três equações e três incógnitas que, após manipulações algébricas, são capazes de modelar matematicamente o comportamento estacionário da população de portadores nos níveis de energia. No entanto, o modelo estacionário não é capaz de descrever o comportamento dos EDFAs em redes ópticas, pois não descreve a dependência temporal da densidade de portadores quando a potência de entrada do EDFA é variada (transientes de potência).

Desde a invenção dos EDFAs, suas propriedades físicas e sua modelagem tem sido objeto de intensa pesquisa [22, 42]. No entanto, devido ao fato do tempo de resposta do EDFA ser lento em comparação às taxas de transmissão utilizadas nos sistemas de comunicações ópticas e à conseqüente transparência do EDFA à interferência entre canais, a maior parte dos estudos focaram suas atenções nas características estacionárias do EDFA. O crescimento do interesse, bem como a implementação de redes ópticas com múltiplos comprimentos de onda, trouxeram à discussão as características dinâmicas dos EDFAs. Isto se deve ao fato de o EDFA ser um elemento indispensável na implementação deste tipo de rede, e dessa forma existe a necessidade de se minimizar as penalidades causadas pelos efeitos dinâmicos que podem ser causadas pela sua inserção nas redes totalmente ópticas.

Os modelos numéricos capazes de descrever a resposta dos EDFAs às variações de potência de entrada consistem de um conjunto de equações diferenciais com algumas condições de contorno [30-31]. No entanto, o número destas equações diferenciais aumenta significativamente no caso de uma transmissão com múltiplos comprimentos de onda. Aliado a isto e ainda considerando-se as componentes espectrais de ASE contra e co-propagantes, a solução para estes modelos se torna extensivamente longa, exigindo uma grande capacidade computacional, especialmente quando sistemas com um grande número de EDFAs são analisados. Neste contexto, fez-se necessário um modelo preciso e computacionalmente rápido, capaz de modelar as variações dinâmicas do ganho do EDFA e prever o comportamento dos comprimentos de onda transmitidos durante as variações dinâmicas de potência que ocorrem em grande parte dos sistemas ópticos amplificados. Um modelo capaz de satisfazer estas características foi desenvolvido por Sun *et al.* [39], sendo este modelo uma extensão do modelo analítico desenvolvido por A. Saleh, no qual varias expressões analíticas são utilizadas para descrição do comportamento de sinais WDM que atravessam o EDFA [43]. O modelo Sun *et al.* [39], mostra que, sob um determinado conjunto de condições que são geralmente satisfeitas na prática por sistemas WDM, o complicado e vasto conjunto de equações diferenciais dos modelos numéricos existentes até aquela época poderiam ser reduzidos a uma única equação diferencial ordinária, diminuindo significativamente o esforço computacional.

Porém, o modelo de Sun *et al.* [39] ainda deixou um ponto em aberto, pois este não é válido quando considerado o efeito de auto-saturação de ganho do EDFA, causado pela ASE. Este efeito se faz presente em redes ópticas com múltiplos comprimentos de onda. É conhecido que o impacto da ASE no ganho de um EDFA é pequeno em sistemas WDM com um grande número de comprimentos de onda. No entanto, a evolução dos transientes de potência causados pela retirada de parte dos canais que se propagam pelo enlace pode ser fortemente afetada pela auto-saturação causada pela ASE. Assim, este efeito deveria ser incluído nas análises sem causar um excessivo acréscimo no tempo de execução da simulação. Um modelo com estas características foi apresentado por Dimopoulos [6] com base no modelo de Y. Sun [39], porém com a adição de um termo responsável pela descrição do impacto da auto-saturação da ASE, termo este sugerido por T. Georges e E. Delevaque, em [41]. Com base em Dimopoulos [6], verifica-se que o modelo com a

inclusão do termo de ASE é capaz de descrever o comportamento da resposta dinâmica do EDFA, exigindo um baixo esforço computacional. A seguir, este modelo e as condições de contorno que o delimitam serão apresentadas e discutidas.

O modelo apresentado por Dimopoulos [6] é válido dentro de um conjunto de condições de contorno que serão descritas a seguir:

- A estrutura de níveis de energia do érbio é modelada como um sistema de dois níveis;
- O espectro de ganho do EDFA possui alargamento homogêneo;
- A ESA (*Excited State Absorption*), que afeta a absorção de bombeio ao longo da fibra, é desconsiderada;
- A dependência do ganho com a polarização não é considerada (PDG);
- A potência média de sinal e de bombeio variam lentamente em comparação ao tempo de propagação da luz ao longo da fibra dopada com érbio;
- A perda devido à inserção de impurezas não é considerada;
- A área da secção transversal da região ativa dopada com érbio é pequena quando comparada ao modo óptico, onde se propagam o bombeio e todos os sinais.

Do modelo do Y. Sun, as equações de taxa que descrevem a taxa de variação na população dos íons de érbio, envolvendo os três níveis de energia, pode ser reduzida a uma única equação diferencial ordinária [39]. O comprimento da fibra é L e a fibra é atravessada por um número K de comprimentos de onda, incluindo o comprimento de onda de bombeio. Considerando a propagação ao longo da fibra nas duas direções, equivalente a desconsiderar o efeito de auto-saturação do ganho provocado pela ASE, a taxa de variação da população dos íons de érbio no nível 2, E_2 , pode ser expressa por [39,44]:

$$\frac{d\langle N_2(t) \rangle}{dt} = -\frac{\langle N_2(t) \rangle}{\tau_0} - \frac{1}{\tau_0 \cdot L \cdot \zeta} \cdot \left[\sum_{i=1}^K (P_i^{out}(t) - P_i^{in}(t)) \right], \quad (2.12)$$

onde $\langle N_2(t) \rangle$ é a fração de íons de érbio que são excitados ao nível de energia 2, E_2 , em todo o comprimento da fibra dopada com érbio. O parâmetro de saturação, $\zeta = \rho S / \tau_0$, expressa a taxa de excitação espontânea por unidade de comprimento, onde ρ é a densidade dos íons de érbio em número de íons de érbio por metro cúbico, S é a área da secção transversal da fibra dopada com érbio e τ_0 é o tempo de fluorescência do nível metaestável. Em (2.12) P_i^{out} e P_i^{in} , representam o número de fótons na entrada e na saída, por unidade de tempo (s) e para o comprimento de onda i , sendo relacionados pela seguinte equação:

$$P_i^{out} = P_i^{in} \cdot G_i(t) = P_i^{in} \cdot \exp(u_i \cdot [\gamma_i + \alpha_i] \cdot \langle N_2(t) \rangle - \alpha_i \cdot L), \quad (2.13)$$

onde as características de absorção e emissão da fibra dopada com érbio são descritas pela constante de emissão estimulada, γ_i , e pela a constante de absorção, α_i , para o comprimento de onda denotado pelo índice, i , e expressados em m^{-1} . Seus valores dependem da composição do vidro da EDF, ou seja, da distribuição dos íons de érbio no núcleo da fibra dopada e da temperatura, sendo ambos facilmente medidos [42].

Na condição estacionária, o primeiro membro da equação (2.12) é igual a zero e, dessa forma, a equação implícita resultante expressa a conservação do número total de fótons de bombeio e de sinal e como eles interagem através do meio de ganho. A equação (2.12) desconsidera a quantidade de fótons de bombeio que são convertidos em ASE. A inclusão do termo de ASE nesta equação de taxa torna o tratamento matemático da equação impossível de ser realizado. No caso de altas potências de entradas, maiores que -15 dBm, ou para ganhos menores que 20 dB, o erro causado pela simplificação estacionária é menor que 0,5 dB [41,43]. No entanto, o número de fótons gerados pela ASE, e seu impacto na determinação da inversão de população média, pode não ser desprezível, e isto ocorre quando uma grande parte dos canais que se propagam na fibra é retirada [6].

Uma maneira simples de incluir o termo de ASE, sem aumento de esforço computacional, é a utilização da fórmula que relaciona a inversão de população média com a ASE produzida, apresentada em [41]. A ASE produzida nos dois estados de polarizações

ortogonais e em ambos os sentidos de propagação, sobre toda a largura de banda da ASE, em fótons por segundo, é aproximadamente dada por [41]:

$$P_{ASE} = 4 \cdot \int_{ASE_BW} n(\nu)_{sp} \cdot (G(\nu) - 1) \cdot \Delta\nu \ , \quad (2.14)$$

onde $G(\nu)$ é o ganho na frequência óptica ν , e $\Delta\nu$ (ou $d\nu$) é um pequeno intervalo de frequências, centrado em torno da frequência ν . É adotado que a quantidade de ASE produzida em cada sentido de propagação são idênticas e iguais à metade do valor obtido pela equação (2.14). A quantidade $n(f)_{sp}$ é definida como o fator de ruído na mesma frequência, dada por:

$$n(f)_{sp} = \frac{\gamma(\nu) \cdot \langle N_2(t) \rangle}{(\gamma(\nu) + \alpha(\nu)) \cdot \langle N_2(t) \rangle - \alpha(\nu)} \quad (2.15)$$

A equação (2.14) proporciona uma maneira de se calcular a taxa na qual os fótons de bombeio são transformados em fótons de ASE. P_{ASE} é, fisicamente, equivalente ao termo $(P^{out} - P^{in})$, podendo dessa maneira ser incluído na equação (2.12) como mostrado a seguir:

$$\frac{d\langle N_2(t) \rangle}{dt} = -\frac{\langle N_2(t) \rangle}{\tau_0} - \frac{1}{\tau_0 \cdot L \cdot \zeta} \cdot \left[\sum_{i=1}^K (P_i^{out}(t) - P_i^{in}(t)) + P_{ASE}(t) \right] \quad (2.16)$$

Em condições estacionárias, esta equação assume a forma da equação algébrica implícita apresentada em [41], podendo ser numericamente resolvida de modo a obter o valor inicial de $\langle N_2(t) \rangle$. A equação (2.14) é precisa, na condição de inversão de população uniforme ao longo da fibra, porém quando o amplificador está saturado, (2.14) subestima a

potência total de ASE gerada. De um modo geral, quando a inversão de população diminui da entrada para a saída, a verdadeira ASE co-propagante produzida é menor que a metade do valor da equação (2.14) e a ASE contra-propagante é maior. Dessa maneira, o erro no cálculo da ASE contra-propagante é maior que o da ASE co-propagante. Apesar disto, a equação (2.14) fornece uma boa estimativa da quantidade de fótons de bombeio que se transformam em ASE e a equação (2.16) se torna mais precisa que a equação (2.12).

A equação (2.16) pode ser integrada utilizando um método numérico padrão, como o Runge-Kutta de quarta ordem, tomando como base um experimento clássico para a análise do comportamento dinâmico do EDFA. Neste experimento, o sinal de entrada do EDFA é composto por um canal não modulado (canal sobrevivente) e um canal modulado através de um modulador acústico óptico com razão de extinção maior que 30 dB e com frequência de modulação de algumas centenas de hertz, sendo que a potência do canal modulado varia de tal forma a representar o número de canais que necessitam serem inseridos ou retirados, e a análise do impacto do transiente é realizada no canal não modulado (sobrevivente) através do uso de um osciloscópio digital.

As Figs. 2.16 e 2.17 ilustram a resposta dinâmica do EDFA, comparando os resultados obtidos em um experimento prático, com a resposta obtida para o mesmo experimento através do modelo proposto por [6], que se baseia na resolução da equação (2.16).

A potência de bombeio lançada na fibra dopada com érbio foi de 15,1 dBm (bombeio de 1480 nm) e diferentes proporções de potência para o canal modulado em 1557,2 nm e para o canal sobrevivente em 1554 nm, foram utilizadas para simular o número de canais inseridos e retirados. Foi considerado que a potência total dos dois canais corresponde ao equivalente a de oito canais com -14,7 dBm cada, ou seja, aproximadamente -5,7 dBm de potência total.

A Fig. 2.16 ilustra medidas experimentais (linhas contínuas) e simuladas (linhas tracejadas) da evolução das excursões de potência do canal sobrevivente para sete diferentes proporções de potência do canal sobrevivente em relação à potência total, que foi mantida constante. Como visto na Fig. 2.16, existe uma grande concordância entre os resultados medidos e simulados, sendo que os maiores desvios ocorrem nos casos onde uma alta proporção da potência total encontra-se nos canais modulados (remoção de muitos canais). A Fig. 2.17 ilustra, para as mesmas proporções de potência do canal sobrevivente e

dos canais modulados, a resposta do EDFA para quatro diferentes comprimentos de onda do canal sobrevivente. Novamente os resultados experimentais e a simulação exibiram grande concordância, demonstrando que o modelo utilizado consegue descrever bem a resposta dinâmica dos EDFAs.

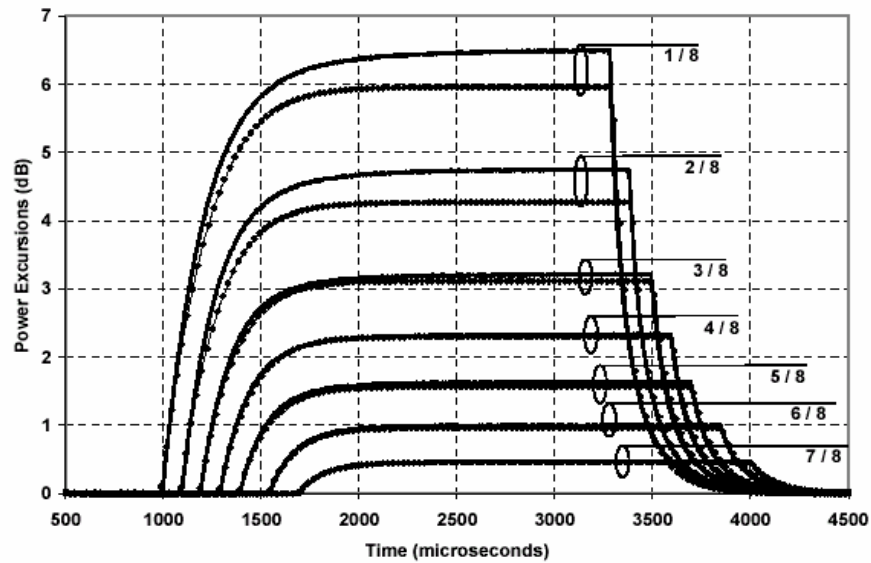


Fig. 2.16: Evolução das excursões de potência, experimentais (linha contínua), e simuladas (linha tracejada), para o canal sobrevivente localizado em 1554 nm para 7 diferentes valores de potência do canal sobrevivente proporcionais à potência total [6].

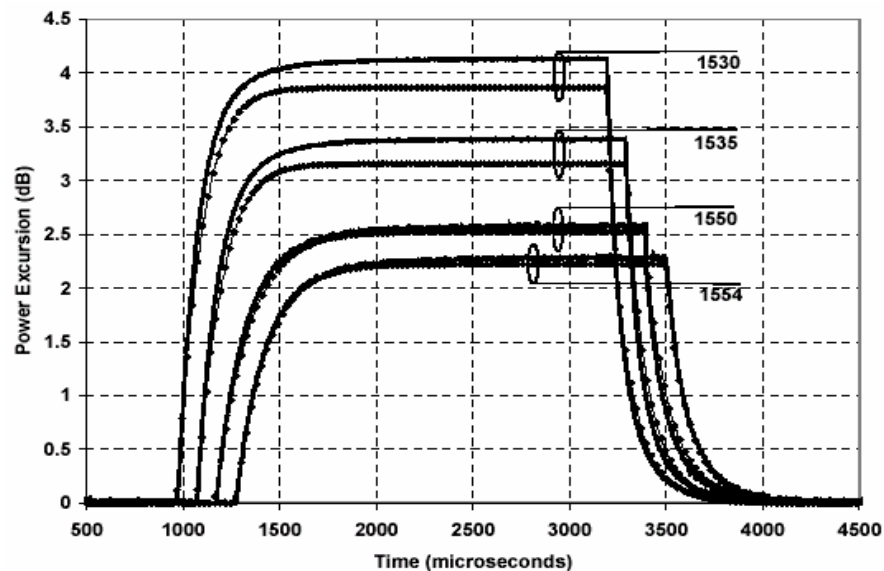


Fig. 2.17: Evolução das excursões de potência, experimentais (linha contínua), e simuladas (linha tracejada), para 4 diferentes comprimentos de onda do canal sobrevivente. Os canais modulados encontram-se em 1557,2 nm e possuem a mesma potência de entrada do canal sobrevivente [6].

Capítulo 3

Técnicas de Controle Automático de Ganho para EDFAs

Existem diferentes métodos de controle automático de ganho para Amplificadores Ópticos (EDFAs). Estes métodos têm por objetivo minimizar os efeitos causados pelas mudanças aleatórias nas potências de entrada dos amplificadores ópticos, que ocorrem devido à introdução de dispositivos que inserem ou retiram canais (*Add-Drop*) e de dispositivos que alteram o caminho óptico do sinal (OXC) em redes com roteamento de comprimento de onda. Alguns destes métodos serão apresentados, analisados e comparados neste capítulo, levando em consideração fatores que podem introduzir penalidades ao sistema óptico.

3.1 Introdução

Como comentado anteriormente, variações na potência de entrada dos EDFAs, como as que ocorrem em redes com roteamento de comprimento de onda, podem levar o sistema à degradação da BER 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 levando às degradações da transmissão devido à excitação de efeitos não-lineares, que causam excessos de potência e a interferência entre canais ópticos. A perda do alinhamento em relação ao limiar do receptor, no entanto, representa a principal fonte de penalidade para o desempenho do sistema. 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, diversas 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.

3.2 Controle Automático de Ganho Totalmente Óptico

O controle automático de ganho totalmente óptico (*OAGC – 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 de múltiplos comprimentos de onda [1],[45-47]. Na literatura, descrevem-se duas formas de obtenção do controle automático de ganho totalmente óptico. 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, porém, fora da faixa de transmissão dos canais de informação.

No primeiro método, uma realimentação óptica, implementada na forma de um anel (*loop*), permite a formação do canal de controle, conforme mostrado na Fig. 3.1 [45], [48–51].

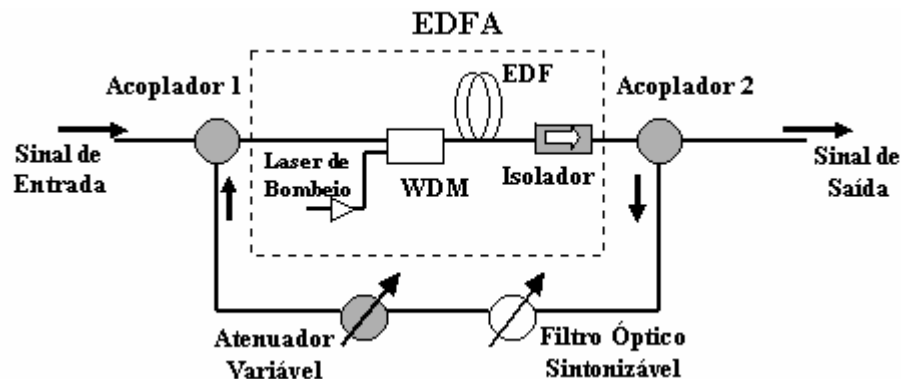


Fig. 3.1: Método de controle automático de ganho totalmente óptico, utilizando a realimentação óptica.

A Fig. 3.1 mostra o diagrama esquemático de um EDFA que possui controle automático de ganho totalmente óptico. A técnica é baseada 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) do EDFA.

Como comentado anteriormente, os amplificadores ópticos trabalham, em sua maioria na região de saturação, onde o ganho do amplificador óptico é demasiadamente 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 e OXCs, a potência de entrada dos amplificadores ópticos variam, causando, assim, mudanças no ganho do amplificador óptico que resultam em excursões dinâmicas de potência nos canais transmitidos, provocando degradações na OSNR e, conseqüentemente, na BER dos canais transmitidos.

O método de controle automático de ganho totalmente óptico através da realimentação óptica (*Loop*) atua quando a potência de entrada do amplificador óptico varia. Em condições de operação, o sistema de controle funcionará com um sinal de entrada composto pelos canais de transmissão e pelo canal de controle, onde a soma das potências de todos os canais compõe a potência de entrada do amplificador. Desta maneira, se canais são retirados, inseridos ou desviados, a potência de entrada do amplificador tenderá a variar, levando o sistema às degradações citadas anteriormente. No entanto, o intuito da utilização do sistema de controle automático de ganho é fazer com que as variações de ganho sejam praticamente anuladas e que os transientes de potência sejam suprimidos, tanto em duração quanto em amplitude.

Quando a potência na entrada do EDFA é alterada por qualquer um dos eventos descritos anteriormente, o ganho do amplificador poderá variar consideravelmente, principalmente se este último estiver operando em um estado de saturação. Portanto, como consequência 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 é o ganho do canal de controle que, após suplantando as perdas da malha de realimentação, inclusive aquela introduzida pelo atenuador variável, que proporciona a própria formação do canal de controle. 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 no 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. Consequentemente, 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 que estão sendo amplificados. Como resultado, o ganho por canal transmitido cai, 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 sinal, [4], [51-54], como mostrado na Fig. 3.2.

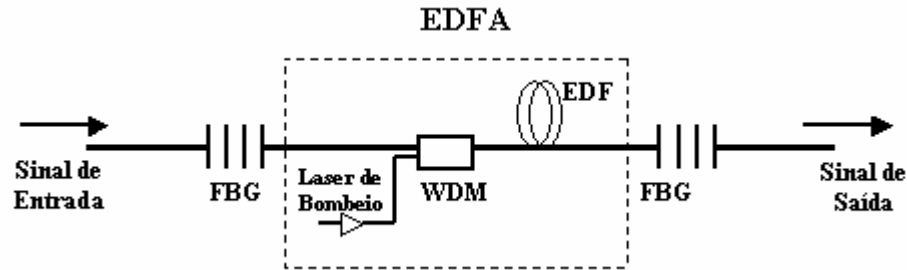


Fig. 3.2: Método de controle automático de ganho totalmente óptico, utilizando grades de Bragg.

As grades de Bragg são utilizadas para garantir a oscilação 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 de saída. Utilizando-se este método, pode-se obter uma variação na potência total pós-transiente, de um canal sobrevivente, da ordem de 0,3 dB, quando são retirados sete de oito canais WDM [55].

3.2.1 Fatores Limitantes do Controle Automático de Ganho Totalmente Óptico

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. 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 [46-47].

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. 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, e provoca oscilações amortecidas na potência dos canais sobreviventes,

originárias de mecanismos de troca durante o consumo de portadores pelos canais sobreviventes e pelo canal de controle, como mostrado na Fig. 3.3 [56].

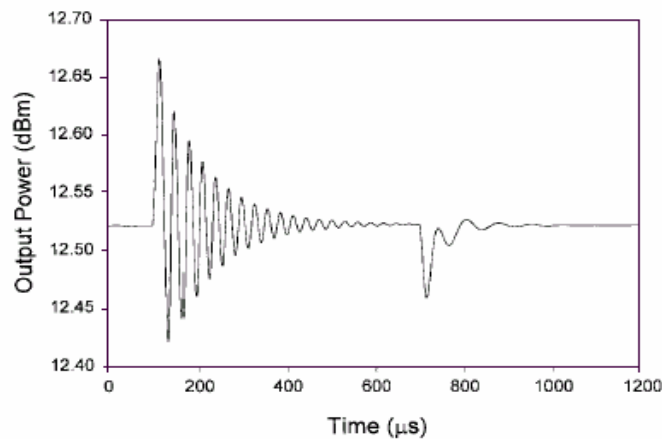


Fig. 3.3: Potência de Saída do canal sobrevivente em um amplificador com controle automático de ganho totalmente óptico [56].

Em particular, a Fig. 3.3 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, verificam-se a presença de oscilações. Contudo, apesar destas oscilações, pode-se observar que a potência de saída, após os transientes, foi corretamente corrigida, indicando assim que o ganho do canal tende ao mesmo valor que aquele antes da adição ou remoção de canais, demonstrando o funcionamento adequado da técnica de controle.

Outro fator limitante é o *spectral hole burning*, que 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 em seu valor inicial. Após as oscilações desaparecerem, o nível de ganho se estabelece em um valor maior ou menor que o inicial, respectivamente dependendo se a potência na entrada diminui ou aumenta. No sinal do canal sobrevivente, o efeito de SHB aparece como um degrau em seu nível de potência como ilustrado na Fig. 3.4. Assim, o EDFA controlado pela técnica totalmente óptica é penalizado por oscilações de relaxação (oscilações de potência nos transientes) e ou pelo SHB (imperfeição no nível de correção de

ganho). A seguir será discutido como estes efeitos se comportam em um EDFA com controle de ganho totalmente óptico.

Na simulação de um EDFA com controle automático de ganho baseado na realimentação óptica, foi verificado que o comportamento das oscilações de relaxação e do SHB se alteram com a variação do comprimento de onda do laser de controle [46]. As Figs. 3.4, 3.5 e 3.6 mostram os resultados de simulação na saída de um EDFA controlado para a variação temporal da potência de um canal (1552,3 nm) em um sistema WDM, durante a inserção e retirada de canais com o laser de controle situado em 1534, 1547 e 1555 nm [46].

Para a Fig. 3.4 o laser de controle se situava em 1534 nm. Pode-se verificar que há uma diferença entre o nível de potência de saída antes e depois da atuação do controle ligeiramente superior a 0,5 dB, caracterizando a presença do efeito de SHB, originário da inhomogeneidade do espectro de ganho do érbio [46]. Também se verifica que as oscilações não apresentam grandes amplitudes em relação ao nível de potência de saída original, demonstrando que seu efeito é menos pronunciado quando o laser de controle se situa o mais afastado possível do canal de controle.

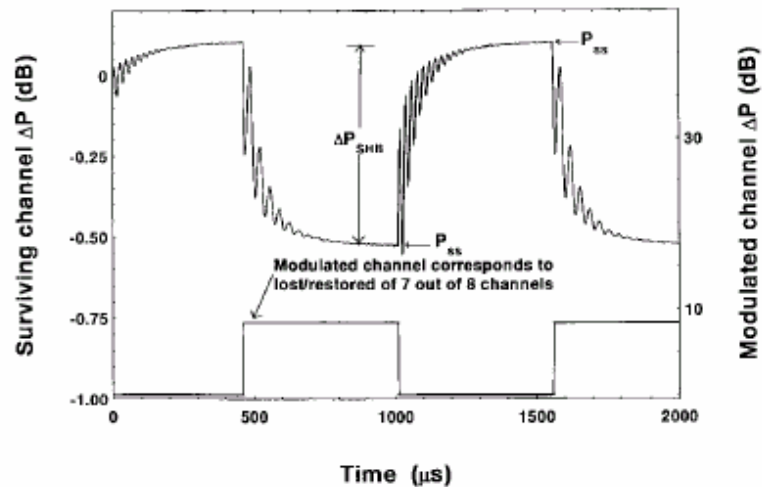


Fig. 3.4: Variação relativa da potência do canal sobrevivente na saída do EDFA controlado, com laser de controle em 1534 nm [46].

Quando o laser de controle encontra-se em 1547 nm, Fig. 3.5, verifica-se que as amplitudes das oscilações de relaxação aumentam, com conseqüente aumento no tempo de duração destas oscilações. No entanto, observa-se que a influência do SHB se tornou menos significativa, com uma redução do degrau no nível de potência de saída de bem inferior à 0,5 dB (0,31 dB).

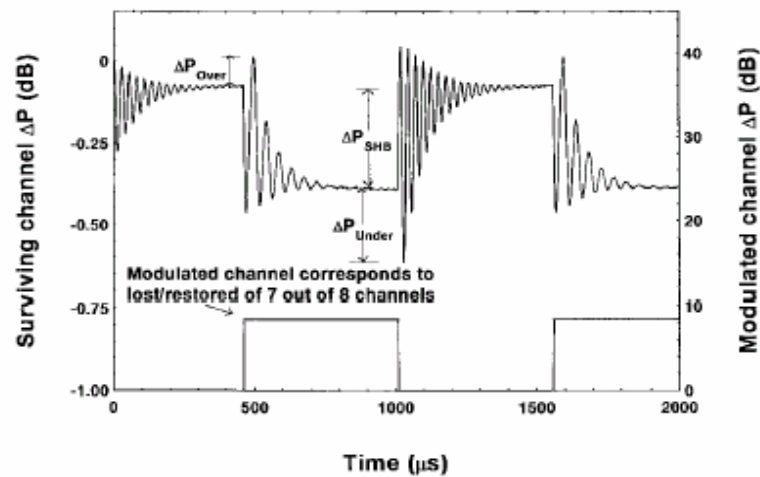


Fig. 3.5: Variação relativa da potência do canal sobrevivente na saída do EDFA controlado, com o laser de controle em 1547 nm [46].

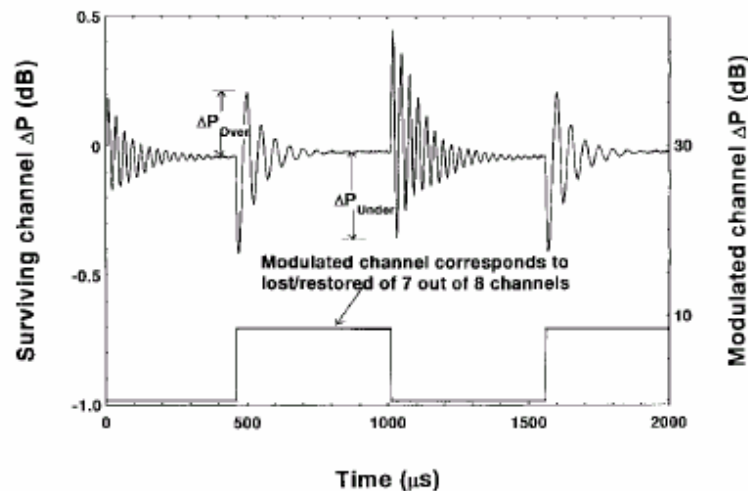


Fig. 3.6: Variação relativa da potência do canal sobrevivente na saída do EDFA controlado, com o laser de controle em 1555 nm [46].

Na Fig. 3.6 o laser de controle se situa em 1555 nm, entre os canais transmitidos e o mais próximo do canal sobrevivente em relação às outras análises. Pode-se observar que o efeito predominante passa a ser o das oscilações de relaxação, sendo que a influência do SHB é praticamente nula.

Analisando-se 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. Assim, torna-se impossível escolher um comprimento de onda para o canal de controle que anule a influência de ambos simultaneamente [46].

As penalidades impostas pelos efeitos do SHB e das oscilações de relaxação ao sistema ocorrem devido a características intrínsecas dos íons de érbio (tempo de resposta) sendo, assim, impossíveis de serem totalmente eliminadas. 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. No próximo capítulo, a influência da alocação do canal de controle e do valor da atenuação da realimentação óptica são experimentalmente analisadas com o intuito de se encontrar maneiras de minimizar as penalidades impostas pelo uso de EDFA com controle de ganho totalmente óptico, inclusive as causadas pelo SHB e pelas oscilações de relaxação.

A obtenção de parâmetros de projeto adequados, aliado à simplicidade estrutural e baixo custo relativo, fazem desta técnica de controle uma forte candidata à aplicação comercial.

Outros resultados encontrados na literatura, também baseados em simulações, ilustram que o número de canais retirados e removidos e a velocidade de chaveamento da adição ou remoção de canais também influenciam o comportamento das oscilações de relaxação [56]. A Fig. 3.7 mostra que as oscilações de potência aumentam com o aumento da velocidade de chaveamento [56]. Isto ocorre porque para menores velocidades de chaveamento, o sinal da realimentação óptica é melhor ajustado, seguindo as variações de ganho (inversão de população) e compensando-as de forma a manter a potência de saída total do amplificador. Para maiores velocidades de chaveamento, no entanto, a realimentação óptica não é

possível de ser ajustada de modo a acompanhar as rápidas variações de ganho, causando em ambos, canal de controle e canais sobreviventes, altas e decrescentes variações de potência.

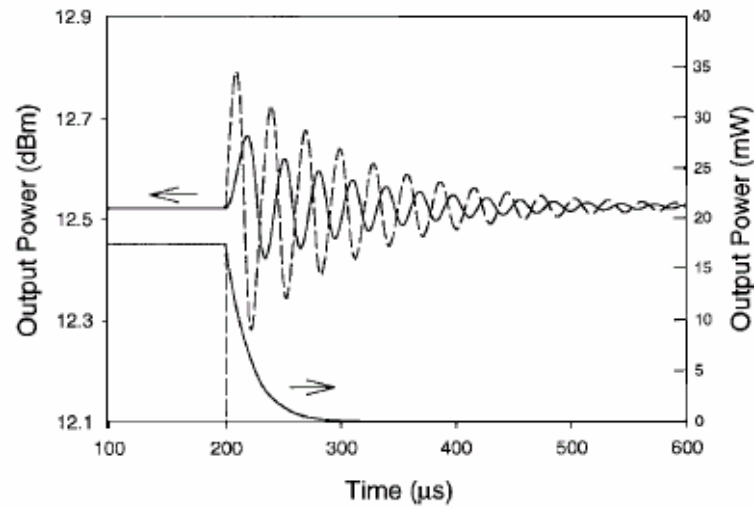


Fig. 3.7: Potência de saída referente à da retirada dos quatro de oito canais, quando são retirados instantaneamente (tracejado), e quando são retirados em 100 μ s (linha cheia)[56].

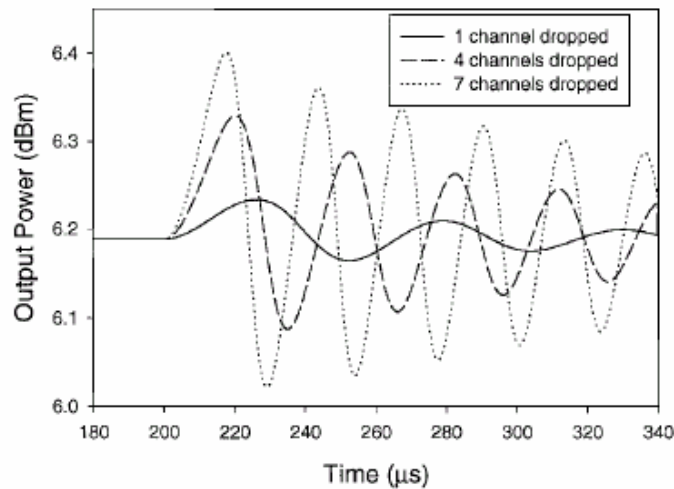


Fig. 3.8: Resposta transiente quando um, quatro e sete canais são retirados [56].

Quando um, quatro e sete canais são retirados, a Fig. 3.8 mostra que um decréscimo da potência de entrada, representado pela simulação de um número cada vez maior de canais retirados, causa um aumento na frequência e na amplitude das oscilações [56]. Dessa maneira quanto maior o número de canais retirados em um nó da rede, maiores serão as oscilações a que os canais sobreviventes serão submetidos.

Até o momento, os resultados de simulação apresentados consideram o método de controle automático de ganho totalmente óptico aplicado a apenas um EDFA. Em um sistema composto de uma cascata de EDFAs, o controle automático do ganho torna-se um desafio ainda maior, pois, enquanto a escala de tempo típica de variação do ganho de um único EDFA é da ordem de 100 μ s [22], a constante de tempo para uma cadeia com N amplificadores é 1/N vezes menor que a de um único EDFA [57]. Deste modo, sistemas com cadeia (cascatas) de amplificadores necessitam de um controle mais rápido para assim limitar as indesejáveis flutuações de potência. A Fig. 3.9 ilustra o crescimento das flutuações de potência em uma cadeia com seis EDFAs controlados através da técnica de controle automático de ganho totalmente óptica [50].

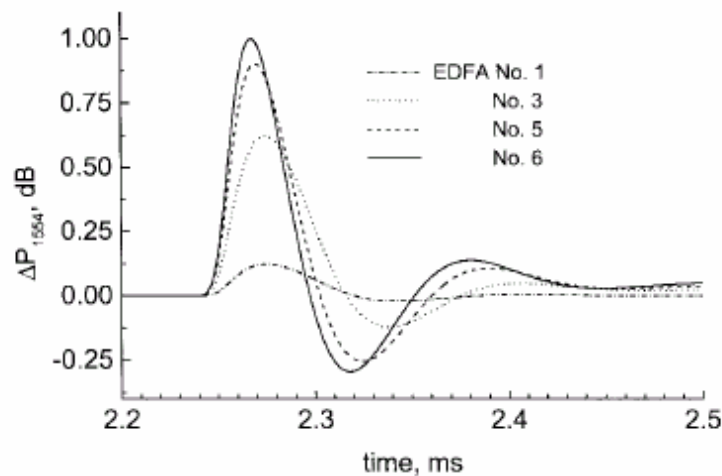


Fig. 3.9: Flutuações de potência em uma cadeia de EDFAs [50].

Em uma cadeia de amplificadores ópticos, analisam-se duas estratégias de controle. A primeira, quando apenas o primeiro EDFA da cadeia é submetido ao controle de ganho e quando todos os EDFAs são submetidos ao controle [56],[58-59]. Teoricamente, observa-se

que, utilizando-se o controle em todos os amplificadores da cadeia, obtêm-se melhorias na resposta transiente em relação ao sistema onde só o primeiro EDFA é controlado. As Fig. 3.10 e 3.11 mostram a potência de um dos canais de um sistema WDM amplificado por uma cascata de EDFAs, após a inserção de canais, quando o controle de ganho é exercido sobre todos (Fig. 3.10) e apenas sobre o primeiro (Fig. 3.11) EDFA. Como ilustrado nas Figs. 3.10 e 3.11, exceto para o primeiro amplificador, há uma diferença significativa entre as amplitudes iniciais das oscilações de potência, além de uma estabilização de ganho mais rápida quando todos os EDFAs são controlados [58].

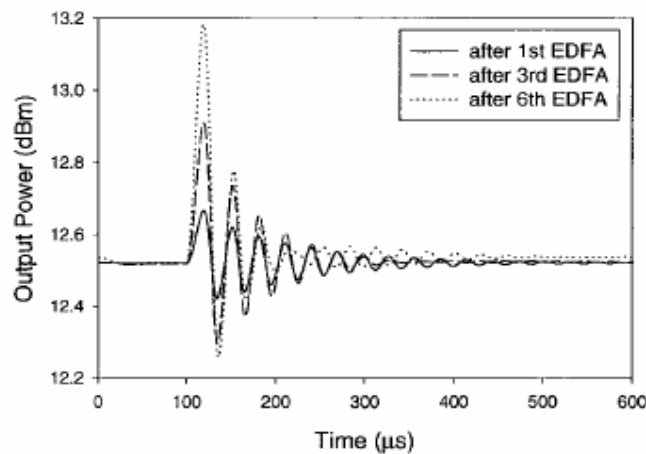


Fig. 3.10: Potência de um dos canais de um sistema WDM amplificado por uma cascata de EDFAs, após a inserção de canais com controle de ganho exercido sobre todos amplificadores [58].

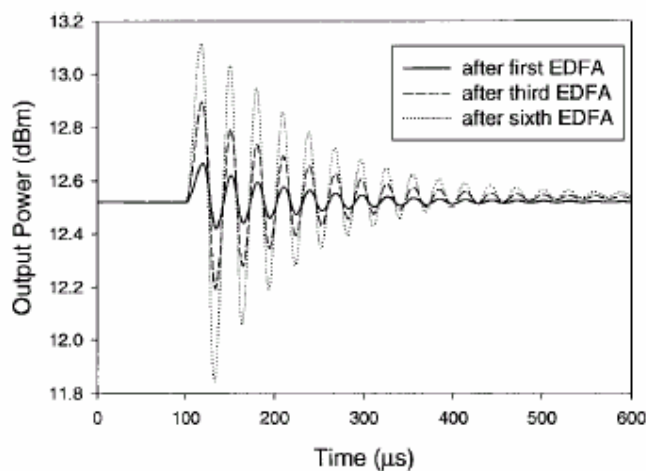


Fig. 3.11: Potência de um dos canais de um sistema WDM amplificado por uma cascata de EDFAs, após a inserção de canais, com o controle de ganho exercido sobre o primeiro amplificador [58].

Pelo fato de os transientes serem mais rapidamente controlados quando todos os EDFAs são submetidos ao controle automático de ganho totalmente óptico, é razoável concluir que este método é mais adequado para o controle de uma cadeia de amplificadores. No entanto, com o controle de todos os EDFAs, o enlace torna-se mais sensível a possíveis variações nas perdas entre EDFAs. Portanto, sugere-se a utilização do controle apenas no primeiro EDFA da cadeia para enlaces com poucos EDFAs, onde alterações de potência devido a diferentes ganhos de sinal tem pequenas possibilidades de serem acumuladas [58]. Já para longas cadeias de EDFAs, torna-se necessário um controle muito preciso da variação do ganho, através do controle de ganho de todos os EDFAs.

Complementando a análise, demonstrou-se experimentalmente que o método de controle automático de ganho totalmente óptico com apenas um EDFA controlado em uma cascata de amplificadores, funciona bem quando as frequências de chaveamento do canal são baixas o suficiente quando comparadas à frequência das oscilações de relaxação do EDFA controlado [49] e [59]. Além disto, quando as frequências de chaveamento do canal tornam-se próximas da frequência das oscilações de relaxação, sérias penalidades de potência e seqüências de erros são induzidas pelos EDFAs subseqüentes. Por outro lado, quando todos os EDFAs da cadeia são controlados, o fato das frequências de chaveamento dos canais se aproximar da frequência das oscilações de relaxação dos EDFAs controlados não causa problemas de penalidades ou de rajadas de erros.

Com base na análise da técnica de controle automático de ganho totalmente óptico aqui realizada (baseada na literatura), pode-se verificar que esta técnica de controle é bastante atraente, não só pela simplicidade estrutural e pelo baixo custo, mas também pela eficiência obtida com a mesma no controle de ganho de EDFAs. No entanto, como descrito anteriormente, algumas limitações relacionadas à sua construção não podem ser evitadas. Mas através da análise dos detalhados estudos destes fatores limitantes já realizados, verificou-se a possibilidade de minimização destes efeitos através da otimização da atenuação da realimentação óptica e da alocação do canal de controle, que, se corretamente empregadas, terão a possibilidade de proporcionar ao EDFA submetido a esta técnica um desempenho superior aos apresentados nos trabalhos já publicados. No Capítulo 4, o desenvolvimento de um EDFA com controle automático de ganho baseado na realimentação óptica é descrito, sendo realizada uma série de análises de desempenho para

o mesmo, onde os parâmetros principais no seu desenvolvimento e análise são a atenuação da realimentação óptica e a alocação do canal de controle.

3.3 Controle Automático de Ganho Eletrônico

Além dos métodos de controle de ganho totalmente ópticos para EDFAs, pode-se destacar, como uma possível solução para a estabilização de amplificadores ópticos, o método de controle automático de ganho baseado no ajuste da potência do laser de bombeio. Neste caso, o ajuste é realizado de forma eletrônica, através de circuitos com realimentação e alimentação adiante.

3.3.1 Controle Eletrônico com Alimentação Adiante (Electronic Feedforward Control)

O controle eletrônico com alimentação adiante tem como objetivo manter constante o ganho do EDFA, detectando previamente a variação da potência óptica de entrada ocasionada pela adição ou remoção de canais promovida por OADMs ou OXCs e corrigindo, de acordo com o nível da potência de entrada, a potência de bombeio do amplificador. Esta técnica baseia-se no ajuste da potência de bombeio em decorrência de variações no nível de potência de entrada [31].

A Fig. 3.12 ilustra um EDFA com controle de ganho eletrônico com alimentação adiante. O Atenuador A_1 retira uma pequena parte 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, e pela atuação no nível da potência de bombeio, que é realizada pelo micro-controlador que recebe um sinal elétrico do fotodetector proporcional ao nível de potência de entrada. Após o controle do bombeio, o mesmo, e o sinal transmitido, são acoplados à fibra através de um acoplador (WDM).

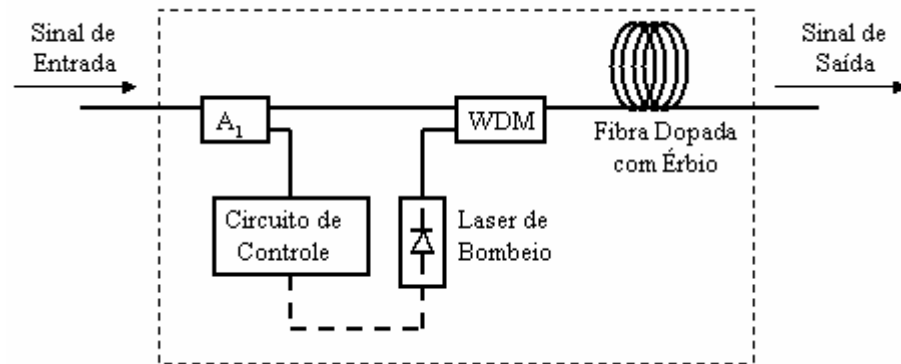


Fig. 3.12: Controle de ganho eletrônico com alimentação adiante aplicado a um EDFA.

O primeiro relato de um controle de ganho de um EDFA com alimentação adiante foi realizado em [31]. No entanto, um exemplo de aplicação experimental desta técnica de controle de ganho, para um sistema WDM de oito canais, foi demonstrado experimentalmente em [60-61]. A Fig. 3.13 mostra a configuração proposta para este EDFA. O EDFA possui bombeio co-propagante realizado por um diodo laser em 980 nm, com uma potência de 80 mW, uma fibra dopada com comprimento de 29 m e com o canal de supervisão em 1510 nm.

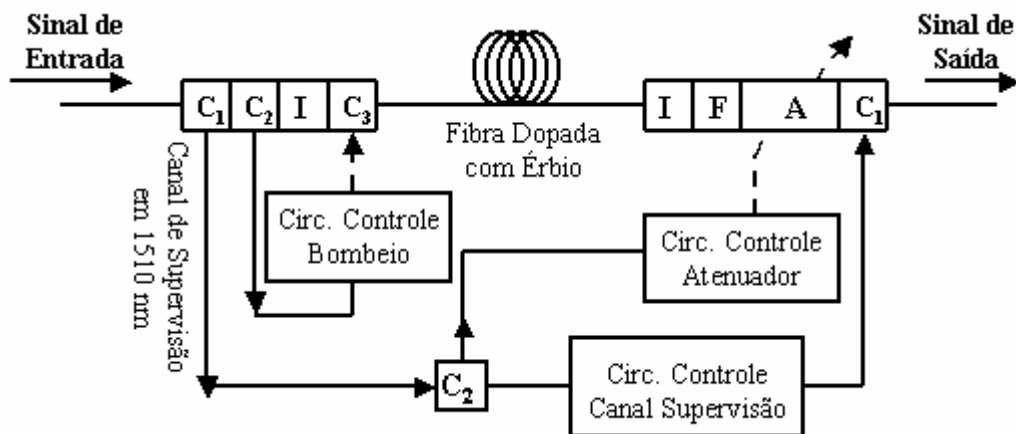


Fig.. 3.13: Arranjo experimental para o EDFA com controle eletrônico com alimentação adiante. A: Atenuador controlado por tensão. C₁: Acoplador para o canal de supervisão. C₂: Acoplador com derivação de 5%. C₃: Acoplador para o bombeio. F: Filtro para supressão de ASE. I: Isolador [60].

O controle de ganho do EDFA, da Fig. 3.13, é composto por dois circuitos de controle. O primeiro, 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. No experimento realizado em [60], o sinal de entrada consiste de oito canais alocados de 1541 nm até 1559 nm, onde sete deles são retirados e inseridos. Além disto há o canal de supervisão em 1510 nm. A variação na perda dos enlaces são simuladas através da atenuação do sinal de entrada.

O canal de supervisão é retirado por C_1 . Mudanças nos enlaces podem ser medidas pelas variações de potência do canal de supervisão no circuito de controle do atenuador, o qual ajusta o atenuador A. O tempo de resposta do atenuador é de 9 ms. O canal de supervisão também é processado no circuito de controle do canal de supervisão e um canal de supervisão é adicionado ao sinal de saída do amplificador. Para um rápido controle de ganho do EDFA, uma pequena parte (5%) da potência dos sinais transmitidos é retirada na entrada do EDFA e medida pelo circuito de controle do bombeio, que ajusta o bombeio de modo a manter a ganho do EDFA constante. O tempo de resposta do circuito de controle do bombeio é 650 ns. Esta velocidade no tempo de resposta é muito difícil de ser alcançada utilizando circuitos eletrônicos convencionais; no entanto, é possível de ser obtida causando elevação do custo e um grande aumento na complexidade de montagem.

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. Além disto, o EDFA opera satisfatoriamente para qualquer nível de potência de entrada ao qual é submetido.

3.3.2 Controle Eletrônico Realimentado (*Electronic Feedback Control*)

Uma alternativa para obtenção do controle automático de ganho é a utilização do ajuste da corrente de bombeio através de informação obtida via realimentação do sinal de saída do amplificador óptico [3], [62-63]. A Fig. 3.14 ilustra a idéia básica do controle de ganho eletrônico de um EDFA através da realimentação e correção do bombeio.

Na Fig. 3.14 verifica-se que uma parcela do sinal de saída é retirada, sendo a mesma enviada ao circuito de controle, através de A_1 . No circuito de controle, a luz é convertida para sinal elétrico (através de um fotodetector), sendo este sinal elétrico enviado a um micro-controlador, que é responsável pelo ajuste do nível da potência de bombeio, que ocorre proporcionalmente à intensidade do sinal na saída do amplificador. Ainda na Fig. 3.14, o acoplador WDM é utilizado para acoplar o bombeio e o sinal à fibra dopada com érbio.

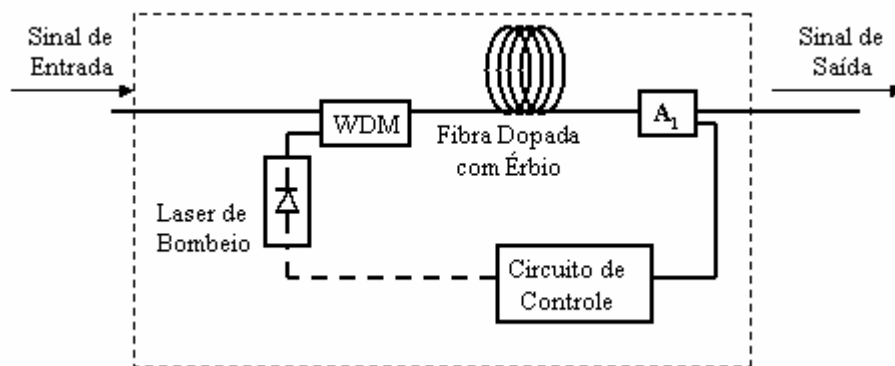


Fig. 3.14: Controle de ganho eletrônico com realimentação aplicado a um EDFA.

Existem diversas variações do método de controle de ganho eletrônico de EDFAs com realimentação; no entanto, todas elas derivam da idéia básica da realimentação apresentada na Fig. 3.14.

Uma aplicação deste tipo de controle é realizada em [62]. Nela, o processo de realimentação atua em dois dispositivos, em um laser de teste (*probe laser*) e no laser de bombeio. A Fig. 3.15 ilustra o diagrama experimental utilizado para análise desta técnica de controle automático de ganho. A entrada de um EDFA com bombeio no comprimento de onda de 980 nm é acoplada a um laser de teste em 1572 nm, fora da banda da região utilizada no experimento para a amplificação dos canais. Na saída do amplificador, um acoplador seletivo em comprimento de onda separa o sinal de teste dos canais transmitidos, direcionando-o para um fotodetector. Este sinal é detectado e, depois, processado pelo micro-controlador, que verifica o nível do laser de teste. Se a potência na entrada do EDFA

variado, o canal de teste será amplificado com ganho maior ou menor, sendo esta variação detectada pelo controlador, que determina se há a necessidade de correção da corrente do laser de bombeio, de forma a manter o ganho do EDFA constante.

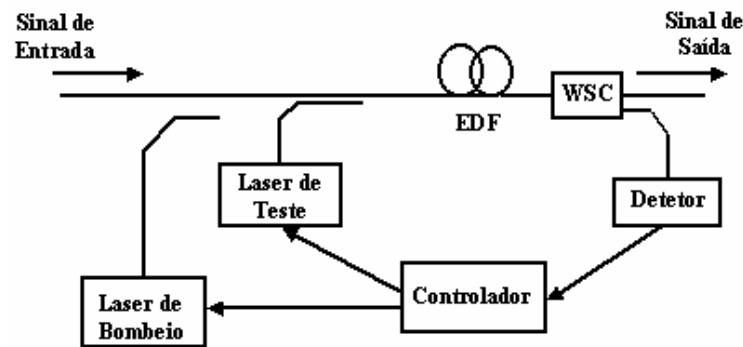


Fig. 3.15: Estrutura eletrônica de controle automático de ganho utilizando a realimentação [62].

Uma alternativa para a realimentação eletrônica seria a utilização (como visto anteriormente) do controle automático de ganho totalmente óptico. No entanto, a realimentação eletrônica possui algumas vantagens, tais como uma melhor utilização do bombeio disponível, já que uma parcela muito pequena do bombeio disponível é utilizada para amplificar o sinal de teste (em um sistema totalmente óptico, uma grande parte do bombeio é absorvida pelo comprimento de onda de controle), além da possibilidade de filtragem eletrônica do sinal realimentado, podendo, assim, otimizar a resposta dinâmica minimizando as oscilações que ocorrem na estrutura totalmente óptica. Porém, algumas desvantagens como o custo e a dependência com o tempo de resposta dos circuitos eletrônicos, limitam a utilização desta técnica de controle automático de ganho.

3.3.3 Controle automático de ganho eletrônico para um enlace de EDFAs

As técnicas de controle automático de ganho eletrônicas também podem ser utilizadas em enlaces que empregam mais de um EDFA. A Fig. 3.16 mostra o diagrama experimental de uma estrutura de controle automático de ganho para uma cascata de EDFAs, onde o controle é realizado pela adição de um canal extra, sem conteúdo de informação, que

compensa a variação da potência óptica total e estabiliza todos os amplificadores, entre sucessivos nós de roteamento de comprimento de onda da rede [64]. Na Fig. 3.16, 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 canal de controle.

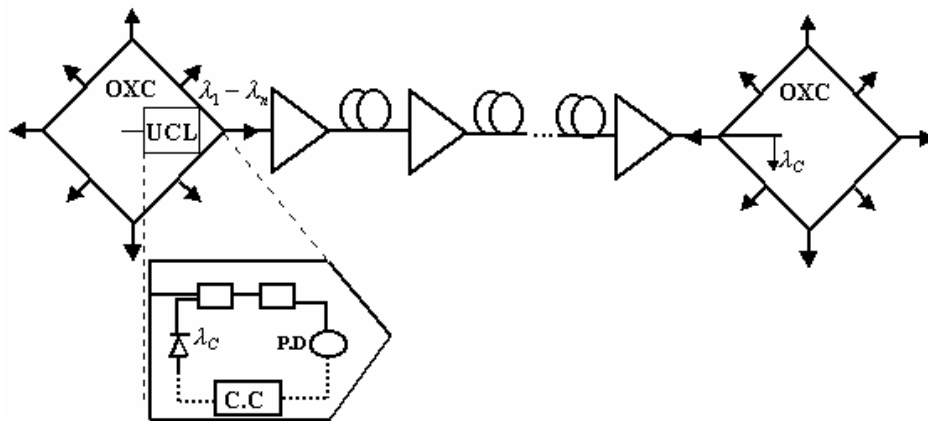


Fig. 3.16: Representação esquemática do controle do enlace para proteção dos canais sobreviventes, em redes ópticas [64].

Um canal de controle (λ_c) é adicionado na entrada do primeiro amplificador óptico do enlace, sendo este mesmo canal retirado antes do próximo nó da rede. A potência do canal de controle é ajustada na saída do nó, de forma a manter-se constante potência total na entrada do primeiro EDFA do enlace, ajuste que fará com que todos os amplificadores da cascata mantenham constante sua potência de entrada até a chegada do sinal ao próximo nó da rede [64].

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, 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, 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. No caso da adição de canais no nó o processo inverso ocorre.

A Fig. 3.17 ilustra a posição do canal de controle durante o experimento realizado em [64], onde se verifica que o canal de controle λ_c ocupa um lugar que poderia ser ocupado por um canal de transmissão.

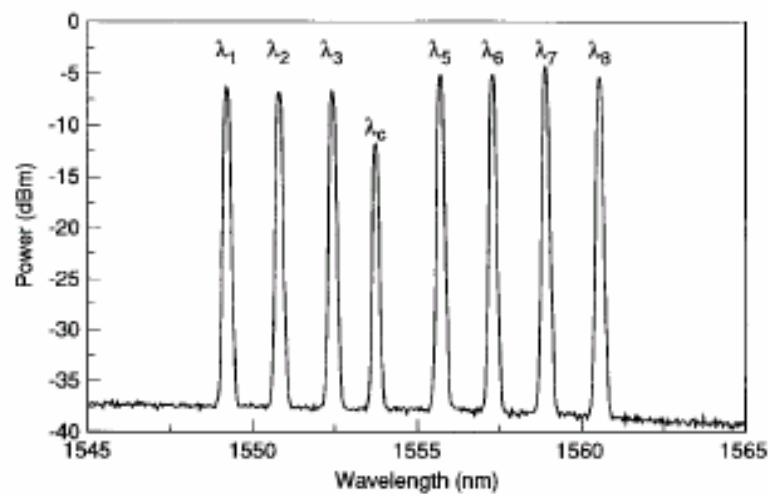


Fig. 3.17: Espectro do sinal transmitido através do enlace (sinal + canal de controle) [64].

A Fig. 3.18 ilustra as variações de potência no enlace, quando cinco de sete canais WDM são retirados e adicionados, a uma frequência de 1 kHz [64]. Mostram-se as variações com e sem a atuação do controle automático de ganho proposto, onde é demonstrada a eficiência do método.

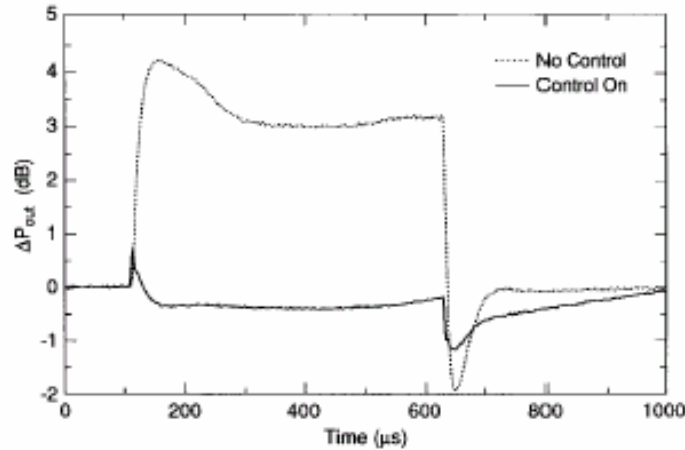


Fig. 3.18: Variações de potência do enlace, quando cinco dos sete canais WDM são retirados e adicionados, com uma frequência de 1 kHz [64].

3.5 Controle Automático de Ganho Híbrido

O controle automático de ganho híbrido de EDFAs, nada mais é que a junção dos métodos de controle totalmente óptico e eletrônico em uma só estrutura, com o intuito 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 (como será mostrado experimentalmente no capítulo a seguir) é maior que o tempo de resposta dos circuitos eletrônicos, tornando possível, assim, a redução das oscilações de relaxação do método totalmente óptico, através da utilização de um controle eletrônico anterior ao controle óptico. 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 [5].

A Fig. 3.19 mostra um exemplo de um arranjo experimental que promove o controle híbrido de um EDFA operando em um sistema WDM de 8 canais [5].

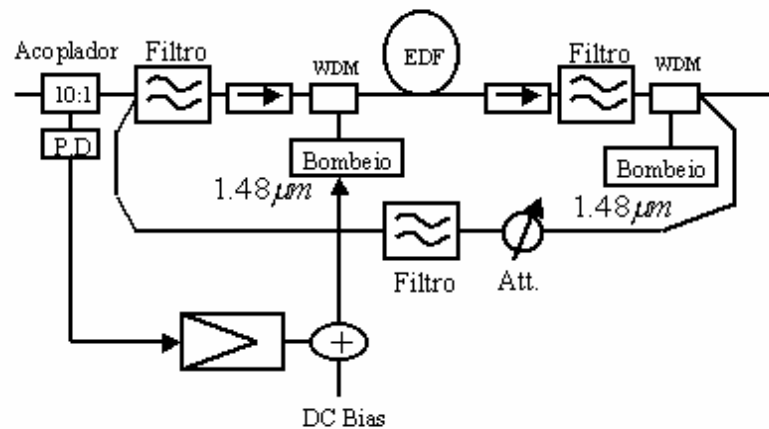


Fig. 3.19: EDFA com controle automático de ganho híbrido [5].

A estrutura híbrida é composta de uma realimentação óptica e de um controle eletrônico com alimentação adiante de um dos lasers de bombeio. O circuito de realimentação óptica permite a formação de um laser em anel no comprimento de onda de 1565 nm, responsável pelo controle do ganho do EDFA. Para uma estabilização do laser de controle mais rápida, utiliza-se um circuito de alimentação adiante do qual faz parte um fotodetector e um amplificador elétrico. A amostra do sinal na entrada do EDFA, fotodetectada e amplificada, é adicionada à corrente de polarização do bombeio. Desta forma, variações na potência de entrada do EDFA provocam variações proporcionais na potência de bombeio, estabilizando o ganho do amplificador mais rapidamente [5].

Na análise experimental da estrutura, verificou-se que as variações de potência do transiente, para o método totalmente óptico em conjunto com o controle eletrônico com alimentação adiante, apresentam uma redução na amplitude das oscilações de potência que ocorrem após a inserção ou retirada de canais, quando comparada ao controle puramente óptico. A Fig. 3.20 mostra as oscilações de potência logo após a inserção e retirada de sete de oito canais WDM, comparando os resultados obtidos para o controle puramente óptico e o controle híbrido [5].

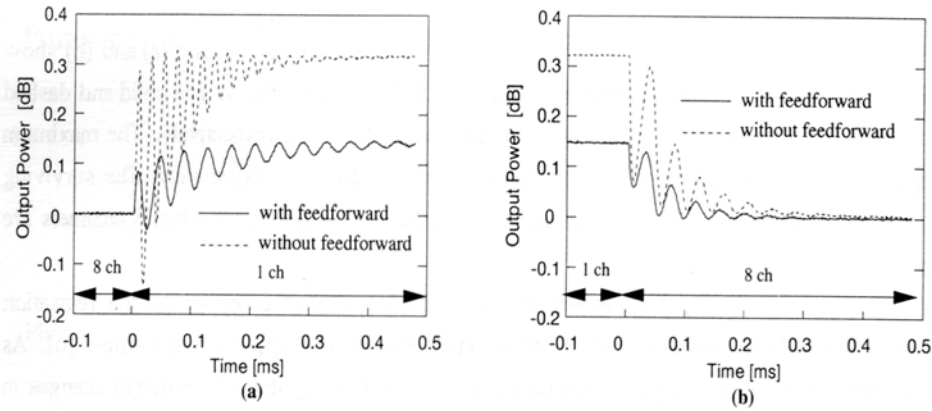


Fig. 3.20: Resposta transiente de potência do canal sobrevivente: (a) 7 de 8 canais são retirados, (b) 7 canais são adicionados [5].

Em um estudo teórico [65], concluiu-se que a estrutura híbrida pode ser considerada como uma solução para a diminuição das amplitudes das oscilações de potência causadas pela oscilação 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. A Fig. 3.21 ilustra a flutuação de potência durante a adição e remoção de 39 de 40 canais, para um tempo de resposta do circuito eletrônico de 1 μ s [65].

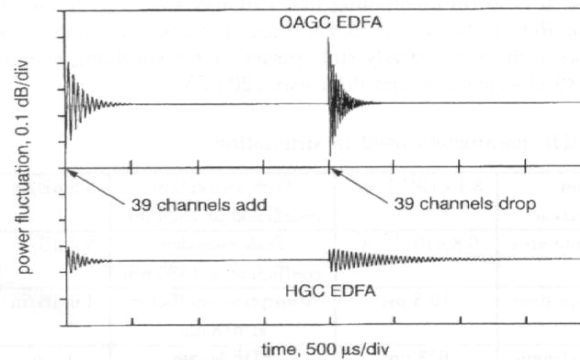


Fig. 3.21: Transientes do canal sobrevivente em um OAGC e em um HGC [65].

A Fig. 3.22 ilustra a flutuação de potência em um EDFA com controle de ganho híbrido em função do tempo de resposta do circuito eletrônico [65]. Como exemplo da dependência

da flutuação de potência com o tempo de resposta do circuito eletrônico em um EDFA com controle de ganho híbrido, pode-se verificar na Fig. 3.21 que, para 40 canais, a pior variação de potência é de 0,1 dB para um tempo de resposta de 1 μ s; 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 a estrutura de controle de ganho totalmente óptica. Esta dependência com o tempo de resposta do circuito eletrônico, e o acréscimo do custo, são as principais desvantagens desta técnica de controle.

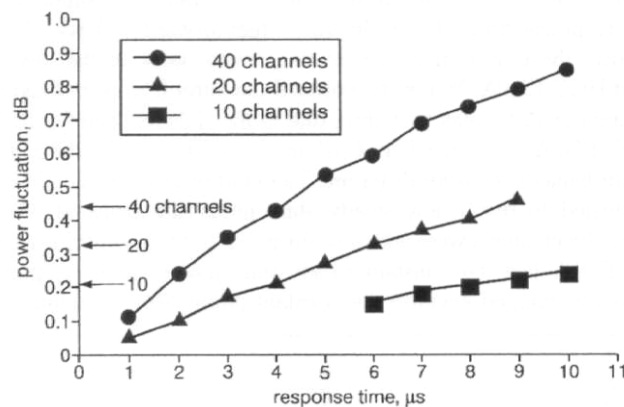


Fig. 3.22: Variações de potência do sinal em um HGC EDFA em função do tempo de resposta do circuito eletrônico [65].

Outros métodos de redução das oscilações de relaxação foram propostos, como em [66], onde é utilizada uma realimentação dupla e dois comprimentos de onda oscilam formando lasers em diferentes comprimentos de onda em lados opostos da banda de amplificação. No entanto, os resultados obtidos não proporcionaram ganhos significativos em relação aos apresentados pelas técnicas convencionais que aqui foram apresentadas.

3.6 Considerações Sobre as Técnicas de Controle de ganho de EDFAs

Como conclusão deste capítulo de estudo bibliográfico, serão feitos alguns comentários a respeito de cada uma das técnicas de controle automático de ganho para EDFAs anteriormente citadas.

As técnicas de controle totalmente ópticas foram alvo de intensa pesquisa no fim dos anos 90 (1997-1999). Este tipo de técnica de controle é 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 ainda 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 frequentemente publicadas. Portanto, 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*.

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, porém maior que a da técnica de controle totalmente óptico. 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. Um fator que pode contribuir para a degradação do desempenho deste método são as variações sofridas pelo perfil de ganho do amplificador que podem ocorrer devido a mudanças de condições ambientais, não compensadas pelo circuito de controle do bombeio.

Além do controle eletrônico automático com alimentação adiante, outra técnica eletrônica que se destaca como uma solução eficiente no controle de ganho de amplificadores ópticos é o controle eletrônico automático com realimentação. Na literatura, poucos são os trabalhos encontrados onde este método de controle de ganho é analisado. A razão para isto pode ser a demasiada complexidade experimental que este método apresenta em relação aos demais, apesar do desempenho satisfatório. Neste método de controle de

ganho, como se faz uso de uma realimentação, é possível se amostrar a potência de saída do amplificador para a utilizar como entrada do circuito de controle (bombeio ou outro parâmetro qualquer). 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. Esta monitoração é possível graças à introdução de um laser de teste na entrada do amplificador. Assim, a entrada do amplificador passa a ser composta pelos sinais WDM transmitidos e pelo sinal do laser de monitoração, fora da banda de transmissão, sendo este último retirado na saída do EDFA por um acoplador seletivo em comprimento de onda e fotodetectado na entrada do circuito de controle. Baseado nas alterações de potência sofridas pelo canal de monitoração, controla-se a potência do laser de bombeio de modo que o ganho permaneça constante. Uma vantagem deste método reside na possibilidade de ajuste eletrônico da estrutura de ganho do EDFA de forma otimizada, uma vez que o sinal de monitoração utilizado na entrada do circuito de controle pode ser filtrado eletronicamente, melhorando a resposta dinâmica do controle e minimizando a ocorrência de oscilações de potência logo após a inserção e ou retirada de canais.

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 atraente, e diversas tentativas de melhoria no seu desempenho estão sendo alcançadas, 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 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 é acrescido consideravelmente, devido à necessidade de componentes eletrônicos capazes de proporcionar estes tempos de respostas ao circuito de controle.

Capítulo 4

Análises e Resultados Experimentais

Neste capítulo, o desenvolvimento do controle automático de ganho totalmente óptico de um EDFA é experimentalmente realizado. O projeto do controle de ganho e os procedimentos utilizados para otimização do funcionamento do EDFA controlado são detalhadamente discutidos e validados através de experimentos.

Uma importância significativa é dada à análise do impacto causado pela inserção de um EDFA-CAGTO (EDFA com controle automático de ganho totalmente óptico) em um sistema WDM. Dessa maneira, o desempenho do amplificador sem controle de ganho e com diferentes condições de controle são comparados através de experimentos onde se observa a eficiência do controle de ganho do EDFA sob situações de inserção e retirada de canais, as quais simulam as variações de potência de entrada ocorridas em redes WDM.

4.1 Introdução

Dentre as técnicas de controle de ganho apresentadas anteriormente, escolheu-se implementar aquela que emprega a realimentação óptica para as análises experimentais propostas no Capítulo 1. A escolha desta técnica de controle baseou-se em diversos fatores. Dentre eles, destacam-se sua simplicidade estrutural, seu baixo custo, além do controle ser realizado totalmente no domínio óptico, necessitando apenas a inserção de alguns dispositivos ópticos passivos para sua obtenção. Outro fator preponderante para a escolha desta técnica veio da verificação de que, apesar da mesma possuir um potencial consideravelmente conhecido, os estudos encontrados na literatura

não são conclusivos no que diz respeito à minimização do impacto causado pelos principais fatores limitantes desta técnica, que são o *spectral hole burning* e as oscilações de relaxação. Com base nos trabalhos já realizados nesta área e em análises feitas no decorrer deste trabalho, foram identificadas maneiras de se minimizar os efeitos causados pelas limitações impostas à técnica totalmente óptica que, se corretamente projetada, provocam melhorias significativas ao controle de ganho do amplificador. Assim, o propósito inicial da investigação foi o de detectar e otimizar possíveis parâmetros de projeto com o intuito de diminuir os efeitos causados por estas limitações. Os resultados obtidos foram analisados e comparados, quando possível, com os resultados encontrados na literatura (experimentalmente, poucos relatos de estudos semelhantes foram realizados).

Neste trabalho, o controle automático de ganho totalmente óptico foi implementado em um EDFA comercial. Desta forma, o projeto do amplificador (comprimento da fibra dopada, configuração de bombeio, etc) não foi alvo de análise. Durante as fases de desenvolvimento do EDFA com controle de ganho totalmente óptico, verificou-se que a posição do canal de controle, e o valor da atenuação utilizada na realimentação óptica, são parâmetros fundamentais no projeto deste tipo de amplificador. Dessa maneira, a influência dos mesmos no desempenho do controle de ganho foi detalhadamente analisada. Por fim, o amplificador com controle de ganho foi inserido em um sistema WDM de oito canais modulados a 2,5 Gb/s, sob diferentes condições de operação do controle de ganho. Analisou-se o desempenho deste sistema WDM, através de medidas da BER, quando o número de canais acoplados ao amplificador era constante (situação estática) ou variável (situação dinâmica), permitindo a simulação de operação dos EDFAs em redes WDM com adição ou remoção de canais.

4.2 Controle Automático de Ganho Totalmente Óptico

Nesta secção, o controle de ganho totalmente óptico, assim como os efeitos causados pela atenuação da realimentação óptica e pela alocação do canal de controle, são detalhadamente discutidos. Para isto são realizados experimentos que ilustram a influência destes parâmetros no desempenho de EDFAs com controle de ganho totalmente óptico.

4.2.1 Arranjo experimental e resultados preliminares

Como mencionado anteriormente, utilizou-se um amplificador óptico comercial, marca OPREL, como base para a implementação da técnica de controle de ganho totalmente óptico. A Fig. 4.1 mostra o diagrama esquemático do arranjo experimental utilizado durante as análises.

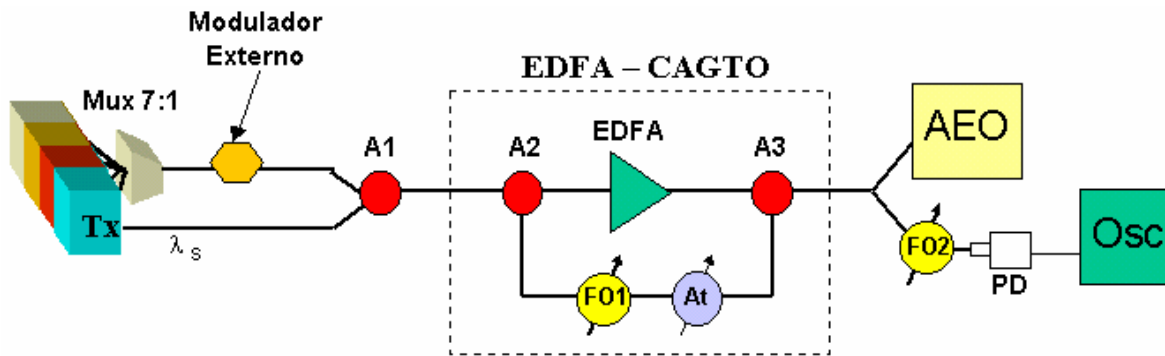


Fig. 4. 1: Esquema do arranjo experimental utilizado em parte dos experimentos.

Na Fig. 4.1, o arranjo experimental é composto por um transmissor (Tx) formado por 8 lasers DFB espaçados de, aproximadamente, 3 nm e localizados entre 1538 e 1558,5 nm (banda C). Nos experimentos preliminares, que analisaram a eficiência do controle, um gerador de funções foi acoplado ao modulador óptico externo, alimentando-o com sinais de onda quadrada de períodos 1 e 2 ms, no intuito de simular situações extremas de inserção e retirada de 7 dos 8 canais do transmissor no sistema, provocando, assim, as variações bruscas na potência total de entrada do EDFA. O canal que não passa pelo modulador externo é denominado canal sobrevivente; sob este canal são analisadas as consequências da inserção e retirada dos outros sete canais. Deve-se observar que estes sete canais são sobrepostos na saída de Tx por um multiplexador (Mux 7:1) antes de serem acoplados ao modulador externo. A razão de extinção entre as condições de inserção e retirada de canais, provocada pela modulação dos sinais ópticos em onda quadrada, foi maior que 25 dB. Na sequência, um primeiro acoplador direcional 90%-10% (A1) combina todos os oito sinais ópticos provenientes de Tx e os direciona ao acoplador de entrada (A2) do EDFA com

controle automático de ganho totalmente óptico (EDFA-CAGTO). Após passar pelo EDFA, os sinais dos oito canais podem ser observados ora em um analisador de espectro óptico (AEO), ora em um osciloscópio (Osc). Na verdade, para este último caso, necessita-se a filtragem dos sinais no filtro óptico 2 (FO2), localizado antes do fotodetector (PD), para a seleção e análise de operação apenas do canal de teste, chamado de canal sobrevivente (λ_s). Os acopladores A2 e A3, também do tipo 90%-10%, o filtro óptico 1 (FO1) e o atenuador variável (At), formam a realimentação óptica do EDFA.

As análises realizadas baseiam-se na observação do comportamento da resposta do canal sobrevivente às variações de potência na entrada do EDFA. Quando sete canais estão ausentes, a potência de entrada do EDFA sem controle diminui, aumentando dessa forma o ganho proporcionado ao canal sobrevivente. Quando os sete canais estão presentes, o EDFA tem sua potência de entrada elevada, o que implicará numa redução do ganho do EDFA sem controle, sendo, conseqüentemente, um menor ganho proporcionado ao canal sobrevivente.

A Fig. 4.2 ilustra o efeito da inserção e retirada de sete dos oito canais do sistema sobre o sinal fotodetectado do canal sobrevivente na saída do EDFA-CAGTO, para diferentes valores de atenuação da realimentação óptica. Neste caso, tomou-se o canal 4 (1546,8 nm) como canal sobrevivente. A potência de entrada do EDFA foi ajustada em -18 dBm/canal, com o canal de controle operando em 1535 nm. A Fig. 4.2 mostra que a potência do canal sobrevivente se comporta de maneira distinta para diferentes valores de atenuação da realimentação. Quando a atenuação é de 30 dB, as perdas totais do enlace de realimentação são tais que impossibilitam a formação do canal de controle, fazendo com que o EDFA opere, sem qualquer controle efetivo de ganho. Como resultado, torna-se possível observar no osciloscópio uma pronunciada oscilação na amplitude do sinal fotodetectado (6,4 dB), sugerindo uma igualmente ampla flutuação na potência óptica do canal sobrevivente quando sete canais são inseridos ou retirados. No entanto, se a atenuação é ajustada em 1 dB, o canal de controle adquire potência suficiente para controlar as oscilações de ganho do EDFA e, portanto, manter a potência do canal sobrevivente praticamente constante (0,1 dB). Infelizmente, observou-se que a alta precisão de controle de ganho obtida com baixos valores de atenuação na realimentação óptica interfere diretamente no ganho absoluto do EDFA por canal, reduzindo-o significativamente, em resposta ao elevado consumo de

bombeio provocado pela alta potência óptica do canal de controle permitida pela própria baixa atenuação da realimentação óptica. Portanto, durante o projeto de um EDFA-CAGTO, deve-se sempre considerar que existe um nível de comprometimento entre a qualidade do controle de ganho e o valor absoluto do ganho por canal do amplificador, onde a melhoria de um irá, conseqüentemente, deteriorar o outro.

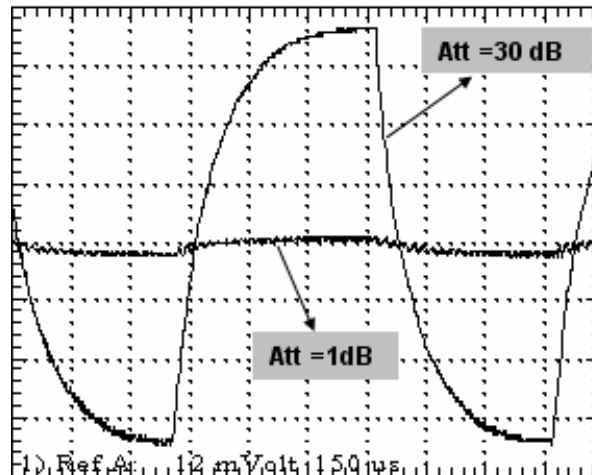


Fig 4.2: Variação do sinal fotodetectado do canal sobrevivente na saída do EDFA-CAGTO, observado no osciloscópio, para diferentes níveis de atenuação da realimentação óptica.

A Fig. 4.3 ilustra o espectro de transmissão amplificado para os dois níveis de atenuação da realimentação óptica utilizados anteriormente (Fig. 4.2), com o canal 4 (1546,8 nm) como canal sobrevivente e o canal de controle em 1535 nm. Na Fig 4.3 (a) estão ilustrados os espectros amplificados quando os oito canais são transmitidos (notar que o primeiro é o canal de controle em 1535 nm) e quando apenas o canal sobrevivente é mantido, para um nível de atenuação de 1 dB na realimentação óptica. Neste caso, verifica-se uma variação de 0,1 dB no ganho do canal sobrevivente. Na Fig. 4.3 (b), a mesma medida foi repetida, porém, para um nível de atenuação da realimentação óptica de 30 dB. Neste caso nota-se uma variação no ganho do canal sobrevivente de 7,4 dB.

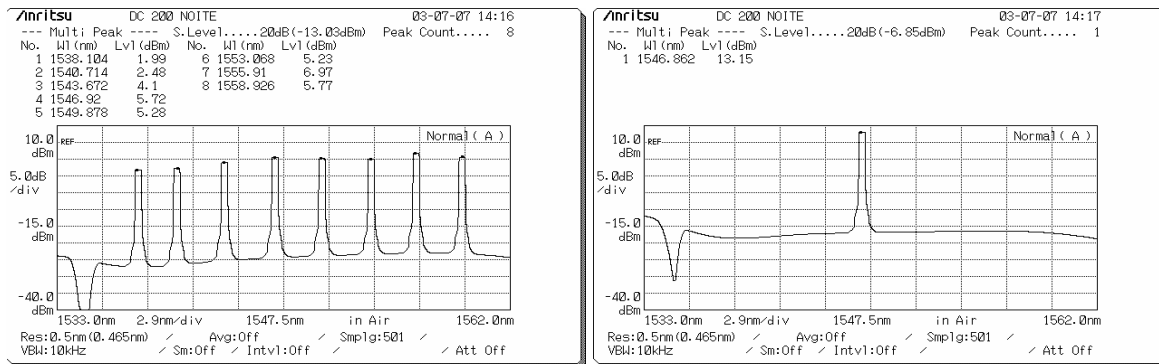
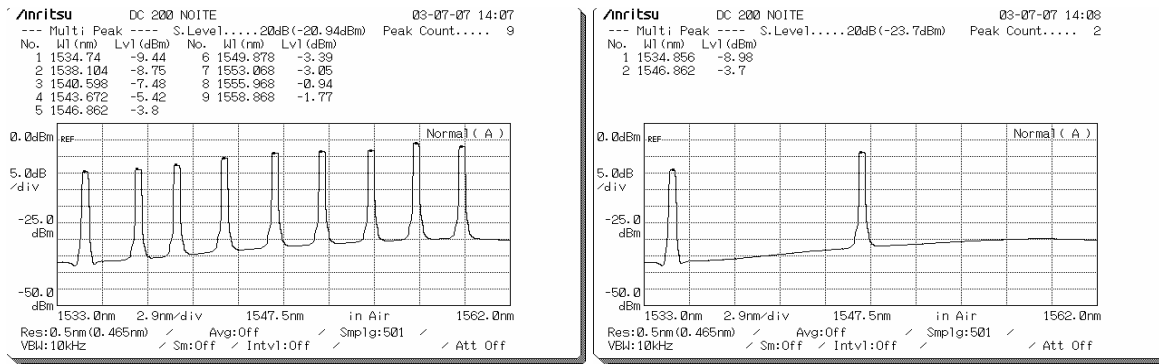


Fig. 4.3 (a)-(b): Espectros de saída do EDFA-CAGTO com oito e um canais transmitidos, respectivamente, para uma atenuação da realimentação óptica de (a) 1 dB, (b) 30 dB.

4.2.2 Atenuação da Realimentação Óptica

A técnica de controle automático de ganho totalmente óptico baseia-se na troca de potência entre os canais transmitidos e o canal de controle de, forma a manter constante o ganho dos canais transmitidos. O controle de potência necessário para manter constante o ganho dos canais transmitidos é, portanto, realizado através de variações na potência do canal de controle. Dessa maneira, qualquer fator capaz de alterar as condições de ocorrência desta troca de potência possui fundamental importância no projeto desta técnica de controle.

Conforme observado na secção anterior, a atenuação da realimentação óptica influencia fortemente a qualidade do controle de ganho do amplificador. O valor da atenuação da

realimentação óptica regula a potência óptica inicial (antes da inserção ou remoção de canais) do canal de controle e, desta forma, torna-se responsável pelo nível de desempenho do controle de ganho. Apesar da amplificação sofrida pelo canal de controle durante os vários ciclos de realimentação, para que ele se forme é necessário que ele seja capaz de superar todas as perdas do enlace de realimentação, inclusive aquela ocasionada pela atenuação da realimentação óptica. Uma vez que o canal de controle é formado, o método de controle de ganho baseia-se numa competição por ganho entre os canais transmitidos e o canal de controle. Como o canal de controle é continuamente realimentado, este adquire um alto nível de potência inicial (controlado pela atenuação) suficiente para saturar profundamente o EDFA. Assim, qualquer variação de potência óptica na entrada de EDFA tende a afetar diretamente o canal de controle. Se a potência óptica aumenta devido a um maior número de canais, a saturação do ganho faz com que o ganho efetivo do canal de controle diminua, diminuindo sua potência óptica em relação ao valor inicial e compensando o ganho para os novos canais inseridos. Por outro lado, se a potência óptica diminui devido a um menor número de canais, o ganho efetivo do canal de controle aumenta, aumentando sua potência óptica em relação ao valor inicial e mantendo o ganho para os canais remanescentes. Contudo, se o valor inicial da potência do canal de controle for excessivamente alto, predominará o consumo de portadores do estado metaestável do érbio pelo canal de controle, diminuindo a oferta de portadores para os demais canais, reduzindo-se o ganho efetivo por canal do amplificador. Portanto, além de ser responsável pela eficiência do controle, a atenuação da realimentação óptica é um fator determinante na capacidade de amplificação do EDFA controlado, podendo controlar, também, o nível de ganho proporcionado aos canais transmitidos.

Para ilustrar este fato, o arranjo experimental da Fig. 4.1 (a menos do modulador óptico) foi utilizado para analisar o desempenho do ganho absoluto e da variação do ganho do canal sobrevivente (1558,5 nm) no EDFA-CAGTO em relação a diferentes valores de atenuação da realimentação óptica, quando dois, quatro e oito canais são simultaneamente acoplados ao amplificador. Este procedimento foi dividido em duas etapas, onde, na primeira, a potência óptica para os canais foi ajustada em -20 dBm/canal e, na segunda, em -25 dBm/canal ambas observadas para duas posições distintas do canal de controle (1535 nm e 1547 nm). Os valores da atenuação da realimentação óptica adotados nas medições

variaram em intervalos de 2,5 dB entre 2,5 dB e 30 dB, além do valor de atenuação intrínseca do atenuador variável utilizado no experimento, que é de 1,5 dB.

Por ganho absoluto do canal sobrevivente deve-se entender a razão entre as medidas das potências do canal sobrevivente na saída e na entrada do amplificador, na presença dos demais canais de transmissão. Já a variação de ganho do canal sobrevivente deve ser entendida como a razão entre as medidas da potência do canal sobrevivente na saída do amplificador quando este canal é o único a passar pelo EDFA e quando ele divide a banda de amplificação com os demais canais.

A inserção dos canais neste experimento é realizada manualmente, no acoplador que justapõe (une) os demais canais ao canal sobrevivente. Como se pode verificar na Fig. 4.1, em uma das portas do acoplador A_1 , acoplam-se sete canais de Tx, enquanto que e na outra o canal sobrevivente. A retirada dos sete canais é feita desconectando-se a respectiva porta de A_1 da saída do Mux 7:1.

As Fig. de 4.4 a 4.7 ilustram os resultados obtidos para a análise do ganho e da variação de ganho do canal sobrevivente, em função da atenuação da realimentação óptica, consideram-se dois níveis de potência de entrada, -20 e -25 dBm por canal, após a amplificação de dois, quatro e oito canais, com o canal de controle alocado em 1535 nm e 1547 nm.

Na Fig. 4.4, verifica-se que o ganho e a variação do ganho do canal sobrevivente para o EDFA-CAGTO aumentam com o aumento da atenuação da realimentação óptica. Para atenuações maiores, a potência do canal de controle é reduzida devido a maiores perdas no enlace de realimentação. Esta redução de potência propicia um maior nível de amplificação aos canais transmitidos, já que se reduz o consumo da potência de bombeio lançada na fibra dopada, pelo canal de controle. Infelizmente, a variação do ganho do canal sobrevivente também aumenta com a diminuição da potência do canal de controle.

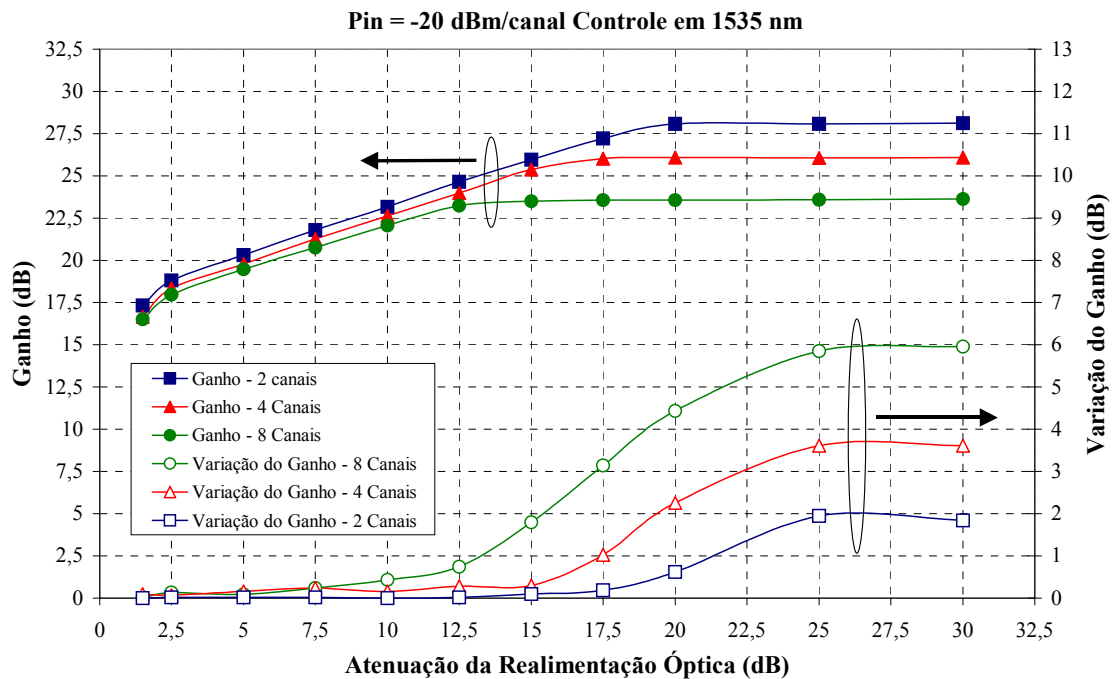


Fig. 4.4: Ganho e variação do ganho em função da atenuação da realimentação óptica, com o canal de controle em 1535 nm e potência de entrada de -20 dBm/canal, para dois, quatro e oito canais.

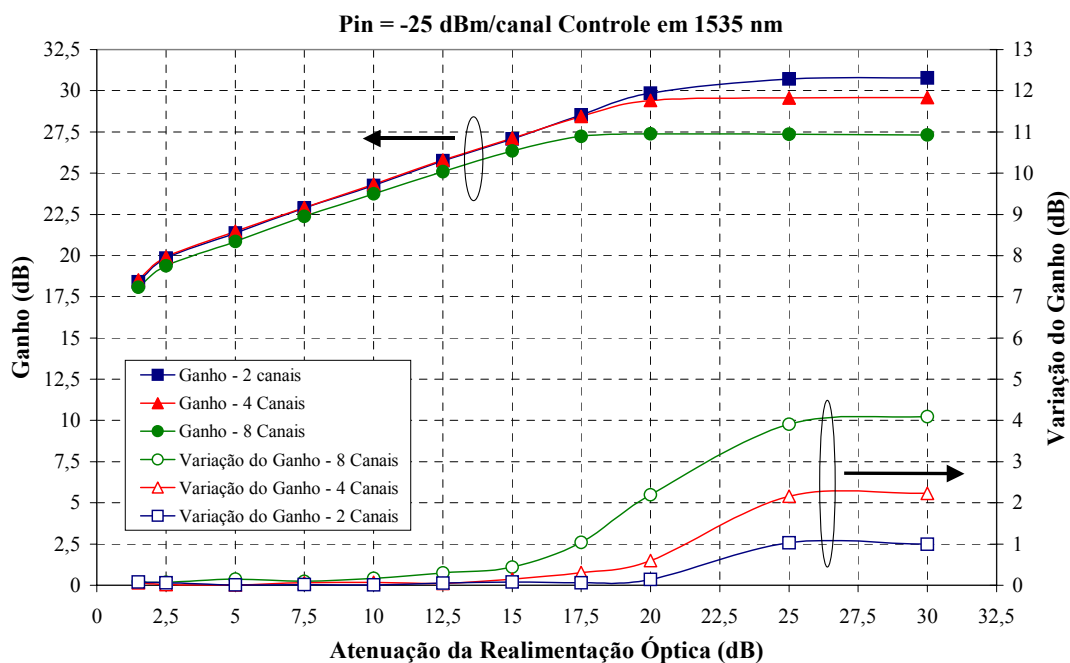


Fig. 4.5: Ganho e variação do ganho em função da atenuação da realimentação óptica, com o canal de controle em 1535 nm e potência de entrada de -25 dBm/canal, para dois, quatro e oito canais.

A Fig. 4.4 mostra também que, para cada valor de atenuação menor ou igual a 10 dB, o valor do ganho do canal sobrevivente se mantém estável dentro de uma faixa de 1 dB, mesmo para um diferente número de canais transmitidos. No entanto, acima de 12,5 dB de atenuação, este ganho começa a apresentar alterações substanciais em seu valor. Com relação à variação do ganho do canal sobrevivente, um comportamento semelhante é também observado. Como se pode verificar, para cada valor de atenuação menor ou igual a 10 dB, a variação de ganho independe do número de canais transmitidos, mantendo-se abaixo de 0,5 dB, mesmo para diferentes números de canais transmitidos. Em resumo, para as condições de operação particulares do EDFA comercial em questão, ou seja, para os valores de potência de entrada dos sinais e de potência de bombeio (mantida constante em todas as medições), observa-se que valores de atenuação de até 10 dB proporcionam um controle de ganho eficiente, com a possibilidade da escolha de um valor de ganho que é praticamente indiferente ao número de canais. Portanto, o valor ótimo para a atenuação da realimentação óptica irá depender das condições de operação às quais será submetido o EDFA com controle automático de ganho. Por exemplo, se um projeto de EDFA-CAGTO deve contemplar uma variação de ganho de até 0,5 dB, quando o ganho absoluto do canal sobrevivente deve ser de, pelo menos, 22 dB, para o caso particular da Fig. 4.4, observa-se que uma atenuação de 10 dB seria uma escolha razoável, uma vez que a variação máxima de ganho medida nesta situação foi de 0,43 dB, enquanto que o ganho mínimo proporcionado ao canal sobrevivente foi de 22,05 dB (situação com oito canais).

Um comportamento qualitativo semelhante ao descrito acima é observado na Fig. 4.5, onde o procedimento experimental foi repetido para uma potência óptica de entrada do EDFA-CAGTO de -25 dBm/canal. A diminuição da potência de entrada dos canais leva o amplificador a operar em um nível de saturação menor, explicando o aumento nos valores de ganho do canal sobrevivente em relação àqueles apresentados na Fig. 4.4, para as mesmas condições de atenuação da realimentação óptica.

É importante observar na Fig. 4.5 que, com a diminuição na potência de entrada do EDFA e para valores de atenuação de até 15 dB, a estabilidade do ganho do canal sobrevivente se mantém dentro de 0,45 dB independentemente do número de canais, mesmo com uma variação do valor absoluto do ganho do canal sobrevivente entre 18 dB e 27 dB. Por exemplo, se o mesmo critério de projeto apresentado anteriormente for aplicado

ao caso da Fig. 4.5, o valor ótimo para a atenuação da realimentação óptica seria, agora, de 15 dB. Neste caso, verifica-se uma variação de ganho de 0,44 dB para um valor absoluto de ganho entre 26,3 dB e 27 dB, independentemente do número de canais. Para valores de atenuação da realimentação óptica maiores que 15 dB, a variação do ganho pode chegar a 4,1 dB, quando sete dos oito canais são retirados, a 2,25 dB, quando três de quatro canais são retirados, e a 1 dB, quando um de dois canais é retirado.

As Figs. 4.6 e 4.7 também ilustram o ganho e a variação de ganho em função da atenuação da realimentação óptica, porém com o canal de controle alocado em 1547 nm. Para os valores de potência de entrada de -20 dBm/canal e -25 dBm/canal, o comportamento, tanto do ganho quanto da variação do ganho, são bastante semelhantes ao comportamento verificado quando os mesmos níveis de potência de entrada foram analisados para o controle alocado em 1535 nm (Figs. 4.4 e 4.5). No entanto, como será posteriormente discutido, o aumento da proximidade do canal de controle em relação ao canal sobrevivente degrada a sensibilidade do sistema, estando o aumento desta degradação estritamente relacionado com o acréscimo de penalidade verificado na análise sistêmica realizado numa próxima secção.

Na Fig. 4.6, pode-se verificar que o valor ótimo de atenuação é de, aproximadamente, 10 dB. Para este valor de atenuação da realimentação óptica tem-se uma variação máxima de ganho de 0,25 dB e um ganho absoluto de 23,7 dB, independentemente do número de canais transmitidos. Já na Fig. 4.7, o valor ótimo de atenuação é de 15 dB. Para este valor de atenuação, a variação máxima de ganho é de 0,35 dB e o ganho proporcionado ao canal sobrevivente é de 27,5 dB.

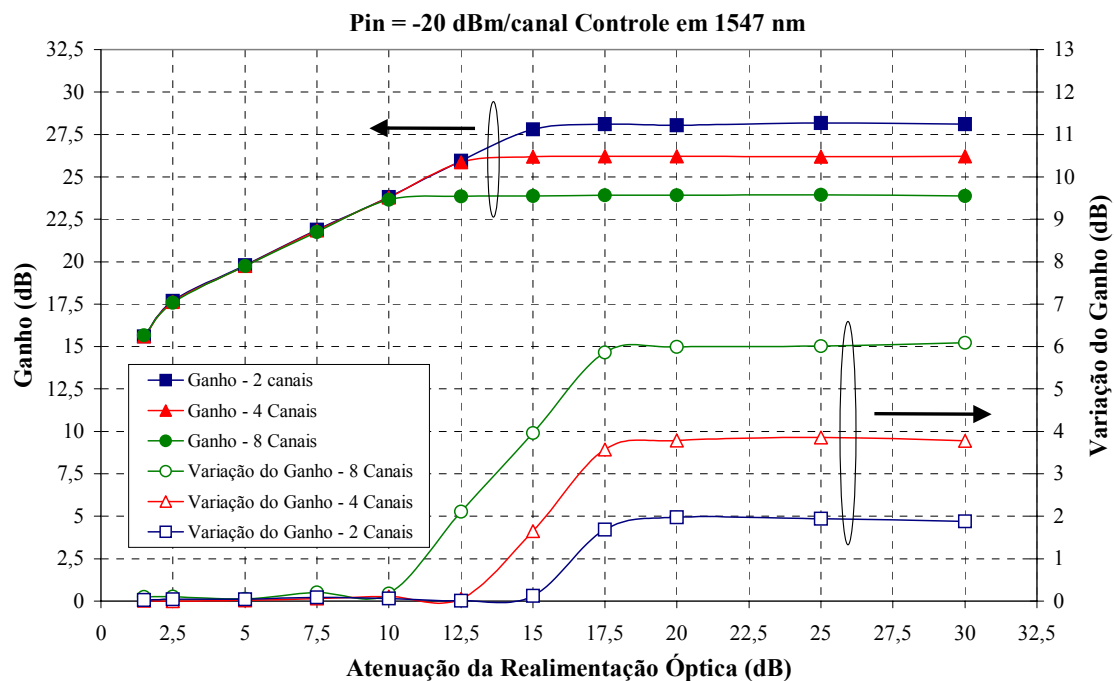


Fig. 4.6: Ganho e variação do ganho em função da atenuação da realimentação óptica, com o canal de controle em 1547 nm e potência de entrada de -20 dBm/canal, para dois, quatro e oito canais.

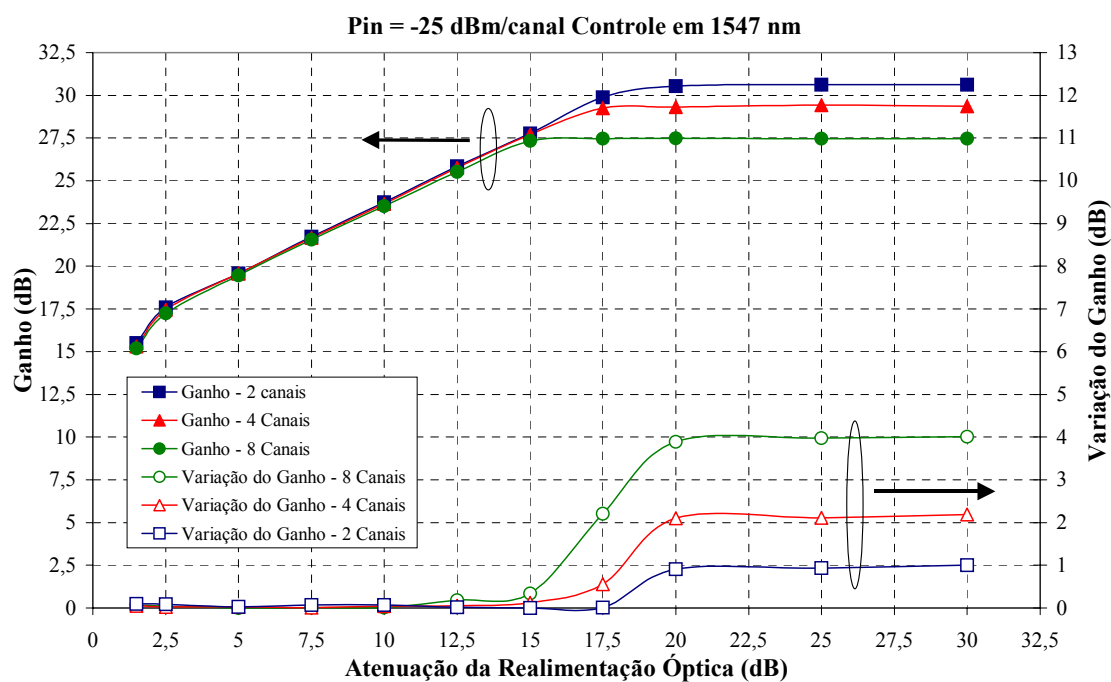


Fig. 4.7: Ganho e variação do ganho em função da atenuação da realimentação óptica, com o canal de controle em 1547 nm e potência de entrada de -25 dBm/canal, para dois, quatro e oito canais.

Como mostrado anteriormente, na análise do impacto da atenuação da realimentação óptica, a mesma é variada, sendo o ganho e a variação de ganho analisada para diferentes números de canais e diferentes níveis de potência de entrada. No entanto, ao término do projeto do EDFA-CAGTO um único valor de atenuação será utilizado na realimentação óptica. Como se pode observar nas Figs de 4.4 a 4.7, o valor ótimo da atenuação da realimentação óptica varia com a diminuição (isto também vale para o acréscimo) do nível de potência de entrada. Dessa maneira, no que diz respeito ao valor desta atenuação, deve-se escolher um valor para a mesma, que seja capaz de satisfazer os requisitos de projeto necessários para o EDFA controlado (ganho absoluto e variação do ganho), fazendo isto com base na verificação do comportamento do EDFA através da construção dos gráficos, como os apresentados nesta seção. Com base nas análises realizadas para o EDFA-CAGTO, neste trabalho desenvolvido, o nível de atenuação de 10 dB fornece um valor absoluto de ganho e uma variação do mesmo dentro dos parâmetros de projeto fixados nesta seção, ganho maior que 22,5 dB e variação de ganho de até 0,5 dB, independente da posição do canal de controle (das duas analisadas), do nível de potência de entrada e do número de canais.

Outro importante fato verificado, durante a realização deste experimento, foi a verificação de que o EDFA-CAGTO perde sua eficácia no controle de ganho com o aumento do nível da potência de entrada. Isto ocorre porque o sinal realimentado corresponde a uma parcela do ruído de emissão espontânea amplificado do EDFA, e o aumento do nível de potência de entrada faz com que o processo de emissões estimuladas aumente significativamente, reduzindo assim o ruído de emissão espontânea. Dessa maneira, quanto menor o nível de ruído de emissão espontânea, menor a potência do canal de controle formado pela mesma e, conseqüentemente, menor a eficiência do controle de ganho totalmente óptico. Assim, os limites de operação do EDFA-CAGTO, neste trabalho desenvolvido e analisado, foram observados, onde se concluiu que o EDFA-CAGTO apresenta um desempenho satisfatório para níveis de potência de entrada total de até -10 dBm. Este valor equivale a um sistema WDM de oito canais, com cada canal com uma potência de -19 dBm. Dessa maneira, o amplificador aqui desenvolvido é adequado para operação em redes WDM, quando utilizado como amplificador de linha ou como pré-

amplificador, sendo proibitiva a sua utilização como amplificador de potência, já que, nesta configuração, as potências de entrada típicas estão entre -5 e 0 dBm (potência total).

4.2.3 Alocação do Canal de Controle

Como a técnica de controle automático de ganho totalmente óptico se baseia na troca de potência entre o canal de controle e os canais transmitidos, qualquer fator que possa alterar as condições nas quais esta troca de potência acontece possui um papel fundamental no desempenho e, conseqüentemente, no projeto do EDFA controlado. Assim, da mesma forma que o valor da atenuação da realimentação óptica, a alocação espectral do canal de controle também apresenta fundamental importância no projeto de EDFAs com controle automático de ganho totalmente óptico.

Utilizando novamente o arranjo experimental apresentado na Fig. 4.1, para uma potência de entrada de -20 dBm/canal, o desempenho do EDFA controlado foi analisado para quatro posições do canal de controle: 1535 nm, 1547,7 nm, 1554 nm e 1557 nm. O canal oito, em 1558,5 nm, foi tomado como canal sobrevivente. A análise da alocação do canal de controle tem como objetivo determinar de que maneira a localização (alocação do canal de controle) influencia o comportamento do canal sobrevivente, sendo dada ênfase à influência do SHB e das oscilações de relaxação. Como será apresentado a seguir, o canal sobrevivente apresentou, de forma diferenciada, os efeitos de SHB e das oscilações de relaxação à medida que a proximidade entre o canal de controle e o canal sobrevivente aumenta.

Durante este experimento, sete dos oito canais do sistema WDM (não modulados) foram adicionados e retirados em intervalos de, primeiramente, 500 μ s e, na seqüência, 1 ms, através da aplicação de uma onda quadrada, de períodos 1 kHz ou 500 Hz, aplicada ao modulador externo. Após a filtragem e fotodetecção, o sinal elétrico correspondente ao canal sobrevivente é monitorado por um osciloscópio, de forma semelhante ao procedimento que permitiu a obtenção da Fig. 4.2. As Fig. 4.8 a 4.11 ilustram as variações da fotocorrente, que equivalem às variações da potência óptica do canal sobrevivente, obtidas para as diferentes posições do canal de controle propostas (respectivamente, 1535,

1547,7 , 1554 e 1557 nm) e para quatro valores de atenuação da realimentação óptica (1,5, 10, 12,5 e 25 dB). Estes valores de atenuação foram escolhidos por ilustrarem bem as diferentes regiões de eficiência do ganho, como mostrado na secção anterior. Este procedimento permite verificar a influência da localização do canal de controle quando a eficiência do próprio controle é alterada. A partir da análise das Figs. 4.8 a 4.11 observou-se que a potência do canal sobrevivente pode variar de duas maneiras distintas: Uma, na forma de variação do nível absoluto de potência, atribuído ao efeito SHB; a outra, na forma de oscilações na potência (durante os transientes), atribuídas às oscilações de relaxação.

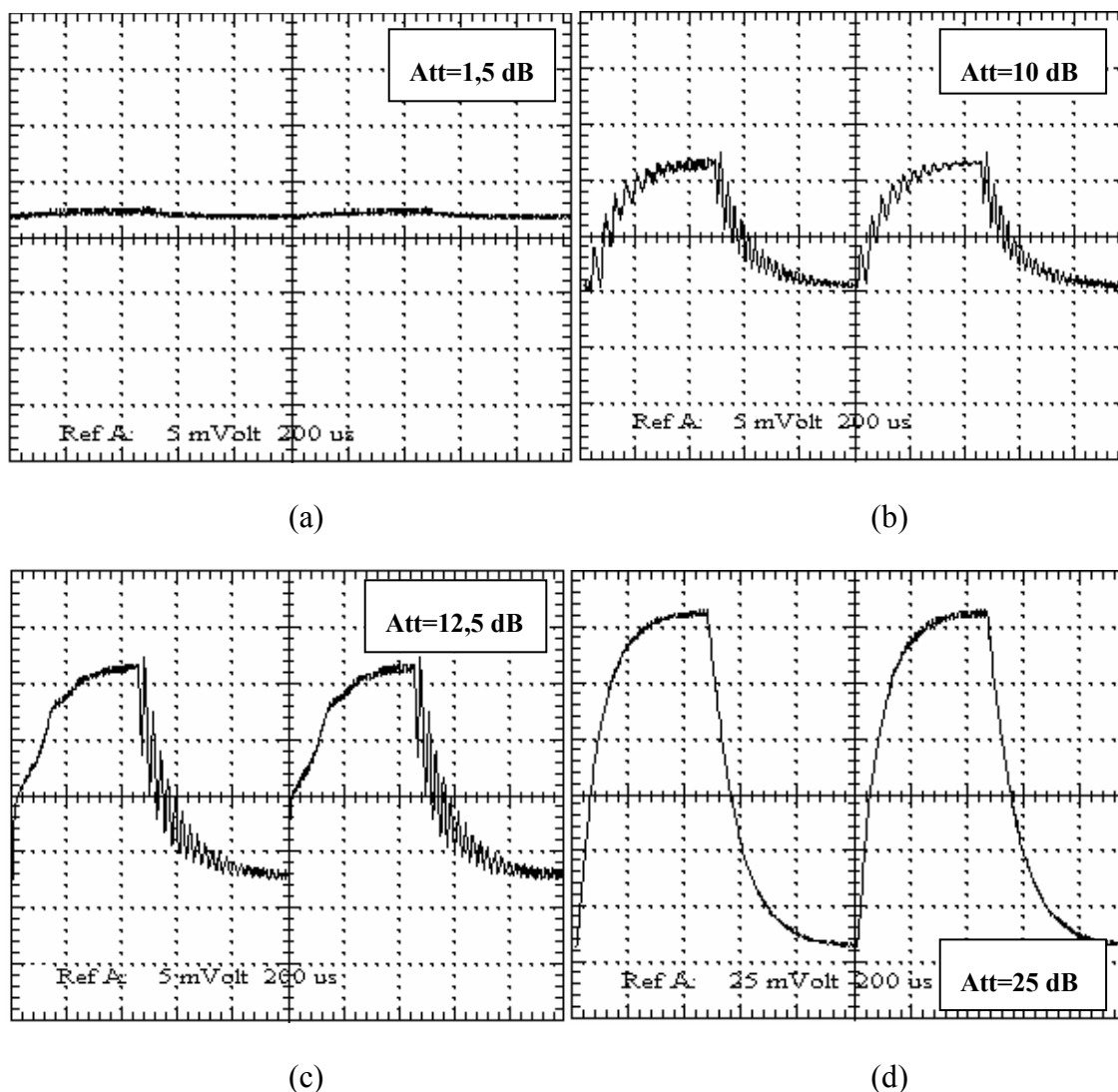


Fig. 4.8 : Medida equivalente da variação temporal de potência no canal sobrevivente, com o canal de controle em 1535 nm, para valores de atenuação da realimentação óptica de (a) 1,5 dB, (b) 10 dB, (c) 12,5 dB e (d) 25 dB.

Na Fig. 4.8, encontram-se as medidas obtidas em osciloscópio equivalentes às variações de potência do canal sobrevivente para quatro níveis de atenuação da realimentação óptica, com o canal de controle em 1535 nm. Como se pode verificar, as variações absolutas de potência aumentam com o aumento da atenuação da realimentação óptica, como era esperado, devido à diminuição da eficiência do controle.

Para uma atenuação de 1,5 dB, onde existe uma forte influência do canal de controle, as variações do valor absoluto da potência do canal sobrevivente são, praticamente, inexistentes (0,02 dB), bem como a influência das oscilações de relaxação. Neste caso, o ganho para o canal sobrevivente foi de 16,5 dB. Já para o nível de atenuação de 10 dB, mediram-se variações da ordem de 0,4 dB para o nível absoluto de potência, enquanto o ganho aumentou para 22,1 dB. Nas demais situações de atenuação, 12,5 dB e 25 dB, variações do nível absoluto de 0,75 e 5,85 dB foram obtidas, para ganhos de 23,2 dB e 23,6 dB, respectivamente.

Um importante fato observado com o canal de controle em 1535 nm é a ausência de oscilações superiores aos limites de variação de ganho. Como se pode verificar na Fig. 4.8, as oscilações encontradas nos transientes, que possuem aproximadamente 200 μ s de duração, não apresentam valores de amplitudes que superam os limites de variação de ganho. Fato este que ilustra que para uma grande distância entre o canal de controle e o canal sobrevivente, o SHB faz-se presente com maior intensidade que as oscilações de relaxação.

As medidas anteriores foram repetidas, para o comprimento de onda do canal de controle em 1547,7 nm e são mostradas na Fig. 4.9. Como se pode verificar, para 1,5 dB de atenuação, a variação do valor absoluto da potência do canal sobrevivente é imperceptível, mantendo o ganho em 15,7 dB. Já para uma atenuação de 10 dB, a variação do valor absoluto foi de 0,2 dB, para um ganho médio de 23,5 dB. Para os demais valores de atenuação 12,5 dB e 25 dB, valores de variação de potência de 2,1 dB e 6 dB foram obtidos enquanto que os ganhos médios permaneceram em 23,5 dB e 23,94 dB, respectivamente.

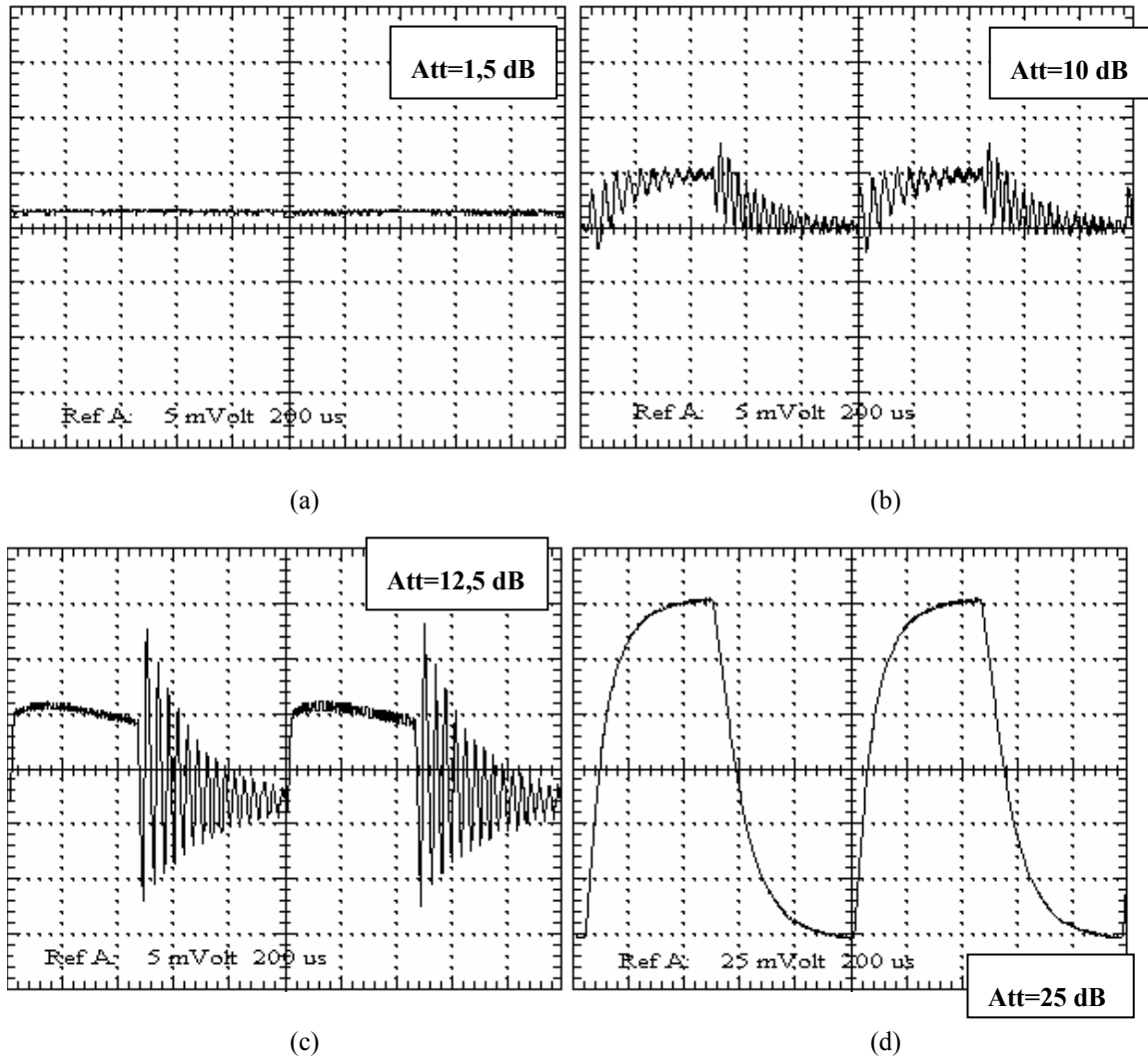


Fig. 4.9: Medida equivalente da variação temporal de potência no canal sobrevivente, com o canal de controle em 1547,7 nm, para valores de atenuação da realimentação óptica de (a) 1,5 dB, (b) 10 dB, (c) 12,5 dB e (d) 25 dB.

Em relação à Fig. 4.8, pode-se verificar, na Fig 4.9, que a variação do nível absoluto da potência do canal sobrevivente diminui. No entanto, as oscilações de relaxação passam a superar os limites de variação do nível absoluto de potência durante o transiente (atenuação de 10 dB e 12,5 dB). Um outro importante fato observado foi que, com o aumento da proximidade entre o canal de controle e o canal sobrevivente, este último apresentou uma maior penalidade em potência (e, conseqüentemente, no ganho), de forma que seu nível médio de potência diminui com o aumento da proximidade entre os canais de controle e sobrevivente.

A Fig. 4.10 ilustra as variações temporais equivalentes às variações de potência do canal sobrevivente para os mesmos níveis de atenuação das medidas anteriores, considerando, agora, o canal de controle em 1554 nm. Na Fig. 4.10 (a), não é possível se observar variações no nível absoluto de potência. Já na Fig. 4.10 (d) verifica-se uma completa ausência de controle de ganho, impedindo a observação das oscilações devido à escala utilizada para as medidas. Nas Figs. 4.10 (b) e (c), que representam as medidas para atenuações de 10 e 12,5 dB, respectivamente, as oscilações de relaxação continuam presentes, porém, aparentemente com menor amplitude que na Fig. 4.9. No entanto, as medidas feitas no osciloscópio não consideraram o nível médio de potência do canal de controle (medida da tensão provocada pela fotocorrente feita no osciloscópio). Assim, não é possível perceber na Fig. 4.10, a redução considerável no nível de potência do canal sobrevivente provocado pela maior absorção de ganho ocasionada pelo controle em 1554 nm. Conseqüentemente, o ganho do canal sobrevivente é menor, resultando na visualização de menores amplitudes para as oscilações de relaxação. Na verdade, se comparações são feitas considerando-se o nível médio de potência do canal sobrevivente, as amplitudes relativas das oscilações são, na verdade, maiores que na Fig. 4.9.

Nas Fig. 4.10 (a)-(d), verificam-se elevadas oscilações na potência do canal sobrevivente, assim como uma menor variação no nível de ganho, em relação a situações anteriores. Este comportamento pode ser atribuído à proximidade entre o canal de controle e o canal sobrevivente, diminuindo, assim, o efeito do SHB e aumentando o efeito das oscilações de relaxação, devido à maior proximidade entre o canal de controle e o canal sobrevivente. Em uma seção posterior, a proximidade entre estes canais será detalhadamente analisada, sendo possível quantificar-se o comprometimento sistêmico, em termos de potência e de taxa de erro, a partir do desempenho do EDFA com controle automático de ganho totalmente óptico, com o canal de controle em cada uma destas posições, com níveis de atenuação da realimentação óptica significativos para a análise (sem controle, apenas com a atenuação intrínseca do atenuador, e com 10 dB de atenuação, que foi o valor ótimo verificado na seção anterior).

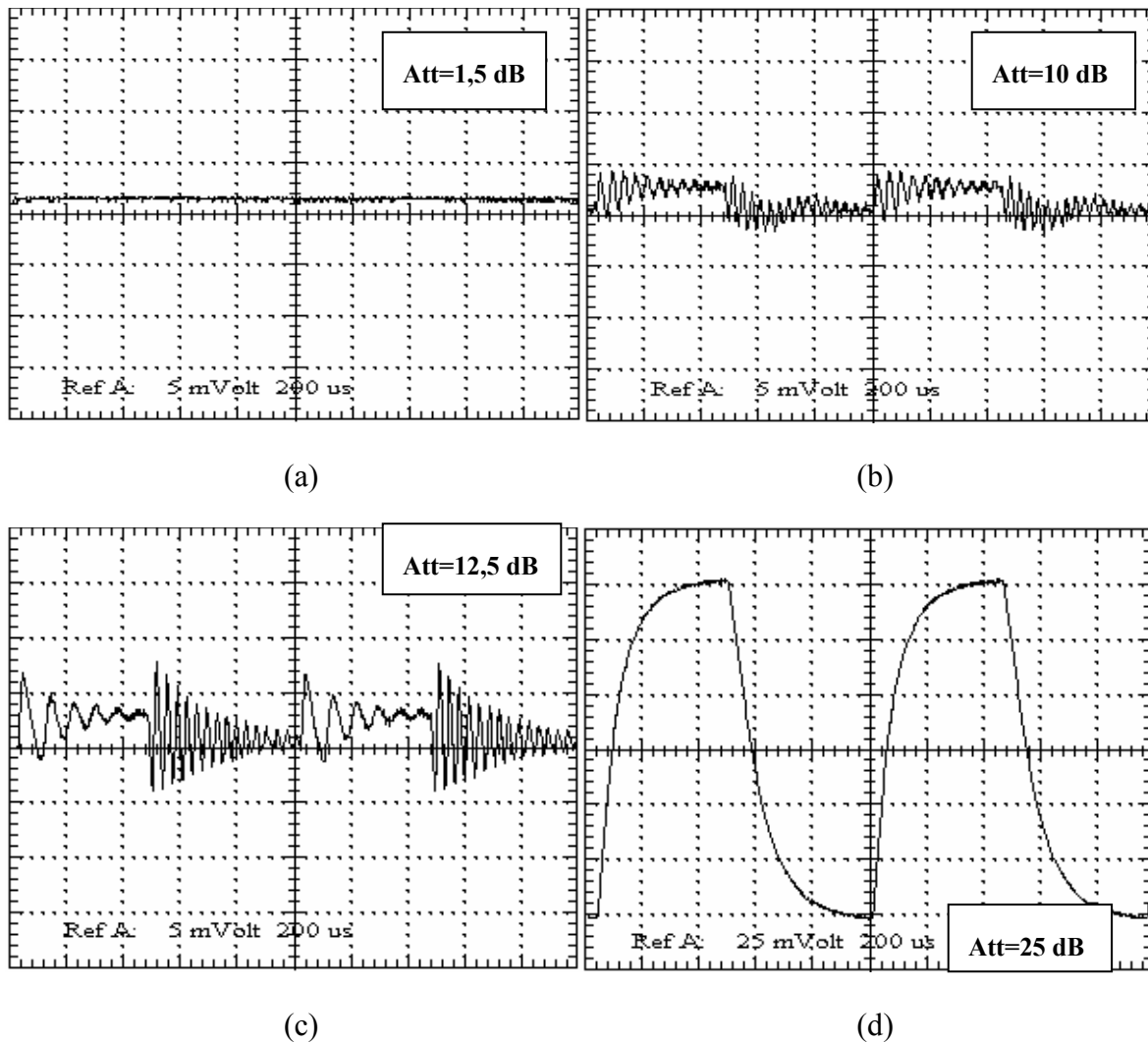


Fig. 4.10: Medida equivalente da variação temporal de potência no canal sobrevivente, com o canal de controle em 1554 nm, para valores de atenuação da realimentação óptica de (a) 1,5 dB, (b) 10 dB, (c) 12,5 dB e (d) 25 dB.

Por fim, o procedimento experimental que resultou nas medidas das Fig. 4.8, 4.9, 4.10 e 4.11 é repetido, considerando a situação onde os canais de controle e sobrevivente estão consideravelmente próximos. A Fig. 4.11 ilustra as variações de potência do canal sobrevivente quando o canal de controle se localiza em 1557 nm. Para esta posição do canal de controle, a redução da potência total do canal sobrevivente é da mesma ordem de grandeza daquela observada na situação onde o canal de controle situava-se em 1554 nm (Fig. 4.10).

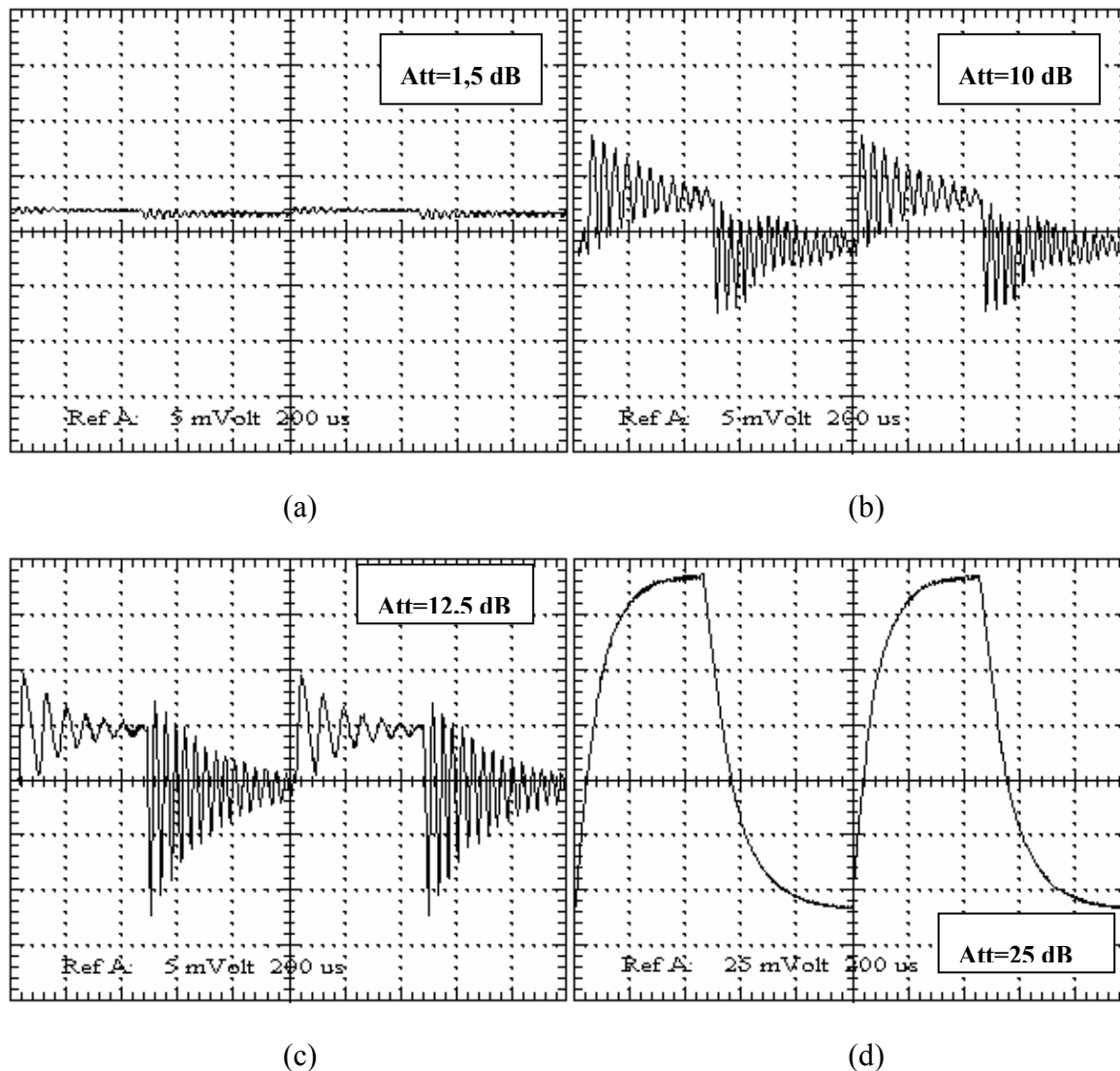


Fig. 4.11: Medida equivalente da variação temporal de potência no canal sobrevivente, com o canal de controle em 1557 nm, para valores de atenuação da realimentação óptica de (a) 1,5 dB, (b) 10 dB, (c) 12,5 dB e (d) 25 dB.

Como se pode observar na Fig. 4.11, as oscilações na potência do canal sobrevivente são mais severas que no caso anterior, tanto em amplitude quanto em duração. Em particular, para a atenuação de 10 dB observa-se que as oscilações, além de possuírem maiores amplitudes, também ocorrem por um maior período de tempo, não sendo possível a obtenção de um regime permanente durante os 500 μs de duração que precede a inserção ou retirada de sete canais. Na Fig. 4.14, o período da onda quadrada que é aplicada ao modulador é de 2 ms. Neste caso, como a inserção e retirada dos canais passam a ocorrer a

cada 1 ms torna-se possível visualizar o tempo de duração do transiente de potência do canal sobrevivente, mesmo quando o canal de controle se encontra em 1557 nm.

Como comentado anteriormente, o aumento das oscilações de relaxação ocorre devido à maior proximidade entre o canal de controle (1557 nm) e o canal sobrevivente (1558,5 nm), como verificado também em estudos anteriores baseados em simulação [56]. No entanto, um aspecto que não é citado nos estudos teóricos é o aumento da duração dos transientes. Além disto, estes mesmos estudos teóricos não fazem referências à influência da atenuação da realimentação óptica para diferentes posições do canal de controle.

Os resultados observados nas Fig. 4.8 a 4.11 concordam com outros já apresentados [46,56]. Verifica-se que, para grandes distâncias entre o canal de controle e o canal sobrevivente, a penalidade imposta ao desempenho do EDFA controlado através da técnica de controle totalmente óptica, é predominantemente devida ao efeito SHB, sendo o mesmo responsável pela variação de ganho no canal sobrevivente, e a ausência de oscilações deve-se ao fato das oscilações de relaxação não apresentarem efeitos significativos para grandes distâncias entre o canal de controle e o canal sobrevivente.

Posteriormente, o impacto causado pelas oscilações de relaxação e pelo SHB, ocasionadas pela variação da proximidade entre os canais de controle e sobrevivente, será quantificado em termos de variação de BER, para diferentes posições do canal de controle. Nestas medidas será adotado um sistema WDM de 8 canais modulados em 2,5 Gb/s, utilizando o EDFA-CAGTO com uma atenuação da realimentação óptica de 10 dB.

Ainda verificando os efeitos da alocação do canal de controle, a Fig. 4.12 ilustra o espectro de saída do EDFA-CAGTO com o canal de controle alocado em duas das posições para quais as medidas anteriores foram realizadas (1535 nm e 1557 nm). Os espectros foram obtidos com o nível de atenuação da realimentação óptica de 10 dB, sendo a potência de entrada de -20 dBm/canal. Como se pode verificar na Fig. 4.12 (a), com o canal de controle em, aproximadamente, 1535 nm, o canal sobrevivente amplificado possui uma potência de 2,05 dBm. Na Fig. 4.12 (b), para o canal de controle próximo ao canal sobrevivente (canal de controle em 1557 nm), o canal sobrevivente apresenta uma potência de 0,7 dBm. Como se pode verificar para esta última situação, o nível de potência do canal sobrevivente é inferior ao obtido na Fig. 4.12 (a); esta perda de potência no canal

sobrevivente (1,35 dB) impõe uma séria penalidade ao desempenho do EDFA, pois a mesma leva à degradação da relação sinal ruído do canal sobrevivente proporcionando, assim, uma séria degradação ao sistema óptico utilizando o EDFA controlado, além do aumento das oscilações de relaxação, que, como discutido anteriormente, aumentam significativamente com o aumento da proximidade entre canal de controle e canal sobrevivente.

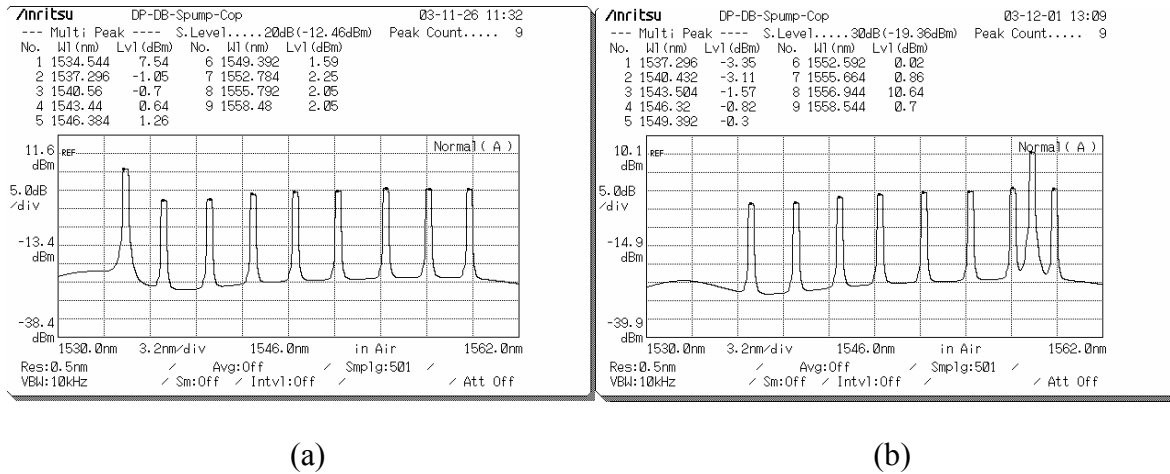


Fig. 4.12: Espectro de saída do EDFA controlado, $P_{in} = -20$ dBm/canal e atenuação da realimentação óptica igual a 10 dB, (a) canal de controle em 1535 nm, (b) canal de controle em 1557 nm.

Para efeito de resumo e comparação dos resultados apresentados, a Fig. 4.13 apresenta a sobreposição dos resultados das medidas armazenadas no osciloscópio referentes às Fig. 4.8, 4.9, 4.10 e 4.11, para o nível de atenuação de 10 dB. Deve-se ressaltar que o comportamento observado para o canal sobrevivente se relaciona diretamente à resposta do ganho do EDFA controlado, quando este é submetido a variações de potência em sua entrada e a diferentes comprimentos de onda do canal de controle.

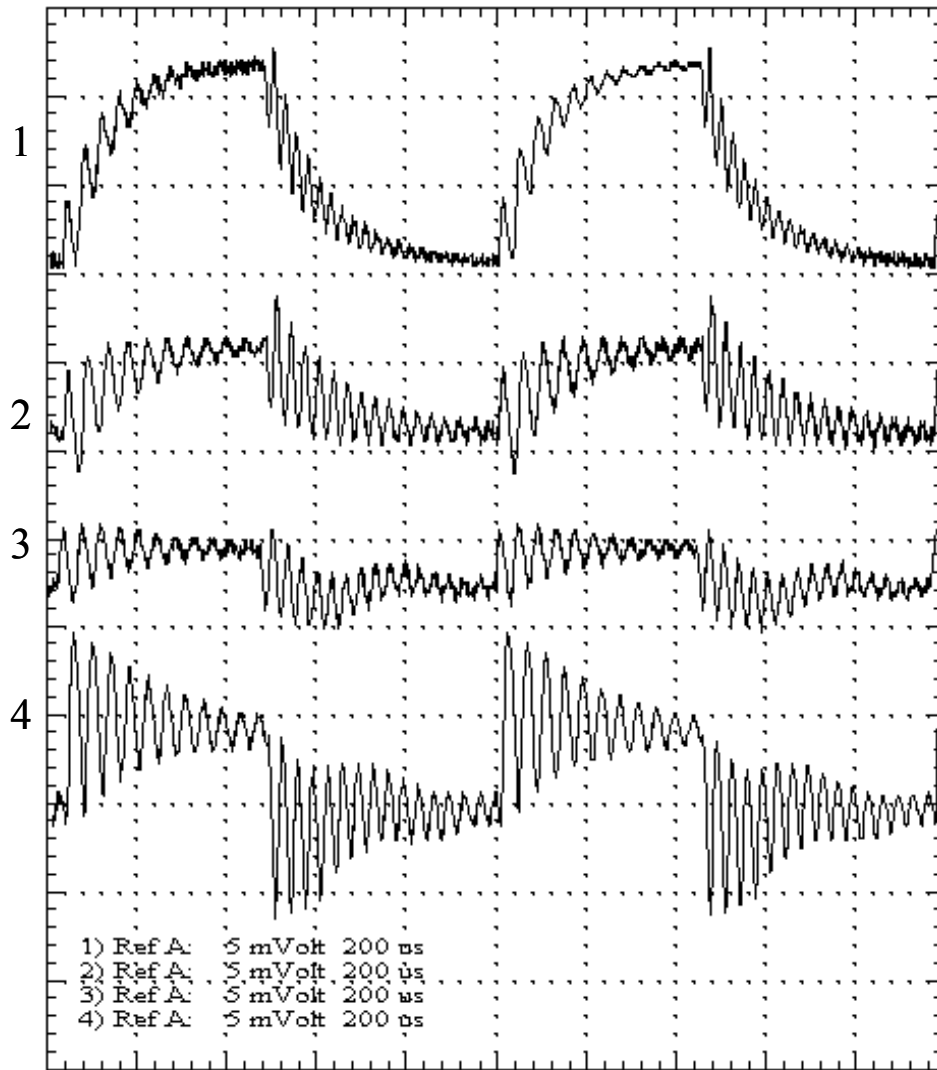


Fig. 4.13: Variações da potência do canal sobrevivente para uma atenuação da realimentação óptica de 10 dB, quando o canal de controle localiza-se em, 1535 nm (1), 1547,7 nm (2), 1554 nm (3) e 1557 nm (4), durante a inserção e retirada dos canais a cada 500 μ s.

Na Fig. 4.13, observa-se que a amplitude do canal sobrevivente na saída do EDFA-CAGTO se comporta de maneira distinta para diferentes valores do comprimento de onda do canal de controle, evidenciando, de forma também distinta, os efeitos de *spectral hole burning* (SHB) (variação absoluta da potência, pré e pós transiente) e das oscilações de relaxação (oscilações periódicas amortecidas da amplitude). Com o canal de controle operando em 1535 nm (1), a variação absoluta de potência do canal sobrevivente é de 0,45 dB com a ausência de grandes oscilações periódicas durante seu transiente. Já quando o

canal de controle é posicionado em 1547,7 nm (2), observa-se uma diminuição na variação absoluta 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), mesmo com uma diminuição ainda maior da variação absoluta 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 caso anterior (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, tanto o degrau quanto as oscilações de relaxação voltam a aumentar e influenciar negativamente o canal sobrevivente de forma mais acentuada. Este último resultado contraria conclusões baseadas em simulações previamente publicadas [56], que afirmam que o efeito de SHB deveria ser continuamente minimizado à medida que os canais de controle e sobrevivente se aproximassem.

Conforme o comprimento de onda do canal de controle aumenta a partir de 1535 nm, observa-se, na Fig. 4.13, que as oscilações de relaxação começam a apresentar uma maior duração. Por exemplo, no caso do canal de controle em 1557 nm, verifica-se a amplitude destas oscilações ainda é considerável, quando os canais são novamente inseridos ou retirados. A Fig. 4.14 mostra as medidas da Fig. 4.13, considerando, agora, um intervalo entre a inserção e a remoção dos canais de 1 ms. Nesta figura pode-se perceber mais claramente a duração dos transientes com o aumento da proximidade entre os canais de controle e sobrevivente. De maneira geral, pode-se concluir que a duração das oscilações de relaxação aumenta com a proximidade entre os canais de controle e sobrevivente.

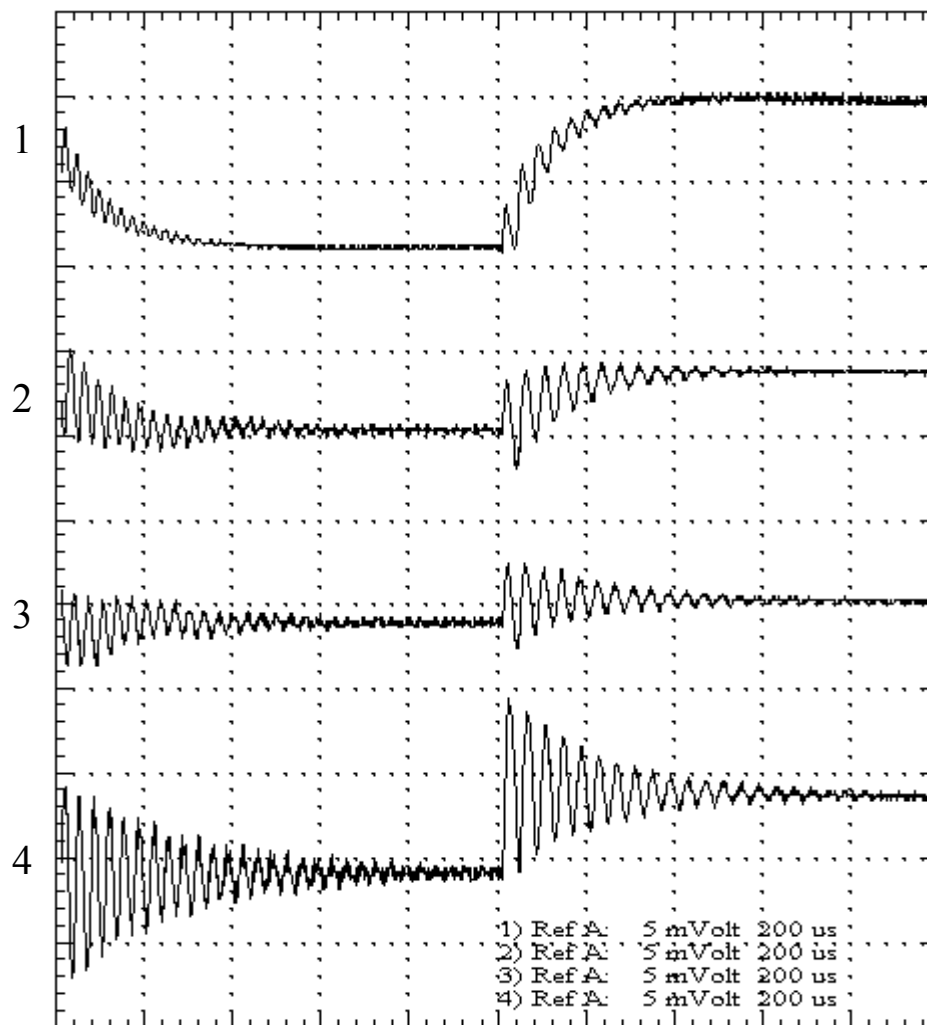


Fig. 4.14: Variações da potência do canal sobrevivente para uma atenuação da realimentação óptica de 10 dB, quando o canal de controle localiza-se em, 1535 nm (1), 1547,7 nm (2), 1554 nm (3) e 1557 nm (4), durante a inserção e retirada dos canais a cada 1ms.

Analisando-se as Fig. 4.13 e 4.14, verifica-se que a alocação do canal de controle é um importante parâmetro de projeto para EDFAs com ganho controlado pela técnica totalmente óptica, pois determina o comportamento dos níveis de potência de saída dos canais sendo amplificados. No caso particular do experimento realizado, observou-se que variações bruscas da potência de entrada do EDFA controlado causam respostas de ganho distintas para o amplificador, quando o comprimento de onda do canal de controle é variado, e que, quanto maior a proximidade entre o canal de controle e o canal sobrevivente, as oscilações de relaxação tendem a ser mais duradouras. Dessa maneira, os resultados experimentais

obtidos neste trabalho sugerem que é possível se determinar um comprimento de onda otimizado para o canal de controle, onde se atinge um grau de comprometimento entre as variações do nível absoluto e as oscilações de ganho do amplificador, levando-se em consideração a escolha do valor da atenuação da realimentação óptica. Conclusões mais específicas sobre este ponto serão apresentadas após a análise sistêmica apresentada a seguir.

Nesta seção foi mostrado que a alocação do canal de controle possui grande influência nos níveis de potência de saída do EDFA com ganho controlado pela técnica totalmente óptica. Observou-se que quanto maior a proximidade entre o canal de controle e o canal sobrevivente, maiores são as amplitudes das oscilações de potência induzida nos transientes do canal sobrevivente. Foi também observado que, com o aumento da proximidade entre os canais de controle e sobrevivente, ocorre uma troca de potência, onde o canal de controle começa a retirar potência do canal sobrevivente. No entanto, não foi avaliado o quanto o aumento das oscilações de potência, e a própria diminuição do nível médio de potência do canal sobrevivente, afetam o desempenho sistêmico do EDFA com controle automático de ganho. Esta avaliação será realizada na próxima seção, onde o desempenho do EDFA controlado, para todas as posições do canal de controle aqui tratadas, será analisado em termos da BER.

4.3 Análise Sistêmica do EDFA-CAGTO

Na seção anterior, observou-se que a atenuação da realimentação óptica e a alocação do canal de controle influenciam diretamente o desempenho de um EDFA com controle de ganho totalmente óptico. Escolhido o valor da atenuação da realimentação óptica que otimiza o desempenho do EDFA controlado, dependendo de como a potência óptica é acoplada à entrada do EDFA, o sinal do canal sobrevivente apresentou oscilações abruptas e periódicas distintas em seu nível de potência na saída do amplificador, conforme o comprimento de onda do canal de controle era variado. Conseqüentemente, para completar a análise, deve-se também avaliar qual o impacto sistêmico que a atenuação da realimentação óptica e a alocação do comprimento de onda do canal de controle de um EDFA-CAGTO tem em um sistema que utiliza tal amplificador entre transmissor e receptor. A Fig. 4.15 ilustra o diagrama de blocos do arranjo da Fig. 4.1 modificado para

este experimento, onde o gerador de onda quadrada foi substituído por um gerador de padrões com uma sequência binária pseudo-aleatória de $2^{23}-1$, que modula cada um dos oito canais ópticos de saída do transmissor a uma taxa de 2,5 Gb/s, e a associação fotodetector-osciloscópio foi substituído por um medidor de BER. O canal 8 (1558,5 nm), tomado como canal sobrevivente, foi modulado diretamente pelo gerador de padrões. Os outros sete canais foram modulados externamente pelo mesmo gerador.

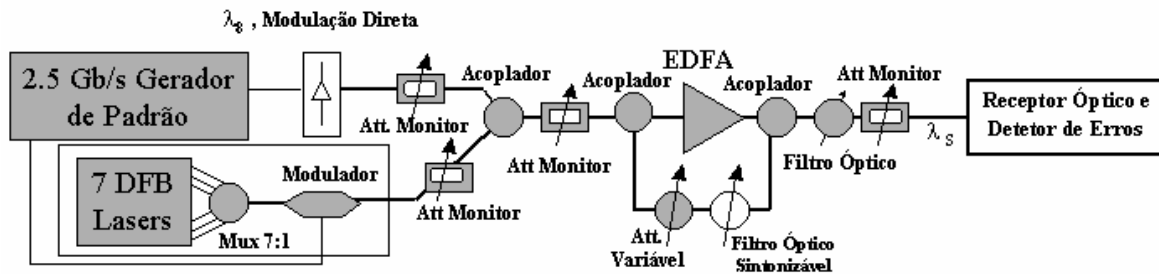


Fig. 4.15: Arranjo experimental utilizado na análise sistêmica do EDFA com controle automático de ganho totalmente óptico.

Neste experimento, o impacto da utilização da técnica de controle automático de ganho no desempenho do EDFA desenvolvido é analisado estática e dinamicamente. Na análise do caso estático, nenhuma inserção ou retirada de canais é realizada durante o experimento. Na análise estática, primeiramente, é analisado o impacto sistêmico causado pela variação do nível de atenuação da realimentação óptica, com o canal de controle em 1535 nm, para potências de entrada de -20 e -25 dBm/canal com dois, quatro e oito canais sendo transmitidos (Fig. 4.16 e 4.17). Também são realizadas medidas de sensibilidade para quatro diferentes posições do canal de controle (1535 nm, 1547,7 nm, 1554 nm e 1557 nm), com todos os canais transmitidos na banda de transmissão e com a atenuação da realimentação óptica de 10 dB (valor ótimo de atenuação, Seção 4.2.2), ilustrado na Fig. 4.18. No caso dinâmico, as medidas da BER foram feitas com o canal 8 (canal sobrevivente) primeiramente sozinho na banda de transmissão sendo, após algumas medidas de BER em 10^{-10} , adicionados outros sete e verificada a BER do canal sobrevivente em três condições de atenuação. Para o caso dinâmico, assumem-se os valores

de atenuação da realimentação óptica de 1dB, 10 dB e também, o caso sem controle (atenuação muito alta). Estes resultados encontram-se ilustrados nas Figs. 4.23 a 4.26.

4.3.1 Análise Estática

Durante a chamada análise estática, os canais transmitidos sempre estão presentes na banda de transmissão do EDFA, ou seja, durante o experimento nenhum canal é inserido ou retirado. Nesta análise, apenas o canal de controle e a atenuação da realimentação óptica variarão de posição e todas as medidas de taxa de erro serão tomadas em relação ao canal 8 (1558,5 nm), denominado canal sobrevivente.

Primeiramente o impacto sistêmico causado pelas diferentes características de ganho do EDFA-CAGTO, originadas pelos diferentes níveis de atenuação da realimentação óptica foi realizado, utilizando o arranjo experimental da Fig. 4.15. Na realização do experimento, um atenuador variável na entrada do medidor de BER controla a sua potência óptica de entrada para manter medidas da BER em 10^{-10} , quando apenas um canal é transmitido. O ajuste da potência óptica de saída de modo a manter a BER 10^{-10} é realizado quando um canal é transmitido, para cada valor de atenuação da realimentação óptica. Posteriormente, a BER em função do nível da atenuação da realimentação óptica é obtida com dois, quatro e oito canais transmitidos, porém com o ajuste de potência realizado para um canal sendo mantido.

Esta análise tem o intuito de quantificar o impacto das variações de ganho no desempenho do sistema em função da atenuação da realimentação óptica. Assim, para cada valor analisado da atenuação da realimentação óptica, conhecendo-se o valor do ganho e da variação do ganho, observa-se o quanto esta variação é capaz de degradar a taxa de erro de bit do sistema baseado no EDFA-CAGTO. Desta maneira, torna-se possível realizar uma escolha elaborada do valor da atenuação da realimentação óptica, criando bases para padronização do projeto de EDFAs-CAGTO.

As Figs. 4.16 e 4.17 apresentam o impacto sistêmico causado pelas variações de ganho associadas a cada nível de atenuação. Os gráficos mostram medidas da BER do canal sobrevivente em função de diferentes valores de atenuação da realimentação óptica, quando

um, dois, quatro e oito canais são acoplados ao EDFA. O ajuste do atenuador para a manutenção da taxa inicial de erro de bits em 10^{-10} foi realizado para cada valor de atenuação, apenas com o canal sobrevivente sendo transmitido. Este procedimento foi dividido em duas etapas, onde, na primeira, a potência óptica para os canais foi ajustada em -20 dBm/canal (Fig. 4.16) e, na segunda, em -25 dBm/canal (Fig. 4.17).

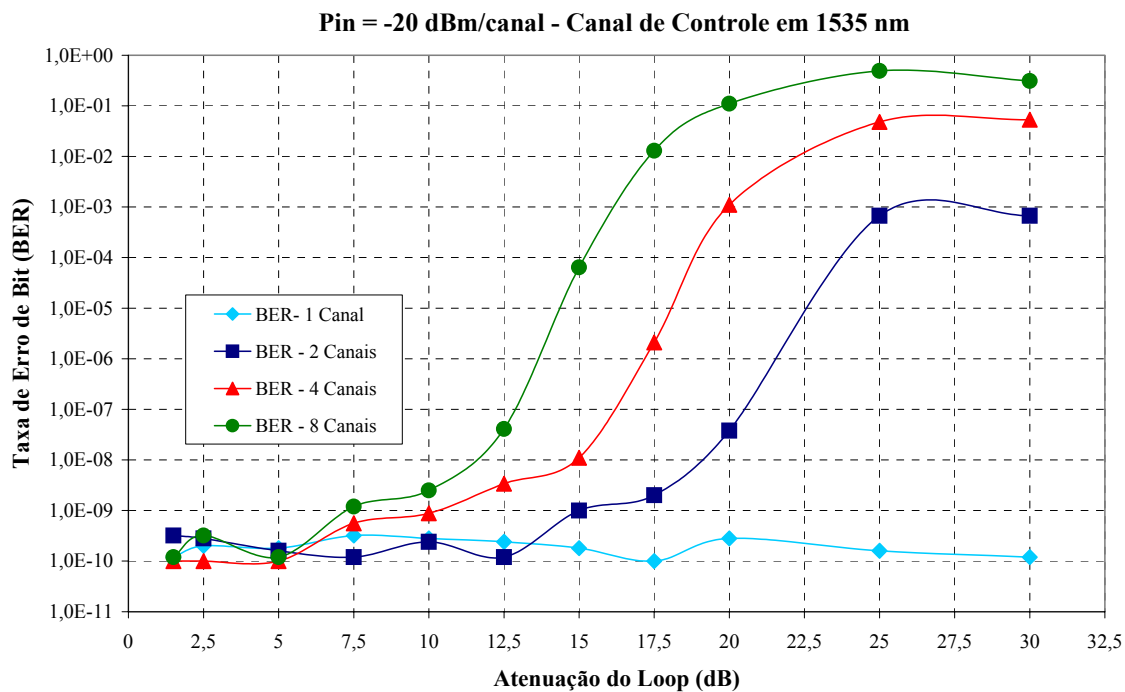


Fig. 4.16: BER em função da atenuação da realimentação óptica com a potência de entrada de -20 dBm/canal e canal de controle em 1535 nm.

A Fig. 4.16 mostra que a taxa de erro de bit é submetida a um crescente aumento de penalidade para valores de atenuação entre 10 e 25 dB. A penalidade se mantém constante para valores de atenuação acima de 25 dB, quando o canal de controle já foi totalmente suprimido. Para valores de atenuação menores ou iguais a 10 dB, o impacto máximo da inserção de canais é inferior a uma ordem de grandeza, sendo a penalidade mais acentuada para um número maior de canais.

De posse das Figs. 4.4 e 4.16, é possível determinar com maior precisão o valor de atenuação que deve ser utilizado para otimizar o desempenho do EDFA controlado, nas condições particulares de operação deste caso. Assim, supondo-se que seja aceitável uma degradação da BER de uma ordem de grandeza em complemento às condições de projeto do exemplo da seção anterior, o valor ótimo para a atenuação continua sendo de 10 dB. A mesma análise com o canal de controle em 1547 nm foi realizada, sendo verificado o mesmo comportamento.

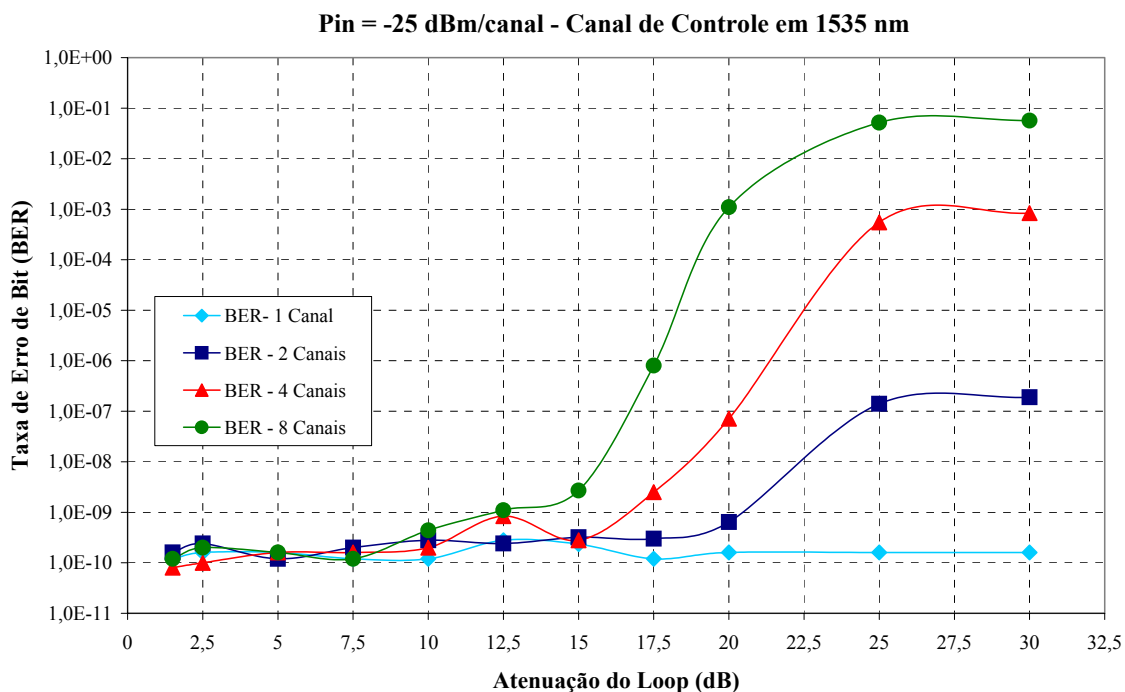


Fig. 4.17: BER em função da atenuação da realimentação óptica com a potência de entrada de -25 dBm/canal e canal de controle em 1535 nm.

Já na Fig. 4.17, a menor potência de entrada dos canais leva o EDFA a um estado de menor saturação, diminuindo o impacto das variações de ganho. Assim, um canal de controle menos eficiente (em relação a EDFAs mais saturados) consegue manter o impacto sistêmico menor que uma ordem de grandeza, mesmo com valores de atenuação maiores. Analisando-se a Fig. 4.17, verifica-se que valores de atenuação abaixo de 12,5 dB proporcionam degradações na taxa de erro inferiores a uma ordem de grandeza.

Considerando-se a Fig. 4.5 e as condições de projeto do exemplo da seção anterior, este valor de atenuação pode ser considerado ótimo, uma vez que também proporciona um ganho ao canal sobrevivente de 25,5 dB.

A Fig. 4.18 mostra a variação de sensibilidade do enlace para o canal sobrevivente, tendo o comprimento de onda do canal de controle em 1535 nm, 1547,7 nm, 1554 nm e 1557 nm como parâmetro. A atenuação da realimentação óptica foi de 10 dB e a potência óptica dos canais foi ajustada em -20 dBm/canal.

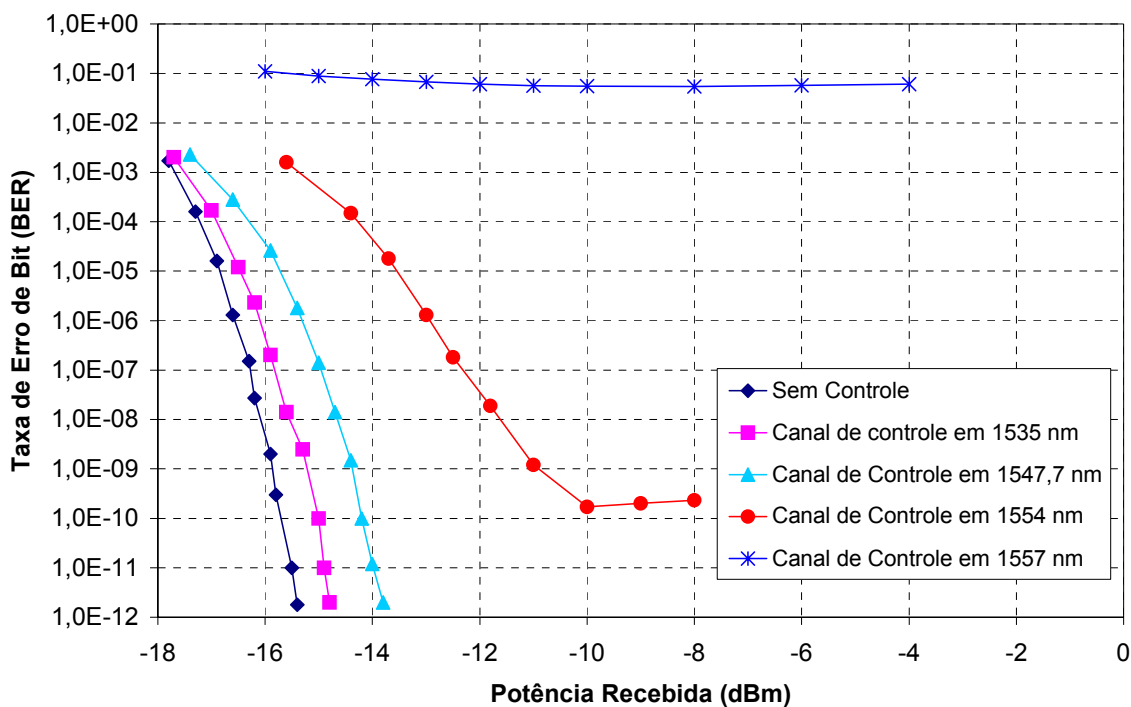


Fig. 4.18: Degradação da sensibilidade do EDFA com controle automático de Ganho totalmente óptico em função do comprimento de onda do canal sobrevivente, $P_{in} = -20$ dBm/canal.

Pode-se verificar na Fig. 4.18, através da degradação da BER, que um acréscimo no comprimento de onda do canal de controle causa um acréscimo de penalidade ao sistema. Para comprimentos de onda do canal de controle alocados até 1547,7 nm, o sistema com EDFA consegue ainda manter níveis aceitáveis de BER. Contudo, quando os comprimentos de onda do canal de controle ultrapassam 1554 nm, a penalidade cresce rapidamente, a

ponto de impedir que níveis toleráveis de BER para sistemas de comunicações ópticas (BER de 10^{-9}) sejam atingidos, mesmo com o aumento do nível de potência no receptor. De fato, quando o canal de controle atinge 1557 nm (comprimento de onda do canal de controle mais próximo do canal sobrevivente), o sincronismo do sistema é completamente perdido, não sendo possível alinhar o sistema.

Para ilustrar as distorções causadas pela variação da posição do canal de controle de 1535 nm a 1557 nm, a Fig. 4.19 (a) a (d) apresentam, respectivamente, os bits do canal sobrevivente recebido. Neste caso, devido a limitações do equipamento de medição, os canais foram modulados a uma taxa de 52 Mb/s, pois o osciloscópio digital utilizado possui uma banda de 200 MHz e a única taxa abaixo disto que o gerador de padrões possui era 52 Mb/s. Este fato de maneira nenhuma mascara o resultado mostrado na Fig. 4.19, pois a penalidade e o ganho sofridos pelos bits durante a passagem pelo EDFA independem da taxa de transmissão.

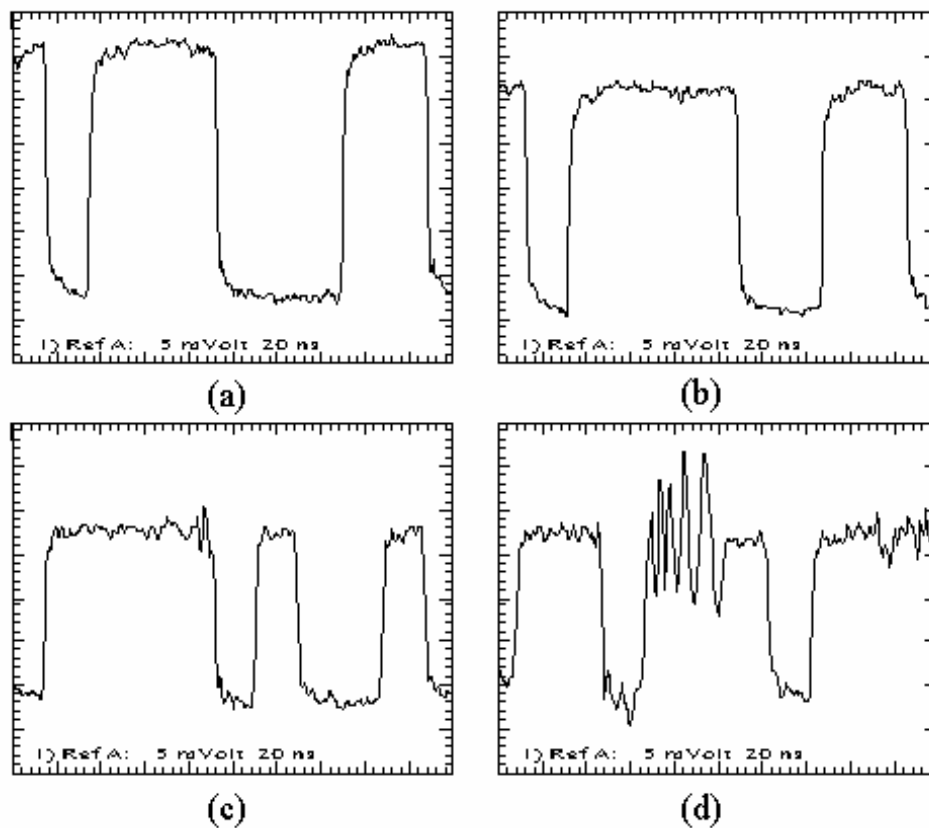


Fig. 4.19 (a)-(d): Bits recebidos para diferentes posições do canal de controle: (a) 1535 nm, (b) 1547,7 nm, (c) 1554 nm e (d) 1557 nm.

Com o canal de controle operando em 1535 nm e 1547,7 nm, os bits recebidos praticamente não apresentaram deformações. Porém, as amplitudes dos bits recebidos com o canal de controle em 1547,7 nm foram menores que as dos bits recebidos em 1535 nm. A tendência de redução das amplitudes dos bits com o aumento do comprimento de onda do canal de controle se confirmou quando este foi alocado em 1554 nm. Neste mesmo comprimento de onda, verificou-se também que os bits recebidos começavam a apresentar distorções aparentes. Com o canal de controle operando em 1557 nm, observou-se a presença de fortes oscilações nos bits recebidos, que distorcem e comprometem a correta decisão do receptor. O comportamento observado concorda qualitativamente com as medidas de sensibilidade apresentadas na Fig. 4.18, pois, como se pode verificar, quanto maiores as penalidades sofridas pelo bit, piores as taxas de erros apresentadas pelo sistema que utiliza o EDFA-CAGTO.

A Fig. 4.20 ilustra o diagrama de olho relativo ao canal sobrevivente para cada uma das quatro posições do canal de controle analisadas, com a modulação dos canais na taxa de 2,5 Gb/s. O diagrama de olho é uma medida qualitativa que fornece, de acordo com a abertura do olho, ou por deformações em sua forma, a qualidade do sinal que está sendo transmitido.

Para obtenção dos diagramas de olho, o mesmo arranjo experimental da Fig. 4.15 foi utilizado, porém, com o detector de erros substituído por um osciloscópio digital de amostragem com uma largura de banda de 2,5 Gb/s. Também foi utilizado um acoplador para retirar uma amostra do padrão utilizado no experimento, no intuito de fornecer ao osciloscópio o sincronismo necessário para a comparação dos bits transmitidos e recebidos.

Os diagramas de olho ilustrados na Fig. 4.20 são referentes ao canal sobrevivente e foram medidos para cada um dos quatro comprimentos de onda do canal de controle sob análise. Devido à potência do canal sobrevivente na saída do EDFA possuir um valor acima de 0 dBm independentemente da posição do canal de controle, necessitou-se ajustar a potência óptica no receptor para evitar a saturação de seu fotodetector. Desta maneira, com o canal de controle em 1535 nm, a potência recebida pelo receptor foi ajustada através do atenuador localizado após o filtro óptico 2 (Fig. 4.15), de forma a maximizar a abertura do diagrama de olho.

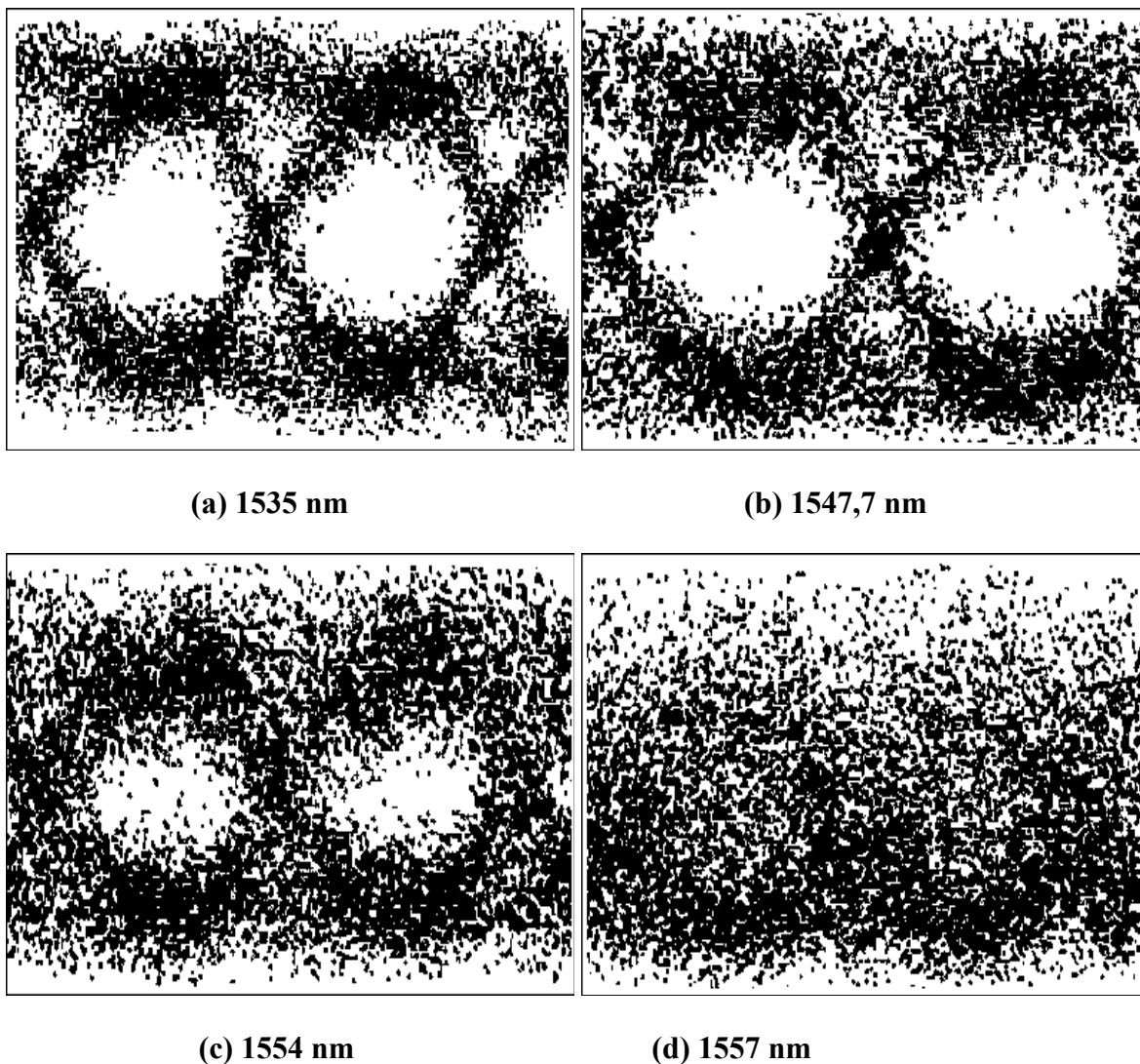


Fig. 4.20: Diagramas de olho relativos ao canal sobrevivente, para o canal de controle em (a) 1535 nm, (b) 1547,7 nm, (c) 1554nm e (d) 1557nm, com a atenuação da realimentação óptica em 10 dB.

Com o canal de controle em 1535 nm, a potência no receptor, correspondente ao olho observado na Fig. 4.20 (a), foi de -7 dBm. O ajuste da atenuação foi, então, mantido para servir de referência para as demais medições. Com o canal de controle posicionado em 1547,7 nm, 1554 nm e 1557 nm, as potências recebidas foram de -7,7 dBm, -8,3 dBm e -8,1 dBm, respectivamente, indicando uma inserção de penalidade de 0,7 dB, 1,3 e 1,1 dB para cada um dos comprimentos de onda do canal de controle analisados. Os diagramas de olho associados a estas posições do canal de controle estão ilustrados nas Figs. 4.20 (b), (c) e (d), respectivamente. Como se pode observar, o diagrama apresenta uma maior abertura

quando o canal de controle se situa em 1535 nm. A maior proximidade entre os canais de controle e sobrevivente causa a diminuição da abertura do olho, até uma total perda de sincronismo para o canal de controle em 1557 nm.

Um fato interessante observado nos resultados experimentais é que a penalidade em potência, obtida com o canal de controle posicionado em 1557 nm, é ligeiramente menor que aquela quando o mesmo se situa em 1554 nm. Numa primeira análise, isto contrariaria o esperado, uma vez que o olho é mais degenerado quando o canal de controle opera em 1557 nm. Porém, uma análise mais detalhada das Figs. 4.13 e 4.14 mostram que a presença das oscilações de relaxação são mais intensas quando o canal de controle está localizado em 1557 nm. Desta forma, mesmo permitindo uma menor penalidade em potência para o canal sobrevivente, o desempenho da transmissão com o canal de controle situado em 1557 nm se torna comprometido pela considerável amplitude das oscilações induzidas na potência do canal sobrevivente.

Dada a importância da alocação do canal de controle para a operação do EDFA-CAGTO, evidenciada pelas medidas anteriores, um segundo experimento sistêmico procurou investigar, mais detalhadamente, o comportamento da penalidade de potência imposta ao canal sobrevivente pelo aumento da proximidade entre o mesmo e o canal de controle. Utilizando-se o mesmo arranjo experimental representado pela Fig. 4.15, as Figs. 4.21 e 4.22 mostram a BER e a potência recebida pelo receptor, respectivamente, em função do comprimento de onda do canal de controle. Neste caso, o comprimento de onda do canal de controle foi variado em passos de 1 nm entre 1532 nm e 1562 nm, cobrindo toda a banda C, enquanto que o nível de potência recebida pelo receptor era ajustado para produzir, quando possível, uma BER de 10^{-9} para cada medição.

A Fig. 4.21 mostra que a BER, para o canal sobrevivente, se mantém praticamente em 10^{-9} enquanto o comprimento de onda do canal de controle se localiza abaixo de 1551 nm. Após este comprimento de onda, a BER do canal sobrevivente, amplificado pelo EDFA controlado, se deteriora rapidamente, demonstrando uma perda total de sincronismo quando o canal de controle situa-se entre 1557 nm e 1560 nm, ou seja, comprimentos de onda muito próximos daquele do canal sobrevivente. Este comportamento é causado pela forte influência que o canal de controle passa a ter no mecanismo de ganho do EDFA, relativo ao

canal sobrevivente, absorvendo portadores que poderiam proporcionar ganho ao canal sobrevivente e provocando oscilações de potência durante os transitórios dos outros canais sendo transmitidos. Para comprimentos de onda acima de 1560 nm, o canal de controle volta a se afastar de forma considerável do canal sobrevivente e a BER volta a cair.

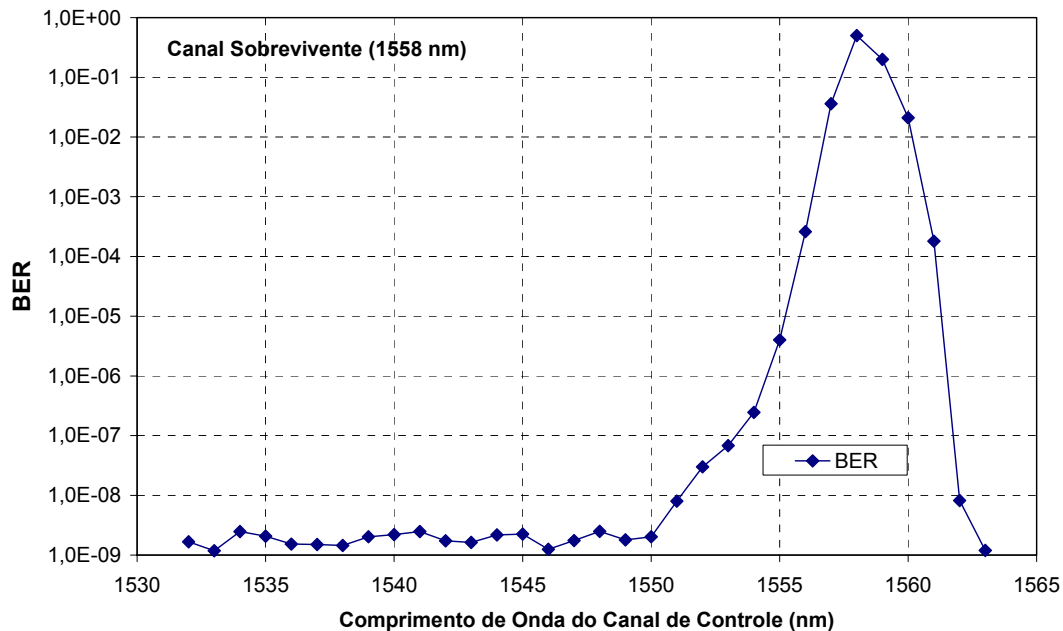


Fig. 4.21: Taxa de erro de bit associada a cada comprimento de onda do canal de controle na banda C, com atenuação da malha de realimentação de 10 dB.

A Fig. 4.22 exibe os níveis de potência no receptor associados às medidas de BER da Fig. 4.21. Como pode ser observado, para comprimentos de onda do canal de controle abaixo de 1550 nm, a inserção de penalidade em potência se mantém inferior a 1 dB. Como esperado, a partir de 1551 nm, a penalidade cresce acentuadamente. Em particular, para comprimentos de onda do canal de controle entre 1555 e 1561 nm, onde as penalidades relativas à ausência de potência e às oscilações de relaxação são máximas, mesmo aumentando-se o nível de potência através da redução da atenuação no atenuador na entrada do receptor (chegando a -9 dBm), a BER continuou sendo degradada com o aumento da proximidade entre o canal de controle e o canal sobrevivente. Ainda analisando as Figs. 4.21 e 4.22, pode-se concluir que isto ocorre devido ao aumento das oscilações,

pois, como se pode verificar quando o canal de controle começa a se distanciar novamente do canal sobrevivente, a taxa de erro volta a melhorar gradativamente.

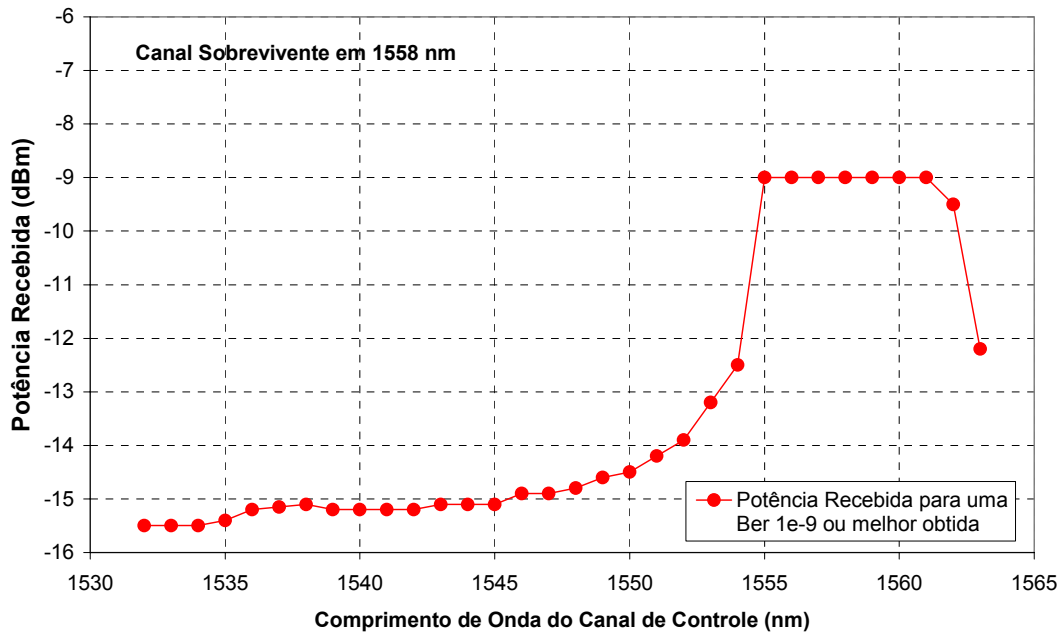


Fig. 4.22: Potência do canal sobrevivente associada a cada comprimento de onda do canal de controle na banda C, com atenuação da malha de realimentação de 10 dB.

Com base nas Figs. 4.21 e 4.22, para o EDFA utilizado e para as condições de realização dos experimentos, pode-se concluir que o canal de controle deve ser alocado a uma distância mínima de 8 nm do canal sobrevivente, garantindo-se, com isto, penalidades inferiores a 1 dB e baixa degradação da BER.

4.3.2 Análise Dinâmica

Considerando-se o arranjo experimental apresentado na Fig. 4.15 e a modulação dos canais mantida em 2,5 Gb/s por canal, primeiramente, com apenas o canal sobrevivente na banda de transmissão, a potência no receptor foi ajustada para manter a BER em 10^{-10} . Após seis medidas de BER, os outros sete canais são inseridos e seis novas medidas de BER para o canal sobrevivente são realizadas. Utilizando este procedimento, é possível quantificar a penalidade introduzida no canal sobrevivente pela adição de canais. As

medições foram repetidas para cada um dos quatro comprimentos de onda do canal de controle sob análise. E mais, assumiram-se condições onde o EDFA controlado operava sem atenuação na realimentação óptica (apenas a atenuação intrínseca do atenuador), com atenuação de 10 dB e sem controle de ganho (atenuação muito alta).

As Figs. 4.23 a 4.26 mostram os resultados obtidos para a análise dinâmica. Nas Figs. 4.23 e 4.24, com o canal de controle em 1534,5 nm e 1547,7 nm, respectivamente, a eficiência do controle de ganho é demonstrada através de situações na qual o EDFA sem controle é comparado ao EDFA com controle, com valores de atenuação da realimentação óptica de 1 dB e 10 dB. Nas Figs. 4.25 e 4.26 com o canal de controle operando em 1554 e 1557 nm, respectivamente, verifica-se que não é possível alinhar a BER em 10^{-10} .

Nas Fig. 4.23 a 4.26, mais particularmente em suas legendas, o termo realimentação óptica foi substituído por *loop*, como na língua inglesa, apenas por questão de otimização de espaço e conseqüente organização na disposição dos resultados mostrados.

Nas Fig. 4.23 e 4.24 se verifica que, sem o controle de ganho, o comportamento do EDFA frente à inserção de sete canais, apresenta uma degradação de aproximadamente 10 ordens de grandeza. Já quando o controle faz-se presente, sob a mesma variação no número de canais na entrada do EDFA, esta degradação na BER é reduzida drasticamente, evidenciando, assim, a eficiência do controle de ganho. Para este último, duas condições de operação foram analisadas, assumindo-se valores de atenuação da realimentação óptica de 1 e 10 dB. Com 1 dB de atenuação, o controle de ganho, em ambas as Figs., demonstra um desempenho satisfatório, permitindo uma variação máxima na taxa de erro de uma ordem de grandeza, quando sete canais são inseridos. Com o valor de atenuação da realimentação óptica ajustada em 10 dB, a BER apresenta uma variação máxima ligeiramente inferior a duas ordens de grandeza. No entanto, nesta situação, o canal de controle apresenta um ganho 6 dB maior que na situação onde se tem 1 dB de atenuação. Esta redução tão drástica no ganho proporcionado ao sinal transmitido (6 dB), frente a uma melhoria menor que uma ordem de grandeza na BER, fortalece o ajuste da atenuação da realimentação em 10 dB como o valor ótimo de atenuação da realimentação óptica para o EDFA-CAGTO desenvolvido.

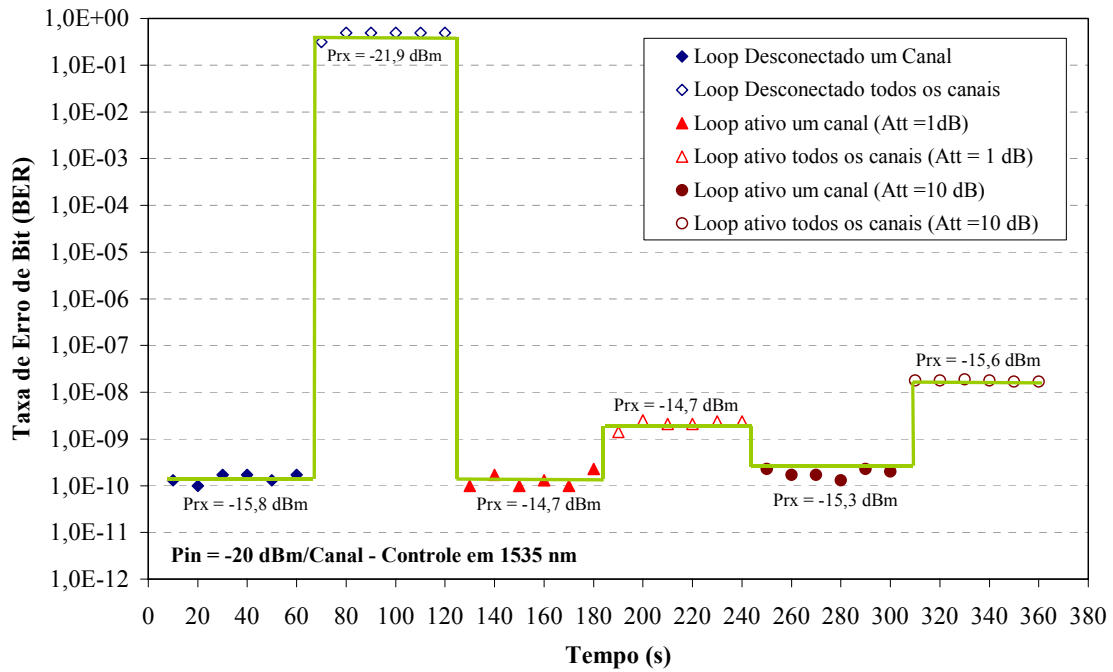


Fig. 4.23: Análise dinâmica da BER com o canal de controle em 1535 nm.

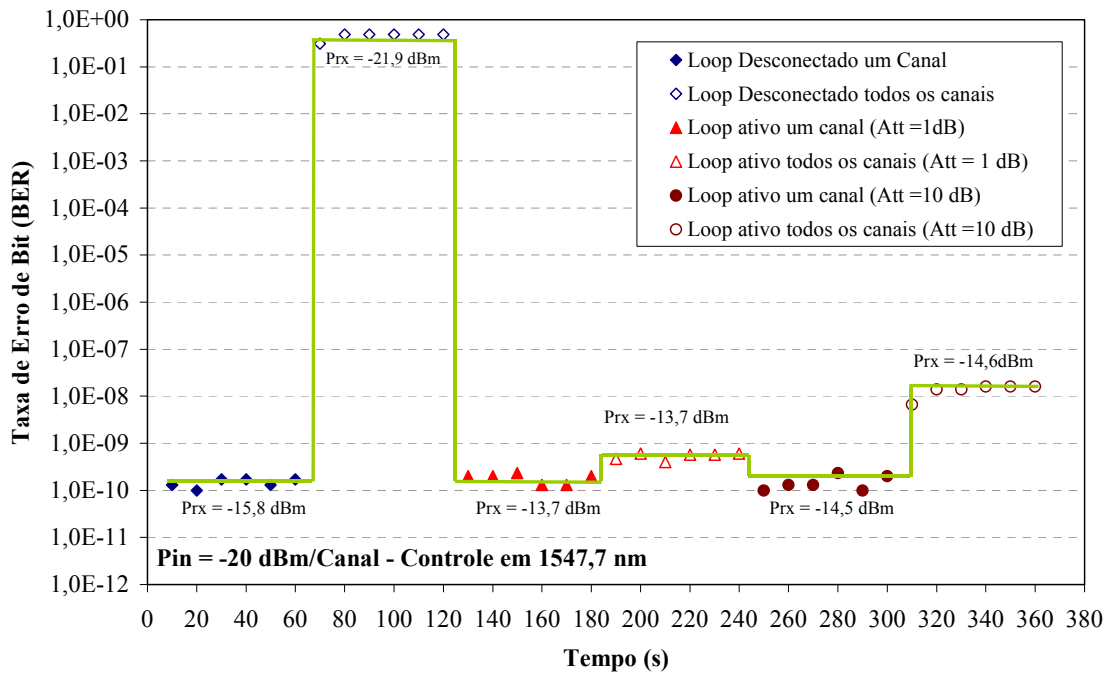


Fig. 4.24: Análise dinâmica da BER com o canal de controle em 1547,7 nm.

Verifica-se, ainda nas Figs. 4.23 e 4.24, que há uma redução na sensibilidade entre estas duas posições do canal de controle. Como se pode observar, para obtenção de uma taxa de erro de 10^{-10} para o EDFA com uma atenuação da realimentação óptica de 10 dB, necessita-se que o canal sobrevivente possua uma potência de -15,3 dBm, com o canal de controle em 1535 nm. Já para o canal de controle em 1547,7 nm, necessita-se de uma potência de -14,5 dBm. Este comportamento representa uma inserção de penalidade de 0,8 dB para o segundo caso, demonstrando a redução na sensibilidade causada pelo aumento da proximidade entre os canais, como também verificado na seção anterior.

Nas Figs. 4.25 e 4.26 a taxa de erro, tomada como referência para a análise dinâmica, não foi possível de ser obtida. Isto se deve ao fato de uma grande penalidade de potência ser imposta ao canal sobrevivente devido ao aumento da aproximação com o canal de controle. Dessa maneira, analisando as Figs. 4.25 e 4.26, conclui-se que a construção de um EDFA-CAGTO com canal de controle nestes respectivos comprimentos de onda (1554 nm e 1557 nm) não é uma solução viável no projeto de um EDFA controlado opticamente. Isto se deve à alta inserção de penalidade em potência e às altas oscilações de potência que aumentam significativamente com o aumento da proximidade entre o canal de controle e o canal sobrevivente.

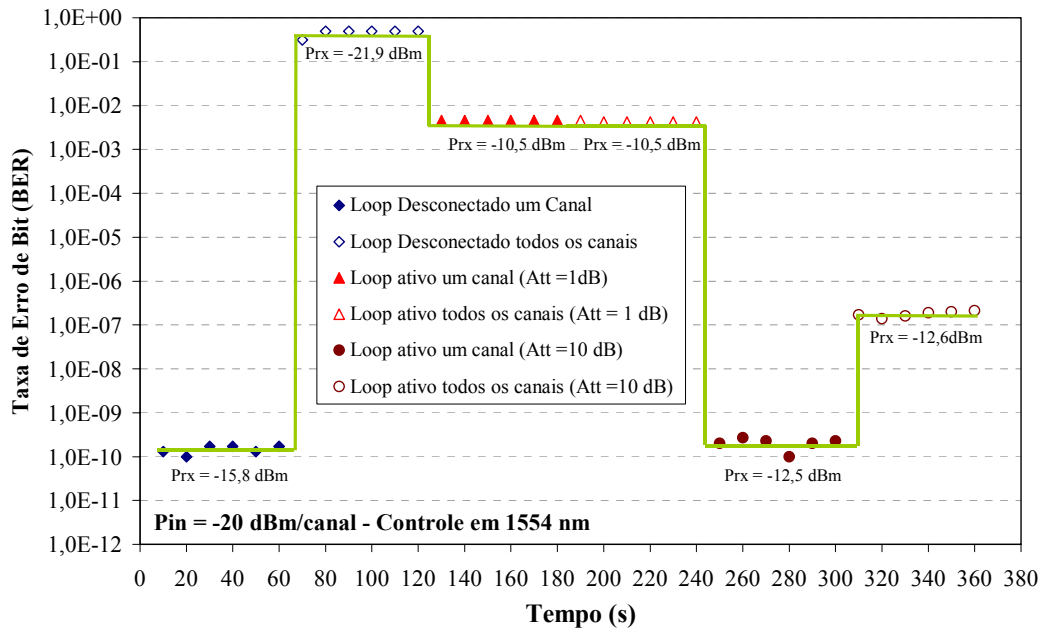


Fig. 4.25: Análise dinâmica da BER com o canal de controle em 1554 nm.

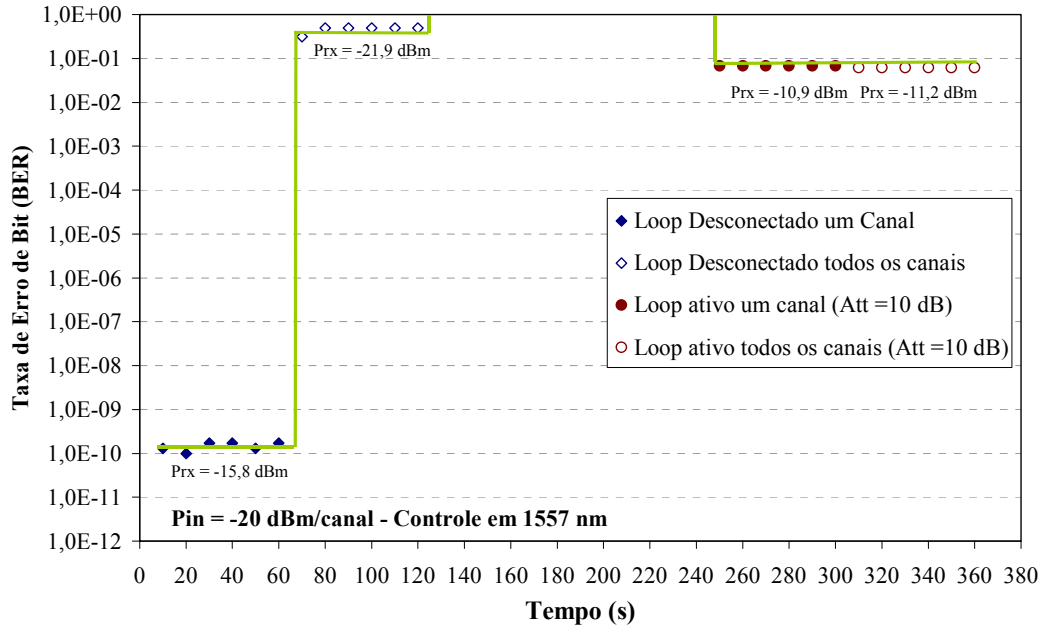


Fig. 4.26: Análise dinâmica da BER com o canal de controle em 1558 nm.

Na Fig 4.25 a taxa de erro de 10^{-10} não foi possível de ser obtida com a atenuação da realimentação ótica em 1 dB, no entanto, esta taxa foi obtida com a atenuação da realimentação ótica em 10 dB, devido a este valor de atenuação da realimentação ótica proporcionar um ganho ao canal sobrevivente 6 dB superior àquele obtido com uma atenuação de 1 dB. Mesmo com 10 dB de atenuação da realimentação ótica, foi observada uma variação de três ordens de grandeza na BER do canal sobrevivente, quando da inserção de sete canais na entrada do EDFA

Como resultado da análise dinâmica, verifica-se que, com o canal de controle nos comprimentos de onda de 1535 nm e 1547,7 nm, as penalidades em termos de BER, para o canal sobrevivente em 1558,5 nm, são bem inferiores às outras duas posições onde o canal de controle foi alocado. No entanto, com o canal de controle em 1547,7 nm o sistema tem sua sensibilidade penalizada em 0,8 dB em relação ao canal de controle em 1535 nm. Além do fato que, com o controle em 1535nm, os canais transmitidos podem ser alocados a partir de 1543 nm, garantindo assim uma penalidade inferior a 1 dB e sem degradação da relação sinal ruído, fato este muito significativo, pois a região a partir de 1543 nm é a região mais plana da banda de amplificação do EDFA, sendo, por este motivo, a região mais utilizada

em sistemas WDM com muitos canais. Como conclusão da análise sistêmica, a alocação do canal de controle em 1535 nm apresenta-se como a melhor opção no projeto de um EDFA com controle automático de ganho totalmente óptico baseado na realimentação óptica.

4.4 Conclusões da Análise Experimental

Observou-se que a utilização de um EDFA em sistemas multicanal, com inserção e remoção de canais, pode se tornar problemática se um controle de ganho não é exercido. Ao se empregar a técnica de controle automático de ganho totalmente óptico, um cuidado especial deve ser tomado no ajuste do valor da atenuação da realimentação óptica, uma vez que este parâmetro regula a potência óptica do canal de controle e, portanto, a eficiência do controle. Além disso, um cuidado especial também deve ser tomado na escolha do comprimento de onda do canal de controle, pois, de acordo com sua alocação, o EDFA apresenta diferentes comportamentos provocados pelos efeitos de SHB e oscilações de relaxação, que levam a variação do nível absoluto de potência de saída do EDFA (e, conseqüentemente, variações no ganho) além de oscilações durante os transientes. Como resultado, verificou-se que a qualidade do controle aumentava para níveis menores de atenuação, porém, à custa da diminuição do ganho do amplificador. Se o impacto sistêmico é também levado em consideração, observa-se que a degradação da BER do sistema WDM analisado, pode ser mantido dentro de níveis aceitáveis se os valores de atenuação e a alocação do canal de controle forem corretamente projetados. Portanto, o projeto de um EDFA-CAGTO irá exigir um compromisso entre a qualidade de controle com baixa degradação sistêmica e o valor do ganho do EDFA por canal.

O EDFA com controle automático de ganho totalmente óptico desenvolvido neste trabalho classifica-se como um amplificador de linha, trabalhando com níveis de potência de entrada menores que -11 dBm de potência total. O projeto final do EDFA teve como valor de atenuação da realimentação óptica, a atenuação de 10 dB. Para este valor de atenuação o EDFA apresenta ganho de 22,5 dB independente do número de canais e uma variação máxima de ganho de 0,45 dB. Quanto ao canal de controle, o resultado da análise dinâmica indicou o comprimento de 1535 nm como a melhor opção para alocação do mesmo. Com o canal de controle alocado em 1535 nm, e a atenuação da realimentação óptica ajustada em 10 dB, a variação máxima de ganho representa uma degradação máxima

da BER inferior a duas ordens de grandeza, quando sete de oito canais a -20 dBm/canal são retirados ou inseridos da entrada do EDFA.

Capítulo 5

Conclusão

Este trabalho apresentou uma análise experimental do comportamento do EDFA submetido à técnica de controle de ganho totalmente óptica. O objetivo deste estudo foi o de observar o desempenho do amplificador controlado sob diversas condições de operação, inclusive àquela que se assemelha à de uma rede óptica WDM, e traçar diretrizes que permitam, a partir de ajustes em parâmetros do amplificador controlado, especificamente o comprimento de onda do canal de controle e a atenuação da realimentação óptica, um projeto eficiente para o EDFA-CAGTO.

Uma introdução sobre redes ópticas com roteamento de comprimentos de onda, a teoria básica relativa aos EDFAs, os efeitos dinâmicos causados pelo uso dos EDFAs em redes ópticas, assim como a modelagem da resposta dinâmica dos EDFAs, foram discutidas no Capítulo 2. No Capítulo 3, o estado da arte das técnicas de controle automático de ganho para EDFAs foi apresentado. Diversas técnicas de controle de ganho de EDFAs e exemplos de aplicação foram introduzidas, onde se procurou analisar as vantagens e desvantagens de cada uma delas. Através deste estudo, se identificou o potencial da técnica totalmente óptica baseada na realimentação óptica, assim como as possibilidades de melhoria nas limitações desta técnica através da otimização dos parâmetros fundamentais para o seu funcionamento (atenuação da realimentação óptica e alocação do canal de controle).

As análises e os resultados experimentais obtidos encontram-se no Capítulo 4. O estudo experimental apresentado neste trabalho baseou-se em identificar e analisar o impacto causado pelos principais parâmetros que influenciam o desempenho da técnica de controle de um EDFA, sendo ao mesmo incorporada a técnica de controle de ganho a partir de uma realimentação óptica. Das análises conduzidas para o EDFA submetido à técnica de

controle automático de ganho totalmente óptico, identificou-se a importância fundamental que os dois parâmetros, atenuação da realimentação óptica e alocação do canal de controle, têm no desempenho do controle de ganho totalmente óptico. Durante o Capítulo 4, a influência destes parâmetros no desempenho do EDFA são analisadas de maneira a sugerir um procedimento capaz de otimizar a escolha dos mesmos.

O arranjo experimental proposto é capaz de propiciar condições onde a potência de entrada do EDFA é bruscamente variada. Este comportamento é semelhante à retirada de canais em redes WDM com roteamento de comprimento de onda. Para o sistema WDM proposto, um canal era sempre mantido na banda de amplificação do EDFA (canal sobrevivente), canal este que serve de referência para análise dos efeitos causados pela variação da potência na entrada do EDFA e pelas diferentes condições de operação do controle de ganho do amplificador.

Primeiramente, analisou-se a influência da atenuação da realimentação óptica no desempenho do controle automático de ganho do EDFA. Verificou-se que este parâmetro, além de ser responsável pela formação do canal de controle, também é responsável pela eficiência do controle automático de ganho. Desta maneira, a atenuação do canal de controle torna-se responsável pelo ganho proporcionado pelo EDFA aos canais transmitidos, assim como, pela variação do ganho à qual é submetido o canal transmitido após variações na potência de entrada do EDFA. Os resultados obtidos mostraram que, para altos valores de atenuação da realimentação óptica, o canal de controle é impossibilitado de se formar. Sob estas condições o EDFA exibe elevadas e inaceitáveis variações de ganho. Para baixos valores de atenuação da realimentação óptica, o EDFA controlado mostrou não possuir variação alguma de ganho mesmo frente a variações na potência de entrada do EDFA. Porém, com a diminuição da atenuação da realimentação óptica, o ganho do EDFA se torna consideravelmente suprimido, devido ao alto ganho fornecido ao canal de controle. Dessa maneira, a escolha do valor ótimo de atenuação da realimentação óptica dependerá das características de ganho e variação de ganho aceitável para cada aplicação. Através das análises do comportamento do ganho, da variação de ganho e do impacto sistêmico causado pelas variações de ganho, em relação à atenuação da realimentação óptica, torna-se possível, para as condições de operação do sistema realizar adequadamente a escolha do nível de atenuação ao qual deve ser submetido o canal de controle na realimentação óptica.

No EDFA-CAGTO projetado, verificou-se que para o valor de atenuação da realimentação óptica de 10 dB, o desempenho do EDFA mostrou-se satisfatório, apresentando um ganho por canal de aproximadamente 22,5 dB (oito canais), com uma variação máxima de ganho de 0,4 dB.

A influência da alocação do canal de controle também foi analisada. Os resultados mostram que, quanto menor a distância entre canal de controle e o canal sobrevivente, maiores são as oscilações de potência durante os transientes, ao mesmo tempo em que maiores são as penalidades de potência sobre o canal sobrevivente. Além disto, verificou-se que o aumento da proximidade entre estes canais também aumenta a duração das oscilações provocadas, aumentando assim a duração dos transientes. Com base nas diversas análises relativas à alocação do canal de controle apresentadas no Capítulo 4, conclui-se que o canal de controle deve ser posicionado a, no mínimo, 8 nm de distância do canal sobrevivente mais próximo, para evitar penalidades significativas ocasionadas pela alocação do canal de controle. Dessa maneira, com base nos experimentos realizados, e assumindo-se EDFAs classificados como de linha, operando na banda C (1530-1560 nm), o melhor comprimento de onda para alocação do canal de controle situa-se em 1535 nm. Neste comprimento é possível se obter níveis adequados de ganho com os canais transmitidos na região plana do EDFA, entre 1540 a 1558 nm.

Considerando-se o EDFA ao qual foi aplicada a técnica de controle automático de ganho totalmente óptico, conclui-se que este EDFA possui as características necessárias para sua utilização, como amplificador de linha ou pré-amplificador em redes ópticas, sendo capaz de prover ganho praticamente constante, independente do seu nível de potência de entrada.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se a análise experimental procurando a otimização dos parâmetros fundamentais na utilização do controle automático de ganho totalmente óptico associado à técnica de controle eletrônico (controle híbrido). Acredita-se que se utilizando uma estrutura adequada, pode-se unir as potencialidades que cada uma destas técnicas proporciona para o controle de ganho de EDFAs reduzindo, principalmente, o impacto das oscilações de relaxação e mantendo-se a simplicidade estrutural do circuito de controle. Além disto, a técnica híbrida poderia permitir qualquer nível de potência de

entrada, habilitando o EDFA controlado a operar como amplificador de potência, amplificador de linha ou pré-amplificador.

Referências Bibliográficas

- [1] Q. Yu, C. Fan, “Simple dynamic model of all-optical gain-clamped erbium-doped fiber amplifiers”, *IEEE J. of Lightwave Technol.*, vol. 17, no. 7, pp. 1166-1171, 1999.
- [2] 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.
- [3] N. Takahashi, T. Hirono, H. Akashi, S. Takahashi e T. Sasaki, “An output power stabilized Erbium-Doped fiber amplifier with automatic gain control”, *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 3, no. 4, pp. 1019-1026, 1997.
- [4] 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 constituting resonant cavity”, *Electron. Lett.*, vol. 34, no. 10, 1998.
- [5] M. Fukutoku e M. Jinno, “Pump power reduction of optical feedback controlled EDFA using electrical feedforward control”, em *Proc. of Optical Amplifiers and their Applications*, pp. 32-35, 1998, Colorado, Canadá.
- [6] C. Dimopoulos, “Study of dynamic phenomena in WDM optical fiber links and networks based on EDFA”, PHD thesis, University of Essex, Inglaterra, 2001.
- [7] Y. Sun, A. K. Srivastava, J. Zhou e J. Sulhoff, “Optical amplifiers for WDM optical networks”, *Bell Labs. Technical Journal*, pp. 187-206, January-March 1999.
- [8] J. P. Ryan, “ WDM: North America deployment trends”, *IEEE Communications Magazine*, vol. 36, no. 2, pp. 40-44, 1998.

- [9] N. A. Jackman S. H. Patel, B. P. Mikkelsen e S. Korotky, "Optical cross connects for optical networking", *Bell Labs Technical Journal*, pp. 262-281, January-March 1999.
- [10] P.E. Green Jr., "Optical networking update", *IEEE J. Select. Areas in Commun*, Vol. 14, no. 5, pp. 764-779, June 1996.
- [11] H. Kobrisnki e D. Zuckermann, "Applications of automated cross-connection in the optical layer", em *Proc. ECOC '98*, 1999, Vol. I, pp. 64-65, Madrid, Espanha.
- [12] M. Sotom e H. Fevrier, "From point-to-point WDM transmission to the WDM photonic layer", Tutorial *ECOC '96*, vol. 6, Oslo, Norway, 1996.
- [13] L. Gillner, "Transmission limitations in all-optical network", em *Proc. ECOC'96*, paper WeB.2.2, Oslo, Norway, 1996.
- [14] M. J. O'Mahony, D. Simeonidou, A. Yu e J. Zhou, "The design of an European optical network", *J. Lightwave Technol.*, vol. 13, no.5, pp.817-828 1995.
- [15] A. L. Schawlow e C. H. Townes, "Infrared and optical masers," *Physical Review*, vol. 112, pp. 1940-1949, 1958.
- [16] C. J. Koester e E. A. Snitzer, "Amplification in a fiber laser", *Applied Optics*, vol. 3, no. 10, pp. 1182, 1964.
- [17] R. J. Mears, L. Reekie, I. M. Jauncey e D.N Payne, "Low-noise erbium doped fibre amplifier operating at 1.54 μ m", *Electron. Lett*, vol. 23,no.19, pp. 1024-1028, 1987.
- [18] E. Desurvire, J. R. Simpson e P. C. Becker, "High gain erbium-doped travelling wave fiber amplifier", *Op. Let.*, vol.12, no.11, pp. 888-890, 1987.
- [19] A. Marthur, M. Ziari e V. Dminic, "Record 1 Watt fiber-coupled-power 1480 nm diode laser pump for Raman and Erbium doped fibre amplification", em *Proc. OFC 2000*, paper PD-15, Baltimore, EUA, 1999.
- [20] T. Tehara, T. Hoshida, J. Kumasako e H. Onaka, "128x10.66 Gbit/s transmission over 840-km standard SMF with 140-km optical repeater spacing employing dual band distributed raman amplification", em *Proc. OFC 2000*, paper PD-28, Baltimore, EUA, 1999.
-

- [21] G.P. Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems*, 1st ed., Ed. New York: J. Wiley&Sons, 1992.
- [22] E. Desurvire, *Erbium-Doped Fiber Amplifiers - Principles and Applications*, 1st ed., Ed.: John Wiley & Sons, Nova Iorque, EUA, 1994.
- [23] S. Milo, *Análise de Desempenho de Topologias de Amplificadores Ópticos a Fibra Dopada com Érbio*, dissertação de mestrado, DMO/FEEC/UNICAMP, Campinas, SP, 2003.
- [24] P. C. Becker, N. A. Olsson e J. R. Simpson, *Erbium-Doped Fiber Amplifiers – Fundamentals and Technology*, 1st ed., Academic Press, EUA, 1999.
- [25] 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.
- [26] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, 2nd. ed., Academic Press, San Diego, CA, 1995.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] A. Bjarklev, *Optical Fiber Amplifiers: Design and System Applications*, 1st. ed., Artech House, EUA, 1993.
- [30] E. Desurvire, “Analysis of transient gain saturation and recovery in erbium-doped fiber amplifiers”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 1, no. 8, pp. 196-199, 1989.
- [31] C. R. Giles e E. Desurvire, “Transient gain and crosstalk in erbium-doped fibre amplifiers”, *Op. Let.*, Vol. 14, no. 16, pp. 880-882, 1989.
- [32] Y. Sun e A. K. Srivastava, “Dynamic effects in optically amplified networks”, em *Proc. Conference on Optical Amplifiers and their Applications*, OAA '97, pp. 44-47, 1997.
-

- [33] Y. Maigran, J. F. Marcerou, J. P. Blondel, J. Hervo e V. Lattelier, "Analysis of a cascaded EDFA link time behaviour", em *Proceedings ECOC*, paper WeP2, 1992.
- [34] Y. Sun, A. K. Srivastava, J. L. Zyskind, J. W. Sulhof, C. Wolf e R.W. Tkach, "Fast power transients in WDM optical networks with cascaded EDFAs", *Electron. Lett*, Vol.33, no. 4, pp. 313-314, 1997.
- [35] A. Lord, "Design of wavelength branching units in long haul WDM networks" em *Proc. NOC'97*, Core and ATM Networks, pp. 81- 87, IOS Press 1997.
- [36] F. Forghieri, R. W. Tkach e A. R. Chraplyvy, "Fiber nonlinearities and their impact on transmission systems", em *Proc. Optical Fiber Telecommunications IIIB*, Academic Press, 1997.
- [37] Claudio Mazalli, "Solitons Ópticos: O que são para que servem", relatório técnico, *Corning Incorporated*.
- [38] M. Eiselt, "The impact of the nonlinear fiber effects on fibre choice for ultimate transmission capacity", em *Proc. OFC'2000*, paper TuD5, Baltimore, EUA, 2000.
- [39] Y. Sun, G. Luo, J. L. Zyskind, A. A. M Saleh, A.K. Srivastava e J.W. Sulhoff, "Model for gain dynamics in erbium-doped fibre amplifiers", *Electron. Lett*, vol 32, no. 16, pp 1490-1491, 1996.
- [40] Y. Sun, J. L. Zyskind e A.K. Srivastava, "Average inversion level, modelling, and physics of erbium doped fiber amplifiers", *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.*, Vol. 3, pp. 991-1007, August 1997.
- [41] T. Georges e E. Delevaque, "Analytic modelling of high gain erbium-doped fibre amplifiers", *Op. Let.*, Vol.17, no. 16, pp.1113-1115, 1992.
- [42] C. R. Giles e E. Desurvire, "Propagation of signal and noise in concatenated erbium-doped fibre amplifiers", *J. Lightwave Technol.*, vol. 9, no. 2, pp. 147-154, February 1991.
- [43] A. A. Saleh, R. M. Jopson, J. D. Evankow e J. Aspell, "Modelling of gain in erbium-doped fibre amplifiers", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 2, no. 10, pp. 714-717, 1990.
- [44] A. Bonomi e L. A. Rusch, "Doped-Fiber amplifier dynamics: A system perspective", *J. Lightwave Technol.*, Vol. 16, no. 6, pp. 945-956, May 1998.
-

- [45] 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.
- [46] 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.
- [47] 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.
- [48] 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," in Proc. OFC'97, pp.130-131, paper WF4, 1997.
- [49] 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, 1997.
- [50] 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.
- [51] 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.
- [52] E. Develaque, T. Georges, J. F. Bayon, M. Monerie, P. Niay e P. Bernage, "Gain control in erbium doped fibre amplifiers by lasing at 1480nm with photoinduced bragg gratings written on fibre ends", *Electron. Lett.*, vol. 29, no. 12, 1993.
- [53] A. Liu e M. J. O'Mahony, "Properties of gain controlled erbium doped fibre amplifiers by lasing," *Electron. Lett.*, vol. 31, no.16, 1995.
- [54] 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, July 2000.
-

- [55] H. Feng, E. Patzak e J. Saniter, "Methods for stabilizing the gain of EDFAs in burst switching optical networks", *Photonic Network Communications*, vol 4, no. 2, pp. 151-166, 2002.
- [56] 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, August 1997.
- [57] J. L. Zyskind, Y. Sun, A. K. Srisvastava, J. W. Sulhoff, A. J. Lucero, C. Wolf, e R. W. Tkach, "Fast power transients in optically amplified multiwavelength networks", em *Proc. OFC'96*, PD 31-1, 1996.
- [58] D. H. Richards, J. L. Jackel e M. A. Ali, "Multichannel EDFA chain control: A comparison of two all-optical approaches", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 10, no. 1, pp. 156-158, 1998.
- [59] 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, 1997.
- [60] 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.
- [61] S. Y. Park, H. K. Kim, D.H. Lee e S-Y. Shin, "Feasibility demonstration of 10 Gbit/s channel WDM network using dynamic gain-controlled EDFAs," *Electron. Lett.*, vol. 34, no. 5, 1998.
- [62] 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 *Proc. OFC'97*, pp.134-135, paper WF7, 1997.
- [63] K. Jones, B. Flintham, J. Drake e H. Lebreton, "Gain control and transient suppression in long wavelength band EDFA modules", em *Proc. ECOC'99*, pp. 152-153, 1999.
- [64] 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.
-

[65] 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, 2002.

[66] 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.