

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

Análise de Desempenho de Topologias de Amplificadores Ópticos a Fibra Dopada com Érbio

Sérgio Milo

Orientador: Aldário Chrestani Bordonalli (FEEC)

Composição da Banca Examinadora:

Prof. Dr. Aldário Chrestani Bordonalli – FEEC/UNICAMP-Presidente Prof. Dr. Amílcar Careli Cesar – EESC/USP – São Carlos Prof. Dr. Evandro Conforti – FEEC/UNICAMP

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

Campinas, fevereiro de 2003

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

Milo, Sérgio

M637a Análise de desempenho de topologias de amplificadores ópticos a fibra dopada com érbio / Aldário Chrestani Bordonalli.--Campinas, SP: [s.n.], 2003.

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

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

RESUMO

O trabalho apresenta um estudo do amplificador a fibra dopada com érbio, que verifica os fundamentos de seu funcionamento e realiza análises de suas diferentes configurações, para dois tipos distintos de bombeio. Com o intuito de se otimizar o seu desempenho e de uma maneira geral, estas configurações são obtidas a partir da configuração convencional do amplificador, com inserções de dispositivos passivos e ativos, tais como espelhos, circuladores e filtros, entre outros. Utilizando-se os fundamentos teóricos do amplificador, estas configurações foram modeladas e simuladas. Por exemplo, como resultado das simulações, observa-se um aumento no ganho de sinal em relação aos resultados para o amplificador convencional. Além disto, para uma dada configuração, realizaram-se comparações de desempenho para bombeios em 980 nm e 1480 nm. Além do ganho de sinal, outros parâmetros, como absorção de bombeio, ruído de emissão espontânea e figura de ruído, entre outros, são apresentados. As simulações foram realizadas utilizando-se os dados característicos de uma fibra dopada comercial.

ABSTRACT

In this work, a theoretical study of the erbium doped fiber amplifier is presented. This study introduces the fundamentals of the optical amplification using erbium-doped fibers and analyzes different amplifier topologies, considering two distinct pumping laser wavelengths. Generally, these different topologies are devised from a basic amplifier configuration by the insertion of passive and/or active optical components, and are developed to improve specific amplifier operational characteristics. By using the amplifier theory, these topologies were modeled and simulated. For instance, as a result from the simulations, it is possible to observe that the amplifier gain increases for all investigated topologies in relation to that of the conventional amplifier. Furthermore, for a giving amplifier topology, performance comparisons were obtained for laser pumping at 980 and 1480 nm. Other amplifier operational characteristics, such as pumping absorption, amplified spontaneous emission, and noise figure, among others, are also analyzed. All simulations were carried out using parameters from a commercial erbium-doped fiber.

Dedico este trabalho a Terezinha e Mário, os meus pais. À minha mãe, uma predestinada, que todos estes anos me orientou, mostrando-me sempre o caminho do trabalho e da perseverança. Ao meu pai, que continua vivo na minha memória, que me deixou a vontade de melhorar no que for possível e passar pelas dificuldades sem me deixar entristecer. Dedico este trabalho também aos meus irmãos Regina, Silvia, Marinho, Adriana e Renata.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, sem Quem seria impossível a realização deste trabalho.

Eu gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos ao orientador, Professor Aldário Chrestani Bordonalli, que confiou neste trabalho desde o início, pelo seu total apoio, confiança, amizade e objetividade com que o conduziu.

Agradecimentos também à Fundação Centro de Pesquisa e Desenvolvimento -CPqD, que, durante o período no qual lá permaneci, apoiou-me e incentivou-me para que eu evoluísse neste trabalho.

À Corning Optical Fiber Incorporation, representada pela pessoa do Dr. Carl E. Crossland, pela doação de 50 metros de fibra óptica dopada com érbio, do tipo Pure Mode Type III, 1550C 3.

Aos amigos do Departamento de Microonda e Óptica, Marcos Sérgio, Socas, Patrocínio, Cezar, Hamilton, e todas as outras pessoas que de alguma maneira contribuíram e estimularam este trabalho.

Aos Professores Rui Fragassi e Evandro Conforti, pela análise do conteúdo do Capítulo 3 e ao Professor Paulo Sakanaka, pelas discussões de programação do software Matemática.

À Márcia Betânia Costa e Silva, pelas discussões de programação e simulações.

Aos amigos Silvio Vezalli e Alceu Marconi, da empresa Redein Telecomunicações Ltda., que me incentivaram muito, principalmente no início deste trabalho.

À Paula Cristiane Secheusk, que sempre me apoiou.

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

Meu muito obrigado e espero poder continuar contando com estas pessoas para trabalhos futuros.

Índice

Capítulo 1 – Introdução1		
Capítulo 2 – Teoria do EDFA	7	
2.1 – Introdução	7	
2.2 – Mecanismo de amplificação do EDFA para sistemas de três níveis e		
dois níveis	7	
2.3 – Características de operação do EDFA em sistemas ópticos	10	
2.4 – Ganho do EDFA	13	
2.5 – Figura de ruído	14	
2.6 – Modelo matemático de níveis de energia para o EDFA	15	
2.7 – Modelo matemático de propagação para o EDFA	23	
2.8 – Conclusão	34	

Capítulo 3 – Configurações de EDFAs35			
3.1 – Introdução	35		
3.2 – Configuração de EDFA com bombeio co-propagante	36		
3.3 – Configuração de EDFA com bombeio contra-propagante	37		
3.4 – Configuração de EDFA com bombeio bidirecional	38		
3.5 – Configuração de EDFAs reflexivos	39		
3.5.1 – EDFAs reflexivo com reflexão de bombeio	40		
3.5.2 – EDFAs reflexivo com reflexão de sinal	41		
3.5.3 – EDFAs reflexivo com reflexão de bombeio e de sinal	42		
3.5.4 – EDFAs reflexivo com reflexão de bombeio e de sinal filtrado	43		
3.6 – Conclusão	45		

4.1 – Introdução	
4.2 – Considerações para as simulações das configurações de EDFA	
4.3 – Amostra de fibra dopada utilizada nas simulações	
4.4 – Simulações preliminares	
4.5 – Simulação do EDFA com bombeio co-propagante	
4.6 – Simulação do EDFA com bombeio contra-poropagante	
4.7 – Simulação do EDFA com bombeio bi-direcional	
4.8 – Simulação do EDFA com reflexão de bombeio	
4.9 – Simulação do EDFA com reflexão de sinal	
4.10 – Simulação do EDFA com reflexões de bombeio e sinal	
4.11 – Simulação do EDFA com reflexões de bombeio e sinal filtrado	
4.12 – Comparação entre as topologias de EDFA analisadas	
4.13 – Resposta espectral do EDFA para a configuração convencional	
4.13.1 – Ganho do EDFA	
4.13.2 – Relação entre o ganho e a potência de entrada do sinal	
4.13.3 – Relação entre o ganho e a potência de entrada do bombeio	
4.13.4 – Relação entre a ASE ⁺ e a potência de entrada do bombeio	
4.14 – Conclusão	

Capítulo 5 – Conclusão	1	11
1		

Lista de Símbolos

Parâmetro	Unidade	Descrição
λ	(nm)	Comprimento de onda
ϕ	(rad)	Coordenada cilíndrica angular
σ'_p	(m ²)	Seção transversal de absorção ESA de bombeio
$ au_{21} = au_2$	(ms)	Tempo de vida de fluorescência do estado metaestável
σ_{a}	(m ²)	Seção transversal de absorção do sinal
$lpha_a$	-	Constante auxiliar da equação (2.52)
$\sigma_{\!e}$	(m ²)	Seção transversal de emissão estimulada do sinal
$lpha_e$	-	Constante auxiliar da equação (2.52)
I_p	(nm)	Comprimento de onda de bombeio
$\sigma_{\!p}$	(m ²)	Seção transversal de absorção GSA de bombeio
$ u_p$	(Hz)	Freqüência do bombeio
$lpha_p$	(m^{-1})	Perda intrínseca do material hospedeiro em λ_p
I_s	(nm)	Comprimento de onda de sinal
\mathcal{U}_{S}	(Hz)	Freqüência do sinal
$lpha_s$	(m^{-1})	Perda intrínseca do material hospedeiro λ_s
η_s	-	Constante auxiliar da equação (2.52)
Δz	(m)	Comprimento incremental de seção da fibra dopada
$\varDelta E$	(J)	Diferença de energia entre níveis da fibra dopada
A	(m ²)	Área do núcleo da fibra dopada
а	(m^{-1})	Parcela do coeficiente de ganho de sinal
$A_2 = A_{21}$	(s^{-1})	Taxa de emissão espontânea total do nível 2
$A_3 = A_{32}$	(s^{-1})	Taxa de emissão espontânea total do nível 3
a_c	(µm)	Raio do núcleo da fibra dopada
A^{NR}_{21}	(s^{-1})	Taxa de emissão espontânea não-radiativa do nível 2 para o nível 1
A^{NR}_{3}	(s^{-1})	Taxas de emissão espontânea não-radiativa do nível 3
A^{NR}_{32}	(s^{-1})	Taxa de emissão espontânea não-radiativa do nível 3 para o nível 2
A^{R}_{21}	(s^{-1})	Taxa de emissão espontânea radiativa de sinal

A^R_{3}	(s^{-1})	Taxa de emissão espontânea radiativa do nível 3
A^{R}_{31}	(s^{-1})	Taxa de emissão espontânea radiativa de bombeio
A^{R}_{32}	(s^{-1})	Taxa de emissão espontânea radiativa do nível 3 para o nível 2
ASE	-	Emissão espontânea amplificada (amplified spontaneous emission)
b	(m^{-1})	Parcela do coeficiente de ganho de sinal
В	(Hz)	Faixa equivalente de emissão espontânea da fibra dopada
С	(m/s)	Velocidade da luz no vácuo
C_{uw}	(m^{-2})	Coeficiente de normalização para a função auxiliar r_n
D	-	Parâmetro fenomenológico da equação (2.44)
Er^{3+}	-	Íon de érbio
ESA	-	Absorção de estado excitado (excited state absorption)
F	-	Figura de ruído
G	-	Ganho ao longo da fibra
GSA	-	Absorção de estado fundamental (ground spontaneous absorption)
g_p	(m^{-1})	Coeficiente de ganho de bombeio
g_s	(m^{-1})	Coeficiente de ganho de sinal
h	(J.s)	Constante de Planck
I^{+}_{ASE}	(W/m^2)	Intensidade do ruído ASE no sentido co-propagante
Γ_{ASE}	(W/m^2)	Intensidade do ruído ASE no sentido contra-propagante
I_p	(W/m^2)	Intensidade de bombeio
I_s	(W/m^2)	Intensidade do sinal
J_n	-	Função de Bessel de primeira espécie de ordem n
k	-	Número total de seções da fibra dopada
K_n	-	Função de Bessel de segunda espécie de ordem n
K_{uw}	(m^{-2})	Coeficiente de normalização para a função auxiliar s_0
L	(m)	Comprimento da fibra dopada
$L_{{\acute o}timo}$	(m)	Comprimento ótimo da fibra dopada
n	-	Número azimutal de bombeio
N_{0}	(m^{-3})	Densidade total de portadores dos íons dopantes
N_l	(m^{-3})	Densidade de portadores dos íons dopantes no nível fundamental
N_2	(m^{-3})	Densidade de portadores dos íons dopantes no nível metaestável
N_3	(m^{-3})	Densidade de portadores dos íons dopantes no nível de bombeio

р	-	Função que descreve a evolução longitudinal do bombeio
P^{+}_{ASE}	(W)	Potência do ruído ASE no sentido co-propagante
P_{ASE}	(W)	Potência do ruído ASE no sentido contra-propagante
per	-	Função perfil de dopagem do núcleo da fibra
p_n	(m^{-2})	Densidade normalizada de energia de bombeio
P_p	(W)	Potência do bombeio
P_s	(W)	Potência do sinal
R_{12}	(s^{-1})	Taxa de absorção de bombeio para sistemas de dois níveis
R_{13}	(s^{-1})	Taxa de absorção de bombeio
R_{31}	(s^{-1})	Taxa de emissão estimulada de bombeio
r_n	(m^{-2})	Função auxiliar da densidade de energia normalizada de bombeio
S	-	Função que descreve a evolução longitudinal do sinal
s_0	(m^{-2})	Densidade normalizada de energia de sinal
SNR	-	Relação sinal-ruído (signal to noise ratio)
u_p	-	Constante de propagação transversal normalizada para o bombeio
u_s	-	Constante de propagação transversal normalizada para o sinal
$V_s(z)$	(W)	Variância da potência do sinal
<i>W</i> ₁₂	(s^{-1})	Taxa de absorção de sinal
W_{21}	(s^{-1})	Taxa de emissão estimulada de sinal
WDM	-	Multiplexação/multiplexador por divisão em comprimento de onda (<i>wavelength division multiplexing/multiplexer</i>)
W_p	-	Constante de propagação transversal normalizada para o bombeio
W_S	-	Constante de propagação transversal normalizada para o sinal
Z	(m)	Coordenada cilíndrica, coincide com o eixo da fibra

Lista de Figuras

- 2.1 Níveis de energia para a fibra dopada com érbio quando o bombeio é de (a) 980 nm (três níveis) e (b) de 1.480 nm (dois níveis).
- 2.2 Comportamento espectral típico do ganho de um EDFA com bombeio de 980 nm.
- 2.3 Diagrama de três níveis para a fibra dopada com érbio, ressaltando as transições relevantes entre os níveis de energia: R se refere ao bombeio, W ao sinal e A às transições espontâneas (radiativas e não radiativas).
- 2.4 Diagrama de dois níveis para a fibra dopada com érbio, ressaltando as transições relevantes entre os níveis de energia: R se refere ao bombeio, W ao sinal e A às transições espontâneas (radiativas e não radiativas).
- 3.1 Diagrama esquemático do EDFA convencional.
- 3.2 Diagrama esquemático do EDFA com bombeio contra-propagante.
- 3.3 Diagrama esquemático do amplificador a fibra com bombeio bi-direcional.
- *3.4 Diagrama esquemático para amplificador reflexivo com reflexão de bombeio.*
- 3.5 Diagrama esquemático para amplificador reflexivo com reflexão de sinal.
- 3.6 Diagrama esquemático para amplificador reflexivo com reflexão de bombeio e sinal.
- 3.7 Diagrama esquemático para amplificador reflexivo com reflexão de bombeio e sinal filtrado.
- 4.1 Modelo incremental para uma fibra dopada de comprimento L.
- 4.2 Parâmetro de emissão em função do comprimento de onda para a amostra de fibra óptica dopada utilizada.
- 4.3 Parâmetro de absorção em função do comprimento de onda para a amostra de fibra óptica dopada utilizada: faixas de (a) 900 a 1.100 nm e (b) 1.450 a 1.700 nm.
- 4.4 Perfil per(r) em função do raio normalizado, tendo α como parâmetro.
- 4.5 Ganho de sinal de um EDFA convencional bombeado com 50 mW em função do comprimento da fibra dopada, tendo a potência de entrada de sinal e o comprimento de onda de bombeio como parâmetros.
- 4.6 Ganho de sinal de um EDFA convencional bombeado com 100 mW em função do comprimento da fibra dopada, tendo a potência de entrada de sinal e o comprimento de onda de bombeio como parâmetros.

- 4.7 Gráficos das evoluções de ganho, bombeio, ASE⁺ e ASE⁻ ao longo de um EDFA convencional (bombeio co-propagante), operando com 50 mW de potência de entrada de bombeio, 1 μW de potência de entrada de sinal e (a) 980 e (b) 1.480 nm de comprimento de onda de bombeio.
- 4.8 Evolução da figura de ruído ao longo de um EDFA com bombeio co-propagante, operando com 50 mW de potência de entrada para o bombeio e 1 μW de potência de entrada para o sinal, para comprimentos de onda de bombeio de (a) 980 e (b) 1.480 nm.
- 4.9 Variação do ganho do sinal com a potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro, para a configuração convencional e bombeio em (a) 980 nm e (b) 1.480 nm.
- 4.10 Gráficos das evoluções de ganho, bombeio, ASE⁺ e ASE⁻ ao longo de um EDFA com bombeio contra-propagante, operando com 50 mW de potência de entrada de bombeio, 1 μW de potência de entrada de sinal e (a) 980 e (b) 1.480 nm de comprimento de onda de bombeio.
- 4.11 Evolução da figura de ruído ao longo de um EDFA com bombeio contra-propagante, operando com 50 mW de potência de entrada de bombeio e 1 μW de potência de entrada de sinal, para comprimentos de onda de bombeio de (a) 980 e (b) 1.480 nm.
- 4.12 Variação do ganho do sinal com a potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro, para um EDFA com bombeio contra-propagante em (a) 980 nm e (b) 1.480 nm.
- 4.13 Gráficos das evoluções de ganho, bombeio, ASE⁺ e ASE⁻ ao longo de um EDFA com bombeio bi-direcional, operando com 50 mW de potência de entrada de bombeio, 1 μW de potência de entrada de sinal e (a) 980 e (b) 1.480 nm de comprimento de onda de bombeio.
- 4.14 Evolução da figura de ruído ao longo de um EDFA com bombeio bi-direcional, operando com 50 mW de potência de entrada de bombeio e 1 μW de potência de entrada de sinal, para comprimentos de onda de bombeio de (a) 980 e (b) 1.480 nm.
- 4.15 Variação do ganho do sinal com a potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro, para um EDFA com bombeio bi-direcional em (a) 980 nm e (b) 1.480 nm.

- 4.16 Gráficos das evoluções de ganho, bombeio, ASE⁺ e ASE⁻ ao longo de um EDFA com reflexão de bombeio, operando com 50 mW de potência de entrada de bombeio, 1 μW de potência de entrada de sinal e (a) 980 e (b) 1.480 nm de comprimento de onda de bombeio.
- 4.17 Evolução da figura de ruído ao longo de um EDFA com reflexão de bombeio, operando com 50 mW de potência de entrada de bombeio e 1 μW de potência de entrada de sinal, para comprimentos de onda de bombeio de (a) 980 e (b) 1.480 nm.
- 4.18 Variação do ganho do sinal com a potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro, para um EDFA com reflexão de bombeio em (a) 980 nm e (b) 1.480 nm.
- 4.19 Gráficos das evoluções de ganho, bombeio, ASE⁺ e ASE⁻ ao longo de um EDFA com reflexão de sinal, operando com 50 mW de potência de entrada de bombeio, 1 μW de potência de entrada de sinal e (a) 980 e (b) 1.480 nm de comprimento de onda de bombeio.
- 4.20 Evolução da figura de ruído ao longo de um EDFA com reflexão de sinal, operando com 50 mW de potência de entrada de bombeio e 1 μW de potência de entrada de sinal, para comprimentos de onda de bombeio de (a) 980 e (b) 1.480 nm.
- 4.21 Variação do ganho do sinal com a potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro, para um EDFA com reflexão de sinal operando com bombeio em (a) 980 nm e (b) 1.480 nm.
- 4.22 Gráficos das evoluções de ganho, bombeio, ASE⁺ e ASE⁻ ao longo de um EDFA com reflexões de bombeio e sinal, operando com 50 mW de potência de entrada de bombeio, 1 μW de potência de entrada de sinal e (a) 980 e (b) 1.480 nm de comprimento de onda de bombeio.
- 4.23 Evolução da figura de ruído ao longo de um EDFA com reflexões de bombeio e sinal, operando com 50 mW de potência de entrada de bombeio e 1 μW de potência de entrada de sinal, para comprimentos de onda de bombeio de (a) 980 e (b) 1.480 nm.
- 4.24 Variação do ganho do sinal com a potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro, para um EDFA com reflexões de bombeio e sinal operando com bombeio em (a) 980 nm e (b) 1.480 nm.

- 4.25 Gráficos das evoluções de ganho, bombeio, ASE⁺ e ASE⁻ ao longo de um EDFA com reflexões de bombeio e sinal filtrado, operando com 50 mW de potência de entrada de bombeio, 1 μW de potência de entrada de sinal e (a) 980 e (b) 1.480 nm de comprimento de onda de bombeio.
- 4.26 Evolução da figura de ruído ao longo de um EDFA com reflexões de bombeio e sinal filtrado, operando com 50 mW de potência de entrada de bombeio e 1 μW de potência de entrada de sinal, para comprimentos de onda de bombeio de (a) 980 e (b) 1.480 nm.
- 4.27 Variação do ganho do sinal com a potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro, para um EDFA com reflexões de bombeio e sinal filtrado operando com bombeio em (a) 980 nm e (b) 1.480 nm.
- 4.28 Comportamento do ganho do sinal para diferentes topologias de EDFA operando com bombeio em (a) 980 nm e (b) 1.480 nm, assumindo-se a potência de entrada do sinal de -30 dBm .
- 4.29 Comportamento da figura de ruído para diferentes topologias de EDFA operando com bombeio em (a) 980 nm e (b) 1.480 nm, assumindo-se a potência de entrada do sinal de -30 dBm .
- 4.30 Característica espectral do ganho de um EDFA com bombeio co-propagante em 980 nm, operando com uma potência de entrada para o sinal de 1 μW, potência para o bombeio de 50 mW e um comprimento total de fibra de 7 metros.
- 4.31 Característica espectral do ganho de um EDFA com bombeio co-propagante em 980 nm, operando com uma potência para o bombeio de 50 mW e um comprimento total de fibra de 7 metros, tendo a potência de entrada do sinal como parâmetro.
- 4.32 Característica espectral do ganho de um EDFA com bombeio co-propagante em 980 nm, operando com uma potência de entrada para o sinal de -30 dBm e um comprimento total de fibra de 7 metros, tendo a potência de bombeio como parâmetro.
- 4.33 Característica espectral da ASE⁺ de um EDFA com bombeio co-propagante em 980 nm, operando com uma potência de entrada para o sinal de -30 dBm e um comprimento total de fibra de 7 metros, tendo a potência de bombeio como parâmetro.

Lista de Tabelas

- 4.1 Parâmetros da fibra utilizada nas simulações de topologias de EDFA.
- 4.2 Diferentes configurações para o EDFA.
- 5.1 Resultados para os principais parâmetros obtidos a partir das simulações das diferentes configurações analisadas no Capítulo 4.

Capítulo 1 Introdução

Nos dias de hoje, é comum encontrarem-se sistemas de comunicação que utilizam fibras ópticas em sua topologia [1-3]. A razão para isto se encontra nas vantagens que as fibras podem trazer ao sistema, como, por exemplo, ampla largura de banda disponível para transmissão, baixas perdas, baixa distorção, segurança, imunidade eletromagnética, entre outras. Entretanto, foi apenas após o advento dos amplificadores ópticos empregando fibras ópticas dopadas com elementos das terras-raras [4-5] que sistemas com alta capacidade de transmissão de informações puderam se tornar realidades comerciais [6].

No início, os sistemas ópticos utilizavam repetidores eletrônicos, que recuperavam, após uma determinada distância da fonte, a forma e a amplitude dos sinais transmitidos. O processo de funcionamento destes repetidores consistia em converter o sinal do domínio óptico para o eletrônico, onde ele era amplificado e reformatado, e do domínio eletrônico para o óptico, onde o sinal eletrônico gerado após a recuperação do sinal óptico inicial modulava direta ou indiretamente a luz de um laser semicondutor de saída. De uma maneira técnica, o repetidor era eficiente, pois conseguia recuperar satisfatoriamente o sinal e aumentar a distância dos enlaces ópticos. Contudo, a complexidade dos circuitos optoeletrônicos do repetidor, particularmente daqueles projetados para a recuperação de sinais ópticos modulados digitalmente em altas taxas, fazia que o custo final dos repetidores se tornasse muito alto, de forma a inviabilizar a transmissão de mais de um canal óptico (comprimento de onda) por fibra.

Com a melhoria dos processos de fabricação da fibra, que minimizaram a sua dispersão intrínseca, e com, principalmente, o aparecimento dos amplificadores ópticos a fibra dopada com érbio (erbium doped fiber amplifier – EDFA), a transmissão multicanal por uma única fibra óptica tornou-se técnica e economicamente viável. Em vista disso, e com a baixa dispersão, o processamento do sinal ficou resumido à sua amplificação, que pode, agora, ser realizada totalmente no próprio domínio óptico, descartando-se a necessidade de repetidores regenerativos. Além disto, os EDFAs tem a capacidade de realizar a amplificação simultânea de vários canais modulados ou chaveados com mínima interferência entre eles, em uma ampla banda de comprimentos de onda em torno de 1.550 nm (cerca de 35 nm). Desta forma, na transmissão óptica multicanal, onde se adota a tecnologia de multiplexação por divisão em comprimento de onda (wavelength division *multiplexing* - WDM), cada canal pode ser amplificado com o mínimo de intermodulação, e utilizar, potencialmente, a ampla banda de transmissão da fibra óptica. Esta prática aumenta a capacidade efetiva de transmissão e diminui o custo por canal, em relação a sistemas com repetidores. Em média, o limite de alcance de um enlace óptico que não utiliza amplificadores e opera com taxas de transmissão da ordem de Gb/s é de, aproximadamente, 200 km [6-7]. Desta forma, para redes ópticas de longo alcance, como, por exemplo, enlaces transoceânicos, torna-se imperativa a utilização de amplificadores ópticos.

O EDFA pertence a uma família de amplificadores, obtidos a partir da dopagem de uma fibra óptica com elementos químicos pertencentes ao grupo das "terras-raras". Dentre estes elementos se destaca o érbio em sua forma iônica (Er^{+3}) , sendo, atualmente, o mais utilizado nos amplificadores (1.550 nm). Contudo outros possíveis dopantes, como o praseodímio (usado para amplificação na faixa de 1.300 nm) e o itérbio (usado como codopante junto com o érbio) também estão sendo pesquisados [7-10].

A função de um amplificador óptico em um sistema pode ser subdividida em três tipos, de acordo com a sua localização física: o amplificador de potência, o amplificador de linha e o pré-amplificador. Contudo, todos devem apresentar o ganho e a figura de ruído condizente com cada aplicação. O amplificador de potência, onde o ganho é um fator importante, é colocado próximo à saída do bloco transmissor de um sistema óptico e tem como função aumentar o nível de potência óptica de saída do transmissor. Assim, pode-se, dependendo do tamanho do enlace ou da acessibilidade da planta óptica, compensar antecipadamente as perdas ópticas e evitar a colocação de novos amplificadores ao longo do sistema. Já os amplificadores de linha, geralmente colocados em pontos estratégicos ao longo do enlace de transmissão, têm como função restaurar a amplitude do sinal óptico de forma a compensar a atenuação na fibra. Assim, deseja-se que estes amplificadores possuam ganho acentuado e baixa figura de ruído. Portanto, os amplificadores de linha são utilizados quando o comprimento do enlace é tal que o nível do sinal que chega ao receptor não é suficiente para a detecção com baixa taxa de erros, mesmo após a utilização de amplificadores de potência. Contudo, em determinados enlaces ópticos, a necessidade de um amplificador de linha pode ser substituída pela utilização dos chamados préamplificadores ópticos. Neste caso, o nível do sinal que chega ao receptor continua não sendo suficiente para a detecção com baixa taxa de erros. Porém, a colocação do amplificador na entrada do receptor óptico permite a recuperação do sinal a nível adequado à sensitividade do fotodetector, aumentando a sua relação sinal-ruído, com a vantagem extra de permitir fácil acesso ao amplificador, em caso de necessidade de manutenção.

Portanto, observa-se que a utilização comercial do EDFA depende de sua função (ou posição) no enlace óptico. Como o amplificador pode ser implementado em diferentes topologias, é possível que cada uma destas seja mais indicada para um tipo específico de aplicação (potência, linha ou pré-amplificação), para um tipo especifico de bombeio. Por meio da verificação de desempenho destas configurações de EDFA, que é consideravelmente facilitada pela utilização de simulações computacionais, pode-se determinar as condições de operação mais adequadas para cada função de amplificação, permitindo, inclusive, otimizações, antes que testes de campo sejam conduzidos. Com base no exposto acima, o objetivo deste trabalho é o de apresentar uma análise teórica dos EDFAs através de simulações computacionais, considerando-se bombeios em 980 e 1480 nm, visando a obtenção das principais características de operação de diferentes topologias de amplificadores, no intuito de se identificar a possível aplicação de cada uma das topologias analisadas nas funções de amplificação que o EDFA pode desempenhar.

Para tanto, no Capítulo 2, realiza-se o desenvolvimento da teoria básica de funcionamento do EDFA. Primeiramente, formalizam-se as considerações que permitem a obtenção das equações de taxa que regem as transições das populações atômicas na fibra óptica dopada. Assumindo-se uma situação estacionária, as equações de taxa levam a uma relação entre as densidades de portadores nos níveis de energia da fibra dopada e a densidade total de portadores. Estes resultados são utilizados posteriormente, após a introdução dos passos que permitem a obtenção das equações de propagação de bombeio, de sinal, de ruído de emissão espontânea amplificado e de figura de ruído. Estas análises são desenvolvidas para a fibra dopada com érbio, considerando-se duas situações distintas: sistema de três níveis e sistema de dois níveis. A primeira permite a modelagem do EDFA para bombeio em 980 nm. Já a segunda, é aplicável quando o bombeio é de 1480 nm.

No Capítulo 3, analisam-se as configurações de amplificadores a fibra dopada com érbio. Partindo-se da configuração convencional, com bombeio co-propagante, analisam-se as configurações que apresentam bombeio contra-propagante e bidirecional. A seguir, as configurações que apresentam elementos reflexivos são apresentadas e comentadas. Destas fazem parte as configurações com retorno de bombeio, com retorno de sinal, com retorno de bombeio e de sinal e, finalmente, com retorno de bombeio e de sinal filtrado.

O Capítulo 4 comeca enunciando as considerações que permitem a adaptação da teoria apresentada no Capítulo 2 às simulações computacionais das topologias de EDFA apresentadas no Capítulo 3. Após um breve comentário sobre a lógica de operação do algoritmo de simulação, apresentam-se as características e os parâmetros físicos para a amostra de fibra dopada com érbio que é referência para este trabalho. De posse destes parâmetros, os resultados numéricos para as principais características de funcionamento das diferentes topologias de EDFA são mostradas na forma de tabelas e gráficos, para bombeios em 980 nm e 1.480 nm. Estes resultados são obtidos para várias combinações de níveis de potência óptica de sinal de entrada e de bombeio, e comprimentos de fibra dopada, buscando-se a otimização das configurações consideradas. Na següência, além das comparações entre os desempenhos de cada configuração para cada tipo de bombeio empregado, comparações entre as próprias topologias são apresentadas, onde são ressaltadas as vantagens e desvantagens de cada uma delas para um dado tipo de bombeio. Por fim, apresentam-se as simulações do comportamento espectral do ganho e da ASE para a configuração co-propagante, assumindo-se várias combinações de níveis de potência óptica de sinal de entrada e de bombeio.

No Capítulo 5 analisam-se os resultados e apresentam-se as conclusões obtidas. A partir destes, traçam-se as perspectivas quanto as contribuições geradas por este trabalho e propõem-se sugestões para futuras pesquisas.

5

Capítulo 2

Teoria do EDFA

2.1 Introdução

Neste Capítulo, primeiramente, os mecanismos de amplificação do EDFA serão apresentados e discutidos para dois tipos distintos de bombeio. Na seqüência, as características de operação do EDFA que são mais relevantes durante o processo de amplificação em sistemas ópticos são comentadas. Finalmente, apresenta-se a teoria que permite a modelagem matemática de uma fibra dopada com érbio, a qual servirá de ferramenta para a realização das simulações computacionais dos principais parâmetros de funcionamento do EDFA.

2.2 Mecanismo de amplificação do EDFA para sistema de três e dois níveis

Para facilitar a compreensão do mecanismo de amplificação do EDFA, utiliza-se o modelo de diagrama de níveis de energia do íon de érbio em sílica (Er^{3+}), representado na Fig. 2.1 para dois valores típicos de comprimento de onda de bombeio. No caso do bombeio de 980 nm, pode- se observar que se trata de um sistema de três níveis de energia, E_1 , E_2 e E_3 , denominados, respectivamente, fundamental, metaestável e de bombeio. Quando o sistema está em equilíbrio térmico, ou seja, na ausência de bombeio ou sinal, a população de átomos em cada um desses três níveis de energia pode ser definida como, respectivamente, N_1 , N_2 e N_3 , onde $N_1 > N_2$ e $N_1 > N_3$. Contudo, na presença do bombeio, a situação de equilíbrio pode ser alterada, uma vez que a população de átomos do nível E_1 pode absorver os fótons de bombeio e, com esta energia extra, passar para níveis de energia mais altos. Deve-se ressaltar que os comprimentos de onda λ que podem permitir tais transições devem obedecer à relação quântica $\lambda = hc/\Delta E$, onde *h* é a constante de Planck, *c* é a velocidade da luz e ΔE é a diferença de energia entre os níveis envolvidos. Neste último caso, as transições ocorrem apenas entre os dois primeiros níveis de energia.

Voltando a operação em 980 nm, a absorção de fótons pelos portadores provoca transições de E_1 para E_3 . Como a tendência do sistema é de retornar ao seu estado inicial, os portadores que foram excitados para o nível E_3 tendem a perder sua energia e retornar para o nível fundamental E_1 . Antes de retornar a E_1 , parte dos portadores do nível E_3 decaem espontaneamente para o nível metaestável E_2 , perdendo energia na forma de emissões espontâneas não radiativas [8]. Uma característica importante do érbio é o fato que as transições $E_3 \rightarrow E_2$ são consideravelmente mais rápidas (da ordem de 10⁴ vezes) que as transições $E_2 \rightarrow E_1$. Isto significa que, se a potência de bombeio for suficientemente alta, a população de portadores do estado fundamental pode ser significativamente reduzida, tendendo os portadores, como um todo, a se acumularem no estado E_2 . Este processo é conhecido como inversão de população e garante as condições para a amplificação óptica, uma vez que, agora, com $N_2 > N_1$, tem-se a situação inversa daquela do equilíbrio térmico. A transição dominante de E_2 para E_1 é radiativa (emissão estimulada ou espontânea). Os comprimentos de onda para os fótons resultantes das transições $E_2 \rightarrow E_1$ se situam em uma faixa em torno de 1.530 nm, que concorda com a janela de mínima atenuação da fibra óptica. Assim, no caso de um sinal ser acoplado à entrada do amplificador, este poderia estimular a emissão de fótons coerentes (mesmo comprimento de onda, fase, direção e polarização) ao longo da fibra dopada, produzindo-se a amplificação óptica desejada. No entanto, alguns fótons poderão também ser emitidos quando os portadores decaírem espontaneamente para o nível fundamental. Em relação ao sinal de entrada, estes fótons espontâneos podem ser considerados com um ruído adicional e são subprodutos indesejados da amplificação. Um efeito negativo do processo de emissão espontânea é o fato de que o próprio fóton produzido por emissão espontânea na fibra dopada pode estimular o aparecimento de outros fótons, de forma que a amplificação não se restringe apenas ao sinal de entrada, mas também ao ruído. A amplificação do ruído em um EDFA é chamada de emissão espontânea amplificada (*amplified spontaneous emission* - ASE), que resulta na maior fonte de ruído em um sistema de transmissão que utiliza amplificadores a fibra.

Uma outra opção de bombeio é a utilização do comprimento de onda de 1.480 nm. De uma forma simplificada, a Fig. 2.1(b) mostra que a presença do bombeio em 1.480 nm excita os portadores diretamente para o nível metaestável E_2 . 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 . Estes portadores excitados tendem a perder energia de forma não-radiativa no interior do próprio nível E_2 , resultando em uma população excitada final que permite transições no comprimento de onda do sinal [11]. Se o nível de potência de bombeio é suficiente, tem-se, portanto, a inversão de portadores, com a ocorrência de decaimentos radiativos do nível E_2 para o nível E_1 . As considerações com relação a ASE são semelhantes àquelas para o bombeio de 980 nm.. Um dos grandes desafios na pesquisa de EDFAs é o de conceber configurações de amplificadores que maximizem o ganho do amplificador e minimizem a ASE produzida.



Fig. 2.1 – Níveis de energia para a fibra dopada com érbio quando o bombeio é de (a) 980 nm (três níveis) e (b) de 1.480 nm (dois níveis).

2.3 Características de operação do EDFA em sistemas ópticos

De uma forma geral, o princípio de funcionamento do EDFA pode ser facilmente entendido com a utilização do modelo de níveis de energia apresentados na seção anterior. Contudo, deve-se ressaltar que os níveis de energia são degenerados e, desta forma, compostos por estreitas bandas de energia, resultado de fenômenos físicos como o efeito

Stark [8]. A degeneração dos níveis de energia é representada pelas faixas sombreadas que determinam E_1 , E_2 e E_3 na Fig. 2.1. Por esta razão, as transições entre as bandas que representam os níveis E_2 e E_1 não geram exclusivamente fótons em 1.530 nm, mas fótons em uma faixa de valores de comprimentos de onda que atendem a janela óptica de 1.550 nm. Portanto, se um sinal WDM é acoplado à entrada do amplificador, o amplificador é capaz de gerar ganho para cada um dos diferentes comprimentos de onda acoplados. No entanto, os decaimentos radiativos que geram os fótons em diferentes comprimentos de onda vão depender das probabilidades quânticas de distribuição de portadores e das transições entre os diferentes sub-níveis de duas bandas distintas. Como a probabilidade de ocorrência destes eventos é diferente para cada sub-nível, o ganho fornecido pelo amplificador torna-se não-uniforme e, portanto, varia conforme o valor do comprimento de onda do sinal de entrada. A Fig. 2.2 ilustra a característica típica da resposta do ganho óptico de um EDFA em função do comprimento de onda. Em particular, o perfil apresentado é para um bombeio em 980 nm, porém, o comportamento da curva é semelhante para bombeio em 1.480 nm. Como pode ser observado, a curva de ganho é irregular, com pico em torno de 1.532 nm. A banda de amplificação para o EDFA é de cerca de 40 nm [6-7,10]. Porém, a União Internacional de Telecomunicações (International Telecommunications Union - ITU) adota, para sistemas WDM, uma faixa útil de amplificação de cerca de 34 nm, cobrindo comprimentos de onda que vão de 1.530 a 1.564 nm [6]. Dentro desta faixa, pode-se alocar até 43 canais multiplexados em comprimento de onda, separados nominalmente de 100 GHz (espaçamento em comprimento de onda de, aproximadamente, 0,8 nm), com freqüência central nominal de 193,1 THz (1.552,52 nm). Se, por exemplo, cada um destes canais for modulado a uma taxa de 10 Gbps, uma taxa agregada de 430 Gbps poderá trafegar em uma única fibra óptica [6-7].



Fig. 2.2 – Comportamento espectral típico do ganho de um EDFA com bombeio de 980 nm.

Como se pode observar na Fig. 2.2, o perfil de ganho do EDFA é irregular. Infelizmente, esta característica pode ocasionar problemas em sistemas WDM que possuem amplificadores cascateados. Como o laser de bombeio fornece uma energia fixa ao EDFA para ser convertida em amplificação, se o sinal na entrada do amplificador tiver um nível de potência muito alto, os portadores que ocupam a banda E_2 tendem a ser rapidamente consumidos, de forma que o ganho do amplificador cai sensivelmente. Quando uma situação como esta ocorre, diz-se que o amplificador está operando sob saturação. Em sistemas cascateados, por causa da não-uniformidade do ganho, os canais WDM concentrados em torno do pico do perfil da curva de ganho tendem a ser amplificados com ganho maior nos primeiros estágios amplificadores. O mesmo vale para o ruído de emissão espontânea nesta região. Como a atenuação da fibra afeta igualmente a transmissão, os canais com menor potência óptica tendem a requerer amplificação depois de um determinado comprimento de fibra. Contudo, as presenças de canais com níveis altos de potência e da ASE amplificada tendem a saturar os EDFAs posteriores, prejudicando a amplificação dos canais de baixa potência. O resultado deste comportamento é sentido nos receptores, pois, se não houver um planejamento específico, canais com maior potência óptica tendem a saturar os fotodetectores, diminuindo a sua resposta ao chaveamento da portadora óptica, levando os canais de menor potência a não obedecer aos pré-requisitos mínimos de sensitividade do receptor. Assim, o perfil de ganho do EDFA, associado à saturação dos amplificadores, torna-se um parâmetro a mais a ser considerado no projeto de um sistema óptico de grande distância.

Na tentativa de minimizar este problema, equalizadores ópticos baseados em filtros ópticos seletivos têm sido utilizados em sistemas comerciais [6,12]. Por outro lado, pesquisas estão sendo feitas com diferentes materiais de composição da fibra dopada visando a uniformidade do perfil de ganho, como é o caso da fibra de fluoreto [13]. Outra solução para este problema poderia ser obtida com o estudo de diferentes configurações de amplificadores, seja para a correção do perfil de ganho do EDFA ou, no mínimo, para a redução do efeito de saturação em estágios cascateados.

2.4 Ganho do EDFA

O ganho de um EDFA é uma conseqüência direta de características como topologia, dopagem, comprimento da fibra dopada, potência de entrada do sinal, potência de bombeio e comprimento de onda do bombeio, entre outros. Dependendo do nível de potência óptica na entrada do amplificador, podem-se alcançar valores típicos de ganho (pico) na faixa de 30 a 40 dB. Ganhos ligeiramente maiores são obtidos com diferentes configurações de amplificadores, como será mostrado no Capítulo 4. Exemplos destas configurações serão apresentados e discutidos no Capítulo 3. Similarmente ao que acontece com amplificadores eletrônicos, o EDFA também está sujeito à saturação de ganho. Normalmente, a saturação ocorre quando a potência óptica de entrada do amplificador se situa em torno de algumas centenas de miliwatts. Porém, o valor exato para a potência de saturação irá depender das características de operação do EDFA. Deve-se ressaltar que, para a potência de saturação, a contribuição da ASE não pode ser descartada. Em alguns sistemas, quando a potência do sinal de entrada é baixa, o próprio ruído ASE tende a saturar o amplificador.

2.5 Figura de Ruído

Um outro parâmetro importante que deve ser analisado em amplificadores ópticos é a figura de ruído. A figura de ruído indica a quantidade de ruído adicionada ao sinal pelo próprio amplificador, ou seja, leva em consideração, principalmente, a deterioração do sinal pela contribuição do ruído de emissão espontânea. Em muitos casos, o ruído ASE gerado em um EDFA pode ser o fator limitante do desempenho em um enlace de transmissão óptica. Por exemplo, como citado anteriormente, em alguns sistemas, o próprio ruído ASE tende a saturar o amplificador e causar problemas na amplificação dos canais WDM, degradando a relação sinal-ruído (signal to noise ratio - SNR) de saída do amplificador. Da mesma forma, a SNR de um amplificador poderia ser otimizada dependendo da configuração adotada para o EDFA. Em vista do que foi exposto, observa-se que, além da importância da utilização dos EDFAs nos sistemas de comunicação óptica, deve-se tentar otimizar seus parâmetros de funcionamento. Uma das alternativas viáveis para tal é o estudo de diferentes configurações desses amplificadores. Desta forma, parâmetros como ganho, figura de ruído e saturação podem ser convenientemente melhorados para um desempenho global superior do EDFA.

2.6 Modelo matemático de níveis de energia para o EDFA

A Fig. 2.3 mostra um diagrama detalhado de um sistema de três níveis, que será utilizado como referência na apresentação das equações de taxa que regem as transições das populações atômicas.



Fig. 2.3 – Diagrama de três níveis para a fibra dopada com érbio, ressaltando as transições relevantes entre os níveis de energia: R se refere ao bombeio, W ao sinal e A às transições espontâneas (radiativas e não-radiativas).

Na descrição matemática dos amplificadores ópticos a fibra dopada com érbio, torna-se necessário definir parâmetros que servirão como premissas para a análise do modelo e posterior simulação. Nesta Seção, a análise teórica será realizada para o caso de um sistema de três níveis de energia (980 nm), com posterior redução para o caso de dois níveis de energia (1.480 nm). O núcleo da fibra é assumido como composto de vidro de sílica dopada com átomos de um dos elementos das terras raras (por exemplo, o érbio), cujo perfil de distribuição no núcleo é dado por per(r), onde r é a distância entre o eixo da fibra e um ponto qualquer perpendicular a este eixo. Para a simplificação das análises, considera-

se que a dopagem e as dimensões físicas da fibra são invariantes ao longo do comprimento da mesma. Supostamente, a casca não possui dopantes. A Fig. 2.3 mostra o diagrama de três níveis para a fibra dopada com érbio, que indica as transições mais relevantes entre os níveis de energia. No caso das transições que envolvem o comprimento de onda de bombeio, existem três possibilidades. A primeira quando os portadores no nível E_1 absorvem energia de bombeio e são excitadas para o nível E3. A segunda quando portadores do nível E_3 decaem estimuladamente para o nível E_1 . A terceira, quando o decaimento radiativo do nível 3 para o nível 1 é espontâneo. Estas transições estão representadas na Fig. 2.3, respectivamente, 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} . Já para o caso das transições que envolvem o comprimento de onda do sinal, 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^{R}_{21} . Ainda com referência à Fig. 2.3, outras transições possíveis podem acontecer de forma radiativa, representada pela taxa de emissão radiativa entre os níveis 3 e 2, A^{R}_{32} , e de forma não-radiativa, representada pelas taxas de transição não-radiativa entre os níveis 3 e 2, A^{NR}_{32} , e entre os níveis 2 e 1, A^{NR}_{21} . Supondo-se que a população total de portadores dos íons dopantes de érbio no núcleo da fibra é N_0 (m⁻³), então:

$$N_0 = N_1 + N_2 + N_3 \tag{2.1}$$

onde N_1 , N_2 e N_3 , representam as populações de portadores nos estados de energia fundamental, metaestável e de bombeio, respectivamente. Como comentado anteriormente, quando o sistema de três níveis é excitado através do bombeio, os portadores do 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 menor energia intermediários) ou diretamente para a condição de equilíbrio (nível 1). Como observado, existem duas possibilidades para o decaimento dos portadores, o decaimento não-radioativo e o decaimento radioativo. Partindo-se da população de portadores do nível 3, definem-se as taxas de emissão espontânea radiativa, A^{R}_{3} , e não-radiativa, A^{NR}_{3} , do nível 3 como, respectivamente [8]:

$$A_3^R = A_{32}^R + A_{31}^R \tag{2.2a}$$

$$A_3^{NR} = A_{32}^{NR} \tag{2.2b}$$

No caso especifico 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 $A_3^R \cong 0$. Se a taxa de emissão espontânea total do nível 3, A_3 , é definida como $A_3 = A_3^{NR} + A_3^R$, então:

$$A_3 \cong A_{32}^{NR} = A_{32} \tag{2.3}$$

onde o índice "*NR*" foi descartado pelo fato da emissão não-radiativa ser a transição predominante. Seguindo-se o mesmo raciocínio, a taxa de emissão espontânea total do nível 2 é dada por:

$$A_2 = A_{21}^R + A_{21}^{NR} \tag{2.4}$$

Considerando-se novamente o érbio, pode-se observar que as emissões espontâneas do nível 2 são predominantemente radiativas. Assim o termo A_{21}^{NR} , de (2.4) pode também ser desprezado, de forma que:

$$A_2 \cong A_{21}^R = A_{21} \tag{2.5}$$

onde o índice "*R*" foi descartado pelo fato da emissão radiativa ser a transição predominante.

Assumindo-se as simplificações acima, lembrando-se que a densidade dos átomos dopantes no núcleo foi considerada constante ao longo da fibra dopada e utilizando-se a Fig. 2.3 como referência, podem-se escrever as equações de taxa para as populações de portadores nos três níveis de energia que estão envolvidos no mecanismo de amplificação [8]:

$$\frac{dN_1}{dt} = -R_{13}N_1 + R_{31}N_3 + A_{21}N_2 + W_{21}N_2 - W_{12}N_1$$
(2.6)

$$\frac{dN_2}{dt} = A_{32}N_3 - A_{21}N_2 + W_{12}N_1 - W_{21}N_2$$
(2.7)

$$\frac{dN_3}{dt} = R_{13}N_1 - R_{31}N_3 - A_{32}N_3$$
(2.8)

Em (2.6), pode-se observar que a variação temporal dos portadores no nível 1 diminui por absorção devido a 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 os decaimento espontâneo do nível 2 $(A_{21}N_2)$. Já em (2.7), a variação temporal dos portadores no 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 em E_2 .

Finalmente, (2.8) mostra que a variação temporal dos portadores no 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 ($A_{32}N_3$).

Supondo-se que a densidade média de portadores nos três níveis de energia é invariante ao longo do tempo (situação estacionária), as derivadas nos primeiros membros de (2.6) a (2.8) se anulam, de forma que:

$$-N_1(R_{13} + W_{12}) + N_2(A_{21} + W_{21}) + N_3R_{31} = 0$$
(2.9)

$$N_1 W_{12} - N_2 (A_{21} + W_{21}) + N_3 A_{32} = 0 (2.10)$$

$$N_1 R_{13} - N_3 (A_{32} + R_{31}) = 0 (2.11)$$

As equações (2.9) a (2.11) caracterizam um sistema de equações com três incógnitas. Contudo, uma investigação minuciosa deste sistema mostra que (2.9) é uma combinação linear de (2.10) e (2.11). No entanto, soluções para N_1 e N_2 em função de N_0 são possíveis quando o sistema de equações é reduzido a um sistema de duas incógnitas, por meio de substituição de N_3 em (2.10) e (2.11) por (2.1). Levando-se isto em consideração e definindo-se A_{21} em termos do tempo de vida de fluorescência do estado metaestável, τ_{21} , dado por [8]:

$$A_{21} = \frac{1}{\tau_{21}} \tag{2.12}$$

(2.10) e (2.11) podem ser reescritas como, respectivamente:

$$N_1 W_{12} - N_2 \left(\frac{1}{\tau_{21}} + W_{21}\right) + A_{32} \left(N_0 - N_1 - N_2\right) = 0$$
(2.13)

$$N_1 R_{13} - (N_0 - N_1 - N_2)(A_{32} + R_{31}) = 0$$
(2.14)

Após manipulações algébricas apropriadas, podem-se definir as densidades normalizadas de portadores para os níveis 1 e 2 por, respectivamente:

$$\frac{N_1}{N_0} = \frac{\left(1 + W_{21}\tau_{21}\right)\left(1 + \frac{R_{13}}{A_{32}}\right)}{\left(1 + W_{21}\tau_{21}\right)\left(1 + \frac{R_{13} + R_{31}}{A_{32}}\right) + W_{12}\tau_{21}\left(1 + \frac{R_{31}}{A_{32}}\right) + R_{13}\tau_{21}}$$
(2.15)

$$\frac{N_2}{N_0} = \frac{R_{13}\tau_{21} + W_{12}\tau_{21}\left(1 + \frac{R_{31}}{A_{32}}\right)}{\left(1 + W_{21}\tau_{21}\right)\left(1 + \frac{R_{13} + R_{31}}{A_{32}}\right) + W_{12}\tau_{21}\left(1 + \frac{R_{31}}{A_{32}}\right) + R_{13}\tau_{21}}$$
(2.16)

Finalmente, tendo-se o érbio como referência, pode-se assumir que a taxa de decaimento espontâneo não-radiativo do nível três para o nível dois (A_{32}) é predominante em relação as taxas de absorção e emissão estimulada de bombeio, R_{13} e R_{31} . Então,

fazendo-se $A_{32} \gg R_{13}$ e $A_{32} \gg R_{31}$ em (2.15) e (2.16), pode-se escrever que as densidades normalizadas de portadores dos níveis 1 e 2 para um sistema de três níveis são:

$$\frac{N_1}{N_0} = \frac{1 + W_{21}\tau_{21}}{1 + \tau_{21}\left(R_{13} + W_{12} + W_{21}\right)}$$
(2.17)

$$\frac{N_2}{N_0} = \frac{\tau_{21} \left(R_{13} + W_{12} \right)}{1 + \tau_{21} \left(R_{13} + W_{12} + W_{21} \right)}$$
(2.18)

É importante ressaltar que, devido ao fato do tempo de decaimento dos portadores do nível 3 ser muito rápido no érbio, ou seja, menor que 10 µs, pode-se trabalhar com a possibilidade de se admitir que a população deste nível de energia é aproximadamente nula, ou seja [11]:

$$N_0 \cong N_1 + N_2 \tag{2.19}$$

Esta simplificação permite a redução da análise de um sistema de três níveis para àquela de um sistema de dois níveis. Apesar desta redução ser aplicável para amplificadores que utilizam bombeio em 980 nm, adaptações podem ser feitas de forma que os resultados já obtidos tenham validade quando bombeios em 1.480 nm sejam utilizados.

A Fig. 2.4 apresenta o diagrama de um sistema de dois níveis para a fibra dopada com érbio, ressaltando as transições de portadores mais relevantes. Como pode ser observado, pretende-se com este diagrama representar amplificadores que utilizam bombeio em 1.480 nm. Todas as transições entre as bandas se resumem àquelas entre os níveis 1 e 2. Na Fig. 2.4, representando as transições entre os sub-níveis de menor energia de E_1 e os sub-níveis de maior energia de E_2 estão a taxa de absorção do bombeio, R_{12} , e a taxa de
emissão estimulada de bombeio, R_{21} , que, dependendo da fibra dopada utilizada como referência, pode não ser desprezível no caso do bombeio em 1480 nm. Já os termos W_{12} , W_{21} e A_{21} permanecem os mesmos definidos anteriormente. Dividindo-se (2.17) por (2.18), a relação entre as densidades de portadores dos níveis 2 e 1, para um sistema de 2 níveis, é dada por [11]:

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{\tau_{21}(R_{12} + W_{12})}{1 + \tau_{21}(W_{21} + R_{21})}$$
(2.20)

onde R_{12} substitui R_{13} em (2.17) e (2.18) e R_{21} é somado a W_{21} para levar em consideração a emissão estimulada para o bombeio. Este procedimento permite a adaptação da formulação apresentada ao bombeio em 1.480 nm.



Fig. 2.4 – Diagrama de dois níveis para a fibra dopada com érbio, ressaltando as transições relevantes entre os níveis de energia: R se refere ao bombeio, W ao sinal e A às transições espontâneas (radiativas e não-radiativas).

O resultado de (2.20) fornece a relação entre as densidades de portadores nos estados metaestável e fundamental e depende somente do tempo de decaimento do nível dois para o nível um, das taxas de absorção e emissão estimuladas de sinal W_{12} e W_{21} e das taxas de absorção e emissão estimulada de bombeio R_{12} e R_{21} . Se N_2/N_1 for maior que a unidade, obtém-se a condição de inversão de população entre os níveis um e dois, de forma que o meio se torna ativo e a amplificação do sinal óptico ocorre. Se N_2/N_1 for menor que a unidade, haverá a predominância da absorção de fótons pelos átomos de érbio da fibra. Uma terceira condição pode ainda ocorrer quando N_2/N_1 é igual à unidade. Neste caso, diz-se que a fibra dopada está em um estado de transparência, não havendo alterações na amplitude do sinal que se propaga pela fibra óptica, a não ser por atenuação [10-11].

2.7 Modelo matemático de propagação para o EDFA

Na seção anterior, foram obtidas as densidades normalizadas de portadores para os níveis de energia de um fibra dopada com érbio, considerando-se dois tipos de bombeio, 980 nm (3 níveis) e 1.480 nm (2 níveis). Para as considerações de estado estacionário feitas anteriormente, não houve menção sobre a distribuição espacial dos dopantes no núcleo da fibra. Como, em geral, o perfil de dopagem não é uniforme, as densidades de portadores passam também a ter uma dependência espacial. O mesmo pode ser dito, portanto, das taxas de absorção e emissão já definidas. Considerando-se o formato físico da fibra, as análises espaciais serão conduzidas em coordenadas cilíndricas (r, ϕ, z), com o eixo zcoincidindo com o eixo da fibra óptica. Assume-se z = 0 como o ponto de entrada do sinal na fibra dopada. Sob estas condições, a densidade de energia normalizada de bombeio, $p_n(r,\phi)$, e a densidade de energia normalizada de sinal, $s_0(r,\phi)$, podem ser escritas como [14-17]:

$$p_n(r,\phi) = r_n(r)\cos^2(n\phi) \tag{2.21}$$

$$s_0(r,\phi) = s_0(r)$$
 (2.22)

onde

$$r_n(r) = \begin{cases} C_{uw} J_n^2 \left(\frac{u_p r}{a_c}\right) & r \le a_c \\ C_{uw} \left[\frac{J_n(u_p)}{K_n(w_p)}\right]^2 K_n^2 \left(\frac{w_p r}{a_c}\right) & r > a_c \end{cases}$$
(2.23)

$$s_{0}(r) = \begin{cases} K_{uw} J_{0}^{2} \left(\frac{u_{s}r}{a_{c}} \right) & r \leq a_{c} \\ K_{uw} \left[\frac{J_{0}(u_{s})}{K_{0}(w_{s})} \right]^{2} K_{0}^{2} \left(\frac{w_{s}r}{a_{c}} \right) & r > a_{c} \end{cases}$$

$$(2.24)$$

onde a_c é o raio do núcleo da fibra, n é um inteiro que indica o número azimutal de bombeio e considera a possível propagação multimodal do bombeio na fibra dopada, u_p e w_p e u_s e w_s são constantes de propagação transversais normalizadas para bombeio e sinal, respectivamente, e J_n e K_n representam as funções de Bessel de primeira e segunda espécie de ordem n, respectivamente. As densidades de energia $p_n(r,\phi)$ e $s_0(r,\phi)$ são normalizadas, ou seja, suas integrais de superfície, na seção transversal da fibra, são iguais à unidade. Para tanto, o modelo utilizado foi o de área infinita [14,16], sendo as constantes C_{uw} e K_{uw} os coeficientes de normalização (m⁻²). As intensidades de sinal I_s e de bombeio I_p (W/m²) estão relacionadas às densidades de energia e às funções que descrevem a evolução do sinal e do bombeio (adimensional), s(z) e p(z), respectivamente, por meio de [16-18]:

$$I_s(r,z) = P_s(0)s_0(r)s(z)$$
(2.25)

$$I_{p}(r,\phi,z) = P_{p}(0)p_{n}(r,\phi)p(z)$$
(2.26)

onde $P_s(0)$ e $P_p(0)$ são as potências de sinal e de bombeio (W) no ponto z = 0, respectivamente. As funções p(z) e s(z) são normalizadas, de forma que p(0) = s(0) = 1. Por simplificação, assume-se bombeio monomodal. Ao se considerar um sistema de três níveis (bombeio em 980 nm - considerações semelhantes podem ser feitas para bombeio em 1.480 nm), quando o sinal de bombeio atravessa a fibra, dois mecanismos principais reduzem a quantidade de fótons de bombeio. O primeiro, chamado de absorção *GSA* (*ground spontaneous absorption*), é a absorção do bombeio por portadores no nível fundamental que pulam para o nível de bombeio e, posteriormente, decaem para o nível metaestável. O outro mecanismo, chamado de *ESA* (*excited state absorption*) [8-10], envolve portadores já excitados, principalmente aqueles no nível metaestável, que absorvem os fótons de bombeio e pulam para níveis de energia ainda mais altos que o nível E_3 . Conseqüentemente, a taxa de variação da intensidade do sinal de bombeio, em uma área incremental *dS* da seção transversal da fibra, pode ser escrita como [16-18]:

$$\frac{dI_p}{dz}dS = -\sigma_p N_1 I_p dS - \sigma'_p N_2 I_p dS$$
(2.27)

onde σ_p é a seção transversal de absorção *GSA*, e σ'_p é a seção transversal de absorção *ESA*. Portanto a evolução da intensidade de bombeio na seção transversal completa é de:

$$\int_{0}^{\infty} \int_{0}^{2\pi} \frac{dI_{p}}{dz} r dr d\phi = -\int_{0}^{\infty} \int_{0}^{2\pi} (\sigma_{p} N_{1} + \sigma'_{p} N_{2}) I_{p} r dr d\phi$$
(2.28)

Analogamente para a intensidade do sinal, que sofre perda por absorção (portador do nível um para o dois) e ganha através da emissão estimulada do nível dois para o nível um, tem-se:

$$\int_{0}^{\infty} \int_{0}^{2\pi} \frac{dI_{s}}{dz} r dr d\phi = \int_{0}^{\infty} \int_{0}^{2\pi} (\sigma_{e} N_{2} - \sigma_{a} N_{1}) I_{s} r dr d\phi$$
(2.29)

onde s_a é a seção transversal de absorção do sinal e σ_e é a seção transversal de emissão estimulada. Para encontrar o coeficiente de ganho da fibra é preciso resolver numericamente as (2.28) e (2.29). Para simplificar as equações, a partir de (2.17) e (2.18), pode-se considerar que:

$$\frac{N_2(r,\phi,z)}{N_0(r,\phi,z)} \triangleq x(r,\phi,z) = \frac{\tau_2 R_{13}(r,\phi,z) + \tau_2 W_{12}(r,\phi,z)}{\tau_2 R_{13}(r,\phi,z) + \tau_2 W_{21}(r,\phi,z) + \tau_2 W_{12}(r,\phi,z) + 1}$$
(2.30)

$$\frac{N_1(r,\phi,z)}{N_0(r,\phi,z)} \triangleq 1 - x(r,\phi,z) = \frac{1 + \tau_2 W_{21}(r,\phi,z)}{\tau_2 R_{13}(r,\phi,z) + \tau_2 W_{21}(r,\phi,z) + \tau_2 W_{12}(r,\phi,z) + 1}$$
(2.31)

onde τ_{21} foi feito igual a τ_2 , por simplificação. As taxas de transição de portadores W_{12} , $W_{21} \in R_{13}$, em coordenadas cilíndricas, podem ser escritas em termos das seções transversais de absorção e emissão como [8-10]:

$$W_{12}(r,\phi,z) = \frac{\sigma_a(\lambda_s)I_s(r,z)}{h\nu_s} + \frac{\sigma_a(\lambda_s)}{h\nu_s} \Big[I_{ASE}^+(z) + I_{ASE}^-(z)\Big]$$
(2.32)

$$W_{21}(r,\phi,z) = \frac{\sigma_e(\lambda_s)I_s(r,z)}{h\nu_s} + \frac{\sigma_e(\lambda_s)}{h\nu_s} \Big[I_{ASE}^+(z) + I_{ASE}^-(z)\Big]$$
(2.33)

$$R_{13}(r,\phi,z) = \frac{\sigma_p(\lambda_p)I_p(r,\phi,z)}{h\nu_p}$$
(2.34)

onde λ_s é o comprimento de onda do sinal (nm), λ_p é o comprimento de onda de bombeio (nm), I_{ASE}^+ é a intensidade do ruído ASE no sentido de propagação do sinal (W/m²), I_{ASE}^- é a intensidade do ruído ASE no sentido contrário à propagação do sinal (W/m²) e υ_s e υ_p são as freqüências de sinal e de bombeio (Hz), respectivamente.

Utilizando-se (2.21), (2.22) e (2.32) a (2.34), e definindo-se os seguintes parâmetros auxiliares [8-9]:

$$\beta = \frac{\sigma_p \tau_2 P_p(0)}{Ah\nu_p}; \qquad \beta_e = \frac{\sigma_e \tau_2 P_s(0)}{Ah\nu_s}; \qquad \beta_a = \frac{\sigma_a \tau_2 P_s(0)}{Ah\nu_s}$$
(2.35)

onde A é a área do núcleo da fibra dopada, (2.30) torna-se:

$$x(r,\phi,z) = \frac{A\left[\beta p(z) p_n(r,\phi) + \beta_a s(z) s_0(r) + \left(\frac{\sigma_a \tau_2}{Ah\nu_s}\right) I_{ASE}(z)\right]}{1 + A\beta p(z) p_n(r,\phi) + A(\beta_a + \beta_e) s(z) s_0(r) + A\left[\frac{(\sigma_a + \sigma_e) \tau_2}{Ah\nu_s}\right] I_{ASE}(z)}$$
(2.36)

onde $I_{ASE}(z) = I_{ASE}^+(z) + I_{ASE}^-(z)$.

Voltando-se agora à análise da integral (2.28), ao se considerar a intensidade de bombeio dada por (2.26), pode-se escrever que o primeiro membro de (2.28) é:

$$\int_{0}^{\infty} \int_{0}^{2\pi} \frac{dI_{p}}{dz} r dr d\phi = \int_{0}^{\infty} \int_{0}^{2\pi} P_{p}(0) p_{n}(r,\phi) \frac{dp}{dz} r dr d\phi = P_{p}(0) \frac{dp(z)}{dz} \int_{0}^{\infty} \int_{0}^{2\pi} p_{n}(r,\phi) r dr d\phi \qquad (2.37)$$

Lembrando-se que $p_n(r,\phi)$ foi definida como normalizada sobre a seção transversal da fibra, a última integração a direita de (2.37) é unitária, de forma que:

$$\int_0^\infty \int_0^{2\pi} \frac{dI_p}{dz} r dr d\phi = P_p(0) \frac{dp(z)}{dz}$$
(2.38)

ou, alternativamente:

$$\frac{dp(z)}{dz} = \frac{1}{P_p(0)} \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \frac{dI_p}{dz} r dr d\phi$$
(2.39)

Substituindo-se (2.29) em (2.39), tem-se que:

$$\frac{dp(z)}{dz} = -\frac{1}{P_p(0)} \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \left(\sigma_p N_1 + \sigma'_p N_2\right) I_p r dr d\phi \qquad (2.40)$$

Agora, substituindo-se (2.26) em (2.40), pode-se escrever que:

$$\frac{dp(z)}{dz} = \left[-\int_0^\infty \int_0^{2\pi} p_n(r,\phi) \left(\sigma_p N_1 + \sigma'_p N_2\right) r dr d\phi \right] p(z)$$
(2.41)

Utilizando-se as definições de (2.30) e (2.31), uma forma alternativa para (2.41) é:

$$\frac{dp(z)}{dz} = \left\{ -\int_0^\infty \int_0^{2\pi} N_0 \sigma_p \left[1 - x(r,\phi,z) + \frac{\sigma_p'}{\sigma_p} x(r,\phi,z) \right] p_n(r,\phi) r dr d\phi \right\} p(z)$$
(2.42)

Considerando-se a equação diferencial para a função normalizada que descreve a evolução do bombeio, p(z), dada por (2.41) e incluindo-se fenomelogicamente a perda intrínseca do material hospedeiro no comprimento de onda do bombeio, $\alpha_p(\lambda_p)$, em (m⁻¹), tem-se que [8-11]:

$$\frac{dp(z)}{dz} = \left[-\alpha_p(\lambda_p) + g_p(z)\right]p(z)$$
(2.43)

onde $g_p(z)$ é o coeficiente de ganho de bombeio (m⁻¹). De (2.41), pode-se concluir que:

$$g_{p}(z) = -D \int_{0}^{\infty} \int_{0}^{2\pi} p_{n}(r,\phi) \Big(\sigma_{p}N_{1} + \sigma_{p}'N_{2}\Big) r dr d\phi$$
(2.44)

onde o parâmetro adimensional D é incluído para considerar a direção de propagação de bombeio. Convenciona-se utilizar D igual a um para bombeio propagando-se na mesma direção do sinal e D igual a menos um para bombeio na direção contra-propagante [8].

Levando-se em consideração que o núcleo é a única região da fibra que contém dopantes, o limite superior de integração em r de $g_p(z)$ pode ser substituído pelo raio do núcleo da fibra a_c , de forma que, alternativamente, (2.44) pode ser escrita como:

$$g_{p}(z) = -D \int_{0}^{a_{c}} \Phi_{n}(r, z) r dr$$
 (2.45)

onde:

$$\Phi_n(r,z) = \pi \sigma_p N_0 r_n(r) + N_0 \left(\sigma'_p - \sigma_p\right) r_n(r) \int_0^{2\pi} \cos^2(n\phi) x(r,\phi,z) d\phi$$
(2.46)

A análise para a evolução do sinal é semelhante à do bombeio [8-11]. Logo, pode-se concluir que, a partir de (2.43):

$$\frac{ds(z)}{dz} = \left[-\alpha_s(\lambda_s) + g_s(z)\right]s(z)$$
(2.47)

onde $\alpha_s(\lambda_s)$ representa a perda intrínseca do material na frequência do sinal, (m⁻¹) e $g_s(z)$ representa o ganho do sinal para um dado comprimento de onda, podendo ser escrito como [8-9,11]:

$$g_s(z) = a(z) - b(z)$$
 (2.48)

onde:

$$a(z) = \sigma_e \int_0^{2\pi} \int_0^{a_c} s_0(r) N_0(r) x(r, \phi, z) r dr d\phi$$
(2.49)

$$b(z) = \sigma_a \int_0^{2\pi} \int_0^{a_c} s_0(r) N_0(r) (1 - x(r, \phi, z)) r dr d\phi$$
(2.50)

Assumindo-se um perfil de dopagem do tipo $N_0(r) = N_0 per(r)$, (2.50) torna-se:

$$b(z) = 2\pi N_0 \sigma_a \int_0^{a_c} per(r) s_0(r) r dr - N_0 \sigma_a \int_0^{2\pi} \int_0^{a_c} per(r) s_0(r) x(r,\phi,z) r dr d\phi \qquad (2.51)$$

Utilizando-se a expressão de a(z) dada por (2.49), (2.51) assume a forma:

$$b(z) = \alpha_a \eta_s - \frac{\alpha_a}{\alpha_e} a(z)$$
(2.52)

onde, por definição, tem-se que [8]:

$$\alpha_a = N_0 \sigma_a \tag{2.53 a}$$

$$\alpha_e = N_0 \sigma_e \tag{2.53 b}$$

$$\eta_s = 2\pi \int_0^{a_c} per(r) s_0(r) r dr$$
 (2.53 c)

Assim, o coeficiente de ganho para o sinal fica:

$$g_s(z) = a(z) \left(1 + \frac{\alpha_a}{\alpha_e} \right) - \alpha_a \eta_s$$
(2.54)

A análise teórica apresentada acima pode ser aplicada ao bombeio de 1.480 nm após pequenas modificações. Dependendo da amostra de fibra dopada utilizada, a emissão estimulada de bombeio pode não ser desprezível neste comprimento de onda. Para levar em consideração esta característica da fibra, o termo $\sigma_{pe}N_2I_pdS$ deve ser adicionado a (2.27), onde σ_{pe} é a seção transversal de emissão estimulada de bombeio (m²), ou seja, a evolução longitudinal da intensidade de bombeio sofre um acréscimo devido às emissões estimuladas em 1.480 nm. Além disto, os termos R_{12} e R_{21} de (2.20) podem ser definidos como, respectivamente:

$$R_{12}(r,\phi,z) = \frac{\sigma_p(\lambda_p)I_p(r,\phi,z)}{h\upsilon_p}$$
(2.55 a)

$$R_{21}(r,\phi,z) = \frac{\sigma_{pe}(\lambda_p)I_p(r,\phi,z)}{h\nu_p}$$
(2.55 b)

Para se finalizar a análise do amplificador, deve-se ainda demonstrar a evolução do ruído gerado por emissão espontânea. A emissão espontânea também participa do processo de amplificação, gerando um ruído no sistema que se soma ao sinal óptico na saída do amplificador. O processo de emissão espontânea, como já discutido, gera um ruído que, diferentemente do sinal, é de faixa larga, bidirecional e sem polarização definida. Pode-se tentar diminuí-lo na saída da fibra ativa através do uso de filtros ópticos passa-faixa, de polarizadores, ou, ainda, de ambos. A ASE gerada pode se propagar em qualquer direção. Assim, definem-se a ASE⁺ como o ruído que se propaga no sentido de propagação do sinal e a ASE⁻ como o ruído que se propaga no sentido contrário ao sentido da propagação do sinal. A evolução da ASE, incluindo-se também a perda intrínseca no material α_s , pode ser descrita por [8-11]:

$$\frac{dP_{ASE}^{+}(z)}{dz} = \left[-\alpha_{s}(\lambda_{s}) + g_{s}(z)\right]P_{ASE}^{+}(z) + B(\upsilon_{s})h\upsilon_{s}a(z) \qquad (2.56 a)$$

$$\frac{dP_{ASE}^{-}(z)}{dz} = -\left[-\alpha_{s}\left(\lambda_{s}\right) + g_{s}(z)\right]P_{ASE}^{-}(z) - B(\upsilon_{s})h\upsilon_{s}a(z)$$
(2.56 b)

onde $P_{ASE}^+(z)$ e $P_{ASE}^-(z)$ representam as potências da ASE⁺ e ASE⁻ ao longo da fibra dopada, e [9]:

$$B(v_s) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \sigma_e(v) dv}{\sigma_e(v_s)}$$
(2.57)

é a faixa equivalente de emissão espontânea da fibra dopada, cujo valor é obtido experimentalmente. A figura de ruído F do amplificador pode ser obtida através de uma relação entre a intensidade espectral da ASE e o ganho da fibra ativa, podendo ser expressa por [8-11]:

$$F = \frac{SNR_{entrada}}{SNR_{saida}}$$
(2.58)

onde SNR é a relação sinal ruído de entrada ou de saída.

A variância da potência do sinal $V_s(z)$ pode ser escrita como [8-11]:

$$\frac{dV_s(z)}{dz} = 2[a(z) - b(z)]V_s(z) + [a(z) + b(z)]P_s(z)$$
(2.59)

onde $P_s(z)$ é a potência do sinal e a(z) e b(z) são definidos em (2.49) e (2.50), respectivamente. Para o cálculo de $P_s(z)$ deve-se, primeiramente, obter a solução de s(z), utilizando-se (2.47), e substituí-la em (2.25). A integração de (2.25) em relação à área do núcleo da fibra resulta em $P_s(z)$. Se o caso ideal de um sinal coerente de entrada $V_s(0) = 0$ é tomado como referência, e considerando que o comprimento da fibra dopada é *L*, pode-se escrever *F* como [8-9,11]:

$$F = \frac{P_s(0)^2 / V_s(0)}{P_s(L)^2 / V_s(L)} = P_s(0) \frac{V_s(L)}{P_s(L)^2}$$
(2.60)

Agora, utilizando-se (2.59), (2.60) e $P_s(z)$, F pode ser calculada como:

$$F = \int_0^L \frac{a(z) + b(z)}{G(z)} dz + 1$$
(2.61)

onde $G(z) = P_s(z)/P_s(0)$ representa o ganho ao longo da fibra ativa.

É importante salientar que as equações para a modelagem do amplificador óptico não podem ser resolvidas analiticamente. De fato, apenas soluções numéricas permitirão as simulações das diferentes topologias de EDFA. Para tanto, o *software* "Mathematica for Windows" deverá ser utilizado. Todo o desenvolvimento teórico apresentado neste Capítulo será aplicado ao algoritmo de programação do *software*, que deverá gerar resultados na forma de gráficos dos parâmetros de maior relevância do EDFA, considerando-se dois tipos distintos de bombeio.

2.8 Conclusão

Neste capítulo, uma análise teórica básica para o funcionamento do EDFA foi apresentada. Partindo-se de considerações sobre o funcionamento do amplificador, as equações de taxa que regem as transições das populações na fibra óptica foram apresentadas. Como resultado, obtiveram-se as densidades de portadores normalizadas em relação ao número total de portadores para o sistema de três níveis. Como a formulação de três níveis é aplicável apenas a EDFAs que operam com bombeio em 980 nm, a teoria foi adaptada para acomodar sistemas de dois níveis e permitir o estudo de amplificadores que utilizam bombeio em 1.480 nm. As densidades de portadores normalizadas foram, então, associadas às seções transversais de emissão e absorção da fibra dopada, e utilizadas, posteriormente, no procedimento que permitiu a obtenção do comportamento de propagação longitudinal do sinal, do bombeio, do ruído ASE e da figura de ruído no interior da fibra dopada.

Capítulo 3 Configurações de EDFAs

3.1 Introdução

No mercado, encontram-se várias companhias que produzem e/ou montam amplificadores ópticos a fibra dopada com érbio. Dependendo da aplicação, têm-se vários modelos e especificações com diferentes graus de sofisticação e complexidade. A tendência é a de existir uma configuração para o circuito óptico do amplificador que mais se aproxima do caso ideal para um enlace óptico específico. Em busca de um melhor desempenho para o amplificador, mudanças e adaptações têm sido propostas tanto na fibra quanto na composição dos componentes que constituem o amplificador [8-10, 19]. Por mudanças na fibra, devem-se entender as alterações na estrutura física da fibra, seja pelo uso de dopantes e co-dopantes, ou seja pelo uso de diferentes materiais vítreos, que podem proporcionar desde o aumento e a uniformidade do ganho óptico como o alargamento da faixa de freqüência de operação. Por alterações no circuito óptico, devem-se entender as diferentes configurações de utilização do amplificador, fazendo ou não uso de componentes ópticos adicionais, visando, além do aumento do ganho e melhoria da *SNR*, a correção do espectro de ganho do amplificador, principalmente dos que utilizam érbio como dopante.

Neste capítulo, apresentam-se diferentes topologias para um EDFA. Partindo-se da configuração mais simples e convencional, com bombeio co-propagante, alternativas de amplificadores com bombeio contra-propagante e bidirecional são analisadas qualitativamente. Na seqüência, detalham-se as estruturas de EDFA do tipo reflexivo. Estas incluem topologias com o retorno de bombeio, o retorno do sinal e com o retorno de sinal e

de bombeio. Por fim, apresenta-se uma variação desta última, onde o bombeio e sinal são refletidos de volta a fibra dopada, porém, com filtragem do sinal para a remoção do ruído ASE.

3.2 Configuração de EDFA com bombeio co-propagante

A Fig. 3.1 mostra o diagrama esquemático da configuração típica de um EDFA, o qual é composto por uma fibra monomodo dopada com érbio, da ordem de dezenas de metros de comprimento.



Fig. 3.1 – Diagrama esquemático do EDFA convencional.

Ao entrar no amplificador, um sinal óptico é sobreposto ao sinal proveniente de um laser de bombeio em um acoplador direcional WDM (*wavelength division multiplexer* – multiplexador por divisão em comprimento de onda). A função do laser de bombeio, como apresentada no Capítulo 2, é a de fornecer energia para que o processo de amplificação ocorra, de forma análoga ao que acontece com as fontes de tensão DC nos amplificadores eletrônicos. Assim, ao se propagar pela fibra dopada, cada canal óptico do sinal de entrada é amplificado por meio de emissões estimuladas, frutos da inversão da população de portadores na fibra dopada provocada pelo laser de bombeio. A seguir, o sinal amplificado

passa por um segundo WDM, cuja função é a de filtrar o sinal de bombeio. Na saída do EDFA, um isolador é utilizado para impedir que reflexões ou sinais indesejados presentes na saída sejam acoplados ao amplificador. Observa-se, portanto, que o funcionamento do EDFA depende da utilização de um dispositivo de bombeamento de potência óptica. De uma maneira geral, pode-se dizer que a função do dopante na fibra é a de converter a energia óptica de bombeio em energia disponível para a amplificação do sinal óptico que está sendo transmitido.

Em vista do que foi exposto, observa-se que além da importância da utilização dos EDFAs nos sistemas de comunicação óptica, deve-se tentar otimizar seus parâmetros de funcionamento. Uma das alternativas viáveis para tal é o estudo de diferentes configurações para estes amplificadores. Desta forma, parâmetros como ganho, figura de ruído e saturação podem ser convenientemente melhorados para um desempenho global superior do EDFA.

3.3 Configuração de EDFA com bombeio contra-propagante

Na Fig. 3.1 descreveu-se o circuito de um amplificador óptico convencional a fibra dopada com érbio. A modificação mais simples que pode ser feita na configuração original do EDFA é a da inversão do sentido de propagação do bombeio, ou seja, o laser de bombeio é colocado na extremidade de saída do amplificador, de forma que a sua propagação é contrária à propagação do sinal que se deseja amplificar. Tal amplificador é mostrado no diagrama esquemático da Fig. 3.2.



Fig. 3.2 – Diagrama esquemático do EDFA com bombeio contra-propagante.

Com relação à configuração original, o amplificador com bombeio contrapropagante possui certas vantagens, como, por exemplo, um ganho óptico ligeiramente maior [8-9]. Fisicamente, esta propriedade ocorre devido à particular distribuição espacial do ganho do amplificador, que, neste caso, concentra-se na saída do EDFA. Desta forma, com pouco ganho na entrada, o sinal tende a ser menos amplificado no início da fibra, diminuindo as chances de saturação, e, assim, resultando em um ganho líquido maior para cada comprimento de onda de interesse. Por outro lado, a *SNR* da configuração original tende a ser superior [8-9]. Isto acontece devido ao fato de que, com o bombeio contrapropagante, o menor ganho na entrada do EDFA resulta numa maior susceptibilidade do sinal de entrada à influência da ASE, com conseqüente diminuição da relação sinal/ruído. As características de funcionamento do EDFA descritas nesta seção (e nas seções subseqüentes) serão novamente comentadas no Capítulo 4, após as simulações numéricas que utilizam a teoria básica desenvolvida no capítulo anterior.

3.4 Configuração de EDFA com bombeio bidirecional

Como mencionado anteriormente, a configuração com bombeio co-propagante apresenta uma *SNR* melhor, ao mesmo tempo em que a configuração com bombeio contra-

propagante apresenta um ganho maior. Desta forma, uma terceira configuração de EDFA foi idealizada utilizando o bombeio bidirecional. Em outras palavras, emprega-se, nesta configuração, até dois lasers de bombeio, um deles na entrada e o outro na saída da fibra dopada, como pode ser verificado na Fig. 3.3.



Fig. 3.3 – Diagrama esquemático do amplificador a fibra com bombeio bi-direcional.

A situação de bombeio bidirecional resulta em um melhor aproveitamento do potencial da fibra dopada, pois combina os dois tipos de bombeio [8-9]. Como resultado, espera-se que esta configuração apresente um ganho ligeiramente maior que aqueles das configurações com bombeio co-propagante e contra-propagante, porém, com uma figura de ruído menor apenas que aquela da configuração com bombeio contra-propagante.

3.5 Configurações de EFDAs reflexivos

A partir do conceito de amplificador com bombeio bidirecional, outras configurações de amplificadores foram propostas [8-9]. Em geral, estas configurações se baseiam na utilização de um elemento refletor em uma das extremidades do EDFA, sendo portanto, classificadas como configurações de amplificador reflexivo. Este elemento refletor pode ser desde uma clivagem apropriada da fibra, acrescida de uma cobertura

refletora, até uma grade de difração. Assim, dependendo da configuração e do dispositivo refletor empregados, pode-se reaproveitar o bombeio, o sinal, ou ambos novamente no interior do EDFA, utilizando-se de forma mais adequada à alta capacidade da fibra dopada e atingindo-se resultados melhores para sinais de pequena intensidade. De uma maneira geral, os amplificadores reflexivos têm como principal característica o aumento do ganho com relação à configuração convencional [8-9].

3.5.1 EFDA reflexivo com reflexão de bombeio

Na Fig. 3.4, ilustra-se o diagrama esquemático para uma configuração de amplificador reflexivo, onde o bombeio é refletido de volta para o EDFA.



Fig. 3.4 – Diagrama esquemático para amplificador reflexivo com reflexão de bombeio.

Neste caso, o elemento reflexivo pode ser uma grade de difração ou um semiespelho, que transmite todos os comprimentos de onda exceto aqueles em torno do comprimento de onda central do bombeio. Com esta configuração, o bombeio é reaproveitado, simulando-se uma situação de bombeio bidirecional, como a da Fig. 3.3. Deve-se ressaltar que a intensidade de bombeio refletida é menor que a inicialmente acoplada à fibra, devido ao fato da potência de bombeio já ter sido absorvida na sua primeira passagem pela fibra dopada. As características do ganho e da *SNR* são semelhantes àquelas do bombeio bidirecional. A vantagem desta configuração é a utilização de apenas um elemento passivo no lugar de um segundo laser de bombeio, ou, alternativamente, no lugar de associações de acopladores ópticos e WDMs quando apenas um laser de bombeio é utilizado.

3.5.2 EDFA reflexivo com reflexão de sinal

Na Fig. 3.5, ilustra-se o diagrama esquemático para uma configuração de amplificador reflexivo, onde só o sinal de entrada é refletido de volta para o EDFA. Neste caso, o elemento reflexivo pode ser uma grade de difração ou um semi-espelho, o qual transmite todos os comprimentos de onda exceto aqueles correspondentes a uma faixa de valores em torno do comprimento de onda do sinal de entrada. Nesta configuração, o sinal de entrada sofre dupla amplificação: uma, mais intensa, na direção propagante, e outra, menos intensa, na direção contra-propagante. A diferenca entre os ganhos advém da absorção de bombeio mais acentuada vista pelo sinal refletido, tendendo a ser maior ou menor se o amplificador operar ou não próximo à sua condição de saturação. Em relação à configuração convencional e para um bombeio de 1.480 nm [8-9], a reflexão do sinal pode melhorar o coeficiente de ganho do amplificador. Uma das desvantagens desta configuração é a de que a ASE também é refletida e re-amplificada, o que tende a deteriorar a relação sinal/ruído na entrada do amplificador, aumentando a sua figura de ruído global em relação à configuração convencional. Como pode ser observado, apenas uma das portas do amplificador funciona como entrada e saída para o sinal, cuja a separação é convenientemente feita por um circulador óptico. A função do WDM é a de acoplar o sinal de bombeio à fibra dopada. Um absorvedor colocado na extremidade oposta do EDFA,

desde que perfeitamente casado com o índice de refração da fibra dopada, evita que reflexões espúrias do sinal de bombeio aconteçam.



Fig. 3.5 – Diagrama esquemático para amplificador reflexivo com reflexão de sinal.

3.5.3 EDFA reflexivo com reflexão de bombeio e de sinal

Na Fig. 3.6, ilustra-se o diagrama esquemático para uma configuração de amplificador reflexivo, onde o sinal de entrada e o bombeio são refletidos de volta para o EDFA. Neste caso, o elemento reflexivo pode ser um espelho alinhado perpendicularmente à extremidade da fibra ou uma cobertura reflexiva aplicada à superfície clivada da fibra. Com esta configuração, o bombeio é reaproveitado, simulando uma situação de bombeio bidirecional. Deve-se ressaltar que a intensidade de bombeio refletida é menor que a inicialmente acoplada à fibra, devido ao fato da potência de bombeio já ter sido absorvida na sua primeira passagem pela fibra dopada. Já o sinal de entrada sofre amplificação duas vezes, a primeira na direção propagante e a segunda, com intensidade maior que o valor obtido na configuração anterior, na direção contra-propagante. O ganho líquido obtido com esta configuração deve ser, portanto, o maior possível dentre as configurações apresentadas

até agora. Intuitivamente, uma possível desvantagem para esta configuração é o fato de que, além do sinal de entrada e do bombeio, a ASE também é refletida e reamplificada, o que poderia deteriorar a relação sinal/ruído na saída do amplificador e aumentar a sua figura de ruído em relação àquela da configuração convencional. Como pode ser observado, uma das portas do amplificador funciona como entrada e saída para o sinal. A função do WDM é a de acoplar e desacoplar o sinal de bombeio da fibra dopada, de forma que o mesmo não chegue ao circulador óptico. A função do circulador é a de separar o sinal de entrada do sinal de saída após a amplificação.



Fig. 3.6 – Diagrama esquemático para amplificador reflexivo com reflexão de bombeio e sinal.

3.5.4 EDFA reflexivo com reflexão de bombeio e de sinal filtrado

Considerando-se o desempenho da configuração anterior em relação à figura de ruído, a Fig. 3.7 mostra um arranjo experimental onde a influência da ASE é parcialmente removida em relação ao sinal refletido de volta para a fibra. Para tanto, os caminhos de reflexão para o sinal e o bombeio são separados por meio de um *WDM*. O sinal de bombeio

é totalmente refletido em direção ao *WDM* e à fibra dopada, enquanto que, no caminho do sinal, existe a inclusão de um filtro óptico. A função do filtro no caminho de reflexão do sinal, filtro este que possui uma banda de operação comercial menor que 1 nm e é, geralmente, centrado no comprimento de onda do sinal (um canal de um sistema *WDM*), é a de remover a influência da ASE que se localiza fora de sua banda de passagem. Assim, o ganho para o sinal refletido tenderia a ser maior que o da configuração anterior, já que a absorção de fótons devido à ASE fica minimizada. De uma forma intuitiva, com a ASE menor, a *SNR* e, também, a figura de ruído do amplificador poderiam ser melhoradas. Como exposto acima, o filtro incorporado ao amplificador reflexivo diminui a contribuição da ASE, porém, dentro da banda de operação do filtro ou filtros, a ASE continuará a afetar o sistema.



Fig. 3.7 – Diagrama esquemático para amplificador reflexivo com reflexão de bombeio e sinal filtrado.

Finalmente, deve-se destacar que a confirmação em relação aos pontos favoráveis e desfavoráveis que cada uma das configurações apresentadas acima vai depender da

simulação destes sistemas e da realização de testes práticos através de montagens experimentais. Neste contexto, apresentam-se, no próximo capítulo, os resultados das simulações computacionais das diferentes configurações de EDFA para dois tipos de bombeio, com ênfase no comportamento dos principais parâmetros do EDFA, como o ganho de sinal, a figura de ruído e a propagação da ASE, entre outros.

3.6 Conclusão

Nesta seção, introduziram-se diferentes topologias de circuitos ópticos para um EDFA. De uma maneira resumida, os princípios e as características particulares de funcionamento de sete configurações de amplificadores foram apresentados. Estas configurações servirão de base para as simulações computacionais do Capítulo 4.

Capítulo 4

Simulações computacionais para EDFAs

4.1 Introdução

Este capítulo começa enunciando as considerações que permitem a adaptação da teoria apresentada no Capítulo 2 às simulações computacionais das topologias de EDFA apresentadas no Capítulo 3. Na seqüência, apresentam-se os parâmetros da fibra dopada com érbio utilizada como referência neste trabalho. De posse destes parâmetros, os resultados numéricos para as principais características de funcionamento das diferentes topologias de EDFAs são mostradas na forma de tabelas e gráficos, para bombeios em 980 nm e 1.480 nm. Estes resultados são obtidos para várias combinações de níveis de potência óptica de sinal de entrada e de bombeio, e comprimentos de fibra dopada, buscando-se a otimização das configurações consideradas. Por fim, além das comparações entre os desempenhos de cada configuração para cada tipo de bombeio empregado, comparações entre as próprias topologias são apresentadas, onde são ressaltadas as vantagens e desvantagens de cada uma delas para um dado tipo de bombeio.

4.2 Considerações para as simulações das configurações de EDFA

Com o recente surgimento de novas ferramentas computacionais e o crescente aumento da capacidade de processamento dos atuais computadores, tornou-se possível a execução de simulações numéricas dos diversos dispositivos ópticos, que a cada dia aumentam em número e ganham mais espaço no mercado. O software "Mathematica" foi escolhido para ser utilizado nas simulações realizadas neste capítulo por ser uma excelente ferramenta para cálculos numéricos e, ainda, pela existência de pesquisas anteriores neste domínio e área. Dando continuidade a esta seqüência de trabalhos já desenvolvidos, novos programas foram escritos utilizando uma versão mais atualizada do software "Mathematica" (versão 4.0). O software é constituído de dois pacotes principais e várias bibliotecas. Os pacotes principais são responsáveis pela parte operacional, com o usuário interagindo com o pacote chamado "Front End", onde são feitas a apresentação, a edição do texto, a utilização de comandos e a apresentação de resultados, sejam estes últimos compostos de números, tabelas ou gráficos. O outro pacote, chamado de "Kermel", é responsável pelo processamento matemático e pela execução dos comandos utilizados no software "Mathematica 4.0". O software "Mathematica 4.0" utiliza o método de Runge-Kutta de quarta ordem para resolver as equações diferenciais. O equipamento utilizado para as simulações foi um microcomputador com processador "Pentium 4" e 512 MB de RAM.

Para as simulações da evolução espacial do sinal, do bombeio e da ASE no EDFA, algumas considerações devem ser feitas, as quais permitem a introdução do modelo teórico do Capítulo 2 no programa de simulação. Primeiramente, considera-se que as funções que descrevem o ganho e a absorção de bombeio tenham uma evolução suave ao longo da fibra dopada com érbio. Em outras palavras, pode-se assumir que, num trecho de fibra dopada com érbio de comprimento incremental Δz , os termos a(z), b(z), $g_s(z)$ e $g_p(z)$ são aproximadamente constantes no intervalo $[z, z+\Delta z]$. Desta forma, a fibra dopada de comprimento L pode ser dividida em seções de comprimento Δz , onde as análises de comportamento de cada seção utilizam a teoria desenvolvida no Capítulo 2, com os termos a(z), b(z), $g_s(z)$ e $g_p(z)$ considerados constantes para cada seção. A Fig. 4.1 ilustra o procedimento de divisão da fibra em seções. Ela também mostra as condições de contorno utilizadas. A modelagem da fibra dopada assume que o sinal de saída a cada trecho é calculado resolvendo-se as equações diferenciais que descrevem o comportamento da fibra. Este resultado serve como sinal de entrada para o próximo trecho da fibra dopada com érbio. A partir da primeira seção, onde as condições de contorno iniciais são assumidas como p(0) = s(0) = 1 e $P_{ASE}^+(0) = 0$, os cálculos são sucessivamente repetidos a cada Δz até o comprimento total da fibra dopada com érbio ser alcançado.



Figura 4.1 - Modelo incremental para uma fibra dopada de comprimento L.

Portanto, considerando-se o exposto acima, o algoritmo de simulação do comportamento dos parâmetros de operação da fibra dopada ao longo do seu comprimento L exige, além dos parâmetros e características físicos da fibra dopada, que serão descritos na Seção 4.3, a definição do número total de seções k e das condições de contorno mostradas na Fig. 4.1. Tendo-se como referência a configuração básica do EDFA, partindo-se da primeira seção da fibra e considerando-se as condições iniciais de contorno e as

potências ópticas de entrada do sinal, $P_s(0)$, e do bombeio, $P_p(0)$, calculam-se os valores das densidades de portadores normalizadas $x(r,\phi,0)$ e 1 – $x(r,\phi,0)$ utilizando-se (2.36), (2.21) e (2.22). Como os parâmetros a(z), b(z), $g_p(z)$ e $g_s(z)$ são assumidos constantes para cada seção da fibra de comprimento Δz , $x(r,\phi,0) \in 1 - x(r,\phi,0)$ são utilizados em (2.49), (2.50), (2.45) e (2.54), respectivamente, para a obtenção destes parâmetros na primeira seção da fibra. Com os valores calculados de a(z), b(z), $g_p(z) \in g_s(z)$, o sistema de equações diferenciais dado por (2.43), (2.47) e (2.56) pode ser resolvido, fornecendo, respectivamente, o comportamento longitudinal de p(z), $s(z) \in P^+_{ASE}(z)$ ao longo da primeira seção de comprimento Δz . Ao final desta seção, os valores de $p(\Delta z) s(\Delta z) e P^{+}_{ASE}(\Delta z) são$ calculados. Estes valores servem de condições iniciais para a próxima seção da fibra e são utilizados no cálculo de $x(r,\phi, \Delta z)$, $1 - x(r,\phi, \Delta z)$ e, conseqüentemente, de a(z), b(z), $g_p(z)$ e $g_s(z)$ para a esta seção. O procedimento acima é repetido até que a última seção da fibra dopada seja analisada, ou, em outras palavras, até que o comprimento L da fibra seja alcançado. A partir das expressões finais de p(z) e de s(z), $P_s(z)$ e $P_p(z)$ podem ser obtidas integrando-se, respectivamente, (2.25) e (2.26) em relação à área do núcleo da fibra.

Entretanto, nesta primeira evolução do programa de z = 0 a z = L, a influência da ASE⁻ não é considerada, uma vez que o sentido de propagação da ASE⁻ é contrário àqueles do sinal e da ASE⁺. Esta omissão leva a um erro na análise dos parâmetros operacionais do EDFA. Para corrigir este erro, primeiramente, utiliza-se o conjunto de valores calculados para a(z), b(z), $g_p(z)$ e $g_s(z)$ em cada seção da fibra dopada entre z = 0 e z = L para a obtenção de funções aproximadas destes parâmetros. Com estas funções aproximadas, pode-se, ainda numa primeira aproximação, obter uma expressão para $P_{ASE}(z)$ a partir de (2.56), considerando-se a condição de contorno inicial $P_{ASE}(L) = 0$. Desta expressão para P $_{ASE}(z)$, torna-se possível o cálculo dos valores de $P_{ASE}(0)$ e de P_{ASE} nos limites de cada seção da fibra dopada. Este procedimento finaliza a primeira interação do algoritmo. No entanto, as expressões obtidas para s(z), p(z), $P_{ASE}^+(z)$ e $P_{ASE}(z)$ não podem ser consideradas como finais, dadas as aproximações feitas para a obtenção de cada uma delas.

Numa segunda interação do programa, o valor de $P_{ASE}(0)$ da primeira interação é utilizado, juntamente com as condições de contorno, para corrigir $x(r,\phi,0)$ e $1 - x(r,\phi,0)$, de forma que estas expressões passem agora a considerar, numa primeira aproximação, o efeito da ASE⁻. Com os novos valores de $x(r,\phi,0)$ e $1 - x(r,\phi,0)$, corrigem-se os valores de a(z), b(z), $g_p(z)$ e $g_s(z)$ e, como anteriormente descrito, determinam-se p(z), s(z) e $P^+_{ASE}(z)$ ao longo da primeira seção de comprimento Δz . Ao final desta seção, os valores de $p(\Delta z)$ s (Δz) e $P^+_{ASE}(\Delta z)$ são recalculados. Estes valores, juntamente com $P_{ASE}(\Delta z)$ da primeira interação, servem de condições iniciais para a próxima seção da fibra e são utilizados no cálculo dos valores corrigidos de $x(r,\phi, \Delta z)$, $1 - x(r,\phi, \Delta z)$ e, conseqüentemente, de a(z), b(z), $g_p(z)$ e $g_s(z)$ para a esta seção. O procedimento é repetido até a última seção, sempre considerando as condições de contorno para p(z), s(z), $P^+_{ASE}(z)$ e $P_{ASE}(z)$ (obtido da interação anterior) ao início de cada seção, de forma que valores corrigidos de $P^+_{ASE}(z)$, $P_s(z)$ e $P_p(z)$ são obtidos após todas as seções da fibra serem consideradas.

Novamente, com os valores de a(z), b(z), $g_p(z)$ e $g_s(z)$ corrigidos durante a primeira parte da segunda interação do programa, geram-se novas funções aproximadas destes parâmetros entre z = 0 e z = L. De posse destas funções, obtém-se uma nova expressão para $P_{ASE}(z)$ a partir da condição de contorno inicial $P_{ASE}(L) = 0$. Com esta nova expressão aproximada para $P_{ASE}(z)$, os valores de $P_{ASE}(0)$ e de P_{ASE} nos limites de cada seção da fibra dopada são recalculados e uma vez mais utilizados para uma nova correção, já em uma terceira interação do programa, de a(z), b(z), $g_p(z)$ e $g_s(z)$. Como conseqüência, e considerando-se sempre as condições de contorno iniciais, $P_s(z)$, $P_p(z)$, $P_{ASE}^+(z)$ e $P_{ASE}(z)$ são novamente obtidas. Por fim, este procedimento é repetido até que o erro no desvio dos valores de $P_s(z)$, $P_p(z)$, $P_{ASE}^+(z)$ e $P_{ASE}(z)$ de uma interação para outra convirja para um determinado valor, que pode ser definido previamente. Dependendo da topologia do EDFA, a utilização de 10 a 15 interações para o programa é suficiente para a obtenção de desvios menores que 1% [8,20]. Neste trabalho, assumiu-se um número de 20 interações, o que resultou em desvios menores do que 0,05% quando a fibra dopada é divida em 200 seções. O tempo médio de processamento para cada topologia nestas condições gira em torno de 5 minutos. Já se o número de seções é de 2.000, o tempo médio de processamento fica em torno de uma hora, com o desvio médio caindo apenas para cerca de 0,04%.

Deve-se destacar que o procedimento descrito acima é válido apenas para a configuração básica do EDFA. Para as outras configurações apresentadas no Capítulo 3, pequenas modificações no algoritmo devem ser implementadas. Por exemplo, no caso da topologia que apresenta bombeio contra-propagante, as condições de contorno iniciais se alteram, uma vez que, agora, tem-se p(L) = 0. Portanto, a primeira evolução do programa de z = 0 a z = L, gera apenas as expressões para as potências de sinal e de ASE⁺. Seguindo-se o mesmo procedimento anterior, com as expressões aproximadas de a(z), b(z), $g_p(z)$ e $g_s(z)$ obtidas, gera-se $P_{ASE}(z)$ e, neste caso, também p(z). Correções nos valores de potência são feitas a cada interação do programa, considerando-se as condições de contorno de entrada e saída da fibra e os valores de $P_{ASE}(z)$ e p(z) da interação anterior, até que os desvios nos valores de $P_s(z)$, $P_p(z)$, $P_{ASE}^+(z)$ e $P_{ASE}(z)$ sejam desprezíveis.

Ainda com relação às modificações no algoritmo, deve-se destacar que algumas topologias de EDFA exigem que pequenas rotinas sejam incorporadas ao programa principal. Estas rotinas são necessárias para se considerar a existência de componentes ópticos externos à fibra dopada, como acontece no caso das topologias de amplificadores reflexivos. De uma forma simplificada, estas rotinas tendem a incorporar o efeito dos elementos externos a fibra dopada na forma de condições de contorno extras para o algoritmo principal do EDFA.

4.3 Amostra de fibra dopada utilizada nas simulações

Para as simulações das topologias de EDFA, utilizam-se os parâmetros da amostra de fibra dopada listados na Tab. 4.1, que correspondem àqueles de um dos tipos de fibra dopada com érbio produzida pela Corning Optical Fiber Inc. (*Corning Pure Mode Er1550C3 Photonic Fiber*). A Tab. 4.1 apresenta os valores dos diversos parâmetros definidos na análise teórica do Capítulo 2. Para as simulações, $\alpha_s \in \alpha_p$ foram desprezadas. Deve-se ressaltar que, para a manipulação de (2.23) e (2.24), foi necessária a criação de uma sub-rotina auxiliar ao programa de simulação, onde o valor da abertura numérica da Tab. 4.1 é usado na determinação das constantes de propagação normalizadas *u* e *w*.

Além da Tab. 4.1, as Fig. 4.2 e 4.3 apresentam, respectivamente, os gráficos dos parâmetros de emissão e absorção em função do comprimento de onda para esta amostra de fibra dopada. No caso da Fig. 4.2, a variação do parâmetro de emissão é mostrada entre 1.450 e 1.700 nm. Para esta fibra em particular, os valores para o parâmetro de emissão ao redor da faixa 980 nm são desprezíveis. Já a Fig. 4.3 mostra a variação do parâmetro de absorção para duas faixas de valores distintas, a primeira desde 900 a 1.100 nm e a segunda de 1.450 a 1.700 nm. Dos valores dos parâmetros de absorção e emissão apresentados, podem-se determinar as seções transversais de absorção e emissão para sinal e bombeio

listadas na Tab. 4.1. Assim, simulações para diferentes tipos de bombeio e comprimentos de onda de sinal são possíveis, de acordo com a necessidade de cada análise.

Parâmetro	Valor
Raio do núcleo - a_c	1,5 µm
Comprimento de onda do sinal - λ_s	1,550 μm
Comprimento de onda do laser de bombeio - λ_p	0,98 e 1,48 μm
Concentração de dopantes por unidade de volume - N_0	4 10 ¹⁸ ions/cm ⁻³
Seção transversal de emissão para o sinal - σ_e	$6,2 \ 10^{-21} \ \mathrm{cm}^2$
Seção transversal para absorção do sinal - σ_a	$4,52 \ 10^{-21} \mathrm{cm}^2$
Seção transversal de absorção para o estado excitado (0,98 μ m) - σ'_p	$0,0 \text{ cm}^2$
Seção transversal de absorção de bombeio (0,98 μ m) - σ_p	4,87 10 ⁻²¹ cm ²
Seção transversal de absorção para o estado excitado (1,48 μ m) - σ'_p	$0,0 \text{ cm}^2$
Seção transversal de absorção para o bombeio (1,48 μ m) - σ_p	4,41 10 ⁻²¹ cm ²
Seção transversal de emissão para o bombeio (1,48 μ m apenas) - σ_{pe}	$3,03 \ 10^{-21} \ \mathrm{cm}^2$
Tempo de vida de fluorescência do estado metaestável - τ_2	10 ms
Faixa equivalente de emissão espontânea da fibra dopada - B	7 THz [9]
Abertura numérica - AN	0,21

Tabela 4.1 – Parâmetros da fibra utilizada nas simulações de topologias de EDFA.

Na Fig. 4.3, pode-se observar que o parâmetro de absorção para o bombeio em 980 nm é maior que aquele para 1.480 nm. Em contrapartida, o parâmetro de emissão para 1.480 nm é maior que o parâmetro de emissão para 980 nm, sendo que, para esta amostra de fibra, este último é desprezível. Estes gráficos levam a considerações interessantes no que diz respeito ao possível ganho das configurações de EDFA. O maior valor de parâmetro de absorção para o bombeio em 980 nm pressupõe uma maior concentração de portadores no nível E_2 que aquela que seria obtida com bombeio em 1.480 nm, o que resultaria, portanto, numa maior disponibilidade de portadores para a geração de fótons estimulados para o sinal. Por um outro lado, enquanto que para 980 nm praticamente todos os portadores excitados pelo bombeio irão participar do processo de amplificação do sinal, para 1.480 nm existe uma probabilidade não-nula de acontecerem emissões estimuladas no próprio comprimento de onda de bombeio, reduzindo-se, portanto, a população do nível metaestável para este tipo de bombeio. Assim, pode-se concluir que, em uma primeira análise, dependendo das condições de contorno utilizadas, os valores de ganho conseguidos com bombeio de 980 nm tenderão a ser maiores para um comprimento mais curto de fibra dopada que os alcançados quando o bombeio de 1.480 nm é utilizado.



Fig. 4.2 – Parâmetro de emissão em função do comprimento de onda para a amostra de fibra óptica dopada utilizada.



Fig. 4.3 – Parâmetro de absorção em função do comprimento de onda para a amostra de fibra óptica dopada utilizada: faixas de (a) 900 a 1.100 nm e (b) 1.450 a 1.700 nm.

O último parâmetro físico da fibra que precisa ser definido é o perfil de distribuição da dopagem na fibra amostra. O perfil mais simples é aquele que assume a forma de um degrau, ou seja, que considera uma distribuição uniforme de dopantes no núcleo, sem que os mesmos se encontrem na casca. Além de mais simples, o perfil degrau cria condições que permitem uma maior precisão em algumas das aproximações assumidas durante a análise teórica do Capítulo 2. No entanto, durante o processo de fabricação da fibra dopada, o perfil degrau ideal é difícil de ser alcançado. Uma expressão ou função que pode ser utilizada na representação da dopagem da fibra para a modelagem do EDFA é dada por [9]:

$$per(r) = 1 - \left(\frac{r}{a_c}\right)^{\alpha} \tag{4.1}$$

onde o termo α é responsável por desviar o perfil de dopagem do padrão degrau ideal, aproximando a simulação dos resultados obtidos na prática.

A Fig. 4.4 mostra o perfil de dopagem dado por (4.1) em função da distância normalizada em relação ao eixo óptico da fibra (raio normalizado da fibra dopada - r/a_c) para vários valores de α . Pode-se observar que, quanto maior o valor de α , mais próximo per(r) se torna do perfil degrau ideal, o qual acontece quando α tende a infinito. Para a amostra de fibra utilizada, assumiu-se que o perfil que mais se adapta às suas características é aquele quando $\alpha = 3$. Para as simulações, assumiu-se também que a distribuição de dopantes na direção z é uniforme.


Fig. 4.4 – Perfil per(r) em função do raio normalizado, tendo α como parâmetro.

4.4 Simulações preliminares

Uma das vantagens da utilização de programas de simulação na análise de EDFAs está diretamente ligada ao projeto do amplificador. Dado o custo das fibras dopadas, a primeira pergunta que surge no projeto é qual o comprimento ideal de fibra a ser utilizado no amplificador. Para fibras dopadas com érbio, o ganho do amplificador tende a aumentar com o comprimento da fibra até atingir um valor máximo para o chamado comprimento ótimo de fibra. Acima deste valor, o ganho começa a decair lentamente devido ao decréscimo na inversão de portadores pelo alto consumo provocado pela densidade elevada de fótons e, também, pela própria atenuação da fibra. Em montagens experimentais é comum utilizar-se o método *cut-back* (de corte) na determinação do comprimento ótimo. Este método consiste em, inicialmente, aplicarem-se sinal e bombeio simultaneamente a uma fibra dopada de comprimento supostamente maior que o comprimento ótimo. Para os

valores iniciais de potência acoplada, mede-se o ganho correspondente que a fibra pode fornecer. Em seguida, a fibra é cortada e o ganho novamente medido. O procedimento é repetido até que uma sensível variação de ganho seja detectada. O máximo valor de ganho para um determinado comprimento de fibra fornece uma estimativa do comprimento ótimo. Contudo, do que foi exposto acima, o método de corte é um processo destrutivo, pois cada trecho de fibra removido não poderá mais ser aproveitado. A simulação, no entanto, permite que uma análise preliminar do amplificador seja conduzida, reduzindo-se os riscos de desperdício de material, com a possibilidade extra de estimar os comportamentos do sinal, do bombeio, da ASE e da figura de ruído do EDFA.

Para cada configuração de EDFA e tipo de fibra dopada utilizada existe um comprimento ótimo de fibra com o qual se consegue um maior ganho para o amplificador. Utilizando-se os parâmetros da Tab. 4.1, as Fig. 4.5 e 4.6 mostram gráficos dos valores do ganho do sinal na saída de um EDFA convencional em função do comprimento total da fibra dopada, tendo a potência de entrada do sinal e o comprimento de onda de bombeio como parâmetros. As condições de operação do amplificador assumem valores de potência de entrada para o sinal de 100 μ W (-10 dBm) e 1 μ W (-30 dBm), além de valores de potência de entrada para o bombeio de 50 mW (17 dBm), utilizado na confecção dos gráficos da Fig. 4.5, e 100 mW (20 dBm), utilizado na confecção dos gráficos da Fig. 4.6. Como pode ser observado, o ganho do sinal tende a aumentar com o comprimento total da fibra dopada até atingir um valor máximo. O comprimento da fibra dopada (L_{dtimo}). Podese observar que, para ambos os comprimentos de onda de bombeio, o comprimento ótimo da fibra dopada varia com as potências ópticas de entrada de sinal e de bombeio. Este efeito

é mais nítido no caso do bombeio de 980 nm, onde os valores máximos de ganho ocorrem, na Fig. 4.5, para cerca de 9 m no caso de $P_s(0) = -30$ dBm, e 8 m no caso de $P_s(0) = -10$ dBm, e, na Fig. 4.6, para cerca de 10 m no caso de $P_s(0) = -30$ dBm e 9,5 m no caso de $P_s(0) = -10$ dBm. Já em relação ao bombeio de 1.480 nm, como esperado, os valores de ganho máximo ocorrem para valores de comprimento de fibra dopada maiores, uma vez que, neste caso, a absorção e a emissão estimulada de fótons de bombeio acontece simultaneamente, forçando a inversão de população a ocorrer para comprimentos maiores de fibra dopada. Os valores máximos de ganho para bombeio em 1.480 nm ocorrem, na Fig. 4.5, para cerca de 28 m no caso de $P_s(0) = -30$ dBm, e 27 m no caso de $P_s(0) = -10$ dBm, e, na Fig. 4.6, para cerca de 31 m no caso de $P_s(0) = -30$ dBm e 30 m no caso de $P_s(0)$ = -10 dBm. Portanto, se um mesmo comprimento de onda de bombeio e um mesmo valor de potência de entrada para o sinal são considerados, pode-se observar que o valor máximo de ganho e o comprimento ótimo da fibra aumentam com a potência de bombeio. Isto ocorre uma vez que o aumento na potência de bombeio causa o aumento da quantidade de fótons de bombeio disponíveis para a amplificação, ocasionando a condição de inversão de população por distâncias mais longas no interior da fibra dopada antes que a absorção atue de forma significativa. Como resultado, mesmo considerando-se a ASE, o sinal passa a sofrer uma maior amplificação para um mesmo valor de comprimento de fibra, ao mesmo tempo em que o comprimento ótimo se desloca para valores maiores. Entretanto, se um mesmo comprimento de onda de bombeio e um mesmo valor de potência de entrada para o bombeio são considerados, pode-se observar que o valor máximo de ganho e o comprimento ótimo da fibra diminuem com o aumento da potência de entrada do sinal. Este comportamento pode ser atribuído à saturação do amplificador, que é possível para potências de entrada do sinal mais altas.



Fig. 4.5 – Ganho de sinal de um EDFA convencional bombeado com 50 mW em função do comprimento da fibra dopada, tendo a potência de entrada de sinal e o comprimento de onda de bombeio como parâmetros.

Ainda nas Fig. 4.5 e 4.6, os valores de ganho do sinal apresentam uma tendência a diminuir após o valor de $L_{\delta timo}$. Isto ocorre pois a potência de bombeio não é mais suficiente para manter a inversão de população dos portadores dos íons de érbio em níveis que possam continuar amplificando o sinal juntamente com a concorrência da ASE, ou seja, a fibra acaba se tornando um meio que passa apenas a absorver o sinal. Conseqüentemente, tem-se uma perda de eficiência no dispositivo.

Apesar do comprimento ótimo ser um fator que pode variar com a topologia de EDFA empregada, a referência para as simulações será um comprimento de fibra dopada próximo ao valor de comprimento ótimo obtido para a configuração convencional. Este procedimento permite a análise das vantagens e desvantagens da utilização de uma ou outra topologia em relação àquela que é a mais simples delas. Portanto, levando-se em consideração também os resultados de outras simulações para a configuração típica do EDFA com condições de contorno iniciais diferentes daquelas utilizadas nas Fig. 4.5 e 4.6, optou-se por escolher um comprimento de fibra para as simulações das diferentes topologias de EDFA de 10 m, no caso de bombeio em 980 nm, e de 25 m, no caso de bombeio em 1.480 nm. Para estas mesmas simulações, as quais serão apresentadas a partir da próxima seção, assumem-se como condições de contorno iniciais os valores de 1 µW (-30 dBm) para a potência de entrada do sinal e de 50 mW (17 dBm) para a potência de entrada do bombeio.



Fig. 4.6 – Ganho de sinal de um EDFA convencional bombeado com 100 mW em função do comprimento da fibra dopada, tendo a potência de entrada de sinal e o comprimento de onda de bombeio como parâmetros.

4.5 - Simulação do EDFA com bombeio co-propagante

Nesta seção, apresentam-se os resultados de simulação para um EDFA típico (bombeio co-propagante), cujo diagrama esquemático é dado pela Fig. 3.1. Assumindo-se as condições de contorno iniciais de 1 µW (-30 dBm) para a potência de entrada do sinal e de 50 mW (17 dBm) para a potência de entrada do bombeio, e os parâmetros de simulação da Tab. 4.1, as Fig. 4.7 (a) e (b) apresentam os resultados para as evoluções da potência óptica do sinal, do bombeio e da ASE (ASE⁺ e ASE⁻), desde da entrada do EDFA (z = 0 m) até a sua saída (z = L), para operação nos comprimentos de onda de bombeio de 980 nm (L = 10 m) e 1480 nm (L = 25 m), respectivamente. Da Fig. 4.7 (a), obtêm-se os valores de potência de saída para o sinal de -1,48 dBm, de potência final de bombeio de 5,42 dBm, de potência para a ASE⁺ de -0,83 dBm e de potência para a ASE⁻ de 1,19 dBm. Da Fig. 4.7 (b), obtêm-se os valores de potência de saída para o sinal de -3,93 dBm, de potência final de bombeio de 12.89 dBm, de potência para a ASE⁺ de -0.37 dBm e de potência para a ASE⁻ de 0,12 dBm. Assim, o ganho para o bombeio em 980 nm foi de 28,52 dB para uma absorção de bombeio da ordem de 11,58 dB. Já para o bombeio em 1.480 nm, o ganho foi de 26,07 dB para uma absorção de bombeio da ordem de 4,11 dB. Como os comprimentos de fibra dopada escolhidos para cada tipo de bombeio são próximos de seus respectivos valores para $L_{\acute{o}timo}$, a diferença entre os ganhos em 980 nm e 1.480 nm, para as condições de operação adotadas, é pequena. Entretanto, para o valor de ganho do EDFA em 1.480 nm, é importante lembrar que este é resultado de um comprimento mais longo de fibra dopada. A razão para este fato se encontra no menor parâmetro de absorção e na emissão estimulada não-desprezível que se obtêm com este tipo de bombeio. Como resultado desta característica, obtém-se uma menor absorção efetiva do bombeio em 1.480 nm.



Fig. 4.7 – Gráficos das evoluções de ganho, bombeio, ASE^+ e ASE^- ao longo de um EDFA convencional (bombeio co-propagante), operando com 50 mW de potência de entrada de bombeio, 1 μ W de potência de entrada de sinal e (a) 980 e (b) 1.480 nm de comprimento de onda de bombeio.

As Fig. 4.8 (a) e (b) mostram a evolução da figura de ruído do EDFA ao longo de seu comprimento, considerando-se os bombeios de 980 e 1.480 nm, respectivamente. As condições para a simulação são as mesmas que as adotadas para as Fig. 4.7. Para 980 nm, o valor para a figura de ruído medido foi de 3,74 dB. No caso de 1.480 nm, o valor medido foi de 6,69 dB. A maior figura de ruído para 1.480 nm é conseqüência direta da relação entre as potências de saída do sinal e da ASE. Como a absorção efetiva do bombeio é baixa em 1.480 nm, a competição por amplificação entre sinal e ASE começa logo no início da fibra. Lembrando-se que a ASE é amplificada em toda a largura de banda do amplificador, uma considerável parte dos poucos portadores no estado metaestável é consumida pela ASE, diminuindo-se o ganho do sinal em relação àquele que se obtem com bombeio em 980 nm. Como a fibra é longa, a tendência é que esta diferença aumente, provocando o excesso de figura de ruído observado.

Nos gráficos da Fig. 4.9 (a) e (b), podem-se observar os comportamentos do ganho do sinal em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro, para bombeios operando em 980 nm e 1.480 nm, respectivamente. As condições para a simulação são as mesmas que as adotadas para as Fig. 4.7. Nas Fig. 4.9, as curvas mostram a tendência do amplificador de saturar quando a potência do sinal de entrada é muito alta. No entanto, o início da condição de saturação ocorre para valores mais altos de potência de entrada quando a potência de bombeio do EDFA é maior. Considerando-se agora a mesma potência de entrada do sinal, as curvas nas Fig. 4.9 tendem a se aproximar com o aumento da potência de bombeio, ou seja, um aumento na potência de bombeio não é capaz de provocar grandes variações no ganho do sinal. O número finito de portadores disponíveis para participar do processo de amplificação limita a capacidade de absorção do bombeio quando este atinge níveis de potência consideráveis, como era esperado.



Fig. 4.8 – Evolução da figura de ruído ao longo de um EDFA com bombeio co-propagante, operando com 50 mW de potência de entrada para o bombeio e 1 μ W de potência de entrada para o sinal, para comprimentos de onda de bombeio de (a) 980 e (b) 1.480 nm.



Fig. 4.9 – Variação do ganho do sinal com a potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro, para a configuração convencional e bombeio em (a) 980 nm e (b) 1.480 nm.

4.6 Simulação de EDFA com bombeio contra-propagante

Assumindo-se as condições de operação do amplificador de 1 µW (-30 dBm) para a potência de entrada do sinal e de 50 mW (17 dBm) para a potência de entrada do bombeio, os comprimentos para a fibra dopada da secão anterior e os parâmetros de simulação da Tab. 4.1, as Fig. 4.10 (a) e (b) apresentam os resultados para as evoluções da potência óptica do sinal, do bombeio e da ASE ao longo de um EDFA com bombeio contrapropagante, para operação nos comprimentos de onda de bombeio de 980 nm (L = 10 m) e 1480 nm (L = 25 m), respectivamente. O diagrama esquemático para o EDFA com bombeio contra-propagante é dado pela Fig. 3.2. Das Fig. 4.10, pode-se observar o caráter contrapropagante do bombeio. No caso do bombeio em 980 nm, Fig. 4.10 (a), obtêm-se os valores de potência de saída para o sinal de -0,91 dBm, de potência final de bombeio (entrada da fibra dopada) de 5,90 dBm, de potência para a ASE⁺ de 1,78 dBm e de potência para a ASE⁻ de -0,33 dBm. Já para o bombeio em 1.480 nm, Fig. 4.10 (b), obtêm-se os valores de potência de saída para o sinal de -3,86 dBm, de potência final de bombeio de 12,95 dBm, de potência para a ASE⁺ de 0,21 dBm e de potência para a ASE⁻ de -0,34 dBm. Assim, o ganho para o bombeio em 980 nm foi de 29,09 dB para uma absorção de bombeio da ordem de 11,10 dB, enquanto que, para 1.480 nm, o ganho foi de 26,14 dB para uma absorção de bombeio de 4,05 dB.

Em relação à topologia convencional do EDFA, a utilização do bombeio contrapropagante permite que a inversão de população se concentre mais para o interior da fibra dopada. Assim, a contribuição da ASE⁻ na entrada do amplificador deve ser menor ao mesmo tempo em que o sinal precisa percorrer uma distância mais longa antes que o processo de amplificação comece a influenciar o seu valor de potência de forma



Fig. 4.10 – Gráficos das evoluções de ganho, bombeio, ASE^+ e ASE^- ao longo de um EDFA com bombeio contra-propagante, operando com 50 mW de potência de entrada de bombeio, 1 μ W de potência de entrada de sinal e (a) 980 e (b) 1.480 nm de comprimento de onda de bombeio.

considerável. Este efeito é mais perceptível para o caso de bombeio em 980 nm, conforme pode ser visualizado na Fig. 4.10 (a). No entanto, esta pequena amplificação inicial do sinal diminui as chances de saturação do amplificador próximo a sua entrada e, aliada a melhor distribuição dos portadores invertidos, é suficiente para provocar um ligeiro aumento no ganho do sinal em relação ao ganho obtido para configuração de EDFA com bombeio copropagante. Contudo, deve-se considerar que o ganho só não é maior pois o sinal sofre a concorrência da ASE⁺ pelos portadores excitados. Esta concorrência tem início na entrada da fibra dopada, onde a ASE⁺ consome uma boa parte dos poucos portadores ainda existentes no estado metaestável. Este consumo inicial é suficiente para que a potência da ASE⁺ cresça e se torne maior que a potência do sinal após poucos metros de fibra dopada. Ao encontrar a região onde se concentra a inversão de população, a ASE⁺ tende a ser amplificada intensamente, diminuindo-se a geração de fótons estimulados para o sinal.

As Fig. 4.11 (a) e (b) mostram como a figura de ruído do EDFA com bombeio contra-propagante evolui ao longo da fibra dopada, considerando-se a operação em 980 nm e 1.480 nm, respectivamente. As condições de simulação são as mesmas que as adotadas para as Fig. 4.10. Para o bombeio em 980 nm, o valor para a figura de ruído medido foi de 5,01 dB. No caso de 1.480 nm, o valor medido foi de 7,06 dB. Apesar do ligeiro aumento no ganho que se consegue com o bombeio contra-propagante, observa-se que os valores da figura de ruído para esta configuração são maiores que aqueles obtidos para a configuração convencional. De uma forma intuitiva, como a potência de saída da ASE⁺ e do sinal aumenta na saída do amplificador e a diferença entre as potências da ASE⁺ e do sinal aumenta na saída do amplificador, se comparados ao que se obtêm com a configuração co-propagante, pode-se concluir que a SNR de entrada tende a aumentar ligeiramente enquanto que a SNR de saída tende a cair de forma mais acentuada, provocando a deterioração da figura de

ruído. Em outras palavras, o aumento da figura de ruído é reflexo direto do menor ganho do sinal na entrada do EDFA, resultante da competição entre o próprio sinal e a ASE pelos portadores excitados, tornando o sinal mais susceptível à influência da ASE (ASE⁺) ao longo da fibra dopada, especialmente onde a inversão de portadores acontece.

Nos gráficos da Fig. 4.12 (a) e (b), apresentam-se as variações do ganho do sinal para o EDFA com bombeio contra-propagante em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro, para operação em 980 nm e 1.480 nm, respectivamente. As condições para a simulação são as mesmas que aquelas adotadas para as Fig. 4.10. Nas Fig. 4.12, da mesma forma que para o caso do EDFA convencional, as curvas mostram a tendência do amplificador de saturar para altas potências de entrada do sinal. Para a mesma potência de entrada do sinal, as curvas das Fig. 4.12 se aproximam com o aumento da potência de bombeio. Este comportamento é esperado, uma vez que a fibra dopada começa a perder a capacidade de absorção do bombeio quando este atinge níveis de potência consideráveis, resultado de uma quantidade total finita de portadores que podem participar do processo de inversão de população. Mais uma vez, é possível se observar que o amplificador com bombeio em 1.480 nm possui valores de ganho menores que os valores de ganho conseguidos com 980 nm, sob as mesmas condições de entrada e enquanto a potência de entrada do sinal é baixa. No entanto, há uma ligeira inversão neste comportamento quando a potência de entrada do sinal é considerável (> 0 dBm). Neste caso, já na entrada da fibra, a alta potência do sinal passa a suplantar a ASE na competição por amplificação. Como a absorção efetiva do bombeio em 1.480 nm é menor, a potência de bombeio se torna, de certa forma, distribuída ao longo da fibra. Assim, o sinal pode usufruir os fótons estimulados de uma forma efetiva e quase exclusiva, fazendo com que o EDFA proporcione uma amplificação líquida maior para 1.480 nm.



Fig. 4.11 – Evolução da figura de ruído ao longo de um EDFA com bombeio contrapropagante, operando com 50 mW de potência de entrada de bombeio e 1 μ W de potência de entrada de sinal, para comprimentos de onda de bombeio de (a) 980 e (b) 1.480 nm.



Fig. 4.12 – Variação do ganho do sinal com a potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro, para um EDFA com bombeio contra-propagante em (a) 980 nm e (b) 1.480 nm.

4.7 Simulação de EDFA com bombeio bidirecional

Assumindo-se as mesmas condições de operação que aquelas utilizadas para a análise da topologia típica do EDFA, as Fig. 4.13 (a) e (b) apresentam os resultados para as evoluções da potência óptica do sinal, do bombeio e da ASE ao longo de um EDFA com bombeio contra-propagante, para operação em 980 nm e 1480 nm, respectivamente. O diagrama esquemático para o EDFA com bombeio contra-propagante é dado pela Fig. 3.3. Das Fig. 4.13, pode-se observar claramente o caráter bidirecional para o bombeio, onde, à ambas as entradas da fibra dopada, aplicou-se uma potência de bombeio de 50 mW (17 dBm). No caso do bombeio em 980 nm, Fig. 4.13 (a), obtêm-se os valores de potência de saída para o sinal de -0,76 dBm, de potência para a ASE⁺ de 1,78 dBm e de potência para a ASE⁻ de 0,31 dBm. Já para o bombeio em 1.480 nm, Fig. 4.13 (b), obtêm-se os valores de potência para a ASE⁻ de -0,10 dBm e de potência para a ASE⁻ de -0,14 dBm. Assim, o ganho para o bombeio em 980 nm foi de 29,24 dB, enquanto que, para 1.480 nm, o ganho foi de 26,19 dB.

A situação de bombeio bidirecional resulta em um melhor aproveitamento do potencial da fibra dopada, pois combina os dois tipos de bombeio. Em relação as duas primeiras topologias de EDFA analisadas, a utilização do bombeio bidirecional permite que a inversão de população seja, de certa forma, distribuída ao longo da fibra dopada. O resultado desta distribuição é uma maior disponibilidade de portadores excitados, o que leva a um ganho de sinal ligeiramente superior para a configuração bidirecional. No entanto, uma desvantagem desta topologia de EDFA é a utilização de dois lasers de bombeio, um deles acoplado à entrada e o outro à saída da fibra dopada.



Fig. 4.13 – Gráficos das evoluções de ganho, bombeio, ASE^+ e ASE^- ao longo de um EDFA com bombeio bidirecional, operando com 50 mW de potência de entrada de bombeio, 1 μW de potência de entrada de sinal e (a) 980 e (b) 1.480 nm de comprimento de onda de bombeio.

Como observado nas Seções 4.5 e 4.6, o EDFA com bombeio co-propagante apresenta um ganho menor e uma figura de ruído melhor que aqueles da configuração com bombeio contra-propagante. Apesar do ligeiro aumento no ganho que se consegue com o bombeio bidirecional, os valores da figura de ruído para esta configuração são intermediários em relação aos valores obtidos para as duas topologias anteriores. As Fig. 4.14 (a) e (b) mostram como a figura de ruído do EDFA com bombeio bidirecional evolui ao longo da fibra dopada, considerando-se a operação com os bombeios de 980 nm e 1.480 nm, respectivamente. As condições para a simulação são as mesmas que as adotadas para as Fig. 4.13. Para o bombeio operando em 980 nm, o valor para a figura de ruído foi de 4,09 dB. No caso de 1.480 nm, o valor medido foi de 6,85 dB. Se uma comparação for feita, observa-se que a configuração com bombeio bidirecional possui una figura de ruído maior que aquela do caso co-propagante, porém, menor que aquela do caso contra-propagante.

Nos gráficos da Fig. 4.15 (a) e (b), apresentam-se as variações do valor de ganho do sinal para o EDFA com bombeio bidirecional em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro, para bombeios operando em 980 nm e 1.480 nm, respectivamente. As condições para a simulação são as mesmas que as adotadas para as Fig. 4.13. Nas Fig. 4.15, da mesma forma que para as topologias anteriores, as curvas mostram a tendência do amplificador de entrar em saturação quando a potência do sinal de entrada é muito alta. Novamente, para uma mesma potência de entrada do sinal, as curvas nas Fig. 4.15 tendem a se aproximar com o aumento da potência de bombeio. Pode-se observar que, mais uma vez, o amplificador com bombeio em 1.480 nm possui valores de ganho menores que os valores de ganho conseguidos com 980 nm.



Fig. 4.14 – Evolução da figura de ruído ao longo de um EDFA com bombeio bidirecional, operando com 50 mW de potência de entrada de bombeio e 1 μ W de potência de entrada de sinal, para comprimentos de onda de bombeio de (a) 980 e (b) 1.480 nm.



Fig. 4.15 – Variação do ganho do sinal com a potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro, para um EDFA com bombeio bidirecional em (a) 980 nm e (b) 1.480 nm.

4.8 Simulação de EDFA com reflexão de bombeio

A partir desta seção, apresentam-se as configurações de EDFA que possuem elementos refletores em sua composição. Durante as simulações, os elementos refletores foram assumidos ideais, ou seja, com superfícies refletoras sem perdas e totalmente reflexivas. No entanto, o algoritmo permite a simulação de situações onde a reflexão não é total. Assumindo-se as mesmas condições de operação que aquelas utilizadas para a análise da topologia típica do EDFA, as Fig. 4.16 (a) e (b) apresentam os resultados para as evoluções da potência óptica do sinal, do bombeio e da ASE ao longo de um EDFA com reflexão de bombeio, para operação em 980 nm e 1480 nm, respectivamente. O diagrama esquemático para o EDFA com reflexão de bombeio é dado pela Fig. 3.4. Das Fig. 4.16, pode-se observar que a operação desta configuração se assemelha àquela que possui bombeio bidirecional, uma vez que o bombeio é refletido de volta para a fibra dopada, propagando-se em direção contrária a do sinal (contra-propagante). Como o bombeio é refletido, a potência que retorna à fibra é menor que aquela acoplada ao mesmo ponto na configuração bidirecional, uma vez que o bombeio já foi absorvido na sua primeira passagem pela fibra dopada. No caso do bombeio em 980 nm, Fig. 4.16 (a), obtêm-se os valores de potência de saída para o sinal de -0,87 dBm, de potência para a ASE⁺ de -0,18 dBm e de potência para a ASE⁻ de 1,29 dBm. Já para o bombeio em 1.480 nm, Fig. 4.16 (b), obtêm-se os valores de potência de saída para o sinal de -2,55 dBm, de potência para a ASE⁺ de 0,97 dBm e de potência para a ASE⁻ de 1,05 dBm. Assim, o ganho para o bombeio em 980 nm foi de 29,13 dB, enquanto que, para 1.480 nm, o ganho foi de 27,45 dB.

No caso de 980 nm, como a potência de bombeio que retorna é menor que aquela acoplada a sua entrada, da ordem de 6 dBm (4 mW), observa-se que a configuração com

retorno de bombeio possui um ganho pouco menor que aquele conseguido com a topologia com bombeio bidirecional. Contudo, este ganho ainda é superior que os registrados para as duas primeiras configurações de EDFA analisadas. Por um outro lado, a utilização do bombeio em 1.480 nm fornece um resultado diferente. Neste caso, observa-se que o ganho é ligeiramente maior para a configuração com retorno de bombeio. Durante as simulações, observou-se que quando o EDFA opera com bombeio em 1.480 nm, a absorção efetiva do bombeio é menor. Desta forma, o nível de bombeio que retorna à fibra após a reflexão ainda é alto, cerca de 14 dBm (25 mW). Este bombeio que retorna também é pouco absorvido e o seu nível na entrada da fibra, que é menor que aquele do bombeio bidirecional, ainda é considerável, cerca de 11 dBm (12,6 mW). Considerando-se os níveis do bombeio na entrada e saída da fibra, e ainda, a evolução do bombeio ao longo da fibra dopada, acredita-se que o efeito da reflexão do bombeio em 1.480 nm possa permitir uma melhor distribuição da inversão de população que no caso do bombeio bidirecional, de forma que haja uma concentração maior de portadores excitados na região central da fibra dopada, gerando a pequena melhora no nível de ganho.



Fig. 4.16 – Gráficos das evoluções de ganho, bombeio, ASE^+ e ASE^- ao longo de um EDFA com reflexão de bombeio, operando com 50 mW de potência de entrada de bombeio, 1 μW de potência de entrada de sinal e (a) 980 e (b) 1.480 nm de comprimento de onda de bombeio.

As Fig. 4.17 (a) e (b) mostram como a figura de ruído do EDFA com reflexão de bombeio evolui ao longo da fibra dopada, considerando-se a operação com os bombeios de 980 nm e 1.480 nm, respectivamente. As condições para a simulação são as mesmas que as adotadas para as Fig. 4.16. Para o bombeio operando em 980 nm, o valor para a figura de ruído foi de 4,09 dB. No caso de 1.480 nm, o valor medido foi de 6,85 dB. Estes resultados são semelhantes àqueles conseguidos para a configuração típica do EDFA. Já em comparação com o bombeio bidirecional, os valores conseguidos são menores. Este comportamento pode ser resultado da menor potência de bombeio que retorna pela fibra dopada. No caso de 980 nm, como a potência que retorna é cerca de 10 % do valor que é acoplado à entrada, a tendência do EDFA é ter um comportamento semelhante ao da configuração com bombeio co-propagante. No caso de 1.480 nm, a menor figura de ruído pode ser resultado do perfil de distribuição dos portadores excitados ao longo da fibra dopada, que priorizam a amplificação do sinal em relação à ASE.

Nos gráficos da Fig. 4.18 (a) e (b), apresentam-se as variações do valor de ganho do sinal para o EDFA com reflexão de bombeio em relação à potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro, para operação em 980 nm e 1.480 nm, respectivamente. As condições para a simulação são as mesmas que as adotadas para as Fig. 4.16. As Fig. 4.18 possuem o mesmo tipo de comportamento que o verificado para as topologias anteriores. As curvas mostram que o amplificador pode entrar em saturação se a potência do sinal de entrada for elevada. Se uma mesma potência de entrada do sinal é considerada, por exemplo, -30 dBm, as Fig. 4.18 exibem a tendência das curvas de se aproximarem à medida que a potência de bombeio aumenta. Comparando-se os comprimentos de onda de operação para o bombeio, o amplificador com bombeio em 1.480 nm possui valores de ganho menores que os valores de ganho conseguidos com 980 nm.



Fig. 4.17 – Evolução da figura de ruído ao longo de um EDFA com reflexão de bombeio, operando com 50 mW de potência de entrada de bombeio e 1 μ W de potência de entrada de sinal, para comprimentos de onda de bombeio de (a) 980 e (b) 1.480 nm.



Fig. 4.18 – Variação do ganho do sinal com a potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro, para um EDFA com reflexão de bombeio em (a) 980 nm e (b) 1.480 nm.

4.9 Simulação do EDFA com reflexão de sinal

Assumindo-se as mesmas condições de operação que aquelas utilizadas para a análise da topologia típica do EDFA, as Fig. 4.19 (a) e (b) apresentam os resultados para as evoluções da potência óptica do sinal, do bombeio e da ASE ao longo de um EDFA com reflexão de sinal, para operação em 980 nm e 1480 nm, respectivamente. O diagrama esquemático para o EDFA com reflexão de sinal é dado pela Fig. 3.5. Das Fig. 4.19, podese observar as reflexões do sinal e da ASE em z = L. É interessante frisar que, neste caso, o ponto de saída do sinal e da ASE (ASE⁻) acontece em z = 0. No caso do bombeio em 980 nm, Fig. 4.19 (a), obtêm-se os valores de potência de saída para o sinal de 3,88 dBm, de potência para a ASE⁺ de -10,01 dBm e de potência para a ASE⁻ de 7,00 dBm. Já para o bombeio em 1.480 nm, Fig. 4.19 (b), obtêm-se os valores de potência de saída para o sinal de 1,60 dBm, de potência para a ASE⁺ de -8,69 dBm e de potência para a ASE⁻ de 7,25 dBm. Assim, o ganho para o bombeio em 980 nm foi de 33,89 dB, enquanto que, para 1.480 nm, o ganho foi de 31,60 dB. Nesta configuração, como o sinal de entrada sofre dupla amplificação, e considerando a amostra de fibra utilizada, o ganho para o amplificador aumenta consideravelmente em relação as topologias anteriores, podendo-se concluir que esta configuração é eficiente em relação ao aproveitamento do bombeio.



Fig. 4.19 – Gráficos das evoluções de ganho, bombeio, ASE^+ e ASE^- ao longo de um EDFA com reflexão de sinal, operando com 50 mW de potência de entrada de bombeio, 1 μ W de potência de entrada de sinal e (a) 980 e (b) 1.480 nm de comprimento de onda de bombeio.

As Fig. 4.20 (a) e (b) mostram como a figura de ruído do EDFA com reflexão de sinal varia da entrada até a saída da fibra dopada, considerando-se que o bombeio opera em 980 nm e 1.480 nm, respectivamente. As condições para a simulação são as mesmas que as adotadas para as Fig. 4.19. Para o bombeio em 980 nm, o valor para a figura de ruído foi de 3,55 dB. No caso de 1.480 nm, o valor medido foi de 7,89 dB.

Nos gráficos da Fig. 4.21 (a) e (b), as variações do valor de ganho do sinal em função da potência de entrada do sinal para um EDFA com reflexão de sinal são apresentadas, tendo a potência de bombeio como parâmetro, para operação em 980 nm e 1.480 nm, respectivamente. As condições para a simulação das curvas são as mesmas que as adotadas para as Fig. 4.19. Nas Fig. 4.21, da mesma forma que para as topologias anteriores, as curvas mostram a tendência do amplificador de saturar quando a potência do sinal de entrada é alta. Se uma mesma potência de entrada do sinal é considerada, por exemplo, -30 dBm, as Fig. 4.21 exibem a tendência das curvas de se aproximarem à medida que a potência de bombeio aumenta. Comparando-se o comportamento de operação para diferentes comprimentos de onda de bombeio, o amplificador com bombeio em 1.480 nm possui valores de ganho menores que os valores de ganho conseguidos com 980 nm.



Fig. 4.20 – Evolução da figura de ruído ao longo de um EDFA com reflexão de sinal, operando com 50 mW de potência de entrada de bombeio e 1 μ W de potência de entrada de sinal, para comprimentos de onda de bombeio de (a) 980 e (b) 1.480 nm.



Fig. 4.21 – Variação do ganho do sinal com a potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro, para um EDFA com reflexão de sinal operando com bombeio em (a) 980 nm e (b) 1.480 nm.

4.10 Simulação do EDFA com reflexões de bombeio e sinal

Assumindo-se as condições de operação do amplificador de 1 μ W (-30 dBm) para a potência de entrada do sinal e de 50 mW (17 dBm) para a potência de entrada do bombeio, e os parâmetros de simulação da Tab. 4.1, as Fig. 4.22 (a) e (b) apresentam os resultados para as evoluções da potência óptica do sinal, do bombeio e da ASE ao longo de um EDFA com reflexão de bombeio e sinal, para operação nos comprimentos de onda de bombeio de 980 nm (L = 10 m) e 1480 nm (L = 25 m), respectivamente. O diagrama esquemático para o EDFA com reflexão de sinal é dado pela Fig. 3.6. Das Fig. 4.22, podem-se observar as reflexões do bombeio, do sinal e da ASE em z = L. Como na topologia anterior, é interessante destacar que a extremidade de saída do sinal, do bombeio e da ASE (ASE⁻) se encontra em z = 0. No caso do bombeio em 980 nm, Fig. 4.22 (a), obtêm-se os valores de potência de saída para o sinal de 3,88 dBm, de potência para a ASE⁺ de -9.91 dBm e de potência para a ASE⁻ de 6,99 dBm. Já para o bombeio em 1.480 nm, Fig. 4.22 (b), obtêm-se os valores de potência de saída para o sinal de 2,26 dBm, de potência para a ASE⁺ de -7,65 dBm e de potência para a ASE⁻ de 8,46 dBm. Assim, o ganho para o bombeio em 980 nm foi de 33,88 dB, enquanto que, para 1.480 nm, o ganho foi de 32,26 dB. Esta configuração pode apresentar um valor de ganho ligeiramente superior àquele registrado pela configuração anterior, uma vez que, além da reflexão do sinal, o bombeio é também refletido e reaproveitado, simulando uma situação de bombeio bidirecional.



Fig. 4.22 – Gráficos das evoluções de ganho, bombeio, ASE^+ e ASE^- ao longo de um EDFA com reflexões de bombeio e sinal, operando com 50 mW de potência de entrada de bombeio, 1 μ W de potência de entrada de sinal e (a) 980 e (b) 1.480 nm de comprimento de onda de bombeio.

As Fig. 4.23 (a) e (b) mostram como a figura de ruído do EDFA com reflexão de sinal e bombeio varia ao longo da fibra dopada, considerando-se a operação do bombeio em 980 nm e 1.480 nm, respectivamente. As condições para a simulação são as mesmas que as adotadas para as Fig. 4.22. Para o bombeio em 980 nm, o valor para a figura de ruído foi de 3,45 dB. No caso de 1.480 nm, o valor medido foi de 7,89 dB.

Nos gráficos da Fig. 4.24 (a) e (b), apresentam-se as variações do ganho do sinal em relação à potência de entrada do sinal para um EDFA com reflexão de sinal e bombeio, assumindo-se a operação em 980 nm e 1.480 nm, respectivamente. Para as curvas, utilizase a potência de bombeio como parâmetro. As condições para a simulação das curvas são as mesmas que as adotadas para as Fig. 4.22. Nas Fig. 4.24, as curvas mostram a tendência à saturação do amplificador para valores elevados da potência de entrada do sinal. Considerando-se uma mesma potência de entrada para o sinal, as Fig. 4.24 ratificam a tendência das curvas de se aproximarem à medida que a potência de bombeio aumenta. Se a referência agora é o comprimento de onda de bombeio, o amplificador com bombeio em 980 nm possui valores de ganho superiores aos valores de ganho obtidos com 1.480 nm.



Fig. 4.23 – Evolução da figura de ruído ao longo de um EDFA com reflexões de bombeio e sinal, operando com 50 mW de potência de entrada de bombeio e 1 μ W de potência de entrada de sinal, para comprimentos de onda de bombeio de (a) 980 e (b) 1.480 nm.


Fig. 4.24 –- Variação do ganho do sinal com a potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro, para um EDFA com reflexões de bombeio e sinal operando com bombeio em (a) 980 nm e (b) 1.480 nm.

4.11 Simulação de EDFA com reflexões de bombeio e sinal filtrado

Assumindo-se as mesmas condições de operação que aquelas utilizadas para a análise da topologia típica do EDFA, as Fig. 4.25 (a) e (b) apresentam os resultados para as evoluções da potência óptica do sinal, do bombeio e da ASE ao longo de um EDFA com reflexão de bombeio e sinal filtrado, para bombeios operando em 980 nm e 1480 nm, respectivamente. O diagrama esquemático para o EDFA com reflexão de sinal é dado pela Fig. 3.7. Das Fig. 4.25, pode-se observar que apenas o sinal e o bombeio são refletidos z = L. No caso do bombeio em 980 nm, Fig. 4.25 (a), obtêm-se os valores de potência de saída para o sinal de 3,89 dBm, de potência para a ASE⁺ de -9,50 dBm e de potência para a ASE⁻ de -12,81 dBm. Já para o bombeio em 1.480 nm, Fig. 4.25 (b), obtêm-se os valores de potência de saída para a ASE⁻ de -10,45 dBm. Assim, o ganho para o bombeio em 980 nm foi de 33,89 dB, enquanto que, para 1.480 nm, o ganho foi de 32,31 dB. Como pode ser observado, esta configuração apresenta valores de ganho semelhantes aos apresentados pela configuração anterior.



Fig. 4.25 – Gráficos das evoluções de ganho, bombeio, ASE^+ e ASE^- ao longo de um EDFA com reflexões de bombeio e sinal filtrado, operando com 50 mW de potência de entrada de bombeio, 1 μ W de potência de entrada de sinal e (a) 980 e (b) 1.480 nm de comprimento de onda de bombeio.

As Fig. 4.26 (a) e (b) mostram como a figura de ruído do EDFA com reflexão de bombeio e sinal filtrado evolui ao longo da fibra dopada, considerando-se a operação com os bombeios de 980 nm e 1.480 nm, respectivamente. As condições para a simulação são as mesmas que as adotadas para as Fig. 4.25. Para o bombeio operando em 980 nm, o valor para a figura de ruído foi de 3,44 dB. No caso de 1.480 nm, o valor medido foi de 7,89 dB.

Nos gráficos da Fig. 4.27 (a) e (b), apresentam-se as variações do valor de ganho do sinal para o EDFA com reflexão de bombeio e sinal filtrado em relação à potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro, para operação em 980 nm e 1.480 nm, respectivamente. As condições para a simulação são as mesmas que as adotadas para as Fig. 4.25. As Fig. 4.27 possuem o mesmo tipo de comportamento que o verificado para as topologias anteriores. As curvas mostram que o amplificador pode entrar em saturação se a potência do sinal de entrada for elevada. Se uma mesma potência de entrada do sinal é considerada, as Fig. 4.27 exibem a tendência das curvas de se aproximarem à medida que a potência de bombeio aumenta. Comparando-se os comprimentos de onda de operação para o bombeio, o amplificador com bombeio em 1.480 nm possui valores de ganho menores que os valores de ganho conseguidos com 980 nm.



Fig. 4.26 – Evolução da figura de ruído ao longo de um EDFA com reflexões de bombeio e sinal filtrado, operando com 50 mW de potência de entrada de bombeio e 1 μ W de potência de entrada de sinal, para comprimentos de onda de bombeio de (a) 980 e (b) 1.480 nm.



Fig. 4.27 – Variação do ganho do sinal com a potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro, para um EDFA com reflexões de bombeio e sinal filtrado operando com bombeio em (a) 980 nm e (b) 1.480 nm.

4.12 Comparação entre as topologias de EDFA analisadas

As Fig. 4.28 (a) e (b) mostram a variação do ganho em relação à potência de bombeio, numa visualização conjunta das configurações que foram introduzidas no Capítulo 3 e simuladas no Capitulo 4, para os comprimentos de onda de bombeio de 980 nm e 1.480 nm, respectivamente. A Tab. 4.2 auxilia na identificação das configurações nas Fig. 4.28 e 4.29. Estão contempladas as configurações co-propagante, contra-propagante, bidirecional, com reflexão de bombeio, com reflexão de sinal, com reflexão de bombeio e de sinal e, finalmente, com reflexão de bombeio e de sinal opticamente filtrado. As análises realizadas consideram o comprimento de fibra dopada de 10 m, para o bombeio de 980 nm, e o comprimento de fibra dopada de 25 m, para o bombeio de 1.480 nm, além de uma potência de entrada para o sinal de -30 dBm.

De uma maneira geral, pode-se verificar na Fig. 4.28 (a) que o ganho aumenta de acordo com a complexidade da configuração apresentada, ou seja, quanto mais elaborada a configuração, maior o ganho obtido. Este comportamento foi registrado até a configuração com reflexão de bombeio. Para as três últimas configurações, a Fig. 4.28 (a) mostra um aumento considerável no valor de ganho. Em geral, o comportamento das curvas da Fig. 4.28 (a) é ratificado por resultados previamente obtidos [17,19]. De fato, se os gráficos que mostram a variação do ganho do sinal com a potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro, forem observados, conclui-se que há a tendência do ganho de se saturar com o aumento da potência de bombeio. A origem para este comportamento pode estar relacionada ao fato da amostra de fibra utilizada possuir alta dopagem, que causa uma apreciável inversão de portadores ao longo da fibra dopada, sendo capaz de elevar consideravelmente o ganho, mesmo para baixas potências de bombeio. Acredita-se que este

fato possa estar causando também a operação do EDFA em uma condição de saturação para altos níveis de potência de bombeio, em particular para o valor de 50 mW, o que pode ter gerado o comportamento de ganho semelhante para as três últimas configurações de EDFA.

Número de referência	Configuração do EDFA		
1	Bombeio co-propagante		
2	Bombeio contra-propagante		
3	Bombeio bidirecional		
4	Reflexão de bombeio		
5	Reflexão de sinal		
6	Reflexão de bombeio e sinal		
7	Reflexão de bombeio e sinal filtrado		

Tabela 4.2 – Diferentes configurações para o EDFA.

Na Fig. 4.28 (b), pode-se verificar um comportamento semelhante àquele da Fig. 4.28 (a) para as primeiras quatro configurações de EDFA. Novamente, um considerável aumento no ganho foi verificado para as três últimas configurações. Pode-se observar também que as configurações 6 e 7 têm valor de ganho próximo, porém superior ao da configuração com reflexão de sinal. É importante destacar que resultados anteriores que mostram a variação do ganho do sinal com a potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro, confirmam a tendência de aumento e saturação do ganho apresentada pela Fig. 4.28 (b). Por fim, apesar dos comportamentos das curvas das Fig. 4.28 serem semelhantes, os valores de ganho conseguidos com bombeio operando em 1.480 nm continuam sendo menores quando comparados aos valores obtidos com o bombeio operando em 980 nm, para todas as configurações analisadas.



Fig. 4.28 – Comportamento do ganho do sinal para diferentes topologias de EDFA operando com bombeio em (a) 980 nm e (b) 1.480 nm, assumindo-se a potência de entrada do sinal de -30 dBm .

Utilizando-se o mesmo procedimento anterior, a Fig. 4.29 (a) e (b) mostram o comportamento da figura de ruído em relação à potência de bombeio para as configurações co-propagante, contra-propagante, bidirecional, com reflexão de bombeio, com reflexão de sinal, com reflexão de bombeio e de sinal e com reflexão de bombeio e de sinal filtrado, para bombeio operando em 980 nm e 1.480 nm, respectivamente, e potência de entrada do sinal de -30 dBm. A análise dos resultados de simulação permite afirmar que, para o bombeio operando em 980 nm, Fig. 4.29 (a), as configurações com reflexão de sinal, reflexão de bombeio e sinal e reflexão de bombeio e sinal filtrado apresentaram valores próximos para a figura de ruído, com o menor dentre todas as configurações estudadas sendo o da configuração reflexão de bombeio e sinal filtrado. Na sequência, as configurações com menor figura de ruído foram aquelas com reflexão de bombeio, com bombeio co-propagante, com bombeio bidirecional e, por último, a configuração com bombeio contra-propagante. Já para 1.480 nm, Fig. 4.29 (b), observou-se um comportamento para as curvas de figura de ruído distinto daquele para o bombeio de 980 nm. Neste caso, as configurações com reflexão de sinal, reflexão de bombeio e sinal e reflexão de bombeio e sinal filtrado apresentaram valores próximos para a figura de ruído, porém, os maiores dentre todas as topologias analisadas. Os menores valores para a figura de ruído foram observados para as configurações 1 e 4, seguidas das configurações 3 e 2.

4.13 Resposta espectral do EDFA para a configuração convencional

Com o objetivo de se conhecer o comportamento da resposta em freqüência do EDFA, realizaram-se alterações no algoritmo para viabilizar a simulação de um conjunto comprimentos de onda de sinal, para bombeio em 980 nm, visando a obtenção da curva de ganho em relação a diferentes comprimentos de onda de sinal.



Fig. 4.29 – Comportamento da figura de ruído para diferentes topologias de EDFA operando com bombeio em (a) 980 nm e (b) 1.480 nm, assumindo-se a potência de entrada

do sinal de -30 dBm .

A formação do espectro de resposta em comprimento de onda do EDFA foi obtida dividindo-se o espectro da fibra dopada em determinado número de freqüências. Para cada uma das freqüências em questão, o programa de simulação foi executado. Assim, obteve-se a resposta do EDFA não mais para apenas um comprimento de onda especifico (1.550 nm), mas sim para uma faixa de comprimentos de onda em torno de 1.550 nm. Para as simulações que resultaram na Fig. 4.30, utilizou-se a amostra de fibra dopada com as características de emissão e de absorção mostradas nas Fig. 4.2 e Fig. 4.3, respectivamente, parâmetros da Tab. 4.1, comprimento da fibra dopada de 7 m e as condições de simulação para um EDFA com bombeio co-propagante (Fig. 3.1). Na Fig. 4.30, pode-se verificar que a faixa de comprimento de onda utilizada para a simulação foi de 1.500 nm até 1.610 nm.

4.13.1 Ganho do EDFA

Partindo-se do procedimento descrito acima, a Fig. 4.30 apresenta a característica espectral do ganho de um EDFA com bombeio co-propagante, onde a potência de entrada de cada comprimento de onda foi de 1 μ W e a potência total de bombeio foi de 50 mW. Para as condições de simulação adotadas, obteve-se um ganho de aproximadamente 19 dB para o comprimento de onda de 1.550 nm. No entanto, o maior valor de ganho observado foi de 26,9 dB para 1.530 nm. Como esperado, a resposta espectral para a amostra de fibra dopada utilizada possui um perfil irregular. Assim, se um sistema com amplificadores cascateados utilizar esta amostra de fibra dopada, deve-se esperar problemas de saturação de canais e possível comprometimento de recepção. Uma maneira destes problemas serem evitados é através da utilização de técnicas de equalização na saída de cada amplificador do enlace.



Fig. 4.30 – Característica espectral do ganho de um EDFA com bombeio co-propagante em 980 nm, operando com uma potência de entrada para o sinal de 1 μ W, potência para o bombeio de 50 mW e um comprimento total de fibra de 7 metros.

4.13.2 Relação entre o ganho e potência de entrada do sinal

Para salientar a influência da potência de entrada de sinal no ganho do EDFA, a Fig. 4.31 mostra espectros do ganho do EDFA com bombeio co-propagante para diferentes potências de entrada dos canais. De uma maneira geral, verifica-se que quanto menor a potência na entrada do amplificador, maior é o ganho por canal fornecido pelo EDFA. Porém, se a potência de entrada for muito baixa, a ASE tende a dominar e até saturar o amplificador. Assumindo-se as mesmas condições de simulação da seção anterior, para 1.550 nm, observa-se um ganho de 19 dB quando a potência de entrada dos canais é de 1 μ W (-30 dBm), de 18 dB quando a potência de entrada dos canais é de 1 mW (0 dBm).



Fig. 4.31 – Característica espectral do ganho de um EDFA com bombeio co-propagante em 980 nm, operando com uma potência para o bombeio de 50 mW e um comprimento total de fibra de 7 metros, tendo a potência de entrada do sinal como parâmetro.

4.13.3 Relação entre o ganho e potência de entrada do bombeio

Para ressaltar a influência da potência de bombeio no ganho do EDFA, a Fig. 4.32 mostra espectros do ganho do EDFA com bombeio co-propagante para diferentes valores de potência de bombeio. Assumindo-se as mesmas condições de simulação da seção anterior, para o comprimento de onda de 1.550 nm, observa-se um ganho de 13 dB quando a potência de bombeio é de 5 mW (7 dBm), de 16 dB quando a potência de bombeio é de 10 mW (10 dBm) e de 19 dB quando a potência de bombeio é de 50 mW (17 dBm). Como esperado, uma vez que a concentração de dopantes é finita, os resultados mostram que o ganho do EDFA tende a aumentar com a potência de bombeio até atingir uma condição de saturação.



Fig. 4.32 – Característica espectral do ganho de um EDFA com bombeio co-propagante em 980 nm, operando com uma potência de entrada para o sinal de -30 dBm e um comprimento total de fibra de 7 metros, tendo a potência de bombeio como parâmetro.

4.13.4 Relação entre a ASE^+ e a potência de entrada do bombeio

Se a potência dos canais na entrada do EDFA for muito baixa, a amplificação das emissões espontâneas tende a predominar, diminuindo o ganho efetivo dos canais e, potencialmente, contaminando-os com ruído na recepção. Para enfatizar a influência da ASE no amplificador, a Fig. 4.33 mostra espectros da ASE^+ do EDFA com bombeio co-propagante para diferentes valores de potência de bombeio. Como esperado, o nível da ASE aumenta com a potência de bombeio. Na Fig 4.33, observa-se que a potência da ASE^+ alcança um valor de pico de cerca de -15 dB para potência de bombeio de 5 mW, de -11 dB para potência de bombeio de 10 mW e de -9,5 dB para potência de bombeio de 50 mW.



Fig. 4.33 – Característica espectral da ASE^+ de um EDFA com bombeio co-propagante em 980 nm, operando com uma potência de entrada para o sinal de -30 dBm e um comprimento total de fibra de 7 metros, tendo a potência de bombeio como parâmetro.

4.14 Conclusão

Este capítulo inicia-se com as considerações assumidas para as simulações das diferentes configurações de EDFA apresentadas no Capítulo 3. Partindo-se de uma descrição geral do funcionamento do algoritmo de simulação, no qual o modelo teórico desenvolvido no Capítulo 2 é utilizado para a determinação das evoluções do sinal, bombeio, ASE e figura de ruído ao longo da fibra dopada, apresentaram-se uma tabela de parâmetros e características físicos para a amostra de fibra dopada utilizada como referência para as simulações (*Corning Pure Mode Er1550C3 Photonic Fiber*) e os respectivos espectros dos coeficientes de emissão e absorção para a fibra em questão. Antes que as topologias de EDFA pudessem ser estudas, simulações iniciais foram realizadas para a determinação do comprimento de fibra dopada a ser utilizado nos EDFAs. Com base em

uma análise de comprimento ótimo, observou-se que seria necessário adotar comprimentos de fibra dopada diferentes para os dois tipos de bombeio empregados nos amplificadores. Assim, se uma potência de entrada para o sinal de -30 dBm e uma potência de bombeio de 50 mW fossem adotados como condições de operação do amplificador para os algoritmos de simulação, e baseado na configuração típica de EDFA, concluiu-se que os comprimentos de fibra de 10 m, para bombeio operando em 980 nm, e 25 m, para bombeio operando em 1.480 nm, seriam suficientes para operação próxima às condições de comprimento ótimo.

Após estas considerações iniciais, os resultados para as simulações das topologias de EDFA foram apresentados. Em geral, o desempenho de cada topologia foi apresentado na forma de gráficos para as evoluções do sinal, do bombeio, da ASE^+ , da ASE^- e da figura de ruído ao longo da fibra dopada, para cada um dos tipos de bombeio utilizados. Além disso, apresentaram-se também resultados que demonstraram a relação entre o comportamento do ganho de cada topologia de EDFA e as potências de sinal e de bombeio, considerando-se a operação nos dois comprimentos de onda de bombeio adotados. Na seqüência, as características de operação das diferentes topologias EDFA foram comparadas e comentadas, com destaque para os comportamentos do ganho e da figura de ruído. Por fim, porém apenas para a configuração típica do EDFA e bombeio operando em 980 nm, simulações do espectro de ganho e ASE^+ para a amostra de fibra dopada utilizada foram apresentadas.

Capítulo 5 Conclusão

Neste trabalho, analisou-se o comportamento das principais figuras de mérito de diferentes topologias de amplificadores a fibra dopada com érbio por meio de simulações computacionais. Por meio da verificação de desempenho destas configurações de EDFA, podem-se determinar as condições de operação que são mais adequadas para atender os pré-requisitos que cada função de amplificação exige, seja esta função de potência, de linha ou de pré-amplificação. Assim, para uma dada amostra de fibra dopada, partindo-se da topologia mais simples, a configuração com bombeio co-propagante, e aumentando-se gradativamente o grau de complexidade até a configuração com reflexão de bombeio e de sinal filtrado, os algoritmos desenvolvidos permitiram a análise da evolução do sinal, do bombeio, da ASE e da figura de ruído ao longo da fibra dopada para a operação com bombeio em 980 nm e 1.480 nm, considerando diversas situações iniciais para a potência de entrada do sinal e a potência de bombeio. Os resultados obtidos mostraram que o desempenho do EDFA depende não só da topologia do circuito óptico escolhida, mas também, das condições de operação do amplificador e do tipo de fibra dopada utilizada.

No Capítulo 2, apresentou-se uma análise teórica que permite a modelagem do comportamento do EDFA. Primeiramente, formalizaram-se as considerações que permitem a obtenção das equações de taxa que regem as transições das populações na fibra óptica. As soluções destas equações em estado estacionário apresentaram como resultado expressões para as densidades de portadores, normalizadas em relação ao número total de portadores para o sistema de três níveis. Como a formulação de três níveis é aplicável apenas a EDFAs

que operam com bombeio em 980 nm, a teoria foi adaptada para acomodar sistemas de dois níveis e permitir o estudo de amplificadores que utilizam bombeio em 1.480 nm. As densidades de portadores normalizadas foram, então, associadas às seções transversais de emissão e absorção da fibra dopada, e utilizadas, posteriormente, no procedimento que permitiu a obtenção do comportamento de propagação longitudinal do sinal, do bombeio, do ruído ASE e da figura de ruído no interior da fibra dopada.

O Capítulo 4 iniciou-se com as considerações assumidas para as simulações das diferentes configurações de EDFA apresentadas de forma detalhada no Capítulo 3. Partindo-se de uma descrição geral do funcionamento do algoritmo de simulação, no qual o modelo teórico desenvolvido no Capítulo 2 é utilizado para a determinação das evoluções do sinal, bombeio, ASE e figura de ruído ao longo da fibra dopada, apresentaram-se a tabela de parâmetros e características físicos da amostra de fibra dopada utilizada como referência para as simulações e os respectivos espectros dos coeficientes de emissão e absorção para a fibra em questão. A partir destes dados, realizaram-se simulações preliminares para a determinação do comprimento de fibra dopada a ser utilizado nos EDFAs. Com base no critério de comprimento ótimo, tendo como referência a configuração típica do EDFA, e assumindo-se uma potência de entrada para o sinal de -30 dBm e uma potência de bombeio de 50 mW como condições de operação do amplificador para os algoritmos de simulação, concluiu-se que os comprimentos de fibra de 10 m, para bombeio operando em 980 nm, e 25 m, para bombeio operando em 1.480 nm, seriam suficientes para operação próxima às condições de comprimento ótimo. Os resultados das simulações foram apresentados em forma de gráficos que mostraram a evolução do sinal, do bombeio, do ASE e da figura de ruído ao longo da fibra dopada. Além destes, outros resultados mostraram o comportamento do ganho e da figura de ruído em relação à potência de entrada do sinal e à potência de bombeio. De posse destas informações, foram possíveis comparações e comentários referentes ao comportamento dos diferentes parâmetros das várias topologias de EDFA analisadas. Também foram apresentadas simulações do espectro de ganho e de ASE, assumindo-se condições de contorno de operação do EDFA distintas.

Algumas considerações a respeito dos resultados devem ser enfatizadas. De uma maneira geral, observou-se que o EDFA operando com comprimento de onda de bombeio de 980 nm apresenta um melhor desempenho que aquele obtido quando o bombeio opera em 1.480 nm. Este comportamento pode ser evidenciado por meio da análise dos resultados de ganho e figura de ruído para uma dada configuração de EDFA. Além disto, deve-se levar em conta que o comprimento de fibra dopada utilizado em 1.480 nm é mais longo que aquele utilizado em 980 nm. Considerando-se a amostra de fibra dopada utilizada, as simulações para a obtenção do comprimento de onda de bombeio é utilizado, necessita-se um comprimento de fibra dopada de cerca de duas vezes e meio maior para 1.480 nm que para 980 nm.

Como comentado acima, com relação ao ganho de uma dada configuração, o comportamento do EDFA para bombeio em 980 nm foi sempre superior àquele quando o bombeio operava em 1.480 nm. Com relação à figura de ruído, observou-se a mesma tendência de desempenho, onde os EDFA que operavam com bombeio em 980 nm obtiveram valores menores para este parâmetro. Para 1.480 nm as configurações com reflexão de sinal, reflexão de bombeio e sinal e reflexão de bombeio e sinal filtrado apresentaram os maiores valores de figura de ruído. Portanto, para a fibra dopada em questão, os resultados mostram que, ao se comparar uma mesma configuração operando

com os dois comprimentos de onda considerados, o processo de amplificação com baixo ruído se torna mais eficiente quando se utiliza bombeio de 980 nm.

Considerando-se agora diferentes topologias de EDFA operando num mesmo comprimento de onda de bombeio, de uma maneira geral, pôde-se verificar que o ganho aumenta de acordo com a complexidade da configuração apresentada. Partindo-se da configuração típica do EDFA, este comportamento foi observado até a configuração com reflexão de bombeio. No entanto, as três últimas configurações mostraram aumento considerável no valor de ganho. Para todas as topologias analisadas, observou-se que o ganho tende a saturar com o aumento da potência de bombeio. A origem para este comportamento pode estar relacionada ao fato da amostra de fibra utilizada possuir alta dopagem, sendo capaz de elevar consideravelmente o ganho, mesmo para baixas potências de bombeio. Com relação à figura de ruído, comparando-se as diferentes topologias de EDFA, e em particular, quando estas operam com 980 nm de comprimento de onda de bombeio, pôde-se concluir que, apesar das configurações 5, 6 e 7 apresentaram valores aproximados para a figura de ruído, estes valores foram o menores dentre as configurações analisadas. Na sequência, as configurações com menor figura de ruído foram as configurações com reflexão de bombeio, co-propagante, bidirecional e, por último, contrapropagante.

Levando-se em consideração a amostra de fibra dopada adotada e as condições de operação do amplificador de -30 dBm para a potência de entrada do sinal e 50 mW para a potência de bombeio, condições estas aplicadas durante as simulações das evoluções do sinal, do bombeio, da ASE e da figura de ruído realizadas no Capítulo 4, a Tab. 5.1 apresenta um resumo dos valores medidos para cada um dos parâmetros de operação para

as diferentes topologias de EDFA consideradas. Na tabela, P_s representa a potência do sinal que sai do amplificador, P_p representa a potência de bombeio que sai do amplificador, P_{ASE+} representa a potência da ASE que deixa o amplificador em z = L, P_{ASE-} representa a potência da ASE que deixa o amplificador em z = 0 e F é a figura de ruído do amplificador. As divisões em uma mesma célula da tabela indicam reflexão de sinal e/ou bombeio.

Tabela 5.1 – Resultados para os principais parâmetros obtidos a partir das simulações das diferentes configurações analisadas no Capítulo 4.

Topologia e Bombeio		P_s (dBm)	P_p (dBm)	P_{ASE+} (dBm)	P_{ASE} (dBm)	Ganho (dB)	F (dB)
1	980	-1,48	5,42	-0,83	1,19	28,52	3,74
	1480	-3,93	12,89	-0,37	0,12	26,07	6,69
2	980	-0,91	5,90	1,78	-0,33	29,09	5,01
	1480	-3,86	12,95	0,21	-0,34	26,14	7,06
2	980	-0,76	6,11/6,11	1,78	0,31	29,24	4,09
3	1480	-3,81	12,94/12,92	-0,10	-0,14	26,19	6,85
1	980	-0,87	5,97/-5,08	-0,18	1,29	29,13	3,76
7	1480	-2,55	13,95/10,85	0,97	1,05	27,45	6,63
5	980	-13,69/3,89	-5,13	-10,01	7,00	33,88	3,55
3	1480	-14,68/1,60	4,36	-8,69	7,25	31,60	7,89
6	980	-13,69/3,89	5,13/-26,76	-9,91	6,99	33,88	3,45
	1480	-14,34/2,26	4,62/-7,74	-7,65	8,46	32,26	7,89
7	980	-13,12/3,88	4,63/-26,19	-9,50	-12,81	33,89	3,44
	1480	-13,87/2,31	4,97/-7,00	-7,27	-10,45	32,31	7,89

Para um mesmo comprimento de onda e levando-se sempre em consideração a amostra de fibra dopada utilizada, a análise do conjunto de características das diferentes topologias de EDFA obtida por meio das simulações permite sugestões quanto a utilização particular de uma ou outra configuração de EDFA para exercer uma das funções de amplificação de um enlace óptico. No entanto, quando se leva em consideração a utilização prática de um EDFA, deve-se buscar um dispositivo cuja relação custo-benefício seja satisfatória, ou seja, um dispositivo que apresente um alto desempenho e baixo custo.

Para a utilização do EDFA como amplificador de potência, procura-se utilizar topologias que forneçam um alto valor de ganho e, preferencialmente, um baixo valor de figura de ruído. Dos resultados de simulação obtidos neste trabalho e dependendo do comprimento do enlace óptico sobre questão, as configurações 7, 6 e 5 são as que fornecem o maior ganho. No entanto, se a figura de ruído for um pré-requisito para o desempenho do amplificador de potência em um determinado enlace óptico, estas mesmas configurações seriam adequadas apenas para o bombeio de 980 nm.

No caso da utilização do EDFA como amplificador de linha, deve-se observar que a escolha entre uma ou outra topologia de EDFA para exercer esta função é, de certa forma, relativa. Isto pois, para o amplificador de linha, a escolha dos valores de ganho e de figura de ruído depende da posição do amplificador no enlace. Portanto, a decisão sobre a escolha de uma determinada topologia pode ainda levar em consideração o fator custo, que tende a aumentar de acordo com a complexidade do circuito óptico do amplificador. Assim, podese dizer que quaisquer das configurações estudadas poderiam atender os requisitos para a função de amplificador de linha, ficando a cargo do projetista analisar a questão do custo do amplificador.

Finalmente, para o caso de pré-amplificação, o amplificador óptico utilizado precisa possuir um baixo valor de figura de ruído, ficando o valor de ganho restrito à necessidade de potência óptica para a detecção apropriada do sinal pelo receptor. Em outras palavras, o ganho não pode ser muito alto, correndo-se o risco de haver saturação do fotodetector, nem muito baixo, o que pode ocasionar o aumento da taxa de erro no caso de uma transmissão digital. Assim, dependendo das características particulares de cada enlace, para os resultados de simulação obtidos neste trabalho, as configurações 7, 6 ou 5 operando em 980 nm poderiam ser utilizadas como pré-amplificadores devido à baixa figura de ruído e o alto ganho que apresentam. No entanto, se houver a necessidade de valores de ganho menores, as configurações 1 ou 4 poderiam exercer esta função de maneira satisfatória, mesmo para bombeio em 1.480 nm.

Como sugestões para trabalhos futuros ficam, entre outros, o refinamento dos algoritmos de simulação das topologias de EDFA, com a possível inclusão de novas configurações, a consideração do comportamento de propagação multimodal para o bombeio, especialmente para o comprimento de onda de 980 nm, a reestruturação do algoritmo para levar em consideração um caráter multicanal para o sinal, além da validação dos resultados obtidos com este trabalho através de montagens experimentais.

Referências Bibliográficas

- S. L Woodward e S. Ariyavistakul, "Transporting CDMA signals over an analog optical link", *IEEE Trans. Vehic. Technol.*, vol. 48, no. 4, pp. 1033-1038, 1999.
- [2] J. Yu, M. Fischer, N. Chand, K. Kojima e V. Swaminathan, "10-Gb/s transmission over 200-km conventional fiber without dispersion compensation using the bias control technique", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 14, no. 12, pp. 1746-1749, 2002.
- B. C. Wang, V. Baby, L. Xu, I. Glesk e P. R. Prucnal, "173-ps wavelength switching of four WDM channels using an OTDM channel selector", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 14, no. 11, pp. 1620-1622, 2002.
- [4] E. Desurvire, J. R. Simpson e P. C.Beker, "High-gain erbium-doped traveling-wave fibre amplifier", *Opt. Lett.*, no. 12, vol. 11, pp. 888-890, 1987.
- [5] R. J. Mears, L. Reekie, I. M. Jauncey e D. N. Payne, "Low-noise erbium-doped fibre amplifier operanting at 1.54 μm", *Electron. Lett.*, no. 23, vol. 19, pp. 1026-1028, 1987.
- [6] R. Ramaswami e K. N. Sivarajan, "Optical Networks A Practical Perspective", 1^a
 ed., Morgan Kaufmann, EUA, 1998.
- [7] T. E. Stern e K. Bala, "Multiwavelength Optical Networks", 1^a ed., Addison-Wesley, EUA, 1999.
- [8] E. Desurvire, "Erbium-Doped Fiber Amplifiers Principles and Applications", 1^a ed., John Wiley & Sons, EUA, 1994.

- [9] A. Bjarklev, "Optical Fiber Amplifiers: Design and System Applications", 1^a ed., Artech House, EUA, 1993.
- [10] S. Sudo, "Optical Fiber Amplifiers Material, Devices, and Applications", 1^a ed., Artech House, EUA, 1997.
- [11] P. C. Becker, N. A. Olsson e J. R. Simpsom, "Erbium-Doped Fiber Amplifiers Fundamentals and Technology", 1^{a.} ed., Academic Press, EUA, 1999.
- [12] A. M. Vengsarkar, P. J. Lemaire, J. B. Judkins, V. Bhatia, T. Erdogan e J. E.Sipe, "Long-period gratings as band-rejection filters", *J. Lightwave Tecnol.*, vol .14, no. 1, pp. 58-65, 1996.
- [13] B. Clesca, D.Ronarchi, D. Bayart, Y. Sorel, L. Hamon, M. Guibert, J. L. Baylat, J. F. Kerdiles e M. Semenkoff, "Gain flatness comparison between erbium doped flouride and silca fiber amplifiers with wavelenght-multiplexed signals", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 6, no. 4, pp. 509-512, 1994.
- [14] G. Gloge, "Weakly Guiding Fibers", Appl. Opt., vol. 10, no. 10, pp. 2252-2258, 1971.
- [15] M. J. F. Digonnet e C. J. Gaeta, "Theoretical analysis of optical fiber laser amplifiers and oscillators", *Appl. Opt.*, vol. 24, no. 3, pp. 333-342, 1985.
- [16] C. A. C. Petersen e R. F. Souza, "Teoria Básica do Laser a Fibra Dopada", Relatório Técnico RT/DMO 029, Departamento de Microondas e Óptica, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, 1994.
- [17] C. A. C. Petersen, "Sub-Sistemas Ópticos para Comunicações Solitônica", Tese de Doutorado, Departamento de Microondas e Óptica, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, 1996.

- [18] M. J. F. Digonnet, "Closed-form expressions for the gain in three- and four-level laser fibers", *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 26, no. 10, pp. 1788-1796, 1990.
- [19] M. B. C. e Silva, "Estudo de topologias para otimização do desempenho de amplificadores ópticos a fibra dopada", Dissertação de Mestrado, Departamento de Microondas e Óptica, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, 2000.
- [20] B. Pedersen, "Small-signal erbium-doped fibre amplifiers pumped at 980 nm: a design study", Opt. Quantum Electron., vol. 26, pp. S273-S284, 1994.