



UNICAMP

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

Modelagem Estática e Dinâmica do Amplificador a Fibra Dopada com Érbio para Sistemas WDM

Andrea Acunha Martin

**Orientador:
Aldário Chrestani Bordonalli (FEEC)**

Composição da Banca Examinadora:

Prof. Dr. Aldário Chrestani Bordonalli – FEEC/UNICAMP – Presidente
Prof. Dr. João Batista Rosolem – Fundação CPqD
Prof. Dr. Rui Fragassi Souza – DMO/FEEC/UNICAMP
Prof. Dr. Cristiano de Mello Gallep – CESET/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, julho de 2007

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

M363m Martin, Andrea Acunha
 Modelagem estática e dinâmica do amplificador a fibra
 dopada com érbio para sistemas WDM / Andrea Acunha
 Martin. --Campinas, SP: [s.n.], 2007.

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

 1. Amplificadores óticos. 2. Fibras óticas. 3. Sistemas
 de telecomunicação. 4. Metais de terras raras. 6. Simulação
 (Computadores). I. Bordonalli, Aldário Chrestani. II.
 Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
 Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

Título em Inglês: Static and dynamic modeling of the erbium doped fiber
 amplifier fo WDM system applications

Palavras-chave em Inglês: Optical amplifiers, EDFA, Optical fibers, WDM
 systems, Static, Dynamic modeling

Área de concentração: Telecomunicações e Telemática

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica

Banca examinadora: João Batista Rosolem, Rui Fragassi Souza, Cristiano de
 Mello Gallep

Data da defesa: 17/07/2007

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Elétrica

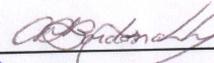
COMISSÃO JULGADORA - TESE DE MESTRADO

Candidata: Andrea Acunha Martin

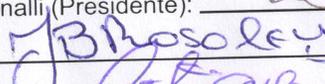
Data da Defesa: 17 de julho de 2007

Título da Tese: "Modelagem Estática e Dinâmica do Amplificador a Fibra Dopada com Érbio para Sistemas WDM"

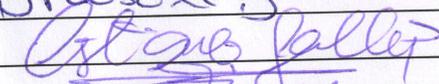
Prof. Dr. Aldário Chrestani Bordonalli (Presidente):



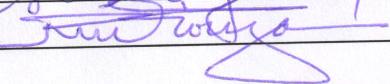
Dr. João Batista Rosolem:



Prof. Dr. Cristiano de Mello Gallep:



Prof. Dr. Rui Fragassi Souza:



RESUMO

Neste trabalho, apresenta-se um estudo teórico das características de operação do amplificador a fibra dopada com érbio (EDFA – *erbium doped fiber amplifier*), considerando-se regimes de operação estático e dinâmico, quando este é aplicado a sistemas de multiplexação por divisão em comprimento de onda. Após a introdução dos mecanismos que permitem a amplificação da luz no interior da fibra dopada, com destaque para a aplicação do bombeio em 980 nm, e a definição da topologia de amplificador a ser avaliada, partiu-se para o desenvolvimento das formulações que permitiram a análise do comportamento estático do amplificador. Primeiramente, a abordagem utilizada foi puramente monocal, baseada na técnica da largura de banda equivalente, que incorporou uma nova proposta de rotina estável para a simulação do EDFA. Na seqüência, esta mesma rotina foi adaptada a um modelo estático reformulado e de aplicação multicanal, que passou a assumir a distribuição espectral da emissão espontânea amplificada. Numa etapa seguinte, uma segunda rotina de simulação multicanal foi desenvolvida a partir das modificações que o estudo do comportamento dinâmico do EDFA exigiu. Com os dados característicos de uma fibra dopada comercial, as diferentes rotinas de simulação foram utilizadas para avaliar parâmetros de operação do EDFA, tais como ganho de sinal, absorção de bombeio e figura de ruído, entre outros. Observou-se que os três métodos apresentaram, em geral e dentro de certos limites para as condições de contorno às quais o amplificador é submetido, concordância de resultados.

ABSTRACT

In this work, a theoretical study of the erbium doped fiber amplifier (EDFA) operational characteristics under static and dynamic conditions for application in wavelength division multiplexing systems is presented. After an introductory analysis of the physical properties that allow for light amplification inside the doped fiber, especially if 980 nm pumps are used, and the definition of the amplifier configuration to be considered, a formulation based on the static behavior of the amplifier was developed. The first approach was purely single channel and based on the equivalent bandwidth technique, which incorporated a new routine to guarantee stable solutions during EDFA simulation for different initial conditions. Then, this same convergence routine was used when the amplified spontaneous emission spectral distribution was considered to restructure the static model and to allow a multi-channel analysis. In a following stage, a second multi-channel simulation routine was conceived due to the modifications that the EDFA transient investigation required. By using the parameter of a commercial fiber, different simulation routines were used to evaluate the EDFA operational parameter, such as gain, pump absorption and noise figure. In general, it was observed that the three methods produced similar results within certain initial condition boundaries for the EDFA operation.

*Aproveito este espaço para agradecer, ainda
que de forma insuficiente, e dedicar este
trabalho à Terezinha e Genuino, os meus pais,
que sempre me apoiaram e incentivaram em
todos os momentos de minha vida.*

“Aprender é a única coisa de que a mente nunca se cansa, nunca tem medo e nunca se arrepende”

Leonardo da Vinci

Agradecimentos

Em primeiro lugar, quero agradecer ao meu orientador, Prof. Dr. Aldário Chrestani Bordonalli pelo seu total apoio, paciência, confiança e dedicação ao longo de todos estes anos e pelas correções e melhorias realizadas neste trabalho.

A Suzete, secretária do DMO, e aos amigos do Departamento de Microonda e Óptica, Luciano, Carlos Henrique, Leonardo, Henrique, Reginaldo e Rafael. Agradeço também pela ajuda, nesse semestre, aos novos integrantes Robson, Ângelo, Carmem e ao futuro integrante Daniel. Agradeço, em especial, ao Marcos pelas discussões de programação e pela ajuda no texto final desta dissertação.

As minhas amigas de longa data, Ivani, Juliana e Liliam pela amizade e motivação.

Aos amigos da Turma 99 pelo apoio e amizade.

Aos amigos que já saíram da FEEC, Fábio, Rafael e Roger, e aos amigos que ainda continuam, Anzai, Felipe, Fioravanti, Leonardo, Máira, Grace e Ricardo pela amizade e diversão que tornaram o almoço no “bandeirão” mais agradável.

Não poderia deixar de agradecer ao Rubens, pela amizade, apoio e momentos de descontração. Sou grata também pelas irreverentes notas de aulas de disciplinas e pelas dicas sobre Látex e apresentações, mesmo que essas últimas nem sempre possam ser levadas a sério, talvez um pouco coloridas demais, proveniente de idéias apresentadas por alguém não muito lúcido (brincadeira!).

Agradeço também aos professores e funcionários da FEEC.

E finalmente, agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro, à FAPESP e ao CePOF/FAPESP.

Índice

Capítulo 1	Introdução	1
Capítulo 2	Introdução Teórica ao Estudo do EDFA	7
	2.1. Níveis de Energia e Mecanismos de Amplificação	8
	2.2. Modelo matemático de níveis de energia para o EDFA baseado num sistema de três níveis.....	11
	2.3. Conclusão.....	15
Capítulo 3	Modelo Matemático para Análise Multicanal	16
	3.1. Modelo matemático para análise de estado estacionário.....	16
	3.2. Considerações sobre as populações de portadores no EDFA.....	21
	3.3. Análise para a Evolução do Bombeio.....	22
	3.4. Análise para a Evolução do Sinal.....	24
	3.5. Evolução da ASE.....	26
	3.6. Figura de Ruído.....	29
	3.7. Conclusão.....	31
Capítulo 4	Simulações Computacionais para Operação Estática do EDFA	32
	4.1 Considerações para as simulações das configurações de EDFA.....	32
	4.2 Amostra da fibra dopada utilizada nas simulações.....	36
	4.3 Desempenho do Amplificador – largura de banda equivalente.....	38
	4.4 Desempenho do Amplificador – espectro de ASE.....	46
	4.5 Conclusão.....	55
Capítulo 5	Análise do EDFA no Domínio no Tempo	56
	5.1 Modelo matemático para a análise da resposta dinâmica do EDFA.....	57
	5.2 Resultados de Simulações.....	64
	5.3 Conclusão.....	68
Capítulo 6	Conclusão	69
	Referências Bibliográficas	72

Lista de Símbolos

λ	(nm)	Comprimento de onda
λ_s	(nm)	Comprimento de onda de sinal
λ_p	(nm)	Comprimento de onda de bombeio
ϕ	(rad)	Coordenada cilíndrica angular
ν	(Hz)	Frequência
ν_p	(Hz)	Frequência do bombeio
ν_s	(Hz)	Frequência do sinal
a_c	(μm)	Raio do núcleo da fibra
$A_2=A_{21}$	(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^{NR}_{21}	(s^{-1})	Taxa de emissão espontânea não radiativa do nível 2 para o nível 1
A^{NR}_3	(s^{-1})	Taxa 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 (<i>amplified spontaneous emission</i>)
ESA	(-)	Absorção de estado excitado (<i>excited state absorption</i>)
GSA	(-)	Absorção de estado fundamental (<i>ground spontaneous absorption</i>)
per	(-)	Função perfil de dopagem do núcleo da fibra
F	(-)	Figura de Ruído
V_s	(W)	Variância da potência de sinal
SNR_E	(-)	Relação sinal-ruído de entrada (<i>input signal to noise ratio</i>)

SNR_S	(-)	Relação sinal–ruído de saída (<i>output signal to noise ratio</i>)
WDM	(-)	Multiplexação por divisão em comprimento de onda (<i>wavelength division multiplexing</i>)
E_1	(J)	Nível de energia do estado fundamental
E_2	(J)	Nível de energia do estado metaestável
E_3	(J)	Nível de energia do bombeio
ΔE	(J)	Diferença de energia entre níveis
N_c	(-)	Número de canais
$N_0 = \rho$	(m ⁻³)	Densidade total de portadores dos íons dopantes
N_1	(m ⁻³)	Densidade de portadores dos íons dopantes no nível fundamental
N_2	(m ⁻³)	Densidade total de portadores dos íons dopantes no nível metaestável
N_3	(m ⁻³)	Densidade total de portadores dos íons dopantes no nível de bombeio
Er^{3+}	(-)	Íon de érbio
L	(m)	Comprimento da fibra dopada
S_{ASE}	(W/m ² .Hz)	Densidade espectral do ruído ASE total
S_{ASE}^+	(W/m ² .Hz)	Densidade espectral do ruído ASE no sentido co-propagante do sinal
S_{ASE}^-	(W/m ² .Hz)	Densidade espectral do ruído ASE no sentido contra- propagante do sinal
P_{ASE}^+	(W)	Potência de ASE no sentido co-propagante do sinal
P_{ASE}^-	(W)	Potência de ASE no sentido contra-propagante do sinal
B	(Hz)	Faixa equivalente de emissão espontânea
I_p	(W/m ²)	Intensidade de bombeio
I_{sk}	(W/m ²)	Intensidade de sinal para cada canal
J_n	(-)	Função de Bessel de primeira espécie de ordem n
k_n	(-)	Função de Bessel de segunda espécie de ordem n
C_{uw}	(m ⁻²)	Coefficiente de normalização da função auxiliar r_n
K_{uw}	(m ⁻²)	Coefficiente de normalização da função auxiliar s_0

U_p	(-)	Constante de propagação transversal para o bombeio
W_p	(-)	Constante de propagação transversal para o bombeio
U_{sk}	(-)	Constante de propagação transversal para cada canal
W_{sk}	(-)	Constante de propagação transversal para cada canal
P_{sk}	(W)	Potência do sinal para cada canal
P_p	(W)	Potência do bombeio
R_{13}	(s ⁻¹)	Taxa de absorção de bombeio
R_{31}	(s ⁻¹)	Taxa de emissão de bombeio
p	(-)	Função que descreve a evolução longitudinal do bombeio
p_n	(m ⁻²)	Função auxiliar da densidade de energia normalizada de bombeio
s	(-)	Função que descreve a evolução longitudinal do sinal
s_{ok}	(m ⁻²)	Densidade normalizada de energia de sinal para cada canal
W_{12}	(s ⁻¹)	Taxa de absorção de sinal
W_{21}	(s ⁻¹)	Taxa de emissão de sinal
η_s	(m)	Raio da seção transversal de emissão para λ_s
η_p	(m)	Raio da seção transversal de emissão para λ_p
τ_{21}	(ms)	Tempo de vida de fluorescência do estado metaestável
τ_{32}	(μ s)	Tempo de vida de fluorescência do estado de bombeio
$\sigma_{ek}(\lambda_s)$	(m ²)	Seção transversal de emissão de sinal para cada canal
$\sigma_{ak}(\lambda_s)$	(m ²)	Seção transversal de absorção de sinal para cada canal
σ_p	(m ²)	Seção transversal de absorção GSA de bombeio
σ'_p	(m ²)	Seção transversal de absorção ESA de bombeio
A	(m ²)	Área do núcleo da fibra dopada
c	(m/s)	Velocidade da luz
h	(J.s)	Constante de Planck
α_s	(m ⁻¹)	Coefficiente de absorção para o sinal
α_p	(m ⁻¹)	Coefficiente de absorção para o bombeio
v_g	(m/s)	Velocidade de grupo
z	(m)	Coordenada cilíndrica, coincide com o eixo da fibra

ΔZ	(m)	Comprimento incremental de seção de fibra dopada
Δp_z	(m)	Passo espacial
Δt	(s)	Passo temporal
$\Delta \nu_s$	(Hz)	Largura espectral total
$\Delta \lambda$	(m)	Largura espectral total
P_o	(W)	Potência de um fóton de ruído
P_s^m	(W)	Potência no sentido co-propagante do sinal
P_{s2}^m	(W)	Potência no sentido contra-propagante do sinal
P_{Sat}^p	(W)	Potência de saturação de bombeio
P_{Sat}^s	(W)	Potência de saturação de sinal
g_p	(m ⁻¹)	Coefficiente de ganho de bombeio
g_{sk}	(m ⁻¹)	Coefficiente de ganho de sinal para cada canal
γ_e	(m ⁻¹)	Parcela de ganho de emissão
γ_a	(m ⁻¹)	Parcela de ganho de absorção
R	(-)	Função auxiliar de convergência
χ	(-)	Fator de convergência
EDF	(-)	Fibra dopada com érbio (<i>erbium doped fiber</i>)

Lista de Figuras

<i>Fig. 2.1 – Diagrama esquemático de um EDFA co-propagante.....</i>	<i>8</i>
<i>Fig. 2.2 – Diagrama esquemático dos níveis de energia para a fibra dopada com érbio quando o bombeio é de 980 nm (três níveis).....</i>	<i>10</i>
<i>Fig. 2.3 – Diagrama esquemático de três níveis de energia para a fibra dopada com érbio.....</i>	<i>12</i>
<i>Fig. 3.1 – Espectro de absorção e emissão para um EDFA com a indicação da largura de banda equivalente.....</i>	<i>28</i>
<i>Fig.4.1 – Representação da divisão da EDF em seções e condições gerais de contorno para a solução das equações diferenciais do sistema.....</i>	<i>34</i>
<i>Fig.4.2– Perfil $per(r)$ em função do raio normalizado (r/a_c), tendo α como parâmetro.....</i>	<i>37</i>
<i>Fig. 4.3 – Seções eficazes de emissão e absorção.....</i>	<i>38</i>
<i>Fig. 4.4 – Tela do programa de simulação para o EDFA em Matlab.....</i>	<i>39</i>
<i>Fig. 4.5 – Tela do programa de simulação para o EDFA: escolha do comprimento de onda.....</i>	<i>40</i>
<i>Fig. 4.6 – Tela do programa de simulação do EDFA, Caso 3: entrada dos valores de potência de entrada de sinal e bombeio.....</i>	<i>41</i>
<i>Fig. 4.7 – Tela do programa de simulação do EDFA, Caso 3: entrada dos dados relativos aos comprimentos dos segmentos de fibra dopada.....</i>	<i>41</i>

<i>Fig. 4.8 - Ganho de um EDFA em função do comprimento da fibra dopada, para operação com potência de sinal em -30 dBm e comprimento de onda do sinal de 1536,7 nm, tendo a potência de bombeio como parâmetro.....</i>	<i>42</i>
<i>Fig. 4.9 - Ganho de um EDFA em função do comprimento da fibra dopada, para operação com potência de sinal em -30 dBm e comprimento de onda do sinal de 1550 nm, tendo a potência de bombeio como parâmetro.....</i>	<i>43</i>
<i>Fig. 4.10 - Evolução do ganho do EDFA em função da potência de entrada de sinal, para o comprimento de fibra dopada de 14,2 m e comprimento de onda do sinal de 1536, 7 nm, tendo a potência de bombeio como parâmetro.....</i>	<i>44</i>
<i>Fig. 4.11 - Evolução do ganho do sinal de um EDFA em função da potência de entrada de sinal, para o comprimento de fibra dopada de 10 m e comprimento de onda do sinal de 1550,49 nm, tendo a potência de bombeio como parâmetro.....</i>	<i>44</i>
<i>Fig. 4.12 - Ganho do EDFA em função do comprimento da fibra dopada, para operação com potência de sinal em -30 dBm e comprimento de onda do sinal de 1550 nm, tendo a potência de bombeio como parâmetro, com e sem rotina de convergência.....</i>	<i>45</i>
<i>Fig. 4.13 – Tela inicial do programa de simulação para o EDFA, no qual mostra os resultados dos cálculos dos coeficientes de normalização, para 2 canais.....</i>	<i>47</i>
<i>Fig. 4.14 – Tela do programa de simulação para o EDFA, onde se destacam os diferentes valores de potência para dos dois canais analisados, o valor da potência de bombeio e os dois comprimentos diferentes de segmentos de fibra.....</i>	<i>48</i>
<i>Fig. 4.15 – Ganho do EDFA em função do comprimento da fibra dopada, para operação com potência de sinal em -30 dBm e comprimento de onda do sinal de 1536,7 nm, tendo a potência de bombeio como parâmetro.....</i>	<i>49</i>

<i>Fig. 4.16 – Ganho do EDFA em função do comprimento da fibra dopada, para operação com potência de sinal em -30 dBm e comprimento de onda do sinal de $1549,76$ nm, tendo a potência de bombeio como parâmetro.....</i>	<i>50</i>
<i>Fig. 4.17 – Evolução do ganho do EDFA em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro, para um segmento de fibra dopada de $14,2$ m e comprimento de onda de sinal de $1536,73$ nm.....</i>	<i>51</i>
<i>Fig. 4.18 – Evolução longitudinal das potências de sinal, bombeio e ASE, assumindo-se 50 mW de potência de bombeio e 1 μW de potência de entrada de sinal, para um comprimento de onda de $1536,72$ nm.....</i>	<i>52</i>
<i>Fig. 4.19 – Evolução longitudinal das potências de sinal, bombeio e ASE, assumindo-se 50 mW de potência de bombeio e 1 μW de potência de entrada de sinal, para um comprimento de onda de $1563,49$ nm.....</i>	<i>52</i>
<i>Fig. 4.20 – Espectro de saída para um EDFA com $14,2$ m de fibra dopada, considerando um canal de -30 dBm em $1563,49$ nm e a potência de bombeio de 50 mW.....</i>	<i>53</i>
<i>Fig. 4.21 - Espectro de saída para um EDFA co-propagante, assumindo-se dez canais transmitidos, a potência de entrada de sinal de -30 dBm/canal, a potência de entrada de bombeio 50 mW e o comprimento de fibra dopada de $14,2$ m.....</i>	<i>54</i>
<i>Fig. 4.22 - Espectro de saída para um EDFA co-propagante, assumindo-se dez canais transmitidos, a potência de entrada de sinal de -10 dBm/canal, a potência de entrada de bombeio 50 mW e o comprimento de fibra dopada de $14,2$ m.....</i>	<i>54</i>
<i>Fig. 5.1 - Transiente de potência do sinal na saída do EDFA quando uma onda quadrada de potência é aplicada à sua entrada, tendo a potência de bombeio de 50 mW, comprimento da fibra dopada de 10 m e comprimento de onda do sinal de $1550,49$ nm.....</i>	<i>65</i>

Fig. 5.2 - Transiente de potência do sinal na saída do EDFA quando uma onda quadrada de potência é aplicada à sua entrada (escala logarítmica), com potência de bombeio de 50 mW, comprimento da EDF de 10 m e comprimento de onda do sinal de 1550,49 nm..... 65

Fig. 5.3 - Potência de bombeio em função do tempo, para operação com potência de bombeio em 50 mW, comprimento da fibra dopada em 10 m e comprimento de onda do sinal de 1550, 49 nm, com escala logarítmica.....66

Fig. 5.4 - Ganho do sinal de um EDFA em função do tempo, para operação com potência de bombeio em 50 mW, comprimento da fibra dopada em 10 m e comprimento de onda do sinal de 1550, 49 nm.....67

Fig. 5.5 - Transientes de potência dos sinais na saída do EDFA quando ondas quadradas de potência são aplicadas à sua entrada, tendo o comprimento da EDF de 10 m, potência de bombeio de 50 mW, e comprimentos de onda do sinal de 1550,49 nm e 1555,21 nm..... 68

Lista de Tabelas

Tabela 4.1 – Parâmetros da fibra utilizada nas simulações.....	37
--	----

Capítulo 1

Introdução

A sociedade atual, juntamente com a indústria das telecomunicações, está vivendo uma das maiores revoluções já presenciadas pelo homem. Uma revolução baseada na informação. O transporte eficiente de informação tornou-se um elemento chave neste novo contexto. A popularização da Internet, o aumento no volume de tráfego em função do oferecimento de serviços multimídia de banda larga, e o espalhamento das redes locais sem fio são apenas alguns exemplos de serviços responsáveis pela agitação constante no mercado das telecomunicações. Em função da alta demanda por largura de banda, os sistemas de comunicações ópticas tornaram-se um dos meios mais eficientes e seguros para transporte de informação. Estes sistemas possuem vantagens operacionais quando comparados a outros, como, por exemplo, os baseados em cabos de cobre. Dentre estas vantagens está a elevadíssima largura de banda, a condutividade elétrica nula, a baixa atenuação, as dimensões reduzidas, a imunidade à interferência eletromagnética e a segurança para a informação, sendo a fibra óptica o componente responsável pela transmissão dos sinais ópticos.

Na década de 50, os altos níveis de perdas de potência luminosa apresentados pelas fibras da época (da ordem de milhares de dB/km) restringiam as aplicações a distâncias muito curtas (menores que um metro), impossibilitando o desenvolvimento dos sistemas de comunicações ópticas [1]. Em 1966, Kao e Hockman, quase que simultaneamente com Werts, concluíram que as altas perdas nas fibras eram resultantes das impurezas contidas no material empregado em sua fabricação [1]. Em 1970, Kapron e Keck da *Corning Glass Works* desenvolveram uma fibra óptica de sílica do tipo multimodo, com atenuação inferior a 20 dB/km [2]. Com este valor de atenuação, foi possível ampliar o espaçamento entre os repetidores ópticos, igualando-o ao espaçamento utilizado pelos sistemas baseados em cabos de cobre. Este avanço fez das comunicações ópticas baseadas em fibras ópticas uma tecnologia promissora em termos de uso comercial. Durante a década de 80, os avanços tecnológicos nos processos de fabricação de fibras diminuiriam ainda mais a atenuação. Desta forma, tornou-se possível a implantação de entroncamentos ópticos com centenas de

quilômetros, interligando as principais capitais e centros urbanos mundiais. Porém, verificou-se que, a cada intervalo de cerca de 70 km, era necessário instalar um repetidor que recuperasse o sinal óptico transmitido.

Os repetidores utilizados nesta década eram conhecidos como 3R (*reshaping, retiming e regenerating* - 3R). O nome 3R surgiu devido à realização de três operações: reformatação, re-sincronização e regeneração. Estes repetidores amplificavam os sinais transmitidos, ressincronizavam a transmissão dos bits e corrigiam as possíveis distorções causadas pelo sistema. O processo de funcionamento destes repetidores consistia em converter o sinal do domínio óptico para o elétrico. Neste domínio, o sinal era processado, recuperando as suas características originais. O sinal elétrico recuperado era novamente convertido para o domínio óptico e retransmitido. Apesar de eficiente, o repetidor optoeletrônico possuía um alto custo. A idéia de aumentar a capacidade dos sistemas de comunicação por fibra óptica utilizando, por exemplo, a tecnologia de multiplexação por divisão em comprimento de onda (*wavelength division multiplexing* - WDM) já existia. Esta técnica permitiria a transmissão simultânea de sinais ópticos com diferentes comprimentos de onda pela mesma fibra, expandindo-se a capacidade do sistema sem a necessidade de instalação de novas fibras. A utilização do WDM com repetidores eletrônicos foi proposta em laboratório. Porém, a necessidade de um repetidor para cada canal transmitido provou a inviabilidade econômica desta idéia, principalmente se a taxa de transmissão também viesse a aumentar.

A consolidação e o estímulo ao uso dos sistemas WDM somente ocorreram com o aparecimento dos amplificadores ópticos empregando fibras ópticas dopadas com elementos das terras-raras, como por exemplo, o érbio (*erbium doped fiber amplifier* – EDFA). Esses amplificadores foram, o estopim para a revolução das comunicações ópticas por realizar a amplificação simultânea de vários canais de informação com mínima interferência entre eles, onde cada canal pode utilizar, potencialmente, a ampla banda de transmissão da fibra óptica.

Desde a invenção dos EDFA's, suas propriedades físicas e sua modelagem têm sido objeto de intensa pesquisa [3,4]. Entretanto, devido ao fato do tempo de resposta do EDFA ser lento quando comparado às taxas de transmissão utilizadas nos sistemas de comunicações ópticas, a maior parte dos estudos e modelos focaram suas atenções nas

características estacionárias do EDFA [5,6]. Em particular, métodos baseados em aproximações que consideram uma contribuição em banda equivalente do ruído de emissão espontânea amplificada (*amplified spontaneous emission* – ASE) tornaram-se comuns. Alguns autores atacam o problema de maneira a analisar a contribuição efetiva da ASE para apenas um comprimento de onda de sinal por vez (análise monocanal) [7]. Outros adotam uma divisão do espectro de emissão do amplificador em torno de vários comprimentos de onda predeterminados dentro da banda, assumindo a contribuição da ASE nestas pequenas faixas, permitindo um tratamento multicanal aproximado para o amplificador [7]. Infelizmente, vários dos métodos desenvolvidos apresentam problemas de convergência quando a análise é feita para amostras muito longas de fibra dopada com érbio (*erbium doped fiber* – EDF).

É importante que a modelagem do EDFA seja a mais fiel possível, para auxiliar no projeto de sistemas ópticos. Por exemplo, atualmente os EDFA's geralmente operam no regime de saturação de ganho. O ganho é um parâmetro do EDFA que depende de uma série de características físicas e de operação do amplificador, como concentração de dopante na fibra dopada, comprimento da fibra dopada, potência de bombeio e potência de sinal. Para uma potência de bombeio fixa, quando a potência de sinal é variada, o ganho pode também variar, sendo de forma mais pronunciada se o nível de saturação for maior. Modelos simples de simulação podem prever este tipo de comportamento com precisão. No entanto, num sistema onde vários canais são amplificados simultaneamente, o ganho do EDFA mantém a mesma dependência com a potência óptica total de entrada; porém, se, por exemplo, a potência de cada canal é fixa, as variações de ganho podem ser fruto do número de canais acoplados. Além disto, se a não uniformidade do espectro de ganho também é considerada, um mesmo canal pode ter um ganho maior ou menor dependendo do nível de saturação. Conclui-se, portanto, que a potência de saída de cada canal depende de cada canal presente e, em sistemas atuais, com adição e remoção de canais na entrada do amplificador, o ganho de cada canal se torna fortemente susceptível a variações [8,9]. Assim sendo, os modelos de simulação multicanal devem ser aptos a prever o comportamento do amplificador em situações extremas, longe de aproximações de primeira ordem, para evitar comprometimento de projeto e possíveis penalidades ao tráfego de informações do sistema.

O crescimento de redes ópticas com múltiplos comprimentos de onda, o aumento da aplicação de funções de conversão de comprimento de onda e de adição e remoção de canais a estas redes, a saturação quase sempre presente e as taxas de transmissão cada vez maiores e implementadas em diferentes formatos de modulação, têm impulsionado o estudo das características dinâmicas do EDFA, seja para a modelagem do sistema como um todo, ou seja como ferramenta para projeto ou investigação de técnicas de controle automático de ganho para o amplificador óptico. A modelagem, assumindo operação estática, é inapropriada para investigação de características dinâmicas. Por essa razão, alguns modelos dinâmicos foram propostos e permitem, por exemplo, o estudo da duração de transientes na potência de saída do amplificador após variações de potência óptica na entrada do EDFA. Estes transientes podem produzir degradações temporárias no sistema, as vezes impossíveis de serem detectadas por analisadores de taxa de erro.

Considerando a importância do EDFA nas telecomunicações, este trabalho se propõe a realizar um estudo teórico do amplificador com bombeio co-propagante em 980 nm, e desenvolver ferramentas de simulação que permitam uma análise do uso desses amplificadores nos sistemas multicanais, ou seja, em sistemas ou redes WDM, para regimes de operação estático e dinâmico. Primeiramente, desenvolveram-se as formulações que permitiram a análise do comportamento estático do amplificador. A análise introdutória foi puramente monocanal, baseada na técnica da largura de banda equivalente, conhecida na literatura [7], que incorporou uma nova proposta de rotina estável para a simulação do EDFA. Na seqüência, o modelo estático para aplicação multicanal foi avaliado, onde a distribuição espectral da emissão espontânea amplificada passou a ser considerada. Em uma segunda etapa, a simulação multicanal foi modificada para incluir o comportamento dinâmico do amplificador. Neste caso, a análise estática ainda é importante, pois fornece as condições iniciais para a modelagem dinâmica. Assim, com os dados característicos de uma fibra dopada comercial, as diferentes rotinas de simulação foram utilizadas para avaliar parâmetros de operação do EDFA, tais como ganho de sinal, absorção de bombeio e figura de ruído, entre outros. Alguns resultados experimentais são também apresentados para validação dos modelos utilizados.

A apresentação deste trabalho se faz em seis capítulos. O Capítulo 2 apresenta uma introdução a teoria dos EDFAs, considerando a sua topologia básica (co-propagante). Na

seqüência, o diagrama esquemático do EDFA co-propagante é introduzido, juntamente com seus componentes fundamentais. Para o entendimento do mecanismo de amplificação, utiliza-se um diagrama que representa os três níveis de energia do íon de érbio envolvidos no processo de amplificação da luz (bombeio em 980 nm). Por fim, com o auxílio do diagrama de três níveis de energia, definem-se as equações de taxa que governam as populações de portadores envolvidas nos processos de absorção e emissão de luz.

Após a descrição teórica do EDFA e a obtenção das equações de taxa, no Capítulo 3 será apresentado um estudo do amplificador que permitirá o desenvolvimento de modelos matemáticos para a análise do mesmo sob estado estacionário. As soluções estáticas das equações de taxa, que definem as populações de portadores nos diferentes níveis de energia de interesse do érbio na fibra dopada, são manipuladas, chegando-se a expressões normalizadas destas populações em relação à concentração total de portadores. No caso do bombeio de 980 nm, adotado para as simulações posteriores, este procedimento resulta na redução do problema de três níveis para dois, simplificando as análises. Assim, para caracterizar o EDFA, um estudo de propagação da luz deve ser conduzido, considerando-se a distribuição transversal e, principalmente, longitudinal da mesma no núcleo e casca da fibra, para sinal, bombeio e ASE. Com isto, um modelo multicanal de propagação é produzido, baseado no espectro de ASE. Este modelo pode ser reestruturado em uma formulação mais simples, conhecida como modelo da largura de banda equivalente para a ASE, que, apesar de versátil, é limitado à propagação monocal. Por fim, apresentou-se uma análise para a figura de ruído do EDFA.

No Capítulo 4, primeiramente, as considerações que permitem a adaptação da teoria apresentada no Capítulo 3 ao algoritmo de simulação do amplificador, são introduzidas. Neste item, apresentam-se as características e os parâmetros físicos para a amostra de fibra dopada com érbio utilizada nas simulações. Na seqüência, os resultados de simulação para o EDFA co-propagante sob operação estática podem ser visualizados para várias condições iniciais de contorno, começando, por razões de desenvolvimento do trabalho, com aqueles produzidos pelo método de largura de banda equivalente. Na seqüência, as simulações para aplicações em sistema multicanal, com a inclusão do espectro de ASE, são apresentadas e comparadas com alguns resultados experimentais, para efeito de validação.

O Capítulo 5 foi dedicado ao estudo e implementação de uma ferramenta computacional para a simulação do comportamento dinâmico do EDFAs. Primeiramente será apresentado o modelo teórico que descreve a resposta dinâmica dos EDFAs, a partir das equações de taxa de um sistema de três níveis de energia. Na seqüência, um modelo simplificado, para o caso estacionário, será apresentado, que fornecerá as condições iniciais para as análises temporais do EDFAs. O método utilizado neste trabalho, para a discretização espacial e temporal, foi o das diferenças finitas. Por fim, serão apresentados os resultados obtidos pelas simulações do modelo apresentado.

Por fim, no Capítulo 6 serão apresentadas as conclusões e sugestões para futuros trabalhos.

Capítulo 2

Introdução Teórica ao Estudo do EDFA

O EDFA pertence a uma classe importante de amplificadores, obtidos a partir do uso de fibras com elementos químicos pertencentes ao grupo das “terras raras”. As características dos amplificadores, bem como o comprimento de onda de operação e a largura de banda do ganho, são determinadas exclusivamente pelos dopantes. A fibra de sílica executa a função de agente hospedeiro. Há íons diferentes pertencentes ao grupo das terras raras, como o érbio, hólmio, neodímio, samário, túlio e itérbio, que podem ser usados para realizar a amplificação em diferentes faixas comprimentos de onda, cobrindo uma extensa banda que vai de 0,5 a 3,5 μm [3], mas não necessariamente na matriz de sílica. O amplificador a fibra dopada com érbio tem atraído mais atenção porque sua banda é centrada próximo ao comprimento de onda de 1,55 μm , ou seja, na região onde a fibra apresenta as menores perdas (terceira janela das comunicações ópticas) [3].

Entre as principais vantagens do EDFA, pode-se destacar a extensa banda passante, que é da ordem de 4,2 THz, ou 35 nm para a região de comprimento de onda em torno de 1,55 μm . Para melhor aproveitar esta disponibilidade de espectro óptico, utiliza-se a técnica de transmissão baseada na multiplexação por divisão em comprimento de onda, onde diversos canais ópticos são alocados nesta banda passante. Por exemplo, dentro desta faixa de 35 nm, pode-se posicionar até 42 canais WDM separados de cerca de 0,8 nm. Se estes canais fossem modulados a uma taxa de até 10 Gb/s, a taxa agregada transmitida por uma única fibra seria de 420 Gb/s.

Na Fig. 2.1, observa-se o diagrama esquemático da topologia básica de um amplificador a fibra dopada com érbio, mostrando seus componentes fundamentais [8]. Um EDFA é constituído basicamente de uma fibra óptica, cujo núcleo é dopado com íons de érbio, dois acopladores seletivos WDM, isoladores e um laser de bombeio. A função do laser de bombeio é a de fornecer energia para o processo de amplificação, uma vez que emite, tipicamente, nos comprimentos de onda de 980 nm ou 1480 nm, que são comprimentos de onda de absorção do érbio.

Ao entrar no amplificador, o sinal óptico a ser amplificado, λ_s , é superposto ao sinal do laser de bombeio, λ_p , no WDM1. Este sinal óptico de entrada, ao se propagar pela fibra dopada, é amplificado por meio de emissões estimuladas, geradas a partir da inversão de população de portadores do érbio provocada pela absorção do bombeio. O sinal amplificado deixa a EDF e passa pelo WDM2, que filtra o sinal de bombeio, λ_p . Na saída do EDFA, o isolador 2 é utilizado para impedir que reflexões ou sinais indesejados presentes na saída retornem ao amplificador.

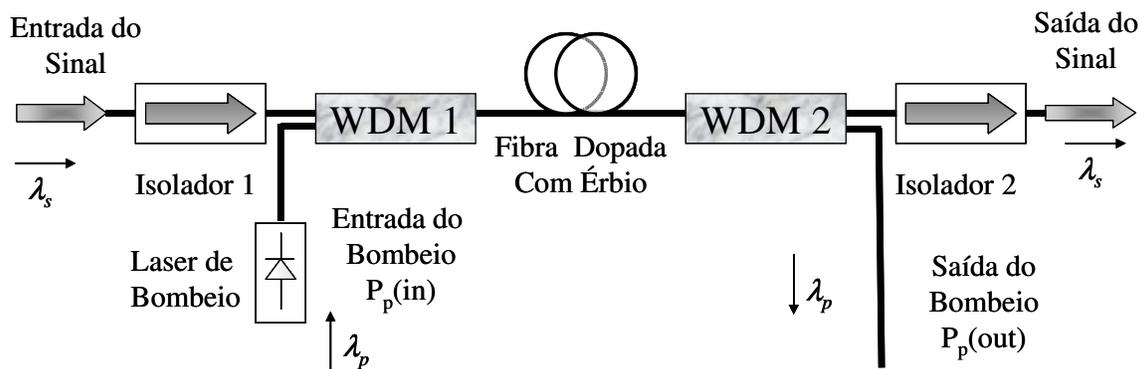


Fig. 2.1 – Diagrama esquemático de um EDFA co-propagante.

Os dispositivos apresentados na Fig. 2.1 podem ser rearranjados. Cada configuração gerada propicia características particulares de operação, permitindo, assim, a adequação do amplificador a diferentes aplicações. Quanto à sua utilização em sistemas, ele pode funcionar como amplificador de potência, para aumentar a potência do sinal do transmissor, como pré-amplificador, para melhorar a sensibilidade na recepção, e como repetidor ou amplificador de linha, para amplificar o sinal já atenuado ao longo da fibra.

2.1. Níveis de Energia e Mecanismos de Amplificação

Quando um feixe de luz atravessa um meio, como, por exemplo, uma fibra dopada com érbio, ele tem sua intensidade atenuada devido à absorção pelos materiais que compõem o núcleo e ao espalhamento provocado pela fibra. A energia dos fótons incidentes excita os elétrons do meio para níveis de energia mais elevados. Posteriormente o elétron, em um nível mais excitado, relaxa, decaindo para seu estado inicial e liberando

energia. Essa energia pode ser liberada de forma radiativa e não-radiativa. O decaimento não-radiativo envolve a criação de um fônon, isto é, de uma vibração da rede cristalina em torno do átomo. O decaimento radiativo pode ocorrer de forma espontânea ou estimulada. Em ambos os casos, ocorre a emissão de fótons. O comprimento de onda do fóton emitido será inversamente proporcional à energia de separação entre os níveis de energia envolvidos no processo.

Os níveis de energia do érbio participantes do processo de amplificação óptica na banda C (1530 a 1565 nm) podem ser representados por um sistema de 3 ou, de até mesmo, de 2 níveis de energia. O objetivo desta simplificação é o de facilitar a descrição dos modelos matemáticos de ganho do amplificador à fibra dopada. Nesse sentido, considera-se um sistema com três níveis de energia, E_1 , E_2 e E_3 ($E_1 < E_2 < E_3$), denominados, respectivamente, fundamental, metaestável e de bombeio. O nível metaestável torna-se o mais populado após o processo de inversão de população e se caracteriza por possuir um tempo de vida radiativo τ_{21} longo, da ordem de 10 ms. O nível 3, o nível de bombeio, possui tempo de vida radiativo τ_{32} inferior a 10 μ s. Esse tempo de decaimento, 1000 vezes menor que o tempo de decaimento do nível metaestável, significa que este nível pode ser considerado praticamente despovoado em uma análise de estado estacionário. A transição de interesse ocorre entre os níveis de energia 1 e 2 e os tempos de vida radiativos correspondem às transições que envolvem liberação de energia via fótons.

Se o sistema está em equilíbrio térmico, ou seja, na ausência de bombeio ou sinal, a população de portadores nos estados de energia fundamental, metaestável e de bombeio, são representados, respectivamente, por N_1 , N_2 e N_3 , onde $N_1 > N_2$ e $N_1 > N_3$. No equilíbrio térmico, um sistema atômico tem população maior em seu nível de energia mais baixo. Se o átomo está inicialmente no nível 2, ele pode decair ao nível 1 emitindo um fóton de energia $E_2 - E_1$. Quando este processo ocorre de forma natural, tem-se a chamada emissão espontânea. A frequência ν do fóton gerado é dada pela expressão:

$$\nu = \left(\frac{E_2 - E_1}{h} \right), \quad (2.1)$$

onde h é a constante de Planck. Caso o decaimento ocorra de forma não-radiativa, a diferença de energia é entregue como uma vibração térmica em torno do átomo (fônon).

Para facilitar o entendimento do mecanismo de amplificação do EDFA, a Fig. 2.2 mostra o diagrama esquemático dos níveis de energia do íon de érbio em sílica (Er^{3+}). No caso de bombeio de 980 nm, pode-se observar que se trata de um sistema de três níveis de energia. Na presença de bombeio, a situação de equilíbrio é 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. Os comprimentos de onda λ para os quais tais transições acontecem, devem obedecer à relação quântica $\lambda = hc/\Delta E$, onde c é a velocidade da luz e ΔE é a diferença de energia entre os níveis envolvidos.

Com bombeio em 980 nm, a absorção de fótons pelos portadores provoca transições de E_1 para E_3 . Como a tendência do sistema é o de retornar ao seu estado inicial, os portadores que foram excitados para o nível E_3 tendem a perder sua energia e retornar ao nível fundamental E_1 . Contudo, a transição não é direta e os portadores do nível E_3 , antes de retornarem ao nível E_1 , decaem espontaneamente para o nível metaestável E_2 , perdendo energia na forma de emissões espontâneas não-radiativas [9].

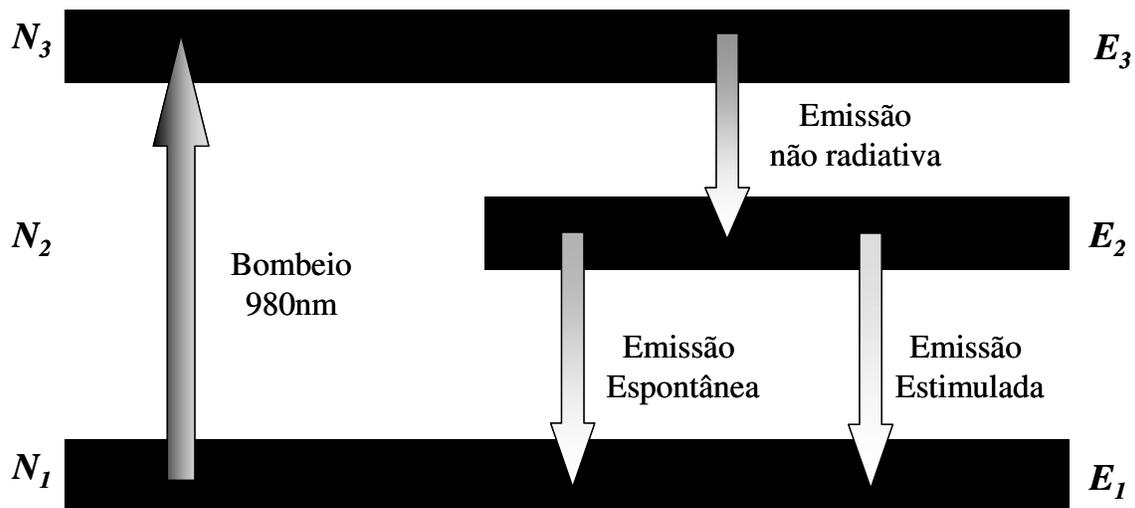


Fig. 2.2 – Diagrama esquemático dos níveis de energia para a fibra dopada com érbio quando o bombeio é de 980 nm (três níveis).

A transição dominante de E_2 a E_1 é radiativa e pode ocorrer por emissão espontânea ou estimulada. Os comprimentos de onda para os fótons resultantes dessa transição estão

em uma faixa em torno de 1.530 nm. Assim, no caso de um sinal ser acoplado à entrada do amplificador, este sinal poderia estimular a emissão de fótons coerentes (mesmo comprimento de onda, fase, direção e polarização) ao longo da fibra dopada, produzindo a amplificação óptica desejada. No entanto, alguns fótons poderão ser emitidos quando os portadores decaírem espontaneamente para o nível fundamental. Em relação ao sinal de entrada, estes fótons espontâneos podem ser considerados como 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, que resulta na maior fonte de ruído em um sistema de transmissão que utiliza amplificadores a fibra dopada.

Para que a amplificação óptica aconteça, os átomos devem ser, de alguma maneira, levados do nível fundamental para o nível de bombeio. Quando se aplica o bombeio, o equilíbrio térmico é alterado, já que os átomos de E_1 podem absorver fótons e passar para níveis superiores de energia. Para o bombeio em 980 nm, a absorção de fótons provoca transições de E_1 a E_3 . Se o material é adequado, os átomos decaem rapidamente, numa transição não radiativa, de E_3 a E_2 . Este fenômeno só acontece porque uma das características importantes do érbio é o fato de ter as transições E_3 a E_2 consideravelmente mais rápidas que as transições E_2 a E_1 , que é predominantemente radiativa, ou seja, emite fótons com comprimento de onda em torno de 1530 nm. Isto significa que, se a potência de bombeio for suficientemente alta, a população de portadores do estado fundamental será reduzida, e os portadores irão se acumular no estado E_2 . Este processo é conhecido como inversão de população, garantindo assim as condições para amplificação óptica.

2.2. Modelo matemático de níveis de energia para o EDFA baseado num sistema de três níveis.

Os níveis de energia que aparecem na Fig. 2.2 são degenerados e podem ser representados pelas faixas que determinam E_1 , E_2 e E_3 . Por esta razão, as transições entre as bandas que representam os níveis E_2 e E_1 não produzem exclusivamente fótons em um determinado valor de frequência, mas em uma faixa de valores que atendem a janela óptica

das telecomunicações. 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.

Para a análise dos níveis de energia e posterior formulação das equações de taxa que representam a dinâmica da população de portadores, a Fig. 2.3 reapresenta, o diagrama de três níveis de energia para a fibra dopada com érbio, onde, agora, ressaltam-se as transições mais relevantes. As transições espontâneas radiativas e não-radiativas são representadas, respectivamente, pelas taxas de transições A^R e A^{NR} , e as transições estimuladas radiativas no comprimento de bombeio e de sinal pelas taxas de transição R e W , respectivamente.

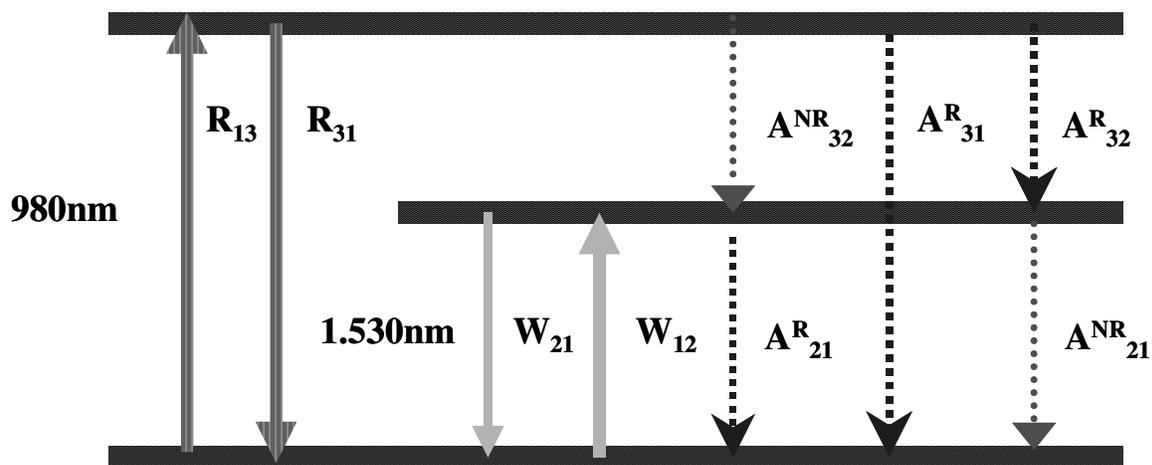


Fig. 2.3 – Diagrama esquemático de três níveis de energia para a fibra dopada com érbio. Nas transições que envolvem o comprimento de onda de bombeio, há três possibilidades [11]:

- 1- os portadores que estão no nível fundamental absorvem energia de bombeio e são excitadas para o nível E_3 (R_{13}), onde R_{13} é a taxa de absorção de bombeio;
- 2- os portadores do nível E_3 decaem estimuladamente para o nível fundamental (R_{31}), onde R_{31} é a taxa de emissão estimulada de bombeio;

- 3- os portadores do nível E_3 decaem espontaneamente de forma radiativa para o nível fundamental (A^R_{31}), onde A^R_{31} representa a taxa de emissão espontânea radiativa do bombeio.

Para as transições que envolvem o comprimento de onda do sinal, também são observados três casos possíveis:

- 1- a absorção do sinal (W_{12}), onde W_{12} é a taxa de absorção de sinal ;
- 2- a emissão estimulada do sinal (W_{21}), onde W_{21} é a taxa de emissão estimulada do sinal;
- 3- a emissão espontânea do sinal (A^R_{21}), onde A^R_{21} é a taxa de emissão espontânea radiativa do sinal.

Além das transições citadas, outras também são possíveis de acontecer. Partindo-se da população de portadores do nível 3, na forma radiativa têm-se as transições dos portadores do nível de bombeio que decaem para o nível de sinal, representados pela taxa de emissão radiativa (A^R_{32}). Já de forma não-radiativa, há outros dois modos possíveis, representados pela taxa de transição não-radiativa do nível de bombeio para o nível de sinal (A^{NR}_{32}). Partindo-se, agora da população de portadores do nível 2, tem-se de forma não-radiativa, o decaimento espontâneo do nível metaestável para o fundamental (A^{NR}_{21}).

No caso específico do érbio, o decaimento espontâneo do nível 3 pode ser assumido como sendo predominantemente não-radiativo, de forma que $A^{NR}_{32} \gg A^R_{32}$. Portanto, a taxa de emissão espontânea do nível três para o nível dois é dada por:

$$A_3 \cong A^{NR}_{32} = A_{32} \quad (2.2)$$

Assume-se, também, que o decaimento espontâneo do nível metaestável 2 é, essencialmente, radiativo, de forma que $A^{NR}_{21} \cong 0$ e $A_{21} \cong A^R_{21}$. Assim, seguindo o mesmo raciocínio que para o nível 3, tem-se que:

$$A_2 = A_{21} \quad (2.3)$$

Definindo-se N_0 (m^{-3}) como sendo a densidade total de portadores dos íons dopantes de érbio e assumindo-se que um íon de érbio só pode ocupar um nível por vez, pode-se escrever que [7]:

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

Com o auxílio do diagrama de três níveis para a fibra dopada com érbio da Fig. 2.3, podem-se escrever as equações de taxa que governam as populações de portadores nos três níveis de energia envolvidos no mecanismo de amplificação. De um modo geral, assume-se que a taxa de variação da população em um determinado nível de energia é igual ao somatório de contribuições que aumentam a população neste nível subtraída do somatório daquelas que diminuem esta população. Como as contribuições dependem do que está ocorrendo em outros níveis, as equações de taxa se tornam acopladas. Assim para o nível E_1 [9]:

$$\frac{dN_1}{dt} = -R_{13}N_1 + R_{31}N_3 + A_{21}N_2 + W_{21}N_2 - W_{12}N_1 \quad (2.5)$$

De (2.5) observa-se que a variação temporal dos portadores no nível 1 diminui por absorção devido a presença do bombeio ($R_{13}N_1$) e do sinal ($W_{12}N_1$) e aumenta com o decaimento estimulado do bombeio ($R_{31}N_3$), do sinal ($W_{21}N_2$) e com o decaimento espontâneo do nível dois para o nível um ($A_{21}N_2$). De forma semelhante, para o nível 2:

$$\frac{dN_2}{dt} = A_{32}N_3 - A_{21}N_2 + W_{12}N_1 - W_{21}N_2 \quad (2.6)$$

Neste caso, (2.6) mostra que os portadores do nível 2 tendem a aumentar com às emissões espontâneas não-radiativas do nível 3 para o nível dois ($A_{32}N_3$) e à absorção do sinal que se propaga pela fibra dopada ($W_{12}N_1$). Já as emissões espontâneas do nível dois para o nível um ($A_{21}N_2$) e as emissões estimuladas pelo sinal ($W_{21}N_2$) contribuem de forma oposta. Para a população do nível 3, pode-se, finalmente, escrever que:

$$\frac{dN_3}{dt} = R_{13}N_1 - R_{31}N_3 - A_{32}N_3, \quad (2.7)$$

onde a densidade de portadores no nível de bombeio aumenta devido à presença dos portadores excitados pelo bombeio ($R_{13}N_1$), porém se reduz devido às emissões espontâneas no comprimento de onda de bombeio ($R_{31}N_3$) e às emissões não-radiativas do nível três para o nível dois ($A_{32}N_3$).

2.3. Conclusão

Neste capítulo, apresentou-se uma introdução ao estudo do EDFA, ressaltando o mecanismo de amplificação e a razão para a escolha do érbio como dopante para a fibra. O mecanismo de amplificação tem sua base em um sinal de bombeio que é o responsável pelo fornecimento da energia que é utilizada no processo de amplificação. Esse sinal de bombeio é absorvido pelos átomos de érbio ao percorrer a fibra óptica dopada, excitando esses portadores para níveis de energia mais altos que, depois, retornam para o estado fundamental, emitindo fótons. Se a potência de bombeio for alta o suficiente, chega-se a uma situação onde há mais portadores nos níveis mais altos de energia que no nível fundamental (inversão de população) situação necessária para a obtenção do ganho óptico. As emissões de fótons podem ser espontâneas (ruído) ou estimuladas pelo sinal, bombeio ou pelas próprias emissões espontâneas.

No final do capítulo, as características de operação do EDFA foram descritas e um modelo matemático para um sistema de três níveis foi formulado. Este modelo servirá de base para a modelagem do EDFA sob condições de operação estacionária e dinâmica.

Capítulo 3

Modelo Matemático para Análise Multicanal

Após a descrição teórica do EDFA, parte-se para um estudo do amplificador que permita o desenvolvimento de modelos matemáticos para a análise de sua operação sob estado estacionário e em condições de amplificação simultânea de vários canais.

Neste intuito, dois modelos foram desenvolvidos para descrever o EDFA: um que permite a modelagem multicanal e outro, um caso especial do primeiro e basicamente monocanal, que utiliza um método conhecido como largura de banda equivalente. Fundamentalmente, o que difere os mesmos é o tratamento dado à ASE. Em ambos os casos, produz-se uma ferramenta para a realização de simulações computacionais que resultam nos principais parâmetros de funcionamento do EDFA. E por fim, apresenta-se um breve estudo sobre a figura de ruído do EDFA.

3.1. Modelo matemático para análise de estado estacionário

As análises estacionárias supõem que o número de portadores em cada um dos três níveis de energia é invariante com o tempo. Portanto, as derivadas nos primeiros membros das equações diferenciais (2.5) a (2.7) são nulas, resultando em um sistema de três equações e três incógnitas (N_1, N_2, N_3). Considerando o estado estacionário e agrupando-se os termos:

$$-N_1(R_{13} + W_{12}) + N_2(A_{21} + W_{21}) + N_3R_{31} = 0 \quad (3.1)$$

$$N_1W_{12} - N_2(W_{21} + A_{21}) + N_3A_{32} = 0 \quad (3.2)$$

$$N_1R_{13} - N_3(R_{31} + A_{32}) = 0 \quad (3.3)$$

Observando-se as três equações acima, pode-se concluir que (3.1) é uma combinação linear de (3.2) e (3.3). Substituindo-se N_3 das equações (3.2) e (3.3) por (2.4), pode-se reescrever que:

$$N_1 W_{12} - N_2 \left(\frac{1}{\tau_{21}} + W_{21} \right) + A_{32} (N_0 - N_1 - N_2) = 0 \quad (3.4)$$

$$N_1 R_{13} - (N_0 - N_1 - N_2) (A_{32} + R_{31}) = 0 \quad (3.5)$$

onde τ_{21} é o tempo de vida de fluorescência do estado metaestável, definido por [9]:

$$\tau_{21} = \frac{1}{A_{21}} \quad (3.6)$$

Isolando N_2 de (3.5), fica-se com:

$$N_2 = \left(\frac{N_0 (R_{31} + A_{32}) - N_1 (R_{13} + R_{31} + A_{32})}{R_{31} + A_{32}} \right) \quad (3.7)$$

Substituindo-se (3.7) em (3.4), após algumas manipulações algébricas, obtém-se que:

$$\frac{N_1}{N_0} = \frac{(1 + W_{21} \tau_{21}) \left(1 + \frac{R_{13}}{A_{32}} \right)}{(1 + w_{21} \tau_{21}) \left(1 + \frac{R_{13} + R_{31}}{A_{32}} \right) + W_{12} \tau_{21} \left(1 + \frac{R_{31}}{A_{32}} \right) + (R_{13} \tau_{21})} \quad (3.8)$$

Ao se isolar N_1 de (3.4), tem-se que:

$$N_1 = \frac{N_2 \left(W_{21} + \frac{1}{\tau_{21}} + A_{32} \right) - N_0 A_{32}}{W_{12} - A_{32}} \quad (3.9)$$

Substituindo-se (3.7) em (3.9) e manipulando-se algebricamente, pode-se escrever que:

$$\frac{N_2}{N_0} = \frac{R_{13}\tau_{21} + W_{12}\tau_{21} \left(1 + \frac{R_{31}}{A_{32}}\right)}{(1 + W_{21}\tau_{21}) \left(1 + \frac{R_{31} + R_{13}}{A_{32}}\right) + W_{12}\tau_{21} \left(1 + \frac{R_{31}}{A_{32}}\right) + R_{31}\tau_{21}} \quad (3.10)$$

Tendo o érbio como referência, pode-se assumir que a taxa de decaimento espontâneo não-radiativo do nível três (A_{32}) é predominante sobre as taxas de absorção e emissão estimulada de bombeio (R_{13} e R_{31}), em outras palavras, $A_{32} \gg R_{13}$ e $A_{32} \gg R_{31}$ [2]. Assim, podem-se simplificar as equações (3.9) e (3.10), deixando-as na forma:

$$\frac{N_1}{N_0} = \frac{1 + W_{21}\tau_{21}}{1 + \tau_{21}(R_{13} + W_{12} + W_{21})} \quad (3.11)$$

$$\frac{N_2}{N_0} = \frac{\tau_{21}R_{13} + W_{12}}{1 + \tau_{21}(R_{13} + W_{12} + W_{21})} \quad (3.12)$$

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. Considerando-se a estrutura cilíndrica da fibra, o sistema de referência de coordenadas cilíndricas será expresso em termos de (r, ϕ, z) , com o eixo z alinhado em relação ao eixo da fibra óptica. Neste sistema de coordenadas, lembrando-se que, no comprimento de onda de bombeio (λ_p), a fibra pode ser multimodo, as densidades de energia de bombeio normalizada, $p_n(r, \phi)$, e de energia normalizada do sinal do k -ésimo canal acoplado, $s_{0k}(r, \phi)$, podem ser escritas como [10-14]:

$$p_n(r, \phi) = r_n(r) \cos(n\phi)^2 \quad (3.13)$$

$$s_{0k}(r, \phi) = s_{0k}(r) \quad (3.14)$$

com

$$r_n(r) = \begin{cases} C_{uw} J_n^2 \left(\frac{u_p r}{a_c} \right) & r \leq a_c \\ C_{uw} \left[\frac{J_n(u_p r)}{K_n(w_p)} \right]^2 K_n^2 \left(\frac{w_p r}{a_c} \right) & r > a_c \end{cases} \quad (3.15)$$

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, C_{uw} (m^{-2}) é o coeficiente de normalização, J_n e K_n representam as funções de Bessel de primeira e segunda espécie, respectivamente, u_p e w_p são constantes de propagação transversais normalizadas, e

$$s_{0k}(r) = \begin{cases} K_{uwk} J_0^2 \left(\frac{u_{sk} r}{a_c} \right) & r \leq a_c \\ K_{uwk} \left[\frac{J_0(u_{sk})}{K_0(w_{sk})} \right]^2 K_0^2 \left(\frac{w_{sk} r}{a_c} \right) & r > a_c \end{cases} \quad (3.16)$$

onde K_{uwk} (m^{-2}) é o coeficiente de normalização para cada canal e u_{sk} e w_{sk} são constantes de propagação transversais para cada canal.

As intensidades de sinal para cada canal, $I_{sk}(r, \phi, z)$, e de bombeio, $I_p(r, \phi, z)$, expressas em W/m^2 , estão relacionadas às densidades de energia e às funções (adimensionais) que descrevem a evolução do sinal de cada canal e do bombeio, $s(z)$ e $p(z)$, respectivamente, por meio de [11,12,14]:

$$I_p(r, \phi, z) = P_p(0) p_0(r, \phi) p(z) \quad (3.17)$$

$$I_{sk}(r, \phi, z) = P_{sk}(0) s_{0k}(r) s_k(z) \quad (3.18)$$

onde, $P_{sk}(0)$ e $P_p(0)$ são as potências em (W) acopladas à fibra do k -ésimo canal e do bombeio, respectivamente, e $p_0(r, \phi)$ é a densidade de energia normalizada, assumindo-se um bombeio monomodal. No caso de sistemas monocanais, k é igual a um.

Quando o bombeio se propaga pela fibra dopada, dois mecanismos são os principais responsáveis pela redução da quantidade de fótons de bombeio. O primeiro, chamado de absorção de nível fundamental (*ground state absorption - GSA*), 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 absorção de estado excitado (*excited state absorption - ESA*), 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 . A operação com bombeio em 980 nm diminui as absorções de estado excitado [12].

A evolução de $I_p(r, \phi, z)$ pode ser descrita, para uma área incremental dS de seção transversal da fibra, por meio da taxa de variação da intensidade do bombeio ao longo da fibra [3,15-16]:

$$\frac{dI_p}{dz} dS = -(\sigma_p N_1 + \sigma_p' N_2) I_p dS \quad (3.19)$$

onde σ_p é a seção transversal de absorção *GSA*, e σ_p' é a seção transversal de absorção *ESA*. Da mesma forma, a evolução de $I_{sk}(r, \phi, z)$ também pode ser escrita em termos da taxa de variação da intensidade do k -ésimo sinal ao longo da fibra, como [3,15-16]:

$$\frac{dI_{sk}}{dz} dS = (\sigma_{ek} N_2 - \sigma_{ak} N_1) I_{sk} dS, \quad (3.20)$$

onde σ_{ek} é a seção transversal de emissão e σ_{ak} é a seção transversal de absorção, ambos para cada canal.

3.2. Considerações sobre as populações de portadores no EDFA

Para simplificar a notação de (3.12) e (3.11), estas são escritas em termos de coordenadas cilíndricas:

$$\frac{N_2}{N_0} = X(r, \phi, z) = \frac{\tau_{21} [R_{13}(r, \phi, z) + W_{12}(r, \phi, z)]}{1 + \tau_{21} [R_{13}(r, \phi, z) + W_{12}(r, \phi, z) + W_{21}(r, \phi, z)]} \quad (3.21)$$

A densidade normalizada de portadores do nível fundamental é:

$$\frac{N_1}{N_0} = 1 - X(r, \phi, z) \quad (3.22)$$

As taxas de transição de portadores W_{12} , W_{21} e R_{13} , em coordenadas cilíndricas, são definidas, em termos das seções transversais de absorção e de emissão, por [3,7]:

$$W_{12}(r, \phi, z) = \sum_{k=1}^{N_c} \frac{\lambda_{sk} \sigma_a(\lambda_{sk}) I_{sk}(r, z)}{hc} + \frac{1}{hc} \int_0^{\infty} s_0(r) \sigma_a(\lambda) \lambda [S_{ASE}(\lambda, z)] d\lambda \quad (3.23)$$

$$W_{21}(r, \phi, z) = \sum_{k=1}^{N_c} \frac{\lambda_{sk} \sigma_e(\lambda_{sk}) I_{sk}(r, z)}{hc} + \frac{1}{hc} \int_0^{\infty} s_0(r) \sigma_e(\lambda) \lambda [S_{ASE}(\lambda, z)] d\lambda \quad (3.24)$$

$$R_{13}(r, \phi, z) = \frac{\lambda_p \sigma_p(\lambda_p) I_p(r, \phi, z)}{hc}, \quad (3.25)$$

onde λ_{sk} é o comprimento de onda para o k -ésimo canal (nm), λ_p é o comprimento de onda de bombeio (nm).

A densidade espectral de ruído ASE total (W/nm) pode ser escrita por:

$$S_{ASE}(\lambda, z) = S_{ASE^+}(\lambda, z) + S_{ASE^-}(\lambda, z), \quad (3.26)$$

onde S_{ASE^+} é a densidade espectral de ASE no sentido de propagação do sinal e S_{ASE^-} é a densidade espectral de ASE no sentido contrário à propagação do sinal.

3.3. Análise para a Evolução do Bombeio

A evolução da intensidade do bombeio na seção transversal completa pode ser escrita como [7]:

$$\int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} \frac{dI_p}{dz} r dr d\phi = - \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} [\sigma_p N_1(r, \phi, z) + \sigma'_p N_2(r, \phi, z)] I_p r dr d\phi \quad (3.27)$$

Considerando-se a integral do primeiro membro de (3.27) e substituindo-se $I_p(r, \phi, z)$ de (3.17) em (3.27), tem-se que:

$$\int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} \frac{dI_p}{dz} r dr d\phi = \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} P_p(0) p_0(r, \phi) \frac{dp(z)}{dz} r dr d\phi = P_p(0) \frac{dp(z)}{dz} \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} p_0(r, \phi) r dr d\phi \quad (3.28)$$

Como $p_0(r, \phi)$ foi definida como normalizada em relação à seção transversal da fibra, obtém-se:

$$\int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} p_0(r, \phi) r dr d\phi = 1 \quad (3.29)$$

Portanto, substituindo-se o resultado de (3.29) em (3.28), fica-se com:

$$\int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} \frac{dI_p}{dz} r dr d\phi = P_p(0) \frac{dp(z)}{dz} \quad (3.30)$$

Substituindo-se o resultado de (3.30) em (3.27), pode-se escrever que:

$$P_p(0) \frac{dp(z)}{dz} = - \int_0^\infty \int_0^{2\pi} [\sigma_p N_1(r, \phi, z) + \sigma'_p N_2(r, \phi, z)] I_p r dr d\phi \quad (3.31)$$

Agora, substituindo-se I_p de (3.31) por (3.17), obtém-se:

$$\frac{dp(z)}{dz} = - \int_0^\infty \int_0^{2\pi} [\sigma_p N_1(r, \phi, z) + \sigma'_p N_2(r, \phi, z)] p_0(r, \phi) p(z) r dr d\phi \quad (3.32)$$

Utilizando-se as definições de (3.21) e (3.22), pode-se escrever (3.32) como:

$$\frac{dp(z)}{dz} = \left\{ - \int_0^\infty \int_0^{2\pi} N_0(r) [\sigma_p [1 - X(r, \phi, z)] + \sigma'_p X(r, \phi, z)] p_0(r, \phi) r dr d\phi \right\} p(z) \quad (3.33)$$

onde N_0 foi expresso em função de r para levar em consideração a distribuição de dopantes na seção transversal da fibra, expressa por $N_0(r) = N_0 per(r)$, onde N_0 é a densidade de portadores e $per(r)$ é uma função que descreve o perfil de dopagem na seção transversal.

Considerando-se a equação diferencial para a função normalizada que descreve a evolução do bombeio $p(z)$, dada por (3.33), e incluindo-se a perda intrínseca do material hospedeiro no comprimento de onda do bombeio, $\alpha_p(\lambda_p)$, em (m^{-1}), tem-se que:

$$\frac{dp(z)}{dz} = [-\alpha_p(\lambda_p) + g_p(z)] p(z) \quad (3.34)$$

onde $g_p(z)$ é o coeficiente de ganho do bombeio (m^{-1}). De (3.33) e (3.34), com bombeio monomodal, pode-se concluir que:

$$g_p(z) = -D \int_0^\infty \int_0^{2\pi} N_0(r) p_0(r) \{ \sigma_p [1 - X(r, \phi, z)] + \sigma'_p X(r, \phi, z) \} r dr d\phi, \quad (3.35)$$

onde o parâmetro adimensional D é incluído para considerar o sentido de propagação do 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.

Levando-se em consideração que o núcleo é a única região da fibra que contém dopantes, o limite superior da integração em r , de $g_p(z)$, pode ser substituído pelo raio do núcleo da fibra a_c , de forma que, alternativamente, (3.35) pode ser escrita como:

$$g_p(z) = - \int_0^{a_c} \int_0^{2\pi} p_0(r) [\sigma_p (1 - X(r, \phi, z)) + \sigma_p' X(r, \phi, z)] r dr d\phi \quad (3.36)$$

3.4. Análise para a Evolução do Sinal

Usando um procedimento análogo àquele usado para a evolução do bombeio, tem-se que a evolução da intensidade do k -ésimo sinal na seção transversal completa pode ser escrita como [7]:

$$\int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} \frac{dI_{sk}}{dz} r dr d\phi = \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} [\sigma_e(\lambda_k) N_2(r, \phi, z) - \sigma_a(\lambda_k) N_1(r, \phi, z)] I_{sk} r dr d\phi \quad (3.37)$$

Considerando-se a integral do primeiro membro de (3.37) e substituindo-se $I_{sk}(r, \phi, z)$ de (3.19) em (3.37), tem-se:

$$\int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} \frac{dI_{sk}}{dz} r dr d\phi = \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} P_{sk}(0) s_{0k}(r) \frac{ds_k(z)}{dz} r dr d\phi = P_{sk}(0) \frac{ds_k(z)}{dz} \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} s_{0k}(r) r dr d\phi \quad (3.38)$$

Como $s_{0k}(r, \phi)$ foi definida como normalizada em relação à seção transversal da fibra, obtém-se:

$$\int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} s_{0k}(r) r dr d\phi = 1 \quad (3.39)$$

Portanto substituindo o resultado (3.39) em (3.38), fica-se com:

$$\int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} \frac{dI_{sk}}{dz} r dr d\phi = P_{sk}(0) \frac{ds_k(z)}{dz} \quad (3.40)$$

Substituindo-se o resultado de (3.40) em (3.37), pode-se escrever que:

$$P_{sk}(0) \frac{ds_k(z)}{dz} = \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} [\sigma_e(\lambda_k) N_2(r, \phi, z) - \sigma_a(\lambda_k) N_1(r, \phi, z)] I_{sk} r dr d\phi \quad (3.41)$$

Agora, substituindo-se I_{sk} de (3.41) por (3.19), obtém-se:

$$\frac{ds_k(z)}{dz} = \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} [\sigma_e(\lambda_k) N_2(r, \phi, z) - \sigma_a(\lambda_k) N_1(r, \phi, z)] s_{0k}(r) s_k(z) r dr d\phi \quad (3.42)$$

Utilizando-se as relações de (3.21) e (3.22) em (3.42) e levando-se em consideração que o núcleo é a única região da fibra que contém dopantes, o limite superior da integração em r pode ser substituído pelo raio do núcleo da fibra a_c , onde, após manipulações algébricas, tem-se que:

$$\frac{ds_k(z)}{dz} = \int_0^{2\pi} \int_0^{a_c} \{\sigma_e(\lambda_k) X(r, \phi, z) - \sigma_a(\lambda_k) [1 - X(r, \phi, z)]\} N_0(r) s_{0k}(r) s_k(z) r dr d\phi \quad (3.43)$$

Incluindo-se a atenuação intrínseca do material hospedeiro $\alpha_s(\lambda_s)$ (m^{-1}) para o sinal, (3.43) pode ser rescrita como:

$$\frac{ds_k(z)}{dz} = [-\alpha_s(\lambda_s) + g_{sk}(z)] s_k(z), \quad (3.44)$$

onde g_{sk} é o coeficiente de ganho do k -ésimo sinal para um determinado comprimento de onda, dado por [3,7]:

$$g_{sk}(z) = \gamma(\lambda, z) = \gamma_e(\lambda_k, z) - \gamma_a(\lambda_k, z) \quad (3.45)$$

onde

$$\gamma_e(\lambda_k, z) = \sigma_e(\lambda) \int_0^{2\pi} \int_0^{a_c} s_0(r) N_0(r) X(r, \phi, z) r dr d\phi \quad (3.46)$$

$$\gamma_a(\lambda_k, z) = \sigma_a(\lambda) \int_0^{2\pi} \int_0^{a_c} s_0(r) N_0(r) [1 - X(r, \phi, z)] r dr d\phi \quad (3.47)$$

com $\gamma_e(\lambda_k, z)$ e $\gamma_a(\lambda_k, z)$ sendo calculados em λ_k .

3.5. Evolução da ASE

Além do bombeio e do sinal, para a formulação do EDFA ficar completa, deve-se estudar a evolução do ruído ASE no interior da fibra dopada, uma vez que o mesmo também participa do processo de amplificação, sobrepondo-se ao sinal óptico na saída do amplificador. O processo de emissão espontânea gera um ruído que, diferentemente do sinal, é de faixa larga, bidirecional e sem polarização definida. A influência desse ruído sobre um canal na saída do amplificador é geralmente reduzida com a utilização de algum processo de filtragem óptica. A ASE gerada fica confinada na fibra, podendo seguir, portanto, dois sentidos. Defini-se a ASE⁺ como o ruído que se propaga no sentido de propagação do sinal e ASE⁻ como o ruído que se propaga no sentido oposto ao da propagação do sinal.

A contribuição ao sistema pode ser obtida considerando-se a evolução da densidade espectral de ASE dada por [7]:

$$\frac{dS_{ASE^+}(\lambda, z)}{dz} = 2 \frac{hc^2}{\lambda^3} \gamma_e(\lambda, z) + \gamma(\lambda, z) S_{ASE^+}(\lambda, z) \quad (3.48)$$

$$\frac{dS_{ASE^-}(\lambda, z)}{dz} = -2 \frac{hc^2}{\lambda^3} \gamma_e(\lambda, z) - \gamma(\lambda, z) S_{ASE^-}(\lambda, z) \quad (3.49)$$

A formulação apresentada até agora pode ser utilizada na modelagem do EDFA para sistemas mono e multicanal. No entanto, o desenvolvimento cronológico deste trabalho partiu de um modelo anterior, chamado de largura de banda equivalente, que utiliza uma formulação semelhante à apresentada até o momento, com exceção do modo como se considera a ASE. Como resultado, tem-se um método aproximado para análises de amplificadores e versátil em termos de velocidade de simulação, porém, que é aplicável apenas nos casos onde se deseja estudar a evolução de apenas um canal (sistemas monocanal). A contribuição da ASE, nesse caso, é calculada de forma pontual para o canal sob análise, ou seja, considera-se a potência de ASE equivalente calculada dentro de uma banda específica na faixa de emissão do amplificador. Como resultados, a complexidade da solução e o número de equações diferenciais envolvidas no processo caem, diminuindo-se o número de integrações e, por consequência, o tempo de resposta para a análise da evolução da ASE.

Na formulação apresentada até o momento, as funções que dependem do número de canal k passam a ser consideradas para apenas um canal (sub-índice k é eliminado). Com isto, as taxas de transição de portadores para o sinal, W_{12} e W_{21} , são rescritas como:

$$W_{12}(r, \phi, z) = \frac{\lambda_s \sigma_a(\lambda_s) I_s(r, z)}{hc} + \frac{\lambda_s \sigma_a(\lambda_s)}{hc} [I_{ASE}^+(z) + I_{ASE}^-(z)] \quad (3.50)$$

$$W_{21}(r, \phi, z) = \frac{\lambda_s \sigma_e(\lambda_s) I_s(r, z)}{hc} + \frac{\lambda_s \sigma_e(\lambda_s)}{hc} [I_{ASE}^+(z) + I_{ASE}^-(z)] \quad (3.51)$$

onde, I_{ASE}^+ é a intensidade de ruído ASE no sentido de propagação do sinal (W/m^2) e I_{ASE}^- é a intensidade de ruído ASE no sentido contrário à propagação do sinal (W/m^2). O parâmetro central deste método é a largura de banda da emissão espontânea equivalente B , definida como [7]:

$$B = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\sigma_e(\nu)}{\sigma_e(\nu_s)} d\nu \quad (3.52)$$

A Fig. 3.1 ilustra o critério utilizado no cálculo do valor da largura de banda equivalente, que é então determinada por (3.52). Um valor freqüentemente utilizado na literatura é o 7 THz.

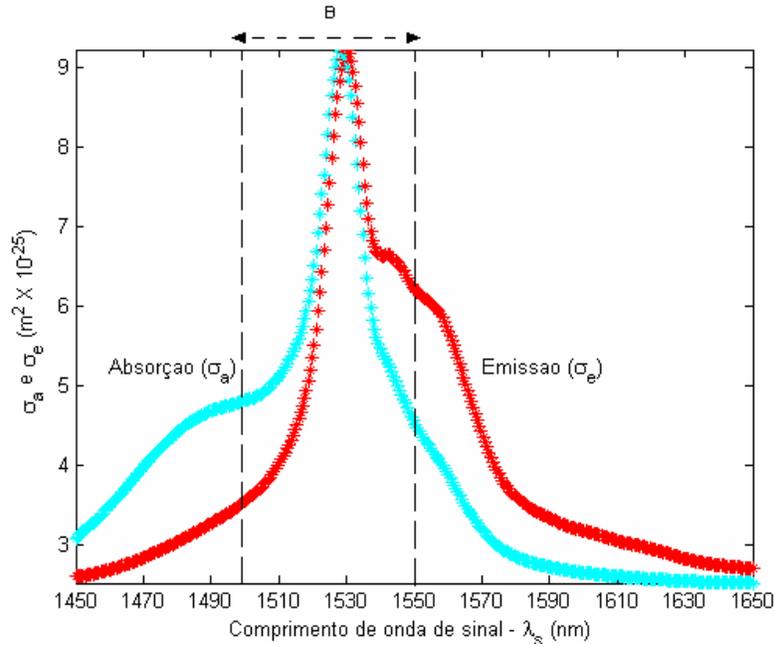


Fig. 3.1 – Espectro de absorção e emissão para um EDFA, com a indicação dos possíveis limites para o cálculo da largura de banda equivalente.

A intensidade da ASE em (3.50) e (3.51) pode ser calculada, considerando-se a área de seção transversal do núcleo da fibra como constante. Assim, a evolução da ASE, incluindo-se também a perda intrínseca no material α_s , pode ser descrita em termos de [3,8-10]:

$$\frac{dP_{ASE}^+}{dz} = [-\alpha_s(\lambda_s) + g_s(z)]P_{ASE}^+(z) + B(\lambda_s)h\frac{c}{\lambda_s}\gamma_e(\lambda_s, z) \quad (3.53)$$

$$\frac{dP_{ASE}^-}{dz} = [-\alpha_s(\lambda_s) + g_s(z)]P_{ASE}^-(z) - B(\lambda_s)h\frac{c}{\lambda_s}\gamma_e(\lambda_s, z) \quad (3.54)$$

onde $P_{ASE}^+(z)$ e $P_{ASE}^-(z)$ representam as potências da ASE⁺ e ASE⁻ ao longo da fibra dopada, respectivamente.

3.6. Figura de Ruído

A figura de ruído (*noise figure* – F) indica, numericamente, a quantidade de ruído adicionado ao sinal pelo amplificador. No caso do EDFA, a figura de ruído leva em consideração a principal fonte de ruído do amplificador, a ASE gerada pela fibra dopada. A figura de ruído está fortemente relacionada à intensidade espectral da ASE⁺ e ao ganho do amplificador. Partindo-se de sua definição, F pode ser expressa por [7]:

$$F = \frac{SNR_E}{SNR_S}, \quad (3.55)$$

onde SNR_E é a relação sinal/ruído na entrada e SNR_S é a relação sinal/ruído na saída. O significado de (3.55) está relacionado ao fato de que, à medida que o sinal se propaga ao longo da fibra, a relação sinal/ruído sofre uma distorção devido à natureza aleatória da interação entre os fótons e os íons do érbio (Er^{+3}).

A variância da potência do sinal $V_s(z)$ pode ser encontrada através de [7]:

$$\frac{dV_s(z)}{dz} = 2[\gamma_e(\lambda, z) - \gamma_a(\lambda, z)]V_s(z) + [\gamma_e(\lambda, z) + \gamma_a(\lambda, z)]P_s(z) \quad (3.56)$$

onde, a potência do sinal $P_s(z)$ é dada por:

$$\frac{dP_s(z)}{dz} = [\gamma_e(\lambda, z) - \gamma_a(\lambda, z)]P_s(z) \quad (3.57)$$

Definindo-se a figura de ruído com respeito ao caso ideal de um sinal coerente de entrada ($V_s(0) = P_s(0)$), e considerando que o comprimento total do segmento de fibra dopada seja dado por L , pode-se escrever que:

$$F = \left\{ \frac{\left[\frac{P_s(0)}{V_s(0)} \right]^2}{\left[\frac{P_s(L)}{V_s(L)} \right]^2} \right\} = P_s(0) \frac{V_s(L)}{[P_s(L)]^2} \quad (3.58)$$

Para ilustrar a relação entre a figura de ruído e a densidade espectral da ASE⁺, define-se a quantidade $\zeta(z)$ como:

$$\zeta(z) = \frac{hc^2}{\lambda_s^3} \left[\frac{V_s(z)}{P_s(z)} - 1 \right] \quad (3.59)$$

Derivando (3.59), $d\zeta(z)/dz$ é dado por:

$$\frac{d\zeta(z)}{dz} = \frac{hc^2}{\lambda_s^3} \left[\frac{dV_s(z)}{dz} P_s(z) - \frac{dP_s(z)}{dz} V_s(z) \right] \frac{1}{[P_s(z)]^2} \quad (3.60)$$

Substituindo-se (3.56) e (3.57) em (3.60), tem-se que:

$$\frac{d\zeta(z)}{dz} = \frac{hc^2}{\lambda_s^3} \left\{ \frac{V_s(z)}{P_s(z)} [\gamma_e(\lambda_s, z) - \gamma_a(\lambda_s, z)] + [\gamma_e(\lambda_s, z) + \gamma_a(\lambda_s, z)] \right\} \quad (3.61)$$

Colocando-se $[\gamma_e(\lambda_s, z) - \gamma_a(\lambda_s, z)]$ em evidência após a soma e subtração de $\gamma_e(\lambda_s, z)$ ao termo no interior do colchetes de (3.61), chega-se a:

$$\frac{d\zeta(z)}{dz} = 2 \frac{hc^2}{\lambda_s^3} \gamma_e(\lambda_s, z) + [\gamma_e(\lambda_s, z) - \gamma_a(\lambda_s, z)] \zeta(z) \quad (3.62)$$

Comparando (3.62) a (3.48), pode-se perceber que $\zeta(z)$ e S_{ASE}^+ obedecem à mesma equação diferencial e, como ambas as quantidades são nulas em $z = 0$, a seguinte identidade torna-se verdadeira [7]:

$$S_{ASE}^+(\lambda_s, L) = \zeta(L) = \frac{hc^2}{\lambda_s^3} \left(\frac{V_s(L)}{P_s(L)} - 1 \right) \quad (3.63)$$

Para relacionar a figura de ruído à densidade espectral de ASE, $V_s(L)/P_s(L)$ pode ser isolado em (3.63) e substituído em (3.58), de maneira que [6]:

$$F = \frac{P_s(0)}{P_s(L)} \left[\frac{\lambda_s^3}{hc^2} S_{ASE}^+(\lambda_s, L) + 1 \right] \quad (3.64)$$

ou, em função do ganho do amplificador como:

$$F = \frac{1}{G} \left[\frac{\lambda_s^3}{hc^2} S_{ASE}^+(\lambda_s, L) + 1 \right] \quad (3.65)$$

3.7. Conclusão

Neste capítulo, as soluções estáticas das equações de taxa que definem as populações de portadores nos diferentes níveis de energia de interesse do érbio na fibra dopada foram manipuladas, chegando-se a expressões normalizadas destas populações em relação à concentração total de portadores. No caso do bombeio de 980 nm, adotado para as simulações posteriores, este procedimento resultou na redução do problema de três níveis para dois, simplificando as análises. Assim, para caracterizar o EDFA, um estudo de propagação da luz foi conduzido, considerando-se a distribuição transversal e, principalmente, longitudinal da mesma no núcleo e casca da fibra, para sinal, bombeio e ASE. Com isto, gerou-se um modelo multicanal de propagação, baseado no espectro de ASE. Este modelo pode ser reestruturado em uma formulação mais simples, conhecida como modelo da largura de banda equivalente para a ASE, que, apesar de versátil, é limitada à propagação monocanal. Por fim, apresentou-se uma análise para a figura de ruído do EDFA.

Capítulo 4

Simulações Computacionais para Operação Estática do EDFA

Neste capítulo, serão inicialmente enunciadas as considerações que permitem a adaptação da teoria apresentada no Capítulo 3 para o desenvolvimento dos algoritmos de simulação. Na seqüência, as grandezas físicas de interesse para a simulação do EDFA, como o perfil de dopagem e as seções transversais de emissão e absorção, são introduzidas. De posse destas, para as situações de operação mono e multicanal, os programas de simulação gerados proporcionam a observação do comportamento dos principais parâmetros do EDFA, como o ganho, o comprimento ótimo da EDF e a figura de ruído, geralmente na forma de gráficos. Para tanto, faz-se uso de interfaces criadas para se tornar mais simples a utilização do programa, onde o usuário entra com as condições de simulação desejadas. Devido à ordem cronológica de desenvolvimento do trabalho, os resultados apresentados primeiro se referem ao método da largura de banda equivalente. Na seqüência, consideram-se aqueles que levam em conta a distribuição espectral da ASE na modelagem do EDFA.

4.1 Considerações para as simulações das configurações de EDFA

A análise teórica foi detalhada no Capítulo 3. Para as simulações da evolução espacial do sinal, do bombeio e da ASE no EDFA, algumas considerações devem ser feitas. Primeiramente, assume-se que as funções de interesse possuem variação longitudinal lenta a ponto de permitir uma análise incremental para a propagação da luz pela fibra dopada de comprimento L , ou seja, a divisão da fibra em n seções de comprimento Δz [7]. Se o número de seções for grande o suficiente, os termos $\gamma_e(\lambda)$, $\gamma_a(\lambda)$ e $g_p(z)$ podem ser considerados aproximadamente constantes no intervalo $(z, z+\Delta z)$. Desta forma, as equações diferenciais (3.34), (3.44), (3.48) e (3.49) se tornam analíticas em cada Δz , permitindo o cálculo de $p(z)$, $s_k(z)$, S^+_{ASE} e S^-_{ASE} a partir das condições iniciais de contorno para bombeio, canais e ASE na entrada de cada seção. Para o caso monocanal, ou seja, para o método da largura de banda equivalente, as mesmas considerações são válidas, porém, assumindo-se k

= 1 e utilizando-se as equações diferenciais (3.34), (3.44), (3.53) e (3.54) para os cálculos de $p(z)$, $s(z)$, P_{ASE}^+ e P_{ASE}^- . Os novos valores calculados ao final de cada seção servem de condições iniciais para seção seguinte. Os cálculos são repetidos a cada Δz , até que seja percorrida toda a extensão da fibra. As soluções das equações diferenciais (3.34), (3.44), (3.48) e (3.49) são dadas por:

$$s_k(z) = s_{k_inicial} e^{[-\alpha(\lambda_k) + g_{sk}] \Delta z} \quad (4.1)$$

$$p(z) = p_{inicial} e^{[-\alpha(\lambda_p) + g_p] \Delta z} \quad (4.2)$$

$$S_{ASE}^{\pm}(z) = S_{ASE_inicial}^{\pm} e^{\pm \gamma(\lambda) \Delta z} + \frac{2hc^2}{\lambda^3} \frac{\gamma_e(\lambda)}{\gamma(\lambda)} e^{\pm \gamma(\lambda) \Delta z} \quad (4.3)$$

onde os termos com a palavra “inicial” correspondem às condições iniciais na interface de entrada de cada seção. Para o caso monocanal, a potência de ASE pode ser escrita como:

$$P_{ASE}^{\pm} = \pm P_{ASE_inicial}^{\pm} e^{\pm [-\alpha_s(\lambda_s) + g_s(z)] \Delta z} \pm B(\lambda_s) h \frac{c}{\lambda_s} \gamma_e(\lambda_s, z) \quad (4.4)$$

A Fig. 4.1 ilustra o procedimento de divisão da fibra em n seções, juntamente com as condições de contorno utilizadas. As condições iniciais de contorno são assumidas como $p(0) = s(0) = 1$, $S_{ASE}^+(\lambda, 0) = 0$ e $S_{ASE}^-(\lambda, L) = 0$.

Partindo-se da primeira seção da fibra e considerando-se as condições de contorno e as potências ópticas de entrada do sinal, $P_s(0)$, e do bombeio, $P_p(0)$, e os comprimentos de onda dos canais, calculam-se os valores das densidades normalizadas de portadores para o nível metaestável $x(r, \phi, 0)$ e para o nível fundamental $[1 - x(r, \phi, 0)]$ através de (3.21) e (3.22). Os parâmetros g_p , $\gamma_e(\lambda)$, $\gamma_a(\lambda)$ e que foram assumidos constantes para cada seção da fibra de comprimento Δz , são obtidos aplicando-se $x(r, \phi, 0)$ e $[1 - x(r, \phi, 0)]$ a (3.36), (3.46) e (3.47). Após a determinação de g_p , $\gamma_e(\lambda)$, $\gamma_a(\lambda)$ para esta seção, as equações (4.1) a (4.3) podem ser resolvidas, fornecendo o comportamento longitudinal de $s_k(z)$, $p(z)$ e $S_{ASE}^+(\lambda, z)$ ao longo da

primeira seção de comprimento Δz . No caso monocanal, utiliza-se (4.4) ao invés de (4.3). Ao final desta seção, recalculam-se s_k , p e $S^+_{ASE}(\lambda)$ (ou P^+_{ASE} , para o caso $S^-_{ASE}(L)=0$). Estes valores servem de condições iniciais para a seção seguinte da fibra e são utilizados no cálculo de s_k , p e S^+_{ASE} (ou P^+_{ASE}) para a próxima seção. Este processo se repete até que se tenha analisado a fibra inteira, em n seções. A partir das seções de s_k , $p(z)$, $P_{s_k}(z)$ e $P_p(z)$ podem ser obtidas. Observa-se que, para o cálculo das densidades de portadores normalizadas x e $(1-x)$, deve-se considerar que cada canal possui as suas próprias seções de choque de absorção e emissão (σ_a e σ_e) e que, para se obter o resultado em cada seção, tem-se que considerar o somatório da potência de todos os canais.

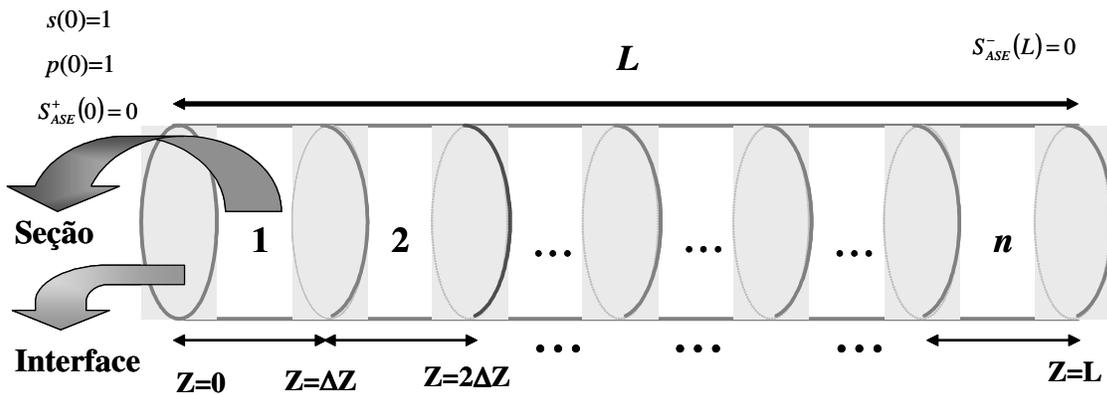


Fig. 4.1 – Representação da divisão da EDF em seções e condições gerais de contorno para a solução das equações diferenciais do sistema.

Nesta primeira evolução do programa de $z = 0$ a $z = L$, a influência da ASE^- não é considerada, já que o sentido da mesma é contrário ao do sinal e da ASE^+ . Esta omissão leva a um erro na análise dos parâmetros operacionais do EDFA. Para corrigir este erro, primeiramente, o conjunto de valores calculados para $\gamma_e(\lambda)$, $\gamma_a(\lambda)$ e g_p em cada seção da fibra dopada entre $z = 0$ a $z = L$ é utilizado para o cálculo de $S^-_{ASE}(\lambda)$ de $z = L$ para $z = 0$, considerando-se a condição de contorno inicial $S^-_{ASE}(\lambda, L) = 0$. Essa primeira iteração é uma estimativa do comportamento de propagação de sinal, bombeio e ASE's. Numa segunda interação do programa, o valor de $S^-_{ASE}(0)$ da primeira interação é utilizado, juntamente com as condições de contorno de entrada, para corrigir os valores de $x(r, \phi, 0)$ e $1 - x(r, \phi, 0)$,

de forma que essas expressões passem a considerar o efeito da ASE⁻. Com os novos valores de $x(r, \phi, 0)$ e $1 - x(r, \phi, 0)$, corrigem-se os demais parâmetros. O procedimento é repetido até a última seção da fibra, considerando-se sempre as condições de contorno para p , s , S_{ASE}^+ , e S_{ASE}^- no início de cada seção. Os valores corrigidos de $\gamma_e(\lambda)$, $\gamma_a(\lambda)$ e g_p para cada seção são utilizados para atualizar novamente S_{ASE}^- , finalizando a segunda interação. Novas interações são realizadas até que uma condição de erro seja satisfeita, determinando o fim da simulação.

Observou-se que número de iterações depende fortemente dos parâmetros iniciais de contorno da fibra, principalmente do comprimento da EDF. Notou-se também que, especialmente durante as análises envolvendo o método da largura de banda equivalente, e para comprimentos de fibra muito longos, principalmente acima do comprimento ótimo (máximo ganho para condições de entradas fixas), a modelagem proposta não apresentava convergência. Uma idéia apresentada em [7] foi adaptada para o algoritmo utilizado (divisão da fibra em seções), de maneira que, primeiramente, (3.21) e (3.22) passam a ser escritas como:

$$\frac{N_1}{N_0} = 1 - x = \frac{1}{1 + R} \quad (4.5)$$

$$\frac{N_2}{N_0} = x = \frac{R}{1 + R} \quad (4.6)$$

onde

$$R = \frac{\tau_2 R_{13} + \tau_2 W_{12}}{1 + \tau_2 W_{21}} \quad (4.7)$$

Para a convergência seja garantida, deve-se adotar que [7,17]:

$$R = \chi R_j + (1 - \chi) R_{j-1} \quad (4.8)$$

onde R_j corresponde ao R obtido para i -ésima seção durante a interação j , e R_{j-1} corresponde ao R obtido para a mesma i -ésima seção, porém, durante a interação anterior ($j - 1$). Em (4.8), χ é o fator de convergência que pode variar entre 0 e 1. Observou-se um χ de 0,75 é suficiente para se garantir a convergência do algoritmo. O parâmetro utilizado como referência, para a convergência foi, o ganho. Se o erro relativo entre a medida obtida após a interação atual e a anterior for menor que 0,1%, a simulação é finalizada com convergência garantida.

4.2 Amostra da fibra dopada utilizada nas simulações

Um dos parâmetros físicos da fibra que precisa ser definido, para que as simulações possam ser realizadas é o perfil de distribuição da dopagem da fibra-amostra. O perfil mais simples é aquele que assume a forma de um degrau, ou seja, que considera uma distribuição uniforme de dopantes do núcleo, sem que os mesmos se encontrem na casca. A função utilizada na representação da dopagem da fibra para a modelagem do EDFA pode ser escrita como [7]:

$$per(r) = 1 - \left(\frac{r}{a_c} \right)^\alpha, \quad (4.9)$$

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

A Fig. 4.2 mostra o perfil de dopagem, dado por (4.9), em função da distância normalizada em relação ao eixo óptico da fibra, 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 ao infinito. Observa-se na Fig. 4.2 que, para o valor de $\alpha = 1000$, obtém-se um perfil semelhante ao de um degrau, enquanto que o valor de $\alpha = 1$ corresponde ao de um perfil triangular. Para a amostra da fibra utilizada, assume-se que o perfil que mais se adapta às suas características é aquele quando $\alpha = 3$. Para as simulações, assume-se, também, que a distribuição de dopantes na direção z é uniforme [8].

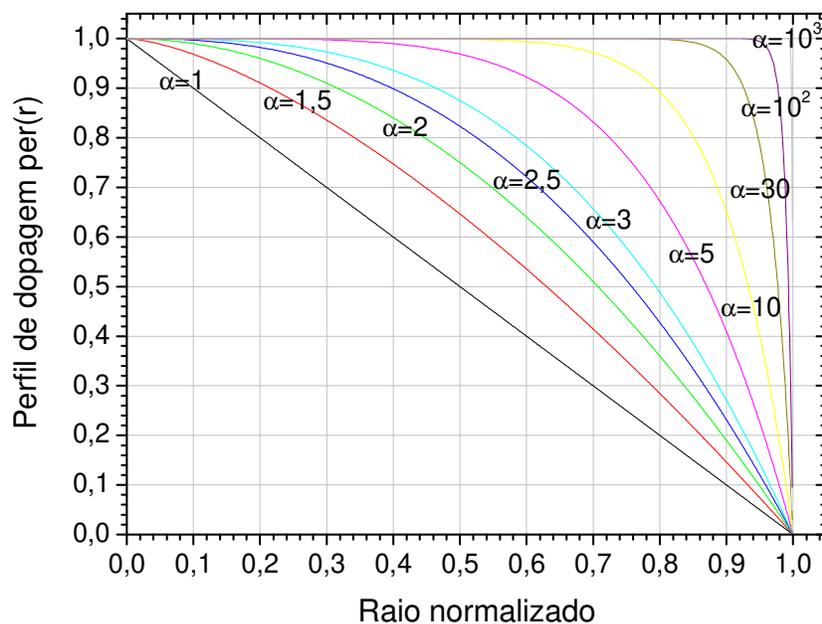


Fig. 4.2 – Perfil $per(r)$ em função do raio normalizado (r/a_c) , tendo α como parâmetro.

Para a simulação do EDFA, outros parâmetros da amostra de fibra dopada utilizada como referência estão listados na Tab. 4.1. Os dados apresentados correspondem aos da fibra dopada com érbio produzida pela *Corning Optical Fiber Inc. (Corning Pure Mode)*.

Tabela 4.1 – Parâmetros da fibra utilizada nas simulações

PARÂMETRO	VALOR
Raio do núcleo (a_c)	1,5 μm
Comprimento de onda do laser de bombeio (λ_p)	975,17 nm
Concentração de dopantes por unidade de volume (N_0)	4×10^{18} ions/cm ⁺³
Seção transversal de absorção para o estado excitado (σ_p')	0,0 cm ²
Seção transversal de absorção de bombeio (σ_p)	5×10^{-25} m ²
Tempo de vida de fluorescência do estado metaestável (τ_{21})	10 ms
Tempo de vida de fluorescência do nível de bombeio (τ_{32})	10 μs
Abertura numérica (AN)	0,21
Faixa equivalente de emissão espontânea da fibra dopada (B)	7 THz

Os dados referentes à seção transversal de emissão (σ_e) e à seção transversal de absorção (σ_a) para o sinal foram fornecidos pelo fabricante na forma de pontos

experimentais. A Fig. 4.3 mostra as seções de choque dos íons de érbio para um intervalo de comprimentos de onda. Para uma maior flexibilidade na escolha dos comprimentos de onda dos canais, os pontos apresentados na Fig. 4.3 foram utilizados em programas numéricos para a extração de funções que melhor representavam a sua distribuição. As funções das seções transversais foram geradas a partir do somatório de funções lorentzianas adequadamente ponderadas.

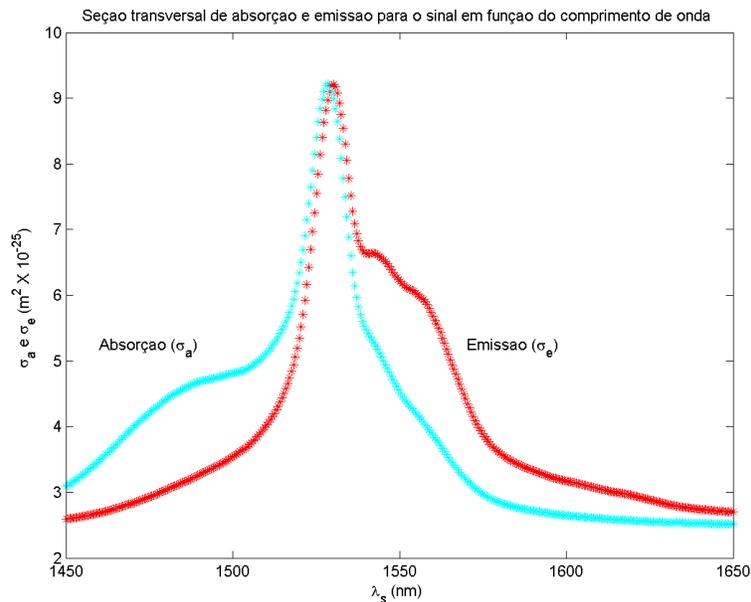


Fig. 4.3 – Seções eficazes de emissão e absorção.

4.3 Desempenho do amplificador – largura de banda equivalente

O desenvolvimento teórico apresentado anteriormente será aplicado ao algoritmo de programação, que deverá gerar resultados, entre outros, na forma de gráficos dos parâmetros de maior relevância do EDFA. Nesta seção, apresentam-se os resultados de simulação para a configuração convencional do EDFA, utilizando-se o método da largura de banda equivalente, sem a inclusão das alterações que garantem a convergência para comprimentos de fibra muito longa. A partir da teoria apresentada no Capítulo 3 e das considerações feitas no início deste capítulo, foi desenvolvido um programa capaz de simular o desempenho de um amplificador óptico a fibra dopada com érbio. As soluções

para a modelagem do amplificador foram obtidas, nesta etapa, utilizando-se o software “*Matlab 6.5*”.

Após uma investigação preliminar, observou-se que a divisão da fibra em 100 seções era suficiente para garantir rapidez ao programa sem comprometimento com relação a erros ou desvios numéricos. O número de interações a ser adotado dependia do tipo de análise conduzida e das condições iniciais de contorno. Por exemplo, a função que gera o gráfico do comprimento ótimo da fibra, demora mais tempo para convergir, que os gráficos de propagação; porisso precisa de mais interações. Uma potência mais alta de sinal também precisará de mais tempo para atingir a convergência que uma potência mais baixa. Por esses motivos, o tempo médio de processamento ficou em torno de 6 minutos por curva (computador CELERON de 512 MB RAM).

Antes de apresentar os resultados obtidos pelas simulações, a Fig. 4.4 mostra a interface criada no software “*Matlab 6.5*” para tornar mais simples a utilização do programa para topologia co-propagante do EDFA.

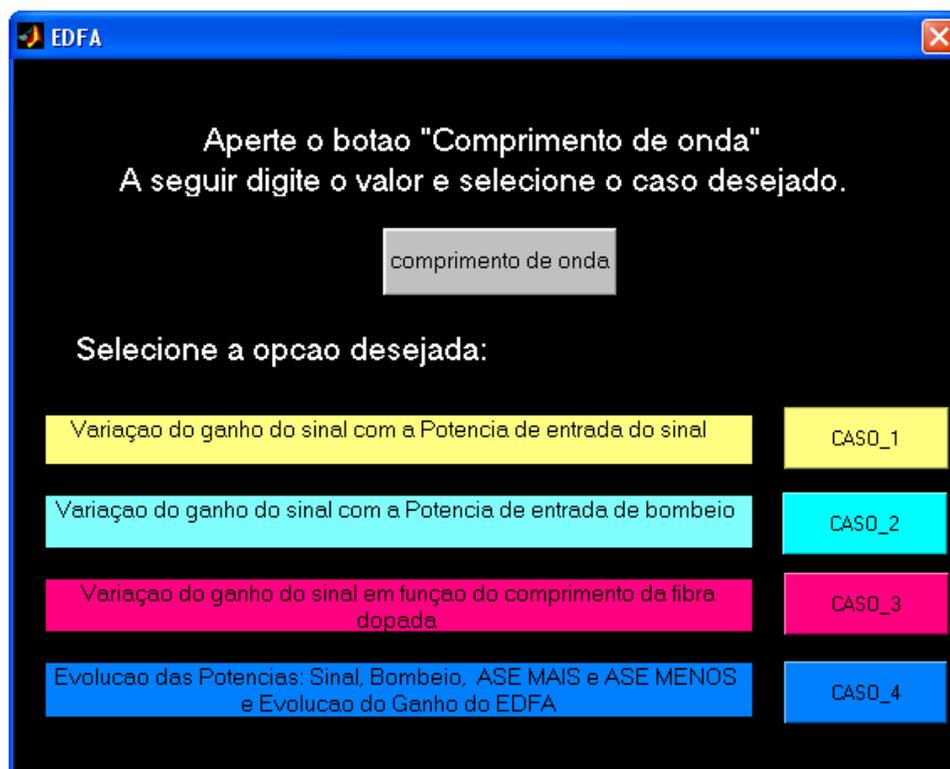


Fig. 4.4 – Tela do programa de simulação para o EDFA em Matlab.

A partir dessa interface é possível gerar quatro tipos de gráficos diferentes, para qualquer comprimento de onda desejado desde que esse se encontre dentro da grade da União Internacional de Telecomunicações (*International Telecommunications Union – ITU*). De antemão, pode-se definir o tipo de análise a ser implementado: ganho versus potência óptica de entrada (Caso 1), ganho versus potência óptica de bombeio (Caso 2), ganho versus comprimento da amostra de fibra dopada (Caso 3) e, finalmente, a evolução das potências de sinal, bombeio e ASE, além do ganho, no interior de uma amostra de fibra dopada (Caso 4).

Para a utilização do programa, primeiramente, escolhe-se qual o comprimento de onda de sinal que será analisado, fazendo clique no botão “comprimento de onda”. Uma janela como a da Fig. 4.5 se abre, onde o valor de comprimento de onda de sinal deve ser digitado, seguido de “OK”. Isto inicia o cálculo das constantes de normalização da densidade normalizada de energia de sinal (como o comprimento de onda do bombeio é feito fixo, as constantes de normalização também o são).

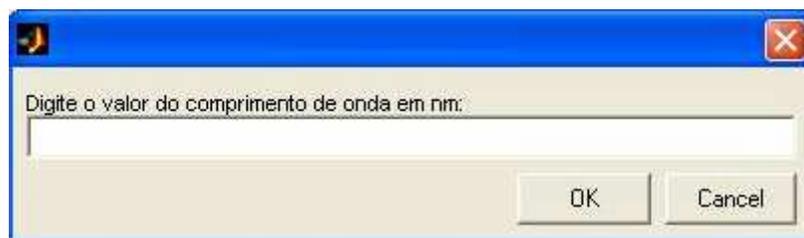


Fig. 4.5 – Tela do programa de simulação para o EDFA: escolha do comprimento de onda.

Após o término do cálculo das constantes, escolhe-se, dentre quatro opções de análise (Fig. 4.4), qual se deseja fazer. Cada uma das opções irá requerer um conjunto diferente de dados de entrada. O Caso 3 será demonstrado como exemplo. Os outros casos apresentam evoluções semelhantes. Escolhendo-se o Caso 3, solicitam-se, num primeiro momento, os valores de entrada da potência de sinal e bombeio, como mostrado na Fig. 4.6.

Na seqüência, para a análise do comprimento ótimo, são solicitados os comprimentos inicial e final dos segmentos de fibra dopada a serem considerados (Fig. 4.7), seguidos do número de pontos que devem ser calculados entre estes dois extremos.

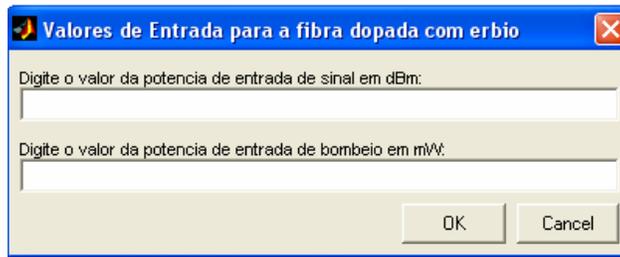


Fig. 4.6 – Tela do programa de simulação do EDFA, Caso 3: entrada dos valores de potência de entrada de sinal e bombeio.

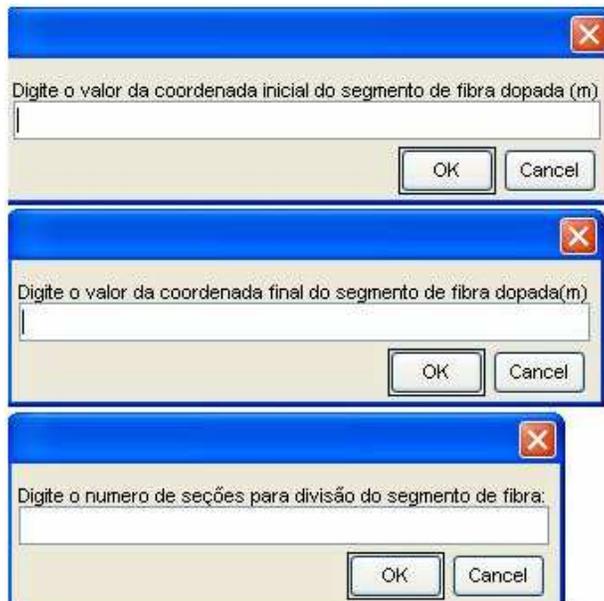


Fig. 4.7 – Tela do programa de simulação do EDFA, Caso 3: entrada dos dados relativos aos comprimentos dos segmentos de fibra dopada.

As Fig. 4.8 e 4.9 mostram o comportamento do ganho do EDFA em função de diferentes comprimentos de segmentos de fibra dopada, tendo o valor da potência de entrada de bombeio como parâmetro, para dois valores distintos de comprimento de onda de sinal: 1536,7 e 1550 nm, respectivamente. Pode-se notar nas simulações que, para fibras dopadas com érbio, o ganho do amplificador tende a aumentar de acordo com o tamanho da fibra até atingir um valor máximo. O comprimento da fibra para o qual o ganho do amplificador atinge um valor máximo é definido como comprimento ótimo da fibra. Acima deste valor o ganho começa a diminuir, 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, de forma que o sinal passa a ser atenuado por absorções. Apesar do comportamento notado nas Fig. 4.8 e 4.9 ser o que se espera, teoricamente, as simulações mostraram que, aumentando-se ou diminuindo-se o número de interações de uma em uma unidade, a inclinação da curva após o ponto de comprimento ótimo se alternava entre o que está mostrado e um quase valor nulo (praticamente paralelo ao eixo das abscissas), gerando o problema de convergência relatado anteriormente.

A Fig. 4.8 mostra que o comprimento ótimo da fibra dopada para o valor de potência de entrada de sinal de $1 \mu\text{W}$ (-30 dBm) muda de acordo com o valor da potência de bombeio fornecida. Nota-se, também, que, com o aumento da potência de bombeio, maior é o valor do ganho do amplificador e maior é o comprimento ótimo da fibra. Isso é esperado, pois, com uma potência de bombeio maior, mais elétrons poderão povoar o nível metaestável ao longo da EDF, resultando em emissões de fótons estimulados.

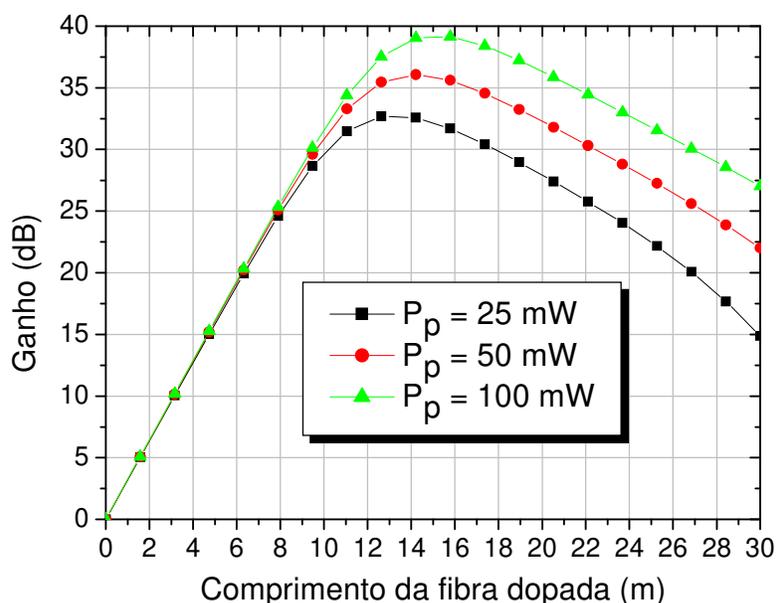


Fig. 4.8 – Ganho de um EDFA em função do comprimento da fibra dopada, para operação com potência de sinal em -30 dBm e comprimento de onda do sinal de $1536,7 \text{ nm}$, tendo a potência de bombeio como parâmetro.

Em particular, a Fig. 4.9 mostra que o comprimento ótimo da fibra dopada, para operação em 1550 nm , é de cerca de 16 m e o ganho é da ordem de $32,5 \text{ dB}$, quando a potência de entrada do sinal é -30 dBm ($1 \mu\text{W}$) e a potência de bombeio de 50 mW .

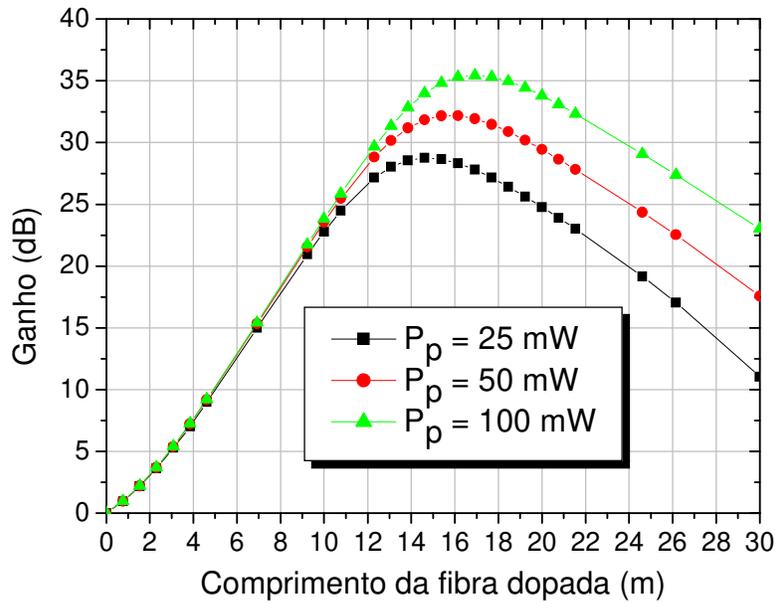


Fig. 4.9 - Ganho de um EDFA em função do comprimento da fibra dopada, para operação com potência de sinal em -30 dBm e comprimento de onda do sinal de 1550 nm, tendo a potência de bombeio como parâmetro.

As Fig. 4.10 e 4.11 apresentam o comportamento do ganho do amplificador em função da potência de entrada do sinal (caso_1 da Fig. 4.4), tendo a potência de bombeio como parâmetro, para dois comprimentos de onda de sinal: 1536,7 e 1550 nm, respectivamente. Nota-se nas Fig. 4.10 e 4.11 que, quando a potência de bombeio é muito alta, ela tende a provocar uma forte inversão no número de portadores. Como a densidade de dopantes é finita, a eficiência de inversão torna-se menor à medida que o bombeio aumenta, reduzindo a taxa de aumento do ganho. Se a potência de bombeio for mantida, as curvas mostram a tendência do amplificador de entrar em saturação quando a potência do sinal de entrada é muito alta (queda do ganho). Para se ilustrar o comportamento do ganho com a potência óptica de entrada, quando o comprimento da EDF está abaixo do comprimento ótimo, a Fig. 4.11 foi obtida para um segmento de EDF de 10 m. Nota-se que, para um valor de potência de sinal de -30 dBm, o ganho do amplificador fica próximo de 28 dB, quase que independentemente da potência de bombeio.

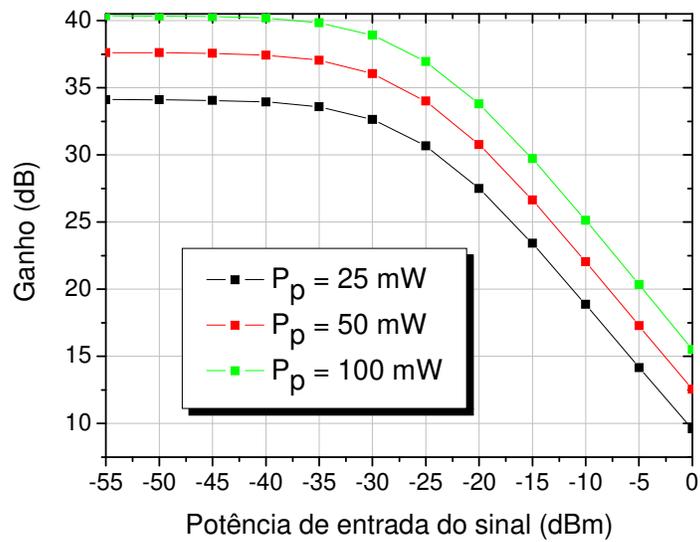


Fig. 4.10 – Evolução do ganho do EDFA em função da potência de entrada de sinal, para o comprimento de fibra dopada de 14,2 m e comprimento de onda do sinal de 1536,7 nm, tendo a potência de bombeio como parâmetro.

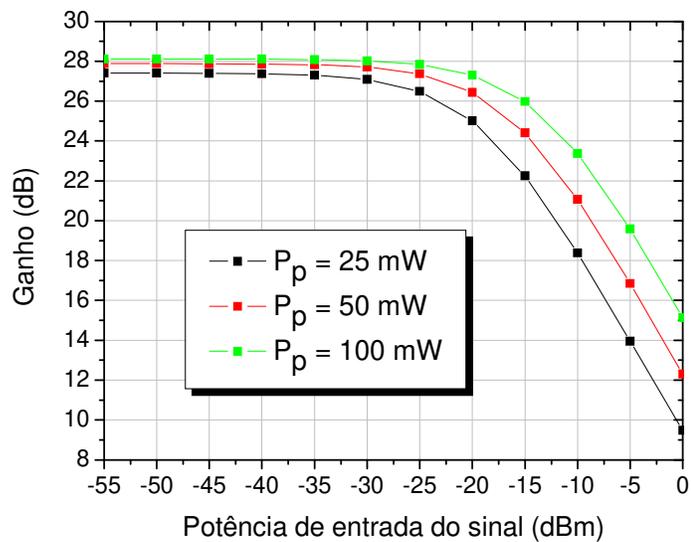


Fig. 4.11- Evolução do ganho do sinal de um EDFA em função da potência de entrada de sinal, para o comprimento de fibra dopada de 10 m e comprimento de onda do sinal de 1550 nm, tendo a potência de bombeio como parâmetro.

Como mencionado anteriormente, os resultados apresentados até aqui não levaram em consideração a rotina de convergência mencionada na Seção 4.1. A Fig. 4.12 mostra o comportamento do ganho do EDFA em função do comprimento de fibra dopada, levando em consideração os dois casos, com e sem a rotina de convergência, além de pontos experimentais. Nota-se que, para valores de comprimento de fibra acima do comprimento ótimo, os resultados teóricos divergem bastante do resultado experimental. Com o uso da rotina de convergência, observa-se que há uma melhora nos resultados em relação aos resultados obtidos sem esta rotina. Considerando-se o valor de potência de bombeio de 50 mW e a amostra de fibra de 14 m, o valor do ganho é da ordem de 29 dB. Os resultados teóricos sem a rotina de convergência e com a rotina de convergência ficam em torno de 36 dB e 31,5 dB, respectivamente. A divergência dos resultados teóricos com o resultado experimental deve-se ao fato de que o método de largura de banda equivalente não leva em consideração toda a contribuição da potência de ASE no espectro, o que faz com que o valor do ganho torne-se maior que o seu valor real.

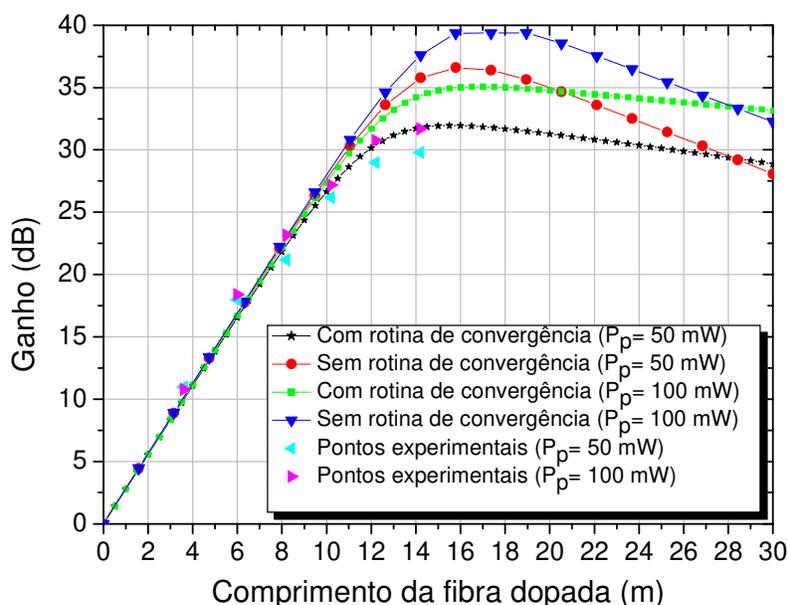


Fig. 4.12 – Ganho do EDFA em função do comprimento da fibra dopada, para operação com potência de sinal em -30 dBm e comprimento de onda do sinal de 1550 nm, tendo a potência de bombeio como parâmetro, com e sem rotina de convergência.

Os resultados mostrados nesta seção são exemplos de curvas geradas através das simulações que o programa desenvolvido com o software “Matlab 6.5” foi capaz de produzir ao se aplicar o método de largura de banda equivalente. Na próxima seção, são apresentados os resultados da modelagem que consideram o espectro de emissão do EDFA.

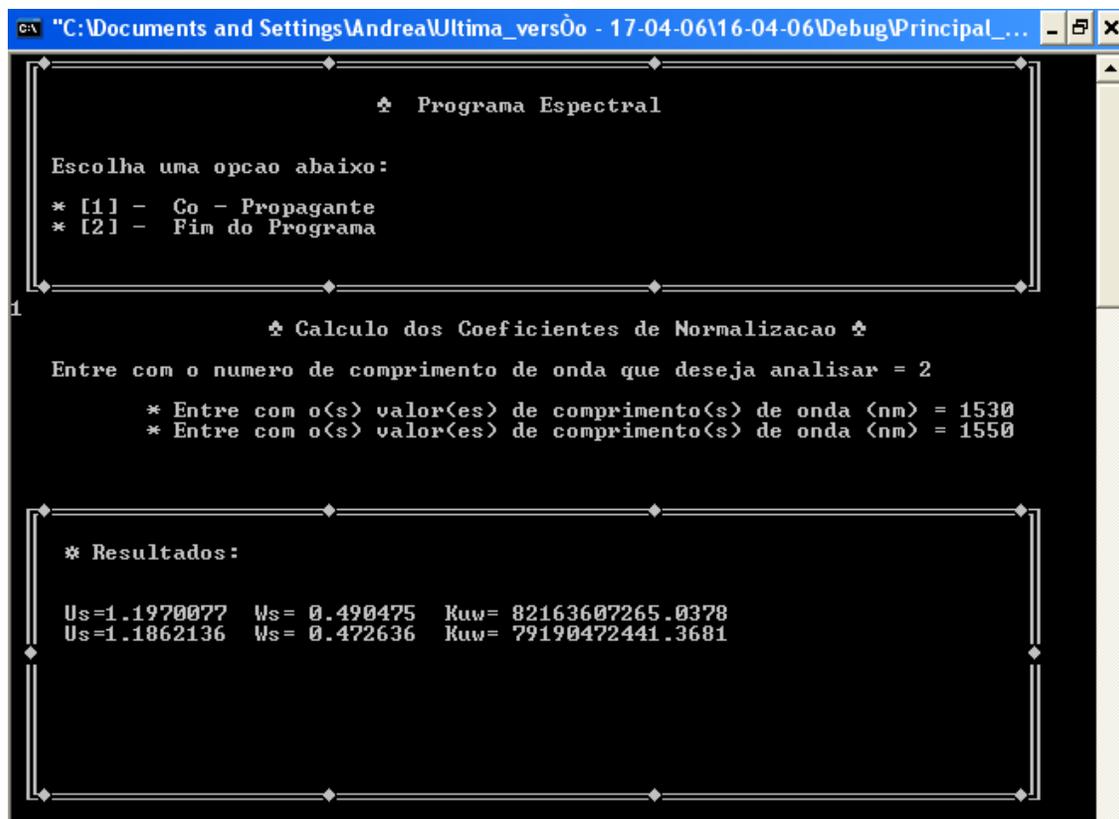
4.4 Desempenho do Amplificador – espectro de ASE

No Capítulo 1, foi comentado que os EDFA’s podem amplificar vários canais simultaneamente e o ganho produzido é dependente do comprimento de onda do sinal. Conseqüentemente, cada sinal terá um ganho óptico diferente. Além disso, a potência total de saída de cada canal depende do número de canais presentes. Quando se altera o número de canais, o ganho dos canais pode ser alterado [18], principalmente em condições de saturação. Durante o desenvolvimento do programa, voltado para modelagem de EDFA’s aplicados a sistema multicanal, observou-se a necessidade de se trocar a plataforma de simulação do Matlab para o Fortran. Isto, devido à complexidade das equações envolvidas na modelagem espectral do EDFA. (contribuição espectral da ASE), principalmente devido a um grande número de integrações, e, então, o processamento mais rápido e eficiente do Fortran (da *Software Developer Studio*) possibilitou uma redução considerável no tempo de processamento.

Após uma investigação preliminar, observou-se que a divisão da fibra em 150 seções era suficiente para garantir rapidez ao programa sem comprometimento com relação a erros ou desvios numéricos. Durante a execução do trabalho, observou-se que principalmente para comprimentos de fibra muito longos, o programa de simulação não convergia para um resultado coerente. Para evitar que isso continuasse acontecendo, foi incorporada ao modelo a rotina de convergência definida por (4.8). No pior caso, que considera o gráfico de ganho de sinal em função do comprimento segmentado da fibra dopada, o tempo médio de processamento ficou em torno de 25 minutos por curva para o mesmo computador mencionado anteriormente.

A interface de apresentação do programa nesse caso também é muito simples. A diferença, agora, é a de que o algoritmo gera um conjunto de arquivos texto, que são utilizados por outros programas gráficos, capazes de gerar as figuras que serão vistas

posteriormente. O primeiro dado solicitado é o número de canais que serão analisados e quais os comprimentos de onda dos mesmos, como mostrado na Fig. 4.13. Isto resultará nos cálculos das constantes de normalização. Após estes cálculos, o programa pedirá informações sobre as potências dos sinais (canais) e do bombeio. No caso da potência de sinal uma pergunta adicional será feita: “Os valores de potência de sinal são iguais para todos os canais?”. Logo após essas informações, uma outra pergunta será feita: “quantos comprimentos segmentados de fibra gostar-se-ia de analisar?” (Fig. 4.14). A resposta dependerá de qual tipo de gráfico gostar-se-ia de gerar. Se o objetivo for analisar em qual tamanho de fibra ocorre o maior valor de ganho, deverão ser escolhidos segmentos de fibra com diferentes comprimentos. Caso seja apenas necessário saber o comportamento de propagação das potências ópticas de sinal, bombeio e ASE, escolhe-se apenas um comprimento de fibra. Os gráficos, a partir da Fig. 4.15, foram gerados a partir da interface aqui descrita.



```

C:\Documents and Settings\Andrea\Ultima_versão - 17-04-06\16-04-06\Debug\Principal_...
Programa Espectral

Escolha uma opcao abaixo:
* [1] - Co - Propagante
* [2] - Fim do Programa

1
Calculo dos Coeficientes de Normalizacao

Entre com o numero de comprimento de onda que deseja analisar = 2
* Entre com o(s) valor(es) de comprimento(s) de onda (nm) = 1530
* Entre com o(s) valor(es) de comprimento(s) de onda (nm) = 1550

* Resultados:

Us=1.1970077  Ws= 0.490475  Kuw= 82163607265.0378
Us=1.1862136  Ws= 0.472636  Kuw= 79190472441.3681

```

Fig. 4.13 – Tela inicial do programa de simulação para o EDFA, no qual mostra-se os resultados dos cálculos dos coeficientes de normalização, para 2 canais.

```
C:\ "C:\Documents and Settings\Andrea\Ultima_versão - 17-04-06\16-04-06\Debug\Principal_... - [ícone] X
Os valores de potencia de sinal sao iguais para todos os canais?
Se sim digite, "0" se nao, digite "1".
1
Entre com o valor da potencia de sinal <dBm> = 0
Entre com o valor da potencia de sinal <dBm> = -30
Entre com o valor da potencia de bombeio <mW> = 50
Entre com o numero de tamanhos de fibra que gostaria de analisar<n> = 2
Entre com o valor do tamanho da fibra <m> = 10
L= 10.0000000000000000
Entre com o valor do tamanho da fibra <m> = 20
L= 20.0000000000000000
*****
```

Fig. 4.14 – Tela do programa de simulação para o EDFA, onde se destacam os diferentes valores de potência para dois canais analisados, o valor da potência de bombeio e os dois comprimentos diferentes de segmentos de fibra.

As Fig. 4.15 e 4.16 mostram o ganho do EDFA em função do comprimento de fibra dopada, tendo a potência de bombeio como parâmetro e a potência de entrada de sinal valendo -30 dBm. A Fig. 4.15 mostra os resultados de simulação, para operação com apenas um canal em 1536,7 nm. Já a Fig. 4.16, mostra resultados experimentais e simulados para operação também monocanal, porém, em 1549,7 nm.

Observa-se que, como esperado, o ganho do sinal aumenta com o comprimento da fibra até atingir um valor máximo. Após esse valor, o bombeio não é mais suficiente para manter a inversão de população ao longo da região final da fibra. Pode-se perceber que os valores de ganho obtidos nas Fig. 4.15 e 4.16 são distintos. Isto se deve à não-uniformidade do espectro de emissão, que provoca um ganho maior na região de 1536,7 nm (região mais próxima do valor de pico de emissão, que poderá ser observada nos gráficos de espectro no final deste capítulo). Esta não-uniformidade do espectro também é responsável pela variação do comprimento ótimo da fibra para diferentes valores de comprimento de onda do sinal (espectro de absorção não-uniforme).

Nota-se que os resultados mostrados na Fig. 4.15 apresentam concordância razoável com aqueles obtidos por meio do método da largura de banda equivalente para valores

abaixo do comprimento ótimo, com degradação acentuada acima deste ponto. Já para a Fig. 4.16, os resultados obtidos pelas duas simulações aparentam ser razoáveis, porém, com o mesmo problema destacado acima. Isto é esperado, dado que a rotina de convergência não foi aplicada para a obtenção das Fig. 4.8 e 4.9. Em particular, observa-se, na Fig. 4.16, que os pontos experimentais e os teóricos concordam razoavelmente bem. No ponto de comprimento ótimo, calculou-se o valor teórico da figura de ruído, através de (3.65). O valor obtido foi de cerca de 3,5 dB para ambos os valores de potência de bombeio.

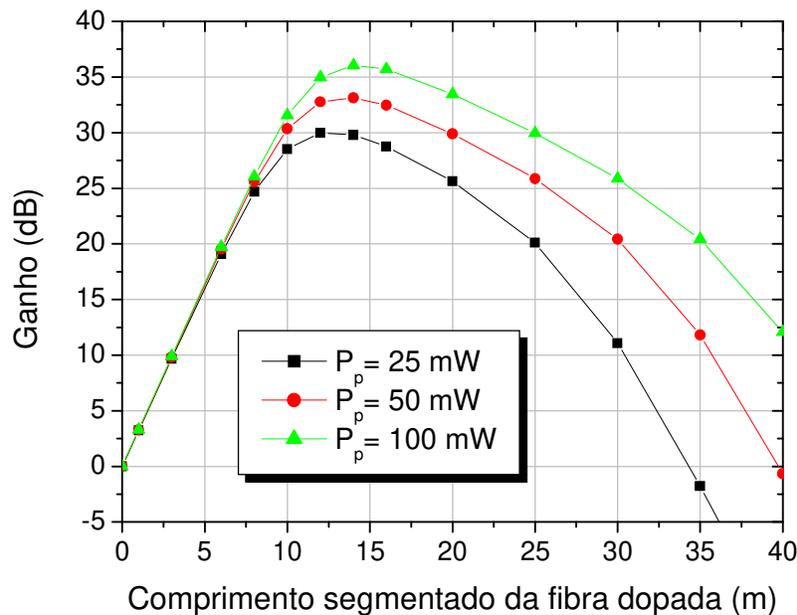


Fig. 4.15 – Ganho do EDFA em função do comprimento da fibra dopada, para operação com potência de sinal de -30 dBm e comprimento de onda do sinal de 1536,7 nm, tendo a potência de bombeio como parâmetro.

Na Fig. 4.17, observa-se o comportamento do ganho do EDFA em função da potência de entrada de sinal para operação com apenas um canal em 1536,73 nm, tendo a potência de bombeio como parâmetro. Escolheu-se o comprimento da fibra em 14,2 m por se tratar do comprimento ótimo para operação com -30 dBm de potência de entrada de sinal e 50 mW de potência de bombeio. Nota-se que, com o aumento da potência de sinal, o ganho tende a diminuir e a tendência do amplificador é a de saturar. Já para um valor fixo de potência de entrada de sinal, o ganho aumenta com a potência de bombeio. Para a mesma potência de entrada do sinal, as curvas na Fig. 4.17 tendem a se aproximar com o

aumento da potência de bombeio, ou seja, um mesmo aumento na potência de bombeio adicional provoca menores variações no ganho do sinal. Este comportamento é esperado, uma vez que 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 cada vez maiores. Essa característica é mais bem observada para valores mais altos de potência de sinal. Pode-se observar, na Fig. 4.16 também, que os resultados experimentais estão bem coerentes com os dados teóricos, principalmente para o bombeio de 50 mW.

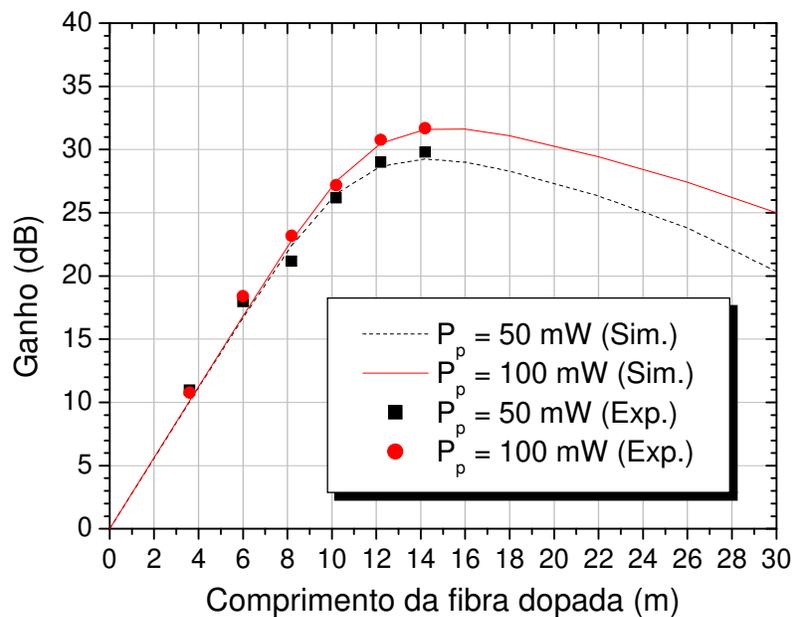


Fig. 4.16 – Ganho do EDFA em função do comprimento da fibra dopada, para operação com potência de sinal de -30 dBm e comprimento de onda do sinal de 1550,49 nm, tendo a potência de bombeio como parâmetro.

As Fig. 4.18 e 4.19 ilustram o comportamento de propagação para o EDFA em dois comprimentos de onda distintos, 1536,728 nm e 1563,499 nm, respectivamente. Os resultados mostram a evolução da potência óptica de sinal, bombeio e ASE (ASE⁺ e ASE⁻). Assumindo-se as condições de contorno inicial de -30 dBm para a potência de entrada de sinal, 50 mW para a potência de entrada de bombeio e comprimento da fibra de 14,2 m, a Fig. 4.18 mostra que o valor da potência de saída, para o sinal, é de 3,1 dBm enquanto que a absorção de bombeio foi da ordem de 10,68 dB. Assim o ganho de sinal é de cerca de

33,2 dB. Esse resultado pode ser comparado ao da Fig. 4.17, comprovando a concordância entre os resultados de simulação e experimental. Já na Fig. 4.19, o ganho foi menor, cerca de 24,95 dB e a absorção de bombeio de 10,49 dB. Utilizando-se (3.65), observou-se que o aumento da potência de bombeio praticamente não influenciou o valor da figura de ruído. Os valores calculados para as potências de bombeio de 25 mW, 50 mW e 100 mW foram de 3,57 dB, 3,56 dB e 3,54 dB, respectivamente, com a potência de entrada do sinal em -30 dBm.

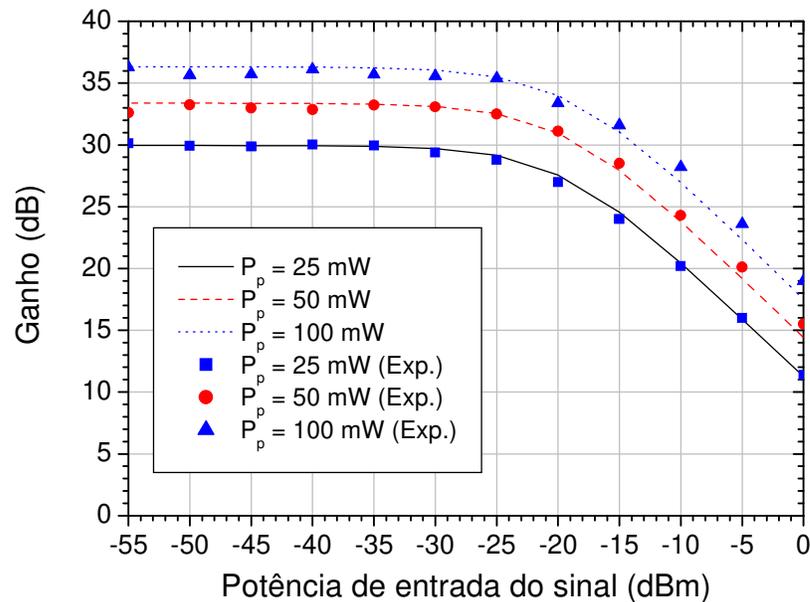


Fig. 4.17 – Evolução do ganho do EDFA em função da potência de entrada do sinal, tendo a potência de bombeio como parâmetro, para um segmento de fibra dopada de 14,2 m e comprimento de onda de sinal em 1536,73 nm.

Através da rotina de simulação apresentada também é possível gerar gráficos de espectro de saída do EDFA e visualizar como os canais se localizam no espectro. As Fig. 4.20 a 4.22 apresentam gráficos das características espectrais de saída do EDFA. Na Fig. 4.20, mostra-se o resultado do espectro quando apenas um canal em 1563,49 nm é acoplado ao EDFA. A potência do canal foi fixada em -30 dBm, a potência de bombeio em 50 mW e o comprimento total da fibra em 14,2 m. Nota-se uma boa concordância entre a simulação numérica e o resultado experimental para alguns intervalos de comprimento de onda e uma discrepância maior entre o teórico e o experimental para os comprimentos de onda nos extremos do espectro. Isso provavelmente se deve aos dados da fibra enviados pelo

fabricante, que não apresentam precisão fora da banda C. O valor da figura de ruído foi de 3,42 dB, em boa concordância com o valor experimental.

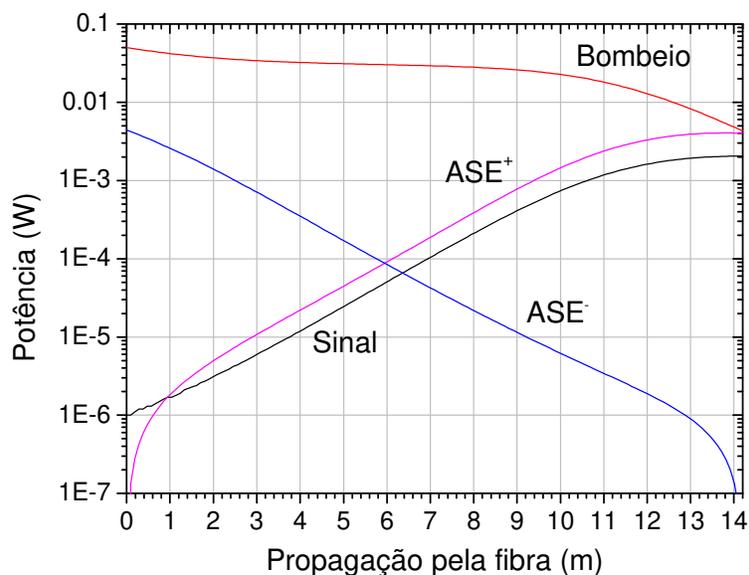


Fig. 4.18 – Evolução longitudinal das potências de sinal, bombeio e ASE, assumindo-se 50 mW de potência de bombeio e 1 μ W de potência de entrada de sinal, para um comprimento de onda de 1536,72 nm.

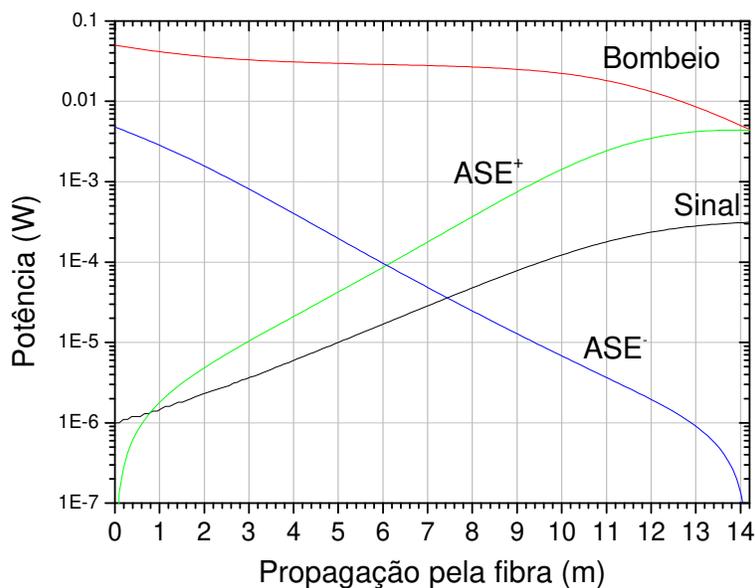


Fig. 4.19 – Evolução longitudinal das potências de sinal, bombeio e ASE, assumindo-se 50 mW de potência de bombeio e 1 μ W de potência de entrada de sinal, para um comprimento de onda de 1563,49 nm.

As Fig. 4.21 e 4.22 também apresentam o comportamento espectral de saída do EDFA para potência de bombeio em 50 mW e comprimento de fibra dopada de 14,2 m, porém, com 10 canais acoplados simultaneamente. Na Fig. 4.21, os 10 canais são amplificados tendo uma potência de entrada de -30 dBm por canal. Na Fig. 4.22, o valor da potência de sinal de entrada foi aumentado para -10 dBm por canal. Como já era esperado, a resposta espectral do EDFA no primeiro caso apresenta um perfil irregular, com pico de ganho ao redor de 1530 nm.

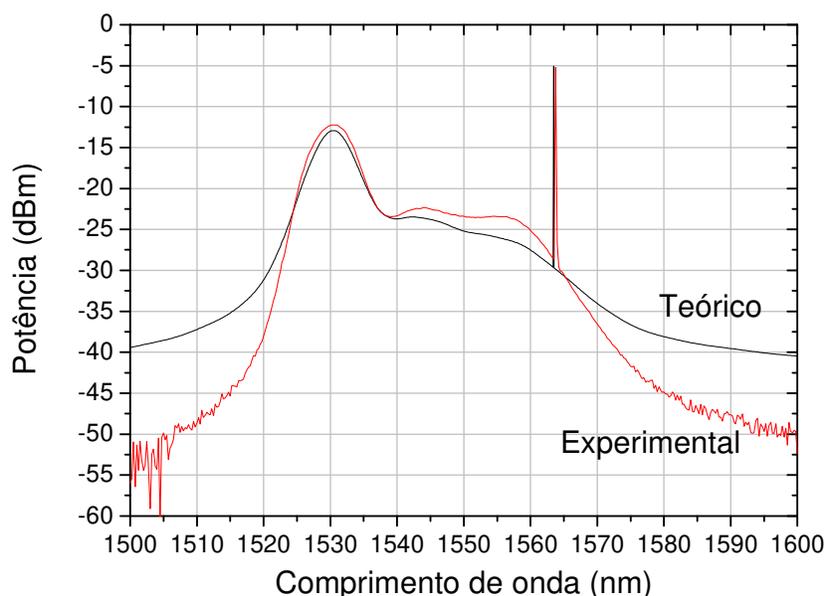


Fig. 4.20 – Espectro de saída para um EDFA com 14,2 m de fibra dopada, considerando um canal de -30 dBm em 1563,49 nm e a potência de bombeio de 50 mW.

Nota-se na Fig. 4.22, contudo, que o pico em torno de 1530 nm é menos pronunciado que o da Fig. 4.21. Isto é devido à alta potência total de sinal, que provoca uma profunda saturação do EDFA, de maneira que a amplificação dos canais tornou-se mais equalizada. Os gráficos de espectro de saída mostram que o ganho pode ser irregular e que, dependendo da aplicação, pode requerer a adoção de técnicas de equalização de ganho. Uma das técnicas de se equalizar o espectro de ganho é fazer com que o EDFA opere em regime de saturação, como mostrado na Fig. 4.22. Porém, sob saturação, o ganho do amplificador fica mais susceptível a variações com a reconfiguração do número de canais

em sistemas WDM. Para prever este comportamento, será necessário estudar o EDFA do ponto de vista dinâmico, como será feito no próximo capítulo.

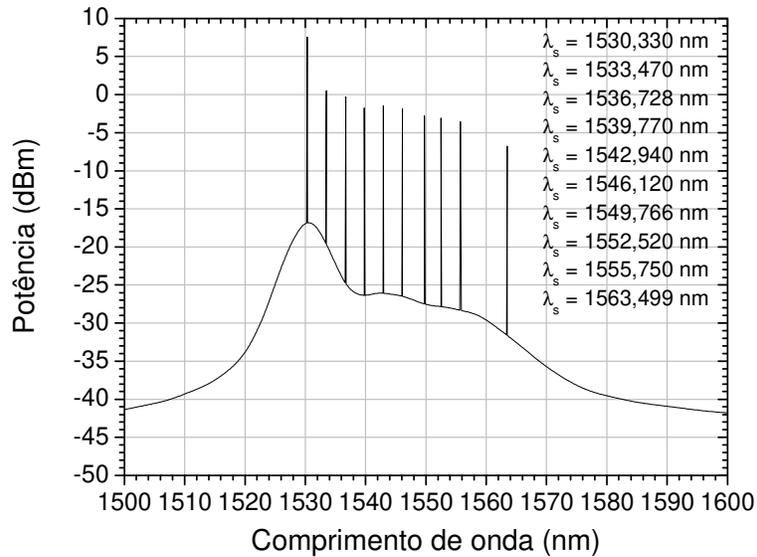


Fig. 4.21 – Espectro de saída para um EDFA co-propagante, assumindo-se dez canais transmitidos, a potência de entrada de sinal é de -30 dBm/canal, a potência de bombeio de 50 mW e o comprimento de fibra dopada de 14,2 m.

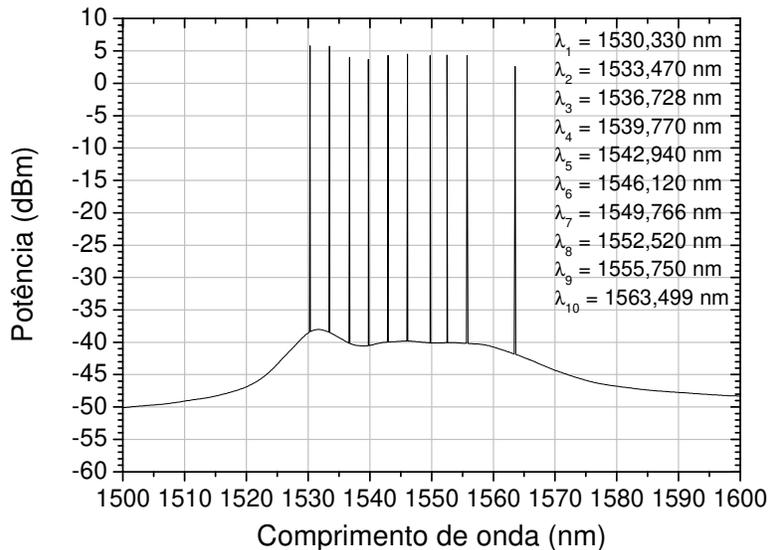


Fig. 4.22 – Espectro de saída para um EDFA co-propagante, assumindo-se dez canais transmitidos, a potência de entrada de sinal é de -10 dBm/canal, a potência de bombeio de 50 mW e o comprimento de fibra dopada de 14,2 m.

4.5 Conclusão

Este capítulo apresentou as considerações que permitiram a adaptação da teoria apresentada no Capítulo 3 para a implementação de simulações computacionais realistas do EDFA operando na situação de co-propagação. Na seqüência, as grandezas físicas de interesse para a simulação do EDFA, como o perfil de dopagem e as seções transversais de emissão e absorção, foram apresentadas. De posse destas, para as situações de operação mono e multicanal, os programas de simulação gerados permitiram a observação do comportamento dos principais parâmetros do EDFA, geralmente na forma de gráficos. Para tanto, interfaces foram criadas para facilitar a utilização do programa desenvolvido. Devido à ordem cronológica de desenvolvimento do trabalho, os resultados apresentados primeiro se referiram ao método da largura de banda equivalente. Na seqüência, consideraram-se aqueles que levavam em conta a distribuição espectral da ASE na modelagem do EDFA.

Capítulo 5

Análise do EDFA no Domínio do Tempo

Desde o aparecimento dos EDFAs, suas propriedades físicas e sua modelagem têm sido objeto de intensa pesquisa. No entanto, como o tempo de resposta do EDFA é lento em comparação às taxas de transmissão utilizadas nos sistemas de comunicações ópticas e dada a conseqüente transparência do EDFA à interferência entre canais, a maior parte dos estudos focaram suas atenções nas características estacionárias do EDFA [6].

O crescimento do interesse, bem como a implementação de redes ópticas com múltiplos comprimentos de onda, fizeram com que pesquisadores passassem a pensar mais sobre as características dinâmicas dos EDFA's [3]. Isto se deve ao EDFA ser um elemento indispensável na implementação deste tipo de rede e, dessa forma, existe a necessidade de se minimizar as penalidades causadas pelos efeitos dinâmicos que podem ser causados pela sua inserção nas redes totalmente ópticas.

Os modelos numéricos, capazes de descrever a resposta dos EDFA's às variações de potência de entrada, consistem de um conjunto de equações diferenciais com algumas condições de contorno. No entanto, o número destas equações diferenciais aumenta significativamente no caso de uma transmissão com múltiplos comprimentos de onda. Aliado a isto e, ainda, considerando-se as componentes espectrais da ASE contra e co-propagantes, a solução para estes modelos se torna complexa.

Neste contexto, fez-se necessário um modelo preciso e eficiente, capaz de modelar as variações dinâmicas do ganho do EDFA e prever o comportamento dos comprimentos de onda transmitidos durante as variações dinâmicas de potência que ocorrem em grande parte dos sistemas ópticos amplificados. Estas variações de potência podem gerar alterações no ganho do amplificador, que opera normalmente em regime de saturação. Portanto, as oscilações de ganho em função do nível de potência óptica na entrada do amplificador tornam-se extremamente críticas numa rede totalmente óptica onde há comutação e roteamento de comprimento de onda, uma vez que a recepção das mensagens em altas taxas pode ser comprometida devido ao excesso, falta ou oscilação de potência óptica de canais

detectados por um nó [6-19]. Este trabalho será importante para uma futura aplicação em redes totalmente ópticas.

5.1 Modelo matemático para a análise da resposta dinâmica do EDFAs

As equações de taxa para as populações atômicas de cada nível de energia do érbio definidas no Capítulo 2, especificamente por (2.5), (2.6) e (2.7), podem ser rescritas assumindo-se a dependência espacial e temporal como [4-13]:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} N_1(z,t) \\ N_2(z,t) \\ N_3(z,t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(R_{13} + W_{12}) & W_{21} + A_{21} & R_{31} \\ W_{12} & -(W_{21} + A_{21}) & A_{32} \\ R_{13} & 0 & -(R_{31} + A_{32}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_1(z,t) \\ N_2(z,t) \\ N_3(z,t) \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

onde $N_1(z,t)$ é densidade de portadores do nível fundamental, $N_2(z,t)$ é o número de portadores do nível metaestável, $N_3(z,t)$ é o número de portadores do nível de bombeio, R_{13} é a taxa de absorção de bombeio, R_{31} é a taxa de emissão estimulada de bombeio, W_{12} é a taxa de absorção de sinal, W_{21} é a taxa de emissão estimulada do sinal, A_{21} é a taxa de decaimento espontâneo do nível metaestável e A_{32} é a taxa de emissão espontânea do nível três para o nível dois.

Como mencionado anteriormente, os modelos de análise do estado estacionário supõem que a densidade de portadores nos três níveis de energia são invariantes ao longo do tempo. Assim as variações temporais da matriz de equações diferenciais (5.1) são anuladas, obtendo-se um sistema de três equações e três incógnitas que, após manipulações algébricas, são capazes de modelar matematicamente o comportamento estacionário da população de portadores nos três níveis de energia. No entanto, o modelo estacionário não é capaz de descrever o comportamento dos EDFAs em redes ópticas, pois não descreve a dependência temporal da densidade de portadores, quando a potência de entrada do EDFAs é variada.

Novamente, assumindo-se que o número total de portadores envolvidos no processo de amplificação é conservado, pode-se considerar que o número de portadores em cada um

dos três níveis do érbio pode ser escrito em relação ao número total de portadores $N_0(z,t)$ como:

$$N_3(z,t) = N_0(z,t) - N_1(z,t) - N_2(z,t) \quad (5.2)$$

Até este ponto, a evolução da análise segue os procedimentos usados nos Capítulos 2 e 3. No entanto, para adaptar a formulação apresentada no Capítulo 3 para um tratamento com variação temporal, especialmente àquela que considera o espectro de ASE, aumentaria-se consideravelmente o número de integrações envolvidas, fazendo-se com que o tempo de simulação ficasse excessivamente longo. Por essa razão, a contribuição espectral da ASE foi considerada de uma maneira diferente. A idéia aqui utilizada foi a de subdividir a o espectro de ASE em seções centradas em comprimentos de onda específicos dentro da banda de emissão do EDFA, baseada numa proposta feita em [3]. Com isto, como no caso do método da largura de banda equivalente, o comprimento de onda central de cada seção espectral poderia ser considerado como um canal já acrescido da influência equivalente da ASE. Se o canal de transmissão de sinal existe ou não naquela seção espectral, dependeria das definições iniciais feitas. Assim, o somatório de contribuições com e sem canais ativos leva à solução real para o EDFA. Desta forma, as equações que descrevem a evolução na coordenada z , do bombeio e do sinal para a topologia co-propagante do EDFA definidas anteriormente, podem ser escritas como [3]:

$$\frac{\partial P_p(z,t)}{\partial z} - \frac{1}{v_g} \frac{\partial P_p(z,t)}{\partial t} = \alpha_p (N_3 - N_1) P_p(z,t) \quad (5.3)$$

$$\frac{\partial P_s(z,t)}{\partial z} - \frac{1}{v_g} \frac{\partial P_s(z,t)}{\partial t} = \alpha_s (\eta_s N_2 - N_1) P_s(z,t) + 2\alpha_s \eta_s N_2 P_0, \quad (5.4)$$

onde v_g é a velocidade de grupo, com valor idêntico para as duas equações de sinal e bombeio, α_s e α_p são os coeficientes de absorção de sinal e bombeio, respectivamente, η_s é o raio da seção transversal de emissão e N_1 , N_2 e N_3 são os números normalizados de portadores para cada nível. A potência de um fóton de ruído na largura de banda ($\Delta\lambda$) para os sinais, representado por P_0 , pode ser expressa por [3]:

$$P_0 = h\nu_s \Delta\nu_s, \quad (5.5)$$

onde h é a constante de Planck, $\Delta\nu_s$ é a largura espectral correspondente a $\Delta\lambda$, considerada de 100 nHz, e ν_s é a frequência central para cada seção espectral.

As equações (5.3) e (5.4) podem ser simplificadas quando se assume, a princípio, que as variações dependentes do tempo, das populações atômicas, são lentas em comparação ao tempo de transiente do bombeio e do sinal através do EDFA. Desse modo, a derivada parcial em relação ao tempo pode ser descartada [3] e a contribuição temporal rege apenas as populações de portadores. Estes termos geralmente não podem ser desconsiderados quando as operações temporais associadas às dispersões e não-linearidades da fibra são levadas em consideração.

O sistema de equações diferenciais, formado por (5.1) e (5.3) a (5.4), pode ser resolvido numericamente através de diversos métodos numéricos. Neste trabalho, adotou-se o método das diferenças finitas, onde o espaço e o tempo são decompostos dentro de uma divisão de elementos discretos Δpz (passo espacial) e Δt (passo temporal), respectivamente. O passo espacial é calculado a partir do comprimento da fibra, dividido pelo número de seções em que essa fibra é dividida, como já adotado anteriormente. Para o cálculo do passo temporal, é necessário definir, primeiramente, o passo espacial. Em seguida o passo espacial encontrado é dividido por duas vezes a velocidade da luz, para garantir-se a estabilidade. A janela temporal de simulação, dividida por esse último valor encontrado, passa a ser o passo temporal. As equações do espaço são integradas iterativamente, com $z = m\Delta pz$ ($m = 1, 2, \dots, M$), para cada intervalo de tempo $t = n\Delta t$ ($n = 1, 2, \dots, N_t$), onde N_t é o número de passos temporais e M é o número de passos espaciais. Assim, as populações atômicas e as potências são redefinidas através de $N_i(z, t) = N_i^{m, n}$ ($i = 1, 2, 3$) e $P_x(z, t) = P_x^{m, n}$ (onde $x = p, s$), onde p faz referência ao bombeio e s ao sinal. Através do algoritmo das diferenças finitas, a população atômica no tempo $(n + 1)\Delta t$ e as potências na coordenada $(m + 1)\Delta pz$ são dadas através de [3]:

$$N_i^{m, n+1} = N_i^{m, n} + \Delta t \frac{\partial N_i^{m, n}}{\partial t} \quad (5.6)$$

$$P_x^{m+1,n} = P_x^{m,n} + \Delta pz \frac{\partial P_x^{m,n}}{\partial z} \quad (5.7)$$

Para serem adequadas à nova formulação, as taxas de transição de portadores R_{13} , W_{12} e W_{21} são rescritas como [3]:

$$R_{13} = R_{31} = \frac{1}{\tau_{21}} \frac{P_p(z,t)}{P_{sat}(\lambda_p)} \equiv \frac{1}{\tau_{21}} \frac{P_p^{m,n}}{P_{sat}^p} \quad (5.8)$$

$$W_{12} = \sum_s \frac{1}{1+\eta_s} \frac{1}{\tau_{21}} \frac{P_s(z,t)}{P_{sat}(\lambda_s)} \equiv \sum_s \frac{1}{1+\eta_s} \frac{1}{\tau_{21}} \frac{(P_s^{m,n} + P_{s2}^{m,n})}{P_{sat}^s(\lambda_s)} \quad (5.9)$$

$$W_{21} = \sum_s \frac{\eta_s}{1+\eta_s} \frac{1}{\tau_{21}} \frac{P_s(z,t)}{P_{sat}(\lambda_s)} \equiv \sum_s \frac{\eta_s}{1+\eta_s} \frac{1}{\tau_{21}} \frac{(P_s^{m,n} + P_{s2}^{m,n})}{P_{sat}^s(\lambda_s)}, \quad (5.10)$$

onde P_s^m e P_{s2}^m são as potências no sentido de propagação do sinal e no sentido contrário à propagação do sinal e P_{sat}^p e P_{sat}^s são, respectivamente, as potências de saturação de bombeio e de sinal, para cada canal, dadas por [3]:

$$P_{sat}^s(\lambda_s) = \frac{h\pi\omega_s^2 v_s(\lambda_s)}{\sigma_a(\lambda_s)[1+\eta(v_s)]\tau_{21}} \quad (5.11)$$

$$P_{sat}^p = \frac{h\pi\omega_p^2 v_p(\lambda_p)}{\sigma_p(\lambda_p)[1+\eta(v_p)]\tau_{21}} \quad (5.12)$$

e η_{ks} e η_p são os raios da seção transversal de emissão e absorção para o comprimento de onda, descritos por [3]:

$$\eta_{ks} = \eta(v_s) = \frac{\sigma_e(v_s)}{\sigma_a(v_s)} \quad (5.13)$$

$$\eta_p = \eta(v_p) = \frac{\sigma_e(v_p)}{\sigma_a(v_{sp})} = 0 \quad (5.14)$$

As constantes de propagação transversais normalizadas, u_x e w_x (onde $x = p, s$) estão relacionadas à frequência normalizada, V_x (onde $x = p, s$), através de [3]:

$$w_x^2 = V_x^2 - u_x^2, \quad (5.15)$$

onde

$$V_x = \frac{2\pi A_c AN}{\lambda_x} \quad (5.16)$$

O raio da potência, ω_x ($x = p, s$), é definido como:

$$\omega_x = \frac{A_c V_x}{u_x} \frac{K_1(w_x)}{K_0(w_x)} J_0(u_x), \quad (5.17)$$

onde, J_0 e K_0 representam as funções de Bessel de primeira espécie e K_1 de segunda espécie.

Aplicando-se (5.6) às populações normalizadas em relação o N_0 , para os níveis fundamental e metaestável, definidas em (5.1), tem-se que:

$$N_1^{m,n+1} = N_1^{m,n} + \Delta t \left\{ R_{13} (N_3^{m,n} - N_1^{m,n}) + W_{21} N_2^{m,n} - W_{12} N_1^{m,n} + \frac{1}{\tau_{21}} N_2^{m,n} \right\} \quad (5.18)$$

$$N_2^{m,n+1} = N_2^{m,n} + \Delta t \left\{ W_{12} N_1^{m,n} - W_{21} N_2^{m,n} + \frac{1}{\tau_{32}} N_3^{m,n} - \frac{1}{\tau_{21}} N_2^{m,n} \right\} \quad (5.19)$$

onde $N_3^{m,n}$ pode ser reescrito de forma normalizada como:

$$N_3^{m,n} = 1 - N_1^{m,n} - N_2^{m,n} \quad (5.20)$$

Substituindo-se (5.7) em (5.3) e (5.4), as equações que descrevem a evolução do sinal e do bombeio podem ser expressas por meio de:

$$P_p^{m+1,n} = P_p^{m,n} + \Delta z \alpha_p (N_3^{m,n} - N_1^{m,n}) P_p^{m,n} \quad (5.21)$$

$$P_s^{m+1,n} = P_s^{m,n} + \Delta z \left[\alpha_{sk} (\eta_s N_2^{m,n} - N_1^{m,n}) P_s^{m,n} + 2P_0 \alpha_{sk} \eta_{sk} N_2^{m,n} \right] \quad (5.22)$$

$$P_{s_2}^{m-1,n} = P_{s_2}^{m,n} + \Delta z \left[\alpha_{sk} (\eta_{sk} N_2^{m,n} - N_1^{m,n}) P_{s_2}^{m,n} + 2P_0 \alpha_{sk} \eta_{sk} N_2^{m,n} \right] \quad (5.23)$$

O termo $2P_0$, nas equações (5.22) e (5.23), é responsável pela geração de um ruído óptico ao longo da fibra, que representa o total da potência de ASE guiada na largura de banda assumida para cada canal. A ASE é também gerada na direção na direção oposta à do sinal.

Os coeficientes de absorção de bombeio, α_p , e de sinal (para cada canal), α_{sk} , podem ser escritos como [3]:

$$\alpha_p = -d \frac{\log(P_p)}{dz} = N_0 \sigma_p(\lambda_p) \frac{2}{\omega_p^2} \int_0^{a_c} per(r) p_0(r, \phi) r dr \quad (5.24)$$

$$\alpha_{sk} = -d \frac{\log(P_{sk})}{dz} = N_0 \sigma_a(\lambda_{sk}) \frac{2}{\omega_{sk}^2} \int_0^{a_c} per(r) s_{0k}(r) r dr \quad (5.25)$$

onde k representa o número identificador do canal considerado na banda, $per(r)$ é o perfil de dopagem, definido na Seção 4.2, $p_0(r, \phi)$ é densidade de energia de bombeio normalizada e $s_{0k}(r)$ é a energia normalizada do sinal do k -ésimo canal, ambas definidas na Seção 3.1.

As condições iniciais necessárias para se resolver (5.18) a (5.23) são obtidas pelas soluções de estado estacionário ($t = n = 0$), onde se ficam com as definições de $N_l^{(m,0)}$,

$N_2^{(m,0)}$, $P_p^{(m,0)}$ e $P_s^{(m,0)}$. Como era de se esperar, os resultados para estes parâmetros são semelhantes aos apresentados no Capítulo 4:

$$N_1^{m,0} = N_0 \frac{(1 + W_{21}^0 \tau_{21})(1 + R_{13}^0 \tau_{32})}{(1 + W_{21}^0 \tau_{21})(1 + 2R_{13}^0 \tau_{32}) + W_{12}^0 \tau_{21}(1 + R_{13}^0 \tau_{32}) + R_{13}^0 \tau_{21}} \quad (5.26)$$

$$N_2^{m,0} = N_0 \frac{R_{13}^0 \tau_{21} + W_{12}^0 \tau_{21}(1 + R_{13}^0 \tau_{32})}{(1 + W_{21}^0 \tau_{21})(1 + 2R_{13}^0 \tau_{32}) + W_{12}^0 \tau_{21}(1 + R_{13}^0 \tau_{32}) + R_{13}^0 \tau_{21}} \quad (5.27)$$

$$N_3^{m,0} = 1 - N_2^{m,0} - N_1^{m,0} \quad (5.28)$$

onde, por definição [3]:

$$R_{13}^0 = R_{31}^0 = \frac{1}{\tau_{21}} \frac{P_p^{m,0}}{P_{sat}^p} \quad (5.29)$$

$$W_{12}^0 = \sum_s \frac{1}{1 + \eta_s} \frac{1}{\tau_{21}} \frac{P_s^{m,0}}{P_{sat}^s} \quad (5.30)$$

$$W_{21}^0 = \sum_s \frac{\eta_s}{1 + \eta_s} \frac{1}{\tau_{21}} \frac{P_s^{m,0}}{P_{sat}^s} \quad (5.31)$$

Os valores iniciais das potências de bombeio e sinal são dados pelas potências na entrada da fibra, quando ($z = m = 0$). Para os incrementos espaciais seguintes, a partir da entrada da fibra, têm-se que [3]:

$$P_p^{m+1,0} = P_p^{m,0} + \Delta z \alpha_p \Gamma_p (N_3^{m,0} - N_1^{m,0}) P_p^{m,0} \quad (5.32)$$

$$P_s^{m+1,0} = P_s^{m,0} + \Delta z [\alpha_s (\eta_s N_2^{m,0} - N_1^{m,0}) P_s^{m,0} + 2\alpha_s \eta_s N_2^{m,0} P_0] \quad (5.33)$$

$$P_{s_2}^{m-1,0} = P_{s_2}^{m,0} + \Delta z [\alpha_s (\eta_s N_2^{m,n} - N_1^{m,n}) P_{s_2}^{m,0} + 2\alpha_s \eta_s N_2^{m,0} P_0] \quad (5.34)$$

Para garantir a convergência no cálculo das soluções do estado estacionário, a mesma rotina de convergência utilizada na Seção 4.1 foi adaptada para a formulação apresentada acima.

5.2 Resultados de Simulações

Na seqüência, apresentam-se alguns resultados de modelagem do EDFA para o caso dinâmico. As Fig. 5.1 a 5.5 mostram os resultados de simulações quando é aplicada uma variação do tipo onda quadrada à potência de entrada de sinal do EDFA. Utilizou-se a linguagem de programação Fortran, no sistema operacional Windows XP para implementação da modelagem do EDFA. O processador utilizado foi um Pentium IV de 2 GHz e 512 MB de memória e o tempo médio para a obtenção de cada curva de simulação foi de 23 horas. O gráfico da Fig. 5.1 mostra a resposta do EDFA após a potência de entrada do sinal em 1550,49 nm oscilar de acordo com o comportamento de uma onda quadrada, com potência de bombeio em 50 mW e comprimento da fibra em 10 m. Após a estabilização da solução estática, a potência de entrada do sinal varia de -30 dBm para 0 dBm no tempo inicial $t_i = 3,3$ ns e retorna ao valor original no tempo final $t_f = 66$ ns. A análise dos resultados mostra que, após a aplicação do pulso, com o passar do tempo, o valor da potência se estabiliza em um valor muito próximo daquele obtido com a rotina de programação estática que considera a distribuição espectral da ASE. Após t_f , o mesmo acontece. Na Fig. 5.2, tem-se a mesma simulação da Fig. 5.1, porém, com os resultados mostrados em escala logarítmica. Observa-se que o EDFA precisa de um tempo para que a potência possa se estabilizar, que é da ordem de 20 ns. Este tempo está relacionado com o tempo de fluorescência do nível de bombeio que é de 10 μ s. Como esperado, verificou-se que, com a variação brusca da potência de entrada do canal, o ganho não permanece constante. Além disto, observa-se que o pico de potência do sinal chega a 25,6 dBm (dinâmica dos cálculos matemáticos) e que se estabiliza em, aproximadamente, 13,9 dBm, durante o intervalo em que a potência do sinal de entrada permanece 0 dBm. Desta forma, conclui-se que o ganho apresentado pelo EDFA nesta situação foi de 13,9 dB, valor muito

próximo ao conseguido com a modelagem estática apresentada no capítulo anterior de 12,7 dB.

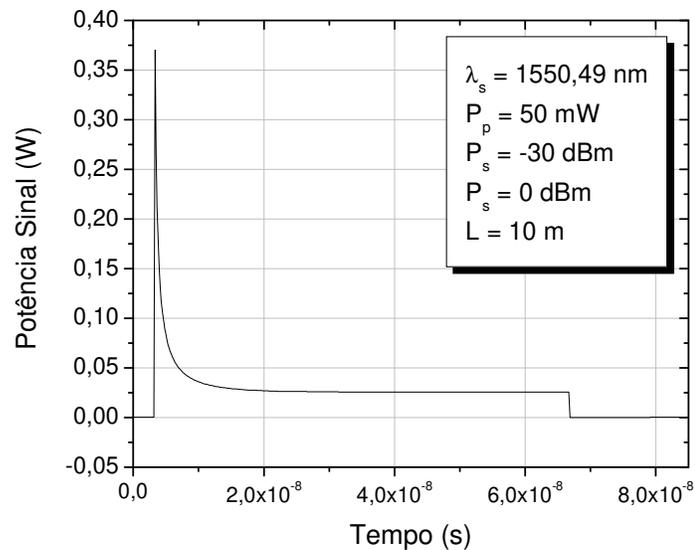


Fig. 5.1 – Transiente de potência do sinal na saída do EDFA quando uma onda quadrada de potência é aplicada à sua entrada, tendo a potência de bombeio de 50 mW, comprimento da fibra dopada de 10 m e comprimento de onda do sinal de 1550,49 nm.

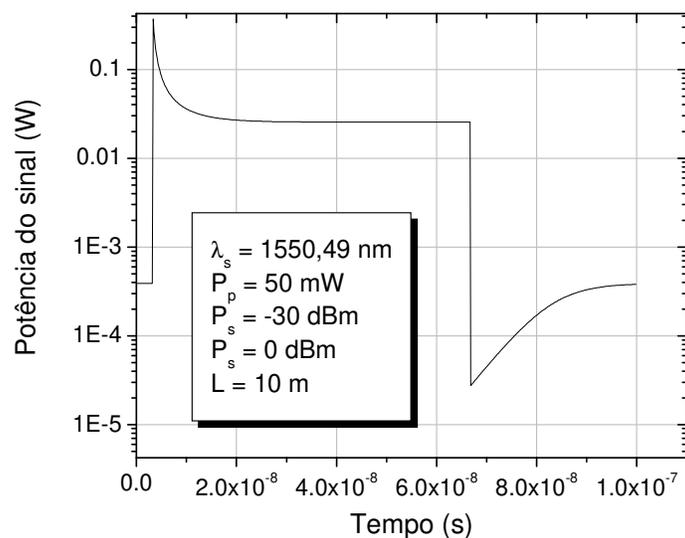


Fig. 5.2 – Transiente de potência do sinal na saída do EDFA quando uma onda quadrada de potência é aplicada à sua entrada (escala logarítmica), com potência de bombeio de 50 mW, comprimento da EDF de 10 m e comprimento de onda do sinal de 1550,49 nm.

A Fig. 5.3 mostra o transiente da potência de bombeio na saída do EDFA, quando as mesmas condições utilizadas para a obtenção da Fig. 5.1 são adotadas. Nota-se que, no instante em que a potência de sinal é alterada, o valor da potência de bombeio, como esperado, diminui consideravelmente. Observa-se, também, que quando a potência de sinal retorna para o valor original, a potência de bombeio aumenta até atingir o valor inicial. O mais importante é que o modelo mostra que este transiente não é instantâneo e depende da física da fibra dopada.

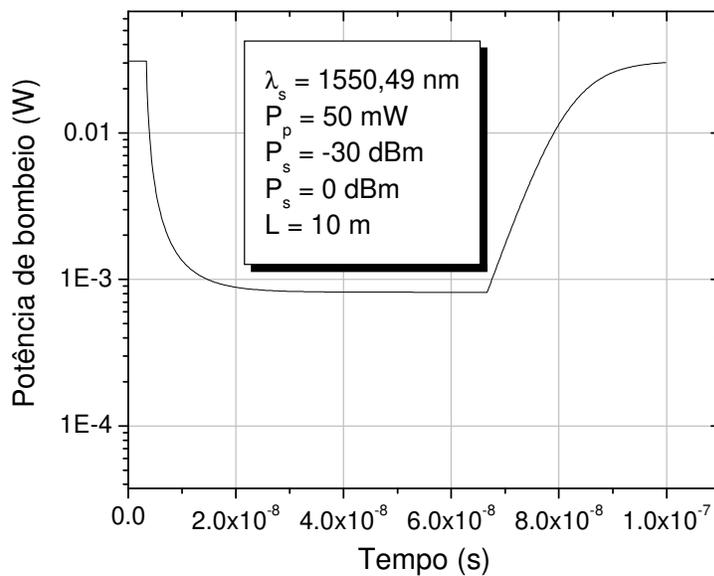


Fig. 5.3 – Transiente de potência de bombeio na saída do EDFA, quando uma onda quadrada de potência de sinal é aplicada à sua entrada, com potência de bombeio de 50 mW, comprimento da EDF de 10 m e comprimento de onda do sinal de 1550,49 nm.

A Fig. 5.4 mostra a situação quando a potência do sinal, em 1550,49 nm, é variada de -5 dBm para 0 dBm, seguindo os mesmos procedimentos anteriores. Novamente, os resultados de potência de saída, antes do pulso e após a estabilização do pulso, concordam com aqueles da modelagem puramente estática. Nota-se que o pico de potência está em torno de 18,45 dBm e que a potência se estabiliza em, aproximadamente, 13,9 dBm durante o intervalo em que a potência do sinal de entrada permanece 0 dBm. Desta forma, conclui-se que o ganho apresentado pelo EDFA, após o sinal se estabilizar, foi de 13,9 dB.

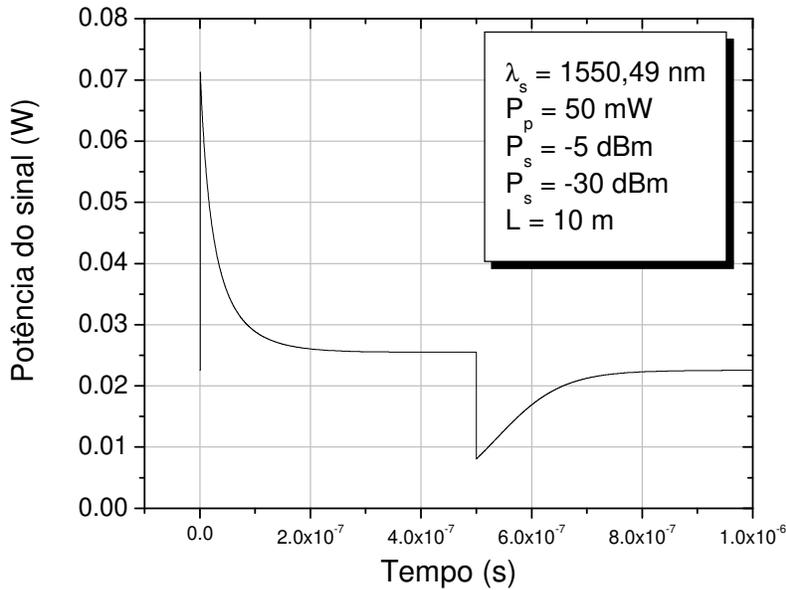


Fig. 5.4 – Transiente de potência do sinal na saída do EDFA quando uma onda quadrada de potência é aplicada à sua entrada, com potência de bombeio em 50 mW, comprimento da EDF de 10 m e comprimento de onda do sinal de 1550,49 nm.

A Fig. 5.5 apresenta o comportamento transiente da potência de saída do EDFA quando sinais em 1550,49 nm (canal 1) e 1555,21 nm (canal 2) são acoplados ao amplificador, mantendo-se a potência de bombeio em 50 mW e o comprimento da fibra em 10 m. Os dois canais são acoplados simultaneamente ao amplificador, porém, sofrem transientes de potência em instantes diferentes. As potências de ambos os canais foram variadas de -30 dBm para -5 dBm, de acordo com o tempo inicial de cada um dos canais, de acordo com o formato de uma onda quadrada. A variação de potência do canal 1 foi acionada e desligada, respectivamente, em $t_{i1} = 0,83$ ns e $t_{f1} = 25,1$ ns. Para o canal 2, $t_{i2} = 2,5$ ns e $t_{f2} = 33,5$ ns. Pode-se observar, na Fig. 5.5, a interferência no primeiro canal quando a potência do segundo é variada e vice-versa. O valor da potência do canal 1 decai exponencialmente até se estabilizar, incluindo neste comportamento a variação de potência do canal 2. Logo após os dois canais se tornarem estáveis, a potência do canal 1 é reduzida, mostrando que o excesso de ganho passa ao canal 2. Os canais retornam às suas condições após t_{f2} .

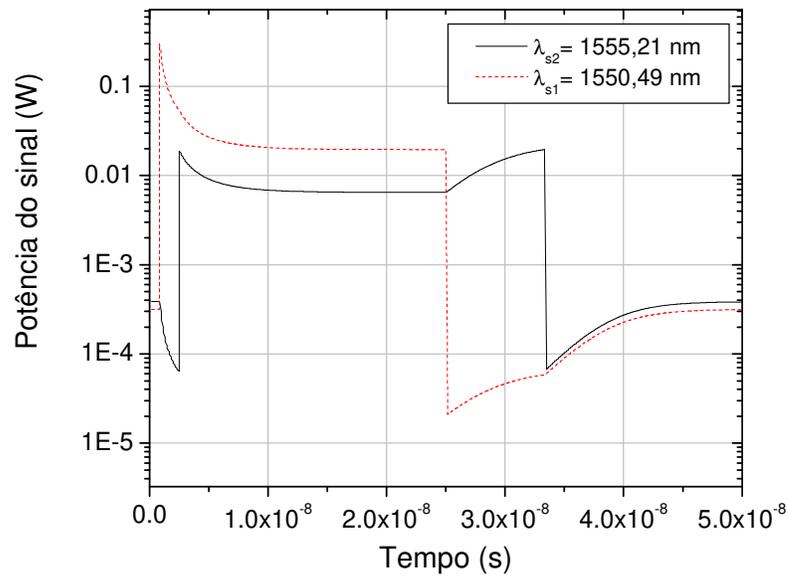


Fig. 5.5 – Transientes de potência dos sinais na saída do EDFA quando ondas quadradas de potência são aplicadas à sua entrada, tendo o comprimento da EDF de 10 m, potência de bombeio de 50 mW, e comprimentos de onda do sinal de 1550,49 nm e 1555,21 nm.

5.3 Conclusão

Neste capítulo, estudaram-se os efeitos dinâmicos do EDFA. Mostrou-se a necessidade de se ter um modelo matemático que estude os transientes de ganho de forma a prever degradações dos sinais. A modelagem apresentada foi representada por um conjunto de equações diferenciais acopladas, que só pode ser resolvido computacionalmente através de intensos cálculos numéricos iterativos, especialmente para sistemas WDM. As simulações realizadas podem ser comparadas, qualitativamente, com os resultados apresentados em [3], que apresenta, inclusive, resultados experimentais.

Capítulo 6

Conclusão

Considerando a importância do EDFA nas telecomunicações, este trabalho propõe-se a realizar um estudo teórico do amplificador com bombeio co-propagante em 980 nm, e a desenvolver ferramentas de simulação que pudessem permitir uma análise do uso dos amplificadores nos sistemas multicanais, para regimes de operação estático e dinâmico.

No Capítulo 2, apresentou-se uma introdução sobre a teoria do EDFA. Para o entendimento do mecanismo de amplificação, utilizou-se de um diagrama representando os três níveis de energia dos íons de érbio presentes no processo de amplificação da luz. Com o auxílio deste diagrama, definiram-se às equações de taxa que governam as populações de portadores envolvidas nos processos de absorção e emissão de luz. O diagrama esquemático do EDFA co-propagante, referência de análise, foi também introduzido, juntamente com seus componentes fundamentais.

Após a descrição teórica do EDFA e a obtenção das equações de taxa, no Capítulo 3 apresentou-se um estudo do amplificador voltado ao desenvolvimento de modelos matemáticos para a análise do mesmo sob estado estacionário. As soluções estáticas das equações de taxa, que definem as populações de portadores nos diferentes níveis de energia de interesse do érbio na fibra dopada, foram manipuladas, chegando-se a expressões normalizadas destas populações em relação à concentração total de portadores. A partir deste ponto, o esquema de contribuição da ASE pela técnica de largura de banda equivalente foi reformulado, resultando em um modelo que permite uma análise simultânea de propagação de vários canais de transmissão no interior do EDFA. Isto foi possível pois se passou a considerar a distribuição espectral da emissão espontânea amplificada ao invés de sua contribuição numa faixa equivalente.

No Capítulo 4, primeiramente, foram introduzidas as considerações que permitiram a adaptação da teoria apresentada no Capítulo 3 ao algoritmo de simulação do amplificador, inclusive com a apresentação de uma proposta de rotina estável para as simulações. Nesta ocasião, apresentaram-se as características e os parâmetros físicos para a amostra de fibra dopada com érbio utilizada nas simulações, no intuito de avaliar os parâmetros de operação

do EDFA, tais como ganho de sinal, absorção de bombeio e figura de ruído, entre outros. Na seqüência, os resultados de simulação para o EDFA co-propagante, sob operação estática, puderam ser visualizados para várias condições iniciais de contorno, iniciando-se com aqueles produzidos pelo método de largura de banda equivalente. Na seqüência, as simulações para aplicações em sistema multicanal, com a inclusão do espectro de ASE são apresentadas e comparadas a alguns resultados experimentais, para validação. Os resultados apresentados pelo método de contribuição espectral mostraram uma boa concordância com o caso prático analisado experimentalmente. Em compensação, o tempo de simulação aumentou consideravelmente, quando comparado ao do método da largura de banda equivalente. Este fato é facilmente explicável por causa do grande número de integrações numéricas que a modelagem multicanal apresenta. Notou-se, nas simulações, que o valor do ganho é fortemente dependente do comprimento da fibra dopada, do comprimento de onda do sinal e dos valores de potência de sinal e bombeio. Os resultados obtidos estão de acordo com resultados clássicos já publicados [3,6].

Por causa das necessidades de se obter redes ópticas, esta dissertação fez uma análise preliminar dos efeitos dinâmicos dos EDFAs. Por isso, o Capítulo 5 foi dedicado ao estudo e implementação de uma ferramenta computacional para a simulação do comportamento dinâmico do EDFA. Nesta outra etapa, a simulação multicanal foi modificada para incluir o comportamento dinâmico do amplificador. Neste caso, a análise estática ainda é importante, pois fornece as condições iniciais para a modelagem dinâmica. O método utilizado neste trabalho, para a discretização espacial e temporal, foi o das diferenças finitas. As simulações teóricas estão qualitativamente de acordo com os resultados experimentais apresentados em [3].

Por fim, observou-se que os três métodos apresentados possuem resultados próximos e, por essa razão, quando é necessário o estudo de um sistema de apenas um canal, o método de largura de banda equivalente, que é mais rápido que os demais, pode ser a melhor opção. Se for necessário analisar sistemas com mais de um canal, o método que leva em consideração o espectro de ASE seria o indicado. Obviamente, a modelagem dinâmica do EDFA torna-se necessária quando há necessidade de se obter as variações temporais do EDFA.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se a realização de medidas experimentais em sistemas multicanais para validação do método de simulação apresentado. Além disto, podem-se incorporar ao modelo outros efeitos até então desconsiderados, como dispersão, intermodulação e efeitos não-lineares, por exemplo, além da análise para bombeio em 1.480 nm. Além disto, o caso dinâmico pode ser ampliado para um estudo que envolva a análise e projeto de amplificadores ópticos a fibra dopada com érbio com controle automático de ganho, para sistemas e redes WDM.

Abaixo, destacam-se as publicações diretamente relacionadas ao trabalho aqui desenvolvido:

- 1) A. A. Martin, T. V. P. Coelho, R. M. B. Godoy e A. C. Bordonalli, “Modelagem do amplificador óptico a fibra dopada com érbio para aplicações multicanal”, Anais do 12º Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica e 7º Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, ‘MOMAG’ 2006, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2006.
- 2) T. V. P. Coelho, A. A. Martin e R. M. B. Godoy e A. C. Bordonalli, “Análise experimental de diferentes topologias de EDFA”, Anais do 12º Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica e 7º Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, ‘MOMAG’ 2006, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2006.

Referências Bibliográficas

- [1] K. C. Kao e G. A. Hockham, “Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies”, *Proc. IEE*, vol. 133, pp. 1151-1158, 1966.
- [2] F. P. Kapron e D. B. Keck, “Radiation loss in glass optical waveguide”, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 17, pp. 423-425, 1970.
- [3] E. Desurvire, *Erbium-Doped Fiber Amplifiers - Principles and Applications*, 1^a ed., John Wiley & Sons, EUA, 1994.
- [4] C. R. Giles e E. Desurvire, “Propagation of signal and noise in concatenated erbium-doped fibre amplifiers”, *J. Lightwave Technol.*, vol. 9, no. 2, pp. 147-154, 1991.
- [5] C. R. Giles e E. Desurvire, “Modeling erbium-doped fiber amplifiers”, *J. Lightwave Technol.*, vol. 9, no. 2, pp. 271-283, 1991.
- [6] J. C. R. F de Oliveira, “Projeto de EDFAs com Controle Automático de Ganho Totalmente Óptico para Aplicações em Redes WDM”, Dissertação de Mestrado, Departamento de Microondas e Óptica, UNICAMP/FEEC, 2004.
- [7] A. Bjarklev, *Optical Fiber Amplifiers: Design and System Applications*, 1^a ed., Artech House, EUA, 1993
- [8] G. Gloge, “Weakly guiding fibers”, *Appl. Opt.*, vol. 10, no.10, pp. 2252-2258, 1971
- [9] S. Milo, “Análise do Desempenho de Topologias de Amplificadores Ópticos a Fibra Dopada com Érbio”, Dissertação de Mestrado, Departamento de Microonda e Óptica, UNICAMP/FEEC, 2003.

- [10] 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.
- [11] C. A. C. Petersen e R. F. Souza, “Teoria Básica do Laser a Fibra Dopada”, Relatório Técnico RT/DMO 029, Departamento de Microonda e Óptica, UNICAMP/FEEC, 1994.
- [12] C. A. C. Petersen, “Sub-Sistemas Ópticos para Comunicações Solitônica”, Dissertação de Doutorado, Departamento de Microondas e Óptica, UNICAMP/FEEC, 1996.
- [13] 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.
- [14] K. Motoshima, L. M. Leba, D. N. Chen, M. M. Downs, T. Li e E. Desurvire, “Dynamic compensation of transient gain saturation in erbium-doped fiber amplifiers by pump feedback control”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 5, no.12, pp. 1423-1426, 1993.
- [15] G. P. Agrawal, “*Fiber Optical – Communication Systems*”, 3^a ed., John Wiley & Sons, EUA, 2002.
- [16] R. Ramaswami e K. N. Sivarajan, “*Optical Networks – A Practical Perspective*”, 2^a ed., Academic Press, EUA, 2002.
- [17] J. H. Povlsen, A. Bjarklev, O. Lumholt, H. Vendeltorp-Pommer, K. Rottwitt e T. Rasmussen, “Optimizing gain and noise performance of EDFA's with insertion of a filter or an isolator”, *SPIE Fiber Laser Sources and Amplifiers III*, vol. 1581, pp. 107-113, 1992.
- [18] I. Nusinsky e A. A. Hardy, “Multichannel amplification in strongly pumped EDFAs”, *IEEE J. of Lightwave Technol.*, vol. 22, no.8, pp. 1946-1952, 2004.

[19] Q. Yu e C. Fan, “Simple dynamic model of all-optical gain-clamped erbium-doped fiber amplifiers”, *IEEE J. of Lightwa*