

Este exemplar corresponde a redação final da tese
defendida por Márcia Betânia Costa e Silva
e aprovada pela Comissão Julgada em 28 / 02 / 2000.
Rui Fragassi Souza
Orientador

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS - UNICAMP
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO - FEEC
DEPARTAMENTO DE MICROONDA E ÓPTICA - DMO

ESTUDO DE TOPOLOGIAS PARA OTIMIZAÇÃO DO
DESEMPENHO DE AMPLIFICADORES ÓPTICOS A FIBRA
DOPADA

Por
MÁRCIA BETÂNIA COSTA E SILVA

Banca Examinadora :

Prof. Dr. Rui Fragassi Souza (Orientador) - FEEC/UNICAMP

Prof. Dr. Hugo Luis Fragnito - IFGW/UNICAMP

Prof. Dr. Aldário Chrestani Bordonalli - FEEC/UNICAMP

Campinas, 28 de Fevereiro de 2000

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE



200013479

UNIDADE	BC
N.º CHAMADA:	T/Unicamp
	Si. 38a
1. Ex.	
TOMBO BC/	42256
PROC.	16-2.88100
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	22/09/00
N.º CPD	

CM-00144202-1

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

Si38a

Silva, Márcia Betânia Costa e

Estudo de topologias para otimização do desempenho de amplificadores ópticos a fibra dopada / Márcia Betânia Costa e Silva.--Campinas, SP: [s.n.], 2000.

Orientador: Rui Fragassi Souza.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Amplificadores ópticos. 2. Comunicações óticas.
3. Fibra ótica. I. Souza, Rui Fragassi. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

Resumo

Este trabalho apresenta um estudo do amplificador a fibra dopada com érbio, ilustrando características de seu funcionamento, e analisando algumas configurações que levam a um melhor desempenho deste circuito. Estas configurações foram obtidas a partir da inserção de dispositivos passivos, tais como espelhos, circuladores e filtros, no circuito do amplificador convencional. Elas foram analisadas através de simulações computacionais, e comparadas com o amplificador convencional. Todas apresentaram aumento no ganho de sinal.

Abstract

This work presents a study of the erbium doped fiber amplifier, illustrating characteristics of its operation. An analysis of the use of some configurations, in order to obtain a better performance of this circuit, is also performed. These configurations were obtained by inserting passive devices such as mirrors, circulators and filters in the conventional amplifier circuit. They were analyzed using computational simulation, and the results were compared with the conventional amplifier. All of them presented an increase in the signal gain.

Dedico este trabalho a Vicente e Bernadete,
os meus pais.

Tudo o que sei, tudo o que faço,
e tudo o que sou, nada mais é que
um reflexo de vocês.

Agradecimentos

- A DEUS, que me deu forças para enfrentar os vários obstáculos da vida e me guiou até aqui.
- Aos meus pais, Vicente e Bernadete, e às minhas irmãs, Mércia e Mírcia, por TUDO.
- Ao amigo e orientador, Prof. Rui Fragassi Souza, pela orientação e dedicação.
- Aos amigos do DMO, pela amizade, apoio e momentos de descontração.
- Aos amigos Divanilson, Vitor, Daniel, Joselan, Virgínia, Juliana, Raquel, Alberto e Mehdi, que foram para mim como uma família. Muito obrigada.
- Ao querido amigo Vitor, que além de toda cumplicidade e companheirismo, foi meu grande apoio técnico e psicológico.
- À grande amiga Daniela, minha fiel companheira para todas as horas.
- Aos amigos Ana Paula, Vilene, Verena, Rafael, Marcio, Vanessa, Felipe, André Kauffman, André Távora, Niudomar e Rubens, pelo carinho.
- À amiga Katherine, pelo total apoio quando eu mais precisei.
- Às amigas Izabella e Vanessa, pelo grande apoio, mesmo à distância.
- Aos amigos que deixei em minha cidade e aos que fiz aqui, pela força e carinho.
- Aos professores e funcionários da FEEC que de alguma forma me ajudaram.
- À CAPES e ao Pronex/MCT pelo apoio financeiro.

Conteúdo

1	Introdução	1
2	Amplificador Óptico a Fibra Dopada	4
2.1	Introdução	4
2.2	Emissões Espontânea e Estimulada	5
2.3	Processo de Amplificação.	7
2.4	Uso do Érbio como Dopante	8
2.5	Análise do Modelo	11
3	Topologias para o Amplificador Óptico a Fibra Dopada com Érbio	21
3.1	Introdução	21
3.2	Configurações de Amplificadores a Fibra	21
3.3	Alguns Dispositivos Ópticos	23
3.3.1	Espelhos	23
3.3.2	Multiplexadores	24
3.3.3	Isoladores	25
3.3.4	Circuladores	25
3.3.5	Filtros	26
3.4	Configurações Otimizadas para o Amplificador	26
4	Simulações Computacionais	31
4.1	Introdução	31
4.2	Simplificações Utilizadas	31
4.3	Desempenho do Amplificador	32
4.4	Configuração 1	32
4.5	Configuração 2	35
4.6	Configuração 3	38

4.7	Configuração 4	40
4.8	Configuração 5	41
4.9	Simulações Espectrais	46
5	Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros	52
	Referências Bibliográficas	55
	Apêndice A : Listagem dos Programas Utilizados	57

Lista de Figuras

2.1	Diagramas de energia para o praseodímio, neodímio e érbio.	9
2.2	Espectro de absorção para fibras de sílica dopadas com érbio [3].	10
2.3	Espectro de emissão para fibras de sílica dopadas com érbio [3].	10
2.4	Diagrama de níveis de energia de um sistema laser de três níveis.	11
3.1	Esquema do Amplificador Óptico Convencional a Fibra.	22
3.2	Configurações para Amplificador Refletivo.	23
3.3	Esquema de um Laser a Fibra	24
3.4	Multiplexador	24
3.5	Circuladores : (a) de três portas e (b) de quatro portas.	26
3.6	Filtro óptico simples (rejeição por reflexão)	26
3.7	Esquema para um amplificador bidirecional.	27
3.8	Diagrama esquemático para a Configuração 1 (Amplificador básico unidirecional com bombeio co-propagante).	28
3.9	Diagrama esquemático para a Configuração 2 (Bidirecional).	28
3.10	Diagrama esquemático para a Configuração 3 (Unidirecional).	30
3.11	Diagrama esquemático para a Configuração 4 (Unidirecional).	30
3.12	Diagrama esquemático para a Configuração 5 (Unidirecional).	30
4.1	Curvas de evolução do sinal, bombeio, ASE^+ , ASE^- e figura de ruído.	33
4.2	Comportamento numérico do Ganho do Sinal versus comprimento ao longo da fibra dopada.	34
4.3	Curva de ganho versus potência de entrada de bombeio.	34
4.4	Variação do ganho do sinal com a potência de entrada, para $L=14m$	35
4.5	Desempenho do Amplificador com Bombeio Co-propagante.	36
4.6	Desempenho do Amplificador com Bombeio Contra-propagante.	36
4.7	Evolução do Ganho do Sinal versus Coeficiente de Reflexão.	37

4.8	Ganho do sinal para Configuração 2, para várias potências do sinal aplicado.	38
4.9	Comparação da evolução do ganho de sinal das Configurações 1 e 2, para $P_s=1$ mW.	39
4.10	Comparação da evolução do ganho de sinal das Configurações 1 e 2, para $P_s=100 \mu\text{W}$.	39
4.11	Desempenho do Amplificador usando a Configuração 3	40
4.12	Ganho de sinal para a Configuração 3, para várias potências do sinal aplicado.	41
4.13	Comparação da evolução do ganho de sinal das Configurações 1 e 3, para $P_s=1 \mu\text{W}$.	42
4.14	Desempenho do Amplificador usando a Configuração 4	42
4.15	Ganho de sinal para a Configuração 4, para várias potências do sinal aplicado.	43
4.16	Comparação da evolução do ganho de sinal nas Configurações 1 e 4, para $P_s=1 \mu\text{W}$.	44
4.17	Comparação da evolução do ganho de sinal nas Configurações 3 e 4, para $P_s=1 \mu\text{W}$.	44
4.18	Desempenho do Amplificador usando a Configuração 5.	45
4.19	Ganho de sinal para a Configuração 5, para várias potências do sinal aplicado.	45
4.20	Comparação da evolução do ganho de sinal nas Configurações 1 e 5, para $P_s=1 \mu\text{W}$.	46
4.21	Comparação da evolução do ganho de sinal nas Configurações 3 e 5, para $P_s=1 \mu\text{W}$.	47
4.22	Ganho do sinal para as diversas configurações.	47
4.23	Figura de ruído para as diversas configurações.	48
4.24	Curvas de eficiência para as diversas configurações, para $P_s=1 \mu\text{W}$.	48
4.25	Curvas de eficiência para as diversas configurações, para $P_s=10 \mu\text{W}$.	50
4.26	Variação espectral típica do ganho de sinal	50
4.27	Curvas espectrais do ganho para todas as configurações, para $P_p=10$ mW.	51
4.28	Curvas espectrais do ganho para todas as configurações, para $P_p=20$ mW.	51

Capítulo 1

Introdução

Quando foi possível reduzir a atenuação na fibra de sílica para alguns decibéis por quilômetro, o conceito de comunicações ópticas ganhou força. Na década de 80, devido a avanços tecnológicos nos processos de fabricação da fibra, já era possível a implantação de enlaces ópticos com dezenas de quilômetros. Porém, isso era possível apenas quando houvesse um repetidor para recuperar o sinal a cada 40 quilômetros, aproximadamente.

Os repetidores, na época, faziam a conversão do sinal óptico para elétrico. Este sinal era processado eletricamente (incluindo amplificação, filtragem, grampeamento e decisão) e, depois, convertido novamente para óptico, quando, então, era novamente retransmitido para o enlace. Estes repetidores não respondiam a uma taxa de transmissão muito elevada, sem apresentarem problemas de intermodulação entre canais e distorções, além de dependerem da confiabilidade dos dispositivos eletrônicos, das variações da temperatura, etc.

Para tentar resolver o problema, pesquisadores do mundo inteiro buscaram uma maneira de restaurar o sinal óptico sem precisar convertê-lo, ou seja, descobrir uma maneira totalmente óptica para a amplificação da luz. Dentre as várias alternativas que surgiram, uma é o nosso tema de estudo, o amplificador a fibra dopada com terras-raras.

Este dispositivo utiliza um pedaço de fibra, em que, no processo de fabricação de sua preforma, são depositadas partículas de elementos químicos especiais, que, como o próprio nome sugere, são chamados de terras-raras. São elementos que, quando incorporados à fibra, possuem propriedades ópticas interessantes, que serão mais detalhadas no Capítulo 2.

Com o desenvolvimento das pesquisas, observou-se que uma fibra de sílica dopada com partículas de érbio, quando bombeada (excitada) em um certo comprimento de onda, pode emitir fótons em torno de 1550 nm de comprimento de onda, que é chamada de terceira janela de telecomunicação fotônica, a janela que apresenta a menor atenuação na fibra de sílica. Se um sinal óptico de comprimento de onda próximo a 1550 nm for aplicado a esta

fibra, os novos fótons emitidos por ela têm a mesma fase dos fótons do sinal óptico original e teremos, então, um sinal óptico amplificado na saída desta fibra.

A principal razão para o grande impacto e interesse no desenvolvimento deste amplificador, para os sistemas de comunicação fotônica, é que ele é ideal em dois importantes aspectos : primeiro, por ele permitir que sejam transmitidos dados em qualquer taxa de bits utilizada e em qualquer formato ; e, segundo, por ele poder ser usado para amplificar simultaneamente sinais com diferentes comprimentos de onda (canais de informação) dentro de uma certa região espectral, e por estes sinais poderem ter diferentes formatos, como sinais digitais, analógicos, de dados, de vídeo, etc.

Podemos citar outras propriedades favoráveis, como : alto ganho, baixo ruído, baixa interferência entre canais (*crosstalk*), insensibilidade à polarização do sinal a ser amplificado e a variações da temperatura ambiente, extensa banda passante, alta potência de saturação, baixa perda de acoplamento e custo relativamente baixo.

Atualmente, há grande aplicação dos AFDE's (Amplificadores a Fibra Dopada com Érbio) em sistemas WDM (*Wavelength Division Multiplexing*), que usam uma técnica de multiplexação de vários comprimentos de onda, e aloca seus diversos canais dentro da banda passante do amplificador, que é por volta de 4,2 THz, ou 35 nm. Na atualidade, dentro desta faixa podem ser alocados até 42 canais WDM, com separação mínima de 0,8 nm e modulados a uma taxa digital de até 10 Gbps.

Outras aplicações importantes deste dispositivo são : na distribuição de TV a cabo, onde a potência óptica disponível no transmissor determinaria o número máximo de assinantes que podem ser atendidos ; a amplificação desta potência, em determinados pontos, aumenta os pontos de derivação permitidos, aumentando, assim, o número de assinantes ; nos enlaces ópticos submarinos de longa distância, etc.

Atualmente, existem vários fabricantes de amplificadores ópticos a fibra dopada com érbio. Dependendo da aplicação, temos vários modelos e especificações com diferentes graus de sofisticação. Mas, a pesquisa de novas alternativas visando obter um melhor desempenho dos sistemas sempre irá existir. Para cada aplicação tende a existir uma configuração ideal.

O objetivo deste trabalho é o estudo do funcionamento do amplificador a fibra dopada com érbio, utilizando diferentes topologias, onde, pela inserção de alguns dispositivos ópticos adicionais em sua configuração original, podemos ter melhorias no desempenho do amplificador.

No Capítulo 2, serão abordados os conceitos físicos básicos do amplificador, a justificativa

da escolha do érbio para dopagem da fibra (como seu uso está relacionado com o processo de amplificação dentro da fibra e como devem ser escolhidos os comprimentos de onda de bombeio e sinal) e um modelamento matemático, necessário para ilustrar a evolução dos diversos sinais ao longo da fibra.

No Capítulo 3, o amplificador a fibra será apresentado : como ele é construído, como funciona e os tipos de bombeamentos normalmente utilizados. Serão mostrados, também, alguns dispositivos ópticos a serem empregados nas diferentes topologias. Definiremos conceitos de amplificadores tipo reflexão e bidirecionais, como opções alternativas da configuração do amplificador básico, onde há melhorias do desempenho de algumas características do amplificador, e, por fim, serão apresentadas algumas configurações de amplificadores refletivos que serão, posteriormente, simulados e discutidos.

No Capítulo 4, serão apresentadas as diversas simulações computacionais, para ilustrar várias propriedades e características dos amplificadores, tais como a variação do ganho de sinal devido ao comprimento da fibra ou à potência de entrada de bombeio. Também, apresentaremos as simulações e análises de cada configuração, comparando-as com a configuração convencional, e as simulações espectrais para todas essas configurações.

No Capítulo 5, estão apresentadas as conclusões deste trabalho, e são enumeradas algumas sugestões para futuras pesquisas que poderão dar seqüência ao estudo aqui desenvolvido.

Capítulo 2

Amplificador Óptico a Fibra Dopada

2.1 Introdução

Em qualquer sistema de transmissão, o papel do amplificador é captar o sinal que leva a informação, amplificá-lo, e devolvê-lo para o canal de transmissão ou para o receptor. No caso de um sistema óptico, temos um feixe de luz viajando dentro de uma fibra óptica, que, depois de percorrer uma certa distância, tem sua intensidade atenuada devido à absorção e espalhamento pela fibra. O amplificador óptico eleva essa intensidade, possibilitando a comunicação entre lugares mais distantes. O elemento ativo do nosso amplificador óptico em questão é uma fibra dopada. As primeiras referências de amplificação a fibra dopada com átomos de terra rara datam de 1964 [1] e continua havendo grande interesse em estudá-la e desenvolvê-la.

O princípio de funcionamento é semelhante ao de um laser a fibra, com um sistema de bombeamento que cede energia aos elétrons dos átomos dopantes, e, estes, em um nível mais excitado, relaxam, decaindo para seu estado inicial e liberando energia. Essa energia é liberada de forma radiativa e não-radiativa; a forma não-radiativa se apresenta como uma vibração em torno do átomo, ou seja, um fônon. Estamos interessados na emissão radiativa, que pode ser de duas maneiras, **emissão espontânea** ou **emissão estimulada**, em ambos os casos ocorrendo a emissão de fótons, com seus comprimentos de onda dependendo da energia de separação entre os níveis permitidos de energia envolvidos.

O processo de emissão espontânea libera fótons por decaimento natural gerando ruído óptico; já o de emissão estimulada, como o nome sugere, precisa de um estímulo de um sinal externo (de informação), para gerar fótons de mesma frequência e mesma fase do sinal de informação, conseguindo, assim, a amplificação.

2.2 Emissões Espontânea e Estimulada

Consideremos um sistema atômico que tem os níveis discretos 1,2,3,... com energias E_1, E_2, E_3, \dots , respectivamente, com populações, isto é, número de átomos por unidade de volume, N_1, N_2, N_3, \dots , respectivamente, e que o nível 1 é o nível de menor energia. Se o sistema está em equilíbrio, em uma dada temperatura T , então a relação de população entre dois níveis, por exemplo o 1 e o 2, é dada pela equação de Boltzmann [2] :

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{e^{-\frac{E_2}{kT}}}{e^{-\frac{E_1}{kT}}} \quad (2.1)$$

onde k é a constante de Boltzmann. Como assumimos $E_2 > E_1$, podemos concluir, pela Eq. (2.1), que $N_2 < N_1$, ou seja, em seu estado de equilíbrio térmico um sistema atômico tem população maior num nível de energia mais baixo.

Se o átomo estiver no nível 2, ele pode decair para o nível 1 através da emissão de um fóton; quando isso acontece, o átomo libera uma energia correspondente a $E_2 - E_1$. Esse processo pode acontecer de forma natural no sistema, quando, então, chama-se **emissão espontânea**. A frequência ν do fóton gerado é dada por :

$$\nu = \frac{E_2 - E_1}{h} \quad (2.2)$$

onde h é a constante de Plank.

Chamemos A_{21} de probabilidade de transição, por unidade de tempo, via emissão espontânea, do nível 2 para o nível 1; A_{21} é, também, chamada constante de Einstein e, por definição, é $A_{21} = \frac{1}{\tau_{21}}$, onde τ_{21} é o tempo médio de vida do átomo no estado excitado 2, antes de decair para o estado 1. O número médio de decaimentos espontâneos, por segundo e por unidade de volume, é $A_{21}N_2$, ou seja, a taxa da variação de população no nível 2, devido à emissão espontânea é :

$$\frac{dN_2}{dt} = -A_{21}N_2 \quad (2.3)$$

O valor numérico de A_{21} depende da transição particular envolvida; logo, a onda eletromagnética gerada por um átomo isoladamente não possui qualquer relação de fase com a gerada por átomos vizinhos, através do mesmo processo, e pode, também, ser emitida em qualquer direção espacial.

Vamos supor que, agora, uma onda eletromagnética com frequência ν , dada pela Eq. (2.2), incide sobre o material, forçando um átomo no nível 2 a decair para o nível 1, devido à presença desse fóton. Neste caso ocorre uma **emissão estimulada**. Pode, também, acontecer de um átomo, no nível 1, sentir a presença desse fóton e absorver sua energia; esse processo se chama **absorção**.

No processo de emissão estimulada, definimos W_{21} como a probabilidade de transição estimulada do nível E_2 para o nível E_1 . A taxa de variação da população no nível 2 é, então :

$$\frac{dN_2}{dt} = -W_{21}N_2 \quad (2.4)$$

O fóton gerado através desse processo depende da onda eletromagnética que o estimulou; ele é emitido na mesma direção e na mesma frequência e fase. Neste caso, W_{21} depende não só da transição particular envolvida mas, também, da intensidade da onda incidente. Podemos, então, escrever :

$$W_{21} = \sigma_{21}F \quad (2.5)$$

onde σ_{21} é a seção transversal de emissão estimulada e F é o fluxo fotônico da onda eletromagnética incidente.

Do mesmo modo, para o processo de absorção, onde W_{12} é a probabilidade de transição, por absorção, do nível 1 para o nível 2 e σ_{12} é a seção transversal de absorção correspondente, temos :

$$\frac{dN_1}{dt} = -W_{12}N_1 \quad (2.6)$$

$$W_{12} = \sigma_{12}F \quad (2.7)$$

Podemos observar que, em um sistema de apenas 2 níveis, $\sigma_{12} = \sigma_{21}$, que resulta em probabilidades iguais de emissão estimulada e de absorção nesse meio. Como consequência, as taxas de transição por emissão estimulada e por absorção só diferem se houver populações diferentes nos dois níveis envolvidos. Concluimos, assim, que, se o nível 1 for mais populoso que o nível 2, haverá mais processo de absorção que de emissão estimulada, e vice-versa. Notar, nas expressões (2.3), (2.4) e (2.6), que as probabilidades A_{21} , W_{21} e W_{12} são sempre números reais não negativos, justificando o sinal negativo (diminuição temporal das populações) dessas expressões.

2.3 Processo de Amplificação.

Consideremos, ainda, nosso sistema atômico de dois níveis, como definido anteriormente, em um determinado material; vamos supor, agora, um fluxo fotônico F se propagando na direção z . Devido à sua presença, deve haver processos de absorção e emissão estimulada. Decorrente disso, a variação incremental do fluxo fotônico é dada pela variação incremental da população nos níveis 1 e 2 devida a esses dois processos; ou seja, com a presença do fluxo, começa a ocorrer emissão, com diminuição da população no nível 2, e absorção, com diminuição da população no nível 1, resultando em uma variação do fluxo dada por :

$$dF = \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \left(-\frac{dN_2}{dt} \Delta z + \frac{dN_1}{dt} \Delta z \right) \quad (2.8)$$

De acordo com as Eqs. (2.4) a (2.7), podemos perceber que a Equação (2.8) pode ser escrita na forma :

$$dF = (\sigma_{21}FN_2 - \sigma_{12}FN_1)dz$$

$$dF = \sigma F(N_2 - N_1)dz \quad (2.9)$$

Podemos perceber, a partir desta equação, que, se $N_2 > N_1$, temos um aumento no fluxo fotônico, ocorrendo, assim, uma amplificação do sinal. Como vimos anteriormente, um sistema atômico em equilíbrio térmico obedece à Eq. (2.1) e que, para ela ser obedecida, deve-se ter $N_2 < N_1$. Então, para conseguirmos a amplificação do sinal, primeiramente temos que obter uma **inversão de população** no nosso meio, ou seja, fazer com que a população no nível 2 fique maior que a no nível 1.

Se o sistema está em equilíbrio térmico e o fluxo atravessa o material, temos, no início, mais transições $1 \rightarrow 2$, pois o nível 1 é mais populoso, mas, com o passar do tempo, a população do nível 2 vai aumentando até o ponto em que $N_1 = N_2$; a partir daí, o sistema fica num estado de transparência ou **saturação** dos dois níveis; a partir deste ponto, o número de emissões e absorções ficam potencialmente iguais. Nestas condições fica impossível conseguir a inversão de população.

Podemos, agora, considerar um sistema de três níveis em que, utilizado um fluxo com uma frequência adequada, ocorre transições $1 \rightarrow 3$. Estando no nível 3, os átomos podem

fazer a transição $3 \rightarrow 2$ rapidamente, e, estando no nível 2, eles podem ficar lá por algum tempo. Se isto ocorrer, podemos criar uma situação em que $N_1 > N_3$, então sempre haveria processo de absorção, e, além disso, também podemos ter, simultaneamente, a situação $N_2 > N_1$, conseguindo a inversão de população entre estes dois últimos níveis. Para ocorrer a amplificação, seria necessária a presença de outro fluxo com uma outra frequência específica, Eq. (2.2), conseguindo, assim, a transição $2 \rightarrow 1$, através de emissão estimulada na frequência do amplificador e atingindo o resultado desejado. O processo que leva os átomos para o nível 3 chama-se **bombeamento**.

Podemos, também, trabalhar com um material com 4 níveis, sendo o nível de bombeamento instável, ou seja, os átomos decaem rapidamente, de forma não radiativa, para outro nível, chamado nível laser ou nível metaestável, que é estável e onde os átomos permanecem por algum tempo antes de decaírem naturalmente ou por emissão estimulada. Então, para quatro níveis, teríamos : $0 \rightarrow 3$, por bombeamento ; depois, rapidamente $3 \rightarrow 2$; por emissão estimulada $2 \rightarrow 1$, e, depois, novamente $1 \rightarrow 0$ ocorreria rapidamente, onde os números 0,1,2,3 correspondem aos níveis de energia usados neste processo, sendo que o nível de menor energia seria o nível 0.

2.4 Uso do Érbio como Dopante

Para se chegar ao amplificador óptico a fibra, primeiramente torna-se necessário o estudo de certos materiais, como as **terras raras**. Estes elementos possuem características que os diferem de outros elementos opticamente ativos, pois eles emitem e absorvem em faixas estreitas de comprimentos de onda, o tempo médio de vida dos elétrons no estado metaestável é bastante longo, os comprimentos de onda das transições de emissão e absorção não são sentidas pelo material hospedeiro (sílica), entre outras [3]. Usando estes materiais, estas propriedades resultam da natureza dos estados envolvidos nestes processos e conduzem a um excelente desempenho das terras raras em aplicações ópticas.

As terras raras são divididas em dois grupos de 14 elementos cada, os **lantanídeos** e os **actinídeos**. Embora todos estes elementos compartilhem de muitas propriedades eletrônicas, os lantanídeos têm maior importância para aplicação em lasers e amplificadores. Apesar do nome terras raras, eles não são tão raros e já são produzidos em laboratório.

Dentre as terras raras mais usadas na dopagem de fibras ópticas estão o **érbio** (Er), o **neodímio** (Nd) e o **praseodímio** (Pr), e ainda o túlio (Tm) e o itérbio (Yb) como co-dopantes, para conseguir maior potência de saída dos amplificadores [7]. A razão para o

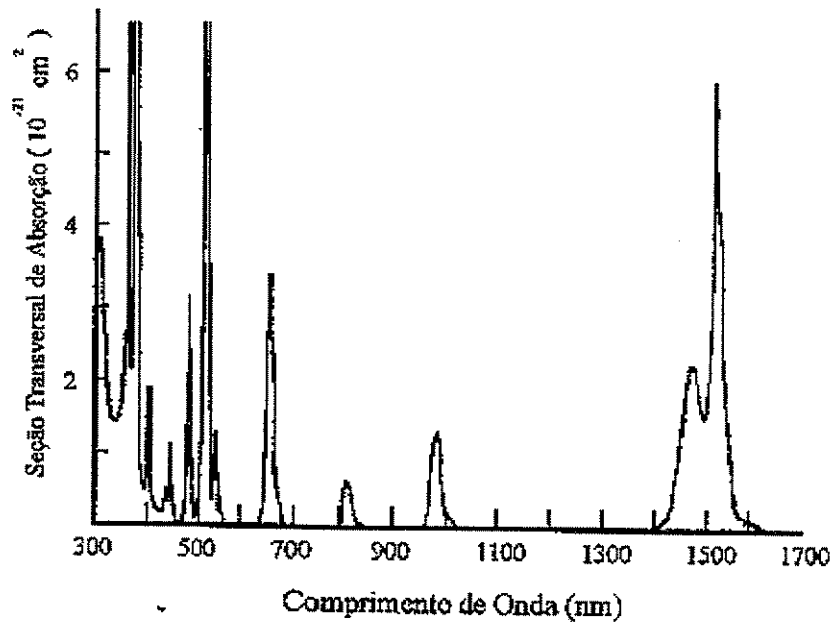


Figura 2.2: Espectro de absorção para fibras de sílica dopadas com érbio [3].

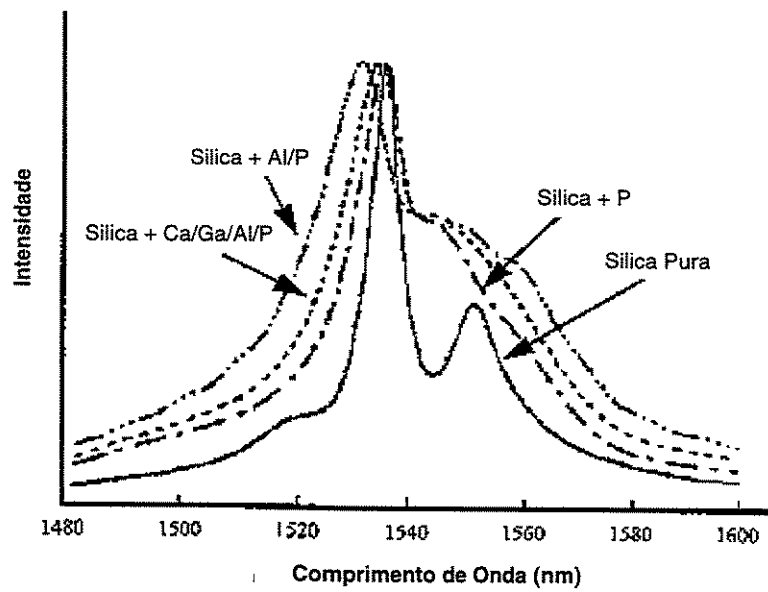


Figura 2.3: Espectro de emissão para fibras de sílica dopadas com érbio [3].

mânio (Ge) no alargamento do espectro de emissão da fibra, algo importante em aplicações WDM, por exemplo.

2.5 Análise do Modelo

Vamos considerar, como em [5], uma fibra de sílica dopada com érbio, utilizando para análise um sistema de três níveis de energia, considerando a fibra com raio “a”, com área da seção transversal “A” ($=\pi a^2$), comprimento “L”, abertura numérica “NA”, comprimento de onda do sinal “ λ_s ” e comprimento de onda do bombeio “ λ_p ”

O núcleo da fibra é um vidro de sílica dopado com terra rara, o perfil do dopante no núcleo é suposto distribuído na forma de uma função perfil de dopagem, “ $per(r)$ ”, e a casca não tem dopagem. Todos os parâmetros da fibra dopada são tomados invariantes ao longo do comprimento dessa fibra.

A Fig. 2.4 ilustra os níveis de energia envolvidos no processo, com as correspondentes populações atômicas e as taxas de transição. A análise matemática será feita em cima deste modelo [4].

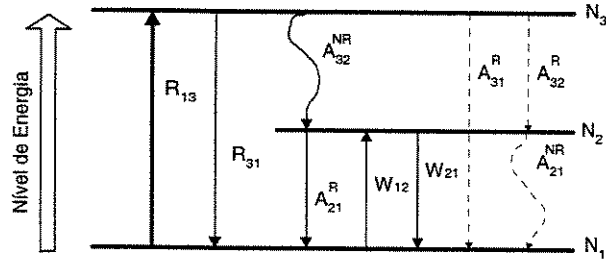


Figura 2.4: Diagrama de níveis de energia de um sistema laser de três níveis.

Considerando que R_{13} é a taxa de absorção do sinal de bombeio, R_{31} é a taxa de emissão estimulada do sinal de bombeio para o nível fundamental. No nível excitado 3, podem ocorrer dois tipos de decaimento, o radiativo (com taxa $A_3^R = A_{32}^R + A_{31}^R$) e o não-radiativo (com taxa A_{32}^{NR}); este nível 3 será suposto apresentar apenas transições não-radiativas, fazendo com que $A_{32}^{NR} \gg A_3^R$. A absorção e emissão estimulada entre os níveis 1 e 2 são W_{12} e W_{21} , respectivamente. A emissão espontânea a partir do estado 2 é $A_2 = A_{21}^R + A_{21}^{NR}$; assumimos, também, que do nível 2 o decaimento é predominantemente radiativo, ou seja, $A_{21}^R \gg A_{21}^{NR}$.

Considerando a população total de átomos de érbio no núcleo da fibra, temos :

$$N_0 = N_1 + N_2 + N_3$$

onde N_0 é a densidade de átomos dopantes no núcleo (invariante ao longo da fibra).

As equações de taxa do sistema ficam, então :

$$\frac{dN_1}{dt} = -R_{13}N_1 + R_{31}N_3 + A_{21}N_2 + W_{21}N_2 - W_{12}N_1 \quad (2.10)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = A_{32}N_3 - A_{21}N_2 + W_{12}N_1 - W_{21}N_2 \quad (2.11)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = R_{13}N_1 - R_{31}N_3 - A_{32}N_3 \quad (2.12)$$

Considerando, agora, que no estado estacionário $\frac{dN_i}{dt} \cong 0$ ($i=1,2,3$), temos :

$$-N_1.(R_{13} + W_{12}) + N_2.(A_{21} + W_{21}) + N_3R_{31} = 0 \quad (2.13)$$

$$N_1W_{12} - N_2.(A_{21} + W_{21}) + N_3A_{32} = 0 \quad (2.14)$$

$$N_1R_{13} - N_3.(A_{32} + R_{31}) = 0 \quad (2.15)$$

Como visto antes, $A_{21} = \frac{1}{\tau_{21}}$, e fazendo $N_3 = N_0 - N_1 - N_2$, temos :

$$-N_1.(R_{13} + W_{12}) + N_2.(A_{21} + W_{21}) + (N_0 - N_1 - N_2)R_{31} = 0 \quad (2.16)$$

$$N_1W_{12} - N_2.\left(\frac{1}{\tau_{21}} + W_{21}\right) + A_{32}.(N_0 - N_1 - N_2) = 0 \quad (2.17)$$

$$N_1R_{13} - (N_0 - N_1 - N_2).(A_{32} + R_{31}) = 0 \quad (2.18)$$

Observamos que a Eq. (2.16) é idêntica à soma das Eqs. (2.17) e (2.18). Escolhemos, então, as Eqs. (2.17) e (2.18) para formarem um sistema de duas equações e duas incógnitas (N_1 e N_2); após manipulações, temos [4] :

$$\frac{N_1}{N_0} = \frac{(1 + W_{21}\tau_{21}) \cdot \left(1 + \frac{R_{13}}{A_{32}}\right)}{(1 + W_{21}\tau_{21}) \cdot \left(1 + \frac{R_{13}+R_{31}}{A_{32}}\right) + W_{12}\tau_{21} \cdot \left(1 + \frac{R_{31}}{A_{32}}\right) + R_{13}\tau_{21}} \quad (2.19)$$

$$\frac{N_2}{N_0} = \frac{R_{13}\tau_{21} + W_{12}\tau_{21} \cdot \left(1 + \frac{R_{13}}{A_{32}}\right)}{(1 + W_{21}\tau_{21}) \cdot \left(1 + \frac{R_{13}+R_{31}}{A_{32}}\right) + W_{12}\tau_{21} \cdot \left(1 + \frac{R_{31}}{A_{32}}\right) + R_{13}\tau_{21}} \quad (2.20)$$

Podemos assumir (para o érbio) que a taxa de decaimento não-radiativo do nível 3 (A_{32}) predomina sobre as taxas de bombeio (R_{13} e R_{31}), ou seja, $A_{32} \gg R_{13}, R_{31}$; então, podemos simplificar as Eqs. (2.19) e (2.20), colocando-as na forma :

$$\frac{N_1(r, \phi, z)}{N_0} = \frac{1 + W_{21}\tau_{21}}{1 + \tau_{21} \cdot (R_{13} + W_{12} + W_{21})} = 1 - x(r, \phi, z) \quad (2.21)$$

$$\frac{N_2(r, \phi, z)}{N_0} = \frac{\tau_{21} \cdot (R_{13} + W_{12})}{1 + \tau_{21} \cdot (R_{13} + W_{12} + W_{21})} = x(r, \phi, z) \quad (2.22)$$

Considerando a estrutura da fibra, o sistema de referência de coordenadas usado será o cilíndrico, ou seja, as coordenadas serão expressas por (r, ϕ, z) , com o eixo z alinhado com o eixo da fibra, e com $z = 0$ no ponto de entrada do sinal de bombeio. Neste sistema de coordenadas, as densidades normalizadas de energia de bombeio, $p_n(r, \phi)$, e de sinal, $s_0(r, \phi)$, são [8] :

$$p_n(r, \phi) = r_n(r) \cos^2(n\phi) \quad (2.23)$$

$$s_0(r, \phi) = s_0(r) \quad (2.24)$$

onde :

$$r_n(r) = \begin{cases} c_{uw} J_n^2\left(\frac{ur}{a}\right) & \text{para } r \leq a \\ c_{uw} \left[\frac{J_n(u)}{K_n(w)}\right]^2 K_n^2\left(\frac{wr}{a}\right) & \text{para } r > a \end{cases} \quad (2.25)$$

$$s_0(r) = \begin{cases} k_{uw} J_0^2\left(\frac{wr}{a}\right) & \text{para } r \leq a \\ k_{uw} \left[\frac{J_0(u)}{K_0(w)}\right]^2 K_0^2\left(\frac{wr}{a}\right) & \text{para } r > a \end{cases} \quad (2.26)$$

Lembremos que, no comprimento de onda de bombeio, λ_p , a fibra pode ser multi-modo, “ n ” é um inteiro que indica o número azimutal do bombeio, “ a ” é o raio da fibra, “ u ” e “ w ” são as constantes de propagação transversais normalizadas e $J_n(u)$ e $K_n(u)$ representam as funções de Bessel de primeira e segunda espécie de ordem “ n ”, respectivamente.

As densidades de energia são normalizadas, ou seja, suas integrais de superfície, na seção transversal total da fibra (área infinita, no modelo utilizado), são unitárias, sendo as constantes c_{uw} e k_{uw} os coeficientes de normalização [m^{-2}].

As intensidades de sinal, I_s , e de bombeio, I_p , expressas em [W/m^2], estão relacionadas com as densidades de energia e com as funções que descrevem a evolução do sinal e do bombeio (adimensionais), $s(z)$ e $p(z)$, ou seja :

$$I_s(r, z) = P_s(0) s_0(r) s(z) \quad (2.27)$$

$$I_p(r, \phi, z) = P_p(0) p_n(r, \phi) p(z) \quad (2.28)$$

onde $P_s(0)$ e $P_p(0)$ são as potências de sinal e de bombeio no ponto $z = 0$, respectivamente, expressas em [W]. As funções $p(z)$ e $s(z)$ são normalizadas, de forma que $p(0) = s(0) = 1$.

Iremos considerar apenas um modo de bombeio. Apesar de considerar um sistema de 3 níveis, quando a intensidade do sinal atravessa a fibra, dois mecanismos reduzem a quantidade dos fótons de bombeio : a primeira é a absorção do bombeio por átomos dopantes do nível fundamental, que pulam para o nível de bombeio ; essas são chamadas absorções GSA (*ground state absorption*) ; o outro mecanismo é a absorção do bombeio por átomos que já estão no estado excitado e podem absorver o bombeio pulando para um nível superior, chamada absorções ESA (*excited state absorption*) [3]. Então, a taxa de variação da intensidade do sinal de bombeio, em uma área incremental dS na seção transversal da fibra, é :

$$\frac{dI_p}{dz} dS = -\sigma_p N_1 I_p dS - \sigma'_p N_2 I_p dS \quad (2.29)$$

onde σ_p é a seção transversal de absorção GSA, e σ'_p é a seção transversal de absorção ESA.

Então, a evolução da intensidade do bombeio, na seção transversal completa, é :

$$\int_0^\infty \int_0^{2\pi} \frac{dI_p}{dz} r dr d\phi = - \int_0^\infty \int_0^{2\pi} (\sigma_p N_1 + \sigma'_p N_2) I_p r dr d\phi \quad (2.30)$$

Analogamente, para a intensidade do sinal, que sofre perda pela absorção do nível 1 para o 2 e ganha através da emissão estimulada do nível 2 para o nível 1, temos :

$$\int_0^\infty \int_0^{2\pi} \frac{dI_s}{dz} r dr d\phi = \int_0^\infty \int_0^{2\pi} (\sigma_e N_2 - \sigma_a N_1) I_s r dr d\phi \quad (2.31)$$

onde σ_a é a seção transversal de absorção do sinal, e σ_e é a seção transversal de emissão estimulada. Para encontrar o coeficiente de ganho na fibra é preciso resolver numericamente as Eqs. (2.30) e (2.31).

Para simplificar, a partir da Eq. (2.22) vamos considerar :

$$x(r, \phi, z) = \frac{\tau_2 W_{pl}(r, \phi, z) + \tau_2 W_{SA}(r, \phi, z)}{\tau_2 W_{pl}(r, \phi, z) + \tau_2 W_{SE}(r, \phi, z) + \tau_2 W_{SA}(r, \phi, z) + 1} \quad (2.32)$$

onde “*pl*” significa absorção do bombeio, “*SA*” absorção estimulada do sinal e “*SE*” emissão estimulada do sinal, e $\tau_{21} = \tau_2$, para simplificar. As taxas de transição, em coordenadas cilíndricas, são dadas, em termos das seções transversais de absorção e de emissão por [5] :

$$W_{SA}(r, \phi, z) = \frac{\sigma_a(\lambda_s) I_s}{h\nu_s} + \frac{\sigma_a(\lambda_s)}{h\nu_s} (I_{ASE}^+ + I_{ASE}^-) \quad (2.33)$$

$$W_{SE}(r, \phi, z) = \frac{\sigma_e(\lambda_s) I_s}{h\nu_s} + \frac{\sigma_e(\lambda_s)}{h\nu_s} (I_{ASE}^+ + I_{ASE}^-) \quad (2.34)$$

$$W_{pl}(r, \phi, z) = \frac{\sigma_p(\lambda_p) I_p}{h\nu_p} \quad (2.35)$$

onde I_{ASE}^+ é a intensidade do ruído ASE^+ , I_{ASE}^- é a intensidade do ruído ASE^- , e, ν_s e ν_p são as frequências de sinal e de bombeio, respectivamente [em Hz].

Usando (2.23), (2.24), (2.33), (2.34) e (2.35), e definindo os seguintes parâmetros :

$$\beta = \left(\frac{\sigma_p \tau_2 P_p(0)}{A h \nu_p} \right); \beta_e = \left(\frac{\sigma_e \tau_2 P_s(0)}{A h \nu_s} \right); \quad (2.36)$$

$$\beta_a = \left(\frac{\sigma_a \tau_2 P_s(0)}{A h \nu_s} \right); I_{ASE} = I_{ASE}^+ + I_{ASE}^-$$

a Eq. (2.32) fica na forma :

$$x(r, \phi, z) = \frac{A\beta p(z)r_n(r) \cos^2(n\phi) + A\beta_a s(z)s_0(r) + A\left(\frac{\sigma_a \tau_2}{A\hbar\nu_s}\right) I_{ASE}}{1 + A\beta p(z)r_n(r) \cos^2(n\phi) + A(\beta_a + \beta_e)s(z)s_0(r) + A\left(\frac{(\sigma_a + \sigma_e)\tau_2}{A\hbar\nu_s}\right) I_{ASE}} \quad (2.37)$$

Voltando à análise da integral, vamos considerar a intensidade do bombeio, dada por (2.28). Podemos escrever :

$$\begin{aligned} \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \frac{dI_p}{dz} r dr d\phi &= \int_0^\infty \int_0^{2\pi} P_p(0) p_n(r, \phi) \frac{dp(z)}{dz} r dr d\phi \\ &= P_p(0) \frac{dp(z)}{dz} \int_0^\infty \int_0^{2\pi} p_n(r, \phi) r dr d\phi \end{aligned} \quad (2.38)$$

Lembrando que $p_n(r, \phi)$ foi definida como normalizada sobre a seção transversal da fibra, temos :

$$\int_0^\infty \int_0^{2\pi} p_n(r, \phi) r dr d\phi = 1 \quad (2.39)$$

Então, usando (2.39) em (2.38), temos :

$$\int_0^\infty \int_0^{2\pi} \frac{dI_p}{dz} r dr d\phi = P_p(0) \frac{dp(z)}{dz} \quad (2.40)$$

Portanto :

$$\frac{dp(z)}{dz} = \frac{1}{P_p(0)} \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \frac{dI_p}{dz} r dr d\phi \quad (2.41)$$

Novamente, usando (2.30), temos :

$$\frac{dp(z)}{dz} = -\frac{1}{P_p(0)} \int_0^\infty \int_0^{2\pi} (\sigma_p N_1 + \sigma'_p N_2) I_p r dr d\phi \quad (2.42)$$

Usando as definições feitas em (2.21) e (2.22), e usando (2.28), podemos escrever :

$$\frac{dp(z)}{dz} = -\int_0^\infty \int_0^{2\pi} N_0(r) \sigma_p \left[(1 - x(r, \phi, z)) + \frac{\sigma'_p}{\sigma_p} x(r, \phi, z) \right] p_n(r, \phi) p(z) r dr d\phi \quad (2.43)$$

Considerando a equação diferencial para o bombeio normalizado $p(z)$, dada por (2.43), e incluindo a perda intrínseca do material no comprimento de onda do bombeio, $\alpha_p(\lambda_p)$, temos :

$$\frac{dp(z)}{dz} = (-\alpha_p(\lambda_p) + g_p(z))p(z) \quad (2.44)$$

onde $g_p(z)$ é o coeficiente de ganho do bombeio, e, segundo (2.43) e (2.44), podemos deduzir que :

$$g_p(z) = -D \int_0^a \int_0^{2\pi} p_n(r) (\sigma_p N_1 + \sigma'_p N_2) r dr d\phi \quad (2.45)$$

Deve-se usar o $D = 1$ para bombeio co-propagante com o sinal e $D = -1$ para bombeio contra-propagante [5].

Vamos definir a função $\Phi_n(r, z)$ como abaixo, ou seja, usando as Eqs. (2.45) e (2.23), e integrando em ϕ , temos :

$$\begin{aligned} \Phi_n(r, z) &= \int_0^{2\pi} r_n(r) \cos^2(n\phi) (\sigma_p N_0(1-x) + \sigma'_p N_0 x) d\phi \\ &= r_n(r) \int_0^{2\pi} \cos^2(n\phi) (\sigma_p N_0 + (\sigma'_p - \sigma_p) N_0 x) d\phi \end{aligned}$$

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

Então, nosso coeficiente de ganho fica :

$$g_p(z) = -D \int_0^a \Phi_n(r, z) r dr$$

A análise da evolução do sinal é semelhante à do bombeio. Logo podemos concluir que, a partir de (2.31), chegamos a :

$$\frac{ds(z)}{dz} = (-\alpha_s(\lambda_s) + g_s(z))s(z) \quad (2.47)$$

Novamente, α_s é a perda intrínseca do material na frequência do sinal. Então :

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

onde :

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

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

Para simplificar, podemos usar $N_0(r) = N_0 \cdot per(r)$; então, a Eq. (2.50) fica :

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

Usando a expressão de $a(z)$, de (2.49), podemos escrever :

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

onde :

$$\alpha_a = N_0 \sigma_a \quad (2.53)$$

$$\alpha_e = N_0 \sigma_e \quad (2.54)$$

$$\eta_s = 2\pi \int_0^a per(r) s_0(r) r dr \quad (2.55)$$

Assim, o coeficiente de ganho para o sinal fica :

$$g_s(z) = a(z) \left(1 + \frac{\alpha_a}{\alpha_e} \right) - \alpha_a \eta_s \quad (2.56)$$

Para terminar a análise do modelo, só falta mostrar a evolução do ruído gerado por emissão espontânea, chamado ASE (Emissão Espontânea Amplificada), que também participa do processo, gerando um ruído no sistema e que se soma ao sinal óptico na saída do amplificador. O processo de emissão espontânea, como já foi discutido, gera um ruído, que, diferentemente do sinal, é de faixa larga, multidirecional e sem polarização definida. Pode-se tentar diminuí-lo na saída da fibra ativa, através do uso de um filtro óptico passa-faixa estreito ou utilizando

um polarizador, ou, ainda, a junção desses dois. A ASE gerada pode ir para qualquer direção e, por isso, definimos ASE^+ como o ruído que vai no sentido co-propagante com o sinal e ASE^- para aquele no sentido contra-propagante.

A evolução da ASE, incluindo também a perda intrínseca no material, α_s , pode ser dada por [5] :

$$\frac{dp_{ASE}^{\pm}(z)}{dz} = \pm[-\alpha_s(\lambda_s) + g_s(z)]p_{ASE}^{\pm}(z) \pm Bh\nu_s a(z) \quad (2.57)$$

onde h é a constante de Planck e B a faixa equivalente de emissão espontânea, obtida experimentalmente para a fibra dopada.

A figura de ruído F está relacionada com a intensidade espectral da ASE e com o ganho na fibra ativa, podendo ser expressa como [5] :

$$F = \frac{RSR_{entrada}}{RSR_{saída}} \quad (2.58)$$

onde RSR é a Relação Sinal Ruído.

Considera-se que a variância da potência do sinal pode ser calculada resolvendo a seguinte expressão [6] :

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

onde P_s é a potência do sinal, obtida como solução de (2.47), e onde a e b são definidos em (2.49) e (2.51), respectivamente.

Tomando como referência o caso ideal de um sinal coerente de entrada ($V_s(0) = P_s(0)$), podemos escrever F como :

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

Agora, usando (2.47), (2.59), e (2.60), F pode ser calculada como :

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

onde $G(z)$ é o ganho ao longo da fibra ativa.

Simplificando mais ainda, podemos manipular (2.61), usando (2.52), obtendo :

$$\frac{d(F-1)}{dz} = \frac{a(v_s, z) \left(1 - \frac{\alpha_a}{\alpha_e}\right) + \alpha_a \eta_s}{G(z)} \quad (2.62)$$

A quantidade $(F-1)$ pode ser vista como um excesso de ruído (igual a zero se não houver ruído).

Para obter a evolução da intensidade do sinal, do bombeio e dos ruídos ASE, devemos resolver uma equação diferencial da seguinte forma :

$$\frac{dy(z)}{dz} = f(z)y(z) \quad (2.63)$$

que possui solução na forma :

$$y(z) = e^{\int f(z) dz} \quad (2.64)$$

A expressão (2.62) é facilmente resolvida numericamente, considerando que o excesso de ruído (ASE^+ ou ASE^-) no início da trajetória correspondente ($z = 0$ ou $z = L$) é zero.

As equações acima são usadas (na forma discretizada) para fazer a simulação do amplificador usando o software **Mathematica**, cujos resultados e listagem dos programas serão apresentados posteriormente (Apêndice A).

Capítulo 3

Topologias para o Amplificador Óptico a Fibra Dopada com Érbio

3.1 Introdução

Em busca de melhores desempenhos para o amplificador óptico, mudanças e adaptações vêm sendo feitas na fibra e no circuito associado. Mudanças na fibra significa o uso de dopagem e co-dopagem com materiais que proporcionem todos os tipos de vantagens para o resultado final do sistema óptico. Estas vantagens vão do aumento do ganho ao alargamento da faixa de frequência de operação. As mudanças no circuito, que é o interesse central deste trabalho, visa um aumento no ganho do sinal e uma diminuição do ruído, e estas mudanças serão feitas inserindo componentes ópticos adicionais.

Vamos introduzir o conceito de amplificadores bidirecionais e amplificadores refletivos [4]. Amplificadores bidirecionais são aqueles onde os sinais que requerem amplificação podem entrar na fibra por qualquer dos dois lados e podem se propagar nos dois sentidos, e amplificadores refletivos são aqueles onde os sinais entram por um lado da fibra e são refletidos do outro lado, retornando novamente pela fibra dopada. Ambos os casos vão ser detalhados a seguir, mostrando suas vantagens e desvantagens.

3.2 Configurações de Amplificadores a Fibra

Depois de entendido o funcionamento do amplificador a fibra dopada com érbio vamos falar de suas principais aplicações. A Figura 3.1 ilustra o amplificador óptico convencional a fibra, mostrando seus componentes fundamentais. Em algum ponto do canal de transmissão, onde o sinal precisa ser restaurado, um circuito como este é inserido; nele temos : a fibra dopada (alguns metros), o laser de bombeio (para o érbio o comprimento de onda prático é

980 nm ou 1480 nm), acopladores de entrada e de saída da fibra dopada (multiplexadores), para o bombeio poder entrar e sair do circuito, e um isolador para impedir circulação de sinais indesejados. Esta configuração pode ser ligeiramente modificada invertendo o sentido de propagação do bombeio, ou seja, o laser de bombeio é colocado no final da fibra e seu sinal propaga-se no sentido contra-propagante (com relação ao sinal), ou, ainda, pode-se ter sinais de bombeio nos dois sentidos da fibra, simultaneamente, situação chamada de bombeio bidirecional.

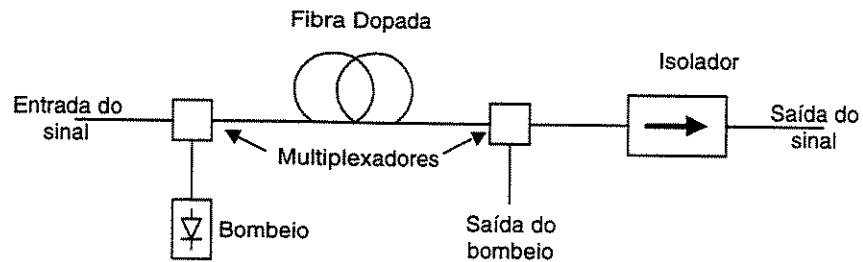


Figura 3.1: Esquema do Amplificador Óptico Convencional a Fibra.

Existem diferenças no comportamento dos circuitos com bombeio co-propagante e contra-propagante, havendo resultados diferentes para ganho e ruído. Por exemplo, em [5] são feitas simulações mostrando que o amplificador com bombeio contra-propagante apresenta maior ganho e maior figura de ruído em relação ao caso co-propagante. A situação de bombeio bidirecional visa um maior aproveitamento do potencial da fibra, pois engloba os dois tipos de bombeio juntos em uma mesma fibra.

A partir deste conceito do amplificador com bombeio bidirecional é que podemos sugerir o uso de outras configurações visando um maior ganho no sistema, como é o caso do amplificador refletivo. Neste tipo de amplificador, um dispositivo de reflexão é colocado no fim da fibra dopada para refletir o bombeio, o sinal ou ambos.

A Fig. 3.2 ilustra os esquemas para duas configurações ilustrando amplificadores refletivos; na primeira o bombeio é refletido no fim da fibra e, na segunda, ambos, o sinal e o bombeio, voltam para a fibra. Neste último caso, foi inserido um dispositivo, chamado OC (*optical circulator*), que é o circulador óptico utilizado para recuperar o sinal de saída.

Antes de estudarmos com detalhes estes e outros circuitos, vamos primeiramente falar sobre os dispositivos que devem ser inseridos no circuito para conseguirmos construir estas novas configurações para o amplificador a fibra.

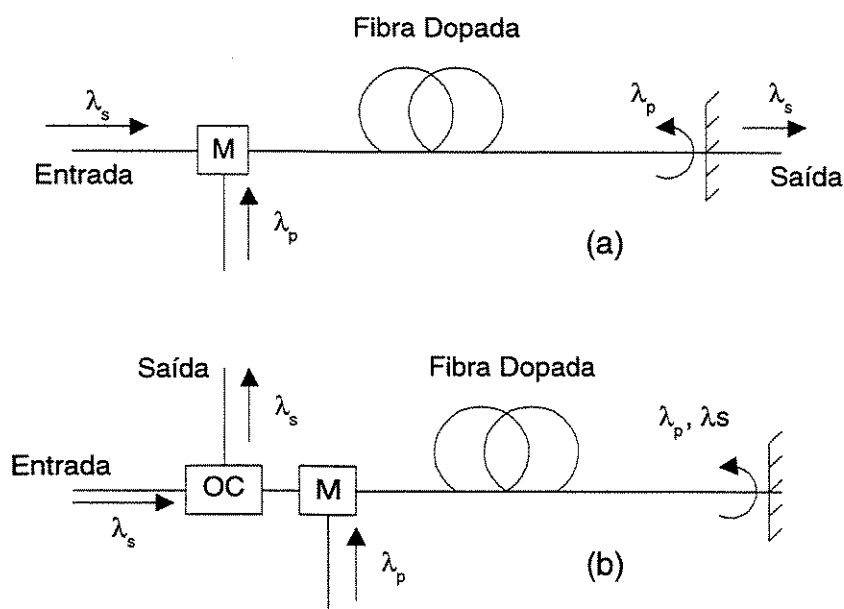


Figura 3.2: Configurações para Amplificador Refletivo.

3.3 Alguns Dispositivos Ópticos

Vamos apresentar, nesta seção, características de alguns dispositivos que podem ser acoplados à nossa fibra dopada para a construção de diferentes circuitos. Basicamente, vamos comentar sobre o uso de espelhos refletores, multiplexadores, isoladores, circuladores e filtros.

3.3.1 Espelhos

A tecnologia de espelhos ópticos é bastante desenvolvida, devido ao estudo dos lasers. A Fig. 3.3 ilustra um laser a fibra. Nela vemos dois espelhos, que garantem o funcionamento adequado do laser. Neste caso, o espelho 1 deve deixar o bombeio entrar, mas deve promover inúmeras reflexões na fibra dopada, enquanto que o espelho 2 tem que ser um pouco transparente para o comprimento de onda do laser, mas deve ter alta refletividade para o bombeio, ou seja, as refletividades dos espelhos nos comprimentos de onda do bombeio e do laser devem ser tais que maximizem a potência de saída do laser.

Existem algumas maneiras de se fabricar um dispositivo para reflexão de sinal na fibra. Primeiramente, vamos falar de espelhos que são montados nas extremidades da fibra. Estes dispositivos são construídos evaporando várias camadas de materiais dielétricos sobre um substrato, com estes dielétricos depositados de tal maneira que temos um material com índice de refração alto alternado com um de índice de refração baixo e com cada camada

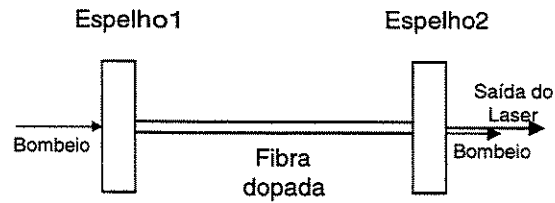


Figura 3.3: Esquema de um Laser a Fibra

tendo o comprimento de um quarto de comprimento de onda. Este sistema, para uso prático, tem várias desvantagens, a maior de todas sendo a dificuldade de montagem, pois a fibra deve estar bem alinhada, a 90° , e bem próxima ao espelho; outra desvantagem é que, como queremos que um sinal passe e o outro seja refletido, o substrato deve ser bastante fino, o que tornaria o dispositivo difícil de ser manuseado praticamente, e, finalmente, o material de que é feito o espelho, tanto o substrato quanto as camadas dielétricas, devem proporcionar pouca perda intrínseca.

Podemos citar, também, uma forma de se refletir o sinal, apenas evaporando na extremidade da fibra, algumas camadas de materias refletivos. Uma vantagem deste procedimento é o custo de fabricação, pois várias fibras podem ser processadas ao mesmo tempo, e uma desvantagem seria a dificuldade de manuseamento, mas, mesmo assim, para sistemas de transmissão atuais este dispositivo vem a ser viável [3].

É possível, também, gravar variações periódicas no núcleo da fibra óptica, formando grades de Bragg, que podem atuar como bons espelhos em determinados comprimentos de onda [14]. Esta é a tecnologia mais atual para uso em amplificadores ópticos a fibra.

3.3.2 Multiplexadores

O uso de acopladores ópticos do tipo WDM (*Wavelength Division Multiplexing*), se faz necessário quando estamos trabalhando com mais de um sinal, com diferentes comprimentos de onda. A função deste multiplexador é captar estes sinais e colocá-los juntos numa mesma fibra, garantindo a integridade dos sinais neste processo. A Fig. 3.4 ilustra este dispositivo.

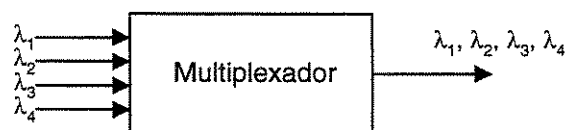


Figura 3.4: Multiplexador

Para o multiplexador temos algumas características básicas relacionadas ao desempenho do sistema. Algumas delas são : a perda de inserção e a diafonia (*cross talk*). A perda de inserção é a quantidade de perda de potência que ocorre devido à inserção do dispositivo WDM no sistema; isto inclui as perdas nos pontos de conexão e a perda intrínseca do dispositivo. Na prática, podem ser toleradas perdas de até alguns decibéis [10]. A diafonia se refere à quantidade de sinal acoplado de um canal para outro.

Outra característica importante que podemos citar é a capacidade de suportar a largura de linha da fonte utilizada. Ou seja, se um laser de diodo for usado como nossa fonte, sua largura de linha é de apenas algumas dezenas de nanômetros, mas para um LED usado como fonte, nosso dispositivo deve suportar uma largura de linha da fonte que é umas 10 a 20 vezes maior que a do laser.

3.3.3 Isoladores

A principal função de um isolador é permitir a transmissão de sinal em apenas um sentido e bloquear no sentido oposto. Eles são usados geralmente na frente de lasers e amplificadores ópticos, para evitar que sinais refletidos entrem em seus terminais e prejudiquem seu desempenho. Suas principais características são a perda de inserção e a isolação.

A perda de inserção é a perda do sinal na direção de propagação permitida; ela deve ser a menor possível; valores típicos de perdas de inserção estão em torno de 1 dB. A isolação é a perda do sinal na direção contrária à propagação permitida, e tem, como valores típicos, algo entre 40 a 50 dB [9].

3.3.4 Circuladores

Os circuladores ópticos têm o mesmo princípio de operação que os circuladores para sinais de microondas. Podemos ter dispositivos de três ou quatro portas, como mostrado na Fig. 3.5. Num circulador de três portas ideal, o sinal que entra na porta 1 sai apenas na porta 2, o que entra na porta 2 sai apenas na porta 3 e o que entra na porta 3 sai apenas na porta 1. Todas as portas possuem isolação óptica, e o dispositivo pode ser visto como três isoladores estrategicamente arrumados (para um dispositivo de três portas), com as mesmas características de um isolador óptico. Podem ser construídos com polarizadores, como indicado em [9], ou, até mesmo, com prismas, como em [15].

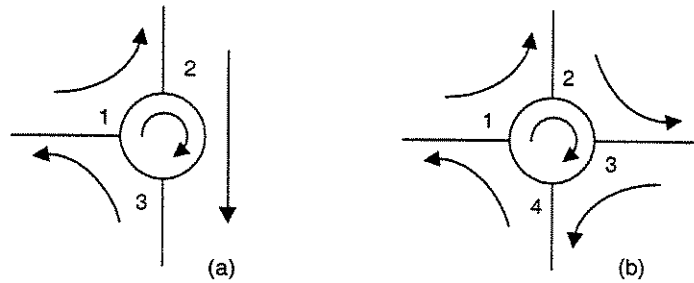


Figura 3.5: Circuladores : (a) de três portas e (b) de quatro portas.

3.3.5 Filtros

Os filtros ópticos são dispositivos que selecionam (deixam passar) um comprimento de onda e rejeitam os outros. A Fig. 3.6 mostra um tipo de filtro óptico.



Figura 3.6: Filtro óptico simples (rejeição por reflexão)

Um bom filtro óptico deve ter, dentre outras características, baixa perda de inserção (para o sinal a ser transmitido), a perda deve ser independente da polarização dos sinais de entrada e a banda passante do filtro deve ser insensível a variações na temperatura ambiente [9].

Existem vários tipos de filtros, alguns feitos na própria fibra, como o filtro de Bragg, outros feitos com camadas de elementos dielétricos, como o filtro Fabry-Perot, por exemplo. Alguns filtros refletem os comprimentos de onda rejeitados, outros não refletem (absorvem ou espalham para fora da fibra); uns deixam passar apenas um comprimento de onda (tipo passa-faixa), outros deixam passar todos e rejeitam apenas um (tipo rejeita-faixa). Enfim, a tecnologia vem avançando, e existem vários tipos de dispositivos comerciais de boa qualidade [9], [16].

3.4 Configurações Otimizadas para o Amplificador

Como já foi mencionado, temos hoje várias configurações que permitem aumentar o desempenho do amplificador. Temos, por exemplo, para aumentar a capacidade da transmissão de uma fibra óptica, o conceito de amplificador bidirecional [11], como ilustrado na Fig. 3.7, que pode proporcionar interatividade e facilidade no monitoramento do sistema.

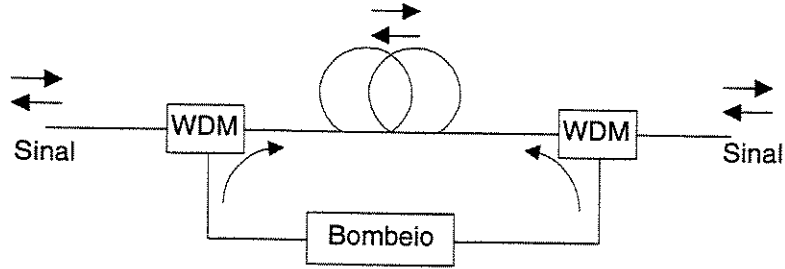


Figura 3.7: Esquema para um amplificador bidirecional.

Para comunicação iterativa dos sistemas usuais temos que usar um par de fibras, usando transmissão unidirecional com isoladores. Para cada um dos enlaces de transmissão (cada fibra) temos uma certa quantidade de dispositivos, e, para uma transmissão por um par de fibras (comunicação duplex), temos o dobro de componentes sendo utilizados, além do monitoramento do sistema poder ficar mais caro com duas fibras independentes. O amplificador bidirecional consiste em uma fibra dopada montada, sem a presença de isoladores, com o sinal de informação podendo ser inserido por qualquer dos dois lados da fibra.

Mas, em nosso trabalho, vamos apenas tratar do amplificador refletivo, que tem como principal característica o aumento do ganho com relação à configuração convencional. Um amplificador refletivo é o que reaproveita, por meio de reflexão, pelo menos um de seus sinais (informação e/ou bombeio), usando melhor a alta capacidade da fibra dopada, ou atingindo resultados mais adequados para pequenos sinais. Nosso estudo foi feito simulando vários amplificadores refletivos e destacando as diferenças entre eles, como suas vantagens e desvantagens. A seguir, vamos ilustrar os esquemas das configurações analisadas. No próximo capítulo faremos as simulações de todas as configurações aqui apresentadas.

– Configuração 1 : Amplificador convencional

Nossa primeira configuração é do amplificador normal, sem inclusão de nenhum dispositivo extra, e sem uso de reflexão. Isto foi feito para servir de base de comparação para todos os outros tipos de amplificadores. A Fig. 3.8 ilustra um possível esquema para esta primeira configuração.

– Configuração 2 : Amplificador com reflexão de bombeio

A partir desta configuração, o amplificador passa a ser do tipo refletivo. Nossa primeira análise é feita colocando uma parede refletora apenas para o bombeio, reutilizando esse bombeio, que seria jogado fora depois de passar pela fibra apenas uma vez. Para isso, a

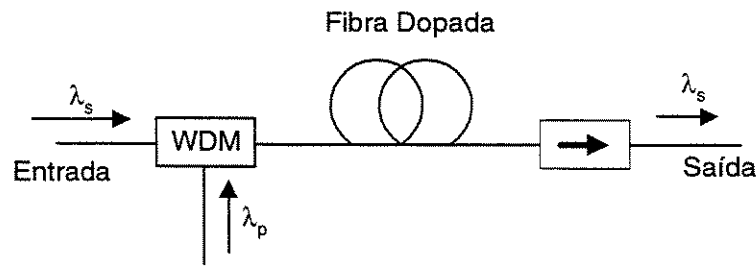


Figura 3.8: Diagrama esquemático para a Configuração 1 (Amplificador básico unidirecional com bombeio co-propagante).

única alteração em nosso esquema é a inserção de um dispositivo apropriado para refletir somente o bombeio e deixar passar o sinal, como na Fig. 3.9. Este dispositivo refletor pode ser, por exemplo, um filtro de Bragg, como em [6]. Esta é a configuração mais usual na literatura [4], [6] e [13]. O isolador, no ramo de bombeio, evita que o bombeio refletido danifique o laser de bombeio.

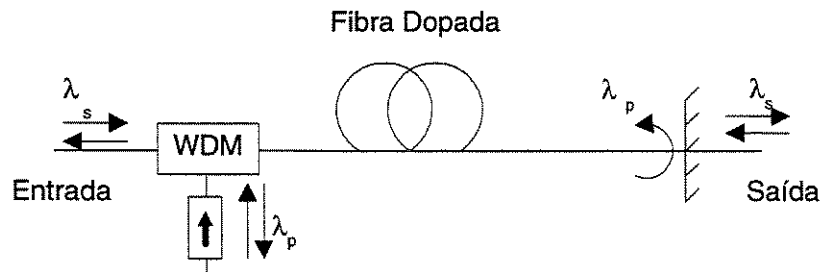


Figura 3.9: Diagrama esquemático para a Configuração 2 (Bidirecional).

– Configuração 3 : Amplificador com reflexão de sinal e ASE.

Seguindo o mesmo padrão, o próximo passo seria ver o que acontece com a reflexão apenas do sinal [4]. Para isso, a mudança no nosso circuito é o uso de um dispositivo que reflita a frequência de sinal e deixe passar o bombeio, além de um circulador óptico para separar o sinal de saída, como ilustrado na Fig. 3.10. Porém, não podemos nos esquecer que em torno da frequência de sinal temos a transmissão do ruído ASE; nesta configuração, da maneira como foram colocados os dispositivos, não temos como eliminar o ruído presente na reflexão; logo, isso deve ser levado em consideração na simulação a ser feita.

– Configuração 4 : amplificador com reflexão de bombeio, sinal e ASE.

Esta configuração é mais simples que a anterior, pois reflete todos os sinais no final da fibra dopada, fazendo com que todos voltem ao início da fibra [12]. A maneira mais fácil

de interpretar esta configuração seria uma configuração normal, mas com a fibra dopada medindo o dobro de seu comprimento. A construção deste esquema é similar ao anterior, mudando apenas o fato que a parede refletora não precisa mais selecionar um comprimento de onda e sim refletir todos os sinais. O esquema está ilustrado na Fig. 3.11. O circulador separa sinal de saída, na entrada.

– Configuração 5 : Amplificador com reflexão de bombeio e sinal.

Esta nossa última configuração tende a melhorar a anterior, por evitar que o ruído ASE seja refletido e seja fortemente amplificado na volta. Para isso, foi colocado um filtro óptico passa-faixa estreito que deixa passar o sinal e absorve o resto dos sinais nele incidentes [12]. Apesar de requerer poucas alterações com relação à configuração anterior, este esquema fica bem mais caro, sendo preciso inserir, além do filtro, outro multiplexador, para resgatar o sinal de bombeio, e outra parede refletora de bombeio, como ilustrado na Fig. 3.12.

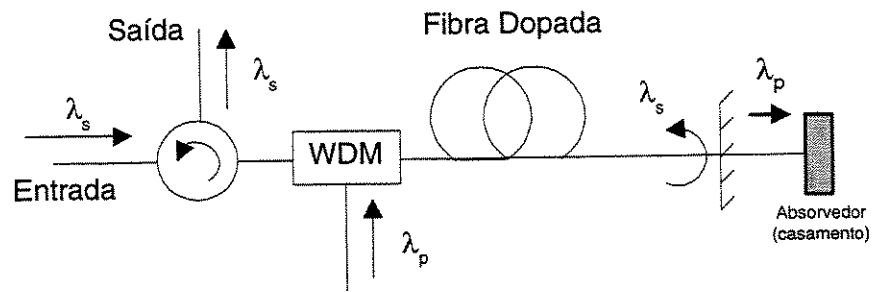


Figura 3.10: Diagrama esquemático para a Configuração 3 (Unidirecional).

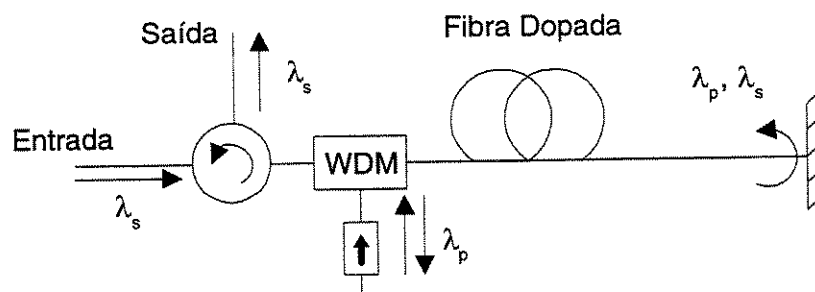


Figura 3.11: Diagrama esquemático para a Configuração 4 (Unidirecional).

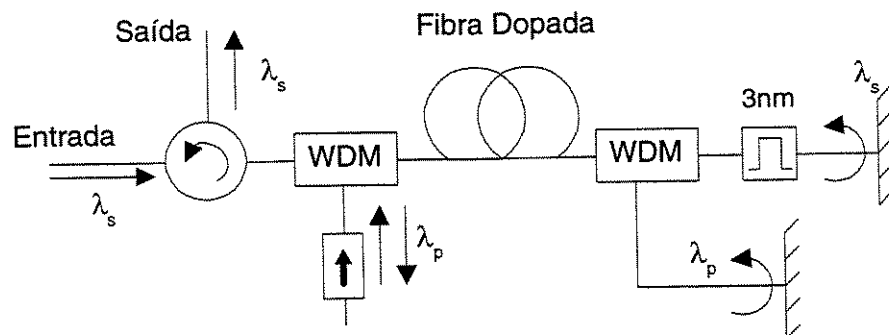


Figura 3.12: Diagrama esquemático para a Configuração 5 (Unidirecional).

Capítulo 4

Simulações Computacionais

4.1 Introdução

Este capítulo apresenta resultados de simulações numéricas para todas as configurações de amplificador óptico mostradas no capítulo anterior, discutindo as vantagens e desvantagens de cada uma. São apresentadas, também, algumas simulações espectrais.

Os programas para efetuar as simulações foram implementados utilizando a plataforma *Mathematica*, que é uma excelente ferramenta para cálculos numéricos. Ela é constituída de dois pacotes principais e várias bibliotecas. Os pacotes principais são responsáveis pela parte operacional, com o usuário interagindo com o pacote chamado *Front End*; nele é feita a apresentação, a edição do texto, a disponibilização de todos os comandos e a apresentação de resultados, seja em termos de números, tabelas ou gráficos. O outro pacote, o *Kernel*, é responsável pelo processamento matemático e execução dos comandos.

4.2 Simplificações Utilizadas

A análise teórica usada foi detalhada no Capítulo 2, considerando que as funções são bem comportadas ao longo da fibra e que, num comprimento incremental Δz , os termos $a(z)$, $b(z)$, $g_s(z)$ e $g_p(z)$ são, aproximadamente, constantes no intervalo $[z, z + \Delta z]$. Portanto, em cada trecho, conhecendo-se o sinal de entrada e a configuração do sistema, calculamos o sinal de saída, e este será o sinal de entrada do próximo trecho a ser analisado, e assim percorremos toda a fibra.

Então, se nossa fibra tem comprimento L , podemos dividi-la em N pedaços de tamanho $\Delta z = L/N$. Para cada Δz calculamos as funções $a(z)$, $b(z)$, $g_s(z)$ e $g_p(z)$ e resolvemos as respectivas equações diferenciais no intervalo correspondente, usando, como condições de contorno, os valores dos sinais no final do intervalo anterior e as condições de contorno

Parâmetro	Descrição	Valor
$a(\mu m)$	Raio do Núcleo da Fibra	1,5
AN	Abertura Numérica	0,2
$\lambda_s (nm)$	Comprimento de Onda do Sinal	1532
$\sigma_{s,e} (cm^2)$	Seção Transversal de Emissão do Sinal	$5,2 \times 10^{-21}$
$\sigma_{s,a} (cm^2)$	Seção Transversal de Absorção do Sinal	$5,5 \times 10^{-21}$
$\lambda_p (nm)$	Comprimento de Onda do Laser de Bombeio	980
$\sigma_{ESA} (cm^2)$	Seção Transversal de Absorção do Estado Excitado	0
$\sigma_{p,a} (cm^2)$	Seção Transversal de Absorção do Bombeio	$2,1 \times 10^{-21}$
$\tau_2 (ms)$	Tempo de Decaimento Espontâneo	10,5
$N_0 (cm^{-3})$	Concentração de Dopantes por Unidade de Volume	$1,0 \times 10^{18}$

Tabela 4.1: Parâmetros da fibra dopada com érbio utilizada nas simulações.

iniciais, como especificadas em [5] :

$$\begin{aligned}
p(0) &= 1 \\
s(0) &= 1 \\
p_{ASE}^+(0) &= 0 \\
p_{ASE}^-(L) &= 0
\end{aligned} \tag{4.1}$$

Com isso, conseguimos simular a evolução, ao longo da fibra dopada, do sinal, bombeio, ASE⁺, ASE⁻ e da figura de ruído. O programa está bem detalhado em [5].

Os dados da fibra utilizada são entregues ao programa principal através de um programa auxiliar ; neste programa entram os principais parâmetros da fibra e, através deles, calculamos outros que são necessários para a simulação. A fibra utilizada tem as características apresentadas na Tabela 4.1.

4.3 Desempenho do Amplificador

Nesta seção são apresentadas simulações para as várias configurações citadas no capítulo anterior. São mostradas características dos circuitos, assim como as vantagens e desvantagens associadas ao uso de cada um.

4.4 Configuração 1

O programa entrega dados que permitem formar curvas como mostradas na Fig. 4.1. Nela podemos ver a evolução do sinal, do bombeio, dos dois sinais de ASE e da figura de ruído ao longo da fibra ativa. A simulação feita para levantar estas curvas levou em consideração um bombeio co-propagante e um comprimento da fibra de 14 m; este comprimento foi

escolhido por comodidade, pois muitas das referências consultadas usam este comprimento. Poderíamos ter usado, sem problemas, qualquer comprimento abaixo do comprimento ótimo (L_{opt}). Explicando : para cada potência dada de bombeio temos um comprimento ótimo da fibra, aquele que dá o maior ganho ou um maior aproveitamento das características da fibra. A Fig. 4.2 ilustra como seria obtido o L_{opt} para uma certa potência de bombeio. Várias outras observações serão feitas, posteriormente, a respeito destas curvas de evolução e das características do funcionamento do amplificador.

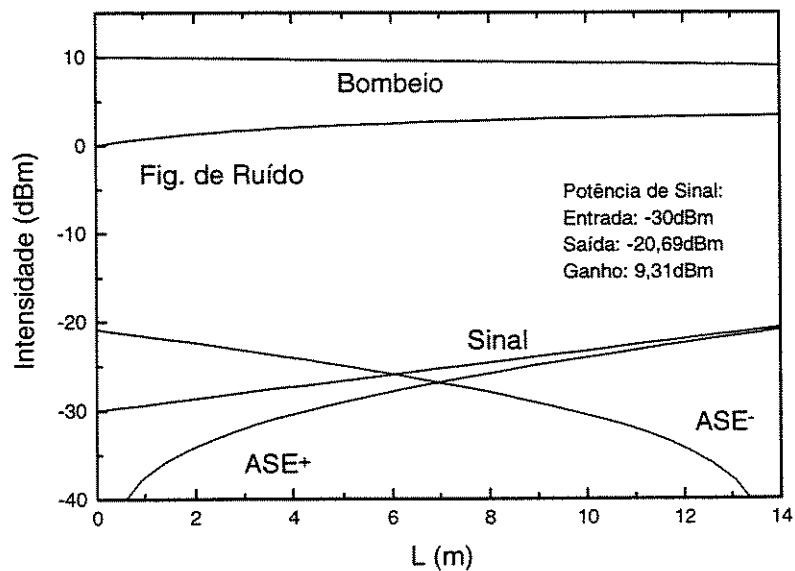


Figura 4.1: Curvas de evolução do sinal, bombeio, ASE⁺, ASE⁻ e figura de ruído.

Primeiro vamos comentar sobre o ganho. O ganho do sinal depende de muitos fatores, um deles é a potência de entrada de bombeio, pois, entrando com uma potência maior de bombeio, o ganho do sinal é maior, quando medido na saída da fibra. Isso é esperado, se lembrarmos que, com um bombeio maior, mais elétrons irão para um nível mais alto de energia, resultando em mais emissão de fótons estimulados, fazendo com que o sinal de saída seja maior. A Fig. 4.3 ilustra esta propriedade.

O ganho também depende da potência de sinal de entrada na fibra. Em princípio, para um amplificador ideal, temos $P_{out} = G \times P_{in}$, onde G é constante. Mas, em diversas simulações deparamos com um ganho do sinal maior para uma potência de sinal de entrada menor, mantendo todos os outros parâmetros constantes. Nestas condições, o que ocorre com o

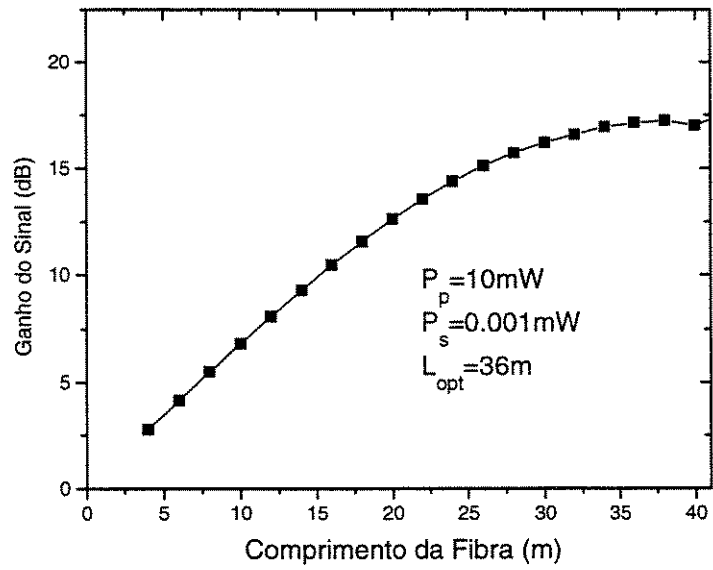


Figura 4.2: Comportamento numérico do Ganho do Sinal versus comprimento ao longo da fibra dopada.

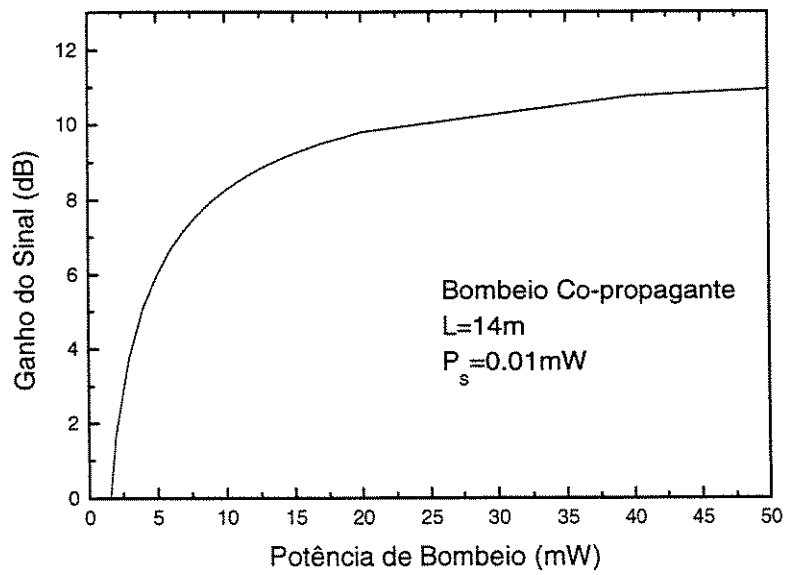


Figura 4.3: Curva de ganho versus potência de entrada de bombeio.

amplificador é uma saturação do ganho, ou seja, a partir de um certo valor de potência de sinal na entrada do amplificador, o ganho perde suas propriedades lineares. Essas relações lineares do ganho do amplificador só podem ser consideradas para pequenos sinais. De acordo com [4], potências de sinal maiores que -30 dBm, ou seja, $1 \mu\text{W}$, já podem acarretar uma diminuição detectável no ganho. A Fig. 4.4 ilustra essa característica.

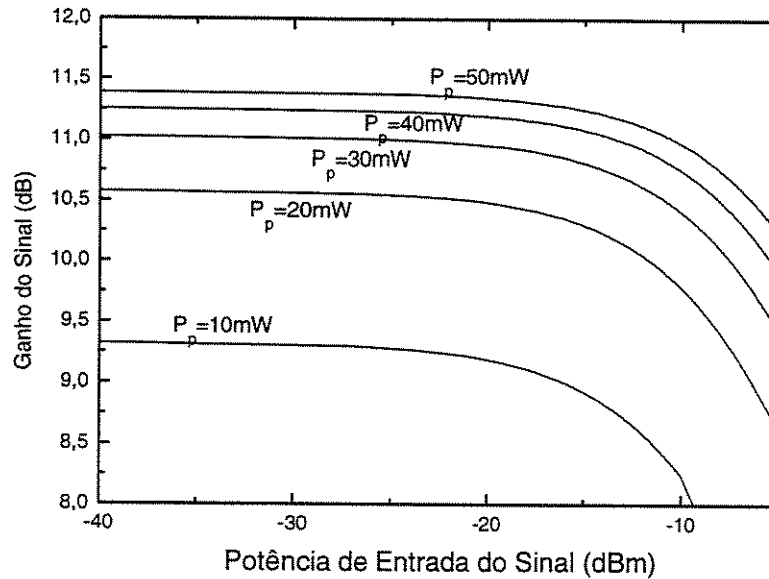


Figura 4.4: Variação do ganho do sinal com a potência de entrada, para $L=14\text{m}$.

Outro fato observado é que a configuração com bombeio contra-propagante apresenta sempre um ganho de sinal um pouco maior que na configuração co-propagante. As curvas mostradas nas Figs. 4.5 e 4.6 servem para ilustrar esta característica.

4.5 Configuração 2

A partir da Configuração 2 todos os outros circuitos a serem apresentados usam uma parede refletora para bloquear um ou vários sinais. Na simulação, tanto a inserção da parede refletora, quanto a dos outros dispositivos, é feita sem levar em consideração as perdas intrínsecas de cada dispositivo e, por isso, todas as simulações, a partir de agora, ilustram o que ocorre na nova configuração, mas em condições ideais.

A parede refletora, no entanto, foi simulada de forma que podemos variar R , sendo que $R=0$ corresponde à resposta do amplificador na configuração simples. A Fig. 4.7 mostra a

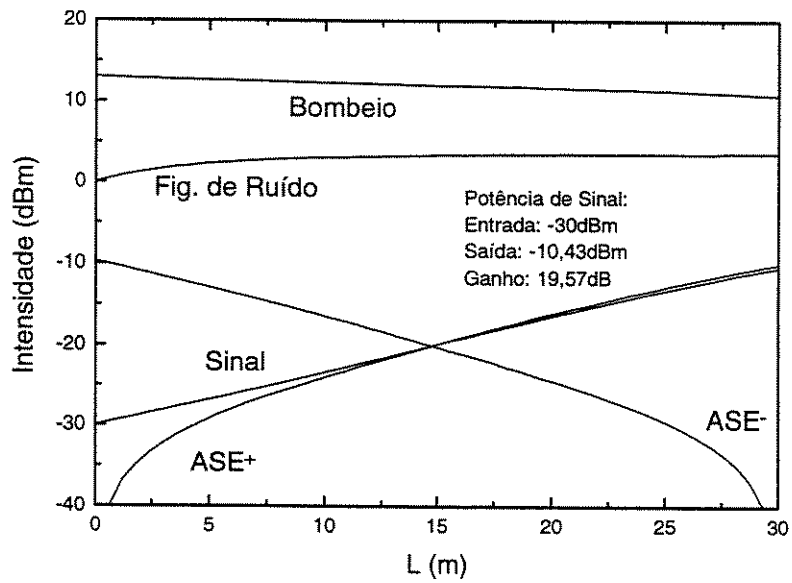


Figura 4.5: Desempenho do Amplificador com Bombeio Co-propagante.

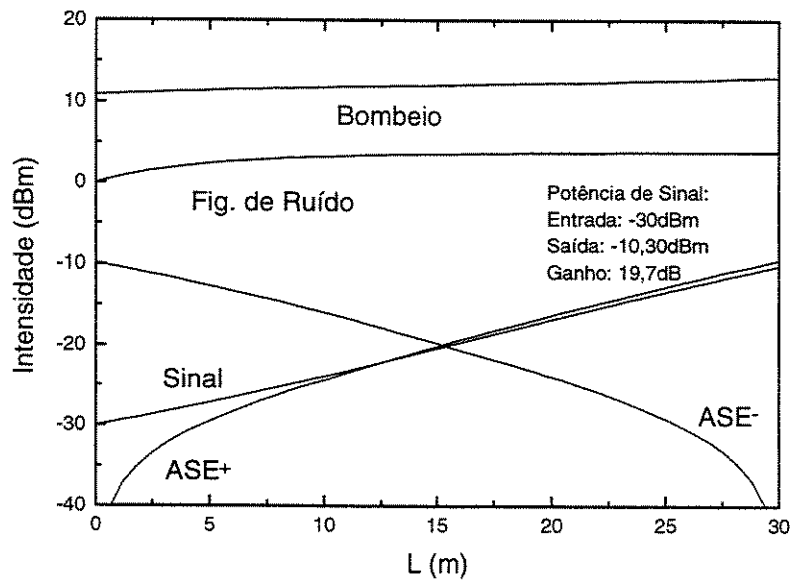


Figura 4.6: Desempenho do Amplificador com Bombeio Contra-propagante.

evolução do ganho de um amplificador, quando variamos o coeficiente de reflexão de potência do espelho, neste caso para o sinal de bombeio.

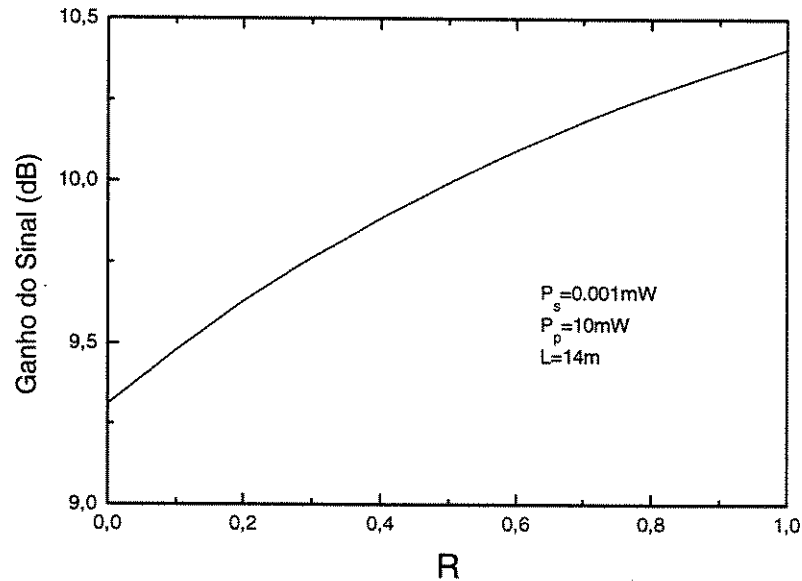


Figura 4.7: Evolução do Ganho do Sinal versus Coeficiente de Reflexão.

Como é esperado, o ganho desta configuração é maior, já que temos mais bombeio na fibra. Essa configuração se assemelha ao amplificador com bombeio bidirecional, com a vantagem da fonte de bombeio entregar um sinal total menor para conseguir o mesmo efeito.

Ao simular o circuito da Configuração 2 percebemos que o ganho do sinal continua a apresentar as mesmas características básicas vistas anteriormente. Na Fig. 4.8 podemos perceber que o ganho cresce com o aumento da potência de bombeio, para uma potência de sinal constante, e o ganho diminui para uma potência de sinal maior, quando a potência de bombeio é mantida constante.

Em comparação com a Configuração 1, observamos uma diferença de ganho maior para potências de bombeio pequenas. Notamos, também, que quanto menor a potência de sinal de entrada, maior fica essa diferença de ganho (há, no entanto, um pico nesta diferença) e, também, mais concentrada para potências de bombeio cada vez menores. Portanto, para potências de bombeio altas, essa configuração não é tão eficiente, apesar de apresentar ainda um certo aumento no ganho do sinal, Figs. 4.9 e 4.10.

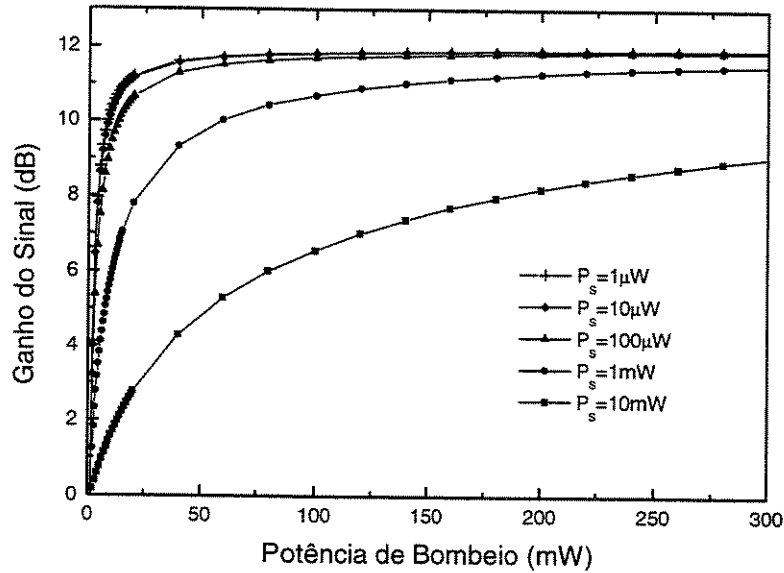


Figura 4.8: Ganho do sinal para Configuração 2, para várias potências do sinal aplicado.

4.6 Configuração 3

Modificando um pouco o circuito anterior, chegamos na Configuração 3, que difere da Configuração 2 apenas por refletir o sinal, ao invés do bombeio. Junto com o sinal temos a propagação de ruído ASE que sempre está presente em uma faixa de frequência próxima do sinal e, com isso, este ruído também é refletido por este novo esquema.

Na nossa configuração, esta parede refletora é colocada no final da fibra dopada. Com isso, o ruído ASE^+ que chega até lá, e é refletido, é somado com o ruído ASE^- , fazendo com que o ruído total amplificado na fibra aumente, principalmente no sentido contra-propagante. Esta situação é apresentada na Fig. 4.11. Observar que, na figura, apesar da curva ilustrar que o ruído ASE total é maior que o sinal, os valores que estão sendo mostrados são as potências totais na fibra. Como o sinal está concentrado na frequência de 1532 nm e o ruído está espalhado por todo o espectro de emissão espontânea (uma banda de aproximadamente 35 nm), é fácil concluir que podemos ter um valor de potência de sinal maior que de ruído, em uma faixa espectral pequena em torno da frequência de sinal (relação sinal/ruído maior que 1).

O aumento no ganho desta configuração se deve ao fato de que o sinal, sendo refletido, é como se a fibra dobrasse seu comprimento. A principal característica desta configuração é

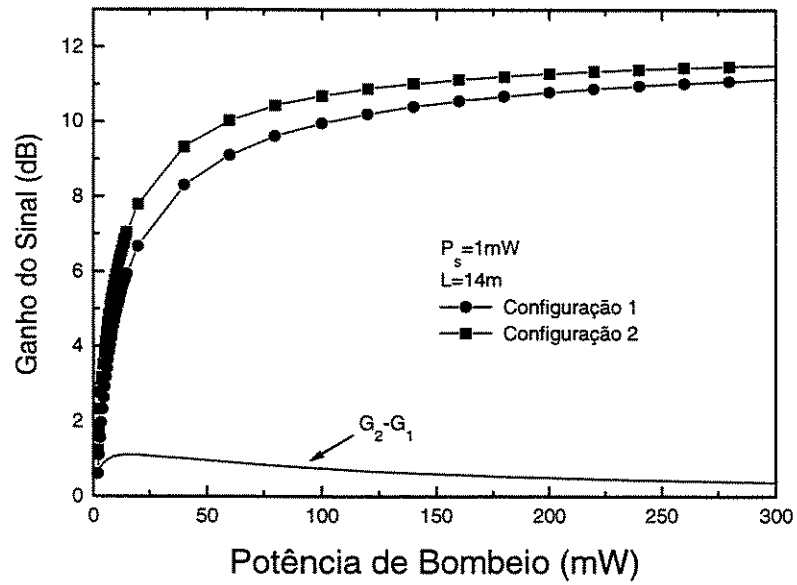


Figura 4.9: Comparação da evolução do ganho de sinal das Configurações 1 e 2, para $P_s = 1 \text{ mW}$.

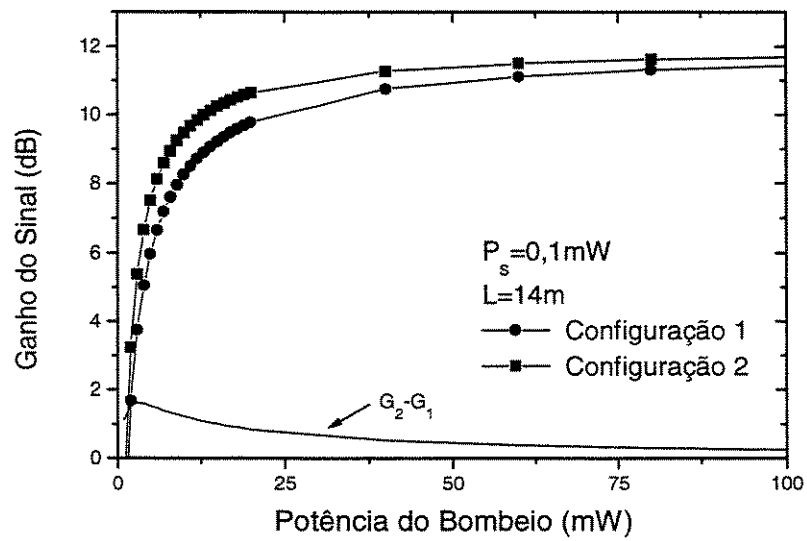


Figura 4.10: Comparação da evolução do ganho de sinal das Configurações 1 e 2, para $P_s = 100 \mu\text{W}$.

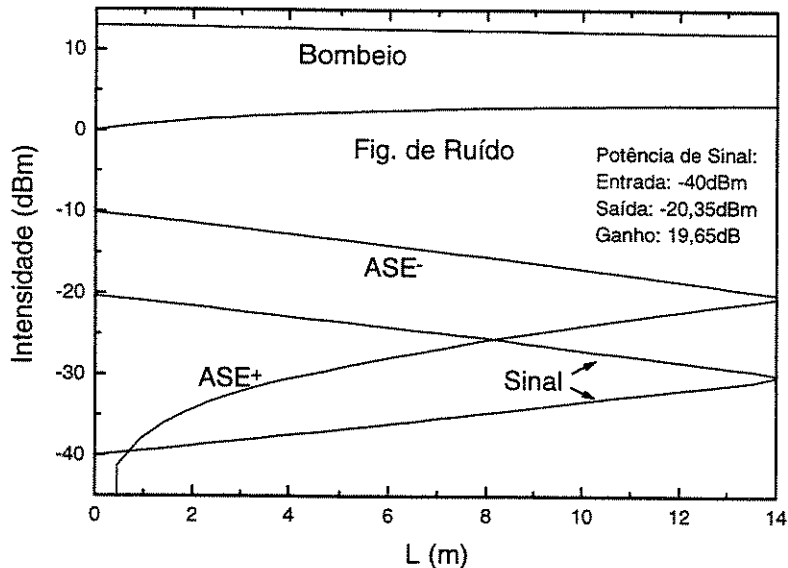


Figura 4.11: Desempenho do Amplificador usando a Configuração 3

que o L_{opt} é rapidamente alcançado para uma fibra de comprimento relativamente pequeno, apenas aumentando a potência de bombeio ou de sinal no sistema. A Fig. 4.12 ilustra o comportamento numérico do ganho de sinal, para uma fibra de comprimento $L = 14$ m, com relação à potência de bombeio.

Em comparação com as configurações anteriores, podemos observar que esta configuração permite aumentar muito o valor do ganho. A Fig. 4.13 mostra uma diferença típica entre as Configurações 1 e 3. A comparação entre as Configurações 2 e 3 não foi mostrada, pois, como já vimos anteriormente, os valores do ganho (em dB) na Configuração 2 é da ordem da Configuração 1. Portanto esta comparação seria repetitiva. Lembrar que nas curvas mostradas o ganho está em [dB], com isso percebemos que a Configuração 3, neste exemplo da Fig. 4.13, apresenta um ganho mais de 10 vezes superior ao da Configuração 1.

4.7 Configuração 4

A Configuração 4 é a união das Configurações 2 e 3, ou seja, a parede refletora no final da fibra reflete o sinal, o bombeio e, também, o ruído ASE. Com a reflexão do bombeio, o L_{opt} é maior, em relação ao encontrado na Configuração 3, para os mesmos valores de potência de bombeio e sinal. A seguir, apresentamos as curvas de simulação da Configuração 4, na

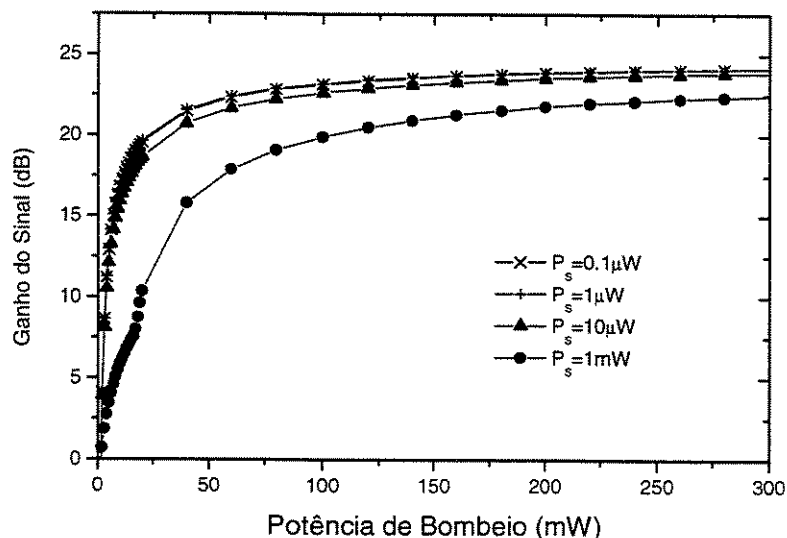


Figura 4.12: Ganho de sinal para a Configuração 3, para várias potências do sinal aplicado.

Fig. 4.14, apresentando o comportamento de todos os sinais dentro da fibra, o ganho de sinal para variações de potências de sinal e de bombeio, na Fig. 4.15, e as comparações com outras configurações, nas Figs. 4.16 e 4.17.

Nas curvas de comparação entre configurações, Figs. 4.16 e 4.17, vemos que o ganho sofre, novamente, um expressivo aumento (~ 10 dB) com em relação às Configurações 1 e 2, e, comparando as Configurações 3 e 4, observamos que entre elas a diferença de ganho é pequena (em favor da Configuração 4), com diferença mais significativa na região de baixo bombeio (semelhante ao que ocorre entre as Configurações 1 e 2).

4.8 Configuração 5

A Configuração 5 é, basicamente, a Configuração 4 melhorada, ou seja, a única diferença entre elas, agora, é que o ruído ASE é filtrado e não retorna à fibra. Com isso, há o aumento do ganho de sinal devido à diminuição do ruído ASE⁻ presente na Configuração 4. Em resumo, deixa-se de amplificar ruído em favor da amplificação de sinal.

Na Fig. 4.18, vemos as curvas da simulação, que foram feitas com os mesmos dados de entrada das configurações anteriores, e onde podemos notar o aumento do ganho. A grande diferença, também, com relação às duas Configurações anteriores (3 e 4) é a curva da ASE⁻

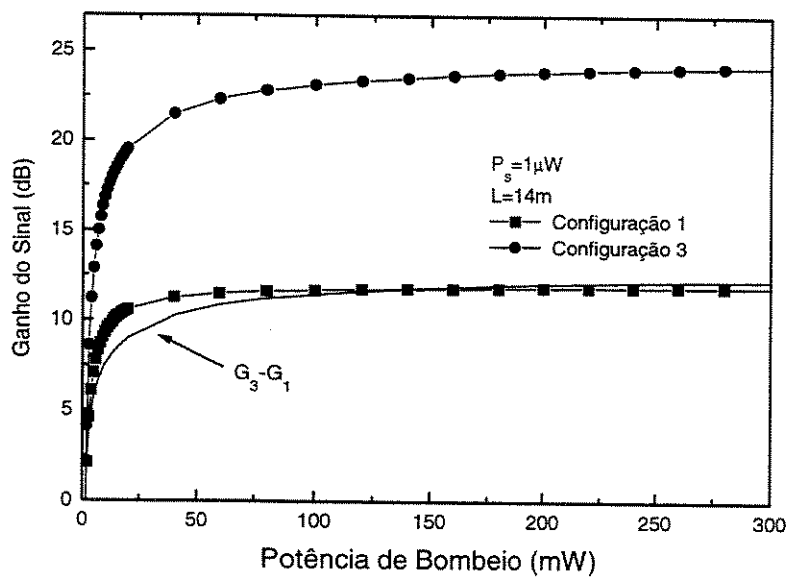


Figura 4.13: Comparação da evolução do ganho de sinal das Configurações 1 e 3, para $P_s = 1 \mu\text{W}$.

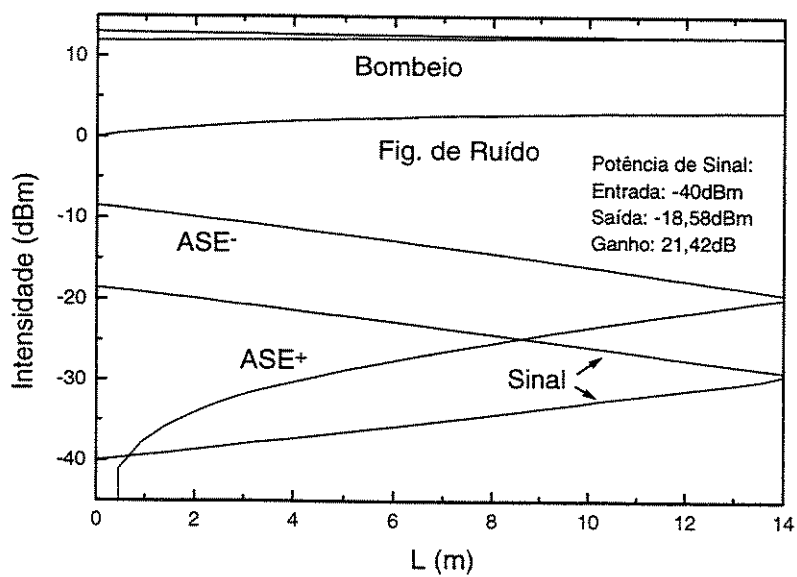


Figura 4.14: Desempenho do Amplificador usando a Configuração 4

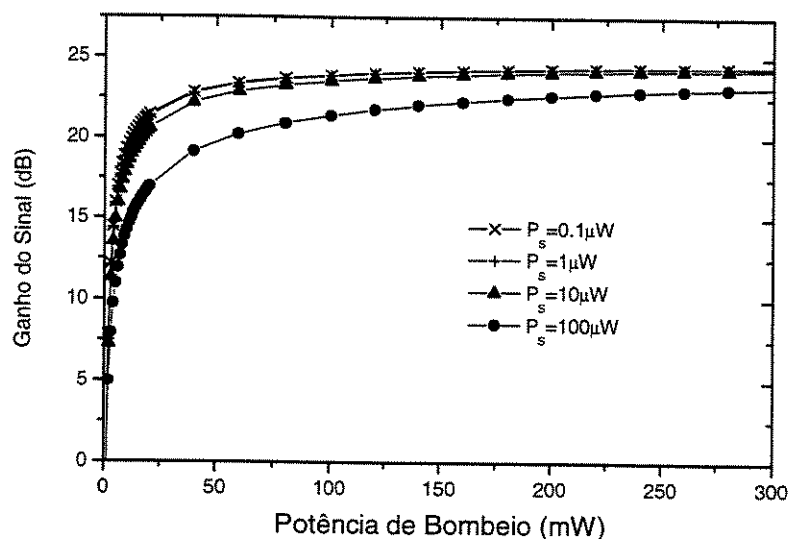


Figura 4.15: Ganho de sinal para a Configuração 4, para várias potências do sinal aplicado.

que está no nível normal, ou seja, o ruído não está sendo refletido de volta para a fibra.

A seguir, vemos a Fig. 4.19 que ilustra, novamente, o comportamento do ganho de sinal para várias potências fixas de sinal de entrada, variando a potência de bombeio. Notamos o comportamento do ganho de sinal exatamente como na Configuração 4, vista anteriormente; portanto, a diferença entre elas é só o aumento do ganho, na Configuração 5.

As Figs. 4.20 e 4.21 ilustram a comparação do ganho com as configurações anteriores. Esta configuração é a que apresenta o maior ganho de sinal, em relação à configuração original. O ganho, neste exemplo, atinge um valor 12 dB superior ao ganho original, para uma faixa grande de potência de bombeio. Com relação à Configuração 3, a atual apresenta um aumento razoável no ganho para baixas potências de bombeio.

A Fig. 4.22 ilustra o ganho para todas as configurações apresentadas. Podemos notar que todas as configurações que refletem o sinal apresentam um aumento no ganho.

A Fig. 4.23 dá uma noção da Figura de Ruído para todas as configurações. Notamos que as Configurações 2 e 5, além de apresentarem um ganho de sinal maior, em relação à Configuração 1, apresentam, também, figuras de ruído menores. Observamos que o valor da figura de ruído cai quando aumentamos a potência de bombeio. Isso ocorre porque, para uma potência de bombeio maior, temos um ganho maior (Fig. 4.3) e, para um ganho maior,

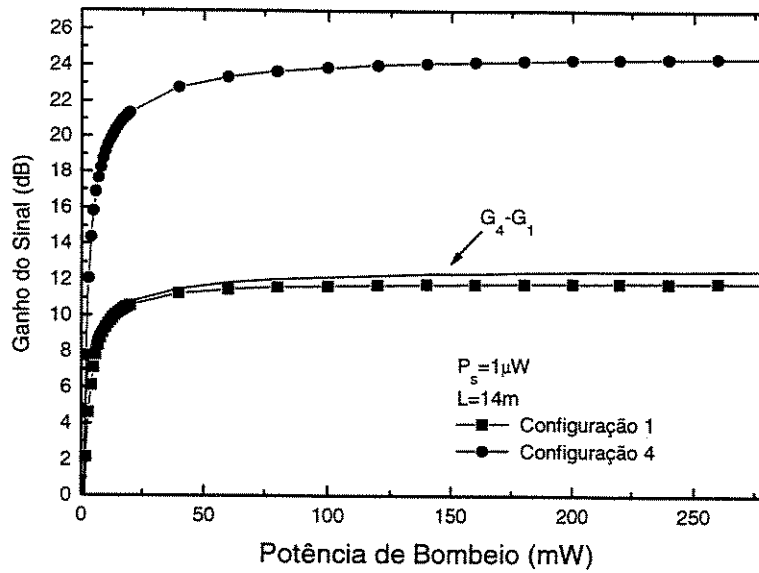


Figura 4.16: Comparação da evolução do ganho de sinal nas Configurações 1 e 4, para $P_s = 1 \mu W$.

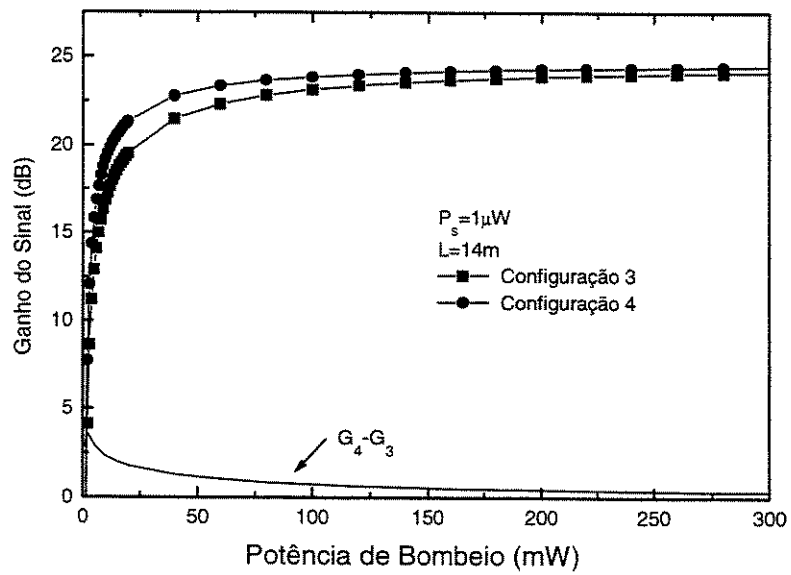


Figura 4.17: Comparação da evolução do ganho de sinal nas Configurações 3 e 4, para $P_s = 1 \mu W$.

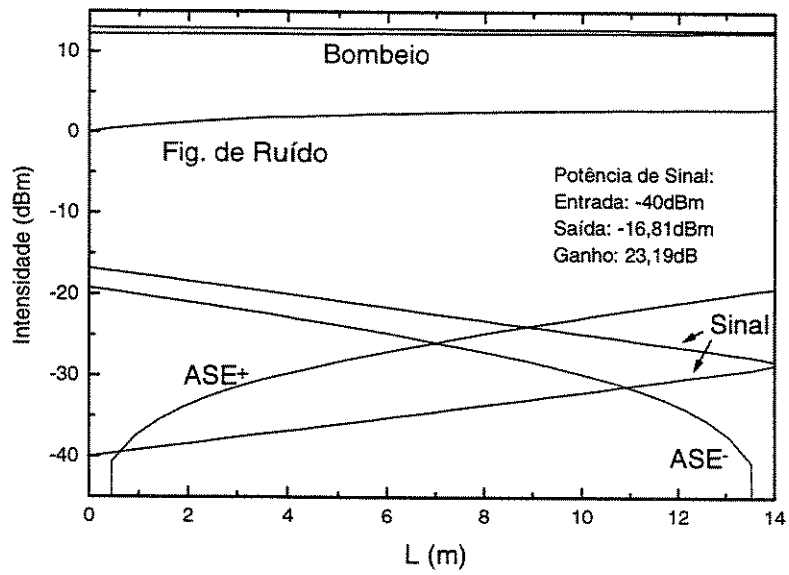


Figura 4.18: Desempenho do Amplificador usando a Configuração 5.

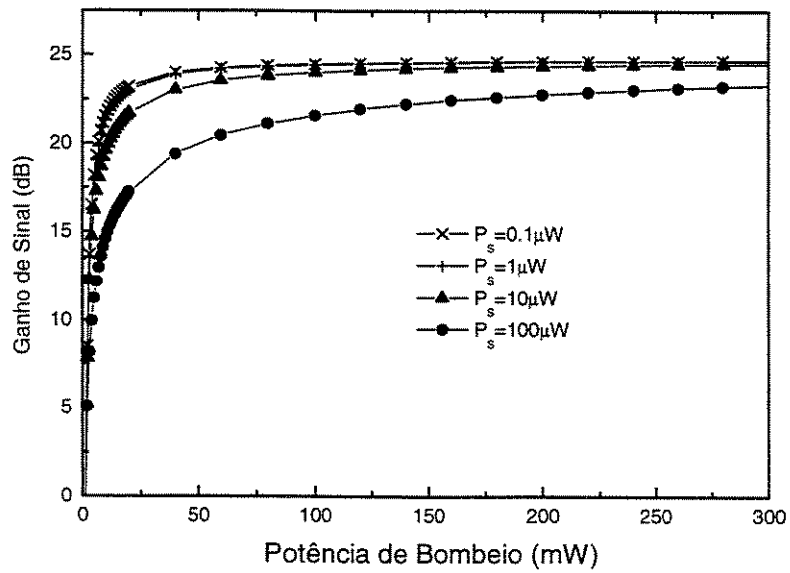


Figura 4.19: Ganho de sinal para a Configuração 5, para várias potências do sinal aplicado.

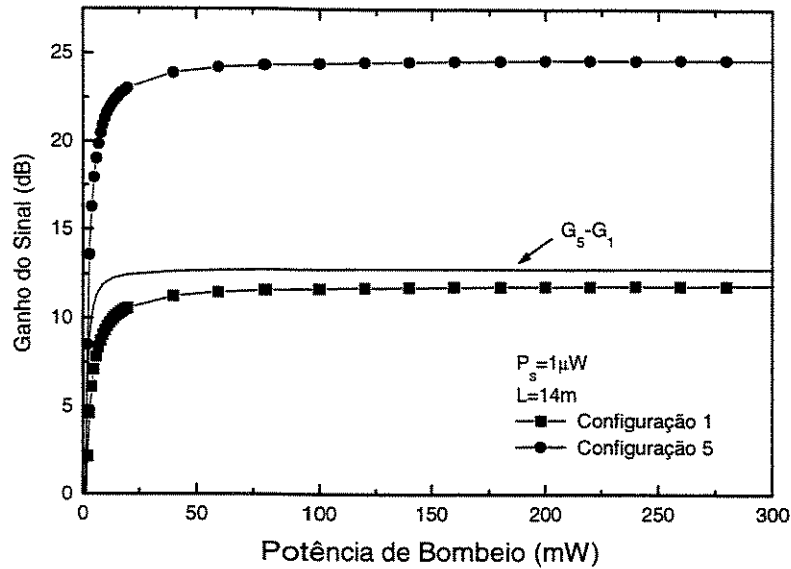


Figura 4.20: Comparação da evolução do ganho de sinal nas Configurações 1 e 5, para $P_s = 1 \mu W$.

temos figura de ruído menor (Eq. (2.62)).

Calculamos as curvas de eficiência de conversão de potência, para todas as configurações estudadas. O cálculo destas curvas é feito através da Eq. (4.2) como em [4].

$$\eta = \frac{P_{s,out} - P_{s,in}}{P_{p,in}} \quad (4.2)$$

onde $P_{s,out}$ é a potência de sinal de saída do amplificador, $P_{s,in}$ é a potência de sinal de entrada do amplificador e $P_{p,in}$ é a potência de bombeio de entrada do amplificador.

Nas curvas das Figs. 4.24 e 4.25 podemos perceber um pico de eficiência para baixas potências de bombeio. Para maiores potências de sinal de entrada, temos um maior valor de eficiência. E, novamente, podemos observar que as configurações que refletem o sinal apresentam um melhor aproveitamento, sendo a Configuração 5 a que dá o maior valor de eficiência.

4.9 Simulações Espectrais

A análise espectral é importante para transmissões de vários comprimentos de onda na mesma fibra, pois, conseguindo transmitir vários comprimentos de onda, podemos aumentar

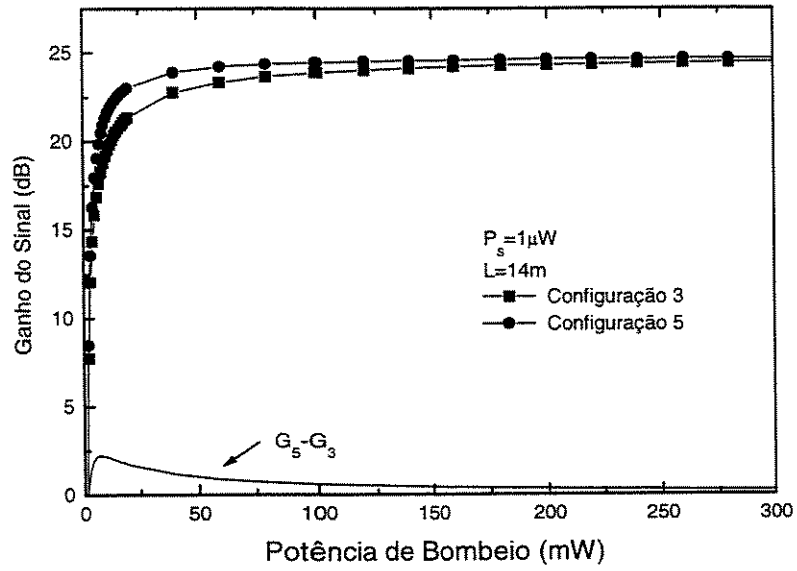


Figura 4.21: Comparação da evolução do ganho de sinal nas Configurações 3 e 5, para $P_s = 1 \mu W$.

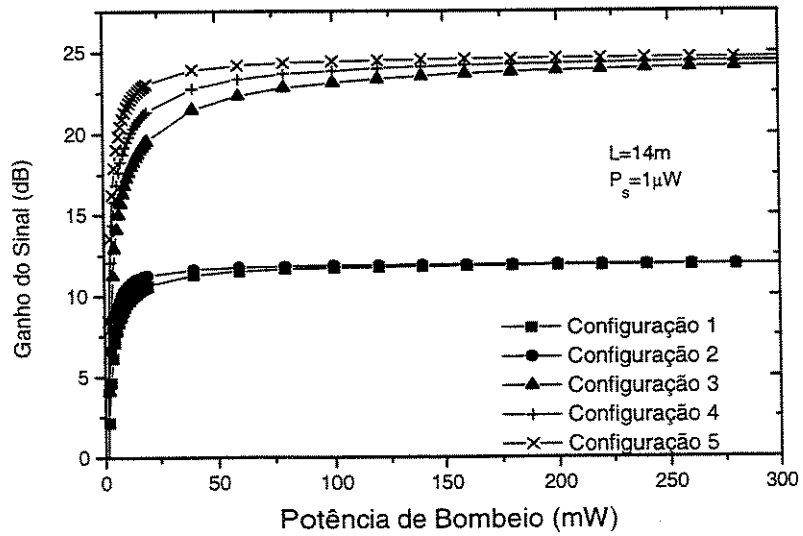


Figura 4.22: Ganho do sinal para as diversas configurações.

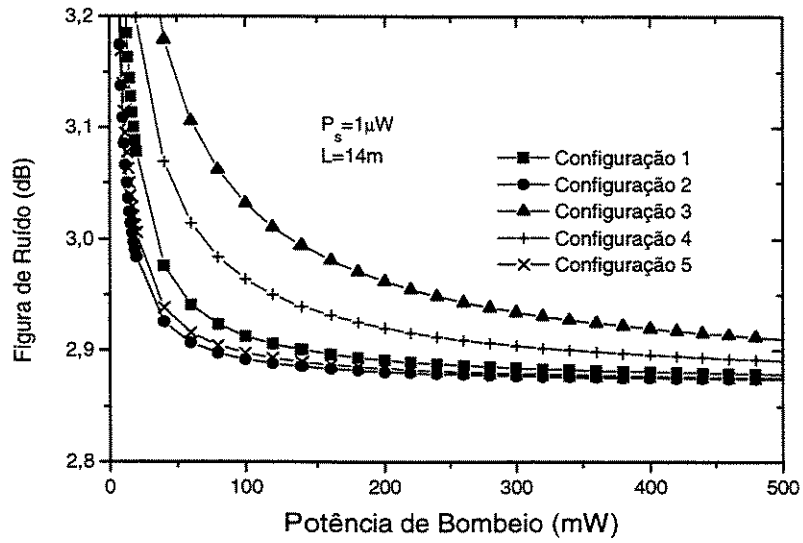


Figura 4.23: Figura de ruído para as diversas configurações.

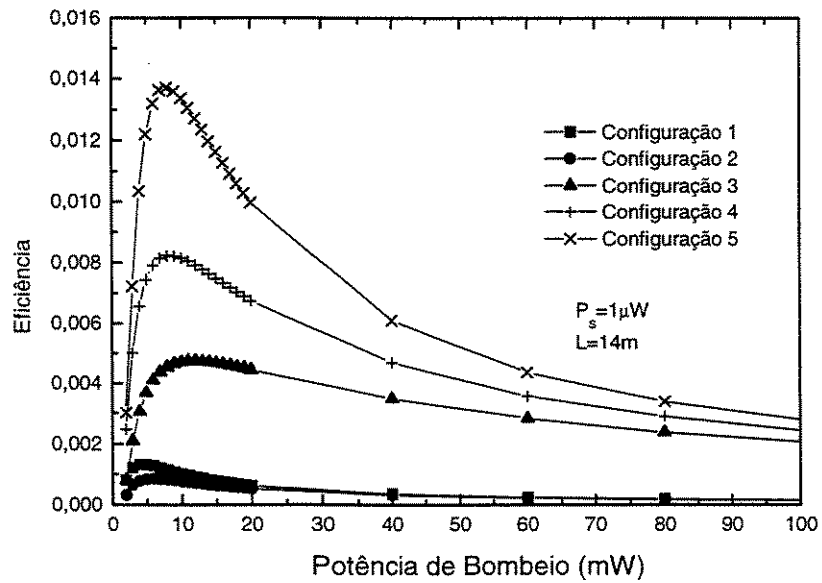


Figura 4.24: Curvas de eficiência para as diversas configurações, para $P_s = 1 \mu W$.

a quantidade de informação do enlace. O amplificador a fibra dopada com érbio pode apresentar, além de outras facilidades, já discutidas anteriormente, amplificação para comprimentos de onda dentro de uma faixa espectral. Isto permitiu o desenvolvimento da tecnologia WDM. A Fig. 4.26 ilustra o espectro de amplificação típico do amplificador a fibra dopada com érbio (AFDE).

Como pode ser observado, o AFDE não amplifica igualmente todos os comprimentos de onda na sua faixa espectral útil, e, por isso, temos hoje em dia várias técnicas para conseguir um ganho constante em todo o espectro de amplificação. Nesta seção vamos apenas apresentar o espectro típico para as várias configurações mostradas anteriormente, mostrando a modificação do ganho de sinal para cada uma delas. Qualquer técnica de controle de ganho pode ser usada em cima dessas configurações. As Figs. 4.27 e 4.28 mostram as curvas espectrais do ganho para todas as configurações apresentadas anteriormente.

Analisando as curvas das Figs. 4.27 e 4.28, não tiramos qualquer conclusão nova. O que se percebe é que com uma potência de bombeio menor percebemos um aumento na diferença entre os ganhos, mais notório para as Configurações 1 e 2.

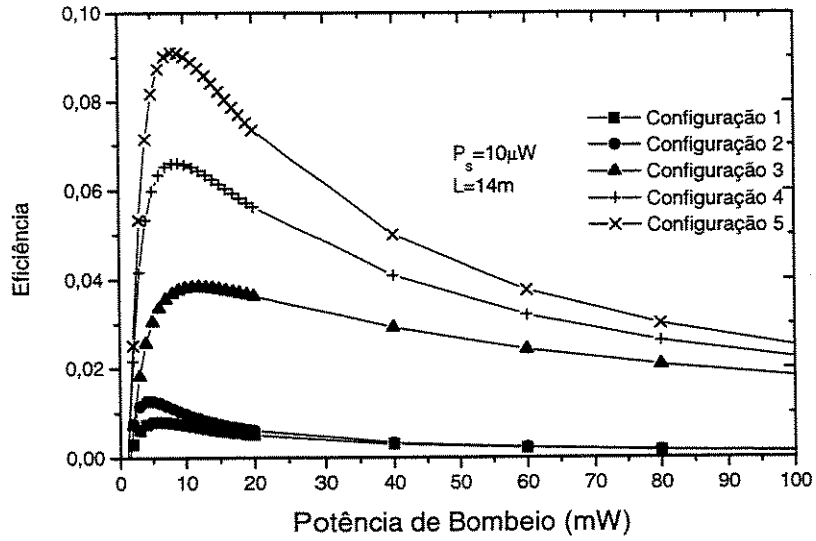


Figura 4.25: Curvas de eficiência para as diversas configurações, para $P_s = 10 \mu\text{W}$.

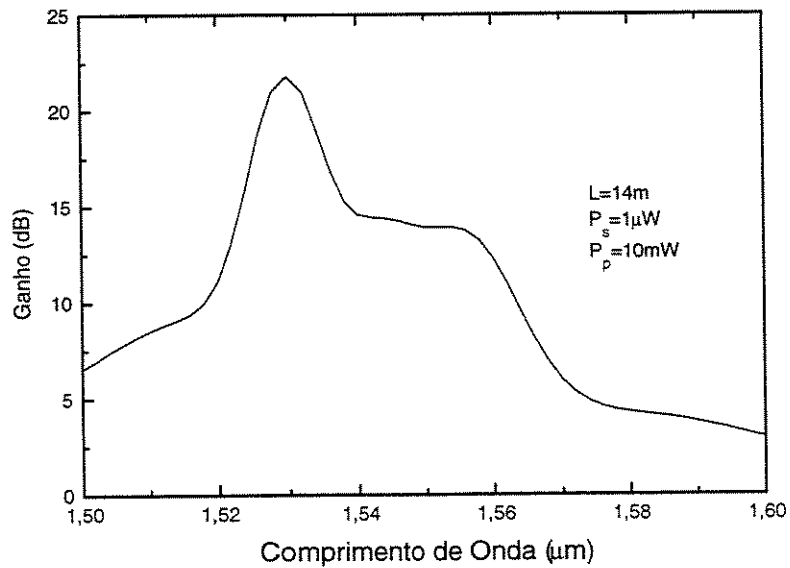


Figura 4.26: Variação espectral típica do ganho de sinal

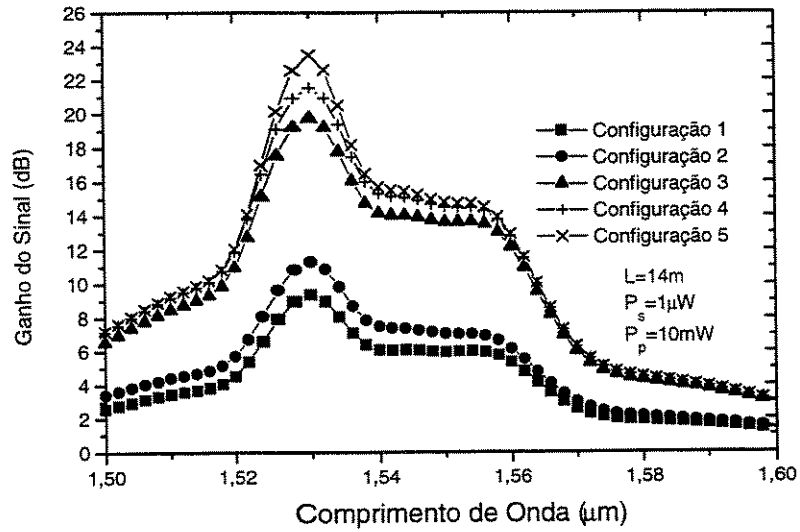


Figura 4.27: Curvas espectrais do ganho para todas as configurações, para $P_p = 10 \text{ mW}$.

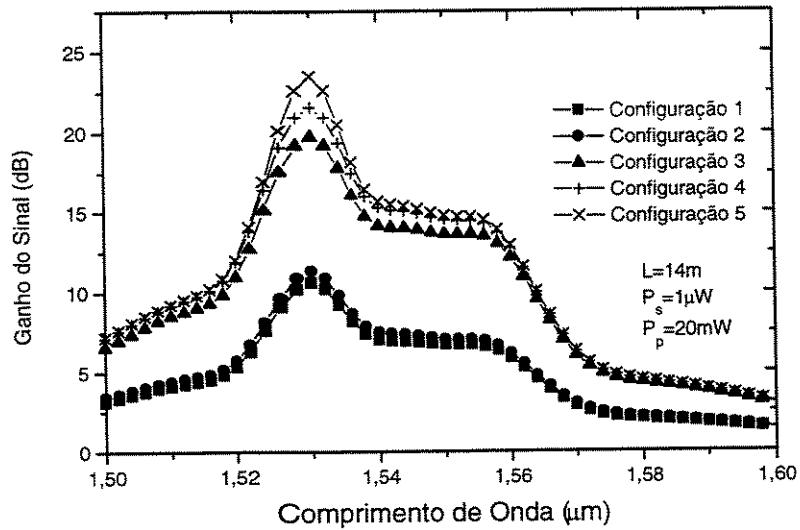


Figura 4.28: Curvas espectrais do ganho para todas as configurações, para $P_p = 20 \text{ mW}$.

Capítulo 5

Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

Este trabalho teve como principal objetivo o estudo do amplificador óptico a fibra dopada com érbio, a partir de sua estrutura básica, com o adionamento sucessivo de dispositivos ópticos complementares a fim de observar as melhorias no seu desempenho. A importância deste estudo foi comentada no Capítulo 1.

No Capítulo 2, analisamos fisicamente o amplificador, desde sua idéia original, informando o porquê da dopagem com os elementos das terras-raras até o modelamento matemático que rege o comportamento dos diversos sinais que se propagam no interior do amplificador.

No Capítulo 3, apresentamos o esquema do amplificador óptico, e introduzimos outras configurações para esse amplificador, com o auxílio de alguns dispositivos ópticos. Apresentamos conceitos de amplificadores refletivos e selecionamos cinco configurações diferentes para serem analisadas.

A Configuração 1 é a configuração normal do amplificador, com bombeamento co-propagante. A Configuração 2 é concebida a partir da primeira, mas refletindo o bombeio que chega no final da fibra. Esta configuração é bastante citada em referências, apresentada como sendo uma boa alternativa para reaproveitar o bombeio que seria perdido na saída de fibra e uma alternativa prática para aumentar o ganho do sinal.

A Configuração 3 é uma variação da anterior, só que ao invés de refletir o bombeio, refletimos o sinal que chega na saída da fibra, juntamente com o sinal de ASE (ruído) que é, também, transmitido e amplificado no espectro localizado em torno da frequência do sinal. A presença da ASE surge devido ao espectro de emissão do érbio. A Configuração 4 ficou sendo a junção das duas configurações anteriores, ou seja, a amplificação do bombeio e do sinal, com o ruído também presente.

A Configuração 5 é um melhoramento da configuração anterior, onde inserimos um filtro para bloquear o ruído ASE, ou seja, nossa Configuração 5 passa a ser o amplificador com reflexão exclusivamente do sinal e do bombeio que chegam ao final da fibra (na primeira passagem).

No Capítulo 4, apresentamos todas as simulações numéricas do amplificador em todas as configurações apresentadas no Capítulo 3. Todos os dispositivos inseridos nos diversos circuitos simulados foram considerados ideais, ou seja, não inserimos nos programas as perdas associadas a cada dispositivo. A análise das cinco configurações descritas incluíram, também, simulações espectrais na faixa de emissão do érbio.

A partir destas simulações, percebemos que a configuração que dá o maior ganho é a Configuração 5, seguida da 4, 3, 2 e, finalmente, a Configuração Básica. Mas cada uma delas apresenta vantagens e desvantagens. A Configuração 2 é melhor que a básica para situações onde há pequenos valores de potência de bombeio; para um bombeio de entrada alto não leva a vantagem significativa, devido ao custo maior e ao aumento desprezível do ganho. A Configuração 3 apresenta um significativo aumento no valor do ganho em relação ao valor do ganho original, mas deve ser usada para uma fibra de pequeno comprimento.

A Configuração 4 aumenta o ganho, quando comparada com a Configuração 3, mas essa melhoria de ganho, novamente, a exemplo das Configurações 1 e 2, é maior para baixas potências disponíveis de bombeio. A Configuração 5 faz o ganho do sinal aumentar, com relação à Configuração 4, porque nela é evitada a re-inserção de ruído que seria amplificado, competindo com o sinal útil.

Além do aumento de ganho com relação à Configuração 1, as Configurações 2 e 5 apresentaram também uma menor figura de ruído. Porém, o custo adicional para a montagem desses circuitos deve ser levado em consideração. Neste sentido, a Configuração 2 leva vantagem, pois é a mais simples (utiliza menos dispositivos adicionais). A Configuração 5 é a mais complexa e, portanto, se forem levadas em consideração todas as perdas dos dispositivos adicionais, seu uso pode não ser vantajoso. A Configuração 4 pode, também, ser utilizada, pois sua construção não é tão complexa, porém ela se apresentou mais ruidosa que a configuração 1.

Fizemos também curvas de eficiência de conversão de potência. Foi observado que as configurações que refletem o sinal apresentam maior eficiência, sendo a Configuração 5 novamente, a que dá o maior valor.

Como seqüência deste trabalho, novas simulações podem ser feitas utilizando algumas des-

tas configurações aqui propostas para um sistema WDM, envolvendo técnicas de equalização e grampeamento do espectro de ganho. A evolução tecnológica tem levado a uma redução dos custos associados ao uso de componentes ópticos adicionais na configuração básica do amplificador a fibra, viabilizando comercialmente outros esquemas alternativos. Várias outras configurações, além das relacionadas neste trabalho, podem, portanto, serem estudadas com boas perspectivas de aplicações futuras.

Referências Bibliográficas

- [1] C. J. Koester and E. A. Snitzer, "Amplification in a fiber laser", *Applied Optics*, vol 3, n° 10, 1964, pp. 1182-1186
- [2] G. R. Fowles, *Introduction to Modern Optics*, Second Edition, Dover, Inc., 1989
- [3] M. J. F. Digonnet, *Rare Earth Doped Fiber Laser and Amplifiers*, Marcel Dekker Inc., 1993
- [4] E. Desurvire, *Erbium-Doped Fiber Amplifiers : Principles and Applications*, John Wiley & Sons, Inc., 1994
- [5] C. A. Caballero, *Sistemas Ópticos para Comunicações Solitônicas*, Tese de Doutorado, DMO/FEEC/UNICAMP, 1996
- [6] A. Bjarklev, *Optical Fiber Amplifiers : Design and System Applications*, Artech House, Inc., 1993
- [7] O. P. L. de Boczar, *Estudo de Amplificadores Ópticos a Fibra Dopada com Érbio para Amplificação em Sistemas WDM*, Tese de Mestrado, DMO/FEEC/UNICAMP, 1998
- [8] D. Gloge, "Weakly Guiding Fibers", *Applied Optics*, vol 10, n° 10, 1971, pp. 2252-2258.
- [9] R. Ramaswami and K. N. Sivarajan, *Optical Networks : A Practical Perspective*, Morgan Kaufmann Publishers, Inc., 1998.
- [10] G. Keiser, *Optical Fiber Communications*, McGraw-Hill, Inc., 1983.
- [11] C. W. Barnard, J. Chorostowski and M. Kavehrad, "Bidirectional Fiber Amplifiers", *IEEE Photonics Technology Letters*, vol 4, n° 8, 1992, pp. 911-913.
- [12] V. Lauridsen, R. Tadayoni, A. Bjarklev, J. H. Povlsen and B. Pedersen, "Gain and Noise Performance of Fibre Amplifiers Operating in New Pump Configurations", *Electronics Letters*, vol 27, n° 4, 1991, pp. 327-329.
- [13] B. Sridhar, S. P. Bastien and H. R. D. Sunak, "Erbium-Doped Fiber Power Amplifiers with Pump Reflecting Mirrors in the 800 nm Band", *IEEE Photonics Technology Letters*, vol, 4 n° 8, 1992, pp. 917-919.

- [14] M. de L. Rocha, , *Estudo do Atraso de Grupo em Grades Compensadoras de Dispersão*, Tese de Doutorado, DMO/FEEC/UNICAMP, 1999
- [15] H. Iwamura, H. Iwasaki, K. Kubodera, Y. Torii and J. Noda, "Simple Polarisation-Independent Optical Circulator for Optical Transmission System", *Electronics Letters*, vol 15, n° 25, 1979, pp. 830-831.
- [16] J. Tone and L. W. Stulz, "FiEnd Filters : Passive Multilayer Thin-Film Optical Filters Deposited on Fibre Ends", *Electronics Letters*, vol 26, n° 16, 1990, pp. 1290-1291.

Apêndice A

Listagem dos Programas Utilizados

Os programas relacionados à fibra são utilizados para todas as configurações, mas os programas que calculam a evolução dos sinais e do espectro são diferentes para cada uma das configurações. Nestes programas, o cálculo é feito da seguinte forma : Primeiramente, os sinais são inseridos na fibra a partir dos dados de entrada e o programa calcula a evolução dos sinais e, depois, repete-se esta operação inserindo, agora, alguns dados já calculados, até que o sistema se torne estável, ou seja, que o erro entre dois cálculos consecutivos seja pequeno. A mudança nos programas é a inserção de variáveis no programa representando os novos sinais, como o bombeio refletido ou o sinal refletido, etc. Portanto, a estrutura dos programas é a mesma, mas para cada configuração há diferenças nas variáveis do programa.

Nas listagens dos programas que calculam a evolução dos sinais e do espectro, estamos apresentando os programas para as Configurações 1, que é a configuração para o amplificador convencional, e 4.

Os programas para a Configuração 4 estão sendo mostrados, pois ela é, dentre todas as demais Configurações, a mais complexa, ou seja, a que reflete todos os sinais que chegam no final da fibra. As linhas dos programas que foram inseridas ou modificadas, estão marcadas com um “***” no início da linha. Os programas para as outras Configurações é semelhante a estes, verificando-se apenas quais dos sinais são refletidos para cada Configuração.

Para a simulação devemos, primeiro, entrar com os dados da fibra e fazer todos os cálculos necessário, para, depois, rodar o programa que calcula a evolução, mostrados nas listagens abaixo.

– Programa para entrada de dados da fibra dopada :

(* Dados para FIBRA #8 Modo Bombeio LP01, tomado de : *)

```

(*B.Pedersen, Optical and Quantum Electronics Vol.26 (1994) S273-S284 *)
(* *)
fibra=8; (* Número de Identificação da Fibra em uso *)
a=1.531; (* Raio da Fibra em [um] *)
AN=0.2;(* Abertura Numérica *)
zmax=45; ps0=0.001; pp01=10;
lambdas=1.532;(* Compr. Onda do Sinal [um] *)
lambdap=0.98;(* Compr. Onda de Bombeio [um] *)
sigmae=5.2 10^-21; (*Seção transversal de emissão sinal[cm^-2] *)
sigmaa=5.2 10^-21; (*Seção transversal de absorção sinal [cm^-2]*)
gamas=N[sigmaa/sigmae,40]; (*Absorção/Emissão =sigmaa/sigmae Eq(2.39) *)
sigmap=2.1 10^-21;(*Seção transv. de absorção de bombeio[cm^-2] *)
sigmaep=0.0 10^-21;(*Seção transv. de emissão de bombeio[cm^-2] *)
tau2=10.5 10^-3; (*Tempo de vida [s] *)
n0=1.0 10^18; (*Concentração de dopante[cm^-3] *)
per=1;
h=6.6256 10^-34; (*Constante de Plank [Js] *)
nup=N[3 10^8/(lambdap 10^-6),40]; (*Freq. de bombeio s^-1 *)
nus=N[3 10^8/(lambdas 10^-6),40];
A=N[Pi 10^-8 a^2,40]; (*área da fibra em cm^-2 *)
con0p=0.17494154; (*Const. Normal.Bombeio Modo LP01 [um^-2]. Vide Apend1.doc*)
con0s=0.072395157; (*Const. Normal.Sinal Modo LP01 [um^-2]. Vide Apend1.doc*)
connp=0.0;(*Não existe modo LP11; Const. Normal. Bombeio Modo LP11 [um^-2]. " *)
u0p=1.5155; (* Número de Onda Bombeio do Modo LP01. Vide Apend1.doc *)
u0s=1.17232; (* Número de Onda Sinal do Modo LP01. Vide Apend1.doc *)
unp=0.0; (*Não existe modo LP11 Número de Onda de Bombeio LP11. n>0 *)
kappa0p=N[u0p/a,40];
kappa0s=N[u0s/a,40];
kappanp=N[unp/a,40];
alfap=N[sigmap n0, 40];
alfaa=N[sigmaa n0, 40];
alfae=N[sigmae n0, 40];
etap01=0.730213; (* Vide proced. cálculo apend1.dot *)

```

```

etap11=0.0 (*Não existe modo LP11*);
etas=0.378573; (*Fração do sinal no núcleo LPO1 Eq(2.68)*)
gamap=sigmaep/sigmap; (* Eq.(2.28) *)
pp01=pp01 10^-3; (*Potência de bombeio [W] *)
ps0=ps0 10^-3;
pp11=pp11 10^-3;
beta01=N[sigmap tau2 pp01/(A h nup),40]; (* Eq(2.24) *)
beta11=N[sigmap tau2 pp11/(A h nup),40];
betae=N[sigmae tau2 ps0/(A h nus),40];
betaep01=N[sigmae tau2 pp01/(A h nup),40];
betaep11=N[sigmae tau2 pp11/(A h nup),40];
alfapm=N[alfap 10^2, 40];
alfaam=N[alfaa 10^2, 40];
alfaem=N[alfae 10^2, 40];
erren01=0.609851;
efeene01=0.299004; (*Integral de sobreposição Eq(2.69)*)
erren11=0.0;
efeene11=0.0; (*Integral de sobreposição Eq(2.69) *)
betaa=N[sigmaa tau2 ps0/(A h nus),40];
Ba=N[sigmaa tau2/(A h nus),40];
Bae=N[(sigmaa+sigmae) tau2/(A h nus),40];
ruído=7 10^12 h nus;

```

- Programa para cálculos com os dados da fibra dopada :

```

n=0;
Vp=N[2 Pi a AN/lambdap,40];
Vs=N[2 Pi a AN/lambdas,40];
ppp=FindRoot[{u^2 + w^2 == Vp^2, u BesselJ[n-1,u]/BesselJ[n,u]==-w BesselK[n-1,w]/BesselK[n,w]},
{u,0.1},{w,0.1}];
unp=u /. ppp;
wnp=w /. ppp;
sss=FindRoot[{u^2 + w^2 == Vs^2, u BesselJ[-1,u]/BesselJ[0,u]==-w BesselK[-1,w]/BesselK[0,w]},
{u,0.1},{w,0.1}];

```

```

uns=u /.sss ;
wns=w /. sss ;
u0s=uns ;
w0s=wns ;
kappas=uns/a ;
gammas=wns/a ;
kappanp=unp/a ;
intecos=NIntegrate[Cos[n phi]^2,{phi,0,2 Pi}] ;
ip1=intecos NIntegrate[r BesselJ[n,kappanp r]^2,{r,0,a}] ;
is1=N[2 Pi NIntegrate[r BesselJ[0,kappas r]^2,{r,0,a}]] ;
(* Segundas Integrais : *)
is2=N[2 Pi NIntegrate[r (BesselJ[0,uns]/BesselK[0,wns])^2 BesselK[0,gammas r]^2,{r,a,Infinity}]] ;
gammanp=wnp/a ; (* Número de onda normalizada ao raio da fibra*)
ip2=intecos NIntegrate[r (BesselJ[n,unp]/BesselK[n,wnp])^2 BesselK[n,gammanp r]^2,{r, a, Infinity}] ;
constantep=N[1/(ip1+ip2),40] ;
con0p=constantep ;
constantes=N[1/(is1+is2),40] ;
con0s=constantes ;
bes02=constantes NIntegrate[r per BesselJ[0,kappas r]^2,{r,0,a}] ;
bes04=constantes constantep NIntegrate[r per^2 BesselJ[0,kappas r]^2 BesselJ[0,kappanp r]^2,{r,0,a}] ;
bes14=constantes constantep NIntegrate[r per^2 BesselJ[0,kappas r]^2 BesselJ[n,kappanp r]^2, {r,0,a}] ;
bep04=constantep^2 NIntegrate[r per BesselJ[0,kappanp r]^4,{r,0,a}] ;
bep14=constantep^2 NIntegrate[r per BesselJ[n,kappanp r]^4,{r,0,a}] ;
erren=If[n<=0 , N[2 Pi^2 a^2 bep04] , N[0.75 Pi^2 a^2 bep14]] ;
etas=N[2 Pi bes02] ;
efeene=If[n<=0 , N[2 Pi^2 a^2 bes04] , N[Pi^2 a^2 bes14]] ;
etap=intecos constantep NIntegrate[r per BesselJ[n,kappanp r]^2,{r,0,a}] ;

```

– Programa que calcula a evolução dos sinais dentro da fibra dopada, para a Configuração 1 :

```

div=14 ;
Off[General : :spell] ; Off[General : :spell1] ;
Imasini=10^-50 ; Imenosini=10^-50 ;

```

```

Z=zmax;pdz=1;sdz=1;Imas=Imasini;Imenos=Imenosini;deltaz=N[Z/div];
attens=0.0;attenp=0.0;(* Atenuação Np/m *)
Do[
(*Integral em r de PHI(r,z) Modo Bombeio LP01*)
(* g01p *)
integral=NIntegrate[per r con0p BesselJ[0,kappa0p r]^2 (Pi a^2 (beta01 pdz con0p BesselJ[0,kappa0p r]^2+
betaa sdz con0s BesselJ[0,kappa0s r]^2+
Ba BesselJ[0,kappa0s]^2 (Imas+Imenos)))/(1+(Pi a^2 (beta01 pdz con0p BesselJ[0,kappa0p r]^2+
(betaaa+betaae) sdz con0s BesselJ[0,kappa0s r]^2+Bae BesselJ[0,kappa0s]^2 (Imas+Imenos)))),{r,0,a}];
g01p=N[-attenp-alfapm etap01-2 Pi alfapm (gamap-1) integral];
(* a(z) *)
integra2=NIntegrate[ per r con0s BesselJ[0,kappa0s r]^2 (Pi a^2 (beta01 pdz con0p BesselJ[0,kappa0p r]^2+
betaa sdz con0s BesselJ[0,kappa0s r]^2+
Ba BesselJ[0,kappa0s]^2 (Imas+Imenos)))/(1+(Pi a^2 (beta01 pdz con0p BesselJ[0,kappa0p r]^2+
(betaaa+betaae) sdz con0s BesselJ[0,kappa0s r]^2+Bae BesselJ[0,kappa0s]^2 (Imas+Imenos)))),{r,0,a}];
adz=N[2 Pi alfaem integra2];
(* b(z) *)
bdz=alfaam (etas-adz/alfaem);
(* g01s(z) *)
g01s=-attens+adz-bdz;
(* Soluções para p(z) e s(z) *)
p01z=pdz Exp[g01p deltaz];
s01z= sdz Exp[g01s deltaz];
(* Solução de Eq. diferencial para ASEmas *)
pasemas=(Imas+ruido adz/g01s) Exp[g01s deltaz] -ruido adz/g01s;
(* Atualização de valores *)
pdz=p01z;
sdz=s01z;
Imas=pasemas;
a01z[j]=adz;g01sz[j]=g01s;gpz[j]=g01p;
p01[j]=p01z;s01[j]=s01z;pasema[j]=pasemas,{j,0,Z,deltaz};(*Fim do Do *)
(* Cálculo de funções em z e valores em dBm *)
bom=Table[{j,10 Log[10,10^3 pp01 p01[j]]},{j,0,Z,deltaz}];

```

```

senal=Table[{j,10 Log[10,10^3 ps0 s01[j]]},{j,0,Z,deltaz}];
asemas=Table[{j,10 Log[10,1000 pasema[j]]},{j,0,Z,deltaz}];
coefp=Table[{j,gpz[j]},{j,0,Z,deltaz}];
coefa=Table[{j,a01z[j]},{j,0,Z,deltaz}];
coefgan=Table[{j,g01sz[j]},{j,0,Z,deltaz}];
coefac=Interpolation[coefa];
coefganc=Interpolation[coefgan];
coefpc=Interpolation[coefp];
(* Eq. diferencial para ASEmenos *)
solucion=NDSolve[{y'[x]==-coefganc[x] y[x]-ruido coefac[x],y[Z]==Imenosini},
y,{x,0,Z}];
ASEMENOS=Max[solucion];
ASEMAS=Interpolation[asemas];
SINAL=Interpolation[senal];
BOMBEIO=Interpolation[bom];
NUM=10;
Off[InterpolatingFunction : :dmwarn];
itera=0;
Do[
ASEmenos=Table[y[i]/.ASEMENOS,{i,0,Z,deltaz}];
itera=itera+1;
Z=zmax;pdz=1;sdz=1;Imas=Imasini;Imenos=ASEmenos[[1]];deltaz=N[Z/div];
attens=0.0;attenp=0.0;i=0;
Do[i=i+1;
(*Integral em r de PHI(r,z) Modo Bombeio LP01*)
integral=NIntegrate[
per r con0p BesselJ[0,kappa0p r]^2 (Pi a^2 (beta01 pdz con0p BesselJ[0,kappa0p r]^2+
betaa sdz con0s BesselJ[0,kappa0s r]^2+
Ba BesselJ[0,kappa0s]^2 (Imas+ASEmenos[[i]])))/(1+(Pi a^2 (beta01 pdz con0p BesselJ[0,kappa0p r]^2+
(betaa+betae) sdz con0s BesselJ[0,kappa0s r]^2+Bae BesselJ[0,kappa0s]^2 (Imas+ASEmenos[[i]])))),
{r,0,a}];
g01p=N[-attenp-alfapm etap01-2 Pi alfapm (gamap-1) integral];
(*Rotina para a(z) *)

```

```

integra2=NIntegrate[
per r con0s BesselJ[0,kappa0s r]^2 (Pi a^2 (beta01 pdz con0p BesselJ[0,kappa0p r]^2+
betaa sdz con0s BesselJ[0,kappa0s r]^2+
Ba BesselJ[0,kappa0s]^2 (Imas+ASEmenos[[i]])))/(1+(Pi a^2 (beta01 pdz con0p BesselJ[0,kappa0p r]^2+
(betaa+betae) sdz con0s BesselJ[0,kappa0s r]^2+Bae BesselJ[0,kappa0s]^2 (Imas+ASEmenos[[i]]))),
{r,0,a}];
adz=N[2 Pi alfaem integra2];
(*Rotina para b(z) *)
bdz=alfaam (etas-adz/alfaem);
(*Rotina para g01s(z) *)
g01s=-attens+adz-bdz;
p01z=pdz Exp[g01p deltax];
s01z= sdz Exp[g01s deltax];
pasemas=(Imas+ruido adz/g01s) Exp[g01s deltax] -ruido adz/g01s;
pdz=p01z;
sdz=s01z;
Imas=pasemas;
a01z[j]=adz ;g01sz[j]=g01s ;gpz[j]=g01p;
p01[j]=p01z ;s01[j]=s01z ;pasema[j]=pasemas,{j,0,Z,deltax}];(*Fim do Do *)
bom=Table[{j,10 Log[10,10^3 pp01 p01[j]]},{j,0,Z,deltax}];
senal=Table[{j,10 Log[10,10^3 ps0 s01[j]]},{j,0,Z,deltax}];
asemas=Table[{j,10 Log[10,1000 pasema[j]]},{j,0,Z,deltax}];
coefp=Table[{j,gpz[j]},{j,0,Z,deltax}];
coefa=Table[{j,a01z[j]},{j,0,Z,deltax}];
coefgan=Table[{j,g01sz[j]},{j,0,Z,deltax}];
coefpc=Interpolation[coefp];
coefac=Interpolation[coefa];
coefganc=Interpolation[coefgan];
solucion=NDSolve[{y'[x]==-coefganc[x] y[x]-ruido coefac[x],y[Z]==Imenosini},
y,{x,0,Z}];
ASEMENOS=Max[solucion];
ASEMAS=Interpolation[asemas];
SINAL=Interpolation[senal];

```



```

BOMBEIO=Interpolation[bom];
SAIDA[itera]=SINAL[Z]; ,{u,1,NUM+1});
Off[InterpolatingFunction : :dmwarn];
sinalfinal=NDSolve[{y'[x]==coefganc[x] y[x],y[0]==1},y,{x,0,Z}];
bombeiofinal=NDSolve[{y'[x]==coefpc[x] y[x],y[0]==1},y,{x,0,Z}];
asemasfinal=NDSolve[{y'[x]==coefganc[x] y[x]+ruído coefac[x],y[0]==Imasini},
y,{x,0,Z}];
asemenosfinal=NDSolve[{y'[x]==-coefganc[x] y[x]-ruído coefac[x],y[Z]==Imenosini},
y,{x,0,Z}];
EXERUIDO=NDSolve[{y'[x]==(coefac[x] (1-alfaam/alfaem)+alfaam etas)/(y[x]/.sinalfinal),y[0]==0},
y,{x,0,Z}];
pto=50;
SINFINAL= Table[Max[y[j]/.sinalfinal],{j,0,Z,Z/pto}];
SINFINAL=10 Log[10,SINFINAL ps0 1000];
SINFINAL[[1]]=10 Log[10,1000 ps0];
BOMFINAL=Table[Max[y[j]/.bombeiofinal],{j,0,Z,Z/pto}];
BOMFINAL=10 Log[10,BOMFINAL pp01 1000];
ASEMASFIN=Table[Max[y[j]/.asemasfinal],{j,0,Z,Z/pto}];
ASEMASFIN=10 Log[10,ASEMASFIN 1000];
ASEMENOSFIN=Table[Max[y[j]/.asemenosfinal],{j,0,Z,Z/pto}];
ASEMENOSFIN=10 Log[10,ASEMENOSFIN 1000];
FIGRUIDO=Table[Max[y[j]/.EXERUIDO],{j,0,Z,Z/pto}];
FIGRUIDO=10 Log[10,FIGRUIDO+1];
Print[AAA," ",N[SINFINAL[[1]]],", ",SINFINAL[[pto+1]],", ",BOMFINAL[[1]],", ",
BOMFINAL[[pto+1]],", ",ASEMASFIN[[pto+1]],", ",ASEMENOSFIN[[1]],
" ",FIGRUIDO[[pto+1]]];

```

– Programa que calcula a evolução dos sinais dentro da fibra dopada, para a Configuração 4 :

```

div=14;
Off[General : :spell];Off[General : :spell1];
R=1.;
Imasini=10^-50 ;Imenosini=10^-50;

```

```

**Z=zmax;pdz2=0;pdz1=1.0;sdz1=1;sdz2=0;Imas=0;Imenos=0;deltaz=N[Z/div];
attens=0.0;attenp=0.0;(* Atenuação Np/m *)
**k1=1;k2=1;
Do[
**pdz=k1 pdz1+k2 pdz2;
**sdz=k1 sdz1+k2 sdz2;
(*Integral em r de PHI(r,z) Modo Bombeio LP01*)
(* g01p *)
integral=NIntegrate[per r con0p BesselJ[0,kappa0p r]^2 (Pi a^2 (beta01 pdz con0p BesselJ[0,kappa0p r]^2+
betaa sdz con0s BesselJ[0,kappa0s r]^2+
Ba BesselJ[0,kappa0s]^2 (Imas+Imenos)))/(1+(Pi a^2 (beta01 pdz con0p BesselJ[0,kappa0p r]^2+
(betaaa+betae) sdz con0s BesselJ[0,kappa0s r]^2+Bae BesselJ[0,kappa0s]^2 (Imas+Imenos)))]),{r,0,a}];
g01p=N[-attenp-alfapm etap01-2 Pi alfapm (gamap-1) integral];
(* a(z) *)
integra2=NIntegrate[per r con0s BesselJ[0,kappa0s r]^2 (Pi a^2 (beta01 pdz con0p BesselJ[0,kappa0p r]^2+
betaa sdz con0s BesselJ[0,kappa0s r]^2+
Ba BesselJ[0,kappa0s]^2 (Imas+Imenos)))/(1+(Pi a^2 (beta01 pdz con0p BesselJ[0,kappa0p r]^2+
(betaaa+betae) sdz con0s BesselJ[0,kappa0s r]^2+Bae BesselJ[0,kappa0s]^2 (Imas+Imenos)))]),{r,0,a}];
adz=N[2 Pi alfaem integra2];
(* b(z) *)
bdz=alfaam (etas-adz/alfaem);
(* g01s(z) *)
g01s=-attens+adz-bdz;
(* Soluções para p(z) e s(z) *)
**p01z2=pdz2 Exp[-g01p deltaz];
**p01z1=pdz1 Exp[g01p deltaz];
**s01z1=sdz1 Exp[g01s deltaz];
**s01z2=sdz2 Exp[-g01s deltaz];
(* Solução de Eq. diferencial para ASEmas *)
pasemas=(Imas+ruido adz/g01s) Exp[g01s deltaz] -ruido adz/g01s;
(* Atualização de valores *)
**pdz1=p01z1;
**pdz2=p01z2;

```

```

**sdz1=s01z1;
**sdz2=s01z2;

Imas=pasemas;

a01z[j]=adz;g01sz[j]=g01s;gpz[j]=g01p;

**p011[j]=p01z1;p012[j]=p01z2;s011[j]=s01z1;s012[j]=s01z2;pasema[j]=pasemas,{j,0,Z,deltaz}};(*Fim do Do *)
**rebomb=p01z1;
**resinal=s01z1;
**rease=pasemas;

(* Cálculo de funções em z e valores em dBm *)
**bom1=Table[{j,10 Log[10,10^3 pp01 p011[j]]},{j,0,Z,deltaz}};
**bom2=Table[{j,10 Log[10,10^3 pp01 R rebomb p012[j]]},{j,0,Z,deltaz}};
**senal1=Table[{j,10 Log[10,10^3 ps0 s011[j]]},{j,0,Z,deltaz}};
**senal2=Table[{j,10 Log[10,10^3 ps0 R resinal s012[j]]},{j,0,Z,deltaz}};
asemas=Table[{j,10 Log[10,1000 pasema[j]]},{j,0,Z,deltaz}};
coefp=Table[{j,gpz[j]},{j,0,Z,deltaz}};
coefa=Table[{j,a01z[j]},{j,0,Z,deltaz}};
coefgan=Table[{j,g01sz[j]},{j,0,Z,deltaz}};
coefac=Interpolation[coefa];
coefganc=Interpolation[coefgan];
coefpc=Interpolation[coefp];

(* Eq. diferencial para ASEmenos *)
**solucion=NDSolve[{y'[x]==-coefganc[x] y[x]-ruído coefac[x],y[Z]==R rease},
y,{x,0,Z}];
**bomcontra=NDSolve[{y'[x]==-coefpc[x] y[x],y[Z]==R rebomb},y,{x,0,Z}];
bomcopro=NDSolve[{y'[x]==coefpc[x] y[x],y[0]==1},y,{x,0,Z}];
**sinal2final=NDSolve[{y'[x]==-coefganc[x] y[x],y[Z]==R resinal},y,{x,0,Z}];
ASEMENOS=Max[solucion];
ASEMAS=Interpolation[asemas];
**SINAL1=Interpolation[senal1];
**SINAL2=Max[sinal2final];
**BOMBEIO2=Max[bomcontra];BOMBEIO1=Max[bomcopro];

NUM=50;
itera=0;

```

```

Do[
**ASEmenos=Table[y[i]/.ASEMENOS,{i,0,Z,deltaz}];
**BOMCONTRA=Table[y[i]/.BOMBEIO2,{i,0,Z,deltaz}];
**BOMCOPRO=Table[y[i]/.BOMBEIO1,{i,0,Z,deltaz}];
**SIN2FINAL= Table[y[i]/.SINAL2,{i,0,Z,deltaz}];

itera=itera+1;

Z=zmax;pdz1=1;sdz1=1;Imas=0;deltaz=N[Z/div];
**_pdz2=BOMCONTRA[[1]];sdz2=SIN2FINAL[[1]];Imenos=ASEmenos[[1]];

attens=0.0;attenp=0.0;i=0;

Do[i=i+1;
**_pdz=k1 pdz1+k2 pdz2;
**_sdz=k1 sdz1+k2 sdz2;

(*Integral em r de PHI(r,z) Modo Bombeio LP01*)
integral=NIntegrate[
per r con0p BesselJ[0,kappa0p r]^2 (Pi a^2 (beta01 pdz con0p BesselJ[0,kappa0p r]^2+
betaa sdz con0s BesselJ[0,kappa0s r]^2+
Ba BesselJ[0,kappa0s]^2 (Imas+ASEmenos[[i]])))/(1+(Pi a^2 (beta01 pdz con0p BesselJ[0,kappa0p r]^2+
(betaa+betae) sdz con0s BesselJ[0,kappa0s r]^2+Bae BesselJ[0,kappa0s]^2 (Imas+ASEmenos[[i]]))),
{r,0,a}];

g01p=N[-attenp-alfapm etap01-2 Pi alfapm (gamap-1) integral];

(*Rotina para a(z) *)
integra2=NIntegrate[
per r con0s BesselJ[0,kappa0s r]^2 (Pi a^2 (beta01 pdz con0p BesselJ[0,kappa0p r]^2+
betaa sdz con0s BesselJ[0,kappa0s r]^2+
Ba BesselJ[0,kappa0s]^2 (Imas+ASEmenos[[i]])))/(1+(Pi a^2 (beta01 pdz con0p BesselJ[0,kappa0p r]^2+
(betaa+betae) sdz con0s BesselJ[0,kappa0s r]^2+Bae BesselJ[0,kappa0s]^2 (Imas+ASEmenos[[i]]))),
{r,0,a}];

adz=N[2 Pi alfaem integra2];

(*Rotina para b(z) *)
bdz=alfaam (etas-adz/alfaem);

(*Rotina para g01s(z) *)
g01s=-attens+adz-bdz;

**_p01z2=pdz2 Exp[-g01p deltaz];

```

```

**p01z1=pdz1 Exp[g01p deltax];
**s01z1= sdz1 Exp[g01s deltax];
**s01z2= sdz2 Exp[-g01s deltax];

pasemas=(Imas+ruido adz/g01s) Exp[g01s deltax] -ruido adz/g01s;
**pdz1=p01z1;
**pdz2=p01z2;
**sdz1=s01z1;
**sdz2=s01z2;

Imas=pasemas;

a01z[j]=adz;g01sz[j]=g01s;gpz[j]=g01p;
**p011[j]=p01z1;p012[j]=p01z2;s011[j]=s01z1;s012[j]=s01z2;pasema[j]=pasemas,{j,0,Z,deltax};(*Fim do Do *)
**rebomb=p01z1;
**resinal=s01z1;
**rease=pasemas;

**bom1=Table[{j,10 Log[10,10^3 pp01 p011[j]]},{j,0,Z,deltax}];
**bom2=Table[{j,10 Log[10,10^3 pp01 R rebomb p012[j]]},{j,0,Z,deltax}];
**senal1=Table[{j,10 Log[10,10^3 ps0 s011[j]]},{j,0,Z,deltax}];
**senal2=Table[{j,10 Log[10,10^3 ps0 R resinal s012[j]]},{j,0,Z,deltax}];

asemas=Table[{j,10 Log[10,1000 pasema[j]]},{j,0,Z,deltax}];
coefp=Table[{j,gpz[j]},{j,0,Z,deltax}];
coefa=Table[{j,a01z[j]},{j,0,Z,deltax}];
coefgan=Table[{j,g01sz[j]},{j,0,Z,deltax}];
coefpc=Interpolation[coefp];
coefac=Interpolation[coefa];
coefganc=Interpolation[coefgan];
**solucion=NDSolve[{y'[x]==-coefganc[x] y[x]-ruido coefac[x],y[Z]==R rease},
y,{x,0,Z}];
**bomcontra=NDSolve[{y'[x]==-coefpc[x] y[x],y[Z]==R rebomb},y,{x,0,Z}];
bomcopro=NDSolve[{y'[x]==coefpc[x] y[x],y[0]==1},y,{x,0,Z}];
**sinal2final=NDSolve[{y'[x]==-coefganc[x] y[x],y[Z]==R resinal},y,{x,0,Z}];

ASEMENOS=Max[solucion];
ASEMAS=Interpolation[asemas];
**SINAL1=Interpolation[senal1];

```

```

**SINAL2=Max[sinal2final];
**BOMBEIO2=Max[bomcontra];
**BOMBEIO1=Max[bomcopro];
**sinal1final=NDSolve[{y'[x]==coefganc[x] y[x],y[0]==1},y,{x,0,Z}];
**sinal2final=NDSolve[{y'[x]==-coefganc[x] y[x],y[Z]==R resinal},y,{x,0,Z}];
**bombeio2final=NDSolve[{y'[x]==-coefpc[x] y[x],y[Z]==R rebomb},y,{x,0,Z}];
**bombeio1final=NDSolve[{y'[x]==coefpc[x] y[x],y[0]==1},y,{x,0,Z}];
asemasfinal=NDSolve[{y'[x]==coefganc[x] y[x]+ruído coefac[x],y[0]==10^-30}, y,{x,0,Z}];
**asemenosfinal=NDSolve[{y'[x]==-coefganc[x] y[x]-ruído coefac[x],y[Z]==(R rease)+10^-30}, y,{x,0,Z}];
EXERUIDO=NDSolve[{y'[x]==(coefac[x] (1-alfaam/alfaem)+alfaam etas)/(y[x]/.sinal1final),y[0]==0},
y,{x,0,Z}];

pto=30;
**SIN1FINAL= Table[Max[y[j]/.sinal1final],{j,0,Z,Z/pto}];
**SIN1FINAL=10 Log[10,SIN1FINAL ps0 1000];
**SIN1FINAL[[1]]=10 Log[10,1000 ps0];
**SIN2FINAL= Table[Max[y[j]/.sinal2final],{j,0,Z,Z/pto}];
**If[R>0,SIN2FINAL=10 Log[10,SIN2FINAL ps0 1000],SIN2FINAL=Table[0,{j,0,Z,Z/pto}]];
**BOM1FINAL=Table[Max[y[j]/.bombeio1final],{j,0,Z,Z/pto}];
**BOM1FINAL=10 Log[10,BOM1FINAL pp01 1000];
**BOM2FINAL=Table[Max[y[j]/.bombeio2final],{j,0,Z,Z/pto}];
**If[R>0,BOM2FINAL=10 Log[10,BOM2FINAL pp01 1000
(*BOMCONTRA[[div+1]]*),BOM2FINAL=Table[0,{j,0,Z,Z/pto}]];
ASEMASFIN=Table[Max[y[j]/.asemasfinal],{j,0,Z,Z/pto}];
ASEMASFIN=10 Log[10,ASEMASFIN 1000];
ASEMENOSFIN=Table[Max[y[j]/.asemenosfinal],{j,0,Z,Z/pto}];
ASEMENOSFIN=10 Log[10,ASEMENOSFIN 1000];
FIGRUIDO=Table[Max[y[j]/.EXERUIDO],{j,0,Z,Z/pto}];
FIGRUIDO=10 Log[10,FIGRUIDO+1];
Do[
Print[N[(zmax (j-1))/pto], " ",SIN1FINAL[[j]], " ",SIN2FINAL[[j]], " ",BOM1FINAL[[j]], " ",BOM2FINAL[[j]],
" ",ASEMASFIN[[j]], " ",ASEMENOSFIN[[j]], " ",FIGRUIDO[[j]]],{j,1,pto+1}];

```

– Programa que calcula a evolução espectral para a Configuração 1 :

```

Off[General : :spell];Off[General : :spell1];

Lmin= 1500 ;

Lmax= 1600 ;

np= 50;

Nmin=Lmin-1410+1;Nmax=Lmax-1410+1;deltaN=Ceiling[(Nmax-Nmin)/np];

sigmaem>(*Input["Valores pico das seções transversais de emissão [cm^2]"];*)5.2 10^-21;

sigmaab>(*Input["Valores pico das seções transversais de absorção [cm^2]"];*)5.2 10^-21;

Do[

(* Leitura de "valores" do arquivo de entrada *)

lambdas=valores[[n,1]];

BdaASE=valores[[n,2]];

sigmae=valores[[n,3]] N[sigmaem];

sigmaa=valores[[n,4]] N[sigmaab];

gamas=N[sigmaa/sigae,40];

nus=N[3 10^8/(lambdas 10^-6),40];

alfaa=N[sigmaa n0, 40];

alfae=N[sigae n0, 40];

betae=N[sigae tau2 ps0/(A h nus),40];

betaep01=N[sigae tau2 pp01/(A h nup),40];

alfaam=N[alfaa 10^2, 40];

alfaem=N[alfae 10^2, 40];

betaa=N[sigmaa tau2 ps0/(A h nus),40];

Ba=N[sigmaa tau2/(A h nus),40];

Bae=N[(sigmaa+sigae) tau2/(A h nus),40];

ruído=BdaASE 10^12 h nus;

(* ##### Rotina para cálculo de etas , contante de normalização, u0s , w0s etc. ##### *)

Vs=N[2 Pi a AN/lambdas,40];

sss=FindRoot[{u^2 + w^2 == Vs^2,

u BesselJ[-1,u]/BesselJ[0,u]==-w BesselK[-1,w]/BesselK[0,w]},

{u,0.1},{w,0.1}];

u0s=u /.sss;

w0s=w /. sss;

kappa0s=u0s/a;

```

```

gamma0s=w0s/a;
is1=N[2 Pi NIntegrate[r BesselJ[0,kappa0s r]^2,{r,0,a}]];
is2=N[2 Pi NIntegrate[r (BesselJ[0,u0s]/BesselK[0,w0s])^2 BesselK[0,gamma0s r]^2,
  {r,a,Infinity}]];
constantes=N[1/(is1+is2),40];
con0s=constantes;
bes02=constantes NIntegrate[r per BesselJ[0,kappa0s r]^2,{r,0,a}];
etas=N[2 Pi bes02];
(* ##### Rotina numérica de cálculo para ganho, F e ASE ##### *)
div=10;(*Quantidade de Divisões da Fibra : div=10*)
Z=zmax;pdz=1;sdz=1;Imas=0;Imenos=0;deltaz=N[Z/div];
attens=0.0;attenp=0.0;(* Atenuação Np/m *)
Do[
(*Integral em r de PHI(r,z) Modo Bombeio LP01*)
(* g01p *)
integral=NIntegrate[per r con0p BesselJ[0,kappa0p r]^2 (Pi a^2 (beta01 pdz con0p BesselJ[0,kappa0p r]^2+
  (betaa sdz con0s+
  Ba (Imas+Imenos) BesselJ[0,kappa0s r]^2 ))/(1+(Pi a^2 (beta01 pdz con0p BesselJ[0,kappa0p r]^2+
  ((betaa+betae) sdz con0s+Bae (Imas+Imenos) BesselJ[0,kappa0s r]^2 ))),{r,0,a}]];
g01p=N[-attenp-alfapm etap01-2 Pi alfapm (gamap-1) integral];
(* a(z) *)
integra2=NIntegrate[ per r con0s BesselJ[0,kappa0s r]^2 (Pi a^2 (beta01 pdz con0p BesselJ[0,kappa0p r]^2+
  (betaa sdz con0s+
  Ba (Imas+Imenos) BesselJ[0,kappa0s r]^2 ))/(1+(Pi a^2 (beta01 pdz con0p BesselJ[0,kappa0p r]^2+
  ((betaa+betae) sdz con0s+Bae (Imas+Imenos) BesselJ[0,kappa0s r]^2 ))),{r,0,a}]];
adz=N[2 Pi alfaem integra2];
(* b(z) *)
bdz=alfaam (etas-adz/alfaem);
(* g01s(z) *)
g01s=-attens+adz-bdz;
(* Soluções para p(z) e s(z) *)
p01z=pdz Exp[g01p deltaz];
s01z=sdz Exp[g01s deltaz];

```



```

(* Solução de Eq. diferencial para ASEmas *)
pasemas=(Imas+ruido adz/g01s) Exp[g01s deltaz] -ruido adz/g01s;
(* Atualização de valores *)
pdz=p01z;
sdz=s01z;
Imas=pasemas;
a01z[j]=adz;g01sz[j]=g01s;gpz[j]=g01p;
p01[j]=p01z;s01[j]=s01z;pasema[j]=pasemas,{j,0,Z,deltaz};(*Fim do Do *)
(* Cálculo de funções em z e valores em dBm *)
rebomb=p01z;
bom=Table[{j,10 Log[10,10^3 pp01 p01[j]]},{j,0,Z,deltaz}];
senal=Table[{j,10 Log[10,10^3 ps0 s01[j]]},{j,0,Z,deltaz}];
asemas=Table[{j,10 Log[10,1000 pasema[j]]},{j,0,Z,deltaz}];
coefp=Table[{j,gpz[j]},{j,0,Z,deltaz}];
coefa=Table[{j,a01z[j]},{j,0,Z,deltaz}];
coefgan=Table[{j,g01sz[j]},{j,0,Z,deltaz}];
coefac=Interpolation[coefa];
coefganc=Interpolation[coefgan];
coefpc=Interpolation[coefp];
(* Eq. diferencial para ASEmenos *)
solucion=NDSolve[{y'[x]==-coefganc[x] y[x]-ruido coefac[x],y[Z]==0},
y,{x,0,Z}];
(*bomcontra=NDSolve[{y'[x]==-coefpc[x] y[x],y[Z]==R rebomb},y,{x,0,Z}];*)
ASEMENOS=Max[solucion];
ASEMAS=Interpolation[asemas];
SINAL=Interpolation[senal];
BOMBEIO=Interpolation[bom];itera=0;
(* ##### Rotina de Iterações (NUM=5)#####*)
NUM=5;(* Quantidade de Iterações NUM *)
itera=0;
Do[
ASEmenos=Table[y[i]/.ASEMENOS,{i,0,Z,deltaz}];
itera=itera+1;

```

```

Z=zmax;pdz=1;sdz=1;Imas=0;Imenos=ASEmenos[[1]];deltaz=N[Z/div];
attens=0.0;attenp=0.0;i=0;
Do[i=i+1;
(*Integral em r de PHI(r,z) Modo Bombeio LP01*)
integral=NIntegrate[
per r con0p BesselJ[0,kappa0p r]^2 (Pi a^2 (beta01 pdz con0p BesselJ[0,kappa0p r]^2+
(betaaa sdz con0s+
Ba (Imas+ASEmenos[[i]])) BesselJ[0,kappa0s r]^2))/(1+(Pi a^2 (beta01 pdz con0p BesselJ[0,kappa0p r]^2+
((betaa+betae) sdz con0s+Bae (Imas+ASEmenos[[i]])) BesselJ[0,kappa0s r]^2))),
{r,0,a}];
g01p=N[-attenp-alfapm etap01-2 Pi alfapm (gamap-1) integral];
(*Rotina para a(z) *)
integra2=NIntegrate[
per r con0s BesselJ[0,kappa0s r]^2 (Pi a^2 (beta01 pdz con0p BesselJ[0,kappa0p r]^2+
(betaaa sdz con0s+
Ba (Imas+ASEmenos[[i]])) BesselJ[0,kappa0s r]^2))/(1+(Pi a^2 (beta01 pdz con0p BesselJ[0,kappa0p r]^2+
((betaa+betae) sdz con0s+Bae (Imas+ASEmenos[[i]])) BesselJ[0,kappa0s r]^2))),
{r,0,a}];
adz=N[2 Pi alfaem integra2];
(*Rotina para b(z) *)
bdz=alfaam (etas-adz/alfaem);
(*Rotina para g01s(z) *)
g01s=-attens+adz-bdz;
p01z=pdz Exp[g01p deltax];
s01z=sdz Exp[g01s deltax];
pasemas=(Imas+ruido adz/g01s) Exp[g01s deltax]-ruido adz/g01s;
pdz=p01z;
sdz=s01z;
Imas=pasemas;
a01z[j]=adz;g01sz[j]=g01s;gpz[j]=g01p;
p01[j]=p01z;s01[j]=s01z;pasema[j]=pasemas,{j,0,Z,deltaz};(*Fim do Do *)
bom=Table[{j,10 Log[10,10^3 pp01 p01[j]]},{j,0,Z,deltaz}];
senal=Table[{j,10 Log[10,10^3 ps0 s01[j]]},{j,0,Z,deltaz}];

```

```

asemas=Table[{j,10 Log[10,1000 pasema[j]]},{j,0,Z,deltaz}];
coefp=Table[{j,gpz[j]},{j,0,Z,deltaz}];
coefa=Table[{j,a01z[j]},{j,0,Z,deltaz}];
coefgan=Table[{j,g01sz[j]},{j,0,Z,deltaz}];
coefpc=Interpolation[coefp];
coefac=Interpolation[coefa];
coefganc=Interpolation[coefgan];
solucion=NDSolve[{y'[x]==-coefganc[x] y[x]-ruído coefac[x],y[Z]==0},
y,{x,0,Z}];
ASEMENOS=Max[solucion];
ASEMAS=Interpolation[asemas];
SINAL=Interpolation[senal];
BOMBEIO=Interpolation[bom];
SAIDA[itera]=SINAL[Z];
(*Print["Iteração No.",itera," Sinal de saída [dBm]=",N[SAIDA[itera],20]]*},{u,1,NUM+1}];
erro=Abs[N[SAIDA[NUM+1]-SAIDA[NUM],20]];
If[erro<10^-3,Print["Convergencia OK!!"],Print["CUIDADO :L é maior que Lmax. Aumentar bombeio ou diminuir L"]];
(* ##### Eq. Diferenciais finais ##### *)
sinalfinal=NDSolve[{y'[x]==coefganc[x] y[x],y[0]==1},y,{x,0,Z}];
bombeiofinal=NDSolve[{y'[x]==coefpc[x] y[x],y[0]==1},y,{x,0,Z}];
asemasfinal=NDSolve[{y'[x]==coefganc[x] y[x]+ruído coefac[x],y[0]==10^-50},
y,{x,0,Z}];
asemenosfinal=NDSolve[{y'[x]==-coefganc[x] y[x]-ruído coefac[x],y[Z]==10^-50},
y,{x,0,Z}];
EXERUIDO=NDSolve[{y'[x]==(coefac[x] (1-alfaam/alfaem)+alfaam etas)/(y[x]/.sinalfinal),y[0]==0},
y,{x,0,Z}];
ganancia=N[10 Log[10,1000 ps0 Max[y[x]/.sinalfinal/.x->Z]]-10 Log[10,ps0 1000]];
FIGRUIDO=10 Log[10,N[Max[y[j]/.EXERUIDO/.j->Z]+1]];
ASEMASFIN=10 Log[10,1000 N[Max[y[j]/.asemasfinal/.j->Z]]];
ASEMENOSFIN=10 Log[10,1000 N[Max[y[j]/.asemenosfinal/.j->0]]];
saida[n]={lambdas,ganancia,FIGRUIDO,ASEMASFIN,ASEMENOSFIN},{n,Nmin,Nmax,deltaN}];
(* ##### Fim do loop principal ##### *)

```

```

Print["Lambdas", " G[dB]", " F[dB]", " ASE+[dBm]", " ASE-[dBm]"];
Do[
Print[Part[saida[j],1], " ",Part[saida[j],2], " ",Part[saida[j],3], " ",Part[saida[j],4], " ",Part[saida[j],5],
{j,Nmin,Nmax,deltaN}
];

```

– Programa que calcula a evolução espectral para a Configuração 4 :

```

Off[General : :spell];Off[General : :spell1];
R=1 ;R1=1 ;
Lmin=1500 ;
Lmax=1600 ;
np>(*Input["Numero de pontos"];*) 50 ;
Nmin=Lmin-1410+1 ;Nmax=Lmax-1410+1 ;deltaN=Ceiling[(Nmax-Nmin)/np];
sigmaem=5.2 10^-21 ;
sigmaab=5.2 10^-21 ;
Do[
(* Leitura de "valores" do arquivo de entrada *)
lambdas=valores[[n,1]] ;
BdaASE=valores[[n,2]] ;
sigmae=valores[[n,3]] N[sigmaem] ;
sigmaa=valores[[n,4]] N[sigmaab] ;
gamas=N[sigmaa/sigmae,40] ;
nus=N[3 10^8/(lambdas 10^-6),40] ;
alfaa=N[sigmaa n0, 40] ;
alfae=N[sigmae n0, 40] ;
betae=N[sigmae tau2 ps0/(A h nus),40] ;
betaep01=N[sigmae tau2 pp01/(A h nup),40] ;
alfaam=N[alfaa 10^2, 40] ;
alfaem=N[alfae 10^2, 40] ;
betaa=N[sigmaa tau2 ps0/(A h nus),40] ;
Ba=N[sigmaa tau2/(A h nus),40] ;
Bae=N[(sigmaa+sigmae) tau2/(A h nus),40] ;
ruído=BdaASE 10^12 h nus ;

```

```

(* ##### Rotina para cálculo de etas , contante de normalização, u0s , w0s etc. ##### *)
Vs=N[2 Pi a AN/lambdas,40];
sss=FindRoot[{u^2 + w^2 == Vs^2,
u BesselJ[-1,u]/BesselJ[0,u]==-w BesselK[-1,w]/BesselK[0,w]},
{u,0.1},{w,0.1}];
u0s=u /.sss;
w0s=w /. sss;
kappa0s=u0s/a;
gamma0s=w0s/a;
is1=N[2 Pi NIntegrate[r BesselJ[0,kappa0s r]^2,{r,0,a}]];
is2=N[2 Pi NIntegrate[r (BesselJ[0,u0s]/BesselK[0,w0s])^2 BesselK[0,gamma0s r]^2, {r,a,Infinity}]];
constantes=N[1/(is1+is2),40];
con0s=constantes;
bes02=constantes NIntegrate[r per BesselJ[0,kappa0s r]^2,{r,0,a}];
etas=N[2 Pi bes02];

(* ##### Rotina numérica de cálculo para ganho, F e ASE ##### *)
div=10;(*Quantidade de Divisões da Fibra : div=10*)
Z=zmax;pdz=1;sdz=1;Imas=0;Imenos=0;deltaz=N[Z/div];
attens=0.0;attenp=0.0;(* Atenuação Np/m *)
Do[
(*Integral em r de PHI(r,z) Modo Bombeio LP01*)
(* g01p *)
integral=NIntegrate[per r con0p BesselJ[0,kappa0p r]^2 (Pi a^2 (beta01 pdz con0p BesselJ[0,kappa0p r]^2+
(betaaa sdz con0s+
Ba (Imas+Imenos) BesselJ[0,kappa0s r]^2 ))/(1+(Pi a^2 (beta01 pdz con0p BesselJ[0,kappa0p r]^2+
((betaa+betae) sdz con0s+Bae (Imas+Imenos) BesselJ[0,kappa0s r]^2 ))),{r,0,a}];
g01p=N[-attenp-alfapm etap01-2 Pi alfapm (gamap-1) integral];
(* a(z) *)
integra2=NIntegrate[ per r con0s BesselJ[0,kappa0s r]^2 (Pi a^2 (beta01 pdz con0p BesselJ[0,kappa0p r]^2+
(betaaa sdz con0s+
Ba (Imas+Imenos) BesselJ[0,kappa0s r]^2 ))/(1+(Pi a^2 (beta01 pdz con0p BesselJ[0,kappa0p r]^2+
((betaa+betae) sdz con0s+Bae (Imas+Imenos) BesselJ[0,kappa0s r]^2 ))),{r,0,a}];
adz=N[2 Pi alfaem integra2];

```

```

(* b(z) *)
bdz=alfaam (etas-adz/alfaem);
(* g01s(z) *)
g01s=-attens+adz-bdz;
(* Soluções para p(z) e s(z) *)
p01z=pdz Exp[g01p deltaz];
s01z= sdz Exp[g01s deltaz];
(* Solução de Eq. diferencial para ASEmas *)
pasemas=(Imas+ruido adz/g01s) Exp[g01s deltaz] -ruido adz/g01s;
(* Atualização de valores *)
pdz=p01z;
sdz=s01z;
Imas=pasemas;
a01z[j]=adz ;g01sz[j]=g01s ;gpz[j]=g01p;
p01[j]=p01z ;s01[j]=s01z ;pasema[j]=pasemas,{j,0,Z,deltaz}>(*Fim do Do *)
(* Cálculo de funções em z e valores em dBm *)
**rebomb=p01z;
**resinal=s01z;
**rease=pasemas;
bom=Table[{j,10 Log[10,10^3 pp01 p01[j]]},{j,0,Z,deltaz}];
senal=Table[{j,10 Log[10,10^3 ps0 s01[j]]},{j,0,Z,deltaz}];
asemas=Table[{j,10 Log[10,1000 pasema[j]]},{j,0,Z,deltaz}];
coefp=Table[{j,gpz[j]},{j,0,Z,deltaz}];
coefa=Table[{j,a01z[j]},{j,0,Z,deltaz}];
coefgan=Table[{j,g01sz[j]},{j,0,Z,deltaz}];
coefac=Interpolation[coefa];
coefganc=Interpolation[coefgan];
coefpc=Interpolation[coefp];
(* Eq. diferencial para ASEmenos *)
**solucion=NDSolve[{y'[x]==-coefganc[x] y[x]-ruido coefac[x],y[Z]==R1 rease},y,{x,0,Z}];
**bomcontra=NDSolve[{y'[x]==-coefpc[x] y[x],y[Z]==R rebomb},y,{x,0,Z}];
**sinal2final=NDSolve[{y'[x]==-coefganc[x] y[x],y[Z]==R1 resinal},y,{x,0,Z}];
ASEMENOS=Max[solucion];

```

```

ASEMAS=Interpolation[asemas];
SINAL=Interpolation[senal];
**SINAL2=Max[sinal2final];
BOMBEO=Interpolation[bom];
**BOMBEO2=Max[bomcontra];
itera=0;
(* ##### Rotina de Iterações (NUM=5)#####*)
NUM=10;(* Quantidade de Iterações NUM *)
Do[
**ASEMENOS=Table[y[i]/.ASEMENOS,{i,0,Z,deltaz}];
**BOMCONTRA=Table[y[i]/.BOMBEO2,{i,0,Z,deltaz}];
**SIN2FINAL= Table[y[i]/.SINAL2,{i,0,Z,deltaz}];
itera=itera+1;
Z=zmax;pdz1=1;sdz1=1;Imas=0;deltaz=N[Z/div];
**pdz2=BOMCONTRA[[1]];sdz2=SIN2FINAL[[1]];Imenos=ASEMENOS[[1]];
attens=0.0;attenp=0.0;i=0;
Do[i=i+1;
**pdz=pdz1+pdz2;
**sdz=sdz1+sdz2;
(*Integral em r de PHI(r,z) Modo Bombeio LP01*)
integral=NIntegrate[
per r con0p BesselJ[0,kappa0p r]^2 (Pi a^2 (beta01 pdz con0p BesselJ[0,kappa0p r]^2+
(betaaa sdz con0s+
Ba (Imas+ASEMENOS[[i]]) BesselJ[0,kappa0s r]^2))/(1+(Pi a^2 (beta01 pdz con0p BesselJ[0,kappa0p r]^2+
((betaaa+betae) sdz con0s+Bae (Imas+ASEMENOS[[i]]) BesselJ[0,kappa0s r]^2))),{r,0,a}];
g01p=N[-attenp-alfapm etap01-2 Pi alfapm (gamap-1) integral];
(*Rotina para a(z) *)
integra2=NIntegrate[
per r con0s BesselJ[0,kappa0s r]^2 (Pi a^2 (beta01 pdz con0p BesselJ[0,kappa0p r]^2+
(betaaa sdz con0s+
Ba (Imas+ASEMENOS[[i]]) BesselJ[0,kappa0s r]^2))/(1+(Pi a^2 (beta01 pdz con0p BesselJ[0,kappa0p r]^2+
((betaaa+betae) sdz con0s+Bae (Imas+ASEMENOS[[i]]) BesselJ[0,kappa0s r]^2))),{r,0,a}];
adz=N[2 Pi alfaem integra2];

```

```

(*Rotina para b(z) *)
bdz=alfaam (etas-adz/alfaem);
(*Rotina para g01s(z) *)
g01s=-attens+adz-bdz;
**p01z1=pdz1 Exp[g01p deltaz];
**p01z2=pdz2 Exp[-g01p deltaz];
**s01z1= sdz1 Exp[g01s deltaz];
**s01z2= sdz2 Exp[-g01s deltaz];
pasemas=(Imas+ruido adz/g01s) Exp[g01s deltaz] -ruido adz/g01s;
**pdz1=p01z1;
**pdz2=p01z2;
**sdz1=s01z1;
**sdz2=s01z2;
Imas=pasemas;
a01z[j]=adz ;g01sz[j]=g01s ;gpz[j]=g01p ;
**p011[j]=p01z1 ;p012[j]=p01z2 ;s011[j]=s01z1 ;s012[j]=s01z2 ;pasema[j]=pasemas,{j,0,Z,deltaz} ;(*Fim do Do *)
**rebomb=p01z1 ;
**resinal=s01z1 ;
**rease=pasemas ;
**bom1=Table[{j,10 Log[10,10^3 pp01 p011[j]]},{j,0,Z,deltaz}];
**senal=Table[{j,10 Log[10,10^3 ps0 s011[j]]},{j,0,Z,deltaz}];
asemas=Table[{j,10 Log[10,1000 pasema[j]]},{j,0,Z,deltaz}];
coefp=Table[{j,gpz[j]},{j,0,Z,deltaz}];
coefa=Table[{j,a01z[j]},{j,0,Z,deltaz}];
coefgan=Table[{j,g01sz[j]},{j,0,Z,deltaz}];
coefpc=Interpolation[coefp];
coefac=Interpolation[coefa];
coefganc=Interpolation[coefgan];
**solucion=NDSolve[{y'[x]==-coefganc[x] y[x]-ruido coefac[x],y[Z]==R1 rease},y,{x,0,Z}];
**bomcontra=NDSolve[{y'[x]==-coefpc[x] y[x],y[Z]==R rebomb},y,{x,0,Z}];
**sinal2final=NDSolve[{y'[x]==-coefganc[x] y[x],y[Z]==R1 resinal},y,{x,0,Z}];
ASEMENOS=Max[solucion];
ASEMAS=Interpolation[asemas];

```



```

SINAL=Interpolation[senal];
**SINAL2=Max[sinal2final];

BOMBEIO=Interpolation[bom];
**BOMBEIO2=Max[bomcontra];

SAIDA[itera]=SINAL[Z] ,{u,1,NUM+1};
erro=Abs[N[SAIDA[ NUM+1]-SAIDA[ NUM],20]];

If[erro<10^-3,Print["Convergencia OK!!"],Print["CUIDADO :L é maior que Lmax. Aumentar bombeio ou diminuir L"]];

(* ##### Eq. Diferenciais finais ##### *)
sinalfinal=NDSolve[{y'[x]==coefganc[x] y[x],y[0]==1},y,{x,0,Z}];
**sinal2final=NDSolve[{y'[x]==-coefganc[x] y[x],y[Z]==R1 resinal},y,{x,0,Z}];
bombeiofinal1=NDSolve[{y'[x]==coefpc[x] y[x],y[0]==1},y,{x,0,Z}];
**bombeiofinal2=NDSolve[{y'[x]==coefpc[x] y[x],y[0]==R rebomb},y,{x,0,Z}];
asemasfinal=NDSolve[{y'[x]==coefganc[x] y[x]+ruído coefac[x],y[0]==10^-50}, y,{x,0,Z}];
**asemenosfinal=NDSolve[{y'[x]==-coefganc[x] y[x]-ruído coefac[x],y[Z]==(R1 rease)+10^-50}, y,{x,0,Z}];
EXERUIDO=NDSolve[{y'[x]==(coefac[x] (1-alfaam/alfaem)+alfaem etas)/(y[x]/.sinalfinal),y[0]==0}, y,{x,0,Z}];
ganancia=N[10 Log[10,1000 ps0 Max[y[x]/.sinal2final/.x->0]]-10 Log[10,ps0 1000]];
FIGRUIDO=10 Log[10,N[Max[y[j]/.EXERUIDO/.j->Z]+1]];
ASEMASFIN=10 Log[10,1000 N[Max[y[j]/.asemasfinal/.j->Z]]];
ASEMENOSFIN=10 Log[10,1000 N[Max[y[j]/.asemenosfinal/.j->0]]];
saida[n]={lambdas, ganancia, FIGRUIDO, ASEMASFİN, ASEMENOSFIN}, {n, Nmin, Nmax, deltaN}
]; (* ##### Fim do loop principal ##### *)
Print["Lambdas", " G[dB]", " F[dB]", " ASE+[dBm]", " ASE-[dBm]"];

Do[
Print[Part[saida[j],1], " ", Part[saida[j],2], " ", Part[saida[j],3], " ", Part[saida[j],4], " ", Part[saida[j],5]],
{j, Nmin, Nmax, deltaN} ];

```