

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

MATHEUS OGGIONI LIMA BENINCA

ESTUDO SOBRE AMPLIFICADORES HÍBRIDOS RAMAN E EDFA

**VITÓRIA
2012**

MATHEUS OGGIONI LIMA BENINCA

ESTUDO SOBRE AMPLIFICADORES HIBRIDOS RAMAN E EDFA

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica - Telecomunicações.

Orientador: Prof. Dr. Maria José Pontes

Co-Orientador: Prof. Dr. Marcelo Eduardo Vieira Segatto

VITÓRIA

2012

A minha orientadora, que persistiu a todos os meus desaparecimentos.

Agradecimentos

Agradeço a Maria José Pontes, por me mostrar caminhos de amplificar meu micro conhecimento.

Ao aluno de iniciação científica José Paulo, quem desbravou a interface gráfica do MA-TLAB e tornou possível alguns saltos.

Aos professores Marcelo Segatto, Anilton Salles, Moisés Ribeiro e Mário Sarcinelli , por acreditarem no papel de pesquisa e ensino, inerentes da Universidade.

A meus pais, irmão e toda a família. Que são as verdadeiras referências biográficas de quem sou.

Agradeço a minha amiga, companheira e namorada Lorryna. Na ciência nos tornamos Mestres e Doutores, mas no amor seremos eternos aprendizes.

Aos amigos

Ao CNPq e a FAPES pelo apoio ao programa de pós graduação.

"Viver é a coisa mais rara do mundo. A maioria das pessoas apenas existe"

Oscar Wilde

Resumo

BENINCÁ, M. O. L. Estudo Sobre Amplificadores Híbridos Raman e EDFA, 2012. Dissertação (Mestre em Engenharia Elétrica - Telecomunicações) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2012.

Neste trabalho apresenta-se um estudo sobre os amplificadores ópticos híbridos EDFA e Raman. São definidos alguns conceitos destes amplificadores individualmente, tais como modo de operação, ganho e ruído. Quando operando em conjunto o HA pode ser classificado quanto a composição de ganho e modo de operação dos amplificadores. Os códigos computacionais de simulação destes amplificadores são caracterizados quanto a sua funcionalidade e uma interface gráfica para simulação de amplificadores Raman é apresentada. A GUI possibilita otimização da escolha dos comprimentos de onda dos lasers de bombeio e suas potências. Apresenta ferramenta para análise das curvas de ganho e variação de *ripple* e possibilita a simulação de diferentes fibras ópticas em diversas combinações de sinais e comprimento de fibra. Foi realizado um estudo de caso de um enlace WDM contendo um EDFA e aproveitando a flexibilidade do perfil espectral de ganho do amplificador Raman para obter uma aplicação de amplificador híbrido de banda larga contínua. São 40 canais WDM operando nas bandas C e L, com 65 nm de largura de banda, *ripple* de 2 dB e enlaces de 90 km, 120 km, 150 km e 180 km de uma fibra SMF. Este trabalho complementa o estudo de amplificadores híbridos apresentando uma de suas aplicações com resultados de ganho, OSNR, NF e *ripple*.

Palavras-chave: Comunicações Óticas, Amplificadores Raman, Amplificadores Óticos, EDFA, Amplificadores Híbridos, Interface Gráfica.

Abstract

BENINCÁ, M. O. L. Study on Hybrid Amplifiers Raman and EDFA, 2012. Master Thesis (Mestre em Engenharia Elétrica - Telecomunicações) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2012.

This work presents a study on hybrid optical amplifiers EDFA and Raman. Individual concepts are defined such as operation mode, gain and noise. While operating as a group the HA has been classified by their gain composition and the operation modes of each amplifier. The simulation code basis for this amplifiers are also presented with an user guide interface for Raman amplifiers. This GUI allows the optimization of the wavelenght and power of the Raman laser pumps. It can plot the gain grafics and ripple and allows diferente types of fiber and combination of signals to be simulated. It is presented a case of study of a WDM link that has an EDFA and uses the spectral flexibility of the Raman gain for a HA with seamless wideband. Using 40 WDM channels spread on 65 nm of bandwidth on C and L band having 2 db of ripple and operating on 90 km, 120 km, 150 km and 180 km of single mode fiber. This works complements the study on hybrid amplifiers and presents one of it's aplications with results of gain, OSNR, NF and ripple.

Key-words: Optical Communications, Raman Amplifiers, EDFA, Hybrid Amplifiers, User Guide Interface.

Sumário

Lista de Tabelas

Lista de Figuras

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Introdução | 16 |
| 1.1 | Motivação | 16 |
| 1.2 | Escopo da Dissertação | 17 |
| 1.3 | Estrutura do texto | 17 |
| 1.4 | Trabalhos Publicados e em Elaboração | 18 |
| 2 | Aspectos Teóricos de Amplificadores Híbridos | 19 |
| 2.1 | Amplificadores Raman | 19 |
| 2.1.1 | Espalhamento Estimulado de Raman | 20 |
| 2.1.2 | Ganho Raman | 22 |
| 2.1.3 | Ruído em Amplificadores Raman | 23 |
| 2.1.4 | Configurações para Amplificadores Raman | 24 |
| 2.2 | Amplificadores a Fibra Dopada com Érbio | 26 |
| 2.3 | Amplificadores Híbridos | 28 |
| 2.3.1 | Amplificador Híbrido de Banda Larga Contínua SWB-HA | 28 |
| 2.3.2 | Análise de Amplificadores Híbridos | 30 |
| 2.4 | Conclusão | 31 |
| 3 | Modelos Para Simulação dos Amplificadores | 32 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3.1 | Modelos para Amplificadores Raman | 32 |
| 3.1.1 | Modelo Numérico para Ondas Contínuas de Amplificadores Raman | 33 |
| 3.1.2 | Modelo Analítico de Amplificadores Raman | 33 |
| 3.1.3 | Modelo Unificado | 34 |
| 3.2 | Modelo EDFA do software <i>OptiSystem</i> | 35 |
| 3.3 | Conclusão | 36 |
| 4 | Reestruturação dos Códigos para Amplificadores Raman | 37 |
| 4.1 | Interface Gráfica | 38 |
| 4.1.1 | Área de Trabalho | 38 |
| 4.1.2 | Ferramentas Básicas | 39 |
| 4.1.3 | Ferramentas de Projeto do Amplificador | 39 |
| 4.1.4 | Ferramentas de Definição do Enlace | 41 |
| 4.1.5 | Ferramentas de Gráficos e Resultados | 42 |
| 4.2 | Diferentes Tipos de Fibra | 42 |
| 4.3 | Fator de Polarização Variável | 44 |
| 4.4 | A Função Amplificador Raman | 45 |
| 4.5 | Conclusão | 46 |
| 5 | Estudo de Caso: Análise da Operação Sistêmica de um Amplificador Híbrido | 47 |
| 5.1 | Especificação dos Amplificadores: Raman e EDFA | 47 |
| 5.1.1 | EDFA de Potência | 47 |
| 5.1.2 | Amplificador Raman Distribuído | 48 |
| 5.2 | Enlace Opticamente Amplificado | 50 |
| 5.3 | Resultados da Simulação | 51 |
| 5.4 | Conclusão | 54 |
| 6 | Conclusão | 56 |

| | |
|---|----|
| 6.1 Sugestão para Trabalhos Futuros | 57 |
|---|----|

| | |
|-----------------------------------|-----------|
| Referências Bibliográficas | 58 |
|-----------------------------------|-----------|

Lista de Tabelas

| | | |
|-----|--|----|
| 2.1 | Classificação dos SWB-HA | 29 |
| 4.1 | Valores de coeficiente Raman e área efetiva por tipo de fibra. | 43 |
| 4.2 | Objetos de entrada da função. | 46 |
| 4.3 | Objetos de saída da função. | 46 |
| 5.1 | Características do amplificador de potência | 48 |
| 5.2 | Características do Amplificador Raman Distribuído. | 50 |
| 5.3 | Características do Sistema de Transmissão WDM Simulado | 51 |
| 5.4 | Ripple para os Diferentes Comprimentos de Fibra. | 52 |

Lista de Figuras

| | | |
|-----|---|----|
| 2.1 | Ilustração do Espalhamento Estimulado de Raman. | 21 |
| 2.2 | Espectro de ganho Raman para sílica. O dado no eixo horizontal é a diferença de frequência entre o sinal e do bombeio.[1] | 23 |
| 2.3 | Representação de um DRA como uma fibra de transmissão seguida de um pré-amplificador. | 24 |
| 2.4 | Amplificador Raman com bombeio co-propagante. | 25 |
| 2.5 | Amplificador Raman com bombeio contra-propagante. | 25 |
| 2.6 | Amplificador Raman com bombeio bi-direcional. | 26 |
| 2.7 | Distribuição de ganho entre os amplificadores que compõem o HA. | 29 |
| 3.1 | Modelos de Onda Contínua para Amplificadores Raman. | 35 |
| 4.1 | Interface gráfica com área de trabalho desenvolvida para a simulação de amplificadores Raman. | 38 |
| 4.2 | Ferramentas básicas dadas na sequência de ícones: Novo, Abrir, Salvar, Imprimir e Executar. | 39 |
| 4.3 | Definição dos parâmetros de projeto do amplificador. | 40 |
| 4.4 | Definição dos comprimentos de onda, potência e intervalo de variação das buscas. | 40 |
| 4.5 | Definição dos parâmetros do enlace. | 41 |
| 4.6 | Janela da área de trabalho para apresentação de resultados. | 42 |
| 4.7 | Atenuação de diferentes tipos de fibra em função do comprimento de onda. | 43 |
| 4.8 | Comparação entre um experimento e 100 simulações. | 44 |
| 5.1 | Ganho do EDFA em função do comprimento de onda do sinal WDM de entrada. | 49 |
| 5.2 | Layout do Sistema Simulado. | 51 |

| | | |
|-----|---|----|
| 5.3 | Potência do sinal antes e depois da amplificação em função do comprimento de onda dos canais de entrada, para 0 km, 90 km, 120 km, 150 km and 180 km de fibra óptica. | 52 |
| 5.4 | A OSNR e a Figura de Ruído do Amplificador Híbrido para diferentes comprimentos de enlace. | 53 |
| 5.5 | A NF Individual de Cada Amplificador, e a NF Efetiva do DRA. | 54 |
| 5.6 | O Ganho para Cada Comprimento do enlace de Fibra. | 55 |

| | |
|-------------------|--|
| <i>METROVIX:</i> | Rede de Alta Velocidade da Região Metropolitana de Vitória |
| <i>WDM:</i> | <i>Wavelength Division Multiplexing</i> , Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda |
| <i>EDFA:</i> | <i>Erbium Doped Fiber Amplifier</i> , Amplificador com Fibra Dopada de Erbio |
| <i>LABTEL:</i> | Laboratório de Telecomunicações da UFES |
| <i>DRA:</i> | <i>Distributed Raman Amplifier</i> , Amplificador Raman Distribuído |
| <i>CRA:</i> | <i>Concentrated Raman Amplifier</i> , Amplificador Raman Concentrado |
| <i>SRS:</i> | <i>Stimulated Raman Scattering</i> , Espalhamento Raman Estimulado |
| <i>NF:</i> | <i>Noise Figure</i> , Figura de Ruído |
| <i>PDG:</i> | <i>Polarization-dependent gain</i> , Ganho dependente da Polarização |
| <i>OSNR:</i> | <i>Optical Signal to Noise Ratio</i> , Relação Sinal Ruído Óptica |
| <i>HA :</i> | <i>Hybrid Amplifier</i> , Amplificador Híbrido |
| <i>NB – HA :</i> | <i>narrowband hybrid amplifier</i> , Amplificador Híbrido de banda estreita |
| <i>SWB – HA :</i> | <i>seamless wideband hybrid amplifier</i> , Amplificador híbrido de banda larga contínua |
| <i>DCF :</i> | <i>Dispersion Compensating Fiber</i> , Fibra com Compensação de Dispersão |
| <i>ripple:</i> | Diferença entre o Maior e o Menor Ganho |
| <i>ASE :</i> | <i>Amplified Espontaneous Emission</i> , Emissão espontânea amplificada |
| <i>CW :</i> | <i>Continuous Wave</i> , Onda Contínua |
| <i>DRS :</i> | <i>Double Rayleigh BackScattering</i> , retro-espalhamento duplo de Rayleigh (DRS) |
| <i>SMF :</i> | <i>Single Mode Fiber</i> , Fibra monomodo |
| <i>GUI :</i> | <i>Guide User Interface</i> , Interface Guiada pelo Usuário |
| <i>GA :</i> | <i>Genetic Algorithm</i> , Algorítmico Genético |
| <i>PS :</i> | <i>Particle Swarn</i> , Enxame de Partículas |

1 Introdução

O desenvolvimento de dispositivos ativos a fibra óptica ao longo dos últimos anos foi um dos maiores responsáveis pela implementação de redes ópticas de alta velocidade para a transmissão de dados, vídeo e voz. Dispositivos como os amplificadores ópticos, lasers de alta potência e conversores de comprimento de onda são partes importantes nessa evolução das redes ópticas.

Como exemplo de rede óptica de comunicação de dados pode-se citar a *METROVIX*, que foi implantada no Espírito Santo. O projeto, instalado inicialmente na Universidade Federal do Espírito Santo, interliga algumas instituições públicas por meio de infra-estrutura óptica, com comunicação em alta velocidade e tempo real. O objetivo é agilizar, modernizar e permitir o acesso a redes de alta capacidade de comunicação entre as instituições de ensino e pesquisa e órgãos públicos. Com isso, tem-se maior qualidade nos serviços prestados à população da capital. A *METROVIX*, iniciativa do Ministério das Ciências e Tecnologia, por meio da Rede Nacional de Ensino e Pesquisa, deve se estender a toda a Região Metropolitana e, posteriormente, ao interior do Estado do Espírito Santo [2]. A rede possui 56 quilômetros de fibra óptica que interliga a rede acadêmica da universidade com as demais instituições parceiras.

1.1 Motivação

Como a demanda por tráfego de informação cresce, assim há maior interesse no estudo de amplificadores ópticos que trabalhem com uma maior banda de comprimento de onda [3]-[4]. Estes estudos abordam expansão e melhorias de sistemas de fibra já em operação ou novos enlaces de dados a serem instalados. Essas melhorias, contudo, requerem uma otimização e simulações para desenvolver os amplificadores mais adequados para um dado cenário de enlace.

A melhoria na capacidade de transmissão em um enlace de comunicação por fibra pode ser alcançado com o aumento na taxa de bits por canal ou simplesmente com o acréscimo de novos comprimentos de onda no sinal de entrada, o que aumenta o número de canais. Ambas as

soluções implicam em um acúmulo de potencia no enlace de dados, o que torna o sistema mais vulnerável à efeitos não lineares.

Uma estratégia para evitar os efeitos não lineares, neste caso, é aumentar o espaçamento dos comprimentos de onda dos canais de entrada dentro da banda a ser amplificada. Isso significa, no caso de um enlace que mantém seu comprimento, explorar uma maior largura de banda. Por exemplo, utilizando canais de entrada na banda *C* (1530nm – 1565nm) e também na banda *L* (1565nm – 1625nm). Com o propósito de operar neste comprimento de banda maior aplicando transmissão *WDM* é conveniente o uso de amplificadores híbridos como se encontram estudos ao longo da ultima década [3]-[5].

1.2 Escopo da Dissertação

Posto a relevância do tema, objetiva-se nesta dissertação apresentar conceitos dos amplificadores ópticos Raman e EDFA e sua utilização conjunta. A partir destes conceitos, trabalhos anteriores foram realizados no laboratório de telecomunicações da UFES (LABTEL) [6] - [14]. Foi desenvolvida uma interface gráfica que reúne estes trabalhos e permite ao usuário utiliza-la como ferramenta de caracterização de amplificadores Raman ou otimização de projeto. Esta ferramenta, também contém algoritmos de otimização e busca exaustiva, inclui diversos modelos de fibras ópticas e considera uma variação no ganho do amplificador devido a variação de polarização.

Por fim, uma configuração de um amplificador híbrido é proposta nesta dissertação. Considerando um amplificador com fibra dopada com érbio (*EDFA*) e um amplificador Raman distribuído(*DRA*). Simulou-se um sistema *WDM* de 80 canais que combina as vantagens de ambos amplificadores. Resultados de análise de ruído e ganho são apresentados para diferentes comprimentos de enlace de fibra óptica.

1.3 Estrutura do texto

Esta dissertação é composta de seis capítulos, sendo esta introdução o primeiro. O Capítulo 3.2, em seguida, apresenta aspectos teóricos dos amplificadores Raman, EDFA e híbrido. Depois, Capítulo 3, aborda-se como tais amplificadores são simulados computacionalmente. No Capítulo 4, apresenta-se uma interface computacional para projeto de amplificadores Raman, interface esta desenvolvida no LABTEL. Como estudo de caso, no Capítulo 5, é proposto um amplificador híbrido operando nas bandas *C* e *L* com resultados para diferentes comprimentos

de enlace. Finalmente no Capítulo 6 apresenta-se as conclusões deste trabalho e sugestões de trabalhos futuros.

1.4 Trabalhos Publicados e em Elaboração

Com os resultados obtidos neste trabalho foram elaborados artigos para conferências e um artigo para submissão em revista está em fase final de revisão.

- Matheus O. L. Beninca, Maria J. Pontes and Marcelo E. V. Segatto, *Design of a Wideband Hybrid EDFA with a Fiber Raman Amplifier* no International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC), Proceedings 282, Nov, 2011.
- Barbosa, E. A.; Bastos-Filho C. J.A.; Bastos-Filho J. F.; Segatto, M. E. V.; Pontes, M. J.; Benincá, e M. O. L.; *Designing a 100 nm bandwidth Raman Fiber Amplifier using Multi Objective Optimization* no 15^o SBMO Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica e o 10^o CBMag Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo., Ago, 2012.
- Raman Amplifier Ripple Optimization Genetic Algorithm Extended Bandwidth Matheus Oggioni Lima Benincá, Helder Rocha, Maria José Pontes, Marcelo Eduardo Vieira Segatto Federal University of Espírito Santo UFES, Department of Electrical Engineering

2 *Aspectos Teóricos de Amplificadores Híbridos*

Amplificadores híbridos são compostos pela combinação de dois ou mais módulos de amplificadores ópticos, baseados em tecnologias distintas e aplicados em um único enlace. A partir de 1998 há na literatura análises da operação de amplificadores Raman e EDFA [3]. O estudo de caso apresentado no Capítulo 5 nesta dissertação analisa o desempenho de um amplificador híbrido simulado computacionalmente.

Para entender o funcionamento dos amplificadores híbridos tem-se, antes, que aprofundar o conceito individual de cada amplificador. Será abordado na Seção 2.1 conceitos básicos de amplificadores Raman, na Seção 2.2 o EDFA e finalizando o capítulo, Seção 2.3, será categorizado alguns tipos de amplificadores híbridos.

2.1 **Amplificadores Raman**

O Amplificador Raman é um amplificador óptico baseado no Ganho Raman, produzido pelo efeito do Espalhamento Estimulado de Raman. Funciona com base na troca de energia entre sinais ópticos no meio de propagação. Denominam-se *bombeios* as ondas que fornecem energia e *sinais* as ondas que contém a informação transmitida. As fontes de bombeio são lasers semicondutores de alta potência escolhidos de acordo com a região amplificada desejada. Estes amplificadores são utilizados em sistemas ópticos devido a alguns fatores considerados vantajosos em relação a outros amplificadores. Como por exemplo a possibilidade de se utilizar uma fibra já instalada como meio de amplificação e a capacidade de proporcionar ganho em uma extensa faixa de comprimentos de onda.

Algumas das principais características deste amplificador são: o fato de abranger diferentes regiões de comprimento de onda para amplificação, dependendo de uma diferença de frequência entre bombeio e sinal; o espectro de ganho pode ser dimensionado usando-se, simultaneamente, diferentes comprimentos de onda nos bombeios; a troca de energia ocorre em diferentes ma-

teriais ópticos, tornando possível uma amplificação Raman em diversas especificações de fibra óptica.

Estes amplificadores são construídos preferencialmente de duas maneiras: amplificação distribuída (*Distributed Raman Amplifiers, DRA*) e amplificação discreta ou concentrada (*Concentrated Raman Amplifiers, CRA*). Na amplificação distribuída o sinal é amplificado ao longo de toda a fibra do enlace, o que favorece a relação sinal ruído e o desempenho quanto aos efeitos não lineares. Já a amplificação discreta ocorre de forma confinada, concentrada em uma determinada região utilizando um tipo especial de fibra que favoreça o ganho Raman. No caso dos resultados obtidos, foi considerada a amplificação distribuída.

Na amplificação distribuída existem três tipos de posicionamento dos bombeios em relação à propagação do sinal. No caso dos bombeios estarem alocados no início da fibra e se propagarem no mesmo sentido do sinal, temos a configuração de bombeio co-propagante (Seção 2.1.4). Se estiverem posicionados no final da fibra e se propagando no sentido contrário ao do sinal, tem-se a configuração de bombeio contra-propagante (Seção 2.1.4). Por fim, quando os bombeios se encontram tanto no início quanto no final da fibra e se propagam em ambos os sentidos denomina-se bombeio bi-direcional (Seção 2.1.4).

2.1.1 Espalhamento Estimulado de Raman

Em 1922 o físico indiano Chandrasekhara Venkata Raman publicou seu trabalho sobre difração molecular da luz. Este era o primeiro de uma série de investigações com seus colaboradores que culminou na sua descoberta, em 28 de Fevereiro de 1928, do efeito de radiação que recebe o seu nome. Raman recebeu o Prêmio Nobel em 1930 por seu trabalho no espalhamento da luz[15].

Considera-se que quando a luz encontra moléculas no ar o modo predominante de espalhamento é o espalhamento Rayleigh, que consiste em um espalhamento elástico onde a energia do fóton incidente é apenas redistribuída espacialmente. Este espalhamento é responsável, por exemplo, pela coloração azul do céu. Porém, os fótons incidentes podem interagir com as moléculas de certa forma que a energia é absorvida ou perdida o que faz com que os fótons espalhados tenham sua frequência alterada. Este espalhamento inelástico é chamado de Espalhamento Raman [16].

Entende-se que na temperatura ambiente, a excitação térmica das moléculas não é nula, porém é baixa. Assim, pode-se assumir que as moléculas apresentam um estado inicial estável. Em algumas situações a luz incidente perde parte de sua energia vibracional nas moléculas.

Desta forma a luz espalhada apresentará energia menor do que a luz incidente. As frequências geradas pelo espalhamento da luz são menores que a frequência da luz incidente e são denominadas frequências de Stokes [8].

Durante o espalhamento pode acontecer que algumas moléculas estejam excitadas previamente à incidência da luz. Nestas situações, estas moléculas se encontram em um estado estável, porém acrescido de uma energia maior que a luz incidente. As frequências geradas pelo espalhamento da luz que são maiores que a frequência da luz incidente são denominadas de Anti-Stokes.

A Figura 2.1 ilustra estes três tipos de troca de energia presentes no espalhamento da luz se propagando em meio material. Considera-se na Fig.2.1 as linhas horizontais como estágios de excitação e as setas como saltos entre estes estágios de energia. Identificamos os espalhamentos Rayleigh, Stokes e Anti-Stokes pela diferença entre a energia absorvida e emitida quando ocorre a excitação. Então, ao retornar para o estado original, tem-se o espalhamento Rayleigh. Se ocorrer o retorno a um estado mais excitado, as frequências espalhadas são chamadas de Stokes e, ao contrario, se retornar a um estado menos excitado que o original, espalha-se a frequência Anti-stokes [8].

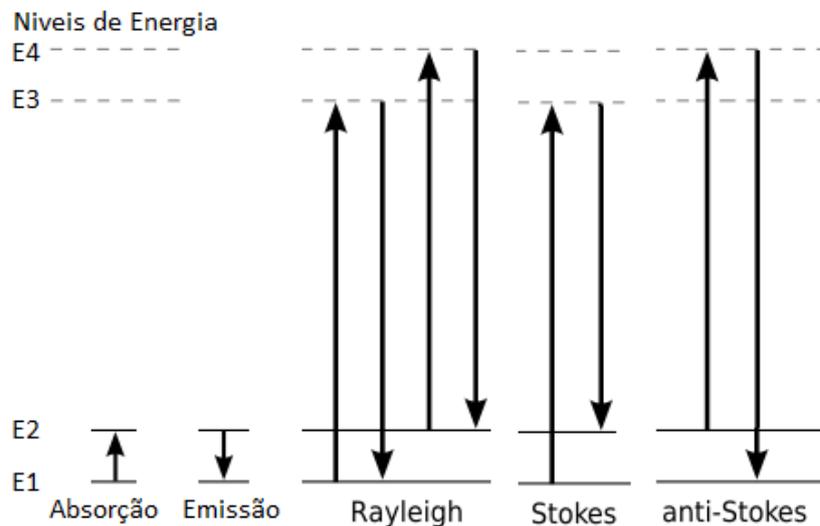


Figura 2.1: Ilustração do Espalhamento Estimulado de Raman.

Assim dá-se o nome de Espalhamento Raman ao espalhamento que gera as frequências Stokes ou Anti-Stokes.

2.1.2 Ganho Raman

O ganho Raman representa uma amplificação óptica derivada do espalhamento estimulado de Raman. Este pode ocorrer em meios sólidos transparentes, é o caso das fibras ópticas por exemplo, líquidos ou gases sob a influência de um bombeio intenso de luz. Este efeito é utilizado em amplificadores e lasers Raman. Sua magnitude depende da diferença entre a frequência do bombeio e do sinal e das características físicas, como atenuação e área efetiva, do meio.

A relação da potência do comprimento de onda do sinal com a distância e a potência de bombeio podem ser descritas pelas equações acopladas a seguir [16]:

$$\frac{\partial P_s}{\partial z} = \frac{g_R}{A_{eff}} P_b P_s - \alpha_s P_s \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial P_b}{\partial z} = -\frac{\lambda_b}{\lambda_s} \frac{g_R}{A_{eff}} P_b P_s - \alpha_p P_b \quad (2.2)$$

Onde P_b e P_s são as intensidades ópticas e λ_b e λ_s os comprimentos de onda para bombeio e sinal, respectivamente; g_R é o coeficiente do ganho Raman, que é da ordem de $10^{-13} m^{-1} W^{-1}$ para fibras de sílica; A_{eff} representa a área efetiva da fibra; α_p e α_s são os coeficientes de atenuação do meio para os comprimentos de onda do bombeio e sinal, respectivamente. Evidentemente que outros termos podem ser acrescentados à equação, por exemplo, quando mais de um sinal e bombeio se propagam na fibra ou quando deseja-se expressar o resultado de outros efeitos físicos da propagação da luz.

As equações evidenciam que a potência no comprimento de onda de sinal tem um ganho cujo coeficiente é dado por $\frac{g_R}{A_{eff}} P_b$ onde o comprimento de onda de bombeio perde parte da sua energia. Este fato ocorre porque um fóton do bombeio é convertido em um fóton de sinal, com menor energia, e um fônon. O fônon corresponde à diferença de energia dos fótons. Assim, a perda de energia óptica é convertida em calor ou vibração para a estrutura atômica do meio material.

O coeficiente de ganho Raman depende, então, da diferença das frequências ópticas. A Figura 2.2, mostra o ganho Raman normalizado para sílica em função da diferença de frequência, assumindo-se polarização linear igual para ambos os sinais. Nota-se um ganho Raman máximo na faixa de deslocamento em torno de $13,2 THz$. Com isso, por exemplo, um bombeio com comprimento de onda de $1064 nm$ fornecerá um ganho maior à um sinal de $1164 nm$. Os picos no espectro de Raman correspondem à modos de vibração específicos da estrutura de sílica.

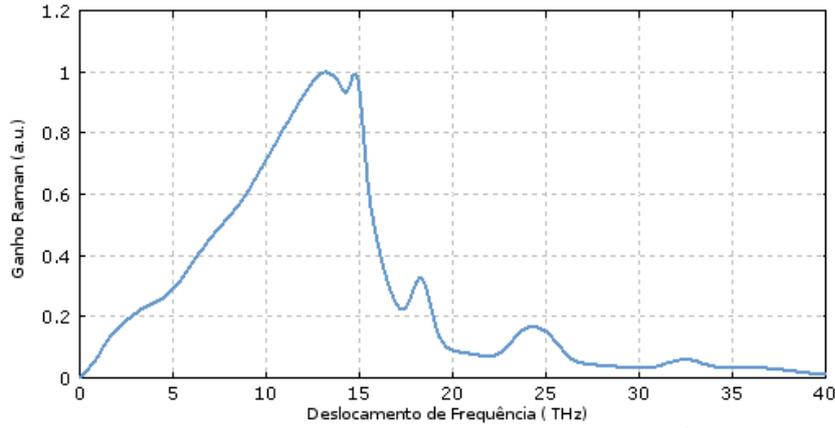


Figura 2.2: Espectro de ganho Raman para sílica. O dado no eixo horizontal é a diferença de frequência entre o sinal e do bombeio.[1]

2.1.3 Ruído em Amplificadores Raman

A figura de ruído (*noise figure*, NF) de um amplificador hipotético colocado após o DRA, com ganho G_d representa a NF efetiva deste DRA (NF_{eff}), como ilustrado na Figura 2.3. Considera-se o ruído de batimento do sinal para a emissão espontânea e o ruído (balístico) e NF pode ser expressa por [17] :

$$NF_{eff} = NF e^{\alpha_s l} = \frac{2P_{ASE}}{h\nu\Delta\nu G_d} + \frac{1}{G_d} \quad (2.3)$$

A NF_{eff} está relacionada com a figura de ruído NF de acordo com a expressão utilizada para o cascadeamento de figuras de ruído [18]. Na equação (2.3) o termo $h\nu\Delta\nu$ representa o ruído balístico onde h é a constante de Plank e $\Delta\nu$ a largura de banda do ruído, e P_{ASE} se refere à potência da emissão espontânea amplificada (*Amplified Spontaneous Emission*, ASE) na saída. A P_{ASE} é descrita por, [17]:

$$\frac{\partial P_{ASE}}{\partial z} = gP_p P_{ASE} + 2h\nu_m(N_{phon} + 1)\Delta\nu - \alpha(\nu_m)P_{ASE} \quad (2.4)$$

Onde:

$$N_{phon} = \frac{1}{e^{h(\nu_p - \nu_s)/kT} - 1} \quad (2.5)$$

Na equação (2.5), N_{phon} corresponde à população de fônons na temperatura finita T dada em unidade kelvin, ν_s e ν_p são as frequências ópticas do sinal e bombeio respectivamente e k é

a constante de Boltzman. A Figura 2.3 apresenta esta representação hipotética do amplificador em fibra.

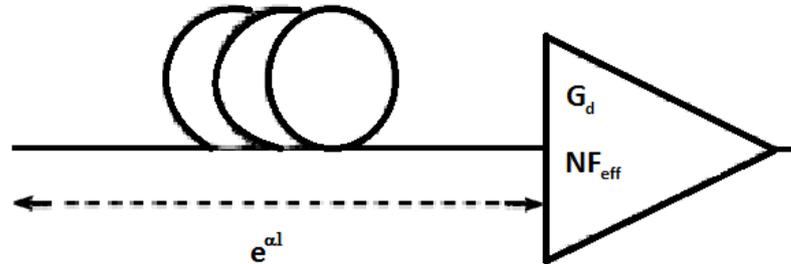


Figura 2.3: Representação de um DRA como uma fibra de transmissão seguida de um pré-amplificador.

A partir deste modelo de figura de ruído equivalente é possível encontrar valores negativos para NF_{eff} desde que o ganho seja grande o suficiente. Os valores negativos correspondem a melhora no desempenho da figura de ruído do sistema em relação a uma configuração sem o amplificador. Este resultado não indica que o amplificador distribuído subtrai ruído do sinal. Na verdade, ele mostra a figura de ruído que um amplificador discreto no final da fibra deveria possuir para que seu desempenho se iguale ao amplificador distribuído. De fato, o DRA apresenta desempenho que o amplificador teórico discreto. A figura de ruído equivalente é inversamente proporcional a relação sinal ruído óptico (*Optical Signal to Noise Ratio*, OSNR), de forma que se NF_{eff} for reduzida por 1 dB, a OSNR vai melhorar em 1 dB.

2.1.4 Configurações para Amplificadores Raman

Configuração Co-propagante

Pode-se visualizar na Figura 2.4 a configuração de um amplificador, no qual, os lasers de bombeio estão no início da fibra óptica e se propagam no mesmo sentido do sinal. Nesta configuração o processo de amplificação do sinal ocorre principalmente no começo da fibra, onde, os valores de potência de bombeio são mais elevados.

Esta configuração tem duas limitações, a primeira devido às potências elevadas no início da fibra, o que aumenta a possibilidade de ocorrerem os efeitos não lineares sobre o sinal. A segunda é que oscilações da fonte de bombeio são transferidas com maior eficácia para os sinais.

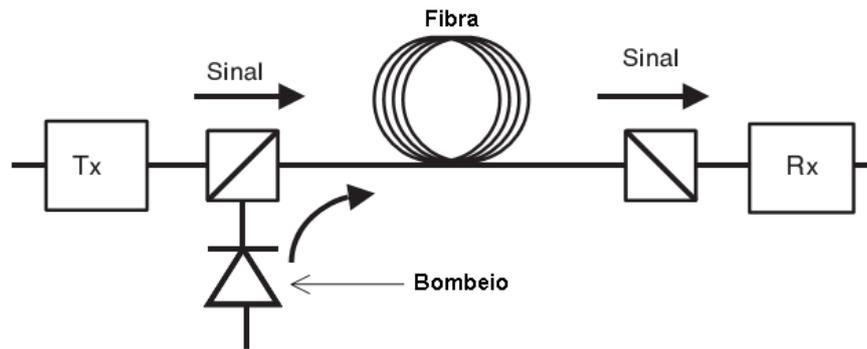


Figura 2.4: Amplificador Raman com bombeio co-propagante.

Configuração Contra-propagante

No modelo de amplificador contra-propagante, Figura 2.5, os lasers de bombeio são posicionados no final da fibra óptica, de forma que sua propagação ocorre no sentido oposto ao do sinal. Isto implica que a maior parte da transferência de energia, na amplificação, ocorrerá mais próximo do final da fibra, onde a potência dos bombeios é maior.

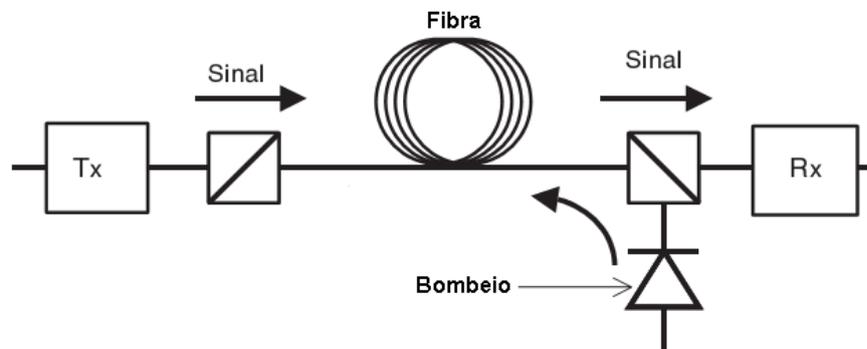


Figura 2.5: Amplificador Raman com bombeio contra-propagante.

Uma vantagem desta configuração é que o sinal recebe energia quando já possui baixa potência e significa que na propagação da fibra este sinal não terá valor elevado, o que poderia gerar efeitos não lineares indesejados na fibra [19]. Entretanto, o ruído será amplificado no final da fibra mais próximo ao receptor o que pode piorar a relação entre sinal e ruído óptico (OSNR).

Configuração Bi-direcional

Na configuração da Figura 2.6 os bombeios são aplicados em ambas as extremidades da fibra fazendo com que a amplificação ocorra próxima a esses pontos.

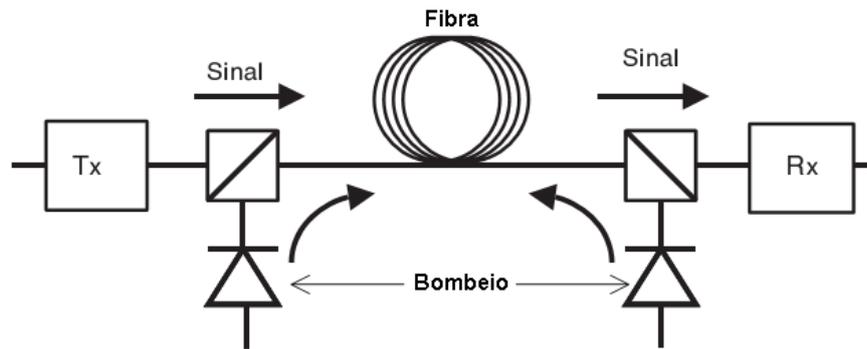


Figura 2.6: Amplificador Raman com bombeio bi-direcional.

Esta configuração tem as vantagens de ambas as configurações nela aplicadas, entretanto é necessário escolher a relação dos bombeios e dos sinais para se obter as combinações desejadas. O problema deste modelo é o custo, que cresce, devido a utilização de mais lasers de bombeio.

2.2 Amplificadores a Fibra Dopada com Érbio

Os EDFAs são amplificadores ópticos amplamente aplicados em comunicações ópticas e são os amplificadores em fibra mais utilizados quando se trata de sistemas comunicação óptica de longa distância. Isso porque sua eficiência de ganho na faixa de 1500 nm é alta. Tendo sua aplicação e experimentos publicados no final da década de 80 estes amplificadores conquistaram o mercado e fazem parte de grandes redes intercontinentais ópticas [20].

Sua configuração, no que se refere a esquemas de bombeio, se assemelha às configurações dos amplificadores Raman onde um ou mais bombeios são aplicados em uma ou ambas as direções. Contudo eles se diferenciam por utilizar como meio de amplificação uma fibra dopada com elemento terra-rara, neste caso íons de Érbio (Er^{3+}), que são excitados com bombeios de 980 nm ou 1480 nm. Assim, sinais dentro da região de 1500 nm são amplificados via emissão estimulada quando os íons excitados pelo bombeio retornam ao estado original.

Essa tecnologia tem diversas aplicações no sistema, onde pode-se citar [21]:

- Amplificador de potência, ou seja, um alto ganho na transmissão de informação logo no início do enlace.
- Em sistemas que utilizam divisores de fibra óptica, elementos que tem alta perda por dividirem o sinal para vários destinos.
- Também como pré-amplificador utilizado na recepção de sinais que chegam muito fracos.

- No meios de longos enlaces, como amplificador de linha, impedindo que a potência óptica diminua para níveis muito baixos tornando a relação sinal ruído óptico degradada e diminuindo a potência de transmissão necessária.

As equações de propagação de potência (2.6) e (2.7) são referentes ao bombeio e ao sinal, respectivamente [20]. São representações de um modelo simplificado que define a interação da luz dentro de uma fibra dopada com érbio. Neste modelo as ondas estão expressas na dimensão z com potência P . N_1 e N_2 são as taxas de inversão de população de íons excitados entre dois estágios. A emissão dentro de uma seção da fibra, representada como σ , a atenuação é α e Γ é o fator de sobreposição do modo para uma distribuição de íons de érbio. Todas estas variáveis contem um marcador p ou s que indica se ela é referente ao bombeio ou sinal.

A equação 2.8 demonstra o ruído gerado no amplificador para uma frequência ν_j em ambas as direções de propagação do eixo z .

$$\frac{dP_p}{dz} = (N_2\sigma_p^e - N_1\sigma_p^a)\Gamma_p P_p - \alpha_p^{a0} P_p \quad (2.6)$$

$$\frac{dP_s}{dz} = (N_2\sigma_s^e - N_1\sigma_s^a)\Gamma_s P_s - \alpha_s^{a0} P_s \quad (2.7)$$

$$\frac{dP_A^\pm(\nu_j)}{dz} = \pm \left(N_2\sigma_{\nu_j}^e - N_1\sigma_{\nu_j}^a \right) \Gamma_s P_{\nu_j}^\pm \pm N_2\sigma_{\nu_j}^e \Gamma_s h\nu_j \Delta\nu_j \mp \alpha_{\nu_j}^{a0} P_{\nu_j}^\pm \quad (2.8)$$

A partir destas 3 equações pode-se identificar que a taxa de inversão de população, o comprimento da fibra, o comprimento de onda do bombeio e dos sinais e suas potências são os parâmetros de maior relevância para o EDFA. Com a potência dos sinais de saída e entrada define-se o ganho do amplificador. Da relação entre a potência dos bombeios e sinais encontra-se a eficiência do amplificador (*Power Conversion Efficiency*, PCE), na Equação 2.9, [22]:

$$PCE = \frac{P_{out} - P_{in}}{P_{pump}} * 100\% \quad (2.9)$$

Sendo P_{out} e P_{in} a soma das potências de todos os sinais de saída e entrada, respectivamente, e P_{pump} a potência do bombeio injetada. Já com os valores de potência de ruído pode-se definir a *OSNR* e a *NF*. Em que a figura de ruído (*NF*) vem da relação entre a *OSNR* de entrada e a *OSNR* de saída.

2.3 Amplificadores Híbridos

No desenvolvimento de amplificadores híbridos (*Hybrid Amplifiers*, HA), tratando da combinação do amplificador em fibra dopada com érbio (EDFA) com o amplificador Raman distribuído (DRA), encontra-se na literatura [4] a separação de dois tipos de HA. O amplificador híbrido de banda estreita (*narrowband hybrid amplifier*, NB-HA) e o amplificador híbrido de banda larga contínua (*seamless wideband hybrid amplifier*, SWB-HA). Esta diferenciação, proposta por H. Masuda [23], ajuda a definir estratégias de projeto e configuração do amplificador com base nos benefícios e limitações que cada tipo oferece.

O NB-HA tem uma amplificação com menor ruído e focada em uma banda específica C (Convencional, entre 1530 nm e 1565 nm) ou L (Longa, 1565 nm a 1625 nm). Tem por benefício estender o comprimento necessário entre amplificadores. Sua figura de ruído é melhor que a de um enlace com apenas um EDFA. Como atua em comprimentos de onda mais próximos, seus amplificadores individualmente são mais simples. Ou seja o EDFA tem um ou dois estágios e o DRA possui um número menor de lasers de bombeios.

Já o SWB-HA objetiva atender uma maior banda e, por consequência, comportar um maior número de canais em um enlace. Pelo uso comercial já difundido do EDFA na banda C, fica como região de amplificação do DRA a banda L e, por vezes, uma pequena parcela da banda C. Como a amplificação de cada módulo está concentrado em uma região, o desempenho deve ser otimizado para que maiores distâncias de enlace seja projetadas com o menor custo. Isso aumenta a complexidade de cada amplificador e seu projeto conjunto.

A faixa de ganho do NB-HA se distribui entre 30 e 40 nm da largura de banda de operação enquanto que o SWB-HA está entre 60 e 80 nm. Isto significa que o SWB-HA permite amplificar número maior de canais WDM de entrada. No Capítulo 5, onde é realizado um estudo de caso, é justamente um SWB-HA que foi simulado, com o EDFA atuando na banda C e o Raman nas bandas C+L com seu ganho concentrado na banda L. A Seção 2.3.1 descreve em detalhes os amplificadores SWB-HA, suas principais características de largura de banda e classificação. A Seção 2.3.2 apresenta algumas figuras de mérito já mencionadas e utilizadas para caracterizar o desempenho dos amplificadores em enlaces de longa distância.

2.3.1 Amplificador Híbrido de Banda Larga Contínua SWB-HA

Para a fabricação de um amplificador híbrido basta combinar em série amplificadores que atuem em uma larga faixa de comprimento de onda, como um EDFA multi-estágio e um DRA

com múltiplos bombeios. Mesmo assim a faixa de amplificação fica limitada pelo EDFA ou DRA, de modo que, para que ambos estejam aptos a atuar nas bandas C+L os custos dos componentes pode se tornar alto.

Nesta Seção o SWB-HA é descrito como uma estrutura simples com poucos componentes ópticos. A principal característica deste HA são os espectros de ganho de inclinação oposta que cada amplificador apresenta. Ou seja quanto maior o ganho do EDFA menor o ganho do amplificador Raman. Para melhor entender esta característica podemos ilustrar a composição de ganho conforme a Figura 2.7. Nota-se que a composição dos ganhos dentro do amplificador resulta da soma individual dos ganhos, expressa em dB, dentro de uma faixa de comprimento de onda.

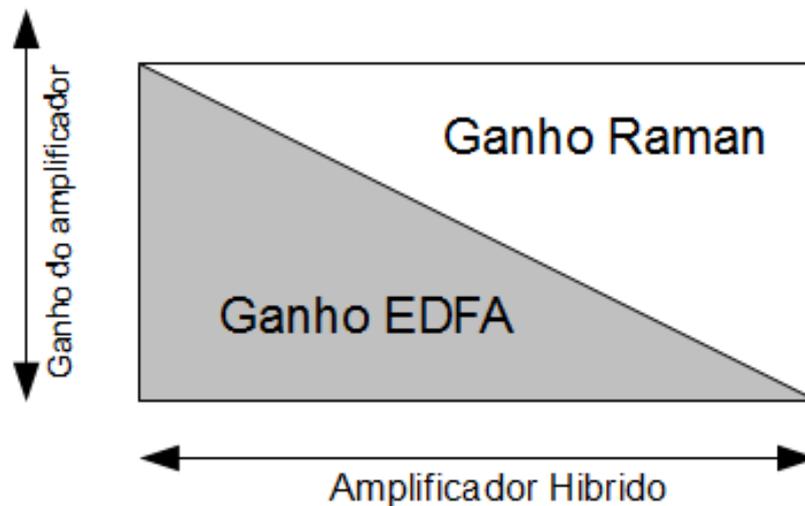


Figura 2.7: Distribuição de ganho entre os amplificadores que compõem o HA.

H. Masuda define em [23] uma classificação para SWB-HA dividida em 4 tipos de acordo com o ganho Raman e o tipo de ganho. Convenciona tipo 1 o SWB-HA com pequeno ganho Raman vindo de um DRA; tipo 2 é o SWB-HA que apresenta grande ganho Raman do DRA; o tipo 3 tem um pequeno ganho Raman em um CRA; e o tipo 4 tem um valor ganho Raman alto em um CRA. A Tabela 2.1 auxilia a entender esta divisão. A seguir mais características dessa classificação são apresentadas.

Tabela 2.1: Classificação dos SWB-HA

| Ganho Raman | Distribuído | Concentrado |
|-------------|-------------|-------------|
| Pequeno | Tipo 1 | Tipo 3 |
| Grande | Tipo 2 | Tipo 4 |

Primeiro, o Tipo 1, seu ganho é determinado principalmente pelo EDFA que deve possuir

mais de um estágio ou laser de bombeio. Neste tipo o EDFA é o elemento que cobre a maior parte da banda de transmissão com seu ganho. O espectro da figura de ruído efetiva é determinado tanto pela NF efetiva do DRA e a NF do EDFA. Sua primeira fabricação e utilização [24] data de 1997 com 67 nm de largura de banda amplificada com 20 dB de pico de ganho e utiliza um equalizador de ganho, um filtro Mach-Zehnder [25].

Em seguida, o Tipo 2, por sua vez tem o ganho determinado pela combinação do DRA e do EDFA e sua figura de ruído é definida, principalmente, pelo amplificador Raman que utiliza a fibra de transmissão como meio de amplificação. Sua aplicação pode dispensar o equalizador de ganho, já que o DRA pode ser projetado para minimizar o *ripple*. Este modelo foi simulado neste trabalho e os resultados são apresentados no Capítulo 5.

O Tipo 3 utiliza um CRA e um EDFA com dois estágios e um equalizador de ganho intermediário. O Raman usa como meio uma fibra com compensação de dispersão (*Dispersion Compensating Fiber*, DCF), onde a figura de ruído é determinada pelo primeiro estágio do EDFA e o ganho pelo segundo estágio. Um experimento com 75 nm de banda de amplificação e 19,8 dB de pico de ganho foi apresentado por S. Kawai em [26].

E por fim, o Tipo 4 tem um CRA com dois estágios e um EDFA com um estágio. O espectro da figura de ruído é composto pela soma dos espectros de ambos os amplificadores e o CRA em dois estágios fornece um alto ganho Raman. O CRA tem maior complexidade, com bombeios bidirecionais nos dois estágios. Seu pico de ganho supera o Tipo 3 e chega a 28.1 dB para uma largura de banda de 80 nm.

2.3.2 Análise de Amplificadores Híbridos

Além dos méritos mencionados anteriormente, como largura de banda e ganho do amplificador, existem outros fatores que influem na qualidade de um amplificador híbrido. Na análise de estado estacionário utilizamos o fator de *ripple*, o ganho sem perdas ($Ganho_{On-Off}$), o número de lasers de bombeio, a relação sinal ruído óptico e a figura de ruído.

A diferença entre o valor da maior e menor potências de saída dos sinais na banda amplificada, denomina-se *ripple*, que pode ser traduzido como ondulação. Este parâmetro é importante na análise de HA pois indica se algum sinal, de um conjunto WDM transmitido, não possui ganho suficiente para compor o conjunto sem adição de um filtro que nivele a potência. Quando o *ripple* é alto, maior que 3 dB por exemplo, significa que um sinal chega com o dobro de potência de outro. Esta diferença de potência é prejudicial para a detecção no receptor e pode ocasionar em efeitos de interferência entre canais.

O ganho sem perdas, ou $Ganho_{On-Off}$, representa o ganho do amplificador descontando-se as perdas por atenuação do enlace. É um fator que indica o quanto de potência é transferida do bombeio para o sinal. Fornece, portanto, a eficiência do amplificador. Como existem diferentes fabricantes de fibra e comprimentos de enlace, esse se torna um valor que independe do enlace.

O número de lasers de bombeio implica diretamente em complexidade e custo do amplificador. Quanto mais lasers de bombeio o amplificador possuir, mais fácil é compor um conjunto de ganho e *ripple* ideal. Contudo, isso também implica em maior custo de fabricação e complexidade da placa controladora e fonte de alimentação do amplificador.

A relação sinal ruído óptico (*OSNR*) representa a proporcionalidade entre o sinal e o ruído de sinal dentro de uma largura de banda. Definida por $OSNR(dB) = P_{sinal} - P_{ruído}$, esta grandeza varia de acordo com o enlace e o ruído adicionado pelos amplificadores.

Por fim, a figura de ruído (*NF*), já mencionada na Seção 2.1.3, para o DRA, também é uma figura de mérito do HA. A *NF* contribui para entender o impacto do conjunto *DRA + EDFA* na *OSNR* do sistema e, caso existam vários amplificadores em cascata, pode determinar o desempenho do HA.

Assim, os amplificadores Raman podem ser compostos por bombeios, em diferentes frequências e potências, e o EDFA pode ter concentração de íons e comprimento de fibra ajustados. Então, os fatores expostos são utilizados para determinar o projeto do HA. Nota-se que são múltiplos fatores de construção e mérito que determinam a qualidade dos amplificadores. Para se alcançar melhores desempenhos são empregadas diversas técnicas de simulação multi-objetivo como Algoritmo Genético (GA) [27] ou Enxame de Partículas (PS) [28], o que torna o projeto de tais amplificadores uma tarefa complexa e tema fértil de pesquisas. Como a reciclagem do resíduo de potência dos lasers de bombeio do amplificador Raman para utilização no amplificador EDFA [29].

2.4 Conclusão

Neste Capítulo foi abordado alguns conceitos básicos de amplificadores ópticos, focando-se nos amplificadores em fibra óptica Raman e EDFA. Sobre o amplificador Raman, apresentou-se o principal conceito por trás do seu funcionamento o *SRS*. Em seguida, o conceito de ganho Raman, figura de ruído efetiva e as principais configurações de montagem de um amplificador Raman. Sobre o EDFA, descrito na sequência, pontuou-se suas características e principais equações que parametrizam o ganho e a *NF*. Por fim, o conceito de amplificador híbrido, sua classificação e as principais figuras de mérito do HA foram descritas.

3 *Modelos Para Simulação dos Amplificadores*

Os amplificadores descritos no Capítulo 3.2 foram implementados, ao longo das últimas décadas, em soluções computacionais que simulam os efeitos da amplificação óptica. Para o DRA, no LABTEL, foram implementados códigos de solução analítica [11] e numérica para estado estacionário, ou seja onda contínua, e também um código numérico para análise de sinais contendo informação [6]. No caso do EDFA, também existem modelos testados dentro do LABTEL [7], contudo optou-se por utilizar o *OptiSystem 7.0* [30], um software comercial conhecido. Isto porque no caso de estudo, Capítulo 5, o EDFA não seria otimizado e deveria representar um amplificador comercial encontrado em enlaces WDM da banda C.

Apresenta-se, a seguir, os modelos utilizados no estudo de caso. Na Seção 3.1.1 tem-se a equação do modelo numérico de onda contínua, na Seção 3.1.2, a equação do modelo analítico de Amplificador Raman e no final da Seção 3.1 explica-se como ambos os modelos são utilizados em conjunto. Já na Seção 3.2 descreve-se o modelo utilizado pelo software *OptiSystem* e os principais parâmetros de entrada e saída.

3.1 Modelos para Amplificadores Raman

O modelo numérico considera muitos efeitos de atenuação e de não-linearidade envolvidos na propagação ao longo da fibra e no processo de amplificação, enquanto o modelo analítico desconsidera alguns desses fatores. Assim, o modelo numérico apresenta uma resposta mais precisa, enquanto o analítico permite obter uma resposta mais rápida. É importante ressaltar que estes modelos são aplicados tanto para o DRA quanto para o CRA, bastando modificar os parâmetros relativos à fibra do enlace.

3.1.1 Modelo Numérico para Ondas Contínuas de Amplificadores Raman

Para a criação de um algoritmo foram utilizadas, como base, as equações acopladas de estado estacionário [16]. Este modelo foi estendido na intenção de trabalhar com sinais e bombeios múltiplos.

$$\begin{aligned}
\frac{\partial P_v^\pm}{\partial z} &= \mp \alpha_v P_v^\pm \pm \varepsilon_v P_v^\mp \\
&\pm P_v^\pm \sum_{\mu > \nu} \frac{C_{R\mu\nu}}{\Gamma} \cdot (P_\mu^+ + P_\mu^-) \\
&\pm 2h\nu B_e \sum_{\mu > \nu} \frac{C_{R\mu\nu}}{\Gamma} \cdot (P_\mu^+ + P_\mu^-) \cdot [1 + \eta(T)] \\
&\mp P_v^\pm \sum_{\mu < \nu} \frac{\omega_\nu}{\omega_\mu} \frac{C_{R\mu\nu}}{\Gamma} \cdot (P_\mu^+ + P_\mu^-) \\
&\mp P_v^\pm \sum_{\mu < \nu} \frac{\omega_\nu}{\omega_\mu} \frac{C_{R\mu\nu}}{\Gamma} \cdot [1 + \eta(T)] 4h\mu B_e
\end{aligned} \tag{3.1}$$

Identificamos na equação 3.1 as seguintes representações de variáveis: P_ν e P_μ que são as potências nas frequências ópticas ν e μ respectivamente; os sinais sobre-escritos $+$ e $-$ indicam a propagação na direção de z positivo e negativo, respectivamente; $C_{R\mu\nu} = g_{\mu\nu}/Aeff_\mu$ é a eficiência de ganho Raman, apresentada na seção 2.1.2, entre as frequências μ e ν , e $g_{\mu\nu}$ é o ganho Raman na frequência ν devido ao bombeio na frequência μ ; $Aeff_\mu$ é a área efetiva da fibra óptica na frequência μ , $h\nu B_e$ é a potência de ruído devido à emissão espontânea (ASE) gerada em uma banda B_e em torno da frequência ν ; h é a constante de *Planck*, logo $h\nu$ é a energia média dos fótons; T é a temperatura da fibra e $\eta(T)$ corresponde a população de fônons.

A equação 3.1 é uma equação geral a partir da qual se obtém uma expressão para cada comprimento de onda. Assim, monta-se o conjunto de equações que serão capazes de simular a propagação de potências de sinais no meio óptico. Este conjunto de equações consiste em um Sistema de Equações Diferenciais Ordinárias (*System of Ordinary Differential Equations*) no qual tem-se um Problema com Condições de Contorno (*Boundary Value Problem*). Em [12] foi apresentado um estudo de tais métodos aplicados a simulação de amplificadores Raman.

3.1.2 Modelo Analítico de Amplificadores Raman

O modelo analítico [8] foi desenvolvido visando gerar um código computacional de resposta mais rápida, mas ainda capaz de obter uma resposta confiável, desde que não ocorra saturação de ganho, mesmo que desconsiderando alguns dos efeitos que afetam o valor final da amplificação.

$$\begin{aligned}
P_\rho(z) &= P_\rho(L) \exp[-\alpha(L-z)] \\
&\exp\left[\sum_{\psi>\rho} \left[A(\rho, \psi) \frac{1 - \exp[\Lambda(z)B(\psi, \varphi)]}{B(\psi, \varphi)}\right]\right] \\
&\exp\left[\sum_{\psi<\rho} \left[\frac{-\rho}{\psi} A(\rho, \psi) \frac{1 - \exp[\Lambda(z)B(\psi, \varphi)]}{B(\psi, \varphi)}\right]\right]
\end{aligned} \tag{3.2}$$

Na equação 3.2 há as seguintes variáveis $A(\rho, \psi) = C_{R,\rho\psi}P_\psi(L)$, $\Lambda(z) = -(1 - \exp[-\alpha(L-z)])/(\Gamma\alpha)$ e $B(\psi, \varphi) = \sum_{\psi<\rho} \psi C_{R,\rho\psi}P_\varphi(L)/\varphi - \sum_{\psi<\rho} C_{R,\rho\psi}P_\varphi(L)$. Nos quais P_n é um sinal ou bombeio, C_R é o coeficiente de ganho Raman, α é o coeficiente de atenuação da fibra e Γ é o fator de polarização.

Nesta rotina não são considerados os efeitos de ruído ASE e o retro-espalhamento duplo de Rayleigh (DRS). Também, as interações de troca de energia entre bombeios e entre sinais, não são computados. Portanto o número de bombeios, sinais e suas potências tem maior limitação para manter-se a aproximação desejada para simulação. O valor total da potência, somados todos os lasers de bombeio não deve superar 1,5 *watts*.

3.1.3 Modelo Unificado

As equações que modelam o efeito Raman são equações diferenciais, ou seja, dimensionam a potência de um comprimento de onda, suas potências espalhadas e o ruído no espaço linear z . Estas equações tem condições de contorno que limitam sua variação. Por exemplo as potências espalhadas só aparecem, no caso tem valor diferente de zero, quando os sinais e bombeios começarem a se propagar no meio. Assim sendo é importante durante a simulação garantir que estas condições sejam atendidas.

Também no modelo contra-propagante, no qual o bombeio é inserido no final da fibra (Seção 2.1.4), é muito difícil prever qual será o valor do bombeio no início da fibra, uma vez que depende da solução do sistema de equações para se aproximar desse valor.

Então, justamente para melhorar a solução inicial do sistema de equações, utilizou-se o Modelo Analítico para se aproximar do valor inicial dos bombeios na simulação com configuração contra-propagante. Assim, o algoritmo ficou mais rápido, pois gasta menos iterações para encontrar uma solução inicial que atenda as condições e tem menor possibilidade de encontrar soluções para as quais o resultado não converge a um determinado valor.

Na Figura 3.1 encontra-se um resumo dos modelos apresentados anteriormente, com suas

limitações e resultados obtidos.

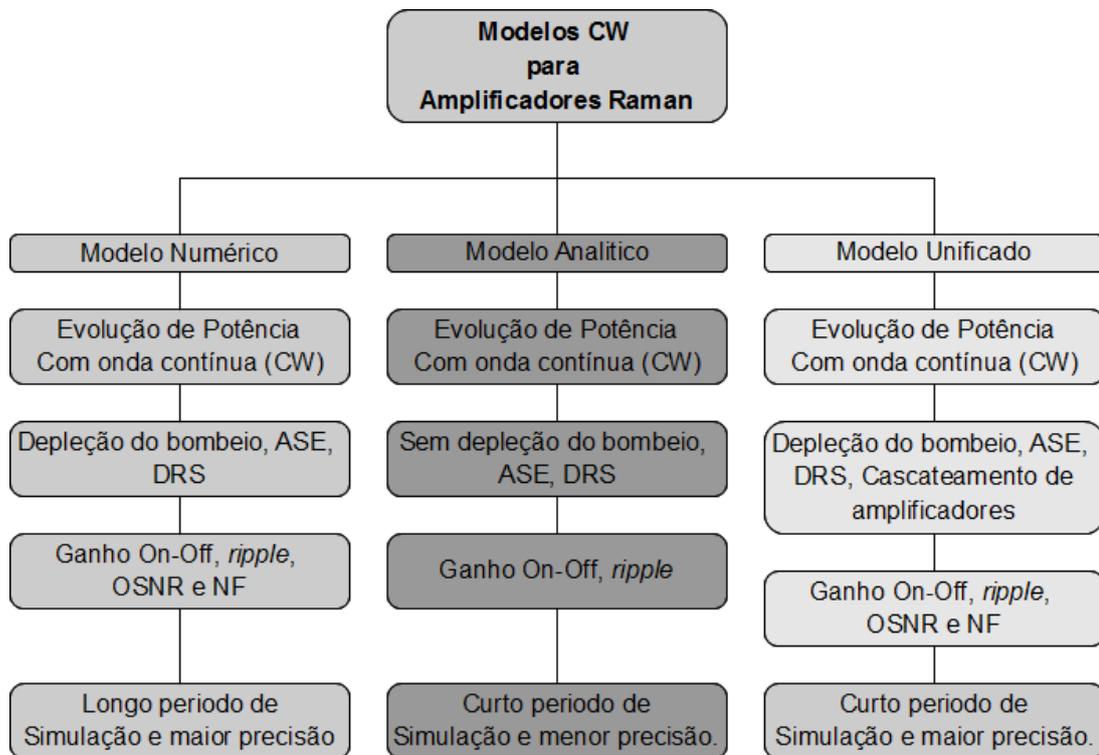


Figura 3.1: Modelos de Onda Contínua para Amplificadores Raman.

3.2 Modelo EDFA do software *OptiSystem*

Os modelos de EDFA implementados dentro do software *OptiSystem*, seguem a linha de modelagem proposta por C. R. Guiles e E. Desurvire [31]. Estão disponíveis:

- Solução numérica das taxas de propagação dentro de condições estacionárias. Um modelo que inclui amplificação de emissão espontânea (ASE) e permite selecionar uma configuração de propagação e a potência do laser de bombeio [31].
- Solução numérica que simula o sinal e os bombeios variando no tempo, chama-se modelo dinâmico completo. Soluciona-se as equações de taxa e propagação nos domínios espacial e temporal. As potências e a densidade populacional são calculadas como uma função variada no tempo para cada ponto de comprimento da fibra óptica dopada. Este modelo é utilizado para o cascadeamento de fibras dopadas com érbio e múltiplos sinais de entrada [32].
- A solução caixa preta (*Black Box*) simula EDFAs com lasers de bombeio em 980 nm or 1480 nm. Utiliza-se a caracterização experimental de um dispositivo como o espectro de

ganho e a figura de ruído nas condições não saturado e saturado. Os fatores de construção da fibra e dos componentes do amplificador não são necessários para realizar a simulação [33].

- Já a solução analítica possibilita simular a resposta dinâmica da fibra dopada com érbio para potências de entrada que variam no tempo. Contudo, em contraste com o modelo dinâmico completo a ASE é desconsiderada. Negando a amplificação de emissão espontânea as equações podem ser resolvidas analiticamente. Uma aproximação adicional, que considera a população de nível elevado constante para as equações de propagação, é utilizada para incluir os efeitos da ASE no comportamento do amplificador. Assim, os resultados são obtidos de maneira rápida mas com menor precisão [34].

Para o estudo de caso (Capítulo 5) utilizou-se uma solução numérica de estado estacionário. Nela assume-se uma aproximação para um sistema de dois níveis (N_1 e N_2) e as equações de taxa são baseadas no nível do diagrama de energia. As equações apresentadas na Seção do Capítulo são adotadas para este modelo. É possível adotar uma configuração co-propagante, contra-propagante ou bi-direcional para o posicionamento dos lasers de bombeio. Também é possível selecionar o comprimento de onda e a potência destes lasers. Os parâmetros geométricos da fibra dopada com érbio como comprimento, densidade de íons, área do núcleo e perdas são necessários. O ganho do amplificador, as potências de saída do sinal e a figura de ruído são os resultados obtidos nesta simulação.

3.3 Conclusão

Este Capítulo apresentou as principais equações implementadas computacionalmente. Para o amplificador Raman tem-se dois modelos de simulação, o modelo numérico e o analítico. O primeiro permite analisar com mais detalhes a operação do DRA. Já o segundo, por ser mais rápido, permite uma aplicação de ferramentas de otimização de multi-parâmetros. O modelo do *OptiSystem* permite otimizar o EDFA para bandas *C* e *L*. Neste trabalho foi considerado uma solução prática de aplicação para enlaces WDM na banda *C*.

4 *Reestruturação dos Códigos para Amplificadores Raman*

No Capítulo 3 foram descritos alguns modelos implementados computacionalmente. Contudo, estes códigos desenvolvidos tinham por objetivo simular alguns experimentos e sua lógica de programação não visava reduzir o tempo de processamento nem simplificar a metodologia de projeto de um novo amplificador. Como o número de canais simulados em uma fibra tem crescido, o tempo de processamento também se elevou. Isso dificultou a utilização de rotinas de busca exaustiva por um conjunto de comprimentos de onda para os bombeios e o desenvolvimento de simulações mais complexas envolvendo diferentes tipos de fibra, outros amplificadores e até o cascadeamento de enlaces.

Como primeiro passo para abordar o projeto de amplificadores híbridos foi necessário alterar os códigos numérico e analítico de onda contínua de amplificadores de forma a reduzir o tempo de execução de uma rotina. Assim foi alterada toda a lógica de programação para uma estrutura orientada a objetos e as funções de maior utilização, principalmente nas soluções numéricas, foram pré-compiladas em linguagem *C*. Isso, não só alterou o tempo de solução, como também permitiu que um maior número de variáveis fossem computadas em uma única solução. Assim o código pode analisar ambientes com um maior número de canais e bombeios, bem como realizar *loops*, múltiplos circuitos, buscas aleatórias, análises exaustivas e utilizar diversos métodos de otimização.

Será abordado na Seção 4.1 a interface gráfica desenvolvida utilizando a ferramenta GUI do MATLAB. Em seguida na Seção 4.2 descreve-se o banco de dados acrescentado aos códigos, que contém as constantes de fibras ópticas de diversos fabricantes que foram disponibilizadas para as simulações. Já na seção 4.3 é apresentado um módulo que contém basicamente uma variável aleatória aplicada ao fator de polarização para contemplar a análise de sistemas que são sensíveis à polarização da luz. É o caso observado em amplificadores Raman que não possuem despolarizadores na saída dos lasers de bombeio. Por fim, na Seção 4.4, tem-se a descrição da função de enlace Raman que permitiu a simulação de amplificadores híbridos.

4.1 Interface Gráfica

A interface gráfica desenvolvida cuja a área de trabalho é mostrada na Figura 4.1 permite a simulação de amplificadores Raman com diversos bombeios e utilizando tipos de fibra distintos, que estão disponíveis no banco de dados incluído no simulador. Ela permite também a incorporação de métodos de busca utilizando busca exaustiva ou busca aleatória. Estes métodos de busca auxiliam na escolha dos comprimentos de onda dos bombeios, ponto crucial do projeto do amplificador. Descreve-se, a seguir, as funcionalidades da ferramenta construída.

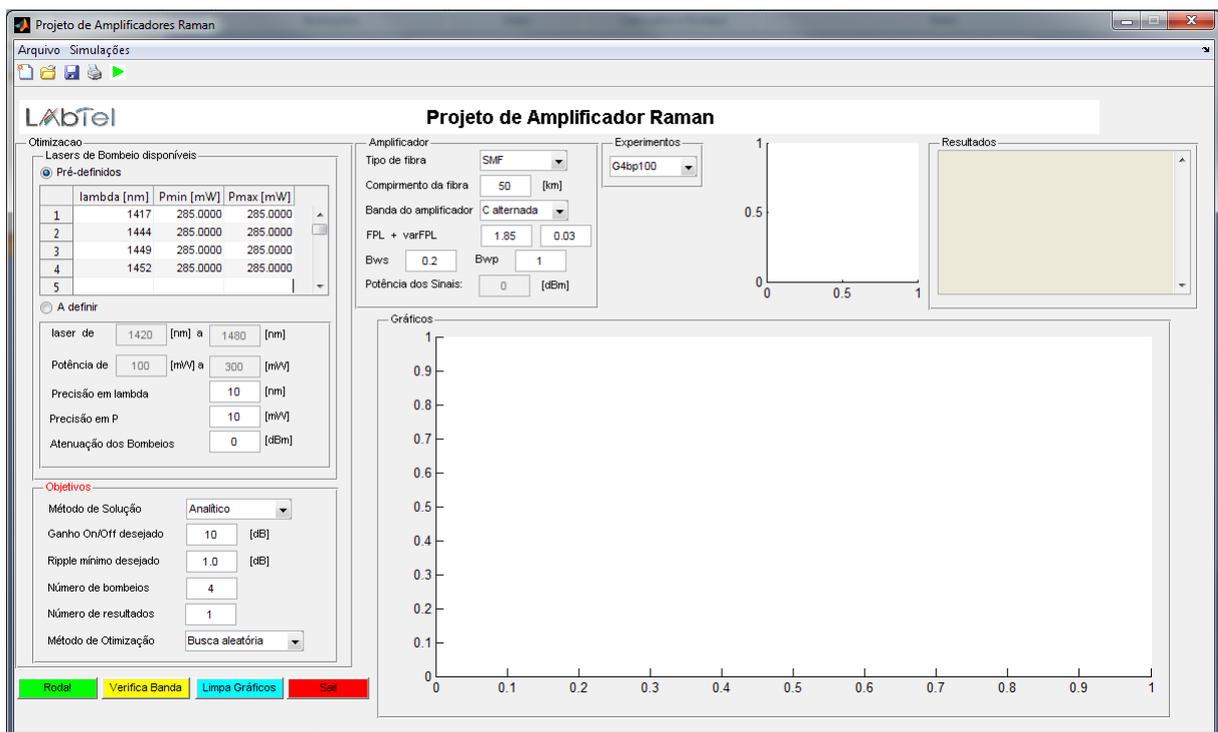


Figura 4.1: Interface gráfica com área de trabalho desenvolvida para a simulação de amplificadores Raman.

4.1.1 Área de Trabalho

A área de trabalho do simulador contém três janelas à esquerda relacionadas aos dados de entrada. A janela de otimização contém dois subgrupos de interface. Um para definir os lasers de bombeio disponíveis para simulação, que podem ser escolhidos individualmente ou definir uma faixa de comprimento de onda onde o algoritmo irá escolher bombeios para realizar a simulação. O outro para colocar a rotina de otimização e os objetivos a serem alcançados nessa otimização, que pode ser efetuada por busca exaustiva ou aleatória.

Abaixo da janela *Objetivos* existem quatro botões com os comandos que o código pode

executar. O comando *Roda!* executa a simulação; *Verifica Banda* exibe uma caixa com o comprimento de onda dos canais; *Limpa Gráficos* simplesmente deixa os gráficos sem dados, já que cada vez que se roda a simulação os dados nos gráficos são acumulados; e o botão *Sai!* encerra o programa.

O restante da área de trabalho é dividida em uma janela *Amplificador* onde escolhem-se os parâmetros do enlace, *Experimentos* contém uma caixa de seleção onde pode se carregar gráficos de experimentos programados, *Resultados* mostra uma caixa de texto que apresenta os dados simulados e *Gráficos* que são duas caixas onde a potência e o *ripple* são plotados.

Nas Subseções a seguir mais detalhes destas janelas e funcionalidades são apresentados.

4.1.2 Ferramentas Básicas

As ferramentas básicas para criar novo projeto, abrir um projeto salvo, salvar, imprimir e rodar uma simulação estão na Figura 4.2. Os ícones foram selecionados tomando por base ícones já conhecidos e amplamente utilizados em interfaces de programas comerciais. A exceção é a execução da simulação que conta com um ícone representado por uma seta verde.

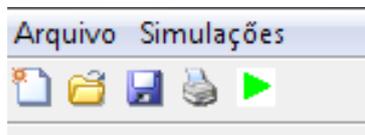


Figura 4.2: Ferramentas básicas dadas na sequência de ícones: Novo, Abrir, Salvar, Imprimir e Executar.

4.1.3 Ferramentas de Projeto do Amplificador

Na Figura 4.3 é mostrada a janela *Objetivos* onde pode-se escolher o método de solução das equações de propagação entre os métodos Analítico e Numérico. Há a opção de inserir os valores de ganho médio e *ripple* ao qual se objetiva aproximar, o número de lasers de bombeio, o número de resultados a serem exibidos nos gráficos e por fim o método de otimização. Existem duas opções disponíveis na caixa de seleção de otimização da interface gráfica. A primeira, denominada *Busca aleatória*, onde conjuntos de potência e bombeio são escolhidos aleatoriamente para serem simulados. Isto facilita a escolha de parâmetros quando o número de opções é muito grande, pois a partir deste chute pode-se refinar a faixa de busca de novos valores. A segunda é a busca exaustiva, no código chamada de *Força Bruta*, que simula todas as combinações de número de lasers, comprimento de onda e potência dos bombeios. Quanto maior a faixa de variação e menor a precisão maior o número de simulações. Essa otimização

se refere à escolha dos lasers de bombeio que é crítico para obter os melhores resultados para os valores de ganho médio e *ripple* para o amplificador.

Objetivos

Método de Solução: Analítico

Ganho On/Off desejado: 10 [dB]

Ripple mínimo desejado: 1.0 [dB]

Número de bombeios: 4

Número de resultados: 1

Método de Otimização: Busca aleatória

Figura 4.3: Definição dos parâmetros de projeto do amplificador.

As ferramentas para o projeto do amplificador conforme, Figura 4.4, estão agrupados na janela específica *Lasers de Bombeio disponíveis* onde se escolhe os parâmetros do amplificador, tais como o comprimento de onda, a potência e as faixas de variação destes valores para a execução de busca exaustiva ou aleatória.

Lasers de Bombeio disponíveis

Pré-definidos

| | lambda [nm] | Pmin [mW] | Pmax [mW] |
|---|-------------|-----------|-----------|
| 1 | 1417 | 285.0000 | 285.0000 |
| 2 | 1444 | 285.0000 | 285.0000 |
| 3 | 1449 | 285.0000 | 285.0000 |
| 4 | 1452 | 285.0000 | 285.0000 |
| 5 | | | |

A definir

laser de: 1420 [nm] a 1480 [nm]

Potência de: 100 [mW] a 300 [mW]

Precisão em lambda: 10 [nm]

Precisão em P: 10 [mW]

Atenuação dos Bombeios: 0 [dBm]

Figura 4.4: Definição dos comprimentos de onda, potência e intervalo de variação das buscas.

Os valores de comprimento de onda ou lambda podem ser escolhidos marcando a opção *Pré-definidos*, onde utiliza-se a tabela para determinar esses valores e potências mínimas e máximas para variação conforme o tamanho do passo determinado da caixa *Precisão de P*. Selecionando a opção *A definir* as caixas *laser de* e *Potência de* ficam habilitadas para edição e nelas são determinadas zonas de variação para comprimento de onda e potência. Assim as determina-

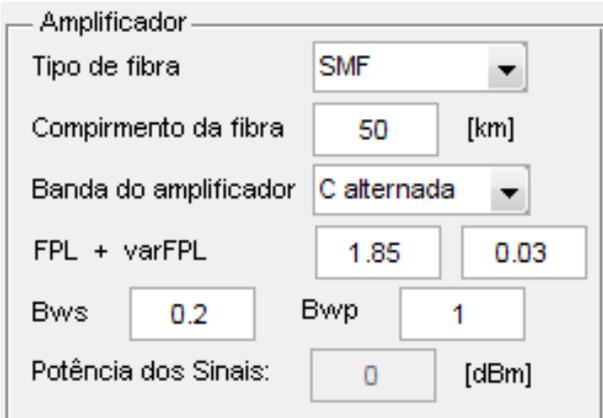
ções de precisão vão delimitar a distância entre dois pontos de iterações diferentes, aumentando a diversidade e controlando o número de combinações possíveis para as simulações.

A última caixa de opção *Atenuação dos Bombeios* representa uma perda de inserção dos bombeios na fibra. Observou-se em experimentos feitos em laboratório uma diferença entre o valor nominal da potência dos bombeios nas fontes de alimentação dos lasers e o valor destes ao entrarem na fibra. Esta atenuação pode ser então considerada na simulação.

4.1.4 Ferramentas de Definição do Enlace

A janela *Amplificador* contém os parâmetros relativos às dimensões físicas e de operação do amplificador Raman. Pode-se escolher o tipo de fibra a partir de uma barra de rolagem onde estão disponíveis fibras tais como a monomodo padrão e a compensadora de dispersão entre outras, estas descritas na Seção 4.2. O comprimento da fibra em unidades de quilômetros deve ser inserida manualmente. A *banda do amplificador* refere-se a uma barra de rolagem com três opções de canais para o enlace, uma para a banda C, outra para a banda L e a última onde se escolhe manualmente os sinais, podendo escolher quaisquer quantidades e combinações dentro das bandas C e L. As opções *FPL+varFPL* se referem ao fator de polarização e sua variância, detalhada na Seção 4.3, enquanto *Bws* e *Bwp* são as larguras de banda dos lasers de sinal e bombeio, respectivamente. Por fim, neste quadro está a *Potência dos Sinais* expressa em dBm.

Acertados todos estes parâmetros a simulação está pronta para ser realizada e as análises de *ripple* e ganho médio computadas.



| Amplificador | |
|-----------------------|-------------|
| Tipo de fibra | SMF |
| Comprimento da fibra | 50 [km] |
| Banda do amplificador | C alternada |
| FPL + varFPL | 1.85 0.03 |
| Bws | 0.2 |
| Bwp | 1 |
| Potência dos Sinais: | 0 [dBm] |

Figura 4.5: Definição dos parâmetros do enlace.

4.1.5 Ferramentas de Gráficos e Resultados

Finalizando a descrição da interface gráfica, a Figura 4.6 mostra o espaço reservado na área de trabalho para apresentação dos resultados. São exibidos em dois gráficos os resultados de ganho e *ripple* por comprimento de onda. Em uma caixa de texto, que está a direita do gráfico de *ripple*, estão disponíveis as configurações e os valores calculados de *ripple* e ganho das simulações analíticas e numéricas dos amplificadores que melhor atendem aos requisitos de otimização. São mostrados um conjunto de até dez resultados que mais se aproximam dos valores escolhidos na janela *Objetivos* da Subseção 4.1.3.

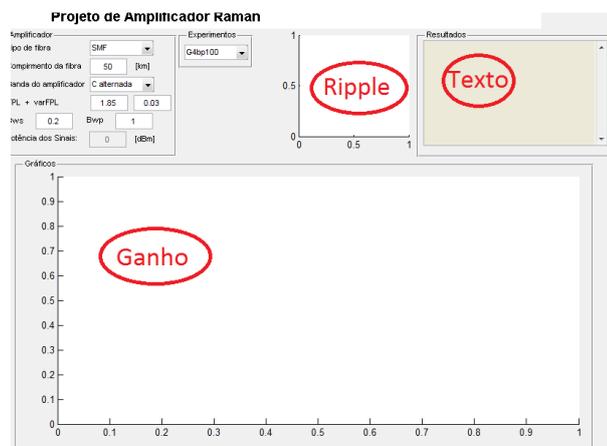


Figura 4.6: Janela da área de trabalho para apresentação de resultados.

4.2 Diferentes Tipos de Fibra

Para a simulação de amplificadores Raman em diferentes cenários um fator de grande influência no desempenho de um conjunto de lasers de bombeio é, sem sombra de dúvidas, o tipo de fibra no qual sinal e bombeios interagem. Este é conhecido como o meio de amplificação. As características da fibra como área efetiva e atenuação vão determinar o coeficiente de amplificação Raman e a absorção dos bombeios. Assim, para incorporar estas características no simulador, foi desenvolvido uma função que determina estes dados de acordo com a fibra escolhida para a simulação. São curvas de área efetiva e relação da atenuação com o comprimento de onda para a fibra. A Figura 4.7 contém as curvas de atenuação das fibras de diferentes modelos e fabricantes, conforme valores apresentados em [17].

Através dos dados encontrados em [17] foram coletados o coeficiente de atenuação, eficiência de ganho Raman e a área efetiva. A função interna do código relaciona os itens da barra de rolagem com as chamadas para carregar os dados da fibra. Quando a simulação é iniciada uma

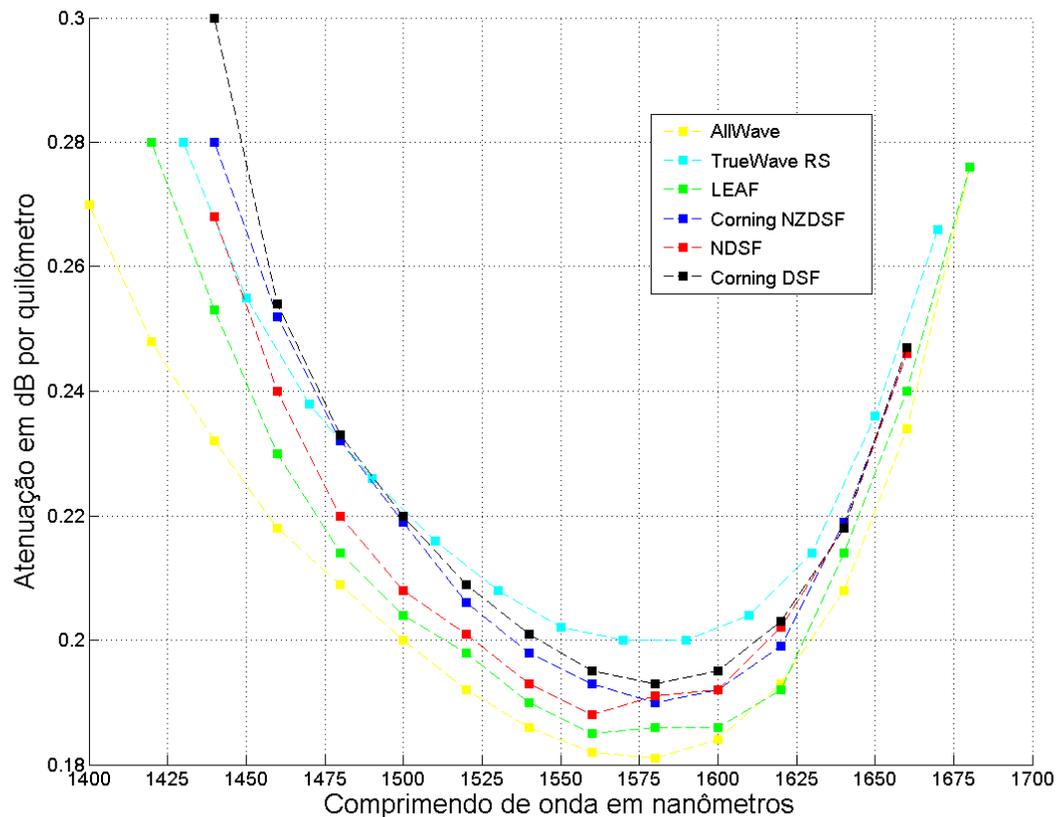


Figura 4.7: Atenuação de diferentes tipos de fibra em função do comprimento de onda.

estrutura com os dados corretos da fibra já está pronta. A Tabela 4.1 relaciona os tipos de fibra disponíveis na interface gráfica com seus valores de pico do coeficiente de ganho Raman, da Seção 2.1.2, e a área efetiva do núcleo da fibra. Com base nestes valores tabelados e uma curva normalizada, da Figura 2.2, foi possível estipular novas curvas para simular o amplificador em diferentes fibras.

Tabela 4.1: Valores de coeficiente Raman e área efetiva por tipo de fibra.

| Tipo de Fibra | Pico do Coeficiente de Ganho Raman ($W^{-1}km^{-1}$) | Área Efetiva (μm^2) |
|---------------|--|----------------------------|
| AllWave | 0.36 | 80 |
| TrueWave RS | 0.60 | 55 |
| LEAF | 0.46 | 75 |
| Corning NZDSF | 0.72 | 50 |
| NDSF | 0.39 | 80 |
| Corning DSF | 0.67 | 55 |

4.3 Fator de Polarização Variável

O amplificador Raman tem como característica o ganho dependente da polarização (*Polarization Dependant Gain*, PDG) [35]. Em diversos experimentos, principalmente quando os lasers de bombeio não são completamente despolarizados antes de serem inseridos no enlace, existe uma variação não linear nos resultados de ganho e, por consequência, *ripple*. Assim foi proposto, para o simulador desenvolvido, a inclusão de uma correção de caráter aleatório e distribuição normal a ser incluída no fator de polarização. Então quando se define o fator de polarização, na opção *FPL*, o projetista tem a possibilidade de que este fator seja diferente para cada canal do enlace. Fica a critério de quem desenvolve o amplificador estimar a variância desta perturbação, que pode ser inclusive zero, o que elimina este efeito aleatório.

Na Figura 4.8, apresentam-se o resultado de uma comparação entre um experimento e múltiplas simulações com resultados acumulados, na qual uma região de ganho e *ripple* fica evidente. Isto permitiu observar como os valores calculados de ganho e *ripple* variam de acordo com as flutuações de polarização para posterior comparação com o resultado experimental.

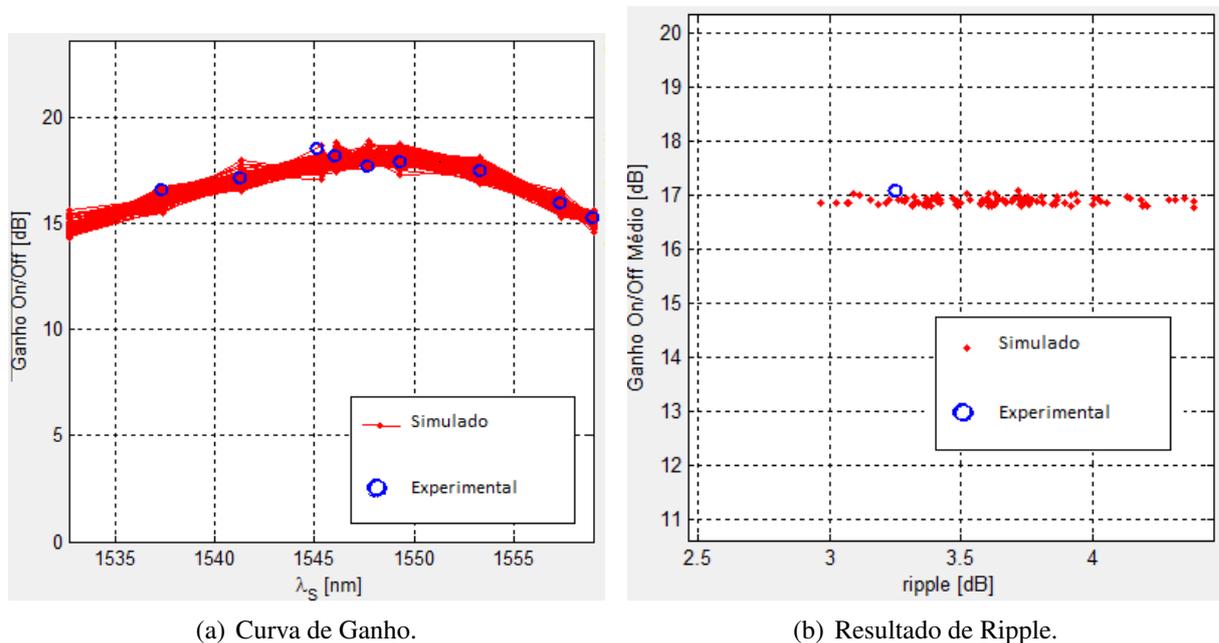


Figura 4.8: Comparação entre um experimento e 100 simulações.

A Figura 4.8(a) mostra o ganho dos sinais por comprimento de onda, onde os círculos em azul são valores experimentais. Os dados em vermelho mostram a faixa de variação dos ganhos simulados conforme indica a Figura 4.8(a). São computados 100 casos da configuração com 4 bombeios. Já a Figura 4.8(b) mostra o *ripple* nestes 100 casos, onde novamente o círculo em azul representa um dado experimental e os pontos em vermelho são os valores simulados.

É possível deduzir que o *ripple* cresce junto com a variância e que quanto mais experimentos puderem ser realizados junto com as simulações, melhor pode ser feita a escolha da variância.

Deve ficar claro que, por lidar-se de uma simulação de estado estacionário, foi realizado uma simplificação. Contudo, a distribuição do fator de polarização ocorre de forma estocástica e em ambientes externos, como cabos OPGW, estes efeitos são ainda mais relevantes [36].

4.4 A Função Amplificador Raman

Além dos ganhos em tempo computacional e facilidade na utilização adquiridos na reestruturação dos códigos junto com uma interface gráfica, uma definição clara das entradas e saídas da função de simulação possibilitou que sistemas mais complexos fossem abordados. A função *Amplificador Raman* retorna ao usuário, além das características do amplificador Raman, a potência e o ruído dos sinais na saída da fibra. Deste modo este sinal de saída pode, novamente, ser aplicado em uma nova função Amplificador Raman, tornando o enlace maior, com fibras diferentes, com lasers de bombeio diferentes ou até sendo simulado em outras funções de amplificadores diferentes, como um *EDFA*.

A Tabela 4.2 contém os três objetos de entrada da função: bombeio, sinal e fibra. Nas colunas estão representados as variáveis que compõem a estrutura. São relacionados os nomes e tipos das mesmas, então: *int(m)*, *[1xm]* e *double* significam, respectivamente, número inteiro, matriz de 1 por *m* e número real. Muitas destas variáveis coincidem com os dados de entrada da interface gráfica e somente as variáveis da fibra não foram definidas anteriormente, pois são oriundos de uma função mencionada na Seção 4.2.

As saídas da função estão na Tabela 4.3 e contém, além dos dados básicos de comprimento de onda (λ) e potência (*P*), os resultados oriundos das soluções analítica e numérica. São resultados obtidos de ambas: a diferença entre a menor e maior potência do sinal de saída (*ripple*), o ganho médio (Ganho Medio), o ganho do médio e individual do sinal descontando-se as perdas da fibra (Ganho on off medio). Os resultados exclusivos obtidos a partir dos cálculos com o modelo numérico são: a relação sinal ruído óptico (OSNR) e a potência de ruído de emissão espontânea amplificada (PasedB). Na última coluna o objeto de saída *signalOut* retorna os dados do sinal no final do enlace computado, o que permite simular outros sistemas em cascata.

Tabela 4.2: Objetos de entrada da função.

| bombeio | sinal | fibra |
|---|--|---|
| N Bombeios: int(m) lambda: [1xm] P: [1xm] Bwp: double FPL: double varFPL: double | N Sinais: int(n) lambda: [1xn] P: [1xb] Bws: double ASE: [1xn] | L: double alfas: [1xn] alfap: [1xm] alfasdBkm: [1xn] alfapdBkm: [1xm] Crpcosinal: [1xn] Crpcopump: [1xm] Crnormal: [1xK] sepfreq: [1xK] Aeffs: [1xn] Aeffp: [1xm] KR: double NA: double no: double |

Tabela 4.3: Objetos de saída da função.

| resultados an modelo analítico | resultados num modelo numérico | sinalOut |
|---|--|--|
| lambda: [1xm] P: [1xm] ripple: double Ganho Medio: double Ganho on off medio: double Ganho on off: [1xn] | lambda: [1xm] P: [1xm] ripple: double Ganho Medio: double Ganho on off medio: double Ganho on off:[1xn] OSNR: [1xn] PasedB: [1xn] | N Sinais: int(n) lambda: [1xn] P: [1xb] Bws: double ASE: [1xn] |

4.5 Conclusão

A interface gráfica para simulação de amplificadores Raman foi apresentada neste Capítulo. São funcionalidades para aplicar múltiplos lasers de bombeio em um enlace WDM, escolher diferentes tipos de fibra óptica e determinar o ganho e *ripple* do amplificador. A ferramenta também inclui ferramentas de otimização e busca exaustiva por combinações de potência e comprimento de onda para um numero determinado de lasers de bombeio. Foi possível incluir o efeito aleatório do ganho por dependência da polarização e definir funções que modularizam o conjunto enlace e amplificador.

5 Estudo de Caso: Análise da Operação Sistêmica de um Amplificador Híbrido

Propôs-se, como uma alternativa para minimizar o número de amplificadores presentes em um enlace, um projeto de amplificador híbrido. Partindo de um enlace contendo um *EDFA* como amplificador de potência, simulou-se a inserção de um amplificador Raman distribuído (*DRA*) que permite ampliar a banda de amplificação do enlace e estender a distância entre novos amplificadores. São 40 canais *WDM* operando nas bandas C e L e um dos objetivos é que o sinal de saída seja o mais plano possível, ou seja que a diferença entre a maior e a menor amplitude de sinal dentro da banda considerada seja minimizado. Apresenta-se a seguir, um estudo de caso de amplificadores híbridos *EDFA* e *DRA*. A Seção 5.1 descreve parâmetros considerados para os amplificadores, a Seção 5.2 contém a configuração do sistema e, por fim, a Seção 5.3 apresenta os resultados da simulação.

5.1 Especificação dos Amplificadores: Raman e EDFA

As simulações numéricas do amplificador híbrido foram realizadas utilizando rotinas implementadas no pacote *MatLab*. Como um estágio inicial das simulações o software comercial *OptiSystem* foi utilizado para determinar os dados de saída do *EDFA* utilizado como amplificador de potência. O modelo numérico foi utilizado no cálculo do amplificador Raman que considera a propagação de ondas contínuas e resolve as equações não lineares de Schrödinger, que governam a interação de energia entre as potências de sinal e bombeio [6]. O amplificador Raman opera de forma distribuída com bombesios no esquema contra-propagante e utiliza a fibra de transmissão como meio de amplificação.

5.1.1 EDFA de Potência

A configuração do amplificador de potência escolhido para esta análise foi um amplificador *EDFA* com um laser co-propagante operando com comprimento de 1480 nm com 100 mW de

potencia. O meio de amplificação é uma fibra dopada com Érbio (EDF) com concentração de íons de Er^{3+} igual a 1000 ppm e 5 metros de comprimento de fibra. Este amplificador é utilizado na saída do transmissor contendo 40 canais igualmente espaçados. Ele opera na banda C com um ganho médio de 13 dB e uma figura de ruído por volta de 4 dB. Isto permite que os canais, que possuem $-7,7dBm$ de potencia cada, sejam lançados por centenas de quilômetros dependendo da taxa de transmissão e da sensibilidade do receptor. Para este modelo a eficiência de conversão de potencia foi de 77 % e é importante salientar que se trata de um amplificador de baixo custo. Isto porque contém apenas um estágio, somente um bombeio co-propagante, não possui nivelamento de potência e é uma tecnologia que já está no mercado ao menos há 10 anos. A Tabela 5.1 mostra os principais parâmetros do *EDFA* utilizado neste enlace.

Tabela 5.1: Características do amplificador de potência

| Características do EDFA | Valor |
|--|---------------|
| Comprimento de Onda do Laser de Bombeio (nm) | 1480 |
| Potencia do Laser de Bombeio (mW) | 100 |
| Concentração de Er^{3+} (ppm) | 1000 |
| Comprimento da Fibra Dopada com Érbio (m) | 5 |
| Variação do Ganho (dBm) | 14.71 to 6.65 |
| Variação da Figura de Ruído (dB) | 4.98 to 3.10 |
| Eficiência de Transferência de Potência (%) | 77 |

A Figura 5.1 mostra a saída do *EDFA* obtida no *OptiSystem*. Esta é a curva típica para a especificação de fibra dopada com Érbio operando como um amplificador discreto. A grande variação observada no valor do ganho ao longo da banda C necessitaria de um filtro para que os canais fossem equalizados. Entretanto, considerando um amplificador híbrido, fica como objetivo do amplificador Raman compensar este desnível de ganho e fornecer uma saída do enlace com menor *ripple*.

5.1.2 Amplificador Raman Distribuído

Para projetar o amplificador óptico híbrido capaz de explorar as bandas C+L deve-se levar em consideração inicialmente o perfil da curva da ganho do *EDFA* (veja Fig. 5.1), o número de lasers de bombeio necessário para o amplificador Raman, os seus comprimentos de onda e respectivas potências. Por razões práticas de custo de implementação do enlace deve-se minimizar o número de lasers de bombeio.

Um DRA com 3 bombeios foi projetado visando obter o maior ganho e o menor ripple dentro de uma larga banda C+L. Como mostra a Tabela 5.2 o primeiro laser de bombeio foi

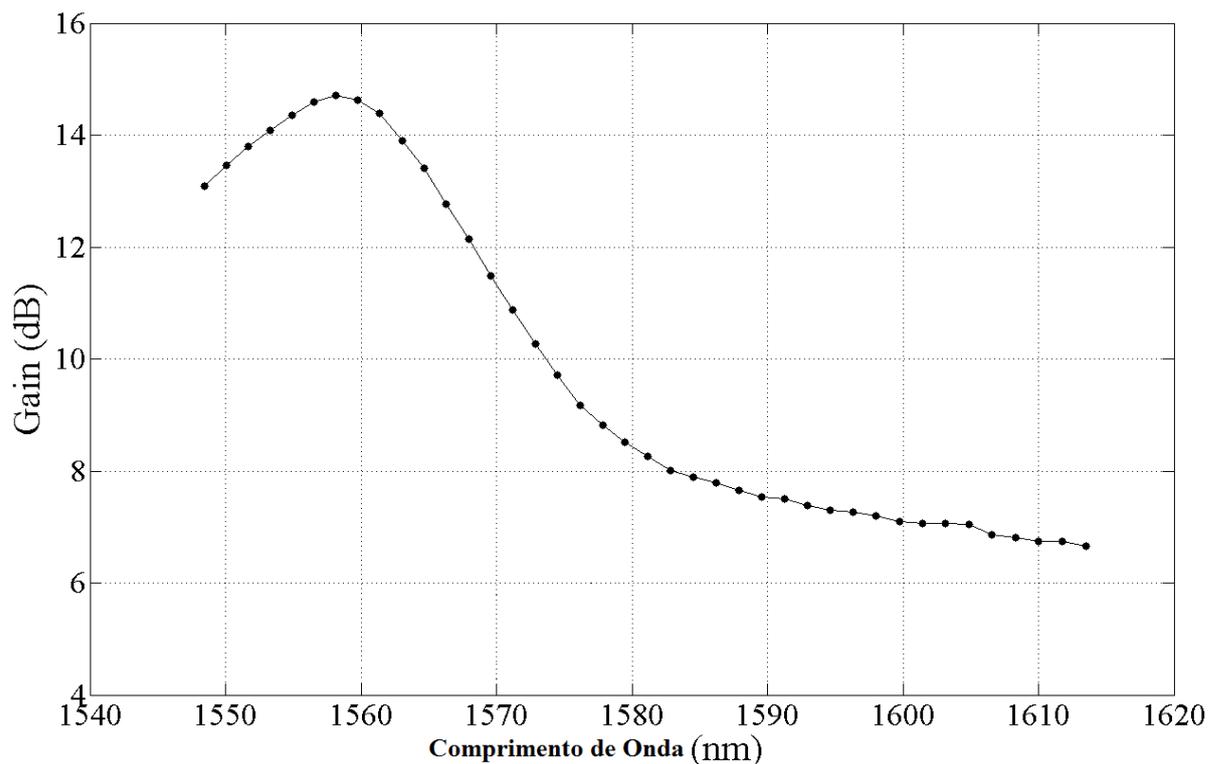


Figura 5.1: Ganho do EDFA em função do comprimento de onda do sinal WDM de entrada.

alocado com comprimento de onda de 1442 nm para compensar o ripple da banda C, pois, como apresentado no Capítulo 3.2, o pico de ganho para um laser de bombeio está 106 nm acima do seu valor. Os lasers de bombeio adicionais com 1477 nm e 1510 nm foram escolhidos para prover um ganho óptico na banda L. Considerou-se um enlace de 150 km, o que significa que este é o comprimento do meio de amplificação do *DRA*. A potência total dos lasers de bombeios foi limitada para aproximadamente 1 W com o intuito de manter níveis de segurança para conectores e fibra, já que ambos podem ser danificados sob potências maiores, e efeitos não lineares também podem aparecer devido ao excesso de energia. Seu valor foi atribuído de forma decrescente aos lasers, onde 1442 nm tem maior potência e 1510 nm tem a menor, foram assim dispostos pois também ocorre uma troca de energia entre estes comprimentos de onda, onde o menor comprimento fornece energia aos outros dois.

Para encontrar os melhores valores de comprimento de onda e potência para os lasers foi realizado uma varredura exaustiva com graus de precisão diferentes para as possíveis combinações de comprimentos de onda e potência. Tendo um espaço de busca limitado a três comprimentos de onda e 1 W de potência combinado, bastou escolher uma precisão grosseira para encontrar as primeiras regiões de resultado e em seguida refinar esta precisão para melhorar o desempenho. Sabe-se que melhores resultados podem ser encontrados por métodos de otimização como Algoritmo Genético (GA) [14] ou Enxame de Partículas (PS) [37].

A Tabela 5.2 resume o DRA utilizado nas simulações onde os resultados de *ripple* e ganho são para 150 km de fibra monomodo padrão.

Tabela 5.2: Características do Amplificador Raman Distribuído.

| Característica do DRA | Valor |
|---|------------------|
| Comprimento de Onda dos Lasers Bombeio (nm) | 1442, 1477, 1510 |
| Potência dos Lasers Bombeio (mW) | 420, 325, 270 |
| Ganho On-Off na Banda C (dB) | 14,29 |
| Ripple na Banda C (dB) | 1,52 |
| Ganho On-Off na Banda L (dB) | 19,38 |
| Ripple na Banda L (dB) | 1,69 |
| Ripple Total (dB) | 1,93 |

5.2 Enlace Opticamente Amplificado

A Figura 5.2 apresenta a configuração geral do sistema simulado. Algumas escolhas de projeto, como a faixa de operação e potência de entrada dos canais, foram feitas no intuito de auxiliar o desenvolvimento do amplificador. O comprimento de onda dos canais simulados foram selecionados para ocupar toda a banda C. Contudo era necessário grande energia do DRA para equalizar o ganho, principalmente próximo da região em torno de 1530 nm, uma vez que o ripple do EDFA neste comprimento de onda era maior. Por outro lado na medida que consideramos os canais da banda C para a banda L se tornou mais fácil obter ganho e equalização da resposta na saída do sistema com o *DRA*. Assim a faixa de operação escolhida variou de 1548.5 - 1613.5 nm com espaçamento entre os canais em 200 GHz e -5 dBm de potência de transmissão.

Estas especificações de parâmetros de entrada tem por objetivo reduzir os efeitos não lineares, advindos da alta potência dos canais de transmissão, e melhorar a eficiência da transferência de potencia dos bombeios para os sinais. Inclui-se na simulação uma perda de inserção de 2 dB devido ao multiplexador de entrada WDM para se aproximar das perdas existentes em sistemas reais. Ainda que as simulações realizadas tenham sido feitas com modelos de estado estacionário a relevância dos efeitos de alta potencia de sinal com um espaçamento entre canais reduzido ajudaram a delimitar os valores de potencia de transmissão, espaçamento de canais e suas frequências.

O amplificador híbrido representado na Fig. 5.2 é composto de 40 canais WDM, representados por λ_1 até λ_N e acoplados ao enlace por um multiplexador (MUX) e conectado ao amplificador *EDFA*. As setas de *Signal* e *Pump* indicam a direção dos sinais e bombeios res-

pectivamente, que se propagam na fibra monomodo padrão *SMF*. Um acoplador de comprimento de onda, do inglês *Coupler*, insere os bombeios no enlace. Por fim um de-multiplexador (DEMUX) separa os canais para que possam ser analisados individualmente nos fotodetectores.

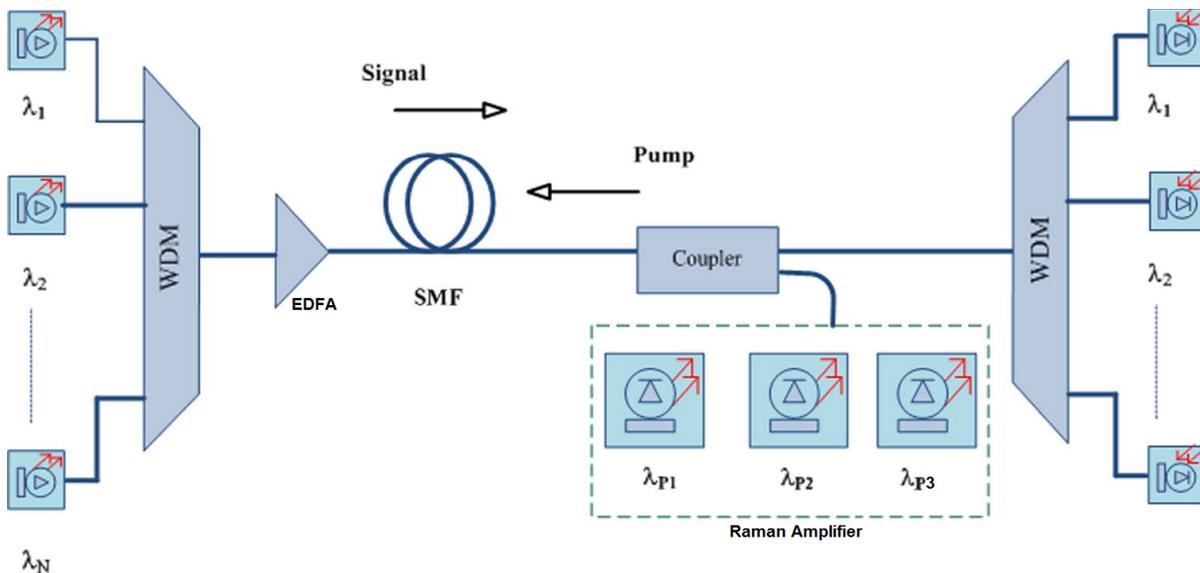


Figura 5.2: Layout do Sistema Simulado.

A Tabela 5.3 resume as principais características do sistema de transmissão WDM simulado.

| Características WDM | Valor |
|--|-----------------|
| Número de Canais | 40 |
| Faixa de Comprimento de Onda dos Canais (nm) | 1548,5 – 1613,5 |
| Frequência Inicial dos Canais (THz) | 185,8 |
| Frequência Final dos Canais (THz) | 193,6 |
| Espaçamento de frequência dos Canais (THz) | 0,2 |
| Potência de Transmissão (dBm) | -5 |
| Perda de Multiplexação WDM (dBm) | -2 |
| Potência média Lançada (dBm) | -7, |
| Faixa de Comprimento do Link (km) | 80 to 180 |
| Fabricante da Fibra | Draka®SMF |

5.3 Resultados da Simulação

Visando analisar os resultados de desempenho deste amplificador híbrido, Figura 5.2, foram simulados quatro enlaces de comprimentos distintos. Utilizando uma fibra monomodo

padrão de baixa perda e alterando seu comprimento, sempre acrescentando 30 km, obteve-se o desempenho do amplificador para 90 km, 120 km, 150 km e 180 km de enlace.

Na Figura 5.3 apresentam-se 6 curvas distintas da potência do sinal obtidas no amplificador híbrido. Representa-se no gráfico o sinal ao ingressar no sistema, quando sua potência média é de $-7,7\text{dBm}$, identificado como sinal de entrada. Em seguida o sinal após o estágio do amplificador de potência, o EDFA, onde a faixa de amplificação fica evidentemente concentrada na banda C. Por fim as curvas do sinal quando considera-se o DRA com 90 km, 120 km, 150 km e 180 km de fibra monomodo padrão como meio de transmissão e amplificação. Verifica-se que o perfil das curvas de saída do amplificador híbrido se mantém para os quatro casos, embora ocorra uma variação no desempenho do ripple e na potência média do sinal de saída.

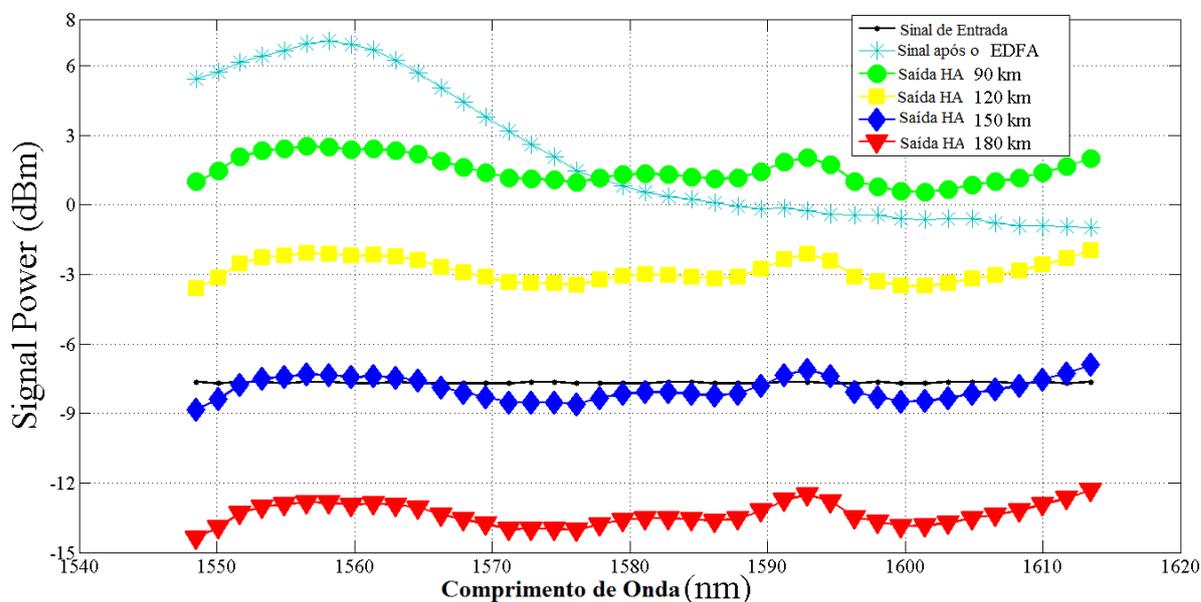


Figura 5.3: Potência do sinal antes e depois da amplificação em função do comprimento de onda dos canais de entrada, para 0 km, 90 km, 120 km, 150 km and 180 km de fibra óptica.

A TABELA 5.4 quantifica os resultados mostrados na Figura 5.3. Nota-se que, para um comprimento de 120 km, é obtido o menor ripple e que em 150 km o sinal de saída se aproxima do valor médio da potência de entrada.

Tabela 5.4: Ripple para os Diferentes Comprimentos de Fibra.

| Comprimento (km) | Saída (dBm) | Ripple (dB) | | |
|------------------|--------------|-------------|------|------|
| | | C + L | C | L |
| 90 | 1,49 | 1,95 | 1,52 | 1,45 |
| 120 | -2,84 | 1,64 | 1,51 | 1,55 |
| 150 | -7,92 | 1,93 | 1,52 | 1,69 |
| 180 | -13,37 | 2,06 | 1,53 | 1,73 |

A relação entre sinal e ruído óptico (OSNR) e a figura de ruído (NF) apresentados na Figura 5.4 variam na medida que o comprimento do enlace aumenta. A OSNR é calculada a partir da comparação da potência do sinal e do ruído, considerando a emissão espontânea amplificada. Os dados de OSNR do EDFA e do Raman são obtidos pelo OptiSystem e o algoritmo numérico, respectivamente. Nota-se que o amplificador de potência tem melhor OSNR onde seu ganho é maior. As figuras de ruído individuais de cada amplificador, mostrado na Figura 5.5, indica um resultado pior para menores comprimentos de onda. O mesmo é observado para a OSNR. Os símbolos preenchidos são referentes a OSNR e os símbolos sem preenchimento representam a NF. A medida que amplia-se a distância do enlace de fibra óptica ocorre a degradação da OSNR e o aumento da figura de ruído.

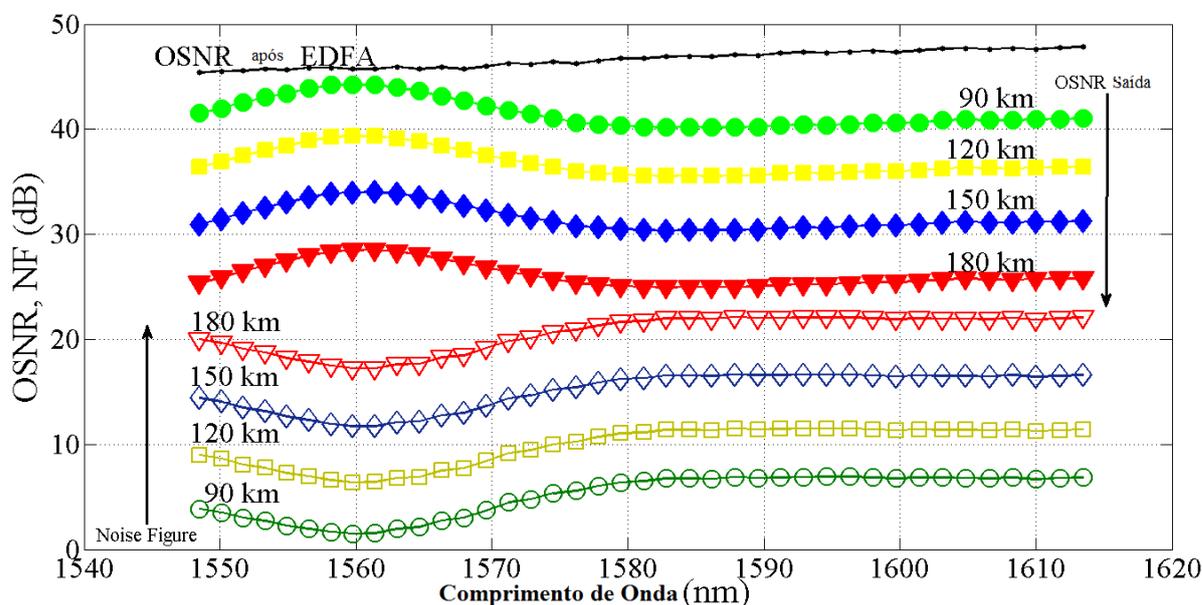


Figura 5.4: A OSNR e a Figura de Ruído do Amplificador Híbrido para diferentes comprimentos de enlace.

A Figura 5.5 tem a figura de ruído efetiva do DRA e as equações para este resultado são baseadas em [38]. Nota-se que na medida em que a distancia cresce, a figura de ruído efetiva do DRA melhora devido ao aumento do ganho On-Off.

Considerando o ganho Raman On-Off, a Figura 5.6 mostra como o amplificador de potência foi balanceado pelo DRA. Isto contribui para uma saída de sinal mais plana. Além disso, a qualidade da fibra de baixa perda é notada uma vez que o ganho continua crescendo além de 150 km de fibra o que torna o comprimento efetivo [39] para os bombeios Raman maior. Assim, o desempenho do DRA melhora na medida que o enlace aumenta.

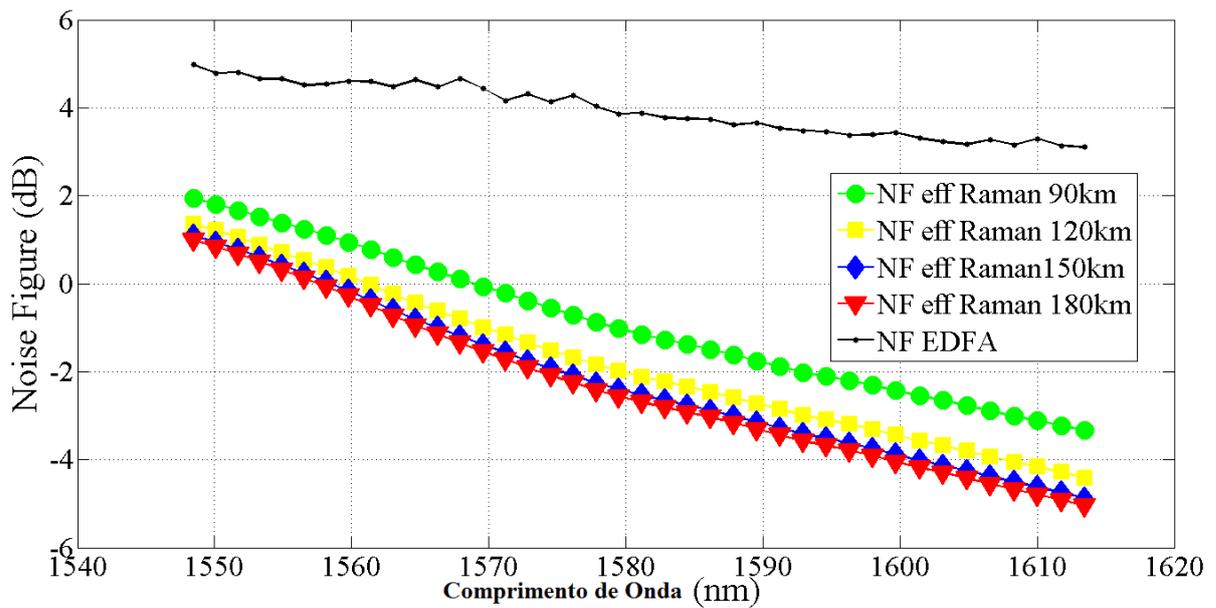


Figura 5.5: A NF Individual de Cada Amplificador, e a NF Efetiva do DRA.

5.4 Conclusão

Foi apresentado uma nova alternativa de um DRA de 3 lasers de bombeio para compor com um EDFA de banda C um Amplificador híbrido (HA). O HA opera nas bandas C+L com um *ripple* menor que 2 dB por centenas de quilômetros. Este sistema tem as vantagens do DRA usual, como melhoria de largura de banda e uma saída mais plana sem a utilização de filtros. Esta configuração proposta também suprime alguns efeitos não lineares, uma vez que valores arbitrários de potência de transmissão, espaçamento e frequência dos canais foram escolhidos com o propósito de reduzir o impacto destes efeitos.

Esta simulação híbrida auxilia a preencher a necessidade de uma proposta de amplificador híbrido para sistemas com somente o amplificador de potência em uso. É possível incluir realimentação na configuração e analisar o comportamento do sistema contendo diversas etapas repetidas, utilizar mais canais com um espaçamento menor ou ainda uma maior largura de banda. Outro trabalho proposto é adaptar os métodos de otimização para melhorar o *ripple* na saída na medida que se adiciona lasers de bombeios.

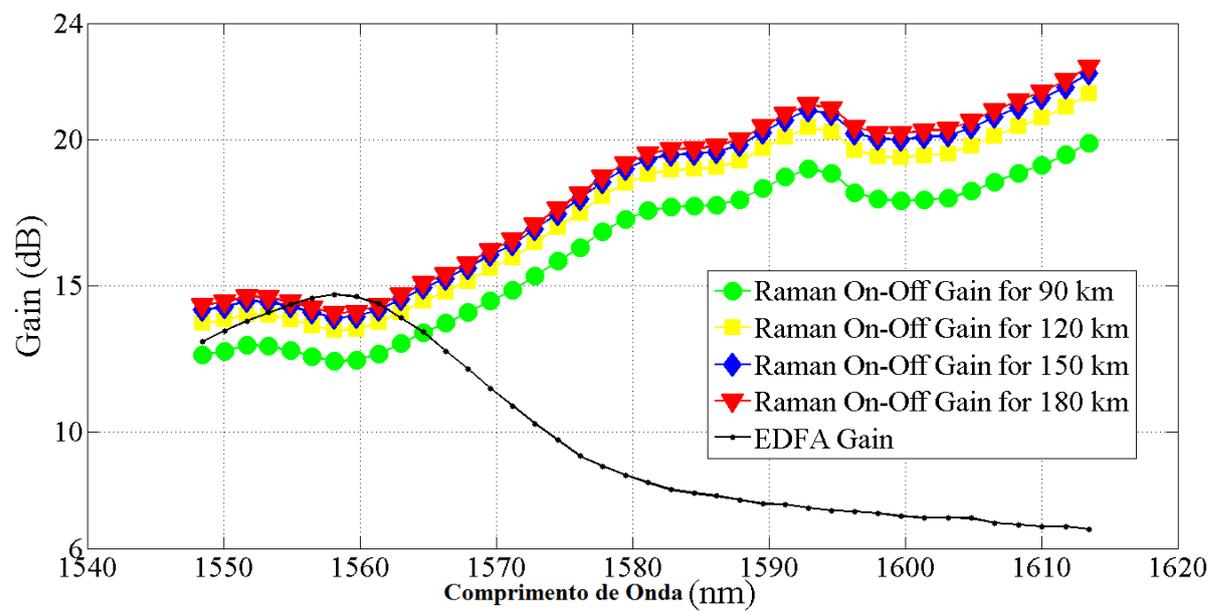


Figura 5.6: O Ganho para Cada Comprimento do enlace de Fibra.

6 Conclusão

Foi discutido neste trabalho alguns conceitos fundamentais de amplificadores Raman e EDFA. As principais equações de propagação da potência dentro da fibra óptica e como a modelagem destas pode auxiliar no desenvolvimento de amplificadores. Apresentou-se alguns conceitos de amplificadores Híbridos Raman + EDFA, como sua classificação quanto a largura de banda atuante entre NB-HA e SWB-HA. Foi descrito, também, uma classificação para os amplificadores híbridos de banda larga sem corte (SWB-HA) que categoriza de acordo com a influência do ganho do amplificador Raman e seu tipo DRA ou CRA. As figuras de mérito dos HA são $Ganho_{on-off}$, $ripple$, NF e $OSNR$.

Primeiramente, no Capítulo 3 os modelos desenvolvidos computacionalmente para amplificadores Raman são retomados. São modelos de estado estacionário, separados entre numérico e analítico, são representados matematicamente e a Figura 3.1 contém suas funcionalidades. Em seguida os modelos do software comercial *OptiSystem* são mencionados e indica-se a utilização do modelo numérico de estado estacionário para a simulação do amplificador híbrido (Capítulo 5).

No Capítulo 4 foi apresentada a interface gráfica desenvolvida. Ela permite a simulação de enlaces WDM contendo amplificadores Raman. Apresenta funcionalidades de otimização e busca exaustiva de parâmetros para os lasers de bombeio. Também é possível analisar os gráficos de ganho por comprimento de onda e $ripple$ e comparar diversas implementações. É uma ferramenta importante no desenvolvimento de enlaces de fibra óptica que utilizem amplificadores Raman.

Por fim, no Capítulo 5 uma combinação do DRA e o EDFA compõem este SWB-HA. Operando com 65 nm de largura de banda com 40 canais nas bandas C e L, este HA apresentou 2 dB de ripple e uma potência de saída com valores semelhantes a entrada para 120 km de fibra óptica. Não foram utilizados filtros e OSNR estava acima de 20 dB para 180 km de distância. O conjunto da lasers de sinal foi escolhido com um espaçamento de comprimento de onda prevendo-se a utilização do enlace para altas taxas de transferência.

6.1 Sugestão para Trabalhos Futuros

Muito pode ser aprofundado no estudo de amplificadores Híbridos. Como sequência deste trabalho uma análise experimental de HA pode ser executada. No campo de otimização uma metodologia incluindo os EDFAS e adicionando um custo por componente. Isto tornaria possível projetos balanceado de acordo com os benefícios e valores, concluindo-se em uma análise de viabilidade da aplicação. Tratando-se de automação de componentes ópticos, seria interessante sugerir um sistema de controle de potência dos lasers de bombeio em ambientes dinâmicos, com entrada e saída de canais aleatórios.

Referências Bibliográficas

- [1] HOLLENBECK, D.; CANTRELL, C. D. Multiple vibrational mode model for fiber optic raman gain spectrum and response function. *J. Opt. Soc. Am. B* 19, 2002.
- [2] RNP. *METROVIX*. <http://www.redecomep.rnp.br/?consorcio=11>.
- [3] MASUDA S. KAWAI, K. S. H.; AIDA, K. Wideband and low noise optical amplification using ditributed raman amplifiers and erbium-doped fiber amplifiers. *ECOC'98*, 1998.
- [4] ISLAM, M. *Raman Amplifiers for Telecommunications 2*. [S.l.]: Quantum Electron, 2002.
- [5] RIVERA R. OLIVARES, M. G. C. Numerical simulations and experimental results of a hybrid edfa-raman amplifier. *SBMO/IEEE MTT-S International Microwave & Optoelectronics Conference*, 2009.
- [6] CANI M. FREITAS, R. A. S.; CALMON, L. Raman amplifier performance of dispersion compensating fibers. *Proc. MTT/IEEE Int. Microw. Optoelectron. Conference*, v. 1, p. 553 – 558, 2003.
- [7] FREITAS, M. *Amplificadores Ópticos a Fibra sob um Ambiente Dinâmico*. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2006.
- [8] CANI, S. P. N. *Contribuição ao modelamento analítico em amplificadores Raman*. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2007.
- [9] S.CASTELLANI, C. E. *Análise de Sistemas Ópticos com Amplificadores Raman*. Tese (Graduação em Engenharia Elétrica) — Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2007.
- [10] CANI, S.; CALMON, L. de C.; PONTES. An analytical approximated solution for the gain of broadband Raman amplifiers with multiple counter-pumps. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 2009.
- [11] CANI L. DE CALAZANS CALMON, M. J. P. S. N. P. An analytical approximated solution for the gain of broadband raman amplifiers with multiple counter-pumps. *J. Lightw. Technol.*, v. 27, p. 944 – 951, 2009.
- [12] BENINCÁ, M. O. L. *Desenvolvimento de Simulador em C++ para Dimensionar Amplificadores Raman*. Tese (Graduação em Engenharia Elétrica) — Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2009.
- [13] FERREIRA, G. C. M. *Aprimoramento de Modelos para a Otimização de Amplificadores Raman*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2010.

- [14] FERRERA S. P. N. CANI, M. J. P. M. E. V. S. G. C. M. Optimization of distributed raman amplifiers using a hybrid genetic algorithm with geometric compensation technique. *J. Lightw. Technol.*, v. 3, p. 390 – 399, 2011.
- [15] SUR, A. *The Oxford Guide to the History of Physics and Astronomy*. New York: Oxford University Press, 2005. 278-280 p.
- [16] HEADLEY, C.; AGRAWAL, G. P. *Raman amplification in fiber-optical communication systems*. New York: Academic Press, 2005.
- [17] ISLAM, M. *Raman Amplifiers for Telecommunications 1*. [S.l.]: Quantum Electron, 2002.
- [18] FRIIS, H. Noise figure of radio receivers. *Proc IRE*, 1944.
- [19] KEISER, G. *Optical fiber communications*. Singapore: McGraw-Hill, 1983.
- [20] BECKER P. C.; OLSSON, N. A. S. J. R. *Erbium-Doped Fiber Amplifiers: Fundamentals and Technology*. San Diego: ACADEMIC PRESS, 1999. 157-158 p.
- [21] DESURVIRE, E. *Erbium-Doped Fiber Amplifiers: Principles and Applications*. New York: John Wiley Sons, 1994.
- [22] BAYART D. ; KOWALSKI, B. . H. J. . L. C. M. . L. S. . G. J. . C. F. Power conversion efficiency of fluoride-based edfas in flat-gain operation. *Optical Fiber Communications, OFC '96*, p. 157 – 158, 1996.
- [23] MASUDA, H. Review of wideband hybrid amplifiers. *OSA/OFC*, 2000.
- [24] MASUDA S. KAWAI, K. S. H.; AIDA, K. Ultra-wideband optical amplification with 3 db bandwidth of 65 nm using a gain-equalised two-stage erbium-doped fibre amplifier and raman amplification. *Electron. Lett.*, v. 33, p. 753, 1997.
- [25] SUYAMA, T. N. N. S. . T. T. . T. C. . M. Gain equalizer in long-haul wdm transmission system. *IEICE TRANSACTIONS on Electronics*, v. 8, p. 1293 – 1300, 1998.
- [26] KAWAI H. MASUDA, K. S. S.; AIDA, K. Ultra-wide, 75 nm 3 db gain-band optical amplifier utilising gain-flattened erbium-doped fluoride fibre amplifier and discrete raman amplification. *Electron. Lett.*, v. 34, p. 897–898, 1998.
- [27] GOLDBERG, D. E. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. [S.l.]: Addison-Wesley, 1989.
- [28] KENNEDY J.; EBERHART, R. Particle swarm optimization. *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks*, v. 4, 1995.
- [29] MARTINI, M. M. J. *Otimizacao de Amplificadores Hibridos Raman EDFA Utilizando Reciclagem de Bombeamento*. Tese (Doutorado em Ciencias) — Universidade Tecnológica Federal do Parana, Curitiba, 2010.
- [30] OPTIWAVE. *OptiSystem 7.0*. Canadá, 2009.
- [31] GILES, C.; DESURVIRE, E. Modeling erbium-doped fiber amplifiers. *J. Lightwave Technol.*, v. 9, p. 271 – 283, 1991.

- [32] DESURVIRE, E. *Erbium Doped Fiber Amplifiers Principles and Applications*. [S.l.]: John Wiley Sons, 1994.
- [33] BURGMEIER A. CORDS, R. M. C. S. B. S. J. A black box model of edfas operating in wdm systems. *J. Lightwave Technol.*, v. 16, p. 1271 – 1275, 1998.
- [34] GEORGES, T.; DELEVAQUE, E. Analytical modeling of high-gain erbium-doped fiber amplifiers. *Optics Letters*, v. 17, p. 1113 – 1115, 1992.
- [35] SERGEYEV, S. P. S. V.; FRIBERG, A. T. Polarization-dependent gain and gain fluctuations in a fiber raman amplifier. *PURE AND APPLIED OPTICS*, v. 9, p. 1119 – 1122, 2007.
- [36] WADDY P. LU, L. C. D.; BAO, X. Fast state of polarization changes in aerial fiber under different climatic conditions. *IEEE Photon. Technol. Lett*, v. 13, 2001.
- [37] AFKHAMI ALIREZA MOWLA, N. G. H.; HORMOZI, A. R. Wideband gain flattened hybrid erbium-doped fiber amplifier/fiber raman amplifier. *J. Opt. Soc. Korea*, v. 14, p. 342–350, 2010.
- [38] HANSEN L. ESKILDSEN, J. S. P. Rayleigh scattering limitations in distributed raman pre-amplifiers. *Photonics Technology Letters, IEEE*, v. 10, p. 159 – 161, 1998.
- [39] HEADLEY, C.; AGRAWAL, G. *Raman amplification in fiber optical communication systems*. [S.l.]: Elsevier, 2005.