

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
INDUSTRIAL - CPGEI

MÁRCIA DA MOTA JARDIM MARTINI

**OTIMIZAÇÃO DE AMPLIFICADORES HÍBRIDOS RAMAN+EDFA
UTILIZANDO RECICLAGEM DE BOMBEAMENTO**

TESE DE DOUTORADO

CURITIBA

2010

MÁRCIA DA MOTA JARDIM MARTINI

**OTIMIZAÇÃO DE AMPLIFICADORES HÍBRIDOS
RAMAN+EDFA UTILIZANDO RECICLAGEM DE BOMBEAMENTO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para obtenção do título de “Doutor em Ciências” – Área de Concentração: Telemática.

Orientador: Prof. Dr. Hypolito José Kalinowski

CURITIBA

2010

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

M386 Martini, Márcia da Mota Jardim
Otimização de amplificadores híbridos Raman+EDFA utilizando reciclagem de bombeamento / Márcia da Mota Jardim Martini. — 2010.
103 f. : il. ; 30 cm

Orientador: Hypolito José Kalinowski.
Tese (Doutorado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. Curitiba, 2010.
Bibliografia: f. 98-103.

1. Comunicações óticas. 2. Raman, Efeito. 3. Fibras óticas. 4. Amplificadores óticos – Otimização. 5. Engenharia elétrica – Teses. I. Kalinowski, Hypolito José, orient. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. III. Título.

CDD (22. ed.) 621.3

Título da Tese Nº 58:

**“Otimização de Amplificadores Híbridos
RAMAN+EDFA Utilizando Reciclagem de
Bombeamento”**

por

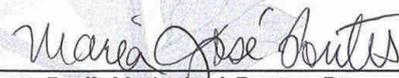
Márcia da Mota Jardim Martini

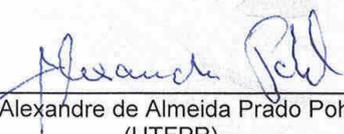
Esta tese foi apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Ciências – Área de Concentração: Telemática, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial – CPGEI – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR – Campus Curitiba às 9h do dia 30 de novembro de 2010. O trabalho foi aprovado pela Banca Examinadora, composta pelos professores:


Prof. Hypolito José Kalinowski, Dr.
(Presidente – UTFPR)


Profª. Maria Thereza M. Rocco Giraldi, Dr.
(IME)


Prof. Murilo Araújo Romero, Dr.
(USP)


Profª. Maria José Pontes, Dr.
(UEES)


Prof. Alexandre de Almeida Prado Pohl, Dr.
(UTFPR)

Visto da coordenação:


Prof. Fábio Kurt Schneider, Dr.
(Coordenador do CPGEI)

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me carregado por todo caminho.

Em especial ao meu marido, Rogério, e aos meus filhos, Renata, Rachel e Júnior pelas orações, pelo apoio, pela paciência, pelo estímulo e principalmente pelo grande amor dado a mim em todos os momentos dessa etapa de nossas vidas. E também ao Lucas, pela disponibilidade constante.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Hypolito José Kalinowski, pela oportunidade da realização desse trabalho, pela paciência e pela orientação sempre presente, atuante e decisiva.

À Profa. Dr. Maria José Pontes, pela oportunidade única de conviver com pessoas singulares do Labtel1.

Ao Prof. Moisés, pela sua capacidade de visão e pela valorização do meu trabalho, com seus palpites precisos e decisivos.

Ao colega Dudu, pela disponibilidade e participação ativa desde o primeiro momento em que cheguei no Labtel1.

Aos colegas do Labtel1 pelo companheirismo nos momentos de solidão, que não foram poucos, e principalmente à Márcia1, pelos programas noturnos e longos cafés nos fins de semanas. E também pelos específicos apoios computacionais.

Aos colegas do LCD pelo vital apoio computacional, em especial ao colega Wyllian. Sem me esquecer da infra-estrutura disponibilizada pelos colegas, principalmente Patrícia e Fábio, no meu período de cadeirante.

Aos professores e funcionários do CPGEI/UTFPR pela infra-estrutura oferecida para a realização desse trabalho, principalmente à Terezinha.

Aos colegas do Departamento de Física do CEFET-MG pela confiança.

A CAPES pela concessão da Bolsa de Estudos

RESUMO

MARTINI, M. M. J. Otimização de Amplificadores Híbridos RAMAN+EDFA Utilizando Reciclagem de Bombeamento, 2010. 103 f. Tese (Doutorado em Telemática) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

Neste trabalho são estudadas configurações de amplificadores híbridos compostos por amplificador Raman em cascata com EDFA, a serem utilizados na expansão da capacidade de sistemas de comunicações óticas utilizando WDM. Foi realizado, mediante simulação em um pacote comercial, um estudo do desempenho de diferentes esquemas desses amplificadores híbridos Raman+EDFA, em termos do ganho global, ondulação (ripple) e figura de ruído. A flexibilidade do perfil espectral do amplificador Raman pode ser combinada com a alta capacidade de potência de saída do EDFA para obter aplicações de amplificadores híbridos banda larga. Este trabalho aplica uma nova técnica de otimização de amplificador híbrido Raman+EDFA para aplicações WDM. É utilizado o modelo de aproximação analítica com menor tempo de cálculo, para determinar o perfil espectral do estágio de amplificação Raman. A otimização foi realizada para uma configuração de amplificador híbrido Raman+EDFA utilizando uma fibra compensadora de dispersão (DCF) com múltiplos lasers de bombeamento no estágio Raman. A otimização foi focada no ganho global e na ondulação do amplificador híbrido resultante. Os resultados demonstraram que o amplificador híbrido Raman+EDFA com reciclagem de bombeamento residual Raman, combinado com uma seleção apropriada de potências e comprimentos de onda dos lasers de bombeamento Raman, possibilita a obtenção de amplificadores híbridos banda larga com maior eficiência de conversão de potência, ganho alto e plano. Os resultados também mostraram ganhos médios maiores, menor ondulação e largura de banda maior que os encontrados na literatura. Tais resultados podem contribuir para um melhor conhecimento das vantagens e desvantagens de amplificadores híbridos utilizados em enlaces óticos.

Palavras-chave: Comunicações Óticas, Amplificadores Raman, Amplificadores Óticos, EDFA, Otimização.

ABSTRACT

MARTINI, M. M. J. RAMAN+EDFA Hybrid Amplifiers Optimization Using Pump Recycling, 2010. 103 f. Tese (Doutorado em Telemática) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

In this work different configurations of hybrid amplifiers are studied, made by a Raman amplifier followed by an EDFA. Such amplifiers can be used to increase the transmission capacity in WDM based optical communication systems. The performance of different hybrid EDFA+Raman amplifiers is obtained using commercial software. Their performance is analyzed in terms of the global gain, ripple and noise figure. The design and development of new configurations of fiber amplifiers, such as Raman and erbium-doped fiber amplifiers operating in a combined system that allows recycling pump power, contributes to minimize the energy consumption of the entire transmission system. Raman amplifiers can be used along with the EDFA high output power capacity to add spectral shaping flexibility for broadband applications. This work applies a new technique to optimize Raman+EDFA hybrid amplifiers for WDM applications. It uses an analytical approximated model to determine the spectral shaping of the Raman gain stage avoiding the time-consuming process of spectral profile optimization. The optimization has been carried out on a hybrid Raman+EDFA amplifier configuration, using dispersion compensating fiber with multiple pump lasers in the Raman amplification stage. The optimization has focused on the global gain and its ripple factor for the hybrid amplifier. Results demonstrated that the Raman+EDFA hybrid amplifier under recycling residual Raman pump, allied with the proper selection of pump wavelengths and powers, enables the construction of broadband amplifiers with enhanced power conversion efficiency and high and flat gains. Results also show average high gain, lower ripple, and higher bandwidth than those found in the literature. Such results can contribute to a better knowledge of the advantages and drawbacks of hybrid Raman/EDFA amplifiers in optical links.

Keywords: Optical Communications, Raman amplifiers, Optical Amplifiers, EDFA, Optimization.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2-1: MECANISMO DE AMPLIFICAÇÃO EM FIBRAS DOPADAS COM ÉRBITO PARA BOMBEAMENTO DE 980 μm .	19
FIGURA 2-2: TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA ENTRE FÓTON E MOLÉCULA.	23
FIGURA 2-3: TIPOS DE AMPLIFICADORES RAMAN.	25
FIGURA 2-4: EVOLUÇÃO DA POTÊNCIA DO SINAL ÓTICO NO ESQUEMA DE AMPLIFICAÇÃO RAMAN.	26
FIGURA 2-5: ESQUEMA DE BOMBEAMENTO.	37
FIGURA 2-6: PERFIL ESPECTRAL DO GANHO DE UM AMPLIFICADOR RAMAN.	28
FIGURA 3-1: ESQUEMA DA CONFIGURAÇÃO DO AMPLIFICADOR HÍBRIDO RAMAN+EDFA.	37
FIGURA 3-2: ESQUEMA DO PRIMEIRO MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO.	42
FIGURA 3-3: ESQUEMA DO SEGUNDO MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO.	44
FIGURA 4-1: ESQUEMA DAS CONFIGURAÇÕES DO AMPLIFICADOR HÍBRIDO RAMAN+EDFA.	46
FIGURA 4-2: CONCORDÂNCIA DOS RESULTADOS DE GANHO GLOBAL FORNECIDOS POR LEE <i>ET AL.</i> 2005.	48
FIGURA 4-3: CONCORDÂNCIA DOS RESULTADOS FORNECIDOS POR TIWARI <i>ET AL.</i> , 2009.	48
FIGURA 4-4: PERFIS ESPECTRAIS DOS GANHOS DO AMPLIFICADOR HÍBRIDO OTIMIZADO COM BOMBEAMENTO DUPLO – PRIMEIRO MÉTODO.	51
FIGURA 4-5: PERFIL ESPECTRAL DA FIGURA DE RUÍDO – BOMBEAMENTO DUPLO	52
FIGURA 4-6: PERFIS ESPECTRAIS DOS GANHOS – BOMBEAMENTO TRIPLO.	53
FIGURA 4-7: PERFIL ESPECTRAL DA FIGURA DE RUÍDO – BOMBEAMENTO TRIPLO.	54
FIGURA 4-8: PERFIS DE GANHO – BOMBEAMENTO SIMPLES SEM OTIMIZAÇÃO (8 CANAIS WDM)	55
FIGURA 4-9: PERFIL DA FIGURA DE RUÍDO – BOMBEAMENTO SIMPLES SEM OTIMIZAÇÃO (8 CANAIS WDM).	57
FIGURA 4-10: PERFIS DOS GANHOS DE CADA ESTÁGIO DE AMPLIFICAÇÃO – BOMBEAMENTO DUPLO COM OTIMIZAÇÃO	57
FIGURA 4-11: PERFIS DOS GANHOS – BOMBEAMENTO DUPLO COM OTIMIZAÇÃO	58
FIGURA 4-12: PERFIL DA FIGURA DE RUÍDO – BOMBEAMENTO DUPLO COM OTIMIZAÇÃO	59
FIGURA 4-13: PERFIS DOS GANHOS – BOMBEAMENTO TRIPLO COM OTIMIZAÇÃO	60
FIGURA 4-14: PERFIL DA FIGURA DE RUÍDO – BOMBEAMENTO TRIPLO COM OTIMIZAÇÃO	61
FIGURA 4-15: GANHO GLOBAL MÉDIO E ONDULAÇÃO EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE LASERS DE BOMBEAMENTO	61
FIGURA 4-16: PERFIS DOS GANHOS – BOMBEAMENTO SIMPLES COM OTIMIZAÇÃO, SEGUNDO MÉTODO (8 CANAIS WDM)	63
FIGURA 4-17: PERFIL DA FIGURA DE RUÍDO – BOMBEAMENTO SIMPLES COM OTIMIZAÇÃO	64

FIGURA 4-18: PERFIS DOS GANHOS – BOMBEAMENTO DUPLO COM OTIMIZAÇÃO	65
FIGURA 4-19: PERFIL DA FIGURA DE RUÍDO – BOMBEAMENTO DUPLO COM OTIMIZAÇÃO	65
FIGURA 4-20: PERFIS DOS GANHOS – BOMBEAMENTO TRIPLO COM OTIMIZAÇÃO	66
FIGURA 4-21: PERFIL DA FIGURA DE RUÍDO – BOMBEAMENTO TRIPLO COM OTIMIZAÇÃO	67
FIGURA 4-22: PERFIL DA FIGURA DE RUÍDO – BOMBEAMENTO QUÁDRUPLO COM OTIMIZAÇÃO	68
FIGURA 4-23: PERFIS DOS GANHOS – BOMBEAMENTO QUÁDRUPLO COM OTIMIZAÇÃO	69
FIGURA 4-24: GANHO GLOBAL MÉDIO E ONDULAÇÃO EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE LASERS DE BOMBEAMENTO	70
FIGURA 4-25: PERFIS DOS GANHOS – BOMBEAMENTO SIMPLES COM OTIMIZAÇÃO, SEGUNDO MÉTODO (16 CANAIS WDM ESPAÇADOS DE 2 nm).....	71
FIGURA 4-26: GANHO GLOBAL (a) E FIGURA DE RUÍDO (b) – BOMBEAMENTO SIMPLES COM OTIMIZAÇÃO, SEGUNDO MÉTODO (16 CANAIS WDM COM ESPAÇAMENTO DE 2nm).....	72
FIGURA 4-27: PERFIS DOS GANHOS – BOMBEAMENTO DUPLO COM OTIMIZAÇÃO, SEGUNDO MÉTODO (16 CANAIS WDM ESPAÇADOS DE 2 nm).....	73
FIGURA 4-28: GANHO GLOBAL (a) E FIGURA DE RUÍDO (b) – BOMBEAMENTO DUPLO (16 CANAIS WDM COM ESPAÇAMENTO DE 2nm)	74
FIGURA 4-29: PERFIS DOS GANHOS – BOMBEAMENTO TRIPLO COM OTIMIZAÇÃO, SEGUNDO MÉTODO (16 CANAIS WDM ESPAÇADOS DE 2 nm).....	75
FIGURA 4-30: GANHO GLOBAL (a) E FIGURA DE RUÍDO (b) - BOMBEAMENTO TRIPLO.....	76
FIGURA 4-31: PERFIS DOS GANHOS – BOMBEAMENTO QUÁDRUPLO OTIMIZADO PARA 16 CANAIS WDM ESPAÇADOS DE 2 nm.	77
FIGURA 4-32: GANHO GLOBAL (a) E FIGURA DE RUÍDO (b) – BOMBEAMENTO QUÁDRUPLO OTIMIZADO	77
FIGURA 4-33: PERFIS DOS GANHOS – BOMBEAMENTO SIMPLES COM OTIMIZAÇÃO (16 CANAIS WDM ESPAÇADOS DE 2,5 nm).....	78
FIGURA 4-34: GANHO GLOBAL (a) E FIGURA DE RUÍDO (b) – BOMBEAMENTO SIMPLES (16 CANAIS WDM ESPAÇADOS DE 2,5nm).....	79
FIGURA 4-35: PERFIS DOS GANHOS – BOMBEAMENTO DUPLO COM OTIMIZAÇÃO, SEGUNDO MÉTODO (16 CANAIS WDM ESPAÇADOS DE 2,5 nm).....	80
FIGURA 4-36: GANHO GLOBAL (a) E FIGURA DE RUÍDO (b) – BOMBEAMENTO DUPLO COM OTIMIZAÇÃO (16 CANAIS COM ESPAÇAMENTO DE 2,5 nm)	81
FIGURA 4-37: PERFIS GANHOS – BOMBEAMENTO TRIPLO COM OTIMIZAÇÃO (16 CANAIS WDM COM ESPAÇAMENTO DE 2,5 nm).....	82
FIGURA 4-38: GANHO GLOBAL (a) E FIGURA DE RUÍDO (b) - BOMBEAMENTO TRIPLO.....	83
FIGURA 4-39: PERFIS DOS GANHOS - BOMBEAMENTO QUÁDRUPLO OTIMIZADO PARA 16 CANAIS WDM ESPAÇADOS DE 2,5 nm	84

FIGURA 4-40: GANHO GLOBAL (a) E FIGURA DE RUÍDO (b) – BOMBEAMENTO QUÁDRUPLO.....	85
FIGURA 4-41: PERFIS DOS GANHOS, CONSIDERANDO POTÊNCIA TOTAL DE ENTRADA DE -20 dBm. (a) 8, (b) 16, (c) 32 E (d) 64 CANAIS.....	86
FIGURA 4-42: GANHO GLOBAL (a) E FIGURA DE RUÍDO (b), CONSIDERANDO POTÊNCIA TOTAL DE ENTRADA DE -20 dBm.....	87
FIGURA 4-43: GANHO GLOBAL (a) E FIGURA DE RUÍDO (b), CONSIDERANDO POTÊNCIA DE CADA CANAL DE -20 dBm.....	88
FIGURA 4-44: PERFIS DOS GANHO, CONSIDERANDO POTÊNCIA DE CADA CANAL -20 dBm.....	89

LISTA DE TABELAS

TABELA 4-1: PARÂMETROS DE ENTRADA UTILIZADOS NAS SIMULAÇÕES PARA COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS COM AQUELES FORNECIDOS POR LEE <i>ET AL.</i> , 2005 E TIWARI <i>ET AL.</i> , 2009.....	47
TABELA 4-2: PARÂMETROS DE ENTRADA UTILIZADOS NAS SIMULAÇÕES DO AMPLIFICADOR HÍBRIDO RAMAN+EDFA	50
TABELA 4-3: PREÇOS CONSIDERANDO AS RESPECTIVAS POTÊNCIAS DOS LASERS DE BOMBEAMENTO PARA MÓDULOS SEPARADO.....	90
TABELA 4-4: SUMÁRIO DOS PREÇOS CONSIDERANDO AS POTÊNCIAS DOS LASERS PARA AS CONFIGURAÇÕES DE BOMBEAMENTO RESIDUAL	90
TABELA 5-1: SUMÁRIO DOS RESULTADOS OBTIDOS, CONSIDERANDO BOMBEAMENTO SIMPLES, DUPLO, TRIPLO, QUÁDRUPLO.....	94

LISTA DE ABREVIATURAS

λ_B	Comprimento de onda de Bragg (<i>Bragg Wavelength</i>)
ASE	Emissão espontânea Amplificada (<i>Amplified Spontaneous Emission</i>)
BER	Taxa de erro de bit (<i>Bit Error Rate</i>)
CWDM	Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda (<i>Coarse Wavelength Division Multiplexing</i>)
DCF	Fibra com compensação de dispersão (<i>Dispersion Compensating Fiber</i>)
DRB	Retro-espalhamento Estimulado Rayleigh Duplo (<i>Stimulated Double Rayleigh Backscattering</i>)
DSF	Fibra com dispersão deslocada (<i>Dispersion Shifted Fiber</i>)
DWDM	Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda Densa (<i>Dense Wavelength Division Multiplexing</i>)
EDFA	Amplificador de fibra Dopada com Érbio (<i>Erbium Doped Fiber Amplifier</i>)
FBG	Rede de Bragg (<i>Fiber Bragg Grating</i>)
FWM	Mistura de Quatro Ondas (<i>Four Wave Mixing</i>)
GVD	Dispersão da velocidade de grupo (<i>Group Velocity Dispersion</i>)
MPI	Interferência de múltiplos caminhos (<i>Multipath Interference</i>)
NF	Figura de ruído (<i>Noise Figure</i>)
SMF	Fibra monomodo (<i>Single Mode Fiber</i>)
SNR	Relação sinal ruído (<i>Signal to Noise Ratio</i>)
SPM	Auto-modulação de fase (<i>Self Phase Modulation</i>)
SRB	Retro-espalhamento Estimulado Rayleigh (<i>Stimulated Rayleigh Backscattering</i>)
SRS	Espalhamento Raman Estimulado (<i>Stimulated Raman Scattering</i>)
WDM	Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda (<i>Wavelength Division Multiplexing</i>)
XPM	Modulação de fase cruzada (<i>Cross-Phase Modulation</i>)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	MOTIVAÇÃO	15
1.2	OBJETIVOS	15
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	16
2	AMPLIFICADORES ÓTICOS	17
2.1	AMPLIFICADORES ÓTICOS DE FIBRA DOPADA	18
2.2	AMPLIFICADORES RAMAN	20
2.2.1	Espalhamento Rayleigh	20
2.2.2	Espalhamento Raman	21
2.3	CONFIGURAÇÕES DE AMPLIFICADORES RAMAN	24
2.4	INTERAÇÃO ENTRE BOMBEAMENTOS	27
3	METODOLOGIA	30
3.1	MODELAGEM ANALÍTICA DO AMPLIFICADOR RAMAN	30
3.2	MODELO NUMÉRICO PARA AMPLIFICADORES RAMAN COM MÚLTIPLOS CANAIS E MÚLTIPLOS LASERS DE BOMBEAMENTO	32
3.3	FONTES DE RUÍDO	34
3.4	DESEMPENHO DE AMPLIFICADORES HÍBRIDOS RAMAN+EDFA	35
3.5	DEFINIÇÕES BÁSICAS	38
3.6	MÉTODOS PROPOSTOS DE OTIMIZAÇÃO PARA MÚLTIPLOS LASERS DE BOMBEAMENTO DE AMPLIFICADORES HÍBRIDOS	40
3.6.1	Primeiro Método Proposto	41
3.6.2	Segundo Método Proposto:	43
4	SIMULAÇÕES E RESULTADOS	45
4.1	CONCORDÂNCIAS COM A LITERATURA	45
4.2	DESEMPENHO DO AMPLIFICADOR HÍBRIDO UTILIZANDO TÉCNICA DE OTIMIZAÇÃO DE BOMBEAMENTO RAMAN	49
4.2.1	Resultados do Primeiro Método Proposto:	50
4.2.2	Resultados do Segundo Método Proposto:	62
4.3	INSERÇÃO DE 8, 16, 32, 64 e 128 CANAIS WDM	85
4.3.1	Potência total de entrada de -20 dBm, independente do número de canais	85
4.3.2	Potência de cada canal de entrada de -20 dBm	87
5	CONCLUSÕES FINAIS	92
	TRABALHOS FUTUROS	96
	PUBLICAÇÕES NÃO RELACIONADAS À TESE	97
	PUBLICAÇÕES RELACIONADAS À TESE	97
	REFERÊNCIAS	98

1 INTRODUÇÃO

O crescimento acelerado da demanda por tráfego de dados fez com que as comunicações por meio de sistemas óticos fossem cada vez mais exploradas. A tecnologia de transmissão de informação por fibra ótica é, atualmente, considerada a principal alternativa para aumentar a banda de transmissão, mantendo algumas características importantes como baixas atenuação do sinal e distorção, entre outros.

Para sistemas de comunicações óticas, as recomendações ITU-T (*International Telecommunication Union, Telecommunication Standardization Sector* – Setor de Padronização em Telecomunicação, União Internacional de Telecomunicação) definem as seguintes bandas de transmissão: Banda O (*original* - original): 1260nm a 1360nm; Banda E (*extended* – extensa): 1360nm a 1460nm; Banda S (*short* – curta): 1460nm a 1530nm; Banda C (*conventional* - convencional): 1530nm a 1570nm; Banda L (*long* - longa): 1570nm a 1620nm; e Banda U (*ultralong* – ultra-longa): 1620nm a 1670nm (HECHT, 2002, BASTOS-FILHO, 2005).

Em longas distâncias, sistemas TDM (*Time Division Multiplexing* – Multiplicação por divisão de tempo), apesar de sua alta capacidade de transmissão, não exploram eficientemente a grande largura de banda das fibras óticas monomodo. Se a técnica de multiplexação TDM for realizada por multiplexadores eletrônicos, a largura de banda eletrônica limitará a taxa de bit alcançável. Por outro lado, embora a multiplexação TDM permita taxas de bit tão altas quanto 100 Gbit/s, tal tecnologia não é adequada para aplicações em redes de comunicação (IANNONE, 1998).

O sistema de transmissão para múltiplos comprimentos de onda poderia substituir as múltiplas fibras mono-canal, ainda utilizadas, aproveitando a enorme banda que a fibra possui. Com o desenvolvimento da técnica de multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM, *Wavelength Division Multiplexing* – Multiplexação por divisão de comprimento de onda), a demanda por equipamentos que permitem o tráfego de informação com uma maior taxa de transmissão e que possuam perdas minimizadas se torna maior a cada dia. Com isso, tem-se a necessidade de dispositivos construídos totalmente em fibras óticas (*all-fiber*), ou seja, que diminuam perdas por inserção, reduzindo custos na amplificação e regeneração da informação transmitida. Nessa linha grande esforço foi direcionado para o desenvolvimento de amplificadores óticos eficientes, confiáveis e de baixo custo, que tornam viável a utilização de uma faixa mais larga na região espectral de baixas perdas das fibras de sílica.

O estado da arte da explosão da capacidade de enlaces de fibra ótica reside na multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM), tecnologia muito mais aperfeiçoada do que a TDM, ainda utilizada. Se interações entre diferentes canais não existissem, a capacidade total de um sistema WDM seria simplesmente dada pela taxa de bit por canal multiplicado pelo número de canais. Para limitar a interferência entre os canais, o espaçamento entre canais deveria ser maior que a taxa de bit do sinal transmitido (IANNONE, 1998).

A tecnologia WDM existe comercialmente em dois formatos: DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing* – Multiplexação por Divisão de Comprimento de onda Densa) que trabalha nas janelas espectrais C e parte das bandas S e L, alocando um máximo de 150 canais espaçados de 0,8 nm na faixa de 1490 nm a 1610 nm, e CWDM (*Coarse Wavelength Division Multiplexing* – Multiplexação por Divisão de Comprimento de onda Esparsa) nas janelas espectrais O, E, S, C e L, que aloca um máximo de 18 canais espaçados de 20 nm na faixa de 1270 nm a 1610 nm. A tecnologia DWDM é usada em sistemas de longas distâncias, conforme recomendações G.694.1 e G.694.2 ITU-T. CWDM é uma boa solução quando taxas mais baixas da informação for transmitida em menores distâncias, por exemplo, redes metropolitanas (BASTOS-FILHO, 2005).

A capacidade de um sistema WDM é determinada pelo número total de canais que podem ser introduzidos dentro da largura de banda disponível. Então dois parâmetros devem ser levados em consideração, a largura de banda ótica e o espaçamento entre os canais. Ao longo dos enlaces WDM existem interações lineares, como espalhamento Rayleigh, e não-lineares como FWM (*Four Wave Mixing*) e XPM (*Cross-Phase Modulation*), que geram diafonia não-linear entre os canais (*Crosstalk*). O efeito FWM pode ser limitado com o aumento do espaçamento entre os canais, ou com utilização de fibras com alto coeficiente de dispersão ou alocando canais com espaçamentos não-uniformes (IANNONE, 1998).

Os maiores limitantes para transmissão de informação por uma fibra ótica são a atenuação e a dispersão. A atenuação faz com que ocorram perdas na amplitude do sinal transmitido, prejudicando principalmente o alcance do enlace, e tem várias origens, como a absorção dos materiais que compõem a fibra, o espalhamento Rayleigh e perdas por micro e macrocurvaturas. A dispersão provoca a degradação do sinal devido à redistribuição de potência no âmbito espacial e temporal ao longo da propagação, provocando interferência intersímbolo, limita a taxa de transmissão.

1.1 MOTIVAÇÃO

O crescimento acelerado da demanda por tráfego de dados fez com que aumentasse o interesse pelo desenvolvimento de equipamentos que permitissem o tráfego de informação com maior taxa de transmissão e com perdas minimizadas. Antes da era dos amplificadores óticos, sistemas de telecomunicações por fibra ótica utilizavam amplificação ou regeneração eletrônica, o sinal ótico era convertido em elétrico, regenerado e amplificado, e então reconvertido em sinal ótico (gerando problemas com as limitações na resposta dos componentes). Atualmente os sistemas de comunicação por fibra ótica são responsáveis pelo transporte de boa parte da informação, devido à grande largura de banda da fibra ótica para reduzir os problemas de atenuação e dispersão que ocorrem durante a propagação do sinal nasceu o grande interesse no estudo dos amplificadores óticos.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é estudar o desempenho de diferentes configurações otimizadas de lasers de bombeamento de amplificadores Raman aplicadas, CW (*Continuous Wave* – Onda Contínua), em amplificadores híbridos Raman+EDFA (*Erbium Doped Fiber Amplifier* – Amplificador de Fibra Dopada com Érbio) com compensação de dispersão e utilizando reciclagem de bombeamento Raman residual, para uso em comunicações óticas. A principal contribuição desse trabalho é a otimização de amplificadores Raman com múltiplos lasers de bombeamento e múltiplos canais de maneira que seja obtido um ganho global plano do amplificador híbrido resultante. Para isso, foi realizado o estudo do desempenho de diferentes esquemas de amplificadores híbridos Raman+EDFA baseados em DCF (*Dispersion Compensating Fiber* – Fibra com compensação de Dispersão) com múltiplos lasers de bombeamento, em termos de ganho global, ondulação (*ripple*) e figura de ruído. Essa investigação utilizou software comercial para confrontar os resultados com aqueles obtidos por outros autores, mediante diferentes técnicas, e também para mensurar a aplicabilidade de pacotes comerciais em novas proposições.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho é organizado como descrito a seguir. O capítulo atual apresenta a motivação e os objetivos do trabalho. A revisão de amplificadores óticos é mostrada no capítulo 2. No capítulo 3 são citadas algumas modelagens analíticas de amplificadores Raman. No capítulo 4 são mostrados resultados das simulações realizadas comparando diferentes configurações de amplificadores híbridos Raman+EDFA com reciclagem de bombeamento Raman residual numa seção EDF, em termos do ganho global, de ondulação e da figura de ruído. Finalmente, no capítulo 5, considerações finais são traçadas com base nestes resultados.

2 AMPLIFICADORES ÓTICOS

O crescimento pelo interesse em tecnologias utilizando somente fibras óticas se tornou maior devido à convergência de três fatores. Primeiramente, o aumento do tráfego de dados e a internet exigiram um aumento da largura de banda. O segundo é a técnica WDM (*Wavelength Division Multiplexing*), que permitiu com que a capacidade das fibras aumentasse ainda mais. O sistema WDM tem um papel equivalente aos circuitos integrados na revolução eletrônica. Em terceiro, o advento do amplificador ótico fez nas redes óticas um papel equivalente ao transistor na revolução eletrônica. O amplificador ótico se tornou a ferramenta que permitiu a amplificação simultânea de um número grande de canais, ao contrário dos regeneradores eletrônicos que operavam canal por canal (ISLAM, 2004).

Um amplificador ótico consiste em um meio, que pode ser a própria fibra convencional ou com dopagens, capaz de converter energia para amplificar o sinal propagado. Existem vários tipos de amplificadores óticos sendo que alguns serão descritos ao longo deste capítulo. Entre eles: amplificadores óticos de semiconductor (SOA, *Semiconductor Optical Amplifiers*), Raman de fibra (FRA, *Fiber Raman Amplifiers*), paramétricos (OPA, *Optical Parametric Amplifiers*), de fibra dopada com Érbio (EDFA, *Erbium Doped Fiber Amplifiers*), com Praseodímio (PDFA, *Praseodimium Doped Fiber Amplifiers*), com Neodímio (NDFA, *Neodimium Doped Fiber Amplifiers*), e com Túlio (TDFA, *Tulium Doped Fiber Amplifiers*) (BOGGIO, 2007; KASOVSKY, 1996; (BASTOS-FILHO, 2005).

No princípio, os amplificadores de fibra ótica possuíam somente um laser de bombeamento e em geral apenas uma fibra. Atualmente, os amplificadores óticos podem possuir múltiplos lasers de bombeamento, como também vários estágios de fibra (com diferentes tipos de fibra). A necessidade de transportar informação cresce de forma continuada, aumentando as exigências dos sistemas de transmissão, por exemplo, aumento de largura de banda. O desenvolvimento de amplificadores óticos viabilizou um maior espaçamento entre os repetidores, que combinado com técnicas de multiplexação, conduziu ao aumento das taxas de transmissão (RAMASWAMI, 2002 a-b).

2.1 AMPLIFICADORES ÓTICOS DE FIBRA DOPADA

Desde a década de 80, os amplificadores óticos baseados em fibras óticas dopadas com terras raras foram identificados como dispositivos importantes para aplicações em comunicações por fibras óticas. O elemento de terra rara a ser considerado como melhor dopante para laser de estado sólido foi o Neodímio, que se mostrou eficiente com um baixo limiar de operação. Posteriormente, outros dopantes foram utilizados para construção de amplificadores óticos, como: Érbio, Itérbio e Túlio. Os amplificadores óticos de fibra dopada com Praseodímio e Neodímio podem ser usados para obtenção de ganho na janela do comprimento de onda de 1300 nm, enquanto que os amplificadores óticos de fibra dopada com Túlio podem prover ganho para toda a banda S de transmissão ótica (DESURVIRE, 1994; BECKER, 1998).

Um interesse maior ocorreu pelas fibras dopadas com Érbio (EDF) por causa das características: alto ganho, baixo ruído intrínseco, baixa dependência com polarização e alta eficiência de conversão de energia na banda C. Na década de 80, o grupo de Southampton (Inglaterra) construiu o primeiro amplificador ótico com fibra dopada com Érbio. No mesmo período, Desurvire começou a trabalhar nos laboratórios Bell, desenvolvendo o modelo teórico dos EDFAs. Os EDFAs são os amplificadores óticos mais utilizados e mais conhecidos, principalmente por seu espectro de amplificação coincidir exatamente com o mínimo de atenuação da sílica, por volta de 1550nm. O amplificador com fibra dopada com Érbio é baseado numa fibra ótica convenientemente dopada com íons de Érbio que constitui elementos óticamente ativos (DESURVIRE, 1994).

A operação do amplificador pode ser descrita assumindo um sistema de três níveis, conforme a figura 2.2. No esquema apresentado na figura 2.2 é utilizado um bombeamento de 980 nm. O fóton do bombeamento é absorvido pelo íon de Érbio no estado fundamental que vai para o nível de energia maior (no exemplo, estado ${}^4I_{11/2}$), figura 2.2.a, e o íon excitado volta para o nível metaestável ${}^4I_{13/2}$ através do decaimento não radiativo, figura 2.2.b. Uma vez no estado metaestável, um decaimento radiativo em direção ao estado fundamental leva à emissão de um fóton na banda C, figura 2.2.c. Nessa última transição um processo de emissão estimulada pode ocorrer na presença de condições apropriadas (IANNONE, 1998).

Para que a fibra dopada com Érbio seja capaz de amplificar sinais em sua faixa de operação, é necessário que os íons de Érbio sejam excitados através da absorção de energia fornecida por lasers de bombeamento, que operam principalmente nas regiões de 980 nm e 1480 nm. O amplificador ótico absorve luz, nos comprimentos de onda específicos de bombeamento, para emitir luz (emissão estimulada) em outro comprimento de onda (IANNONE, 1998).

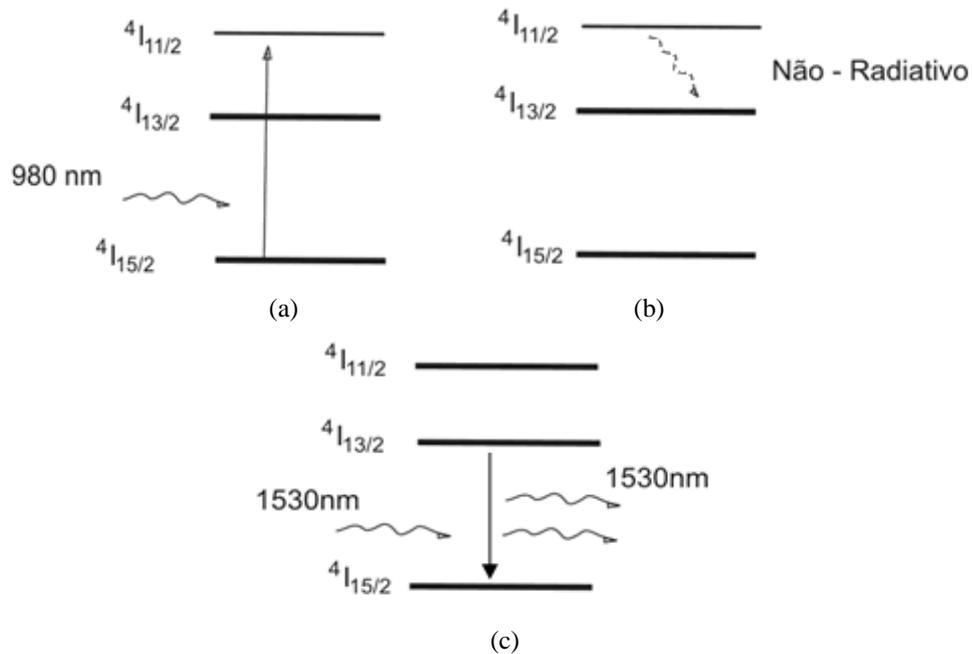


Figura 2-1: Mecanismo de amplificação em fibras dopadas com Érbio para bombeamento de 980 μm .

Outras transições podem ser usadas para bombear um EDFA (650 nm, 800 nm, 980 nm, 1530 nm). Alguns experimentos usaram radiação visível emitidas por lasers de Argônio, Nd:YAG, ou de corantes mas em comprimento de onda onde os esquemas de bombeamento são relativamente ineficientes. O desenvolvimento de lasers de bombeamento eficientes, operando nas regiões de 980 nm e 1480 nm foi estimulado pelo advento do EDFA (DESURVIRE, 1994).

Uma das características de um projeto de um EDFA é que o núcleo da fibra contenha íons de Érbio (Er^{3+}), e com um laser de bombeamento em um comprimento de onda específico, então forneça um ganho através da inversão de população. O espectro do ganho depende tanto do esquema de bombeamento quanto da presença de outros co-dopantes, tal como Alumínio ou Germânio, no núcleo da fibra. A natureza amorfa da sílica desdobra os níveis de energia de Er^{3+} provocando amplificação numa banda larga (aproximadamente 35 nm).

Os EDFA's podem ser projetados para operar com o bombeamento e o sinal se propagando na mesma direção ou em direções opostas. O desempenho é aproximadamente o mesmo nas configurações copropagante e contrapropagante. No regime de saturação, a eficiência de conversão de potência é geralmente melhor no contrapropagante, principalmente por causa do papel importante realizado pela ASE (*Amplified Spontaneous Emission* – Emissão Espontânea Amplificada) (AGRAWAL, 2002).

2.2 AMPLIFICADORES RAMAN

2.2.1 Espalhamento Rayleigh

Em 1871, Lord Rayleigh, levantou a hipótese de que as cores observadas no céu eram conseqüências de desvio da luz solar provocado por partículas que eram suficientemente pequenas quando comparadas com o comprimento de onda da luz incidente. Esse efeito recebeu o nome de Espalhamento Rayleigh. Mais adiante, ele observou que as moléculas de ar por si só espalhavam a luz solar e, mesmo na ausência de minúsculas partículas de poeira e água, o céu ainda continuaria azul (vide, por exemplo, capítulo 8 do HECHT, 1990).

O espalhamento Rayleigh pode ser considerado um processo elástico, isto é, um fóton incidente e um fóton espalhado possuem praticamente a mesma energia, portanto a frequência também pode ser considerada igual. O espalhamento Rayleigh em fibras redireciona luz de modos guiados levando à atenuação ótica na direção de propagação. Em fibras óticas operando no visível ou no infravermelho próximo, o espalhamento Rayleigh é a maior fonte de atenuação, sendo a absorção praticamente desprezível. O efeito de espalhamento Rayleigh ocorre quando uma fração de luz é espalhada em direção diferente daquele do modo propagado, chamada de espalhamento Rayleigh simples (SRB). Parte desta luz espalhada é novamente refletida para a direção propagante, então é chamado de espalhamento Rayleigh duplo (DRB). Os fótons espalhados podem ser amplificados ou aparecer como ruído extra na saída de um amplificador. (por exemplo, capítulo 8 do HECHT, 1990).

2.2.2 Espalhamento Raman

Em 1921, o pesquisador indiano Chandrasekhara Venkata Raman observou a coloração azul do mar Mediterrâneo, passando a estudar o espalhamento da luz em líquidos. Em 1923, o grupo de pesquisa de Raman notou que o espalhamento da luz em líquidos transparentes era extremamente fraco quando comparados com o espalhamento observado em meios turvos, e que a luz era espalhada em comprimentos de onda diferentes da onda incidente. Em 1927, o mesmo grupo observou que a luz do sol espalhada em uma amostra de glicerina pura era verde brilhante, ao invés de azul. O fenômeno foi o mesmo que havia sido observado em 1923, porém com intensidade maior (por exemplo, capítulo 13 do HECHT, 1990).

O espalhamento Raman foi descoberto de forma independente e quase simultânea por dois grupos de pesquisa, aquele de C. V. Raman, e outro por G. S. Landsberg e L. I. Mandelstam trabalhando na Rússia. Em 1930, o comitê Nobel distinguiu Sir C. V. Raman como descobridor do espalhamento molecular da luz e desde então esse efeito foi conhecido como o efeito Raman (por exemplo, AGRAWAL, 2001).

A interação entre o campo eletromagnético da luz e o meio provoca espalhamento da luz. Observa-se na luz espalhada, componentes de frequência maior e menor que a da luz incidente. As componentes com frequências deslocadas abaixo daquela da luz incidente foram denominadas Stokes, aquelas deslocadas acima são chamadas frequências anti-Stokes (ECKHARDT, 1962, HELLWARTH, 1963).

Em termos de mecânica quântica o efeito Raman é descrito como uma interação paramétrica não-linear entre luz e vibrações moleculares ou o espalhamento de um fóton incidente pelo meio para um fóton de maior ou menor frequência, dessa forma o meio provoca uma transição entre dois estados vibracionais (ECKHARDT, 1962, HELLWARTH, 1963).

O espalhamento Raman pode ser explicado como troca de energia entre fótons da luz incidente e moléculas do meio. De acordo com os princípios de conservação de energia e do momento, se o fóton incide sobre uma molécula que permanece sem movimento após o choque, o fóton é desviado de sua trajetória original, mas permanece com a mesma energia ou a mesma frequência. Esse efeito é chamado de espalhamento elástico. Porém, se, um fóton incide sobre uma molécula causando algum tipo de vibração, sua trajetória original será

desviada e apresentará uma energia inferior ou superior à energia inicial. Agora o espalhamento é inelástico e como exemplo tem-se o espalhamento Raman. O efeito Raman pode ser descrito considerando níveis de energia dos estados vibracionais da molécula como mostra o esquema na figura 2.3, onde E_0 corresponde à energia do estado fundamental, que é o estado de mínima energia vibracional, e E_1 é a energia correspondente a um dos modos de vibração (AGRAWAL, 2001).

Quando um fóton de energia $E_f = E_1$ incide sobre uma molécula, ela pode absorver a energia do fóton e passar do estado vibracional E_0 para o estado vibracional E_1 . Se essa energia E_f for muito maior do que energia necessária para excitar a molécula até o nível E_1 , a molécula é excitada até um nível de energia superior, onde permanece por pouco tempo por ser um estado proibido (virtual), e depois pode retornar até o nível E_0 ou até o nível E_1 . Se ela retornar ao nível E_0 , o fóton liberado terá a mesma energia do fóton incidente. Se a molécula retornar ao nível E_1 , parte da energia do fóton incidente fica armazenada na molécula em forma de vibração e o fóton liberado terá uma energia igual a $E_f - E_1$, portanto menor que a energia inicial E_1 . Então, o fóton Stokes é produzido pela absorção de um fóton incidente e a criação simultânea de um quantum de energia vibracional, enquanto que o fóton anti-Stokes é produzido pela absorção de um quantum de energia vibracional. À temperatura ambiente, a excitação térmica das moléculas é baixa, porém diferente de zero. Portanto pode acontecer que algumas moléculas estejam excitadas previamente à incidência da luz. Assim, essas moléculas se encontram em um estado estável, porém acrescido de uma energia vibracional provocada por fonte externa. No estado de excitação prévia as frequências anti-Stokes podem surgir (ISLAM, 2004).

O efeito Raman ocorre em meios sólidos, líquidos, gasosos e em plasmas. Em material cristalino as ondas Stokes têm frequências específicas e bem definidas. Como o vidro de sílica não é de natureza cristalina, a frequência da onda Stokes em fibras óticas se estende continuamente sobre uma banda larga. Um espectro Raman é obtido quando luz monocromática incide numa amostra. A luz espalhada pode ser dispersa por uma rede de difração em um espectrômetro e suas componentes são analisadas por um detector que converte intensidade de luz em sinais elétricos e as interpreta na forma espectral.

Uma perturbação de alta intensidade na molécula pode mudar a sua susceptibilidade dielétrica e o meio deixa de ter resposta linear. Esta mudança permite um acoplamento entre as ondas Stokes e a onda incidente, tal que parte da intensidade da onda incidente pode ser transferida para as ondas Stokes. Quanto maior a intensidade de fótons

presentes nas ondas Stokes e quanto mais intensa for a luz incidente, maior é o crescimento da onda Stokes.

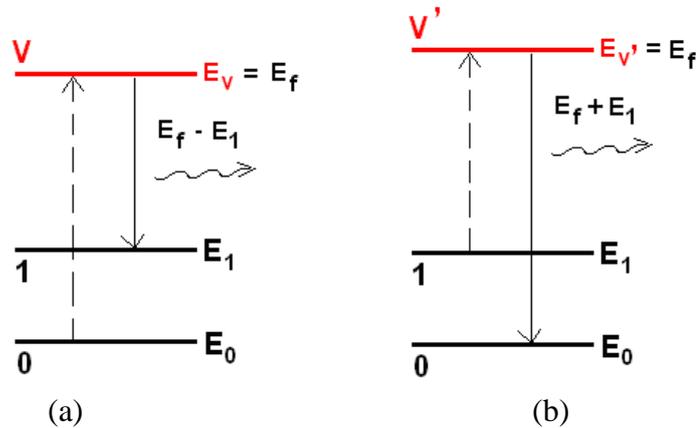


Figura 2-2: Transferência de energia entre fóton e molécula. (a) processo Stokes, e (b) processo anti-Stokes.

Devido a essa característica do espalhamento Raman, se dois canais com frequências distintas, deslocadas de aproximadamente 13,1 THz, forem propagadas no meio, o canal com maior frequência agirá como um de bombeamento e irá transferir parte de sua energia para o canal de menor frequência. Este efeito é denominado espalhamento Raman estimulado (SRS, *Stimulated Raman Scattering*) e é o princípio básico da amplificação ótica utilizada nos amplificadores Raman (HECHT, 1990; AGRAWAL, 2001).

O espalhamento Raman estimulado é um dos efeitos não-lineares dominantes na fibra, que limita a potência de entrada permitida na fibra em muitos sistemas de comunicação ótica. Esse efeito restringe a transmissão de sinais óticos de alta intensidade, o que seria necessário para enlaces mais longos. Esse efeito é provocado intencionalmente quando radiação de bombeamento é acoplada na fibra que transmite o sinal para gerar ganho Raman. SRS também ocorre não intencionalmente em sistemas de transmissão WDM devido ao aumento do número de canais dentro da largura de banda do ganho Raman. A potência total pode aumentar para níveis onde frações consideráveis de SRS são geradas, com os canais de sinais agindo como bombeamento para outros, prejudicando o desempenho do sistema. Em sistemas multiplexados por divisão de comprimento de onda (WDM), o SRS é responsável pela transferência da potência de canais de comprimento de onda menores para canais de comprimentos de onda maiores, causando uma diminuição no ganho dos canais e diafonia (*crosstalk*) entre eles (ISLAM, 2004).

Uma das características atrativas da amplificação Raman em sistemas de transmissão é o aumento da capacidade (taxa x distância) sem exigir mudanças na fibra, pois

ocorre em qualquer fibra de transmissão convencional e tem um espectro de ganho amplo. Consegue-se ganho em qualquer comprimento de onda precisando apenas selecionar lasers de bombeamento em frequências comprometidas com a relação ganho/comprimento de onda. O pico do ganho de amplificação é obtido por sinais deslocados para frequências menores de aproximadamente 13.1 THz (para a sílica), relativo a frequência do laser de bombeamento (STOLEN *et al.*, 1973). Dessa maneira é possível combinar lasers de bombeamento para obter um ganho plano em banda larga. Os sinais de lasers de bombeamento de comprimento de onda menor demandam mais potência para serem efetivos, pois esses fornecem potência para sinais de comprimento de onda maiores. A possibilidade de combinar o maior número de sinais de bombeamento centrados em diferentes comprimentos de onda pode levar a um ganho plano com largura de banda ultra-larga (BROMAGE, 2004).

O uso da amplificação Raman permite o confinamento do sinal dentro de limites impostos por não-linearidades e pela degradação da relação sinal/ruído resultantes de grandes distâncias de percursos. A faixa de ganho dos amplificadores Raman, ao contrário dos amplificadores de fibra dopada com íons de terras raras, não é restrita à diferença entre os níveis de energia daqueles íons. A faixa de ganho Raman pode ser obtida em qualquer banda de operação dos sistemas óticos (ANDRÉ *et al.*, 2003).

2.3 CONFIGURAÇÕES DE AMPLIFICADORES RAMAN

Considerando a topologia, existem duas configurações de amplificadores Raman, conforme mostrado no esquema da figura 2.4: a distribuída (a) e a discreta (b), especialmente utilizando DCF (*Dispersion compensating fiber* – Fibra com compensação de Dispersão). A amplificação Raman distribuída ocorre ao longo de toda a fibra de transmissão enquanto que a amplificação Raman discreta ocorre em um trecho limitado de fibra.

A amplificação Raman distribuída consiste em injetar um sinal de bombeamento (com um laser de alta potência) na fibra de transmissão, fazendo com que os fótons emitidos pelo bombeamento induzam SRS para o sinal ao longo dela, assim as perdas de potência do sinal serão compensadas ao longo da transmissão.

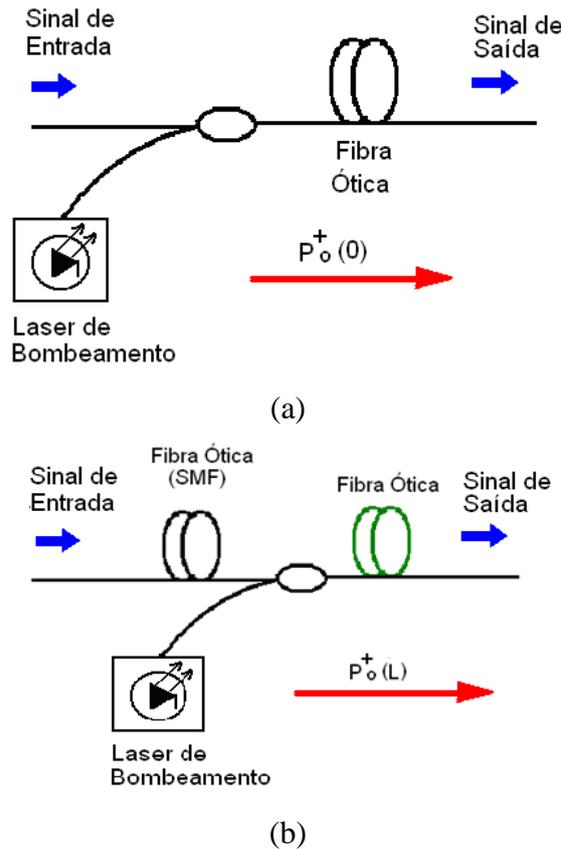


Figura 2-3: Tipos de amplificadores Raman: (a) distribuído, e (b) discreto.

A principal vantagem da amplificação Raman distribuída é apresentar uma relação sinal/ruído melhor que aquela da configuração discreta. Os valores menores da amplitude do sinal amplificado ao longo da fibra sofrem menor influência de ruído, como também aqueles valores maiores de amplitude não são influenciados pelos efeitos não-lineares, que distorceriam o sinal, pois a amplificação em um segmento limitado do enlace não é tão elevada (CHRAPLYVY, 1984; HEADLEY, 2005).

A amplificação Raman distribuída é utilizada nas bandas C e L. Existem propostas de configuração híbrida (combinações de diferentes tipos de amplificadores com bombeamento simples para as bandas S e C) utilizando fibras Raman cuja casca é dopada com Érbio e Alumínio e o núcleo dopado com Germânio. Os sinais da banda S são amplificados pelo espalhamento Raman estimulado no núcleo e os da banda C pela amplificação causada pelos íons de Érbio na casca (ISLAM, 2002).

A amplificação Raman discreta consiste em concentrar o sinal de bombeamento em um trecho limitado de fibra para conseguir um ganho considerável. O sinal transmitido apresenta variações de amplitude, sendo que os valores menores do sinal amplificado ao longo da fibra sofrem maior influência de ruído, devido à relação sinal-ruído (SNR – *Signal to*

Noise Ratio), e aqueles valores maiores de amplitude são influenciados pelos efeitos não-lineares, uma vez que a amplificação no segmento da fibra do amplificador é mais elevada. Esses efeitos são inevitáveis na amplificação Raman discreta. A vantagem da amplificação Raman discreta é apresentar uma conversão de energia de potência melhor que na amplificação Raman distribuída, por causa da amplificação em fibras de ganhos altos, como a DCF, conforme mostrado na figura 2.5 (HANSEN *et al.*, 1998).

A eficiência do ganho Raman da fibra DCF é muito maior que das fibras SMF (*Single Mode Fiber*) e DSF (*Dispersion Shifted Fiber*), dessa forma é mais interessante utilizar DCF em amplificadores Raman discretos. Uma vantagem importante da inserção da DCF em série com a fibra de transmissão é poder ajustar o comprimento da mesma de forma que proporcione simultaneamente ganho e compensação da dispersão no enlace. Também é importante ressaltar que o perfil do ganho Raman é máximo no mesmo ponto referente à diferença de frequência para fibras DCF, DSF e SMF (STOLEN *et al.*, 1973, ISLAM, 2004).

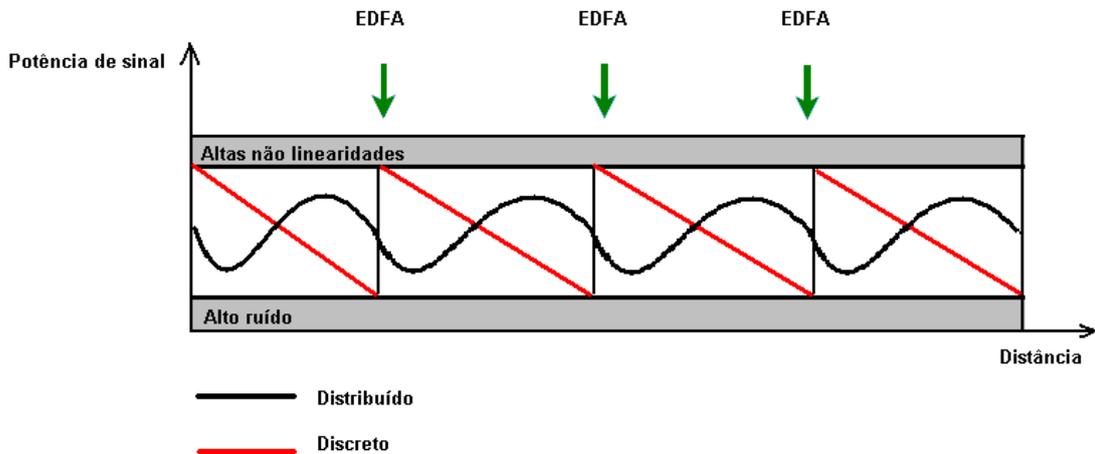


Figura 2-4: Evolução da potência do sinal óptico no esquema de amplificação Raman discreta (vermelho) e distribuída (preto).

Considerando o posicionamento do laser de bombeamento pode-se subdividir os amplificadores Raman em três configurações: amplificador Raman com bombeamento copropagante, contrapropagante e bidirecional, conforme mostrado no esquema da figura 2.6. Na configuração copropagante, o laser de bombeamento é posicionado no início do enlace da fibra onde se deseja que ocorra a amplificação Raman, isto é, o sinal de bombeamento se propaga no mesmo sentido do sinal que se deseja transmitir. As principais características dessa configuração são alto ganho e aumento das flutuações indesejáveis de ruído, devido ao efeito do sinal de bombeamento, que se propaga no mesmo sentido do sinal que se deseja

amplificar. Nessa configuração, a amplificação ocorre e diminui ao longo do enlace da fibra em que se deseja que ocorra a amplificação Raman (HEADLEY, 2005, CASTELLANI *et al.*, 2007).

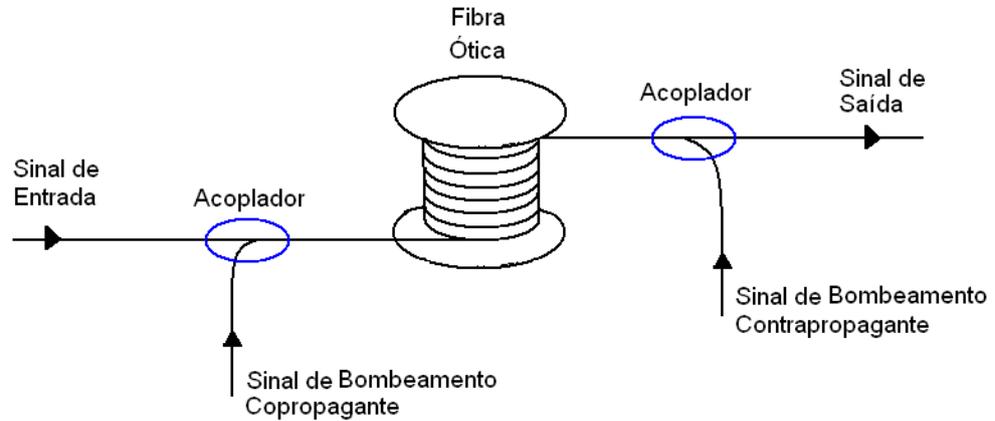


Figura 2-5: Esquema de bombeamento copropagante, contrapropagante e bidirecional.

Na configuração contrapropagante, o sinal de bombeamento é posicionado após a fibra, isto é, o sinal de bombeamento se propaga no sentido oposto ao sinal que se deseja amplificar. Suas principais características são: ser pouco susceptível a efeitos não-lineares e às flutuações indesejáveis de ruído, que são atenuadas devido ao efeito do sinal de bombeamento. Na configuração bidirecional, o sinal de bombeamento é posicionado tanto no início quanto após a fibra amplificadora, isto é, os sinais de bombeamento se propagam em ambos os sentidos. Essa configuração apresenta todas as características das anteriores, mas possui um custo de implementação elevado.

2.4 INTERAÇÃO ENTRE BOMBEAMENTOS

Um desafio importante é o desenvolvimento de amplificadores óticos que satisfaçam, por exemplo, a exigência de uma banda larga da rede de acesso denominada rede CWDM. A partir do momento em que tais redes implantadas começaram a exigir banda mais larga para transmitir maior número de canais, o interesse pelos amplificadores Raman aumentou por possuírem banda larga suficiente para cobrir toda a região espectral alocada para CWDM, compreendendo as bandas O, S, C e L, conforme seção 1, pag. 2 (CASTELLANI *et al.*, 2008).

Os lasers de bombeamento múltiplos permitem aumentar a largura de banda do sinal de entrada do amplificador óptico adicionando alguns poucos lasers, denominada amplificação composta. A amplificação composta é determinada pelas interações mútuas entre os comprimentos de onda do sinal e do bombeamento (LIAW, 2007; 2008). Teoricamente, deve-se aumentar o número de lasers de bombeamentos para melhorar a ondulação do ganho espectral, isto é, o ganho de cada canal deve ter valores aproximados (ganho plano) dentro de uma faixa pré-estabelecida, conforme representação mostrada na figura 2.7. O ganho deve ser o suficiente para compensar as perdas causadas pela fibra óptica e a largura de banda deve aumentar de forma a suportar todos os canais transmitidos.

A saturação do ganho de um amplificador Raman em um sistema com múltiplos canais é caracterizada pela redução do ganho com aumento da potência do sinal de entrada no amplificador. Este efeito é mais pronunciado quando o número de canais ativos aumenta. No caso de sistemas CWDM, a potência de entrada pode ser reduzida em todos os canais como uma técnica possível para evitar a saturação do ganho. Para um sistema CWDM, com oito canais situados entre 1270 nm e 1340 nm, com espaçamento de 10 nm, um amplificador Raman discreto, utilizando quatro lasers de bombeamento com 1202 nm, 1225 nm, 1242 nm e 1265 nm, com potências de 25,5 dBm, 19,3 dBm, 16,5 dBm e 12,5 dBm, respectivamente, forneceu um ganho médio de 10,5 dB, largura de banda de 70 nm, com ondulação do ganho menor que 1 dB (SAITO *et al.*, 2008).

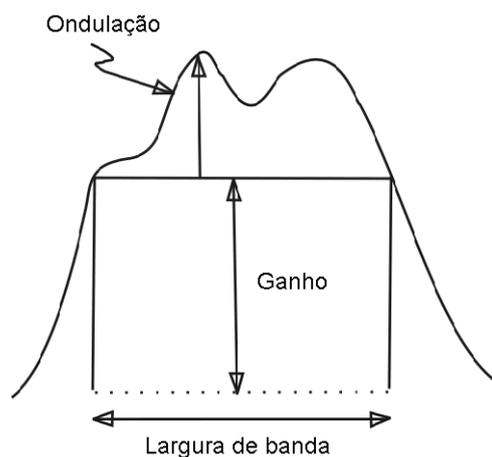


Figura 2-6: Representação do perfil espectral do ganho enfatizando os parâmetros, ondulação, largura de banda e ganho de um amplificador Raman. (adaptada de ANDRÉ *et al.*, 2007).

A configuração do amplificador Raman é definida por diversos parâmetros, tais como largura de banda e potência dos canais de entrada e de bombeamento. A partir desses parâmetros definidos, deve-se estimar um conjunto de lasers de bombeamento que agirão na

amplificação dos sinais transmitidos de maneira que equalize os ganhos dos canais de entrada. Como o objetivo é obter um ganho plano em toda a largura de banda dos sinais de entrada, a escolha adequada da potência e do comprimento de onda de cada laser de bombeamento é primordial.

3 METODOLOGIA

No capítulo anterior foram apresentadas a fenomenologia de amplificação ótica e a revisão de alguns trabalhos sobre amplificadores óticos que apresentam aumento da largura de banda do sinal de entrada, permitindo aumento no número de canais de entrada. Os amplificadores Raman podem ser utilizados para complementar o uso do EDFA, unindo a capacidade de amplificação deste com a flexibilidade daquele. A dificuldade de ajustar os parâmetros de projeto do amplificador Raman com múltiplos canais e múltiplos lasers de bombeamento impulsiona a investigação por buscas mais simples e rápidas. Um estudo do desempenho do amplificador híbrido Raman+EDFA deve ser feito com o objetivo de um entendimento completo de suas vantagens e desvantagens.

Neste capítulo é apresentado um modelo de evolução de potência primeiramente para sistemas de apenas um canal e um laser de bombeamento e em seguida para sistemas com múltiplos lasers de bombeamentos e múltiplos canais interagindo entre si e propagando simultaneamente em qualquer sentido ao longo da fibra. Expressões analíticas são importantes, não apenas para proporcionar resultados confiáveis com tempo computacional reduzido, mas também compreender a relevância e a interferência dos diversos efeitos envolvidos na propagação de sinais em amplificadores Raman. Também serão apresentadas propostas de técnicas de equalização do perfil de ganho de amplificadores híbridos Raman+EDFA, com o objetivo de obtenção de menor variação dos ganhos dos canais de entrada.

3.1 MODELAGEM ANALÍTICA DO AMPLIFICADOR RAMAN

Os parâmetros de projeto de amplificadores Raman, como ganho do sinal e a relação sinal ruído (ótica), são geralmente obtidos através de simulações numéricas utilizando modelos matemáticos completos, mas que exigem um tempo computacional relativamente longo, relacionado à complexidade do sistema.

Expressões analíticas representam modelos aproximados de maneira a obter resultados satisfatórios dentro de faixas de potência de interesse em comunicações óticas. O

importante é alcançar faixas em que o SNR do sistema transmitido seja menor e o ganho do amplificador não chegue à saturação.

Modelos numéricos da evolução de potência em regime estacionário são apresentados para sistemas com apenas um bombeamento e um sinal interagindo entre si, como também para múltiplos canais e múltiplos lasers de bombeamento propagados simultaneamente na mesma fibra ótica. Nesses modelos serão considerados alguns dos principais efeitos como interações sinal-bombeamento, espalhamento Rayleigh e ASE (*Amplified Spontaneous Emission* – Emissão Espontânea Amplificada) que afetam a transmissão desses sinais em tais amplificadores considerando um regime de operação CW (*Continuous Wave* – Onda Contínua). Para efeito de simplificação, não serão abordados efeitos dinâmicos como dispersão por velocidade de grupo e os efeitos não lineares de auto-modulação de fase, modulação cruzada de fase e mistura de quatro ondas.

A interação entre a potência ótica de bombeamento e aquelas das ondas Stokes, sob condições de regime estacionário é governada pelo conjunto de equações acopladas (equações 3.1 e 3.2) que podem ser expressas em função da potência das ondas propagantes, onde P é o nível de potência de cada onda considerada e os subscritos s e p representam as frequências das ondas de Stokes (sinal) e as de bombeamento, respectivamente. (AGRAWAL, 2002).

$$\frac{dP_s}{dz} = -\alpha_s P_s + \frac{g_{R_{p,s}}}{A_{eff}} P_p P_s \quad (3.1)$$

$$\frac{dP_p}{dz} = -\alpha_p P_p + \frac{\omega_p}{\omega_s} \frac{g_{R_{p,s}}}{A_{eff}} P_p P_s \quad (3.2)$$

Nas equações 3.1 e 3.2, α é o coeficiente de atenuação e A_{eff} é a área efetiva, definida como πr^2 , sendo r o raio do núcleo da fibra. A dependência da A_{eff} com a frequência é um fator que deve ser levado em consideração no projeto de amplificadores por causa de sua influência direta no ganho do amplificador. O coeficiente de ganho Raman, $g_{R_{p,s}}$ (obtido em função da separação em frequência entre a onda Stokes e a de bombeamento), geralmente depende da composição do núcleo da fibra e pode variar significativamente com o uso de diferentes dopantes. A relação entre as frequências angulares $\frac{\omega_p}{\omega_s}$ é o termo que garante a conservação de energia trocada entre bombeamento e a onda Stokes.

Naquelas equações, o primeiro termo depois da igualdade mostra a atenuação da potência provocada pelo meio de propagação e o segundo termo mostra as trocas de potência entre sinal e bombeamento provocadas pelo SRS (AGRAWAL, 2002).

A eficiência do ganho Raman, $C_{R_{p,s}}$, é definida como

$$C_{R_{p,s}} = \frac{g_{R_{p,s}}}{A_{eff}} \quad (3.3)$$

e depende do desvio em frequência entre o sinal e o bombeamento.

O ganho Raman é influenciado pela luz polarizada paralelamente (co-polarizada) e pela luz polarizada perpendicularmente à luz de bombeamento. Em comprimentos de fibras longos utilizados em sistemas de transmissão, a polarização entre bombeamentos e sinais varia arbitrariamente (BROMAGE, 2004).

3.2 MODELO NUMÉRICO PARA AMPLIFICADORES RAMAN COM MÚLTIPLOS CANAIS E MÚLTIPLOS LASERS DE BOMBEAMENTO

A crescente necessidade de expandir a largura de banda de amplificadores óticos despertou a necessidade de modelos com múltiplos canais e com múltiplos lasers de bombeamento propagando simultaneamente em uma fibra. Um modelo de propagação CW que inclui efeitos físicos existentes em transmissão de sinais e bombeamentos em amplificadores Raman foi proposto por KIDORF, 1999. Nesse modelo a soma das contribuições em cada onda propagante é aproximada por uma integral sobre as frequências.

Nos modelos apresentados por EMORI, 1999 e NAMIKI, 2006, a integral foi substituída por um somatório sobre as frequências. O modelo analítico para a evolução da potência de ruído gerado pela emissão espontânea amplificada (ASE) em sistemas com múltiplos canais e múltiplos lasers de bombeamento, nas configurações copropagante e contrapropagante, foi desenvolvido por HAN *et al.*, 2006, considerando todas as interações devido ao efeito Raman. O modelo matemático de um amplificador Raman pode ser expresso com os seguintes sistemas de equações diferenciais não-lineares:

$$\pm \frac{dP_i^\pm}{dz} = \left[-\alpha_i + \sum_{\nu_j > \nu_i} g_{ji} \bar{P}_j - \sum_{\nu_j < \nu_i} \frac{\nu_i}{\nu_j} g_{ij} \bar{P}_j - 2h\nu_i \sum_{\nu_j < \nu_i} \frac{\nu_i}{\nu_j} g_{ij} \eta(T) \Delta\nu \right] P_i^\pm \quad (3.4)$$

referente à influência dos bombeamentos e dos sinais;

$$\pm \frac{dP_{A,i}^{\pm}}{dz} = \left[-\alpha_i + \sum_{\nu_j > \nu_i} g_{ji} \bar{P}_j - \sum_{\nu_j < \nu_i} \frac{\nu_i}{\nu_j} g_{ij} \bar{P}_j - 2h\nu_i \sum_{\nu_j < \nu_i} \frac{\nu_i}{\nu_j} g_{ij} \eta(T) \Delta\nu \right] P_i^{\pm} + 2h\nu_i \sum_{\nu_j > \nu_i} g_{ji} \bar{P}_j [1 + \eta(T)] \Delta\nu + \gamma_i P_i^{\mp} \quad (3.5)$$

referente à influência da ASE e

$$\pm \frac{dP_{R,i}^{\pm}}{dz} = \left[-\alpha_i + \sum_{\nu_j > \nu_i} g_{ji} \bar{P}_j - \sum_{\nu_j < \nu_i} \frac{\nu_i}{\nu_j} g_{ij} \bar{P}_j - 2h\nu_i \sum_{\nu_j < \nu_i} \frac{\nu_i}{\nu_j} g_{ij} \eta(T) \Delta\nu \right] P_{R,i}^{\pm} + \gamma_i (P_{R,i}^{\mp} + P_i^{\mp}) \quad (3.6)$$

referente à influência das componentes de espalhamento Rayleigh.

As equações (3.4) a (3.6) descrevem a evolução da potência dos bombeamentos, dos sinais, da ASE, e das componentes do espalhamento Rayleigh, respectivamente, ao longo do comprimento da fibra amplificadora.

Naquelas equações os símbolos + e - denotam o sentido copropagante e contrapropagante, respectivamente, P_i é a potência na frequência ν_i , a distância ao longo da fibra é medida pela coordenada z , g_{ij} é o coeficiente de ganho Raman entre as frequências ν_i e ν_j , medido com um bombeamento na frequência ν_{reff} , α_i e γ_i são o coeficiente de atenuação da fibra e o de espalhamento Rayleigh na frequência ν_i , respectivamente, h e k são constantes de Planck e de Boltzmann, respectivamente. T é a temperatura absoluta da fibra, $\Delta\nu$ é a largura de banda do espectro ASE e $\eta(T)$ é o fator de ocupação do fônon.

O fator de ocupação do fônon é definido pela equação:

$$\eta(T) = \left(\exp \left[\frac{h(\nu_p - \nu_s)}{kT} \right] - 1 \right)^{-1} \quad (3.7)$$

onde $h\nu_s$ é a energia média dos fótons gerados. Em equilíbrio térmico $\eta(T)$ é dado pelo fator de Bose-Einstein (equação 3.7). A emissão espontânea de fônons em cada frequência propagante ocorre em uma taxa proporcional a $[1 + \eta(T)]$ (ROTTWITT *et al.*, 1998).

O modelo analítico da evolução da potência dos bombeamentos desenvolvido por CANI *et al.*, 2009, inclui interação devido ao efeito Raman, como também os efeitos de polarização, desconsiderando em sua formulação os efeitos de emissão de ruído amplificado e do espalhamento Rayleigh. Este modelo foi obtido por um processo iterativo. O número de iterações foi considerado suficiente quando a potência dos bombeamentos obtida analiticamente alcançou a estabilização, inclusive apresentando um resultado bastante próximo da solução numérica (duas iterações foram suficientes para alcançar a estabilização e uma boa aproximação).

Tal modelo considera as equações 3.8 e 3.9, que governam a evolução da potência do canal de sinal e do canal de bombeamento. Nessas equações, o primeiro termo depois da

igualdade mostra a atenuação da potência entre o sinal e o bombeamento provocadas pelo espalhamento estimulado Raman (SRS). Nenhum tipo de ruído está inserido nessas equações.

$$\frac{dP_s}{dz} = -\alpha_s P_s + \frac{g_R P_p P_s}{A_{eff}} \quad (3.8)$$

$$\frac{dP_p}{dz} = -\alpha_p P_p - \frac{\omega_p}{\omega_s} \frac{g_R}{A_{eff}} P_p P_s \quad (3.9)$$

As equações 3.8 e 3.9 foram resolvidas considerando a depleção do bombeamento causada pelo SRS. Para esta situação, a solução foi obtida usando um método de iteração numérica, dividindo-se a fibra ótica em N seções, e assume-se que as potências P_s e P_p são constantes em cada seção; começando a partir da primeira seção, substitui-se P_s e P_p nas equações 3.8 e 3.9 respectivamente, para obter as potências na seção seguinte, e assim sucessivamente até alcançar a última seção. O passo de iteração deve ser pequeno o suficiente para se alcançar resultados precisos.

Considerando que a intensidade de potência do canal de sinal é muito menor que a intensidade do canal de bombeamento, a depleção do bombeamento provocada pelo SRS pode ser desprezado, dessa forma o segundo termo depois da igualdade na equação 3.9 pode ser desprezado, fazendo com que $\alpha_s = \alpha_p = \alpha$.

A dificuldade encontrada em otimizar um amplificador Raman banda larga, utilizando os modelos numéricos encontrados na literatura, por exemplo SPERTI *et al.*, 2008, motivaram a busca por uma ferramenta alternativa rápida e, principalmente confiável. CANI *et al.*, 2009 apresenta um modelo analítico aproximado que fornece a evolução da potência e consequentemente o ganho para uma quantidade arbitrária de canais propagantes em um amplificador Raman, levando em consideração fatores relevantes no projeto de um amplificador Raman.

3.3 FONTES DE RUÍDO

As principais fontes de ruído de um amplificador ótico são as seguintes: (KARÁSEK *et al.*, 2001; BROMAGE, 2004, BORGHESI *et al.*, 2002)

- Batimento sinal-ASE, que é originado da mistura da luz coerente do sinal com a luz incoerente da emissão espontânea amplificada (ASE) quando ambas têm uma mesma polarização;
- Batimento ASE-ASE, que é o batimento de componentes copolarizadas de ASE;
- Interferência de múltiplos caminhos (MPI, *Multipath Interference*), que aparece devido às flutuações de fase e frequência do sinal refletido em vários pontos dentro do amplificador, ocorre com o espalhamento Rayleigh estimulado duplo (DRB, *Double Rayleigh Backscattering*);
- Ruído balístico (*shot noise*), devido à natureza quantizada dos fótons.

A figura de ruído (NF, *Noise Figure* – Figura de ruído) quantifica a degradação da relação sinal-ruído (ótica) devido à inserção de ruído, quando o sinal é amplificado. Em amplificadores óticos, esse é um parâmetro que permite uma comparação simples entre diferentes configurações. A amplificação de ruído é uma das limitações nas aplicações em sistemas de comunicação. De acordo com a definição adotada pela ITU-T, utilizada em equipamentos de teste, a figura de ruído é definida por:

$$NF = 10 \cdot \log \left[\frac{SNR_{entrada}}{SNR_{saída}} \right] \quad (3.10)$$

SNR são as relações entre a potência ótica do sinal e do ruído na entrada e na saída do amplificador definidas por $\frac{P_S}{P_{ASE}}$, onde P_S é a potência do sinal amplificado e P_{ASE} é a potência total da ASE após o amplificador (HEADLEY, 2005).

3.4 DESEMPENHO DE AMPLIFICADORES HÍBRIDOS RAMAN+EDFA

Diversas configurações de amplificadores híbridos foram propostas na literatura com o objetivo de obter ganho alto e maior largura de banda. Esquemas de amplificadores híbridos utilizando módulos de amplificação Raman e EDFA separados, como também esquemas de amplificador híbrido Raman+EDFA com bombeamento residual foram desenvolvidos para atingir esse objetivo.

MASUDA *et al.*, 1998, utilizando módulos separados, consideraram no primeiro estágio um amplificador Raman distribuído com bombeamento de 230 mW de potência e

comprimento de onda de 1476 nm. No segundo estágio, um EDFA (seção EDF de apenas 2 m de comprimento), com bombeamento de 1480 nm e potência de 55 mW. Um simples equalizador de ganho, um filtro Mach-Zehnder com faixa espectral de 75 nm, colocado após o EDFA também foi utilizado. O resultado obtido da largura de banda, considerando o amplificador híbrido completo, foi de aproximadamente 90,5 nm, na faixa de 1556 nm a 1646,5 nm.

CARENA *et al.*, 2001, ainda considerando módulos separados, utilizaram filtro de ganho (gain flatening filter – GFF), com o objetivo de maximizar o comprimento do enlace e/ou minimizar os efeitos da não-linearidades. Nessa mesma linha, KARÁSEK *et al.*, 2001, analisaram o desempenho do amplificador híbrido (amplificador Raman distribuído em cascata com EDFA) operando em redes de acesso local. Foram introduzidos 50 canais WDM, nas bandas C e L. Para a obtenção de maior planicidade do ganho e maior largura de banda, foi variado, experimentalmente, o comprimento da EDF, a posição do primeiro canal de entrada, como também o comprimento de onda e a potência dos lasers de bombeamento. Os resultados obtidos foram o ganho global médio e a ondulação de aproximadamente 18,5 dB e 2 dB, respectivamente. Com o mesmo objetivo, AHMAD *et al.*, 2005, através de uma associação de um amplificador Raman, três EDFA's e Filtro (GFF), considerando 44 canais WDM, obtiveram ganho global máximo de 28 dB.

LEE *et al.*, 2004, 2005, apresentaram análise do desempenho de um amplificador híbrido com dois estágios, sendo o primeiro um amplificador Raman, bombeado por um laser com o comprimento de onda de 1455 nm e potência de 500 mW, em cascata com uma seção EDF de 10 m de comprimento. No segundo estágio recebe uma fração da potência do laser de bombeamento Raman que seria desperdiçada devido ao comprimento da DCF relativamente pequeno. Essa análise espectral foi realizada experimentalmente, em termos do ganho global e da figura de ruído. Nessa mesma linha, LIN *et al.*, 2009 publicaram novos resultados experimentais, considerando o mesmo esquema de LEE *et al.*, 2005. Nesse momento foram considerados 16 canais WDM, com espaçamento de 100 GHz e bombeamento Raman duplo, sendo a potência de 200 mW em cada laser.

Em TIWARI *et al.*, 2008, 2009 comparações de resultados de simulações e experimentos foram realizadas, enfatizando as vantagens de primeiramente serem realizadas as simulações com objetivo de obter-se experimentos mais direcionados para alcançar mais rapidamente os objetivos de ganho alto e plano, com largura de banda maior. A análise do desempenho do amplificador híbrido tanto espectral quanto com 8 canais WDM (com

espaçamento de 3 nm), com configurações equivalentes às apresentadas por LEE *et al.*, 2005, foram realizadas em termos do ganho global e da figura de ruído.

As maiores motivações que impulsionam o estudo de desempenho de amplificadores híbridos com reuso de bombeamento são suas vantagens como a alta eficiência de conversão de energia, ganho maior que em módulos separados e a possibilidade de casamento da flexibilidade espectral do amplificador Raman com o alto ganho do EDFA. A relação complexa existente entre ganho espectral, comprimento de onda e potência de bombeamento é uma dificuldade importante em projetos de amplificadores Raman. Também pode ser citada a alta ondulação dos ganhos de cada canal das configurações de amplificadores híbridos encontradas na literatura.

Os amplificadores Raman discretos são utilizados para complementar o uso dos amplificadores de fibra dopada com Érbio, promovendo um ganho adicional em enlaces muito longos. A principal questão, em configurações de amplificadores híbridos com bombeamento residual, é aumentar a eficiência da potência de bombeamento, pois uma fração significativa dessa potência é desperdiçada devido ao comprimento relativamente pequeno da DCF. A potência de bombeamento é reutilizada como uma amplificação de sinal secundária através de uma EDF em cascata com amplificador Raman (LEE *et al.*, 2004).

A figura 3.1 apresenta o esquema de amplificador híbrido com lasers de bombeamento contrapropagante no primeiro estágio (amplificação Raman) e copropagante no segundo estágio (EDFA) proposto por LEE *et al.* (2004, 2005 a-c).

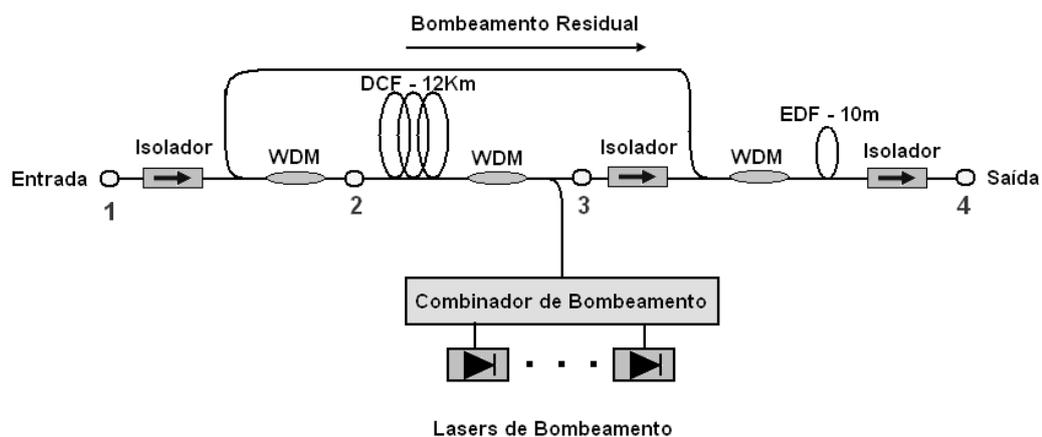


Figura 3-1: Esquema da configuração do amplificador híbrido Raman+EDFA, com compensação de dispersão, utilizando bombeamento residual, LEE *et al.* (2005).

Naquele esquema foi experimentalmente demonstrado o conceito original de amplificador híbrido utilizando compensação de dispersão baseado no amplificador Raman

seguido de um amplificador EDFA, e realizada uma comparação de desempenho, em termos de ganho global e figura de ruído (NF). O estágio de amplificação Raman possui uma DCF de 12,6 km de comprimento, com coeficiente de atenuação de 0,55 dB/km e dispersão da velocidade de grupo (GVD, *Group Velocity Dispersion*) de -98 ps/nm.km, na frequência de 1550 nm. Dois lasers de bombeamento foram utilizados separadamente, cada um operando em 1455 nm e 1465 nm, com potência de 500 mW. O segundo estágio de amplificação é uma seção EDF de 10 m de comprimento que atua como amplificação secundária do sinal transmitido.

Para a configuração considerando apenas o amplificador Raman foi verificado que o ganho médio e a largura de banda para o amplificador somente Raman foram de aproximadamente 6 dB e 14 nm, respectivamente, considerando a ondulação máxima do ganho de cada canal de 1 dB, para os três níveis de potência do sinal de entrada (-20 dBm, -10 dBm e -5 dBm). Para o amplificador híbrido Raman+EDFA com bombeamento Raman residual copropagante na seção EDF em cascata, o ganho global médio passou de 6 dB para aproximadamente 10 dB, 15 dB e 19 dB, nas mesmas condições de potência de entrada. Dessa maneira pode ser verificado que o amplificador híbrido fornece um ganho global maior, que depende da potência do sinal de entrada. A largura de banda é de aproximadamente 30 nm.

3.5 DEFINIÇÕES BÁSICAS

A análise do desempenho das configurações do amplificador híbrido Raman+EDFA, conforme a figura 3.1, foi realizada principalmente em termos de ganho global e ondulação. Dessa forma é interessante definir algumas grandezas utilizadas para tais análises, pois o amplificador proposto possui dois estágios de amplificação e em todas as simulações são analisados os desempenhos de cada amplificador tanto separadamente quanto do amplificador híbrido.

O ganho global médio ($G_{médio}$) foi considerado como o ganho de cada canal (G_c) dividido pelo número de canais (N_c):

$$G_{médio} = \frac{\sum G_c}{N_c} \quad (3.11)$$

O ganho Raman calculado (G_{Raman}), conforme mostrado na figura 3.1, corresponde à razão entre a potência na entrada do primeiro estágio, ponto 2, no desenho esquemático, e a potência no ponto 3, saída do amplificador Raman.

$$G_{Raman} = \frac{P_{saída}^3}{P_{entrada}^2} \quad (3.12)$$

sendo que $P_{saída}^3$ é a potência de saída no ponto 3 e $P_{entrada}^2$ é a potência de entrada no ponto 2.

O ganho EDFA (G_{EDFA}) é determinado pela relação entre as potências de saída, ponto 4, e entrada, ponto 3, do EDFA. Essa seção de fibra é chamada de segundo estágio de amplificação.

$$G_{EDFA} = \frac{P_{saída}^4}{P_{entrada}^3} \quad (3.13)$$

sendo que $P_{saída}^4$ é a potência de saída do EDFA no ponto 4 e $P_{entrada}^3$ é a potência de entrada no ponto 3. Similarmente, o ganho global do amplificador híbrido Raman+EDFA (G_{global}) é dado pela relação entre a potência de saída, ponto 4, e a potência de entrada do amplificador híbrido ponto 1.

$$G_{global} = \frac{P_{saída}^4}{P_{entrada}^3} \quad (3.12)$$

Ondulação é a diferença entre o maior e o menor valor do ganho global considerando todos os canais de entrada.

$$Ondulação = G_c^{max} - G_c^{min} \quad (3.13)$$

onde G_c^{min} é o menor valor do ganho global e G_c^{max} é o maior valor do ganho global, considerando cada canal.

A Figura de ruído foi definida na seção 3.3, onde as relações entre a potência ótica do sinal e do ruído na entrada e na saída do amplificador são definidas por $\frac{P_s}{P_{ASE}}$, onde P_s é a potência do sinal amplificado e P_{ASE} é a potência total da ASE após o amplificador, conforme a equação 3.10.

3.6 MÉTODOS PROPOSTOS DE OTIMIZAÇÃO PARA MÚLTIPLOS LASERS DE BOMBEAMENTO DE AMPLIFICADORES HÍBRIDOS

A otimização de comprimentos de onda e de potências de múltiplos lasers de bombeamento é uma tarefa crítica que deve ser realizada durante o projeto do amplificador Raman. Não existe uma relação simples entre o ganho Raman, os comprimentos de onda e a potência de bombeamento. Muitas tentativas nesse sentido não obtiveram boas estimativas das características de um amplificador Raman. Existem alguns trabalhos na literatura que propõem métodos para a otimização do ganho e da ondulação em amplificadores Raman banda larga com múltiplos lasers de bombeamento.

Em LIU *et al.*, 2004, é utilizado um processo iterativo com algoritmo genético para obtenção das potências dos lasers de bombeamento, porém a convergência desse método pode ser demorada. Em LI, *et al.*, 2004, um método alternativo utiliza as características geométricas do perfil de ganho Raman para obtenção do comprimento de onda dos lasers de bombeamento e é necessário aplicar novamente um processo iterativo para obtenção das potências. Outras ferramentas de otimização também são propostas por LOPEZ-BARBERO *et al.*, 2006 e ZHOU *et al.*, 2005. Um método analítico com uma boa aproximação capaz de fornecer o ganho e ondulação para amplificadores Raman com múltiplos canais e múltiplos lasers de bombeamento foi proposto recentemente por CANI *et al.*, 2009.

O amplificador híbrido Raman+EDFA utilizado nesta tese é analisado considerando múltiplos lasers de bombeamento e múltiplos canais, sendo dois estágios de amplificação, um amplificador Raman utilizando uma DCF e uma seção EDF em cascata. São analisados esquemas de configurações de amplificadores híbridos com bombeamento residual copropagante e contrapropagante na seção EDF, sendo sempre contrapropagante no estágio Raman. Dentro desse contexto foram realizadas simulações no ambiente do OptiSystem® 7.0 com o objetivo de verificar o perfil de ganho global e de figura de ruído mais adequados para possíveis aplicações de amplificadores híbridos com bombeamento residual em comunicações óticas. A estrutura apresentada por LEE *et al.*, 2005, foi utilizada como base nas análises apresentadas nesse trabalho.

Uma nova técnica de otimização para projetar amplificadores híbridos banda larga está sendo proposta nesta tese. Essa técnica utiliza o método analítico de CANI *et al.*, 2007, com o objetivo de equalizar o espectro do ganho do EDFA através do ajuste de parâmetros do

amplificador Raman. Esse método analítico permite avaliar o perfil do ganho Raman dentro de um grande conjunto de configurações de lasers de bombeamento, com exatidão razoável em poucos minutos. O perfil do ganho Raman foi analisado sob diferentes condições de bombeamento, isto é, foi considerada uma larga faixa de potência e de comprimento de onda.

Essa nova técnica proposta é realizada em duas etapas. Na primeira é gerada uma grande população dessas configurações de lasers de bombeamento Raman, por uma seleção aleatória de potências e de comprimentos de onda. Na segunda etapa são realizados testes em simulador comercial, e dentre todos os resultados obtidos, é selecionada a configuração de lasers de bombeamento seguindo o critério de perfil de ganho global do amplificador híbrido com menor ondulação e ganho global alto.

Serão apresentados dois métodos, sendo que o primeiro utiliza aproximação geométrica (desvio médio quadrático) para conseguir boas soluções do perfil de ganho Raman em um espaço de 30.000 possibilidades, resultando em apenas 10 possíveis soluções a serem testadas no amplificador híbrido. O segundo método realiza uma busca completa de 100.000 possibilidades de perfil de ganho Raman, a partir da soma de cada um desses perfis com o do EDFA de referência. Dessa forma o espaço de busca se torna maior, quando comparado com o primeiro método, com o objetivo de conseguir melhores soluções.

3.6.1 Primeiro Método Proposto

O primeiro método utiliza um ajuste geométrico dos perfis de ganho dos estágios do amplificador híbrido Raman+EDFA, considerando a simetria entre eles. A aproximação do perfil de ganho Raman utilizada nesse método é baseada na forma geométrica utilizada por LI, *et al.*, 2004. Esse primeiro método é composto de duas etapas. Uma população de 30.000 diferentes perfis de ganho Raman é fornecida pelo método analítico de CANI *et al.*, 2007, sob diferentes condições de potência (na faixa de 50 mW a 300 mW) e de comprimento de onda (entre 1400 nm e 1480 nm).

Os perfis de ganho Raman são divididos em duas regiões distintas, considerando a simetria com o perfil de ganho do EDFA de referência, denominadas, R1: 1530-1560 nm e R2: 1560-1570 nm, conforme é apresentado na figura 3.2. A inclinação do ganho Raman deverá compensar o perfil do ganho do EDFA nessas regiões. Para que isso ocorra, a derivada

do ganho Raman deve ser negativa em R1 e positiva em R2, segundo o critério de simetria entre os perfis de ganho dos dois estágios de amplificação. Para cada região do espectro do estágio Raman, esse método considera uma faixa de ondulação de 6,5 até 9,5 dB em R1 e de 1,0 até 3,0 dB em R2, de maneira que equalize o ganho global do amplificador híbrido nessas duas regiões. Nessa etapa, o custo computacional se torna oneroso, pois são necessárias operações que exigem maior tempo para execução, como por exemplo, derivadas (relacionadas com inclinação de retas). Apesar de terem sido obtidos 30.000 diferentes perfis, somente 10 perfis de ganho Raman, que melhor se ajustaram geometricamente ao perfil de referência (espelho do perfil do EDFA), são escolhidos para a segunda etapa do processo de seleção. Dessa forma, o espaço de busca desse método se torna muito restrito, pois as soluções encontradas se limitam a uma comparação geométrica de perfis, considerando a simetria a partir de um perfil de referência.

A segunda etapa de seleção é realizada utilizando o simulador comercial OptiSystem® 7.0, onde o amplificador híbrido completo é agora levado em consideração através de métodos numéricos precisos. Isso inclui efeitos tais como interações bombeamento-bombeamento, bombeamento-sinal, sinal-sinal, emissão espontânea Raman e sua dependência com a temperatura, espalhamento Raman estimulado, depleções de bombeamento devido à transferência de energia Raman, geração Stokes de alta ordem, espalhamento Rayleigh duplo múltiplo, perda da fibra e ruído por emissão espontânea na análise do amplificador híbrido EDFA+Raman.

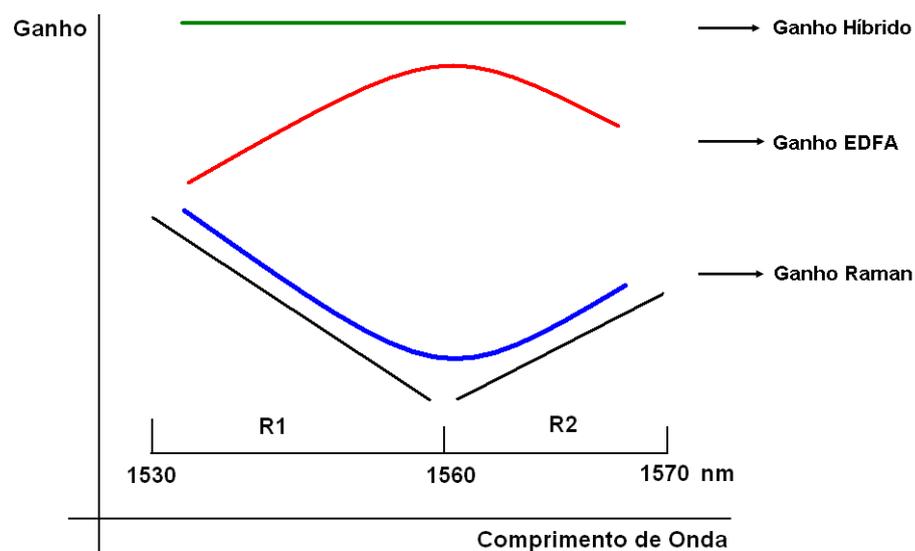


Figura 3-2: Esquema utilizado para aproximação do perfil de ganho do estágio de amplificação Raman no primeiro método de otimização.

No caso do OptiSystem® 7.0, os efeitos não-lineares tais como FWM, instabilidade de modulação, auto-modulação de fase e espalhamento Raman estão incluídos no modelo da fibra ótica monomodo padrão. O modelo dos amplificadores óticos e os modelos das fibras são componentes separados no OptiSystem® 7.0.

O conjunto de perfis do ganho Raman, selecionados na primeira etapa, são testados no ambiente do simulador comercial e a configuração do amplificador híbrido que fornecer o perfil de ganho global com menor ondulação define os parâmetros dos lasers de bombeamento ótimo.

3.6.2 Segundo Método Proposto:

O segundo método foi desenvolvido por causa da necessidade de diminuir o custo computacional, para que pudessem ser fornecidas melhores soluções para configurações de múltiplos bombeamentos. Esse método utiliza duas etapas, sendo que na primeira, através do método analítico utilizado na seção 3.6.1, são gerados 100.000 perfis de ganho de amplificadores Raman, e nessa mesma etapa são somados cada um desses perfis ao do EDFA de referência, conforme é apresentado na figura 3.2. Nessa primeira etapa, o custo computacional se torna menos oneroso, pois são necessárias apenas operações simples, como adição. Dessa forma, o espaço de busca desse método se torna muito maior.

Dentre as 100.000 geradas pelo método analítico, apenas as 10 configurações de bombeamento, que forneceram perfis de ganho global com menor ondulação de ganho dos canais de entrada, serão consideradas na segunda etapa do processo. As mesmas faixas de potência e comprimento de onda do primeiro método são novamente empregadas.

Ainda nessa etapa, cada um desses 100.000 perfis obtidos é somado ao ganho do EDFA de referência de maneira que o somatório obtido forneça o perfil de ganho dos possíveis amplificadores híbridos resultantes, isto é, o espaço de busca é 33% maior que do método anterior. As 10 configurações com perfil de ganho de menor ondulação são selecionadas para a segunda etapa do processo.

A segunda etapa é, novamente, realizada utilizando o simulador comercial OptiSystem® 7.0, que considera o amplificador híbrido completo, sendo as 10 configurações selecionadas avaliadas como parâmetros de entrada. O menor valor de ondulação do perfil do ganho global obtido para o amplificador híbrido Raman+EDFA encontrado entre essas

configurações selecionadas define os parâmetros da configuração final dos lasers de bombeamento Raman.

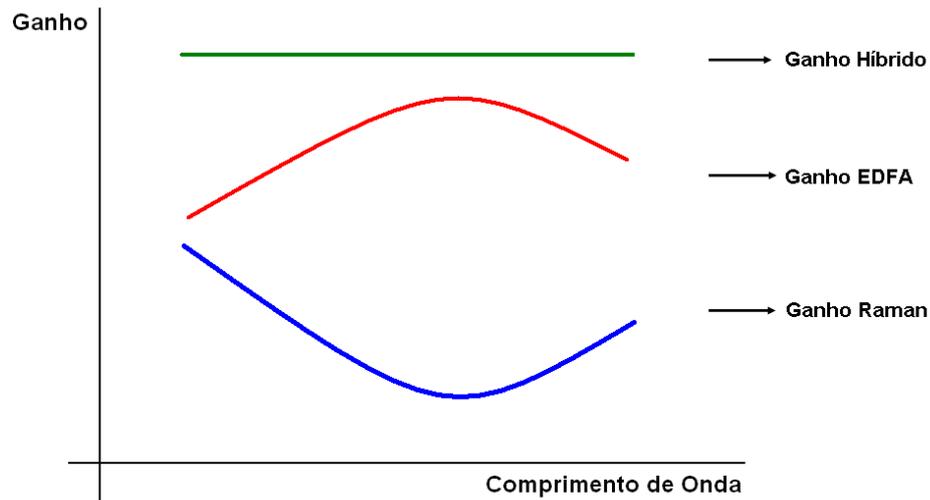


Figura 3-3: Esquema utilizado no segundo método de otimização para equalização do ganho global.

A técnica proposta no primeiro método oferece um espaço de busca muito restrito, pois somente são analisados os perfis de ganho Raman que se aproximam da forma geométrica espelhada do perfil do EDFA de referência (desvio médio quadrático). Esse método se mostrou eficiente para configurações de dois e três lasers de bombeamento, porém não foi obtida nenhuma solução para casos acima de quatro lasers. A partir dessa constatação foi verificada a necessidade do aperfeiçoamento da técnica proposta, e então o segundo método foi proposto. Esse método possibilita a realização de uma busca em um espaço muito maior do que o primeiro método, pois utiliza todos os perfis fornecidos pelo método analítico de CANI *et al.*, 2007. Isso permite a obtenção de melhores soluções.

4 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados resultados obtidos para análise do perfil de ganho de diferentes configurações de amplificador híbrido Raman+EDFA com bombeamento residual. As configurações foram modeladas no ambiente do software comercial OptiSystem® 7.0. Todos os parâmetros das simulações foram mapeados de acordo com as referências bibliográficas (experimentais) e o *default* do simulador utilizado. Essa investigação utilizou software comercial para confrontar os resultados obtidos por simulação com aqueles obtidos por outros autores utilizando diferentes técnicas e também para mensurar a aplicabilidade de pacotes comerciais em novas proposições.

A comparação do desempenho, em termos de ganho global médio, ondulação do ganho e figura de ruído entre diferentes configurações de amplificadores híbridos Raman+EDFA foi realizada para verificar os benefícios e as desvantagens de cada configuração. Foi avaliada a possibilidade de fazer análise do ganho de amplificadores híbridos utilizando um software comercial, levando em consideração os problemas gerados pelas condições ideais dos componentes que integram o pacote computacional.

4.1 CONCORDÂNCIAS COM A LITERATURA

Esquemas das configurações dos amplificadores híbridos Raman+EDFA com múltiplos lasers de bombeamento e múltiplos canais propostos nesta tese, são apresentados na figura 4.1, sendo que foi considerada para o estágio Raman a configuração de bombeamento contrapropagante e para o EDFA (a) copropagante e (b) contrapropagante. Inicialmente houve uma tentativa de concordância com os resultados simulados com os dados experimentais fornecidas por LEE, *et al.*, 2005 e TIWARI *et al.*, 2008 e 2009. Os parâmetros de entrada das fibras utilizados nas simulações que forneceram os resultados mais próximos (desvio médio quadrático) aos dados fornecidos por esses autores foram utilizados em diferentes configurações de amplificadores híbridos com bombeamento residual para análise de desempenho de ganho e de figura de ruído do amplificador híbrido. Os resultados obtidos tanto para análises espectrais quanto para canais WDM, são apresentados nesse capítulo.

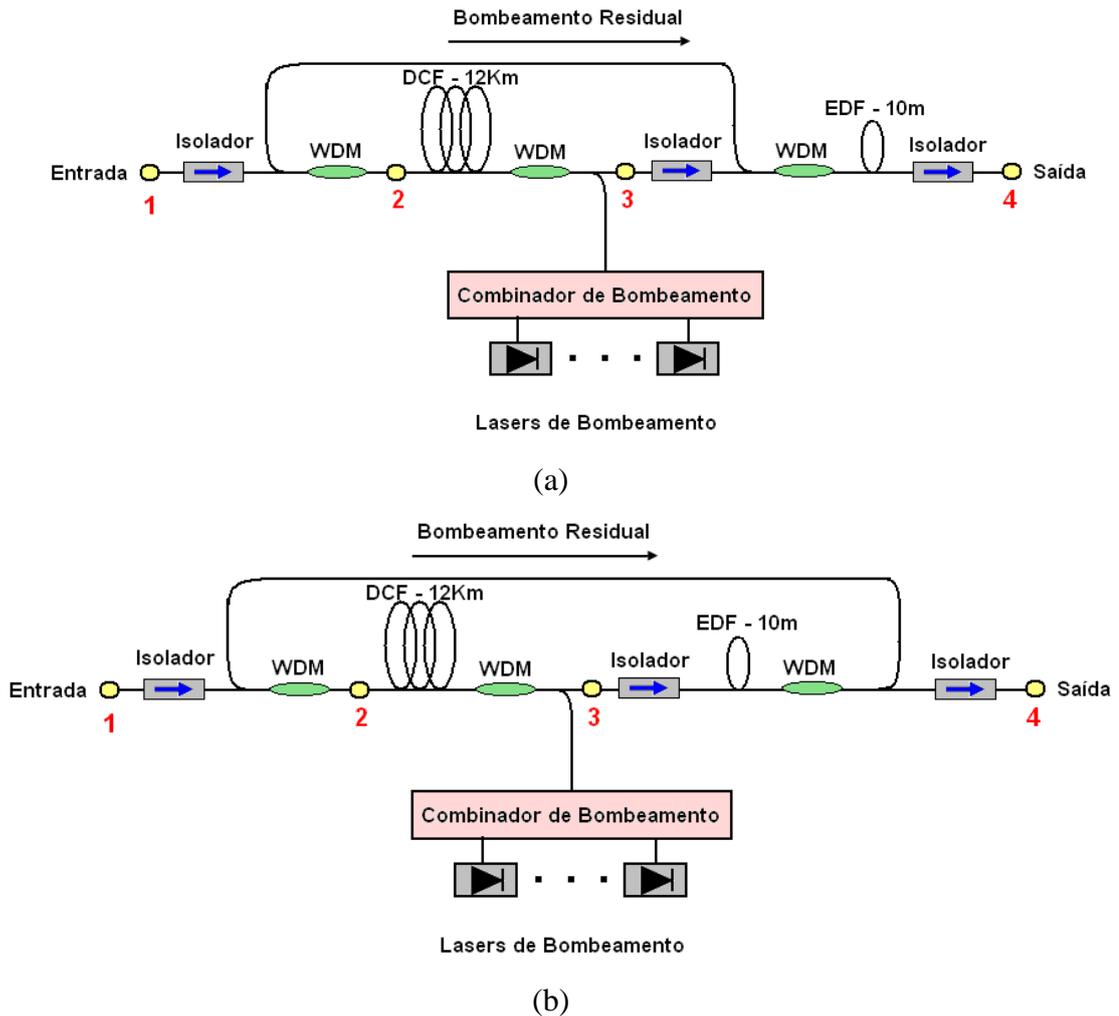


Figura 4-1: Esquema do amplificador híbrido Raman+EDFA utilizado nas simulações com o simulador OptiSystem 7.0. Bombeamento residual Raman (a) copropagante e (b) contrapropagante.

Foram analisadas algumas características das fibras DCF e EDF com o objetivo de determinar os parâmetros que mais influenciam no perfil do ganho global do amplificador híbrido. Para isso os valores do raio do núcleo e a concentração da dopagem de Érbio da EDF, como também a área do núcleo, o coeficiente de atenuação e o coeficiente de dispersão da DCF foram analisados, pois LEE, *et al.*, 2005 e TIWARI *et al.*, 2009 não forneceram os valores desses parâmetros importantes das fibras DCF e EDF, para uma melhor concordância com os resultados simulados.

Os valores dos parâmetros que mais influenciaram na aproximação dos resultados foram o raio do núcleo da DCF e a concentração de dopagem de Érbio da EDF. A melhor aproximação desses resultados obtidos nas simulações é de $80,0 \mu\text{m}^2$ para a área do núcleo da

DCF e para a concentração de Érbio da EDF é de $1,0 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$, comparada com os resultados de ganho global apresentados por LEE *et al.*, 2005, e de $1,0 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$ por TIWARI *et al.*, 2009.

Os resultados apresentados nas figuras 4.2 e 4.3 foram obtidos através de simulações utilizando o esquema do amplificador híbrido Raman+EDFA com bombeamento residual copropagante, introduzindo cada canal separadamente (análise espectral). Tal esquema é apresentado na figura 4.1. Os valores de entrada utilizados nessas simulações são apresentados na tabela 4.1. A potência de entrada do amplificador é de -20 dBm , sendo que foi introduzido um canal de cada vez para análise espectral do ganho global.

A potência de bombeamento não utilizada pelo estágio Raman e fornecida como bombeamento residual na seção EDF, de acordo com os resultados experimentais fornecidos por LEE *et al.*, 2005, foi de apenas 40 mW (potência residual que chega na seção EDF), obtendo ganho global máximo de aproximadamente 20 dB . Entretanto, o amplificador híbrido simulado se mostrou melhor, pois nas simulações realizadas utilizando o OptiSystem® 7.0, alcançou a potência de aproximadamente 115 mW como bombeamento residual, fornecendo ganho global de aproximadamente 40 dB . Isso ocorreu, pois as características das fibras (DCF e EDF) utilizadas nas simulações são diferentes em alguns parâmetros, conforme a tabela 4.1, que não foram fornecidos por LEE *et al.*, 2005.

Tabela 4-1: Parâmetros de entrada utilizados nas simulações para comparação dos resultados com aqueles fornecidos por LEE *et al.*, 2005 e TIWARI *et al.*, 2009.

Parâmetros	LEE <i>et al.</i> , 2005	TIWARI <i>et al.</i> , 2009
DCF		
Comprimento	12,6 km	5,3 km
Área do núcleo	$80,0 \mu\text{m}^2$	$80,0 \mu\text{m}^2$
Coefficiente de atenuação	0,5 dB/km	0,7 dB/km
Coefficiente de dispersão	-98 ps/nm.km	-110 ps/nm.km
EDF		
Comprimento	10 m	10 m
Raio do núcleo	2,2 μm	2,2 μm
Dopagem de Érbio	$1,0 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$	$1,0 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$

A técnica de otimização baseada no método analítico de CANI *et al.*, 2009, é utilizada como uma maneira para obtenção de um desempenho melhor do amplificador híbrido simulado, isto é, ganho global alto e menor ondulação. Na figura 4.2 pode ser observado que os resultados das concordâncias obtidas pelas simulações que utilizaram a

técnica de otimização (ganho global máximo de ≈ 30 dB e ondulação de ≈ 2 dB, na faixa de 1530 nm e 1565nm), forneceram resultados de ganho global maiores se comparado aos fornecidos por LEE *et al.*, 2005 (ganho global máximo de ≈ 20 dB e ondulação de ≈ 4 dB, na mesma faixa). Esses resultados foram obtidos por causa da técnica utilizada, que busca a simetria dos perfis de ganho dos estágios de amplificação, isto é, melhor combinação de lasers de bombeamento que planifica o ganho global.

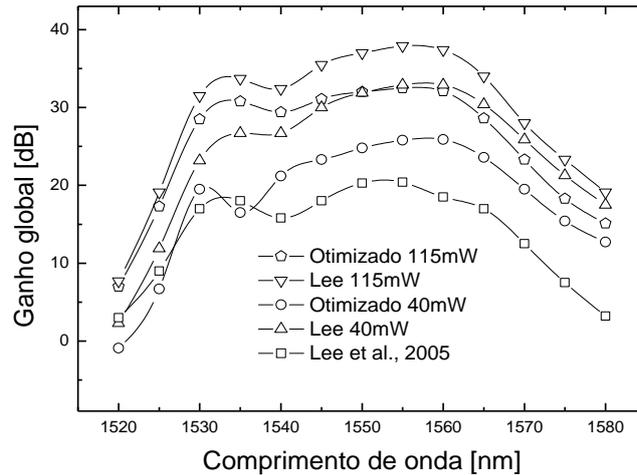


Figura 4-2: Concordância, utilizando desvio quadrático, com os resultados de ganho global fornecidos por LEE *et al.* 2005. Na legenda, “otimizado” indica a utilização do método de CANI *et al.* 2009.

Os resultados apresentados na figura 4.3 foram obtidos a partir de simulações, variando a dopagem de Érbio na seção de fibra utilizada no estágio de amplificação EDFA, de maneira que obtivesse uma melhor concordância, através do desvio quadrático, dos resultados de ganho global fornecidos por TIWARI *et al.*, 2009.

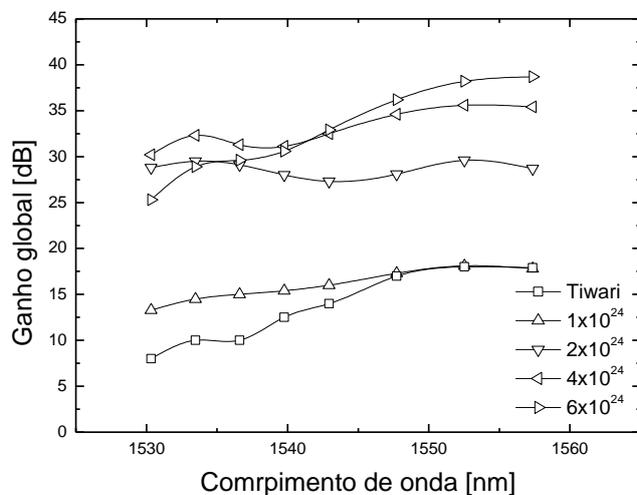


Figura 4-3: Concordância, utilizando desvio quadrático, com os resultados fornecidos por TIWARI *et al.*, 2009. A legenda representa a densidade de íons de Érbio por m^3 .

Foram considerados como parâmetros de entrada das simulações, os dados apresentados na tabela 4.1. Novamente a potência de entrada de cada canal foi de -20 dBm, sendo introduzidos um canal de cada vez. Na figura 4.3 pode ser verificado que a dopagem de Érbio na fibra deve ser na ordem de $1 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$, para melhor concordância com aos resultados fornecidos por TIWARI *et al.*, 2009.

4.2 DESEMPENHO DO AMPLIFICADOR HÍBRIDO UTILIZANDO TÉCNICA DE OTIMIZAÇÃO DE BOMBEAMENTO RAMAN

Nesta seção são apresentados resultados do ganho, da ondulação e da figura de ruído de amplificadores híbridos Raman+EDFA otimizados com múltiplos lasers de bombeamento e múltiplos canais. A técnica de otimização utilizada é baseada no método analítico de CANI *et al.*, 2009. Para isso são propostos dois métodos que fornecem os melhores parâmetros dos lasers de bombeamento (comprimentos de onda, potências e perfil de ganho) do estágio Raman do amplificador híbrido otimizado. Esses métodos foram descritos na seção 3.6.

Serão apresentados os perfis de ganho dos estágios de amplificação Raman e EDFA, o perfil do ganho global, como também a figura de ruído e a ondulação do ganho do amplificador híbrido otimizado, tanto para análise espectral quanto para múltiplos canais WDM.

A seção 4.2 é organizada da seguinte maneira: na subseção 4.2.1 são apresentados os resultados obtidos, utilizando o primeiro método de otimização proposto para as configurações de bombeamento duplo e triplo, em termos de análise espectral e de 8 canais WDM simultâneos. Na subseção 4.2.2 são apresentados os resultados obtidos, considerando o segundo método de otimização, para 8 canais WDM. Os resultados obtidos com a inserção de 16 canais WDM são apresentados na subseção 4.2.3, considerando dois valores de espaçamento entre os 16 canais, primeiramente 2 nm e depois 2,5 nm. Isso foi realizado para análise da influência desse parâmetro na planicidade do ganho global. Na seção 4.3 têm-se as subseções 4.3.1 e 4.3.2, onde são apresentados os resultados obtidos considerando 8, 16, 32, 64 e 128 canais WDM, na situação de aumento do número de canais e do aumento da

potência total de entrada, respectivamente, com o objetivo de comparar o desempenho do amplificador híbrido Raman+EDFA com bombeamento residual.

Tabela 4-2: Parâmetros de entrada utilizados nas simulações do amplificador híbrido Raman+EDFA.

DCF	
Comprimento	12,6 km
Área do núcleo	15,3 μm^2
Coefficiente de atenuação	0,5 dB/km
Coefficiente de dispersão	-98 ps/nm.km
EDF	
Comprimento	10 m
Raio do núcleo	2,2 μm
Dopagem de Érbio	1,0x10 ²⁵ m ⁻³

As configurações apresentadas na figura 4.1 foram utilizadas para análise de desempenho do amplificador híbrido Raman+EDFA otimizado. Na tabela 4.2 são apresentados os parâmetros de entrada para cada estágio. O parâmetro de Giles (*cross-section*) considerado nas simulações são os valores definidos no OptiSystem® 7.0 (*default*) para a seção EDF. A otimização foi realizada para dois e três lasers de bombeamento Raman. Três níveis de potência do sinal de entrada (P_s) foram considerados (-20 a -5 dBm), com o objetivo de verificar o perfil de ganho tanto do amplificador híbrido quanto de cada estágio de amplificação.

4.2.1 Resultados do Primeiro Método Proposto:

A melhor configuração de bombeamento duplo otimizado do estágio Raman obtida utilizando o primeiro método, isto é, que forneceu a menor ondulação do ganho global, possui dois lasers com os seguintes comprimentos de onda: 1425,0 nm e 1468,4 nm, com as potências de 296,3 mW e 61,3 mW, respectivamente. Considerando a configuração com bombeamento triplo, os lasers com os comprimentos de onda de 1414,5 nm, 1426,5 nm e 1472,6 nm, e potências de 244,1 mW, 269,9 mW, e 60,1 mW, respectivamente, forneceram resultados com menor ondulação do ganho global.

A técnica de otimização utilizada para bombeamento com múltiplos lasers fornece resultados melhores (maiores ganho globais e menores ondulações) quando as configurações de bombeamento possuem conjunto de lasers com comprimentos de onda menores e potências maiores e vice-versa, isto é, comprimentos de onda maiores com potências menores.

4.2.1.1 Análise Espectral

A partir da análise espectral, isto é, os canais foram introduzidos individualmente no amplificador híbrido, os resultados obtidos dos perfis de ganho da configuração de bombeamento duplo são apresentados na figura 4.4.

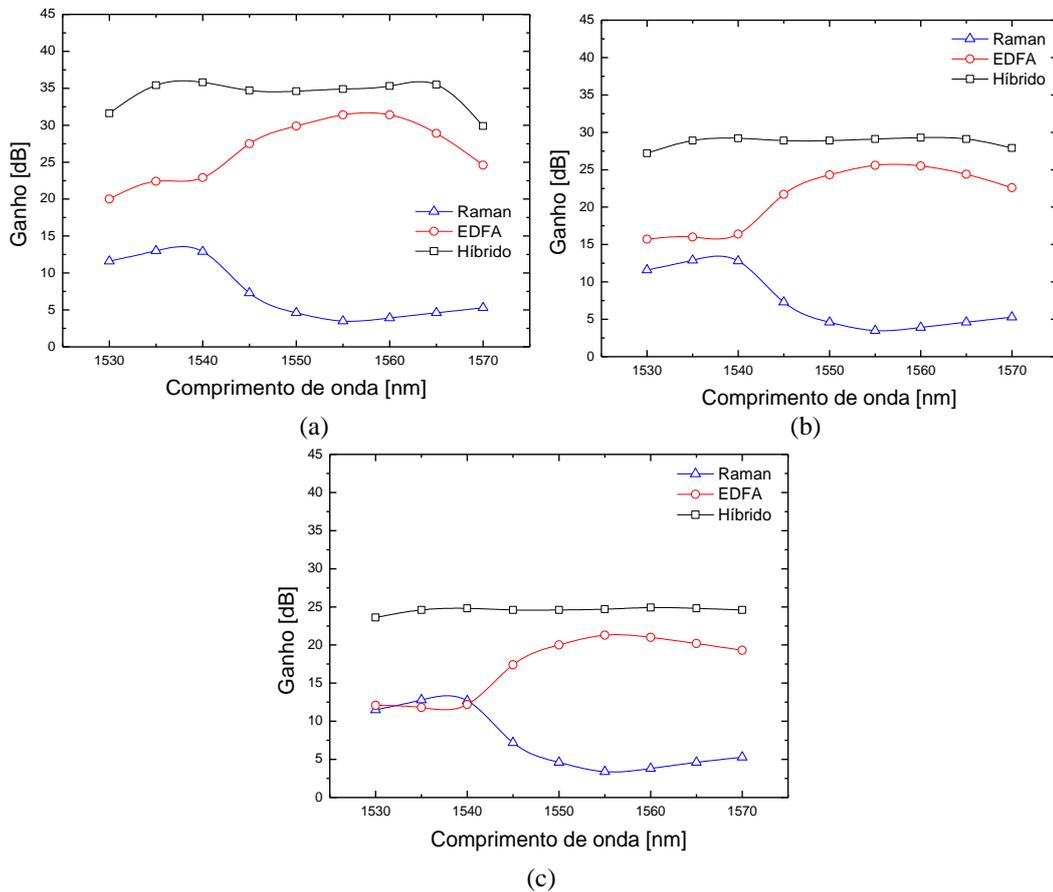


Figura 4-4: Perfis espectrais de ganho de cada estágio e do amplificador híbrido otimizado com dois bombeamentos. (a) $P_s = -20$ dBm, (b) $P_s = -10$ dBm e (c) $P_s = -5$ dBm.

Para sinais de entrada com comprimento de onda na faixa de 1535 nm a 1565 nm (largura de banda do amplificador de 30 nm), os valores de ganho global médio são 34 dB, 29 dB e 25 dB e da ondulação são 1,2 dB, 0,4 dB, e 0,3 dB, considerando os valores de potência

total de entrada (P_s) de -20 dBm, -10 dBm, e -5 dBm, respectivamente. Esses valores de ganho alto e baixa ondulação foram obtidos principalmente devido à utilização da técnica de otimização.

O efeito da saturação do ganho aparece no estágio da seção da EDF, quando o nível da potência do sinal de entrada aumenta. Isso pode ser explicado pela posição da seção EDF que se localiza após o estágio de amplificação Raman e recebe níveis maiores de potência, tanto de sinais de entrada quanto de bombeamento residual, considerando os canais com comprimento de onda menores que 1545 nm e maiores que 1560 nm. O ganho Raman permanece sem mudanças significativas, pois a técnica de otimização utilizada faz com que a potência de saturação do amplificador Raman seja maior do que com o amplificador sem otimização. Também podemos ressaltar que, com a utilização dessa técnica, a variação que ocorre entre o ganho global de cada canal se torna menor com o aumento da potência do sinal de entrada, pois buscam a simetria entre os perfis de ganho do EDFA e do Raman.

A figura 4.5 apresenta o perfil espectral da figura de ruído (NF) do amplificador híbrido otimizado com bombeamento duplo. O valor médio da NF é de aproximadamente 10 dB, apresentando resultado similar aos encontrados na literatura (LEE, *et al.*, 2005). Os valores da figura de ruído permanecem insensíveis à variação do nível de potência do sinal de entrada.

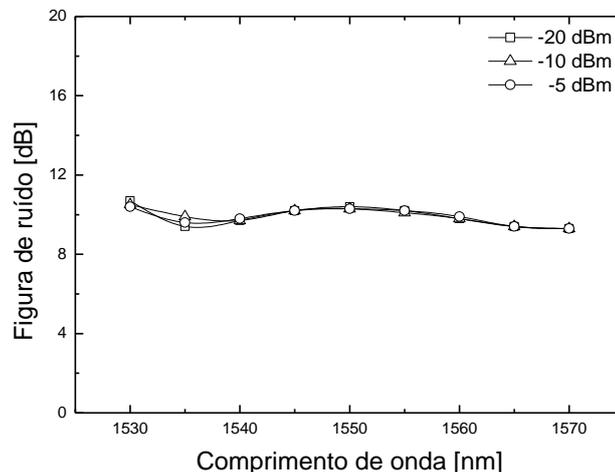


Figura 4-5: Perfil espectral da figura de ruído do amplificador híbrido Raman+EDFA otimizado com dois bombeamentos. Níveis de P_s na faixa de -20 dBm a -5 dBm.

Os resultados obtidos dos perfis espectrais dos ganhos dos estágios de amplificação e do ganho global, considerando a configuração de bombeamento triplo que forneceu melhor desempenho do amplificador híbrido, são apresentados na figura 4.6. Os

valores de ganho global médio são de 38 dB, 31 dB, e 27 dB e da ondulação são 3,0 dB, 1,3 dB, e 0,6 dB, considerando os valores de P_s de -20 dBm, -10 dBm, e -5 dBm, respectivamente. Na figura 4.6 pode ser verificado que, com adição de um laser de bombeamento, a ondulação (0,6 dB) permanece menor que 1 dB, como exige os sistemas de transmissão, e o ganho global médio passou de 25 dB (bombeamento duplo) para 27 dB, para potência total de entrada de -5 dBm, considerando a mesma largura de faixa de 30 nm.

A figura 4.7 apresenta a figura de ruído em função do comprimento de onda do sinal de entrada do amplificador híbrido otimizado. O valor médio de NF é de aproximadamente 9,2 dB (≈ 1 dB menor do que o amplificador híbrido com dois lasers de bombeamento). Isso mostra que a adição de mais um laser de bombeamento pode ser conveniente.

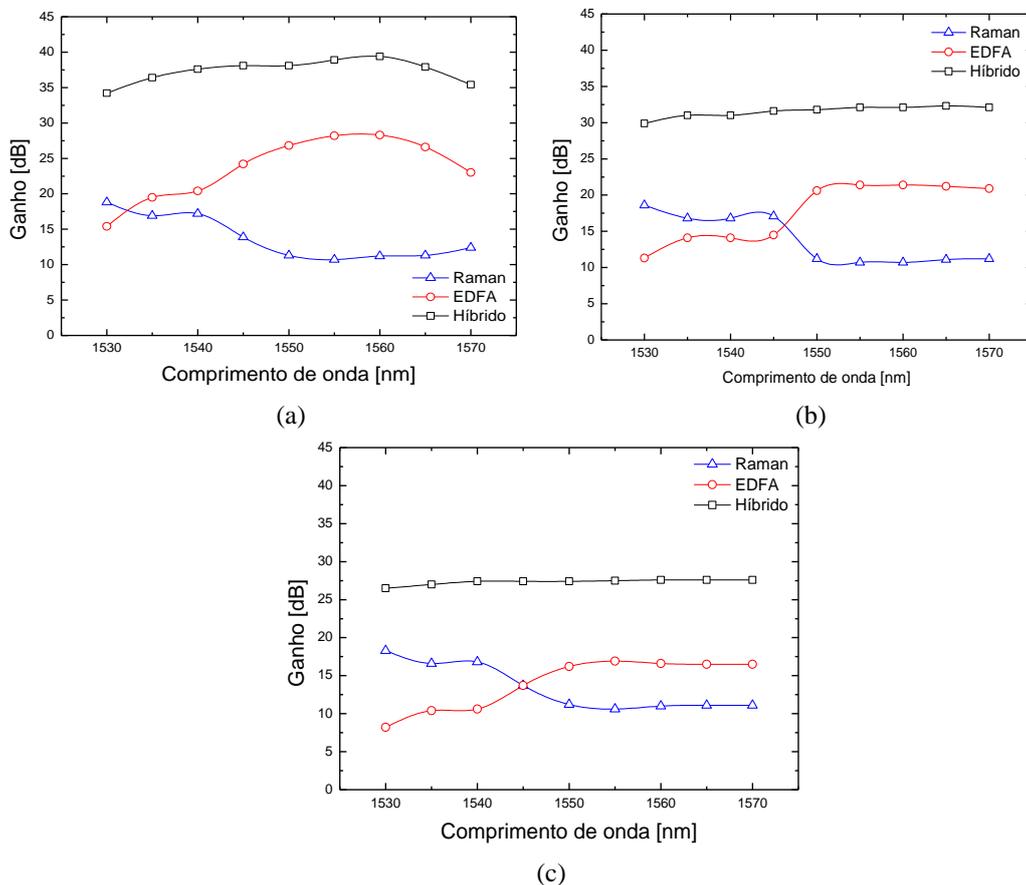


Figura 4-6: Perfis espectrais de ganho de cada estágio e do amplificador híbrido otimizado com três bombeamentos. (a) $P_s = -20$ dBm, (b) $P_s = -10$ dBm e (c) $P_s = -5$ dBm.

O uso de dois e três lasers de bombeamento melhorou a planicidade do ganho global do amplificador híbrido EDFA+Raman, isto é, a ondulação diminuiu aproximadamente 2 dB na faixa de 1535 nm a 1565 nm, comparado com os resultados de LEE *et al.*, 2005,

conforme pode ser observado nas figuras 4.4 e 4.6. A técnica com ajuste geométrico do perfil de ganho Raman (primeiro método) demonstrou que a configuração de bombeamento com dois laser apresentou melhores resultados de ganho e ondulação entre os canais de entrada, quando comparado aos resultados com três lasers de bombeamento (ganho global foi de 2 a 4 dB maior e a ondulação menor de 0,3 a 1,8 dB, dependendo da potência do sinal de entrada).

A análise do desempenho dos amplificadores híbridos com múltiplos lasers de bombeamento otimizado foi realizada em termos da ondulação. Essa análise não pode ser comparada com os resultados fornecidos por LEE *et al.*, 2005 e TIWARI *et al.*, 2009, pois a ondulação não é levada em consideração por eles.

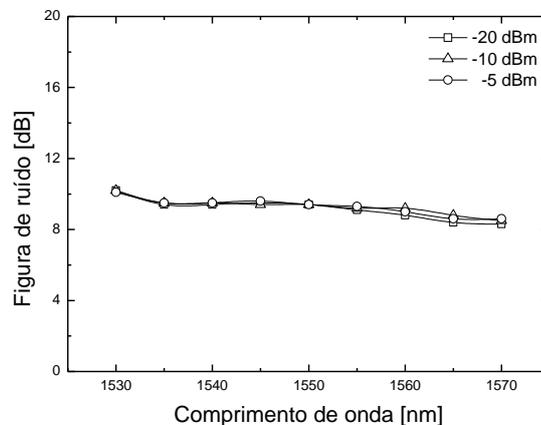


Figura 4-7: Perfil espectral da figura de ruído do amplificador híbrido Raman+EDFA otimizado com três bombeamentos. Níveis de P_s na faixa de -20 dBm a -5 dBm.

É importante ressaltar a vantagem de utilizar múltiplos lasers de bombeamento, pois cada laser tem potência menor que a utilizada por aqueles autores (500 mW, para apenas um laser). A potência total de bombeamento otimizado é 367,6 mW, no caso de dois lasers, e 574,1 mW para três lasers.

4.2.1.2 Inserção de 8 Canais WDM simultaneamente

A partir da figura 4.8, os resultados apresentados foram obtidos para 8 canais WDM (banda C) de 1535 nm a 1570 nm, com espaçamento de 5 nm, para as configurações do amplificador híbrido Raman+EDFA utilizando bombeamento residual contrapropagante na seção EDF. Foram realizadas simulações tanto para a configuração copropagante quanto contrapropagante, cujos esquemas são os mesmos mostrados na figura 4.1, entretanto,

somente são apresentados os resultados obtidos nessa última configuração, pois forneceram valores médios da figura de ruído 1,5 dB menor que naquela.

O sistema WDM foi simulado, variando o nível de potência de cada canal de -20 dBm a -5 dBm, sendo que os parâmetros do amplificador híbrido permaneceram os mesmos das simulações anteriores, exceto os dos lasers de bombeamento. A fonte de bombeamento otimizado consiste de dois, três ou quatro lasers operando na faixa de comprimentos de onda de 1400 nm a 1480 nm e os níveis da potência de cada laser de bombeamento foram na faixa de 50 mW a 300 mW. Os níveis de potência total de entrada utilizados nas simulações continuaram sendo de -20 dBm, -10 dBm e -5 dBm, dividido pelos 8 canais, isto é, cada canal deverá ter -29 dBm, -19 dBm e -14 dBm, respectivamente.

Na figura 4.8 são apresentados os resultados do ganho de cada estágio de amplificação, como também o ganho global do amplificador híbrido com bombeamento simples obtidos nas simulações, sendo que o laser possui potência de 500 mW e comprimento de onda de 1425 nm (por ter fornecido a menor ondulação).

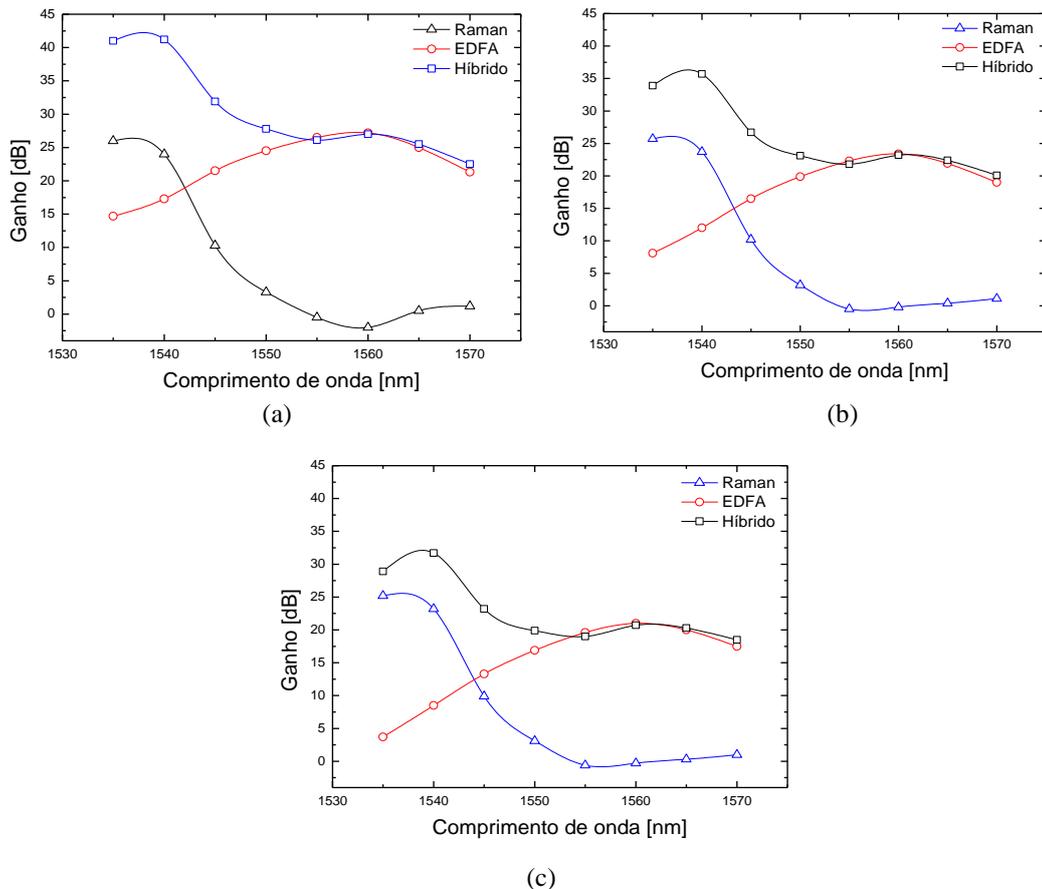


Figura 4-8: Ganhos em função dos comprimentos de onda do sinal de entrada do amplificador com bombeamento simples. (a) $P_s = -20$ dBm, (b) $P_s = -10$ dBm e (c) $P_s = -5$ dBm. (entre os símbolos são linhas de vista)

Os valores de potência do laser para a configuração de bombeamento simples (500 mW) e de comprimento de onda adotados (na faixa de 1425 nm a 1465 nm) foram baseados nos dados fornecidos em experimentos e simulações encontrados na literatura referenciada (LEE *et al.*, 2005, TIWARI *et al.*, 2009).

Os valores do ganho global médio são de 30,4 dB, 25,9 dB e 22,8 dB e da ondulação são de 18,7 dB, 15,6 dB e 13,2 dB, considerando os valores de P_s de -20 dBm, -10 dBm, e -5 dBm, respectivamente. Os valores obtidos de ganho foram altos, mas os níveis de ondulação são incompatíveis com os sistemas WDM. Os ganhos dos canais para sistemas WDM devem ter variação de ganho dos canais próximo de 1 dB, o que impõe a necessidade de técnica de otimização para amplificadores híbridos. A solução para esse problema é a utilização do método de otimização proposto de forma que ajuste o perfil do ganho do estágio Raman. Isso inclui não somente a adição de um laser, mas também uma otimização cuidadosa dos comprimentos de onda e das potências de bombeamento.

Na figura 4.8, pode ser observado que para sinais de entrada com comprimentos de onda menores que 1543 nm, o estágio Raman se torna dominante, o que faz com que ocorra os efeitos de saturação do EDFA. A partir desse comprimento de onda, os efeitos do EDFA passam a dominar o funcionamento do amplificador híbrido.

Nos resultados mostrados na figura 4.8 pode ser verificado que o aumento da potência do sinal de entrada implica em menor variação dos ganhos de cada canal, isto é, demonstra a tendência de equalização do ganho resultante com a utilização da simetria entre os perfis do Raman e do EDFA. Essa configuração não otimizada de bombeamento simples foi selecionada por apresentar essa característica de simetria. Dentre as configurações analisadas, na faixa de 1425 nm a 1465 nm, essa forneceu o maior ganho global e a menor variação de ganho entre os canais. Esses resultados mostram que o perfil do ganho Raman apresenta alterações significativas com o aumento da potência do sinal de entrada.

O perfil da figura de ruído do amplificador Raman+EDFA com bombeamento simples, considerando os mesmos níveis de potência para todos os canais, é mostrado na figura 4.9.

O valor médio da figura de ruído é de aproximadamente 11 dB, sendo similar aos resultados encontrados em TIWARI *et al.*, 2009. Pela figura 4.9, pode ser observado que houve um aumento no nível da figura de ruído na faixa de 1545 nm e 1560 nm, mas a NF permanece insensível às variações do nível de potência do sinal de entrada. Isso pode ser explicado pelo fato de que o EDFA opera próximo à saturação.

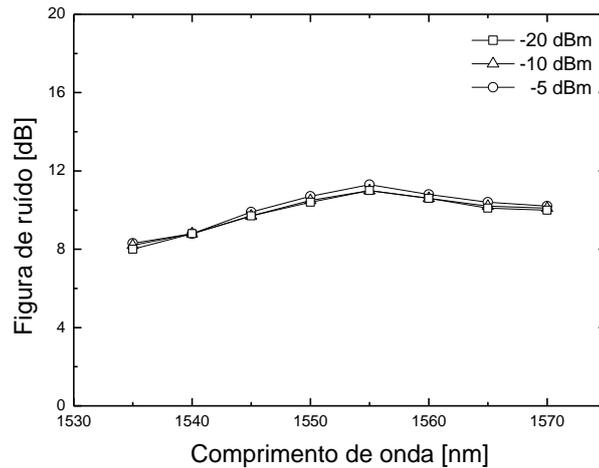


Figura 4-9: Figura de ruído em função dos comprimentos de onda dos canais de entrada do amplificador híbrido com bombeamento simples. Níveis de P_s na faixa de -20 dBm a -5 dBm. (entre os símbolos são linhas de vista)

A configuração de bombeamento duplo otimizado que forneceu maior ganho global e menor ondulação, comparado com os resultados obtidos no bombeamento simples, possui lasers com comprimentos de onda de 1425 nm e 1468,4 nm e potências de 296,3 mW e 61,3 mW, respectivamente.

Os perfis do ganho de cada estágio de amplificação (Raman e EDFA) são mostrados na figura 4.10, com o objetivo de verificar a influência do aumento de P_s no perfil do ganho em cada estágio. Pode ser concluído que o aumento de P_s influencia no efeito de depleção dos sinais com comprimento de onda menor que 1550 nm como também para sinais maiores que 1565 nm.

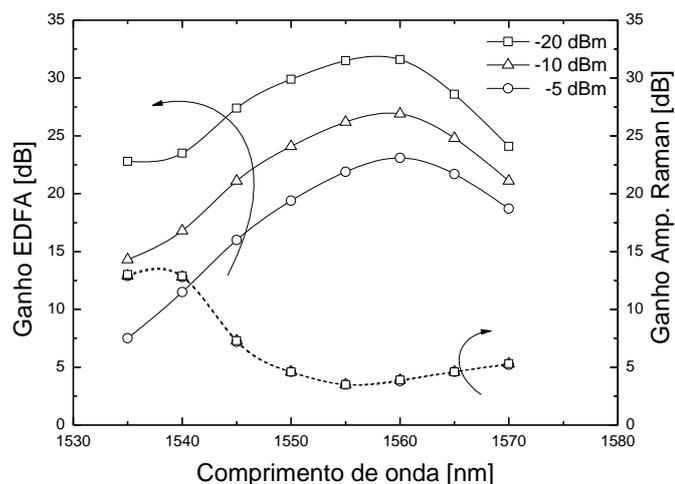


Figura 4-10: Perfis dos ganhos dos dois estágios de amplificação: Raman e EDFA, variando o nível da potência do sinal de entrada de -20 a -5 dBm. (entre os símbolos são linhas de vista)

A saturação do segundo estágio (EDFA) também pode ser verificada no gráfico da figura 4.10. Isso pode ser explicado pelo aumento do nível da potência que chega nesse estágio para os canais de comprimento de onda menor que 1540 nm. O perfil de ganho do estágio Raman otimizado não sofre mudanças com o aumento de P_s , pois com a utilização da técnica de otimização de bombeamento, a potência de saturação do estágio Raman passa a ser maior quando comparada com os resultados apresentados na figura 4.8, que mostram mudanças significativas no perfil do ganho Raman com o aumento do nível de potência de entrada.

A figura 4.11 apresenta os perfis de ganho obtidos na simulação do amplificador híbrido com bombeamento duplo otimizado considerando 8 canais WDM. Os valores de ganho global médio são de 34,3 dB, 28,8 dB, 24,3 dB e da ondulação são de 7,0 dB, 4,3 dB, 6,5 dB, respectivamente, considerando os mesmos valores de P_s .

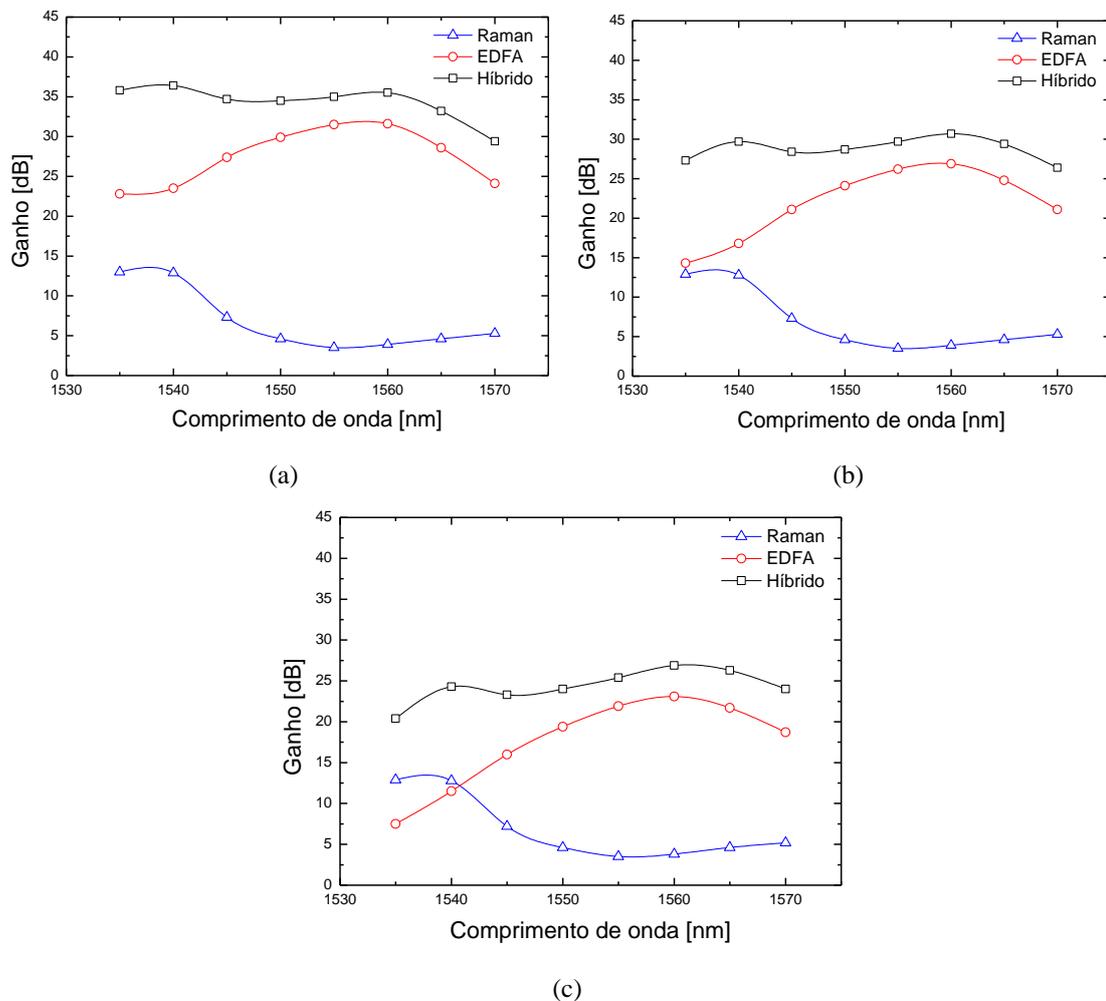


Figura 4-11: Ganhos em função dos comprimentos de onda do sinal de entrada do amplificador com bombeamento duplo otimizado. (a) $P_s = -20$ dBm, (b) $P_s = -10$ dBm e (c) $P_s = -5$ dBm. (entre os símbolos são linhas de vista)

O ganho global médio passou de 30,4 dB para 34,3 dB e a ondulação de 18,7 dB para 7,0 dB, considerando a potência de entrada de -20 dBm. Esses valores foram alcançados devido à utilização da técnica de otimização. A potência total dos dois lasers de bombeamento Raman (357,6 mW) é menor que a utilizada na literatura (TIWARI *et al.*, 2009) que utilizaram apenas um laser de bombeamento (500 mW). Isso torna a utilização da técnica ainda mais interessante.

A figura 4.12 apresenta o perfil da figura de ruído do amplificador híbrido com bombeamento duplo otimizado. O valor médio da figura de ruído é de aproximadamente 11 dB, sendo similar aos resultados encontrados na literatura (LEE *et al.*, 2005, TIWARI *et al.*, 2009).

Nas figuras 4.9 (configuração de bombeamento simples sem otimização) e 4.12 pode ser observado que houve maior variação do nível de NF naquela configuração do que nessa. Nesse caso, a figura de ruído permaneceu insensível às variações do nível do sinal de entrada.

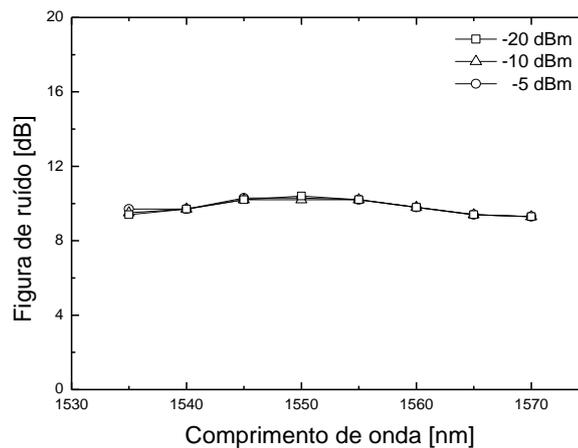


Figura 4-12: Figura de ruído em função dos comprimentos de onda do sinal de entrada do amplificador híbrido com bombeamento duplo. Níveis de P_s na faixa de -20 dBm a -5 dBm. (entre os símbolos são linhas de vista)

Aplicando novamente o método de otimização, a configuração com três lasers de bombeamento que forneceu melhores resultados em termos de ganho global e figura de ruído utilizou os lasers de bombeamento com os seguintes comprimentos de onda 1414,5 nm, 1426,5 nm, e 1472,6 nm e potências de 244,1 mW, 269,9 mW, e 60,1 mW, respectivamente. Para a configuração, os perfis dos estágios de amplificação Raman e EDFA, como também do ganho global são apresentados na figura 4.13. A potência total de bombeamento é 574,1 mW (para três lasers), apenas 14,8% maior que o utilizado por LEE *et al.*, 2005.

Para essa configuração de bombeamento triplo otimizado, os valores obtidos de ganho global médio são 37,7 dB, 31,2 dB, 26,2 dB e de ondulação são 5,4 dB, 9,3 dB, 12,6 dB, respectivamente. Para P_s de -20 dBm, o ganho global médio aumentou de 34,3 dB para 37,7 dB. Isso demonstra que o EDFA está operando próximo à saturação que deve ser devida ao alto nível do sinal de saída do estágio Raman, como também, a potência de bombeamento residual remanescente disponível na seção EDF, nos canais de comprimento de onda menor que 1540 nm.

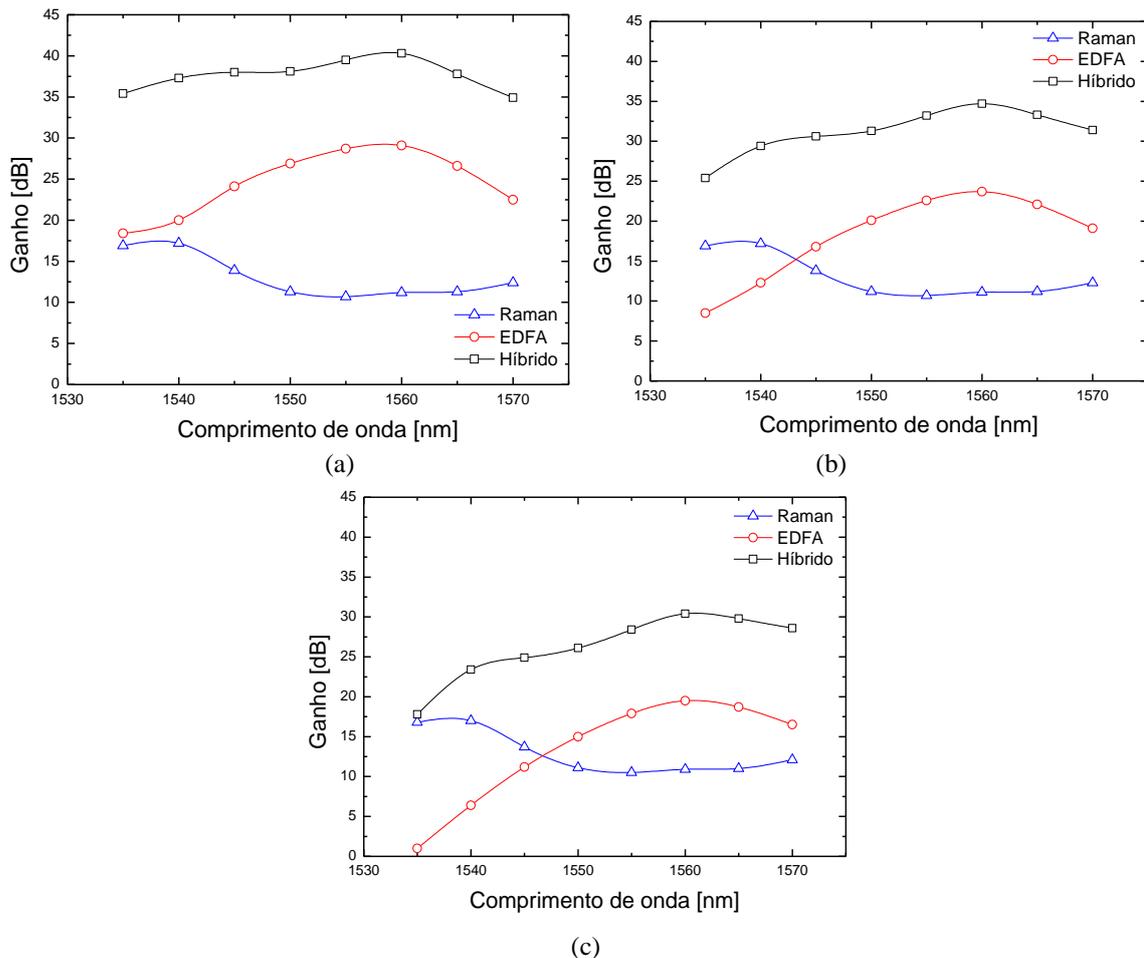


Figura 4-13: Ganhos em função dos comprimentos de onda do sinal de entrada do amplificador com bombeamento triplo otimizado. (a) $P_s = -20$ dBm, (b) $P_s = -10$ dBm e (c) $P_s = -5$ dBm. (entre símbolos são linhas de vista)

A ondulação diminuiu de 7,0 dB para 5,4 dB, comparado com os resultados obtidos com a configuração de bombeamento duplo otimizado. A ondulação diminuiu 1,6 dB com o acréscimo de mais um laser. Isso demonstra a versatilidade da utilização de múltiplos lasers de bombeamento. Entretanto para níveis de potência de entrada maiores (-10 dBm e -5 dBm), a adição de mais um laser de bombeamento implica no aumento na variação dos

ganhos dos canais de entrada (ondulação), ocasionado pelo aparecimento dos efeitos não-lineares.

A figura 4.14 apresenta o perfil da figura de ruído do amplificador Raman+EDFA com bombeamento triplo otimizado. O valor médio da figura de ruído é de aproximadamente 9 dB, menor que o valor obtido na configuração com bombeamento duplo otimizado. Novamente é verificado que o nível da figura de ruído permanece insensível ao aumento do nível do sinal de entrada, pois o EDFA opera próximo à saturação. Isso afeta o ganho negativamente, mas a figura de ruído sofre menor influência.

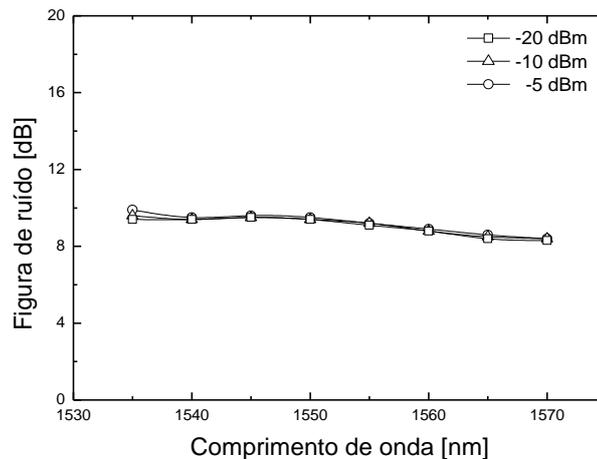


Figura 4-14: Figura de ruído em função dos comprimentos de onda do sinal de entrada do amplificador com bombeamento triplo otimizado. Níveis de P_s na faixa de -20 dBm a -5 dBm. (entre símbolos são linhas de vista)

Os resultados da ondulação e o ganho global em função do número de bombeamentos são apresentada na figura 4.15.

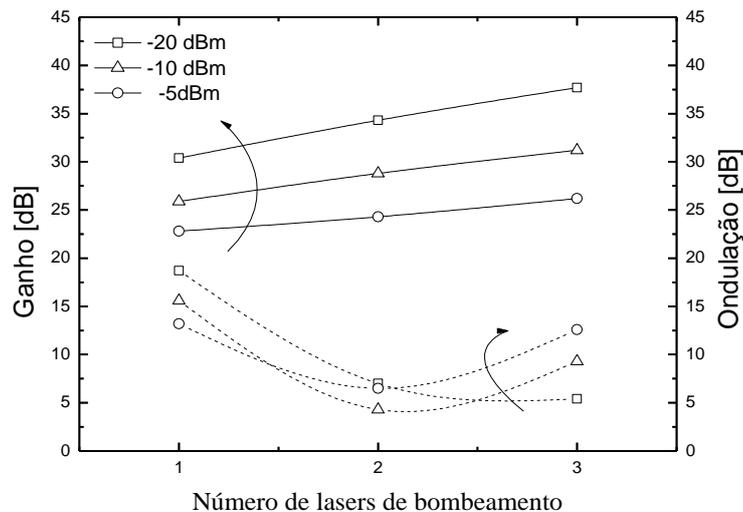


Figura 4-15: Ganho global médio e ondulação em função do número de lasers de bombeamento do amplificador híbrido otimizado. Níveis de P_s na faixa de -20 dBm a -5 dBm. (entre símbolos são linhas de vista)

Na figura 4.15 pode ser observada a tendência do aumento do ganho global médio e do decréscimo da ondulação com o aumento do número de lasers de bombeamento. Para o primeiro método de otimização proposto nesta tese, descrito na seção 3.6.1, a configuração com bombeamento duplo otimizado oferece melhor resultado de ganho global e de ondulação quando comparada com a configuração de bombeamento triplo. Porém, isso não é o resultado esperado. A análise dos resultados apresentados nas figuras 4.8 a 4.15, sugere que o método de otimização seja aperfeiçoado, em termos de espaço de busca de soluções melhores utilizando múltiplos lasers de bombeamento, para obtenção de ganho global alto e plano.

4.2.2 Resultados do Segundo Método Proposto:

A partir da técnica proposta na seção 3.6.1 (primeiro método), foi desenvolvida uma nova metodologia (segundo método, seção 3.6.2) para obtenção de um perfil de ganho do amplificador híbrido com valor de ondulação menor que os obtidos com o primeiro método. Diferentes configurações com bombeamento simples, duplo, triplo e quádruplo são novamente simuladas considerando 8 canais WDM, com espaçamento de 5 nm, iniciando em 1535 nm. O objetivo é demonstrar a eficiência da técnica proposta para equalização do perfil do ganho global do amplificador híbrido Raman+EDFA utilizando a otimização do bombeamento Raman através do método analítico de CANI *et al.*, 2009.

Os perfis dos ganhos dos estágios Raman e EDFA, como também do ganho global da configuração do amplificador híbrido com bombeamento simples otimizado são apresentados na figura 4.16. O laser com comprimento de onda de 1425 nm e potência de 231,3mW (novamente, o critério é ganho alto e menor ondulação) foi utilizado nessa configuração. Esse valor de potência é 46,2% menor que os valores obtidos por LEE *et al.*, 2005 (menor possibilidade de ocorrer os efeitos não-lineares).

Comparando os resultados apresentados na figura 4.16 com os obtidos com o bombeamento simples não otimizado, conforme os gráficos da figura 4.8, verificou-se que o ganho global médio diminuiu 2,9 dB. Os valores de ganho global médio são de 28,0 dB, 23,7 dB, 19,9 dB e da ondulação são de 10,6 dB, 7,3 dB, 4,7 dB, respectivamente, considerando os mesmos valores de P_s . A ondulação diminuiu de 13,2 dB para 4,7 dB, sendo mais próximo

aos valores aceitáveis para sistemas WDM (≈ 1 dB), comparado com os resultados apresentados por TIWARI *et al.*, 2009, de aproximadamente 11 dB.

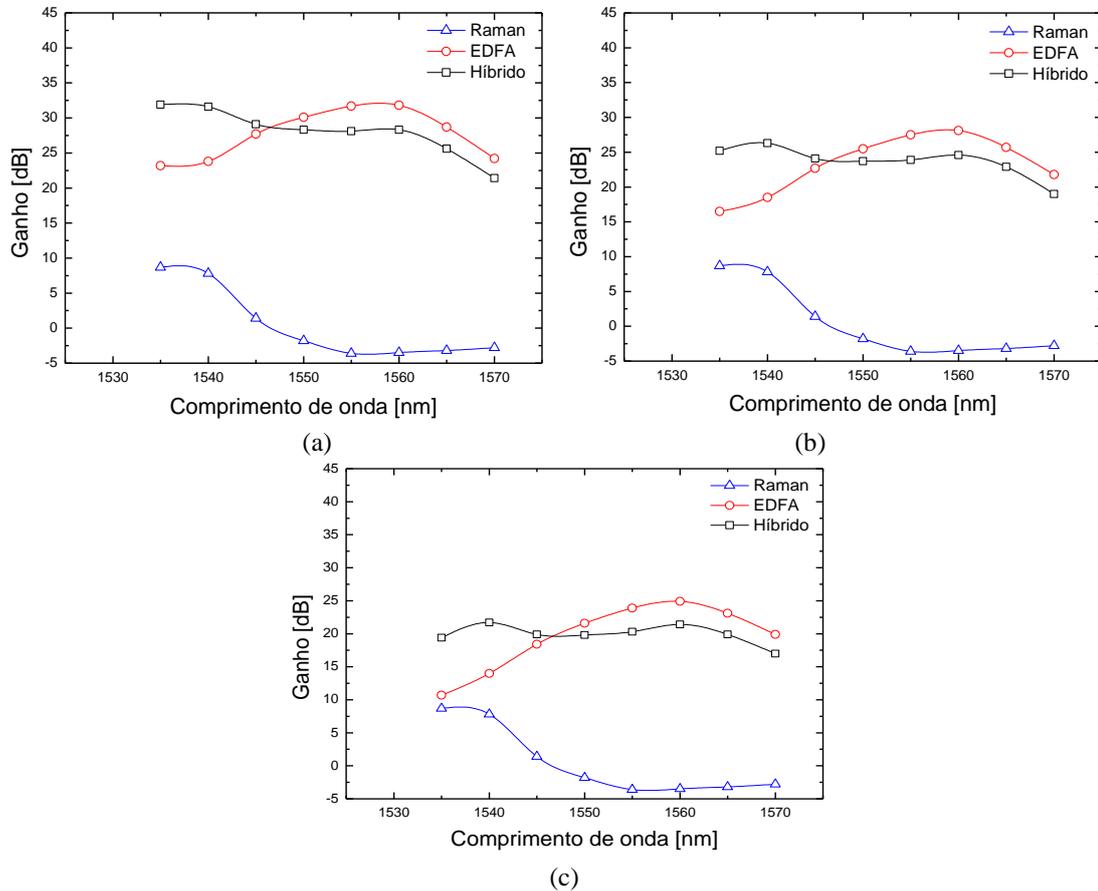


Figura 4-16: Ganhos em função dos comprimentos de onda do sinal de entrada do amplificador com bombeamento simples otimizado. (a) $P_s = -20$ dBm, (b) $P_s = -10$ dBm e (c) $P_s = -5$ dBm. (entre símbolos são linhas de vista)

A figura 4.17 apresenta o perfil da figura de ruído do amplificador híbrido com bombeamento simples. Na figura é verificado um leve aumento no nível do perfil da NF a partir do comprimento de onda de 1540 nm. O valor médio da NF é de aproximadamente 10,8 dB. A figura de ruído é menor 0,2 dB, quando comparado com os resultados da configuração com bombeamento simples sem otimização apresentado na figura 4.8. Isso significa que o aumento do número de lasers de bombeamento, isto é, aumento da potência de bombeamento, implica na diminuição da figura de ruído.

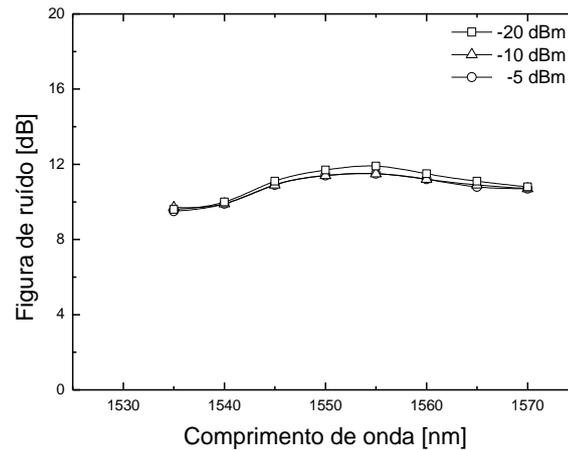


Figura 4-17: Figura de ruído em função dos comprimentos de onda do sinal de entrada do amplificador com bombeamento simples otimizado. Níveis de P_s na faixa de -20 dBm a -5 dBm. (entre símbolos são linhas de vista)

A configuração do amplificador híbrido com bombeamento duplo otimizado que forneceu ondulação do ganho global próximo aos valores apresentados na figura 4.11 foi selecionada para ser apresentada. Essa configuração possui os lasers com comprimentos de onda de 1425,4 nm e 1451 nm e as potências de 291 mW e 77,9 mW, respectivamente. A potência total de bombeamento é 368,9 mW, sendo esse valor 73,8% menor que o utilizado por LEE *et al.*, 2005.

Os perfis dos estágios de amplificação, Raman e EDFA, e o ganho global são apresentados na figura 4.18. Novamente os três níveis de potência do sinal de entrada (P_s) são de -20 a -5 dBm, com o objetivo de verificar a saturação do ganho do estágio EDFA e mudanças no perfil do ganho. O ganho global médio obtido é 34,1 dB, 28,7 dB, 24,4 dB e de ondulação é 9,0 dB, 5,3 dB, 4,9 dB, respectivamente.

A eficiência do método proposto para compensação do perfil do ganho do EDFA utilizando a flexibilidade do amplificador Raman pode ser observada na figura 4.18 para diferentes níveis de potência de P_s . A partir desses resultados pode ser verificado que a adição de mais lasers de bombeamento, como também a otimização cuidadosa desses bombeamentos (comprimentos de onda e potências adequados) fornece menor ondulação do ganho global do amplificador híbrido, isto é, ganho plano e alto.

A figura 4.19 mostra o perfil da figura de ruído (NF) do amplificador híbrido com bombeamento duplo otimizado. O valor médio da figura de ruído é de 9,5 dB, isto é, 1,3 dB menor que o resultado obtido com apenas um bombeamento (10,8 dB), conforme apresentado na figura 4.17.

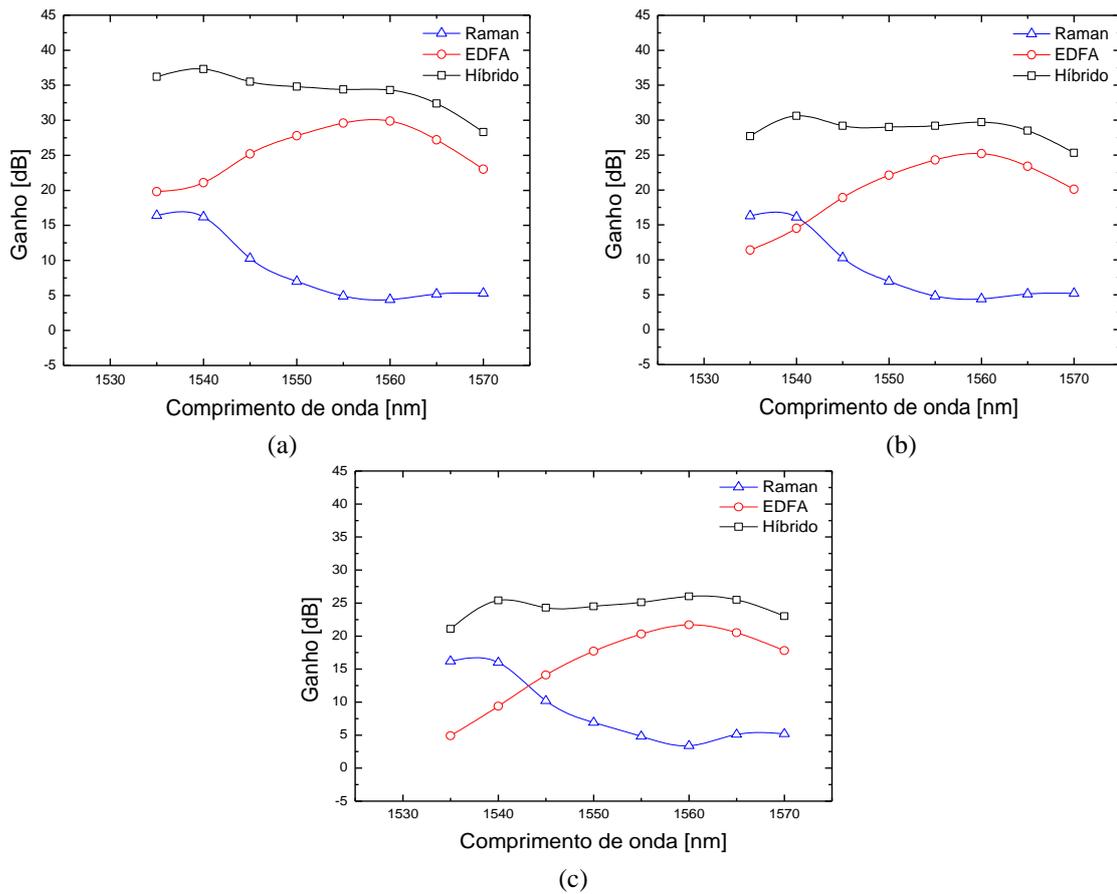


Figura 4-18: Ganhos em função dos comprimentos de onda do sinal de entrada do amplificador com bombeamento duplo otimizado. (a) $P_s = -20$ dBm, (b) $P_s = -10$ dBm e (c) $P_s = -5$ dBm. (entre símbolos são linhas de vista)

O perfil da figura de ruído teve menor variação ao longo do espectro analisado (1535 nm a 1570 nm), apenas apresentando um leve aumento no nível 1545 nm a 1550 nm.

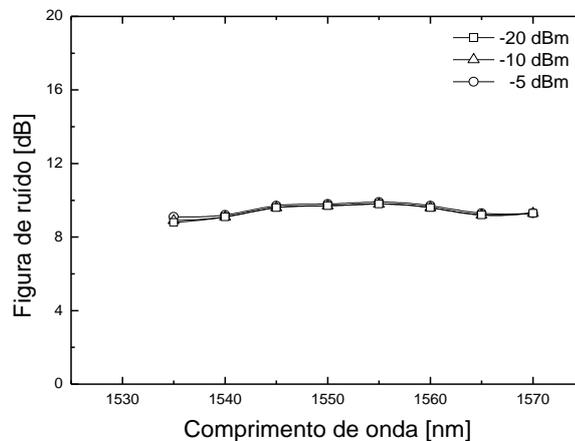


Figura 4-19: Figura de ruído em função dos comprimentos de onda do sinal de entrada do amplificador com bombeamento duplo otimizado. Níveis de P_s na faixa de -20 dBm a -5 dBm. (entre símbolos são linhas de vista)

Esses resultados são considerados melhores quando comparado com os mostrados na figura 4.17 (bombeamento simples com otimização) que apresentou leve mudança quando a potência de entrada aumentou para -5 dBm.

A figura 4.20 apresenta os resultados dos ganhos de cada estágio e do ganho global da configuração do amplificador híbrido otimizado com bombeamento triplo. Os lasers utilizados para essa configuração têm os comprimentos de onda 1423,9 nm, 1425,4 nm e 1465,8 nm e potências de 288,9 mW, 176,5 mW, e 64,3 mW, respectivamente. A potência total de bombeamento é 529,7 mW, o valor de potência de cada laser é menor que para bombeamento simples (500 mW) utilizado na literatura (LEE *et al.*, 2005, TIWARI *et al.*, 2009). O estágio Raman na configuração com bombeamento triplo possui ganho Raman (máximo de 25 dB) maior que os resultados apresentados quando o bombeamento duplo foi utilizado (máximo de 15 dB). Isso ocorreu devido ao aumento da potência total de bombeamento.

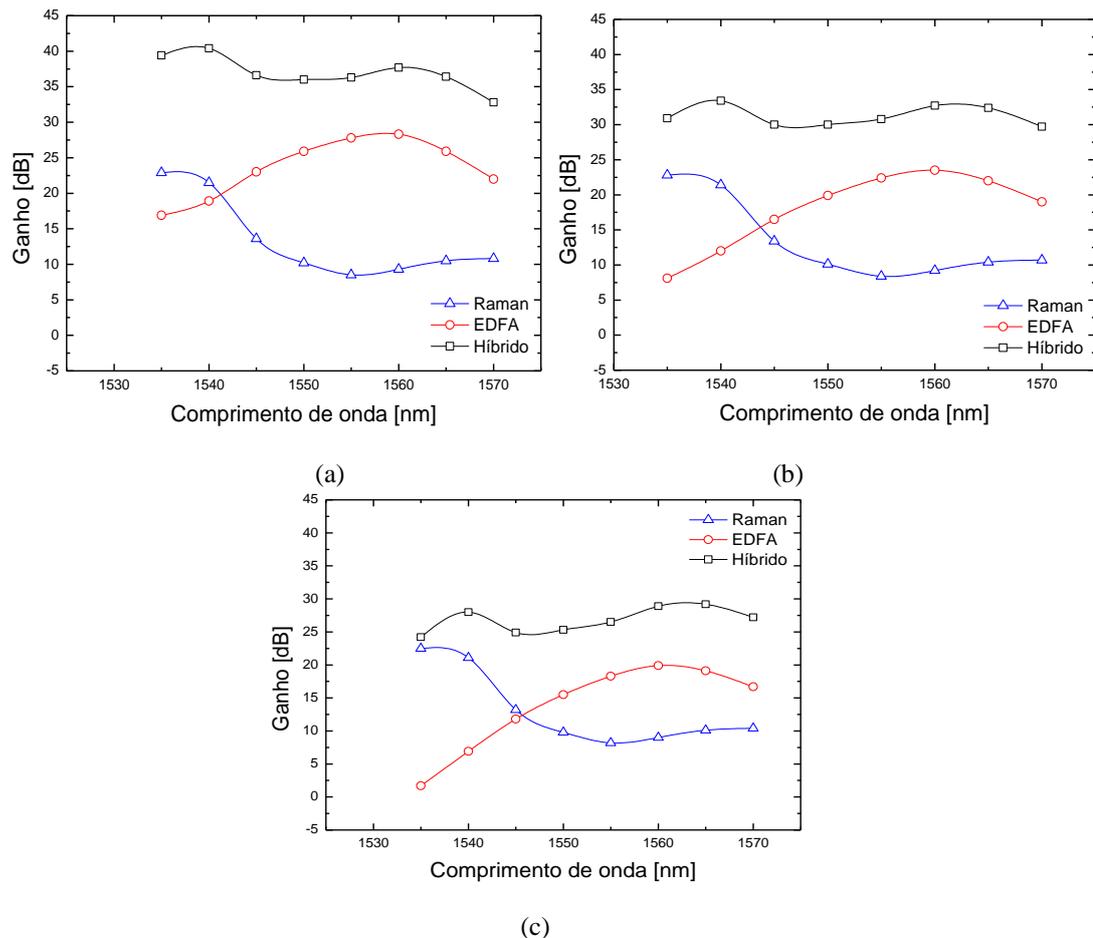


Figura 4-20: Ganhos em função dos comprimentos de onda do sinal de entrada do amplificador com bombeamento triplo otimizado. (a) $P_s = -20$ dBm, (b) $P_s = -10$ dBm e (c) $P_s = -5$ dBm. (entre símbolos são linhas de vista)

De acordo com os resultados apresentados na figura 4.20, os valores de ganho global médio são 37,0 dB, 31,2 dB e 26,8 dB e da ondulação são 7,6 dB, 3,0 dB e 5,0 dB, respectivamente. Com a adição de um terceiro laser, e conseqüentemente o aumento da potência de bombeamento de 368,9 mW para 529,7 mW, o ganho global médio aumentou aproximadamente 3 dB e a ondulação diminuiu aproximadamente 2 dB, em relação aos resultados obtidos na configuração com bombeamento duplo.

Os resultados apresentados mostram que o acréscimo de mais um laser resulta em um aumento no ganho e diminuição na variação do ganho de cada canal, mas às vezes o aumento do desempenho do amplificador não é compatível com o custo referente ao aumento do número de lasers.

A figura 4.21 apresenta o perfil da figura de ruído do amplificador híbrido com bombeamento triplo otimizado. O valor médio de NF é de aproximadamente 9 dB. Foi verificado que a figura de ruído foi menor que o resultado obtido com a utilização do bombeamento duplo (9,5 dB).

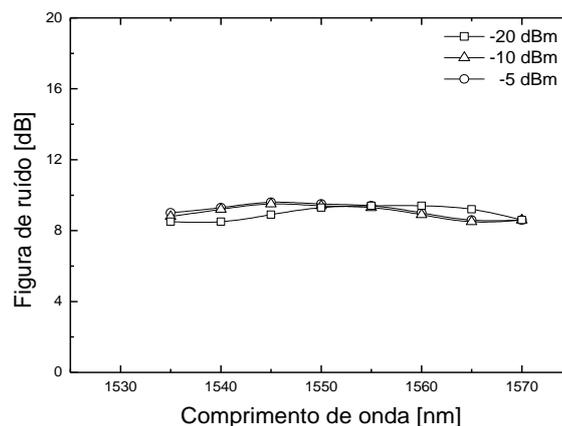


Figura 4-21: Figura de ruído em função dos comprimentos de onda do sinal de entrada do amplificador com bombeamento triplo otimizado. Níveis de P_s na faixa de -20 dBm a -5 dBm. (entre símbolos são linhas de vista)

A figura de ruído, para a potência total do sinal de entrada igual a -20 dBm, teve valores distintos dos obtidos com valores de P_s maiores. Pode ser verificado que o perfil da figura de ruído apresentou leve mudança quando a potência de entrada aumentou para -5 dBm, ao longo do espectro analisado (1535 nm a 1570 nm), conforme pode ser observado na figura 4.21.

A configuração do amplificador híbrido com bombeamento quádruplo otimizado, com menor valor de ondulação do ganho global, possui lasers com comprimentos de onda de 1421,7 nm, 1422,9 nm, 1424,0 nm e 1451,4 nm e potências de 91,4 mW, 211,9 mW, 204,1

mW e 106,2 mW, respectivamente. A figura de ruído em função dos comprimentos de onda dos canais de entrada do amplificador híbrido otimizado é apresentado na figura 4.22.

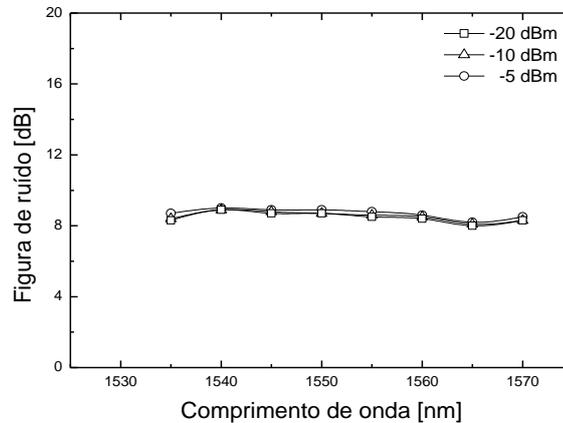


Figura 4-22: Figura de ruído em função dos comprimentos de onda do sinal de entrada do amplificador com bombeamento quádruplo otimizado. Níveis de P_s na faixa de -20 dBm a -5 dBm. (entre símbolos são linhas de vista)

Para essa configuração, o valor médio da figura de ruído é de 8,6 dB. Esse valor é o menor comparado com os obtidos pelas configurações com bombeamento simples (10,8 dB), duplo (9,5 dB) e triplo (9,0 dB). Isso demonstra que a figura de ruído pode ser reduzida com a utilização de múltiplos lasers de bombeamento associados ao uso da técnica de otimização utilizada nesta tese.

Os perfis de ganho do amplificador híbrido com bombeamento quádruplo otimizado são apresentados na figura 4.23. Cada laser utilizado nessa configuração possui níveis de potência adequados para evitar efeitos não-lineares. Os valores obtidos de ganho global médio são de 38,1 dB, 32,2 dB e 28,0 dB e da ondulação são de 7,3 dB, 3,4 dB e 5,0 dB, respectivamente para os mesmos níveis de potência. Esses resultados mostram que a adição de mais um laser não produziu aumento de ganho significativo, como também não houve diminuição da ondulação. Dessa forma, verifica-se que o bombeamento triplo se mostrou mais adequado para o amplificador híbrido proposto nesta tese. O ganho Raman tende a ser maior para os canais de comprimentos de onda menores que 1545 nm, isso pode ser explicado pelo fato de que o bombeamento quádruplo otimizado utilizou lasers com comprimentos de onda menores (1414,5 nm e 1426,5 nm) com potências maiores (244,1 mW e 269,9 mW, respectivamente) enquanto que o laser de comprimento de onda maior (1472,6 nm) possui potência de apenas 60,1 mW.

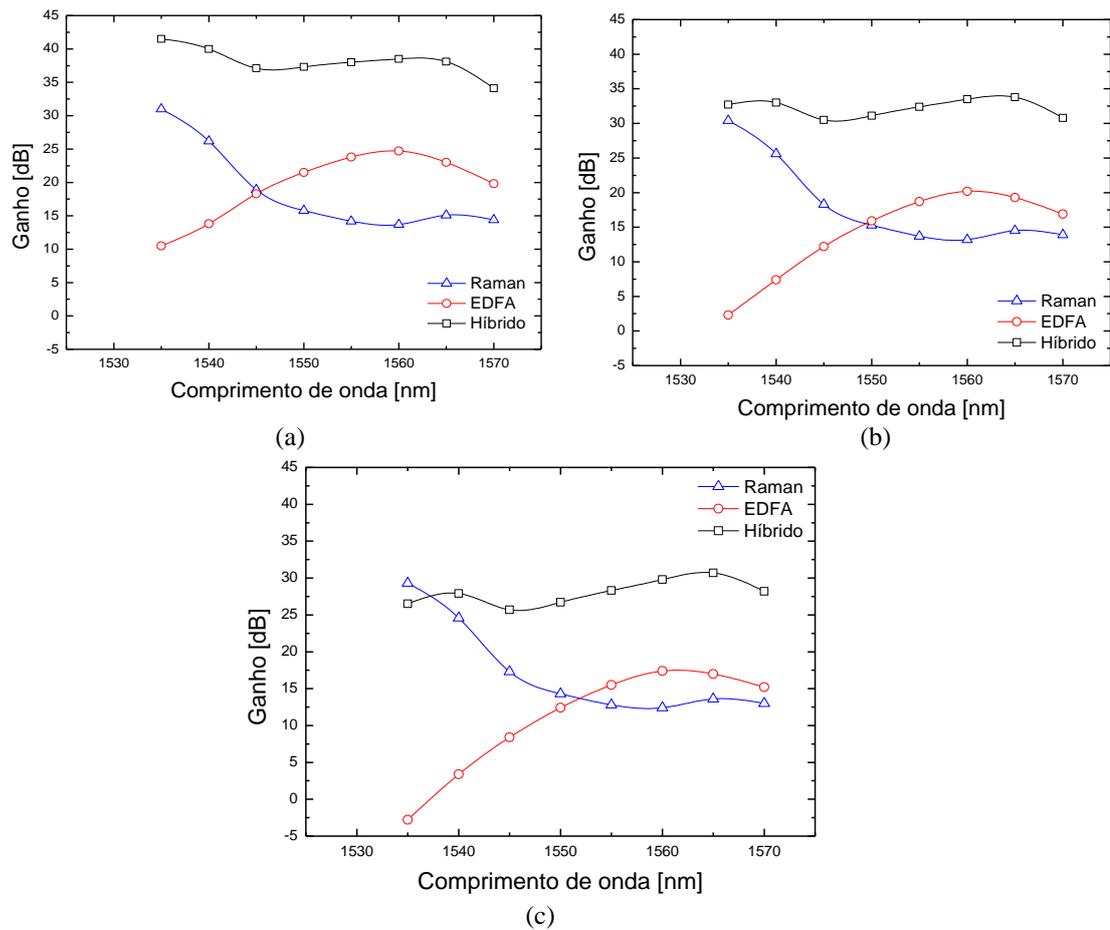


Figura 4-23: Ganhos em função dos comprimentos de onda do sinal de entrada do amplificador com bombeamento quádruplo otimizado. (a) $P_s = -20$ dBm, (b) $P_s = -10$ dBm e (c) $P_s = -5$ dBm. (entre símbolos são linhas de vista)

A figura 4.24 resume o desempenho do amplificador híbrido Raman+EDFA otimizado com um, dois, três e quatro lasers de bombeamento. Existe uma clara tendência de redução da ondulação e aumento do ganho global com o aumento do número de lasers de bombeamento. Os resultados da ondulação e do ganho global médio em função do número de lasers de bombeamento são mostrados na figura 4.24, considerando os mesmos níveis de potência total de entrada. Pode ser observado que com o aumento do número de lasers de bombeamento, a ondulação tende a diminuir e o ganho global tende a aumentar. Na figura 4.24 pode ser notado que a ondulação aumenta com a adição do terceiro e o quarto laser de bombeamento, quando a potência total do sinal de entrada é -5 dBm. Esse aumento na ondulação pode ser explicado pela saturação que ocorre no EDFA com o aumento da potência do sinal de entrada.

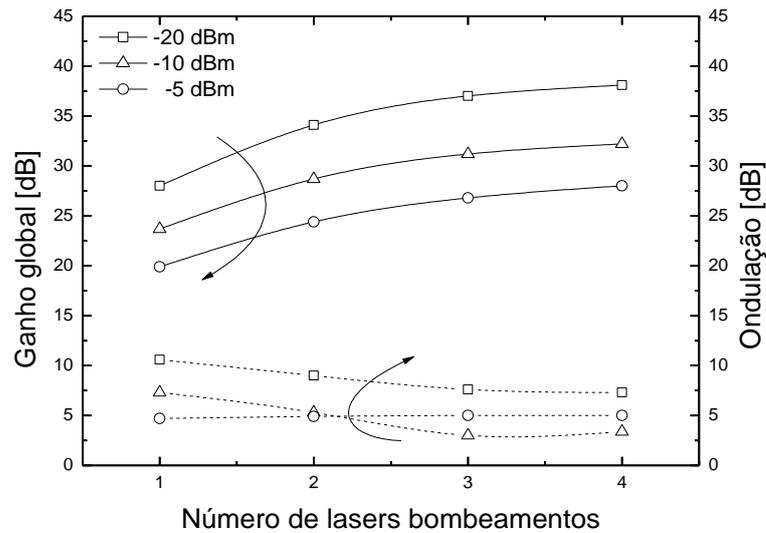


Figura 4-24: Ondulação e ganho global médio em função do número de bombeamentos, considerando 1, 2, 3 e 4 lasers de bombeamento Raman para os mesmos níveis de potência total do sinal de entrada. (entre símbolos são linhas de vista)

4.2.2.1 Inserção de 16 canais WDM

Nessa seção será analisado ganho global, ondulação e figura de ruído do amplificador híbrido Raman+EDFA proposto considerando o aumento do número de canais WDM. Para essa análise, foi considerada a configuração contrapropagante tanto no estágio de amplificador Raman quanto no bombeamento residual do EDFA. Essa análise é realizada para a banda C. Primeiramente, foram realizadas simulações considerando as mesmas configurações de laser de bombeamento contrapropagante, com potência total de entrada e lasers de bombeamento otimizados pelo segundo método para 8 canais WDM.

Foram considerados espaçamentos entre 16 canais de entrada de 2 nm (banda C) e em seguida de 2,5 nm (banda C e L). Os níveis de potência total de entrada (P_s), utilizada no amplificador híbrido simulado, são de -20 dBm, -10 dBm e -5 dBm, sendo então que a potência de cada um dos 16 canais é de -32 dBm, -22 dBm e -16 dBm, respectivamente.

4.2.2.2 Espaçamento entre 16 canais de 2 nm

Na figura 4.25 são apresentados os resultados obtidos dos ganhos de cada estágio de amplificação, como também do ganho global da configuração do amplificador híbrido otimizado com bombeamento simples (231,3 mW e 1425 nm), considerando 16 canais WDM com espaçamento de 2 nm, iniciando em 1535 nm. Novamente são utilizados os mesmos níveis de potência de entrada.

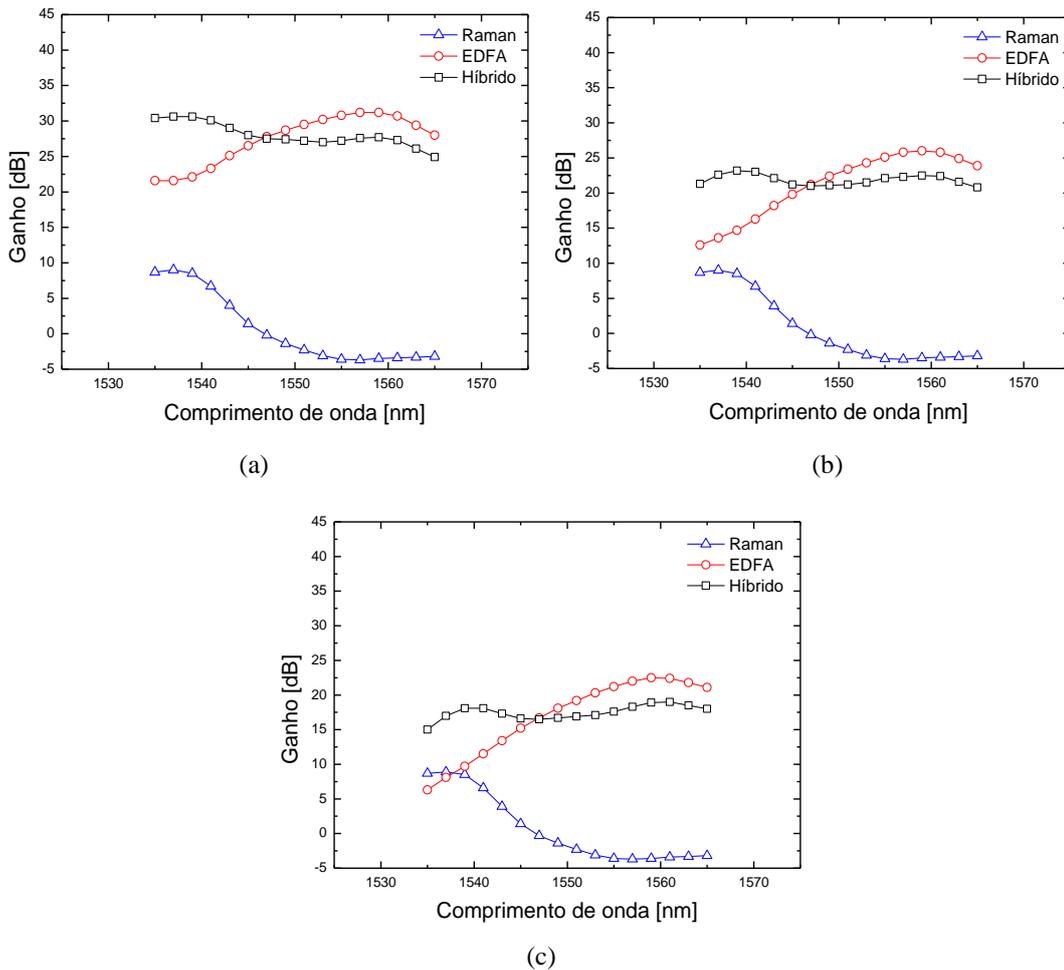


Figura 4-25: Ganhos em função dos comprimentos de onda do sinal de entrada do amplificador com bombeamento simples otimizado para 16 canais WDM espaçados de 2 nm. (a) $P_s = -20$ dBm, (b) $P_s = -10$ dBm e (c) $P_s = -5$ dBm. (entre símbolos são linhas de vista)

Pela análise dos resultados apresentados na figura 4.25 pode ser verificado que, para os canais de comprimentos de onda menores que 1545 nm, o ganho do EDFA é menor se comparado com o dos canais de comprimentos de onda maiores. Naquela região o estágio Raman é dominante, que somado ao ganho do EDFA, resulta no nível do ganho global maior.

A partir dos resultados, apresentados na figura 4.25, os valores médios do ganho global são 29,0 dB, 24,1 dB e 20,1 dB e de ondulação são 6,3 dB, 3,4 dB e 2,5 dB, respectivamente. Esses valores de ganho global médio (≈ 1 dB maior que para 8 canais) e de ondulação (≈ 3 dB menor), considerando os mesmos valores de P_s , se comparado os resultados apresentados na figura 4.16, mostra que o amplificador híbrido proposto nesta tese pode ser utilizado para 16 canais WDM.

Da observação dos resultados apresentados na figura 4.26 (a) pode ser verificada a diminuição do ganho global com o aumento do nível da potência total de entrada. Isso pode ser explicado pelo efeito da saturação do ganho global ocorrido no amplificador híbrido. Os resultados obtidos da figura de ruído, considerando os mesmos níveis de potência de entrada, são apresentados na figura 4.26 (b).

Desses valores verifica-se que para canais de comprimentos de onda maiores que 1545 nm, o nível da figura de ruído se tornou maior do que naqueles de comprimentos de onda menores. Como também houve alterações significativas nos valores da NF com o aumento da potência de entrada.

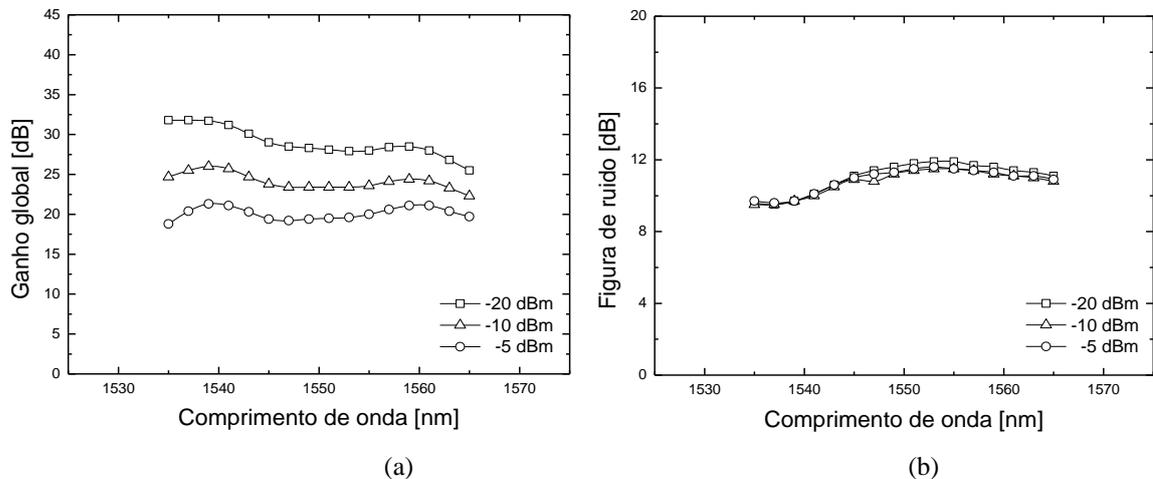


Figura 4-26: Ganho global (a) e figura de ruído (b) em função do comprimento de onda dos canais de entrada para bombeamento simples, considerando -20 dBm, -10 dBm e -5 dBm. (entre símbolos são linhas de vista)

O ganho de cada estágio de amplificação, como também o ganho global do amplificador híbrido com bombeamento Raman duplo otimizado (1425,4 nm e 1451 nm, com potências de 291 mW, 77,9 mW, respectivamente) para 16 canais WDM (espaçamento de 2 nm) são apresentadas na figura 4.27, considerando os mesmos níveis de potência de entrada.

Os valores médios do ganho global são 35,0 dB, 28,9 dB e 24,5 dB e de ondulação são 4,9 dB, 3,1 dB e 5,2 dB, respectivamente. A partir desses resultados é importante observar que o ganho global médio aumentou 6 dB, enquanto que a ondulação

diminuiu 2 dB, quando a potência total de entrada é de -20 dBm, se comparado com os resultados apresentados na figura 4.26 (a), bombeamento simples otimizado para 16 canais WDM.

Se aqueles resultados apresentados na figura 4.27 (bombeamento duplo otimizado para 16 canais WDM) forem comparados com os da figura 4.18 (para 8 canais WDM), a eficiência do método proposto para equalização do perfil do ganho do EDFA, utilizando a flexibilidade do amplificador Raman, pode ser observada, pois com o aumento do número de canais de 8 para 16, a ondulação tende a se tornar menor, mostrando que as interações entre sinal-bombeamento auxiliaram na planicidade do ganho global.

Os valores do ganho global, figura 4.28 (a), e da figura de ruído, figura 4.28 (b) são apresentados em função do comprimento de onda dos canais de entrada para configuração de bombeamento duplo com 16 canais WDM.

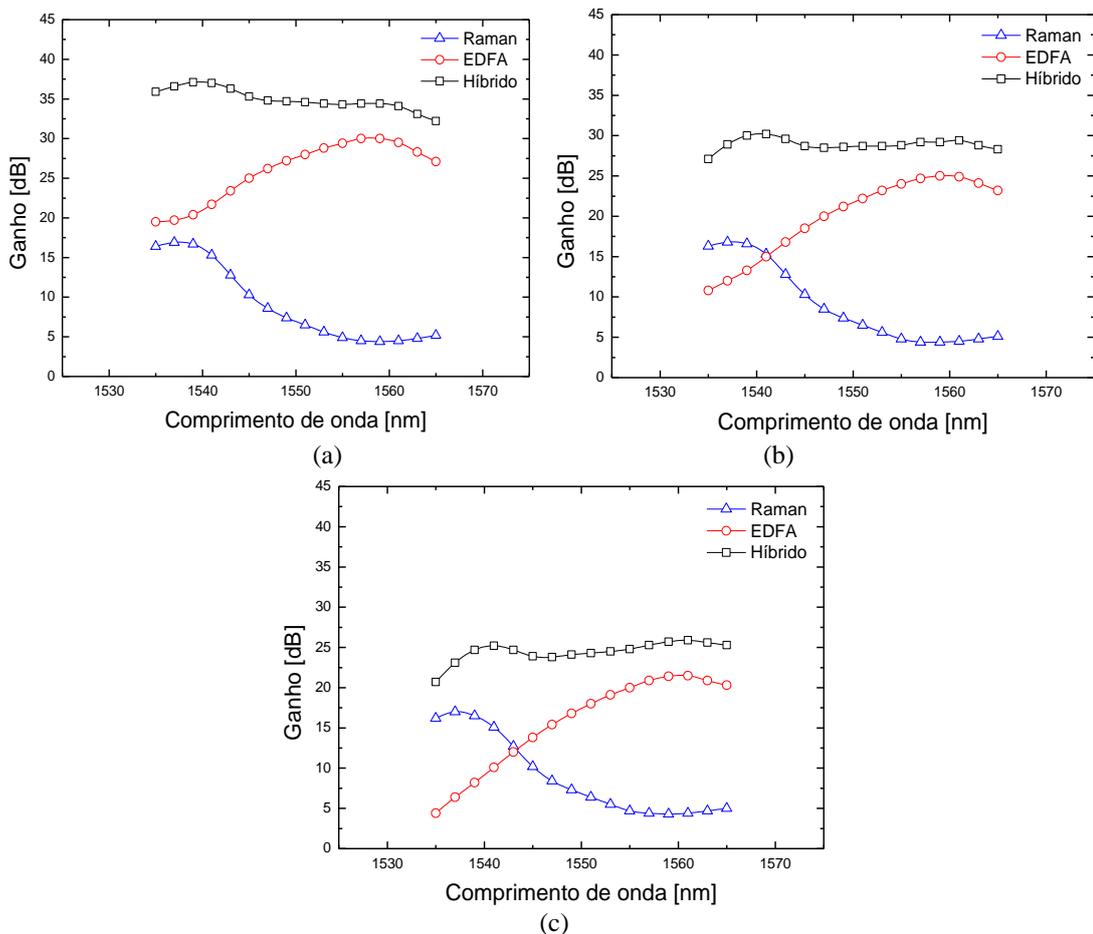


Figura 4-27: Ganhos em função dos comprimentos de onda do sinal de entrada do amplificador com bombeamento duplo otimizado para 16 canais WDM espaçados de 2 nm. (a) $P_s = -20$ dBm, (b) $P_s = -10$ dBm e (c) $P_s = -5$ dBm. (entre símbolos são linhas de vista)

Pelos resultados mostrados na figura 4.28 (a) pode ser observado que o ganho global médio teve um aumento de aproximadamente 5 dB, com o aumento do número de canais, se comparado com os resultados obtidos para 8 canais.

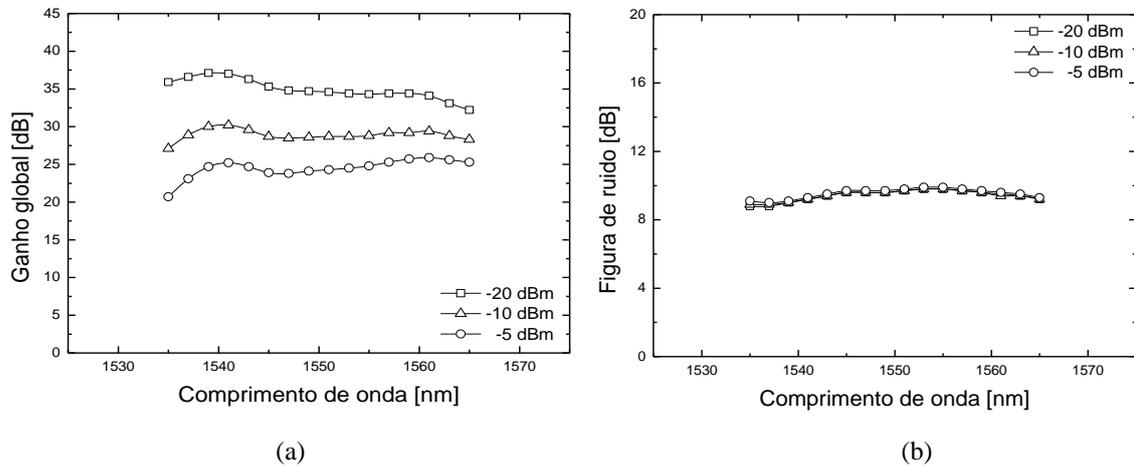


Figura 4-28: Ganho global (a) e figura de ruído (b) em função do comprimento de onda dos canais de entrada para bombeamento duplo, considerando -20 dBm, -10 dBm e -5 dBm. (entre símbolos são linhas de vista)

O valor médio da figura de ruído é de aproximadamente 9,4 dB, isto é, NF diminuiu 1,4 dB, quando esses resultados são analisados e comparados com os apresentados na figura 4.26 (b), 10,8 dB, isto é, o acréscimo de mais um laser de bombeamento melhora a figura de ruído.

O ganho em cada estágio de amplificação, como também o ganho global do amplificador híbrido para bombeamento Raman triplo otimizado (1423,9 nm, 1425,4 nm e 1465,8 nm, com potências de 288,9 mW, 176,5 mW e 64,3 mW, respectivamente), considerando os mesmos níveis de potência de entrada, são apresentadas na figura 4.29. Os valores médios do ganho global são de 37,5 dB, 31,3 dB e 26,8 dB e da ondulação são 4,9 dB, 3,3 dB e 5,1 dB, respectivamente. A partir da análise dos resultados da figura 4.29, observa-se que o ganho global aumentou aproximadamente 2 dB em relação aos resultados de bombeamento duplo mostrados na figura 4.27. A ondulação não teve alterações significativas comparada aos resultados mostrados nessa figura. Para canais de comprimentos de onda menores que 1540 nm, o estágio Raman se torna dominante sobre o resultado do ganho global.

Apesar do ganho global não sofrer nenhuma mudança significativa, quando comparado com os resultados obtidos com o aumento do número de canais de 8 para 16, a

ondulação teve uma diminuição de até 2 dB, dependendo do nível de potência total dos canais de entrada. Isso mostra que a utilização do amplificador híbrido proposto para 16 canais pode ser mais vantajosa em termos do custo sistêmico.

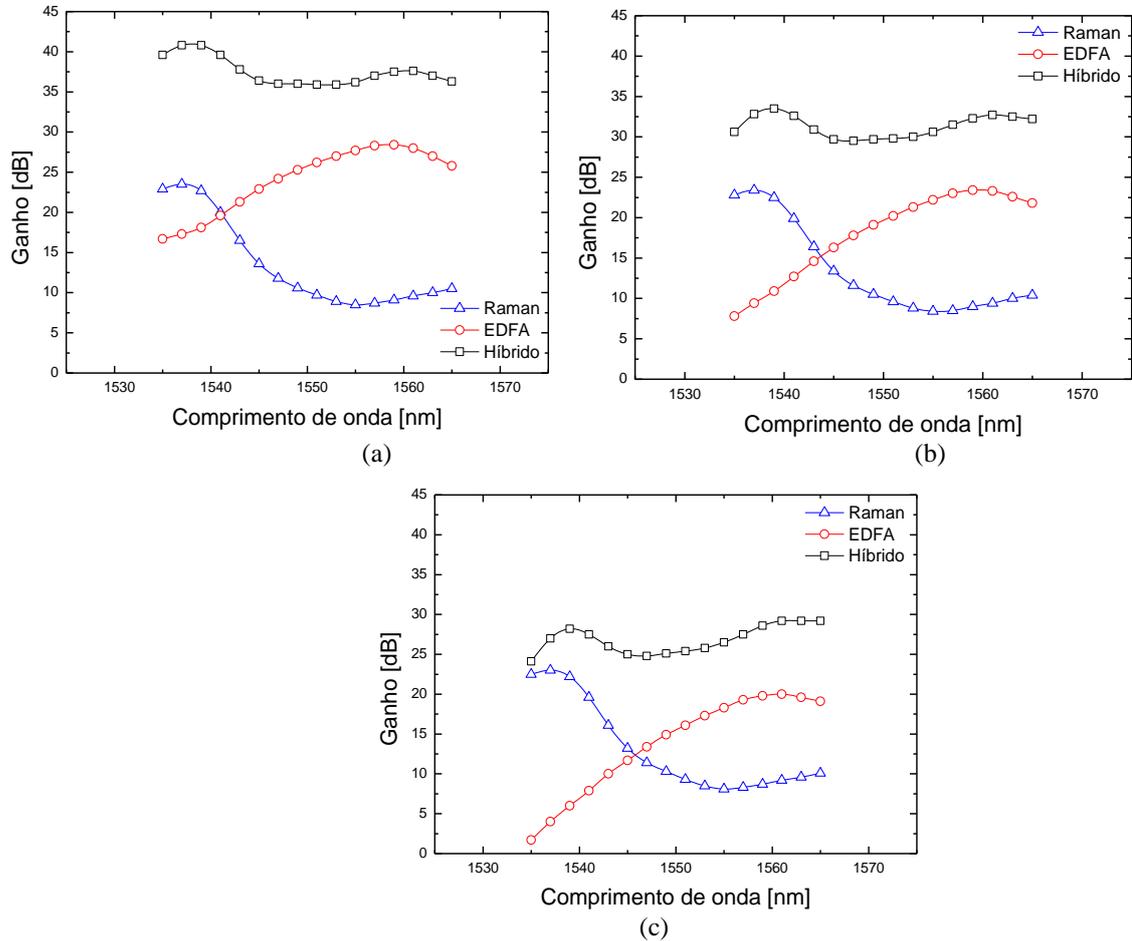


Figura 4-29: Ganhos em função dos comprimentos de onda do sinal de entrada do amplificador com bombeamento triplo otimizado para 16 canais WDM espaçados de 2 nm. (a) $P_s = -20$ dBm, (b) $P_s = -10$ dBm e (c) $P_s = -5$ dBm. (entre símbolos são linhas de vista)

O ganho global (a) e a figura de ruído (b), em função do comprimento de onda dos canais de entrada do amplificador com bombeamento triplo otimizado para 16 canais WDM espaçados de 2 nm, são mostrados na figura 4.30.

A partir da observação dessa figura, pode ser verificado que o ganho global não teve nenhuma alteração e a figura de ruído se manteve no valor próximo de 9,0 dB, com o aumento do número de canais de entrada. A figura de ruído, para o caso de 16 canais, sofre menor alteração na faixa de comprimento de onda analisada, quando comparada com os resultados obtidos com 8 canais WDM.

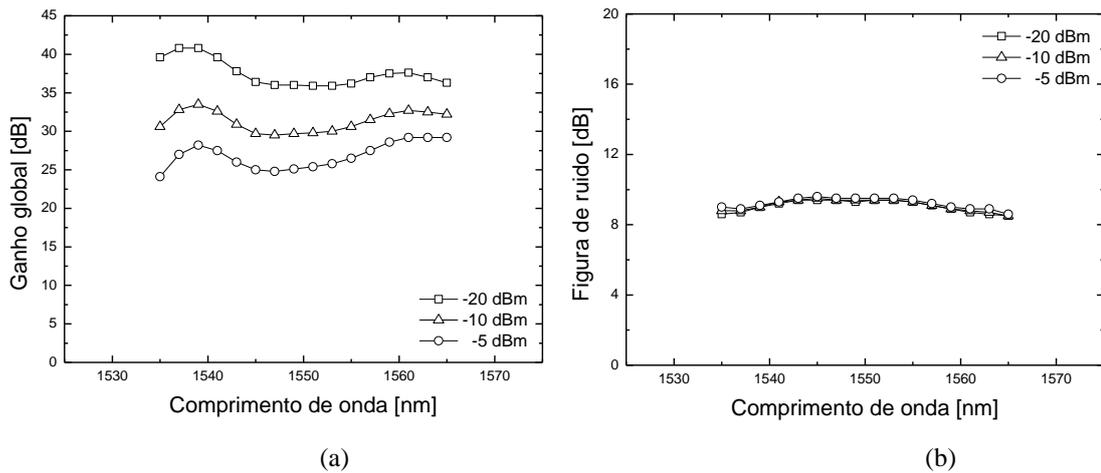


Figura 4-30: Ganho global (a) e figura de ruído (b) em função do comprimento de onda dos canais de entrada para bombeamento triplo, considerando -20 dBm, -10 dBm e -5 dBm. (entre símbolos são linhas de vista)

Os resultados obtidos dos ganhos do amplificador híbrido com bombeamento Raman quádruplo otimizado (1421,7 nm, 1422,9 nm, 1424,0 nm e 1451,4 nm, com potências de 91,4 mW, 211,9 mW, 204,1 mW e 106,2 mW, respectivamente) em função do comprimento de onda dos canais de entrada são mostrados na figura 4.31. Os valores médios do ganho global são de 38,4 dB, 32,2 dB e 27,9 dB e de ondulação são 4,5 dB, 4,0 dB e 5,2 dB, respectivamente. Os resultados apresentados na figura 4.31 permitem observar que o ganho global não teve alteração significativa comparada aos resultados mostrados na figura 4.29, com o aumento do número de canais de 8 para 16, e a ondulação teve uma diminuição de até 2 dB, dependendo do nível de potência total dos canais de entrada.

Comparando com a configuração de bombeamento triplo com 16 canais pode ser observado que o acréscimo de um laser de bombeamento não produziu aumento significativo do ganho global (somente 1 dB) como também não teve variação na ondulação. Dessa forma pode ser entendido que, para o segundo método, a configuração de bombeamento triplo parece ser mais adequada para alcançar os objetivos desejados para o amplificador híbrido com a banda proposta, isto é, ganho global alto e ondulação menor.

Os valores do ganho global (a), e da figura de ruído (b) em função do comprimento de onda dos canais de entrada são apresentados na figura 4.32. O ganho global teve um aumento de aproximadamente 1 dB com o acréscimo do quarto bombeamento. O valor médio da figura de ruído é de aproximadamente 8,6 dB. NF teve um decréscimo de aproximadamente 0,6 dB com a adição de mais um laser de bombeamento.

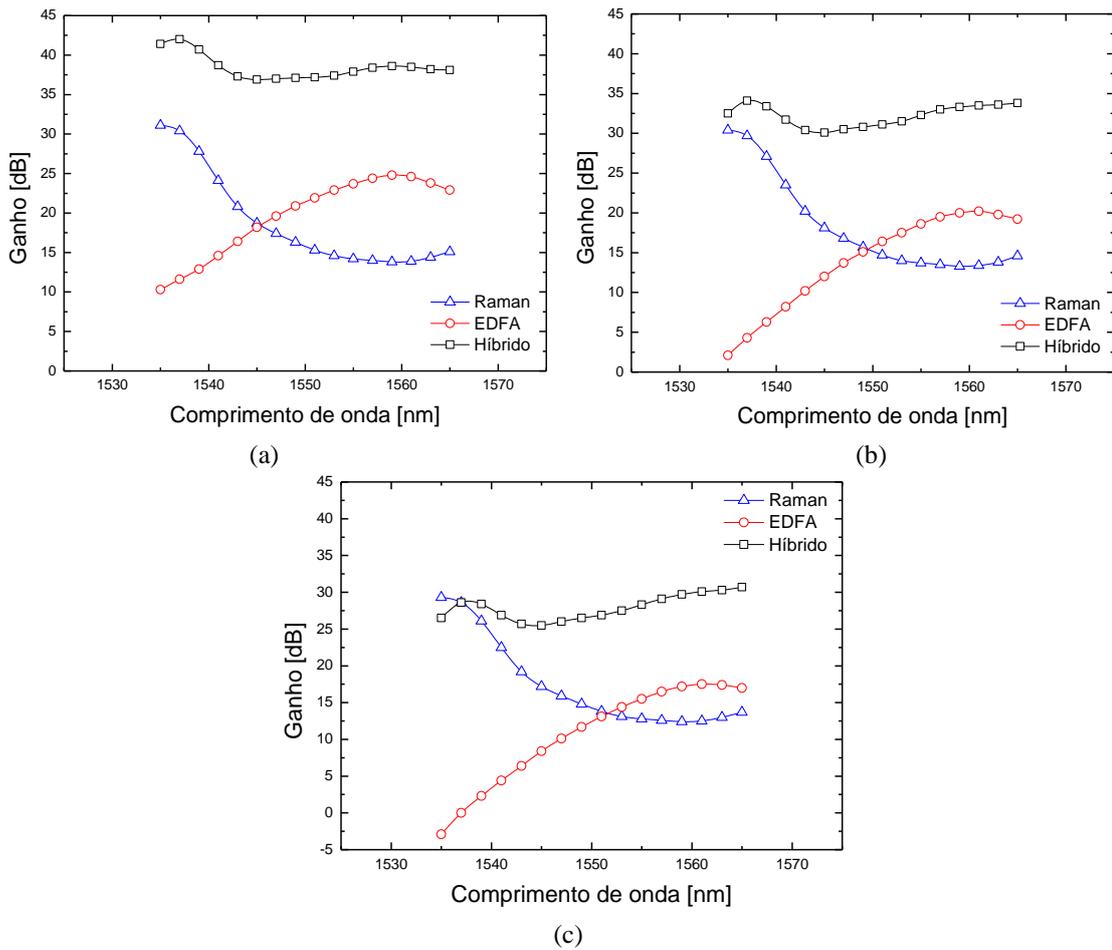


Figura 4-31: Ganhos em função dos comprimentos de onda do sinal de entrada do amplificador com bombeamento quádruplo otimizado para 16 canais WDM espaçados de 2 nm. (a) $P_s = -20$ dBm, (b) $P_s = -10$ dBm e (c) $P_s = -5$ dBm. (entre símbolos são linhas de vista)

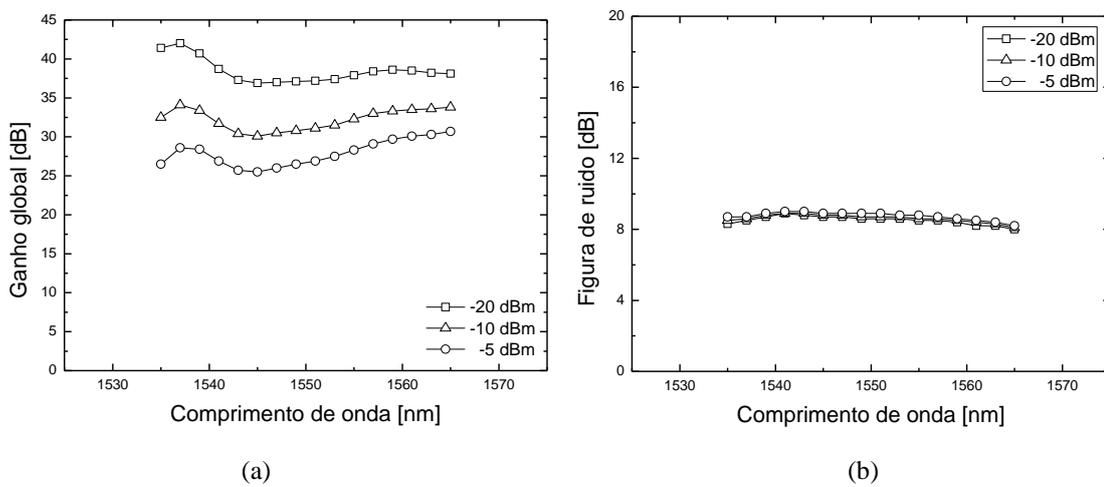


Figura 4-32: Ganho global (a) e figura de ruído (b) em função do comprimento de onda dos canais de entrada para bombeamento Raman quádruplo, considerando -20 dBm, -10 dBm e -5 dBm. (entre símbolos são linhas de vista)

Com esses resultados pode ser concluído que não é interessante a utilização da configuração de bombeamento quádruplo, se comparado com os resultados de bombeamento triplo, pois não houve nenhuma variação significativa, tanto no ganho global quanto na ondulação, enquanto a complexidade e o custo do amplificador aumentam.

4.2.2.3 Espaçamento entre 16 canais de 2,5 nm

Os resultados apresentados da figura 4.33 até 4.40 foram obtidos através das simulações realizadas com o amplificador híbrido Raman+EDFA utilizando bombeamento residual, para 16 canais WDM com espaçamento de 2,5 nm, iniciando em 1530 nm. Isso foi realizado para verificação do comportamento desse amplificador na banda C e L.

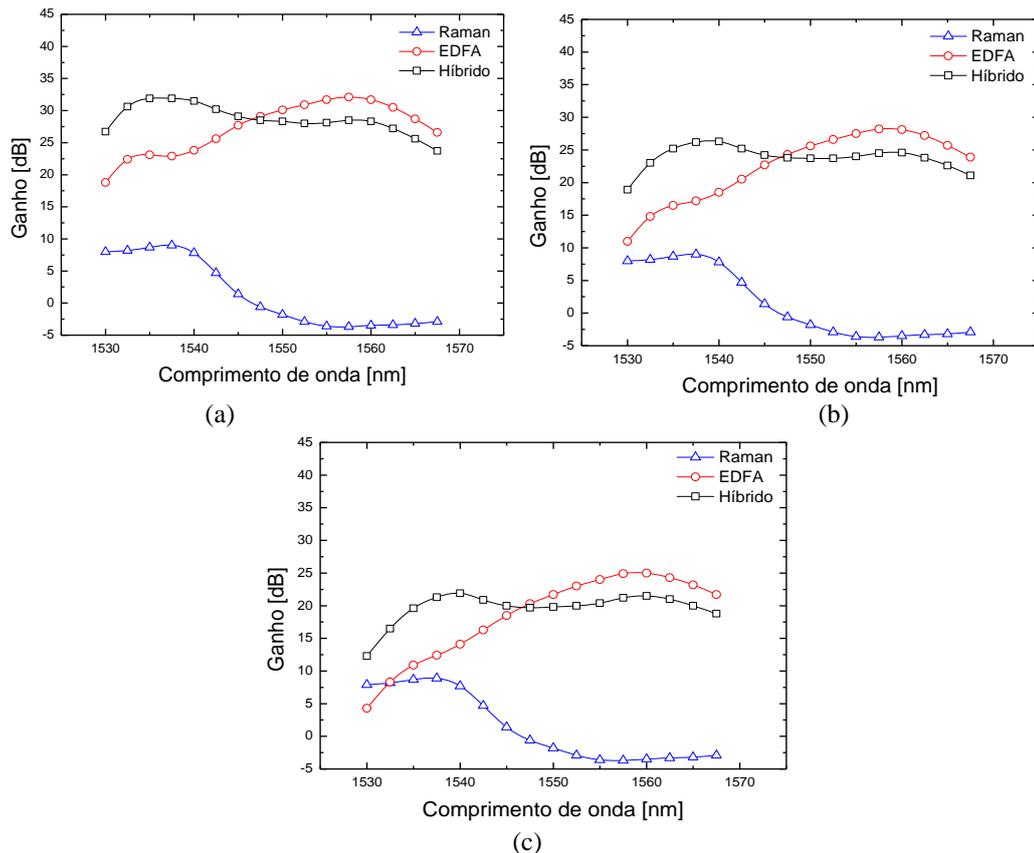


Figura 4-33: Ganhos em função dos comprimentos de onda do sinal de entrada do amplificador com bombeamento simples otimizado para 16 canais WDM espaçados de 2,5 nm. (a) $P_s = -20$ dBm, (b) $P_s = -10$ dBm e (c) $P_s = -5$ dBm. (entre símbolos são linhas de vista)

Os resultados do ganho em relação ao comprimento de onda dos canais de entrada são mostrados na figura 4.33. Pela análise dessa figura observa-se que o ganho global teve um decréscimo de aproximadamente 1 dB em relação aos resultados de bombeamento simples, com espaçamento entre os canais de 2 nm. Os valores médios do ganho global são 28,6 dB, 22,4 dB e 19,7 dB e de ondulação são 8,2 dB, 9,4 dB e 9,6 dB, respectivamente. O ganho não teve mudança significativa, mas a ondulação aumentou de aproximadamente 2 dB, 6 dB e 7 dB para as potência total de entrada de -20 dBm, -10 dBm e -5 dBm, respectivamente.

Na observação da figura 4.33, o estágio EDFA sofre maior depleção na região onde os canais de entrada possuem comprimentos de onda menores que 1535 nm, pois nesses comprimentos de onda o ganho no estágio Raman é maior, fornecendo maior nível de potência no segundo estágio. Isso resulta no ganho global menor nessa região, apesar de não ocorrer nenhuma variação no estágio Raman.

A figura 4.34 apresenta os resultados do ganho global (a), e da figura de ruído (b) em função dos comprimentos de onda dos canais de entrada. Pela análise dos resultados apresentados por essa figura, verifica-se que os valores médios do ganho global ($\approx 28,5$ dB, para P_s de -20 dBm) e da figura de ruído (≈ 11 dB) não tiveram mudanças significativas com o aumento do espaçamento entre os 16 canais (de 2 nm para 2,5 nm).

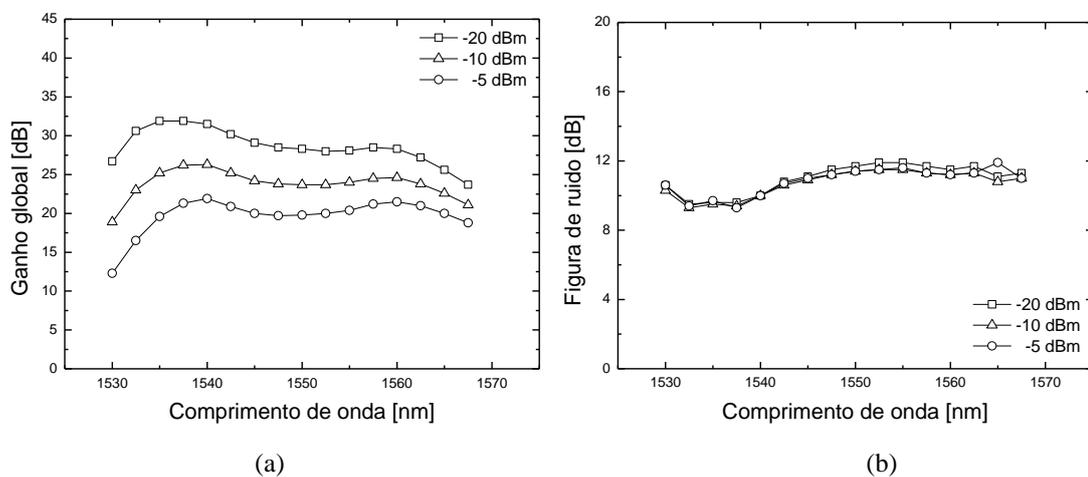


Figura 4-34: Ganho global (a) e figura de ruído (b) em função do comprimento de onda dos canais de entrada para bombeamento simples, considerando -20 dBm, -10 dBm e -5 dBm. (entre símbolos são linhas de vista)

A ondulação teve maior influência com o aumento do espaçamento entre os canais, de 2,0 nm para 2,5 nm, o que resultou no aumento de 6,3 dB para 8,2 dB, respectivamente. Isso mostra a importância desse parâmetro no desempenho do amplificador híbrido Raman+EDFA. Deve ser ressaltado que para espaçamento de 2,5 nm, os canais

exigem ocupação maior da banda C, possuindo canais alocados a partir de 1530 nm, onde ocorreu maior depleção do ganho.

Os resultados obtidos dos ganhos de cada estágio de amplificação e do ganho global do amplificador híbrido com bombeamento Raman duplo otimizado são apresentados na figura 4.35. Os valores médios do ganho global são 34,4 dB, 28,4 dB e 24,0 dB e de ondulação são 7,5 dB, 10,7 dB e 9,6 dB, respectivamente. Esses resultados quando comparados com os obtidos na configuração com bombeamento simples, isto é, acréscimo da potência de bombeamento, o ganho global médio aumentou de aproximadamente 6 dB, enquanto que a ondulação diminuiu de aproximadamente 2 dB.

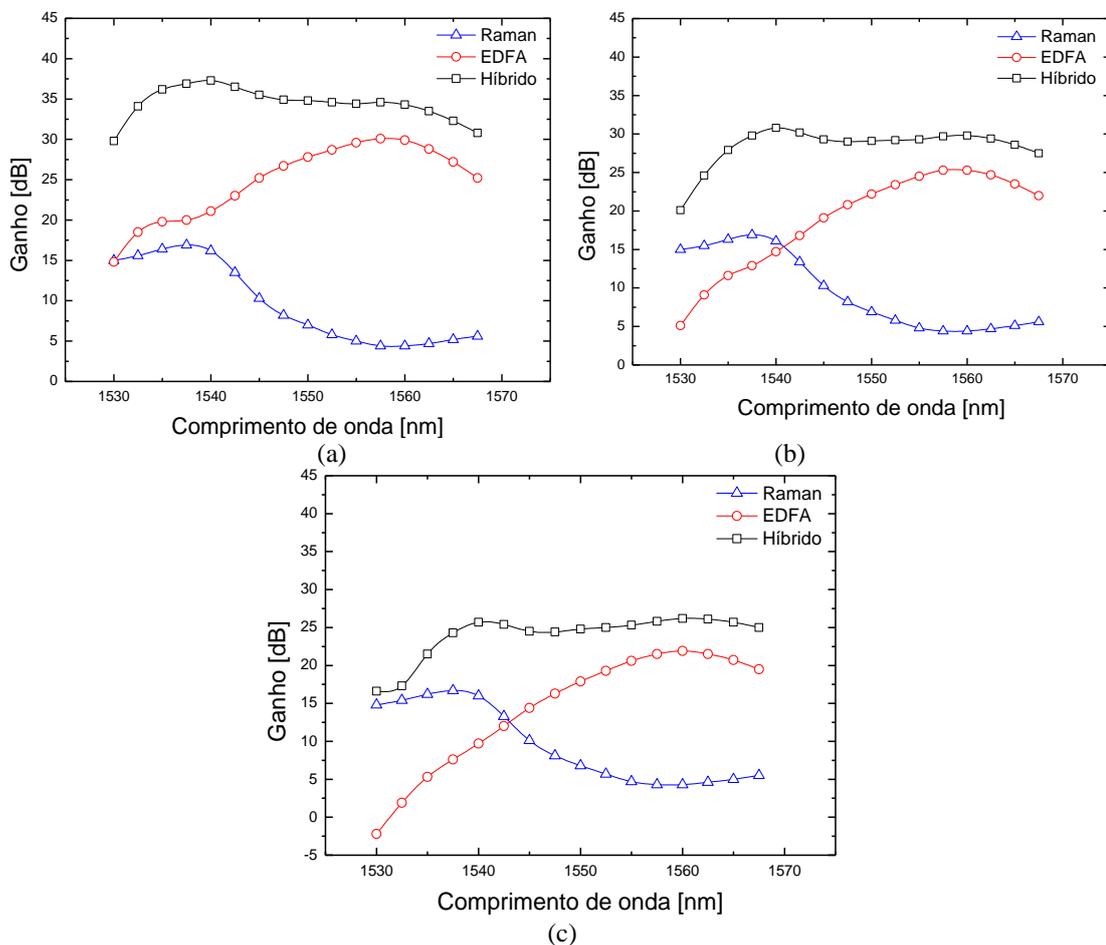


Figura 4-35: Ganhos em função dos comprimentos de onda do sinal de entrada do amplificador com bombeamento duplo otimizado para 16 canais WDM espaçados de 2,5 nm. (a) $P_s = -20$ dBm, (b) $P_s = -10$ dBm e (c) $P_s = -5$ dBm. (entre símbolos são linhas de vista)

Na análise comparativa dos resultados apresentados nas figuras 4.27 (espaçamento de 2,0 nm) e 4.35, o ganho global não teve aumento significativo, enquanto que a ondulação teve uma variação irregular com o acréscimo de mais um bombeamento.

Comparando aqueles resultados com esses, verifica-se que a ondulação teve um aumento de até 7 dB (para P_s de -10 dBm).

Os resultados do ganho Raman, apresentados na figura 4.35, demonstram o domínio desse estágio de amplificação na região onde os comprimentos de onda dos canais são menores que 1540 nm, mas o resultado do perfil do ganho global não foi satisfatório, isto é, ocorreu forte depleção no ganho desses canais, e conseqüentemente aumento da ondulação.

Os resultados obtidos do ganho global (a), e da figura de ruído (b), em função do comprimento de onda dos canais de entrada, são apresentados na figura 4.36. Por essa figura observa-se que o ganho global médio não teve variação significativa quando comparado com o valor obtido com espaçamento de 2,0 nm. O valor médio da figura de ruído não apresentou mudanças significativas, mantendo-se em aproximadamente 9,4 dB.

Nos canais com comprimentos de onda menores que 1543 nm, o nível de NF sofreu maior variação, que coincide com a região em que houve maior depleção do ganho global. Na faixa de 1543 nm a 1562 nm, o nível da NF se manteve inalterado.

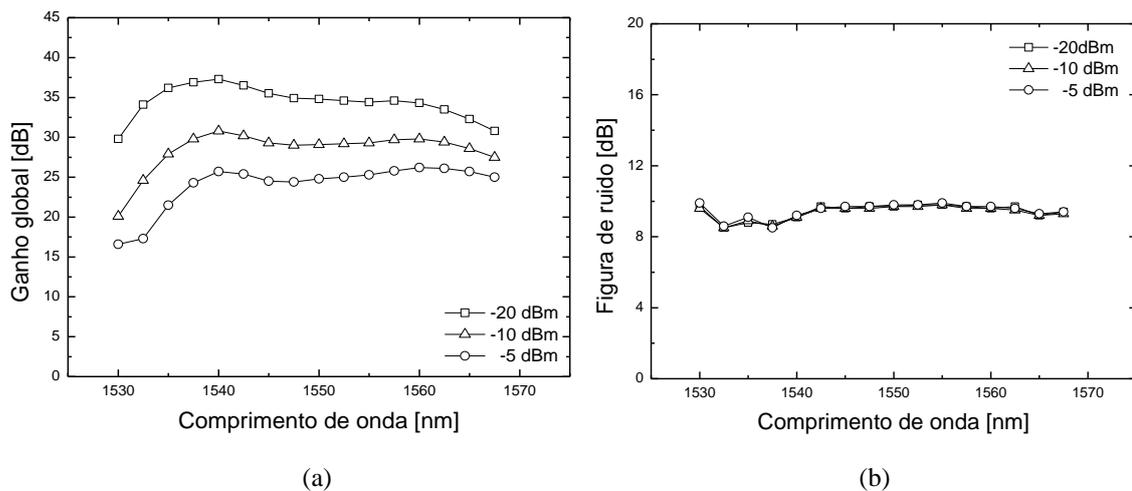


Figura 4-36: Ganho global (a) e figura de ruído (b) em função do comprimento de onda dos canais de entrada para bombeamento duplo, considerando P_s de -20 dBm, -10 dBm e -5 dBm. (entre símbolos são linhas de vista)

Os ganhos em função do comprimento de onda dos canais de entrada do amplificador híbrido com bombeamento Raman triplo otimizado são mostrados na figura 4.37. Os valores médios de ondulação são 9,0 dB, 11,6 dB e 15,1 dB e do ganho global são 37,5 dB, 30,8 dB e 24,3 dB, respectivamente. Apesar de o ganho global permanecer próximo dos valores considerados interessantes para amplificadores híbridos, maiores que os obtidos experimentalmente por LEE *et al.*, 2005 e TIWARI *et al.*, 2009 (≈ 20 dB), os valores da ondulação tiveram aumento de até 10 dB, quando comparados com os resultados obtidos com

espaçamento de 2,0 nm. Tais valores de ondulação não são aceitáveis para sistemas de transmissão WDM, pois o ideal seria valores próximos de 1 dB.

Pela análise realizada com os resultados apresentados na figura 4.37, pode ser observado que mesmo com o aumento de mais um laser e consequentemente aumento da potência de bombeamento, ocorre depleção do ganho dos canais com comprimentos de onda menores que 1540 nm. O sinal introduzido pelo terceiro laser de bombeamento não diminuiu o efeito da depleção no ganho global do amplificador híbrido proposto, isto é, não ocorreu a equalização do ganho global na mesma faixa de comprimento de onda.

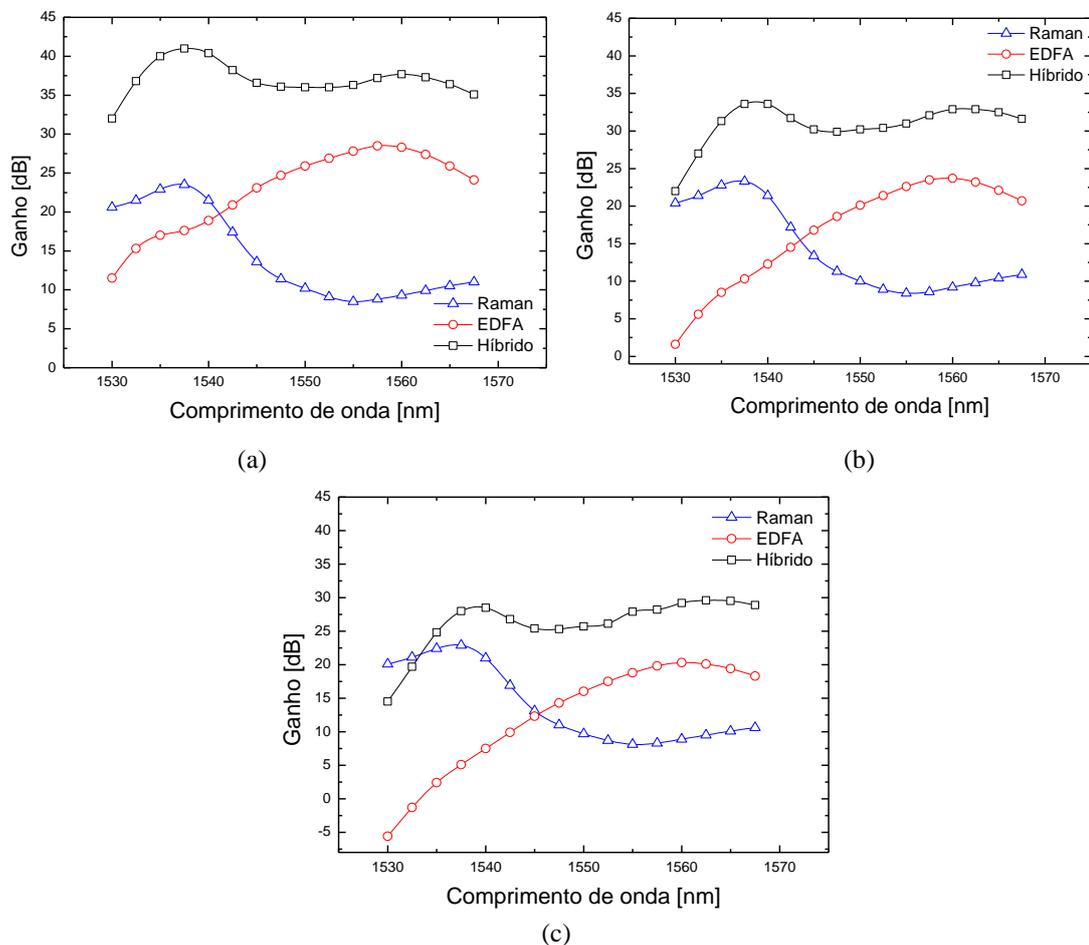


Figura 4-37: Ganhos em função dos comprimentos de onda do sinal de entrada do amplificador com bombeamento triplo otimizado para 16 canais WDM espaçados de 2,5 nm. (a) $P_s = -20$ dBm, (b) $P_s = -10$ dBm e (c) $P_s = -5$ dBm. (entre símbolos são linhas de vista)

A figura 4.38 apresenta os resultados obtidos do ganho global (a) e da figura de ruído (b), em relação ao comprimento de onda dos canais de entrada. A partir da análise dessa figura verifica-se que o ganho global tem um aumento de aproximadamente 2 dB com o

acréscimo do terceiro bombeamento. A figura de ruído teve mudanças significativas na faixa de 1530 nm a 1570 nm, sendo o seu valor médio de aproximadamente 9,0 dB, ocorrendo uma oscilação intensa no nível da NF para os canais com comprimentos de onda menores que 1545 nm, pois nessa faixa ocorre maior depleção no ganho devido, principalmente, ao alto ganho Raman e consequente depleção no EDFA (segundo estágio).

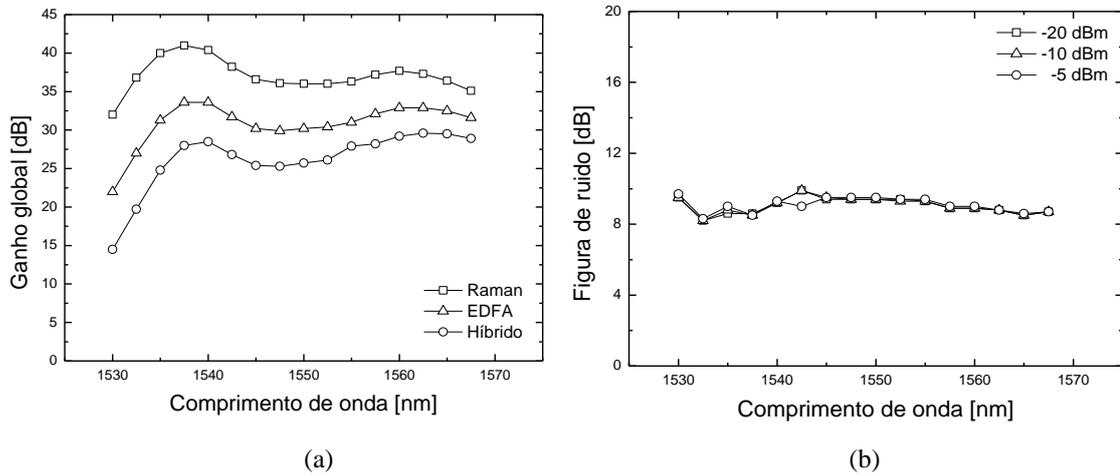


Figura 4-38: Ganho global (a) e figura de ruído (b) em função do comprimento de onda dos canais de entrada para bombeamento triplo, considerando -20 dBm, -10 dBm e -5 dBm. (entre símbolos são linhas de vista)

Os resultados dos ganhos em relação ao comprimento de onda dos canais de entrada do amplificador híbrido com bombeamento Raman quádruplo otimizado são mostrados na figura 4.39. Os valores médios do ganho global são 38,1 dB, 31,8 dB e 27,4 dB e da ondulação são 9,1 dB, 11,9 dB e 14,5 dB, respectivamente. O ganho global aumentou apenas 1 dB em relação aos resultados obtidos com três bombeamentos. A ondulação continua com valores não aceitáveis (ideal seria ≈ 1 dB) para sistemas WDM, mesmo com a adição de mais um laser de bombeamento.

A forte depleção, que ocorre no ganho global para sinais de comprimento de onda menor que 1535 nm, demonstra que o amplificador proposto com bombeamento quádruplo não é apropriado para essa faixa de sinais. Entretanto, para sinais acima de 1565 nm, esse amplificador, com essa configuração de bombeamento, demonstra ter valor de ganho global maior (≈ 10 dB) que naquela faixa.

A partir da análise dos resultados apresentados na figura 4.39, verifica-se que a ação dos lasers de bombeamento do estágio Raman faz com que o EDFA não seja efetivo na amplificação dos sinais dos canais com comprimento de onda menor que 1545 nm. Somente a

partir desse comprimento de onda, o perfil do ganho global se torna mais plano, isto é, menor variação dos ganhos dos canais.

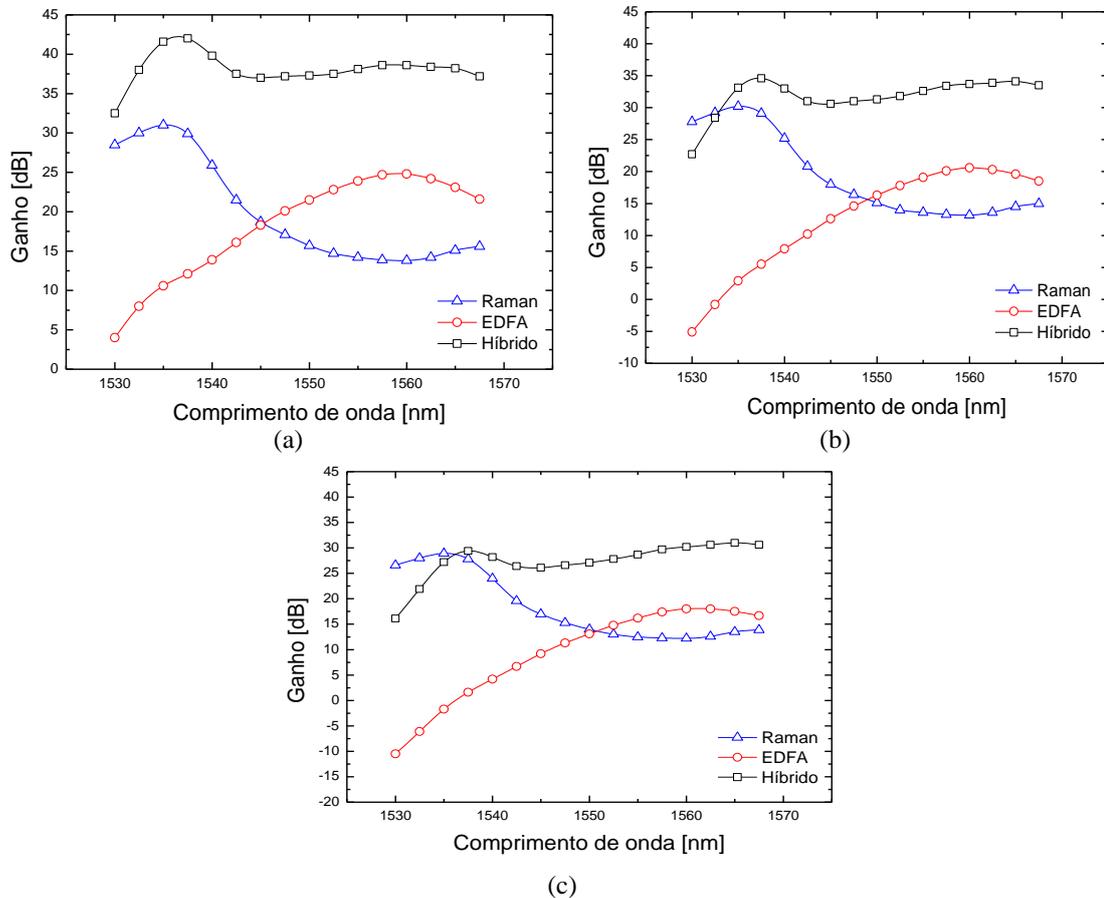


Figura 4-39: Ganhos em função dos comprimentos de onda do sinal de entrada do amplificador com bombeamento quádruplo otimizado para 16 canais WDM espaçados de 2,5 nm. (a) $P_s = -20$ dBm, (b) $P_s = -10$ dBm e (c) $P_s = -5$ dBm. (entre símbolos são linhas de vista)

O aumento da potência de entrada implica em depleção do ganho, principalmente para canais de comprimento de onda menores que 1545 nm. Isso pode ser prejudicial na utilização da banda do amplificador híbrido.

O ganho global (a) e a figura de ruído (b) em função do comprimento de onda dos canais de entrada são mostrados na figura 4.40. Pode ser observado, conforme a figura (a), que o decaimento do ganho global, que ocorre para os canais de comprimento de onda menor que 1537 nm, se torna ainda maior com o aumento do número de lasers de bombeamento.

O valor médio da figura de ruído é de aproximadamente 8,6 dB, menor valor comparado com as outras três configurações de bombeamento: simples (11,0 dB), duplo (9,4 dB) e triplo (9,1 dB). Da análise dos resultados apresentados na figura 4.40 (b) pode ser observado que o perfil da figura de ruído, considerando o aumento do espaçamento entre os

canais de entrada para 2,5 nm, se apresentou com maior oscilação em relação ao comprimento de onda, principalmente na faixa entre 1530 nm e 1545 nm.

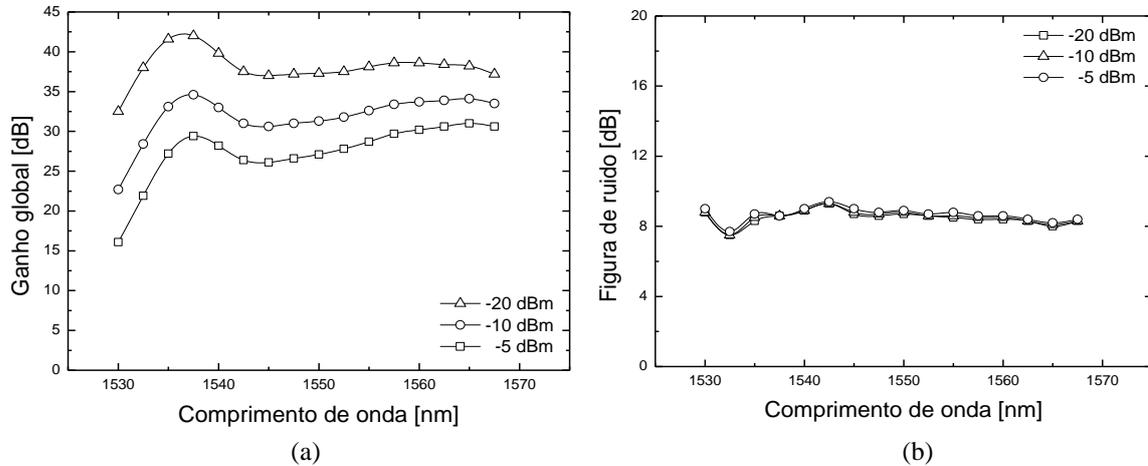


Figura 4-40: Ganho global (a) e figura de ruído (b) em função do comprimento de onda dos canais de entrada para bombeamento quádruplo, considerando -20 dBm, -10 dBm e -5 dBm. (entre símbolos são linhas de vista)

A figura de ruído permanece sem alterações significativas com o aumento da potência de entrada. Isso pode ser explicado pelo fato de que o EDFA está trabalhando sempre próximo à região de saturação.

4.3 INSERÇÃO DE 8, 16, 32, 64 E 128 CANAIS WDM

4.3.1 Potência total de entrada de -20 dBm, independente do número de canais

A figura 4.41 apresenta os resultados obtidos dos ganhos Raman, EDFA e global do amplificador híbrido otimizado com bombeamento simples (comprimento de onda de 1425 nm e potência de 231,3 mW) para 8, 16, 32 e 64 canais WDM. Nesse caso a potência total de entrada de -20 dBm foi dividida igualmente entre os canais, isto é, cada canal recebeu -29 dBm (para 8 canais), -32 dBm (para 16 canais), -35 dBm (para 32 canais) e -38 dBm (para 64 canais), respectivamente.

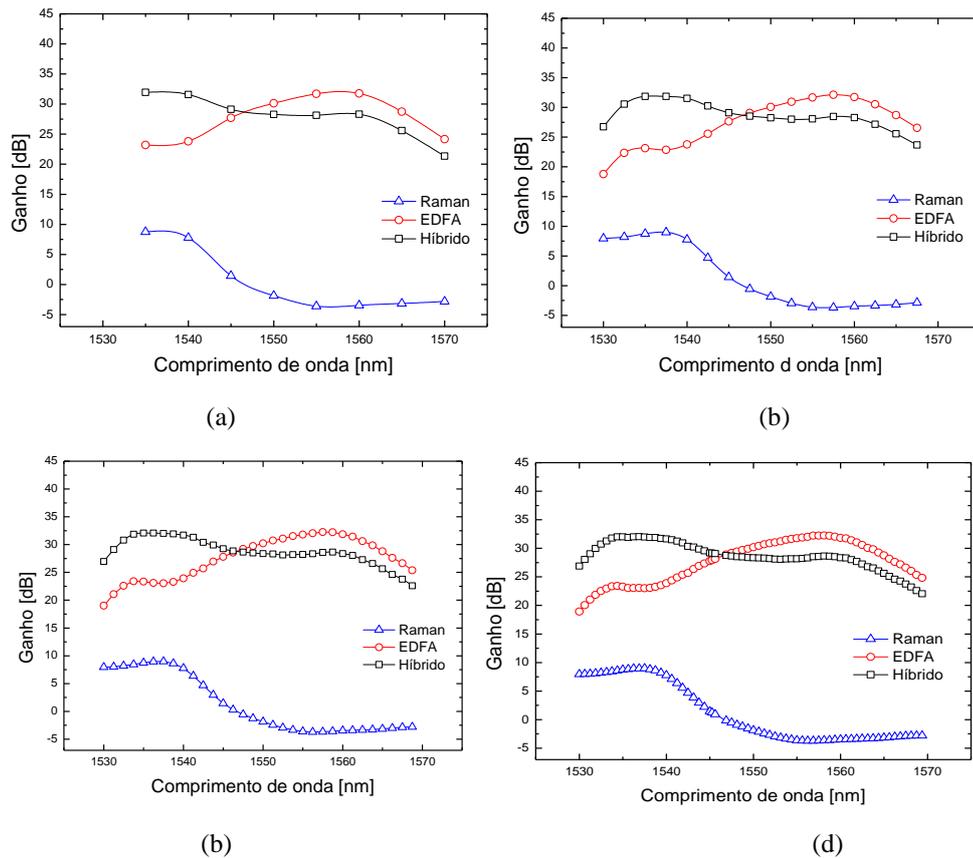


Figura 4-41: Ganhos em função dos comprimentos de onda do sinal de entrada do amplificador com bombeamento simples otimizado com Potência total de entrada de -20 dBm dividida entre os canais WDM na banda C. (a) 8, (b) 16, (c) 32 e (d) 64 canais. (entre símbolos são linhas de vista)

Teoricamente, com o aumento do número de canais de entrada, era esperado que as interações entre os sinais (sinal-bombeamento e sinal-sinal) aumentassem a depleção do ganho global. Como o nível da potência total de entrada foi mantido, o amplificador não enxerga nenhuma mudança significativa em relação ao sinal de entrada, isto é, as interações sinal-sinal não têm influências significativas sobre o desempenho do amplificador. Os resultados mostram também que as interações entre os sinais sinal-bombeamento degradam o ganho dos canais alocados no início e no final da banda C, comprimentos de onda menores que 1535 nm e maiores que 1560 nm.

Pode ser ressaltado que os dois estágios amplificadores (Raman e EDFA) atuam de forma complementar por causa da simetria dos perfis de ganho, então a ação daquelas interações resulta na equalização do ganho global, que é a soma dos ganhos dos dois estágios de amplificação.

A figura 4.42 apresenta os resultados obtidos do ganho global (a) e da figura de ruído (b) do amplificador híbrido otimizado, para 8, 16, 32 e 64 canais WDM. O aumento de canais não implicou na saturação do amplificador híbrido, pois a potência total de entrada foi mantida constante, conforme apresentado na figura 4.42 (a).

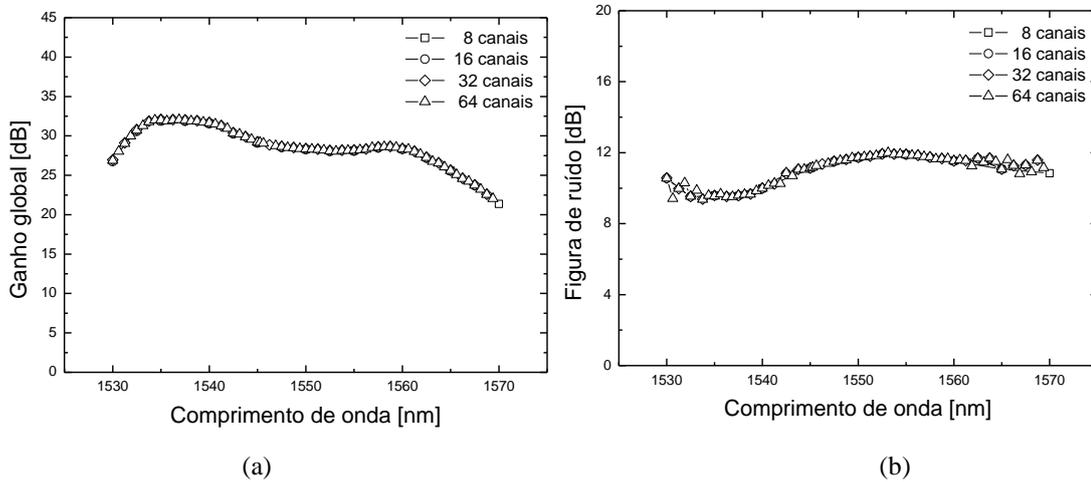


Figura 4-42: Ganho global (a) e figura de ruído (b) em função do comprimento de onda dos canais de entrada para bombeamento simples, considerando -20 dBm de potência total de entrada dividido entre os canais. (entre símbolos são linhas de vista)

A depleção dos ganhos dos canais com comprimento de onda menor que 1535 nm e maior que 1560 nm (extremidades da banda C) se tornam mais forte. A figura de ruído, figura 4.42 (b), sofre variações significativas para os canais com comprimentos de onda alocados nessas mesmas regiões.

4.3.2 Potência de cada canal de entrada de -20 dBm

A figura 4.43 apresenta os resultados obtidos do ganho global (a) e da figura de ruído (b) do amplificador híbrido otimizado com bombeamento simples, para 8, 16, 32, 64 e 128 canais WDM, considerando a potência de cada canal de -20 dBm. O aumento do número de canais implica automaticamente no aumento do nível da potência de entrada. Esse aumento leva à depleção do ganho global, como também a depleção do ganho se torna mais forte para canais com comprimento de onda menor que 1540 nm.

A figura 4.44 apresenta os resultados obtidos dos ganhos Raman, EDFA e global do amplificador híbrido otimizado com bombeamento simples, para 8, 16, 32, 64 e 128 canais WDM, considerando a potência de cada canal igual a -20 dBm.

Apesar da saturação que ocorre no EDFA e conseqüente diminuição do ganho global, devido ao aumento da potência de entrada, os perfis dos ganhos se mantiveram próximos à simetria desejada pela técnica de otimização proposta neste trabalho.

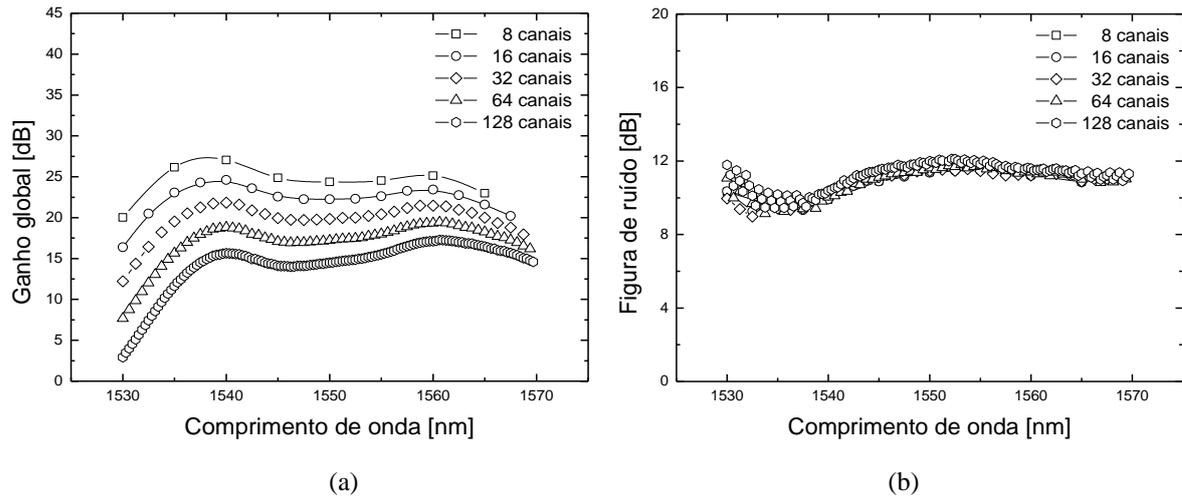


Figura 4-43: Ganho global (a) e figura de ruído (b) em função dos comprimentos de onda do sinal de entrada do amplificador com bombeamento simples otimizado com Potência de -20 dBm de cada canal WDM na banda C. (entre símbolos são linhas de vista)

Pode ser concluído que o amplificador híbrido proposto é suficientemente robusto aos efeitos não-lineares provocados pelo aumento da potência total de entrada para os níveis considerados nas simulações realizadas. Isso pode ser observado pelas mudanças nos perfis de ganho mostrados nas figuras 4.44 (a), (b), (c), (d) e (e).

A figura de ruído sofre variações significativas com o aumento do número de canais e conseqüente aumento do nível da potência de entrada, principalmente para os canais com comprimento de onda menores que 1540 nm.

Os resultados apresentados nas figuras 4.42 e 4.44 mostram que o desempenho do amplificador híbrido otimizado se comporta de maneira “previsível” (perfis semelhantes) mesmo com a inserção de um grande número de canais e com o aumento da potência de entrada.

A otimização proposta nesta tese visa à obtenção da melhor relação custo/benefício para o sistema, seja reduzindo o primeiro ou incrementando o segundo. Os preços foram baseados em informações fornecidas pela Furukawa. Apesar do preço de cada

laser depender de sua potência, o custo total do amplificador cresce com o aumento do número de lasers de bombeamento, mas foi constatado que o ganho global também se torna maior e a ondulação tende a diminuir. O método de extrapolação foi realizado para a obtenção do preço do laser de 500 mW, pois o mesmo não foi fornecido pela Furukawa.

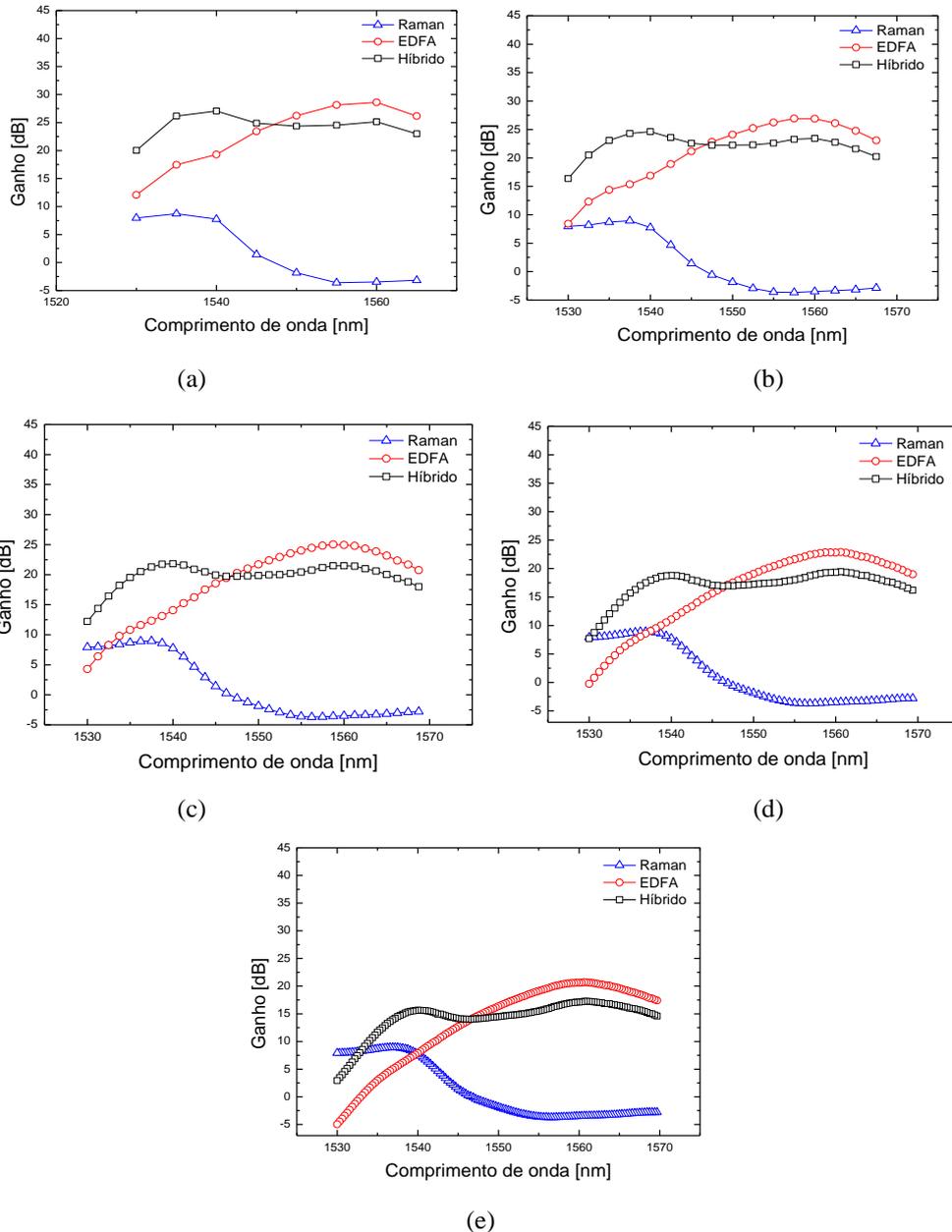


Figura 4-44: Ganho Raman, EDFA e global em função dos comprimentos de onda do sinal de entrada do amplificador com bombeamento simples otimizado com Potência de -20 dBm de cada canal WDM na banda C.

(a) 8, (b) 16, (c) 32, (d) 64 canais e (e) 128 canais. (entre símbolos são linhas de vista)

Uma comparação de custo/benefício entre amplificadores híbridos Raman+EDFA, utilizando a técnica de otimização, pode ser feita a partir dos resultados apresentados nas

tabelas 4.3 e 4.4 (valores baseados em dados fornecidos pela Furukawa). A partir dos valores apresentados nessas tabelas, pode ser verificado que no caso do bombeamento simples, o custo é menor (apenas um laser de 231,3 mW no estágio Raman de $\approx 700,00$ dólares) quando comparado com a configuração utilizando módulos separados, isto é, um laser de 500 mW no estágio Raman ($\approx 2.300,00$ dólares) e um laser de 60 mW para o estágio do EDFA ($\approx 600,00$ dólares), totalizando o custo de $\approx 2.900,00$ dólares. No caso do bombeamento duplo é utilizado um laser de 291 mW, de 1.000,00 dólares e um laser de 77,9 mW, de $\approx 600,00$ dólares, totalizando $\approx 1.600,00$ dólares.

Tabela 4-3: Preços considerando as respectivas potências dos lasers de bombeamento para módulos separados.

Estágio Raman	Preço (dólar)	Estágio EDFA	Preço (dólar)	Preço global (dólar)
500 mW	2.300,00*	60 mW	600,00	2.900,00

*valor obtido por extrapolação.

Tabela 4-4: Sumário dos preços considerando as potências dos lasers para as configurações de bombeamento residual.

Bombeamento	Potência (mW)	Preço (dólar)	Preço global (dólar)
Simples	231,3 mW	700,00	700,00
Duplo	291 mW	1.000,00	1.600,00
	77,9 mW	600,00	
Triplo	288,9 mW	1.000,00	2.300,00
	176,5 mW	700,00	
	64,3 mW	600,00	
Quádruplo	91,4 mW	600,00	2.600,00
	211,9 mW	700,00	
	204 mW	700,00	
	106,2 mW	600,00	

No bombeamento duplo otimizado, o número de lasers é igual ao bombeamento simples da configuração com módulos separados (um laser para o estágio Raman + um laser para o estágio do EDFA). Nesse caso, o custo ainda continua sendo menor ($\approx 1.600,00$ dólares) quando comparado com a configuração considerando módulos separados ($\approx 2.900,00$ dólares), pois a potência de cada laser é menor para o caso do bombeamento residual otimizado. Para o bombeamento triplo, é utilizado um laser de 288,9 mW, 1.000,00 dólares, outro de 176,5 mW, 700,00 dólares e um terceiro de 64,3 mW, de 600,00 dólares, totalizando $\approx 2.300,00$ dólares. Apenas um laser foi acrescentado e o custo total ainda é menor do que o caso da configuração de módulos separados (2.900,00 dólares).

A configuração que utilizou o bombeamento Raman quádruplo, apesar de não ter se mostrado vantajosa devido ao aumento do ganho global de apenas 1 dB e da ondulação ter passado de 3 dB para 3,4 dB, o custo ainda é menor (isto é, um laser de 91,4 mW, \approx 600,00 dólares, outro de 211,9 mW, de \approx 700,00 dólares, um de 204 mW, de 700,00 dólares, sendo mais um quarto laser de 106,2 mW, de 600,00 dólares, totalizando \approx 2.600,00 dólares). Todas essas considerações citadas, a partir dos dados apresentados nas tabelas 4.3 e 4.4, mostram todo o potencial que a técnica de otimização proposta nesta tese pode oferecer ao desenvolvimento dos amplificadores híbridos.

5 CONCLUSÕES FINAIS

Para melhor utilização da banda C de transmissão ótica foram abordados amplificadores híbridos Raman+EDFA otimizados com múltiplos lasers e bombeamento residual para sistemas WDM. Essa otimização utilizou a técnica que ajusta o perfil do ganho do estágio Raman, de maneira que compense o espectro do ganho do EDFA, com o objetivo de minimizar a ondulação do ganho global desse amplificador híbrido. O desempenho desse amplificador foi avaliado em termos do ganho global, da ondulação e da figura de ruído.

A contribuição mais importante deste trabalho ao estado da arte de amplificadores óticos consistiu da nova técnica de otimização de múltiplos lasers de bombeamento Raman. O objetivo dessa técnica é equalizar o perfil de ganho global do amplificador híbrido, a partir da flexibilidade espectral do amplificador Raman, adicionado à capacidade de amplificação do EDFA. Em pontos espectrais em que o EDFA possui limitações de ganho, o amplificador Raman consegue corrigir as flutuações de ganho dos canais WDM.

Pela primeira vez foi utilizada a técnica de otimização em que o perfil do ganho do EDFA é compensado a partir do perfil do ganho do estágio de amplificação Raman, ajustando as potências e os comprimentos de onda dos múltiplos lasers de bombeamento. Essa técnica é baseada na compensação, por simetria, dos perfis de ganho dos dois estágios do amplificador híbrido, e na etapa posterior ao uso do método analítico introduzido por CANI *et al.*, 2009.

Foi mostrado que o amplificador híbrido proposto pode ser utilizado tanto para 8 quanto para 16 canais WDM, sendo que o aumento do número de canais aumenta a ondulação dos ganhos dos canais de entrada de 7,3 dB para 9,4 dB, com espaçamento de 2,5 nm (para potência total de entrada de -10 dBm). Mas se o espaçamento diminuir de 2,5 nm para 2,0 nm, a ondulação diminui de 9,4 dB para 3,4 dB. Isso mostra a dependência do ganho em relação ao espaçamento entre os canais, que pode ser utilizada para conseguir uma redução significativa na ondulação, o que seria interessante para sistemas de transmissão.

Este trabalho utilizou o software comercial OptiSystem® 7.0 para confrontar os resultados obtidos por simulação com aqueles obtidos por outros autores utilizando diferentes técnicas, como também para mensurar a aplicabilidade de pacotes comerciais em novas proposições. Foi verificado que simulações, com software comercial, podem ser utilizadas para validação de resultados experimentais apesar de possuírem condições não-ideais para o

funcionamento do sistema simulado, isto é, não são levadas em consideração as condições reais dos elementos que compõem o sistema.

Foram propostos dois métodos de otimização de amplificador híbrido. Simulações com dois e três lasers de bombeamento foram realizadas buscando um ganho global plano. Para esse cenário investigado sob sinais de entrada WDM, a utilização do primeiro método proposto demonstrou que a configuração com dois lasers de bombeamento seria a melhor solução, pois forneceu ganho global médio alto (28,8 dB) e ondulação menor (4,3 dB), para uma potência total de entrada de -10 dBm. Configurações, tanto com dois ($NF \approx 11$ dB) quanto com três ($NF \approx 9$ dB) lasers de bombeamento, apresentaram figura de ruído 2 dB menor, quando se adiciona o terceiro laser de bombeamento. Os resultados demonstraram que o amplificador híbrido Raman+EDFA com bombeamento residual, combinado com escolha adequada de potência e comprimento de onda de bombeamento Raman, permite projetar amplificadores híbridos banda larga com ganho global alto e plano.

A técnica de otimização, utilizando o segundo método, conduz a valores de potência de cada laser de bombeamento menores que 500 mW, utilizados na literatura. O laser de bombeamento simples Raman otimizado com apenas 231,1 mW de potência e comprimento de onda de 1425 nm fornece ganho global médio de 23 dB e uma ondulação de 7,3 dB, para 8 canais WDM, para potência total de entrada de -10 dBm. Aumentando a potência total com dois lasers de bombeamento para 368,9 mW, a nova configuração fornece 28,7 dB de ganho global médio e 5,3 dB de ondulação, nas mesmas condições de entrada do bombeamento simples. Com três lasers de bombeamento Raman otimizados, com potência de 529,7 mW, a ondulação diminui de 5,3 dB para 3,0 dB e o ganho global médio aumenta de 28,7 dB para 31,2 dB. Com a adição de mais um laser, isto é, quatro lasers de bombeamento, com 613,6 mW, foram obtidos ganho global médio de 32,2 dB e ondulação de 3,4 dB. Isso mostra que o aumento do número de lasers de bombeamento deve ser um parâmetro a ser analisado com critério, definindo quais as reais necessidades do sistema.

A tabela 5.1 apresenta os valores de potência média por laser de bombeamento, a potência total de bombeamento, o ganho médio global, a ondulação das configurações de amplificadores híbridos propostos nesta tese. Foi considerado o segundo método de otimização em cada configuração de bombeamento, sendo que foram introduzidos 8 canais WDM simultâneos. A partir da análise dos valores apresentados na tabela 5.1 pode ser observado que o aumento do número de lasers de bombeamento diminui a potência média por laser, como também aumenta o ganho global e diminui a ondulação.

Tabela 5-1: Sumário dos resultados obtidos, considerando bombeamento simples, duplo, triplo e quádruplo.

Bombeamento	Potência média por laser (mW)	Potência total de bombeamento (mW)	Ganho médio global (dB)	Ondulação (dB)
Simple	231,3	231,3	23,0	7,3
Duplo	184,5	368,9	28,7	5,3
Triplo	176,2	529,7	31,2	3,0
Quádruplo	153,8	613,6	32,2	3,4

Pelos dados fornecidos pela tabela 5.1, também pode ser verificado que a configuração ótima de bombeamento, isto é, que fornece o melhor desempenho do amplificador híbrido Raman+EDFA, é a do bombeamento triplo, pois fornece a menor ondulação, como também o alto ganho médio global comparado com as configurações de bombeamento simples e duplo. A configuração de bombeamento quádruplo forneceu maior ganho global, mas a variação dos ganhos dos canais de entrada (ondulação) é maior.

A importância da utilização da técnica de otimização de amplificadores híbridos proposta nesta tese pode também ser verificado pela análise de custo que foi realizada, onde pode ser observado que o custo do amplificador híbrido otimizado se torna sempre menor se comparado ao custo da configuração com módulos Raman e EDFA bombeados separadamente. O custo global de amplificadores híbridos pode ser reduzido utilizando configurações de múltiplos lasers de bombeamento com potências menores, como também economizando o laser do estágio EDFA.

O modelo analítico de propagação da potência utilizado neste trabalho pode ser estendido para computar as interações devido ao efeito Raman entre frequências propagantes em direções opostas, por isso pode realizar as simulações com a configuração de bombeamento contrapropagante com bons resultados. O modelo foi capaz de representar os resultados do amplificador Raman com múltiplos sinais e múltiplos lasers de bombeamento, como também permitiu que fossem simuladas as configurações de bombeamento copropagante e contrapropagante.

Os resultados obtidos, através do modelo analítico de CANI *et al.*, 2009 complementado com o numérico do OptiSystem® 7.0 e aqueles obtidos experimentalmente por LEE *et al.*, 2005 e TIWARI *et al.*, 2009, mostraram que o modelo analítico utilizado neste trabalho é uma ferramenta rápida e confiável, que pode ser utilizada para projetar amplificadores híbridos Raman+EDFA com múltiplos canais e múltiplos lasers de bombeamento.

Os resultados de ganho obtidos inserindo 8, 16, 32, 64 e 128 canais demonstraram a robustez do amplificador híbrido com bombeamento residual. Os efeitos não-lineares (interações sinal-sinal, sinal-bombeamento e bombeamento-bombeamento) podem ter colaborado de maneira complementar através dos dois estágios amplificadores (Raman e EDFA) devido à técnica de otimização adotada (simetria dos perfis de ganho). Essa ação pode ter influenciado positivamente no sinal amplificado na saída do amplificador híbrido resultante, isto é, ocorrendo transferência de potência entre os canais, diminuindo assim a ondulação. A característica não-linear forte da DCF, utilizada no primeiro estágio, realça sensivelmente os efeitos do amplificador Raman sobre o EDFA.

Todas as análises desses resultados apresentados conduzem ao entendimento de que o amplificador híbrido com bombeamento residual proposto combinado com a técnica de otimização (primeiro ou segundo método) pode fornecer ganho global alto e plano, dependendo das exigências de cada aplicação. O aumento de canais implica automaticamente no aumento do nível da potência de entrada, o que reduz o ganho global do amplificador, mas o seu perfil se mantém sempre semelhante.

TRABALHOS FUTUROS

Com o objetivo de dar continuidade a este trabalho, algumas sugestões podem ser feitas como trabalhos futuros:

- Ajustar os parâmetros dos amplificadores híbridos propostos para obter maior concordância com os resultados experimentais;
- Analisar planicidade do ganho global em relação ao comprimento da DCF, levando em consideração a subcompensação e a sobrecompensação de dispersão;
- Considerar a influência do EDFA, variando o comprimento da fibra e a potência de bombeamento;
- Implementar o modelo analítico de ganho e ondulação em amplificador de fibra dopada com Érbio;
- Analisar a questão da equalização do ganho dos canais WDM que deve ser abordada em diferentes situações, assim como métodos de preservar a estabilidade quanto a inserção e a retirada de canais WDM;
- Estender a análise para sinais alocados em outras bandas O, S e L;
- Investigar sistemas compostos por fibras de alto ganho Raman tais como fibras óticas microestruturadas;
- Analisar, experimentalmente, tais configurações de amplificadores híbridos com múltiplos lasers de bombeamento e múltiplos canais, considerando a degradação do ganho global.

PUBLICAÇÕES NÃO RELACIONADAS À TESE

PATYK, R. L.; MARTINI, M. M. J. ; POSSETTI, G. R. C.; LOURENCO JR, I. ; MAZUR, W. ; KALINOWSKI, H. J. . Determinação do Perfil de Escrita para Redes de Bragg em Fibra Ótica. **In: MOMAG 2008 - 13º Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica e 8º Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, Florianópolis. Anais do MOMAG 2008.** p. 283-286.

PATYK R. L., MARTINI M. M. J., POSSETTI G. R. C., LOURENÇO Jr. I., MAZUR W., KALINOWSKI H. J., Determination of the Recording Profile of Fiber Optic Bragg Gratings, **Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications**, V. 8, p. 9s – 16s, 2009.

PUBLICAÇÕES RELACIONADAS À TESE

MARTINI M. M. J., CASTELLANI C. E. S., PONTES M. J., RIBEIRO M. R. N., KALINOWSKI H. J., Multi-pump Optimization for Raman+EDFA Hybrid Amplifiers under Pump Residual Recycling, **International Optoelectronics Conference**, p. 117 – 121, Belém, Brazil, 2009.

MARTINI M. M. J., CASTELLANI C. E. S., PONTES M. J., RIBEIRO M. R. N., KALINOWSKI H. J., Multi-pump Optimization for Raman+EDFA Hybrid Amplifiers in WDM Systems, **Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications**, v. 9, no. 2, p. 100 – 112, December, 2010.

MARTINI M. M. J., CASTELLANI C. E. S., PONTES M. J., RIBEIRO M. R. N., KALINOWSKI H. J., Analysis of a Multi-Pump Optimization in Raman+EDFA Hybrid Amplifiers with Pump Recycling for WDM Systems, **Photonics Europe International Symposium**, Brussels, Belgium, p. 12-16, April, 2010.

REFERÊNCIAS

AGRAWAL, G. **Fiber-Optic Communication Systems**. 3ª edição, John Wiley and Sons, USA, 2002.

AGRAWAL, G. **Nonlinear Fiber Optics**. 3ª edição, Academic Press, Inc., USA, 2001.

ANDRÉ P. *et al.* New Challenges in Raman Amplification for Fiber Communication Systems. p. 51-81, in: **Optical Fibers Research Advances**. Jürgen C. Schlesinger Editor, Nova Science Publishers, Inc., 2007.

AHMAD A., MAS IZYANI M. A., ZAMZURI A. K., ADIKAN F. R. M., SHEIH S-J., MAHDI M. A., Experimental Validation of OSNR Enhancement Utilizing Hybrid Raman/Erbium Fiber Amplifiers, **Microwave and optical Technology Letters**, v. 45, no. 4, p. 333 – 335, May, 2005.

ANDRÉ, P. S. B., CORREIA, R., BORGHESI Jr, TEIXEIRA, A. L. J., NOGUEIRA, R. N., LIMA, M. J. N., KALINOWSKI, H. J., DA ROCHA, F., PINTO, J. L. Raman Gain Characterization in Standard Single Mode Optical Fibers for Optical Simulation Purposes. **Optica Applicata**, v. 33, no. 4, p. 595 – 573, 2003.

BASTOS-FILHO, C. J. A. **Amplificadores Ópticos para Sistemas de Comunicação Multicanais de Alta Capacidade**. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, 2005.

BECKER P., **Erbium Doped Fiber Amplifiers – Fundamentals and Technology**, Academic Press, EUA, 1998.

BOGGIO, J. M. C., MARCONI, J. D., BICKHAM, S. R., FRAGNITO, H. L. Spectrally Flat and Broadband Double-pumped Fiber Optical Parametric Amplifiers. **Optics Express**, v. 15, no. 9, p. 5288-5307, 2007.

BORGHESI JR, Luis Mário; NABAS, K. K. H.; KALINOWSKI, H. J. Análise para Implantação de WDM em Enlaces Ópticos Existentes Frente a Efeitos de SRS e FWM. In: **X Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica**, 2002, Recife. Anais do X Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica, v. único, p. 645-649, 2002.

BROMAGE, J. Raman Amplification for Fiber Communications Systems. **IEEE Journal of Lightwave Technology**, v. 22, no. 1, p. 79 – 93, janeiro, 2004.

CANI, S. P., FREITAS, M., ALMEIDA, R. T., CALMON, L. C. Raman Amplifier Performance of Dispersion Compensating Fibers. **in Proceeding of Sociedade Brasileira de Microondas e Optoeletrônica/IEEE Microwave Theory and Techniques Society, International Microwave and Optoelectronic Conference**, Foz do Iguaçu, p. 553-558, 2003.

CANI, S. P. N. **Uma Contribuição ao Modelamento Analítico em Amplificadores Raman**. Tese de doutorado, Programa de Pós-Graduação Engenharia Elétrica, Universidade federal do Espírito santo, Agosto, 2007.

CANI S. P. N., CALMON L. C., PONTES M. J., RIBEIRO M. R. N., SEGATTO M. E. V., CARTAXO A. V. T., “An Analytical Approximated Solution for the Gain of Broadband Raman Amplifiers With Multiple Counter-pumps,” **Journal of Lightwave Technology**, v. 27, p. 944 – 951, April, 2009.

CARENA A., CURRI V., POGGIOLINI P., “On the Optimization of Hybrid Raman/Erbium-doped Fiber Amplifiers,” **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 13, no. 11, p. 1170 – 1172, 2001.

CASTELLANI, C. E. S., CANI, S. P. N., PONTES, M. J., SEGATTO, M. E. V. Análise do Desempenho de Sistemas Ópticos com Amplificadores Raman. **Revista de Ciência e Tecnologia**, Vitória, v. 2, p. 26 – 34, Março, 2007.

CASTELLANI, C. E. S., CANI, S. P. N., PONTES, M. J., SEGATTO, M. E. V. Análise de Sistemas Ópticos Operando com Amplificadores Raman Discretos com sinais WDM na Banda C. **MOMAG**, CD-ROM, p. 1138 – 1142, Santa Catarina, Setembro, 2008.

CASTELLANI, C. E. S., CANI, S. P. N., SEGATTO M. E. V., M. J. PONTES, ROMERO M. A., “Design Methodology for Multi-pumped Discrete Raman Amplifiers: Case-Study Employing Photonic Crystal Fibers,” **Optics Express**, v. 17, no. 16, p. 14121 – 14131, 2009.

CHRAPLYVY, A. R., “Optical Power Limits in Multichannel Wavelength Division Multiplexed Systems due to Stimulated Raman Scattering,” **Electronics Letters**, v. 20, p. 58 – 59, 1984.

DESURVIRE, E. **Erbium-Doped-Fiber Amplifiers: Principles and Applications**. John Wiley & Sons Inc., New York, 1994.

ECKHARDT, G., HELLWARTH, R. W., McCLUNG, F. J., SCHWARZ, S. E., WEINER, D., WOODBURG, E. J., “Stimulated Raman Scattering from Organic Liquids,” **Physical Review Letters**, v. 9, no. 11, p. 455 – 457, 1962.

EMORI Y., TANAKA K., NAMIKI S., 100 nm Bandwidth Flat-Gain Raman Amplifiers Pumped and Gain-Equalized by 12 – Wavelength – Channel WDM Laser Diode Unit, *Electronics Letters*, v. 35, no. 16, August, 1999.

GILES, C. R., DESURVIRE, E. Modeling Erbium-Doped Fiber Amplifiers. **IEEE Journal of Lightwave Technology**, v. 9, no. 2, p. 271-283, February, 1991.

HAN, Q., NING, J., ZHANG, H., CHEN, Z. Novel Shooting Algorithm for Highly Efficient Analysis of Fiber Raman Amplifiers. **IEEE Journal of Lightwave Technology**, v. 24, no. 4, p. 1946 – 1952, April, 2006.

HANSEN P. B., JACOBVITZ-VESELKA G., GRUNER-NIELSEN L., STENTZ A. J., “Raman Amplification for Loss Compensation in Dispersion Compensating Fiber Modules,” **Electronic Letters**, v. 34, no. 11, p. 1136 – 1137, May, 1998.

HEADLEY, C., AGRAWAL, G. Raman Amplification in Fiber Optical Communication Systems. **Elsevier Academic Press**, USA, 2005.

HECHT, E. **Optics**. 2^a edição, Addison-Wesley Publishing Company, USA, 1990.

HELLWARTH, R. W., “Theory of Stimulated Raman Scattering,” **Physical Review**, v. 130, no. 5, p. 1850 – 1852, 1963.

IANNONE E., MATERA F., MECOZZI A., SETTEMBRE M. **Nonlinear Optical Communication Networks**. John Wiley & Sons, Canada, 1998.

ISLAM, M. Raman Amplifiers for Telecommunications. **IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics**, v.8, no.3, p. 548 – 559, May/June, 2002.

ISLAM, M. **Raman Amplifiers for Telecommunications 1 Physical Principles**. Springer-Verlag New York, Inc., 2004.

ITU-T Recommendation G.692, 1998.

ITU-T Recommendation G.694, 2002.

HECHT J. S-band Amplification: Challenges Developers. **Laser Focus World**, p.79-84, July, 2002.

KARÁSEK, M., MENIF, M., BELLEMARE, A. Design of Wideband Hybrid Amplifiers for Local Area Network. **IEEE Proceeding of Optoelectronic**, v. 148, no. 3, p. 150 – 155, June, 2001.

KASOVSKY, L., BENEDETTO, S., WILLNER, A. **Optical Fiber Communication Systems**. Artech House, London, 1996.

KIDORF, H., ROTTWIT, K., NISSON, M., MA M., RABARIJAONA, E. Pumps Interactions in a 100-nm Bandwidth Raman Amplifier. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 11, no. 5, p. 530 – 532, May, 1999.

LEE, J. H., CHANG, Y. M., HAN, Y. G., KIM, S. H., LEE, S. B. Dynamic Proprieties of Single Pump, Dispersion-Compensating Raman/EDFA Hybrid Amplifier Recycling Residual Raman Pump. **Optics Express**, v. 12, no. 26, p. 6594 – 6599, December, 2004

LEE, J. H., CHANG, Y. M., HAN, Y. G., KIM, S. H., CHUNG, H., LEE, S. B. Dispersion-Compensating Raman/EDFA Hybrid Amplifier Recycling Residual Raman Pump for Efficiency Enhancement. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 17, no. 1, p. 43 – 45, January, 2005.

LEE, J. H., CHANG, Y. M., HAN, Y. G., H., KIM, CHUNG, S. H., LEE, S. B. Performance Comparison of Various Configurations of Single-Pump Dispersion-Compensating Raman/EDFA Hybrid Amplifiers. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 17, no. 4, p. 765 – 767, April, 2005.

LEE, J. H., CHANG, Y. M., HAN, Y. G., CHUNG, H., KIM, S. H., LEE, S. B. A Detailed Experimental Study on Single-Pump Raman/EDFA Hybrid Amplifiers: Static, Dynamic, and System Performance Comparison. **IEEE Journal of Lightwave Technology**, v. 23, no.11, p. 3484 – 3493, November, 2005.

LI Z., LU C., CHEN J., ZHAO C., “Raman Amplifier Design Using Geometry Compensation Thecnique,” **Optics Express**, v. 12, no. 3, p. 436 – 441, February, 2004.

LIAW, S. K., DOU, L. D., XU, A. Fiber-Bragg-Grating-Based Dispersion-Compensated and Gain-Flattened Raman Fiber Amplifier. **Optics Express**, v. 15, no. 19, p.12356 – 12361, September, 2007.

LIAW, S. K., HUANG, Y. S. C+L-Band Hybrid Amplifier Using FBG for Dispersion Compensation and Power Equalization. **Electronics Letters**, v. 44, no. 14, July, 2008.

LIN H. S., LAI P. C., “The Research of Mix Raman and EDFA Amplifier Recycling Residual Raman Pump for Amplifier Gain Efficiency Improvement,” **Microwave and Optical Technology Letters**, v. 51, no. 2, p. 358 – 361, February 2009.

LIU, X., LEE, B., “Optimal Design of Fiber Raman Amplified Based on Hybrid Genetic Algorithm,”**IEEE Photonics Technology Letters**, v. 16, no. 2, p. 428 – 430, February 2004

LOPEZ-BARBERO, A. P., PONTES, M. J., GIRALDI, M. T. M. R., CANI, S. P. N., CALMON, L. C., SEGATTO, M. E. V., MARTINEZ, M. A. G., REIZNIK, A. A., “Numerical Routines for the Optimization of Pump Power Wavelength in Distributed Raman Amplifiers,” **Fiber Integrated Optics**, v. 25, no. 5, p. 347 – 361, 2006..

MASUDA H., KAWAI S., AIDA K., Ultra-wideband Hybrid Amplifier Comprising Distributed Raman Amplifier and Erbium-Doped Fibre Amplifier, **Electronics Letters**, v. 34, no. 13, p. 1342 – 1344, June, 1998.

NAMIKI, S., SEO, K., TSUKIJI, N., SHIKII, S. Challenges of Raman Amplification. **Proceeding of the IEEE**, v. 94, no.5, p. 1024 – 1035, May, 2006.

RAMASWAMI, R. Optical Fiber Communication: From Transmission to Network. **IEEE Communications Magazine**, p. 138 – 147, May, 2002.

RAMASWAMI R., SIVARAJAN K. N. “Optical Networks: a practical perspective. Second edition, **Morgan Kaufmann Publishers**, USA, 2002.

ROTTWITT K., NISSOV M., KERFOOT F., “Detailed analysis of Raman Amplifiers for Long-haul transmission,” **OFC’98 Technical Digest**, article TuG, p. 30 – 31, 1998.

SAITO L. A. M., TAVEIRA, P. D., GAARDE, P. B., DESOUZA, K., DESOUZA, E. A., “Multi-Pump Discrete Raman Amplifier for CWDM System in the O-Band,” **Optical Fiber Technology**, Elsevier, p. 1 – 5, 2008.

STOLEN R. H., IPPEN E. P., “Raman Gain in Glass Optical Waveguides,” **Applied Physics Letters**, v. 22, no. 6, p. 276 – 278, 1973.

SPERTI D., ANDRÉ P. S., NETO B., ROCHA A. M., BONONI A., ROCHA F., FACÃO M., “Experimental Assessment of Some Raman Fiber Amplifiers Solutions for Coarse Wavelength Division Multiplexing Applications,” Vol. 16, p. 195 – 202, **Photonic Network Communications**, 2008.

TIWARI U., RAJAN K., THYAGARAJAN K., “Multichannel Gain and Noise Figure evaluation of Raman/EDFA Hybrid Amplifiers,” **Optics Communications**, no. 281, p. 1593 – 1597, 2008.

TIWARI U., THYAGARAJAN K., SHENOY M. R., “Simulation and Experimental Characterization of Raman/EDFA Hybrid Amplifier with Enhanced Performance,” **Optics Communications**, no. 282, p. 1563 – 1566, 2009.

ZHOU, J., CHEN, J., LI, X., JIANG, W., WANG, Y., “A Novel Pump Adjustments Method for WDM Pumped Optical Raman Amplifier,” **Optics Communications**, v. 248, p. 407 – 413, 2005.

OptiSystem 7.0, Reference Manual, Canadá, 2009.