



**Nara Elisa de Freitas
Silva Ângelo**

Amplificadores óticos híbridos de bomba única



**Nara Elisa de Freitas
Silva Ângelo**

Amplificadores óticos híbridos de bomba única

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Física, realizada sob a orientação científica do Doutor Rogério Nunes Nogueira, Investigador Auxiliar do Instituto de Telecomunicações e Professor Coordenador no Instituto Politécnico de Saúde do Norte, e Doutora Berta Neto, investigadora da Nokia Siemens Networks.

o júri

presidente

Prof.^a Doutora Teresa Maria Fernandes Rodrigues Cabral
Professora Associada com Agregação, Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Rogério Nunes Nogueira
Investigador Auxiliar do Instituto de Telecomunicações e Professor Coordenador no Instituto Politécnico de Saúde do Norte

Doutora Berta Neto
Investigadora, Nokia Siemens Networks

Doutora Natasa Pavlovic
Investigadora, Nokia Siemens Networks

agradecimentos

Gostaria de agradecer, em primeiro lugar, ao meu orientador, o Prof. Doutor Rogério Nogueira, pela oportunidade que me deu de desenvolver a dissertação na área das comunicações óticas, pela sua disponibilidade, orientação e palavras de ânimo nos momentos mais difíceis, e à minha coorientadora, a Doutora Berta Neto, pelas sugestões dadas ao longo do trabalho e colaboração na revisão deste documento.

Um agradecimento especial à Doutora Ana Rocha, pelo apoio no ambiente laboratorial, acompanhamento de todo o trabalho e processo de revisão deste documento, pela simpatia, disponibilidade e profissionalismo.

Ao Instituto de Telecomunicações onde dispus de todas as condições e material para a realização do trabalho aqui apresentado.

A todos os elementos do grupo de comunicações óticas que de uma forma ou outra contribuíram para a minha boa integração e desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus pais, que sempre me apoiaram ao longo de todo o processo que culminou na escrita da presente dissertação.

Gostaria ainda de agradecer aos meus familiares, colegas e amigos, em especial ao Paulo, ao Daniel e ao Dércio, pelo apoio e compreensão.

palavras-chave

Amplificadores óticos híbridos, Amplificadores de fibra dopada com érbio, Amplificadores de Raman em fibra, Ganho, Figura de ruído, Relação sinal-ruído ótica.

resumo

O presente trabalho consiste num estudo preliminar sobre a possibilidade de desenvolvimento de um amplificador ótico híbrido, composto por um amplificador de fibra dopada com érbio e um amplificador de Raman em fibra, bombeado por uma única fonte, o que poderá potenciar eventuais reduções de custos, quando comparado com amplificadores híbridos equivalentes de duas bombas.

Os amplificadores de fibra dopada com érbio e de Raman são caracterizados individualmente. Para o amplificador híbrido, são consideradas duas configurações distintas, com o amplificador de Raman a anteceder o estágio de amplificação na fibra dopada, e vice-versa, ambas com bombeamento copropagante a 1480 nm. A primeira configuração revela valores de ganho mais elevados, enquanto a segunda apresenta vantagens do ponto de vista de equalização do ganho e figura de ruído. A eventual aplicação destes amplificadores em sistemas de comunicações óticas é discutida.

keywords

Hybrid optical amplifiers, Erbium doped fiber amplifiers, Raman fiber amplifiers, Gain, Noise Figure, Optical signal-to-noise ratio.

abstract

This work is a preliminary study about the possibility of developing an optical hybrid amplifier, composed of an erbium-doped fibre amplifier and a Raman fibre amplifier, pumped by a unique source, which may potentially reduce costs when compared to equivalent hybrid two-pumped amplifiers.

Erbium doped fibre amplifiers and Raman amplifiers are individually described. For the hybrid amplifier, two different configurations are considered, one with the Raman amplifier preceding the amplification stage of the doped fibre and the other vice versa, both with a co propagating pumping of 1480 nm. The first configuration reveals higher gain values, whereas the second one presents some advantages from the points of view of gain equalization and noise figure. The possible use of these amplifiers in optical communications systems is discussed.

Índice

o júri	
agradecimentos	
resumo	
abstract	
glossário de acrónimos	
lista de símbolos e constantes	
Capítulo 1-Introdução.....	1
1.1 Enquadramento e motivação.....	1
1.2 Objetivos	6
1.3 Estrutura da dissertação	7
Capítulo 2-Amplificadores de fibra dopada com érbio	9
2.1 Princípios de funcionamento	9
2.2 Caracterização	13
Capítulo 3-Amplificadores de Raman em fibra	23
3.1 Princípios de funcionamento	23
3.2 Caracterização	26
Capítulo 4-Amplificadores híbridos EDFA/RFA.....	35
4.1 Caracterização	35
4.1.1 Configuração RFA-EDFA	36
4.1.2 Configuração EDFA-RFA	39
4.1.3 Comparação entre configurações RFA-EDFA e EDFA-RFA.....	43
Capítulo 5-Considerações finais	45
5.1 Conclusões.....	45
5.2 Sugestões para trabalho futuro	46
Referências bibliográficas	

Glossário de acrónimos

ASE	Amplified Spontaneous Emission	Emissão espontânea amplificada
BPF	Band-pass filter	Filtro passa-banda
CIR	Circulator	Circulador
DM	Dichroic Mirror	Espelho dicróico
ECL	External Laser Cavity	Laser de cavidade externa
EDF	Erbium Doped Fiber	Fibra dopada com érbio
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier	Amplificador de fibra dopada com érbio
FC	Fiber Coupler	Acoplador de fibra
FWM	Four Wave Mixing	Mistura de quatro ondas
HA	Hybrid Amplifier	Amplificador híbrido
NA	Numerical Aperture	Abertura numérica
NF	Noise Figure	Figura de ruído
OSA	Optical Spectrum Analyzer	Analisador de espectros ótico
OSNR	Optical Signal-to-Noise Ratio	Razão sinal-ruído ótica
RFA	Raman Fiber Amplifier	Amplificador de Raman em fibra
RIN	Relative Intensity Noise	Intensidade relativa do ruído
SMF	Single Mode Fiber	Fibra padrão monomodo
SRB	Single Rayleigh Backscattering	Espalhamento contrapropagante de Rayleigh
SRS	Stimulated Raman Scattering	Espalhamento de Raman estimulado
WDM	Wavelength-Division Multiplexing	Multiplexagem no comprimento de onda

Lista de símbolos e constantes

A_{ef}	Área efetiva
b_{ref}	Referência da largura de banda ótica
b_{res}	Resolução do instrumento de medida
C_r	Ganho de Raman na fibra
G	Ganho da potência do sinal de transmissão
g^*	Coefficiente de ganho
g_r	Coefficiente de Ganho de Raman
$G_{on/off}$	Ganho da potência on/off
h	Constante de Plank
k	Fator de Polarização
L	Comprimento da fibra
N_T	Densidade populacional total dos níveis de energia
N_1	Densidade populacional do estado fundamental
N_2	Densidade populacional do primeiro estado excitado
P_{ASE}	Potência da ASE
P_s	Potência do sinal
P_s^{in}	Potência do sinal de entrada
P_s^{out}	Potência do sinal de saída
$(P_s^{out})_{on}$	Potência do sinal de saída com a bomba ligada
$(P_s^{out})_{off}$	Potência do sinal de saída com a bomba desligada
P_b	Potência da bomba
r_d	Raio da região dopada do núcleo
r_n	Raio do núcleo
V	Frequência normalizada da fibra
w	Modo fundamental
α^*	Coefficiente de absorção
α_{pico}	Pico de absorção
α_t	Coefficiente de perdas nas fibras
Γ	Fator de sobreposição
$\Delta\nu$	Largura espectral
λ_c	Comprimento de onda de corte

ν	Frequência do sinal
σ_a	Secção eficaz de absorção
σ_e	Secção eficaz de emissão

CAPÍTULO 1

Introdução

1.1 Enquadramento e motivação

Desde os finais do século XX, o aumento do tráfego de dados, nomeadamente na Internet, conduziu à necessidade do crescimento da capacidade dos sistemas de telecomunicações.

O conceito do sistema de transmissão por multiplexagem no comprimento de onda, conhecido por WDM, acrónimo para a sua designação em inglês (*Wavelength Division Multiplexing*), surgiu em 1970 [DeLange70], mas os sistemas baseados nesta tecnologia começaram a ser comercializados, apenas, por volta de 1995 [Agrawal02]. Este sistema substitui múltiplas fibras monocal por uma única fibra, em que cada canal é associado a uma determinada frequência, o que possibilita a propagação de vários canais na mesma fibra. Desta forma é possível aproveitar toda a largura de banda que a fibra ótica dispõe.

A distância de transmissão, em qualquer sistema de comunicações baseado em fibra ótica, está condicionada pela atenuação do sinal ótico. Esta atenuação pode ser provocada pela absorção parcial da radiação devido a defeitos estruturais ou impurezas presentes na fibra, perdas de radiação devido a curvaturas ou micro deformações na fibra ótica ou efeitos não lineares como o espalhamento de Brillouin e Raman e efeito Kerr. As limitações impostas pela atenuação foram inicialmente ultrapassadas com o uso de repetidores optoelectrónicos. Com estes dispositivos, o sinal ótico é inicialmente convertido para corrente eléctrica, regenerado, e novamente transformado para o domínio ótico. Estes permitem a regeneração total dos sinais, onde, para além, de se amplificar o nível de potência, se regenera também, a forma e posição relativa dos impulsos dentro do intervalo temporal atribuído aos mesmos. Contudo, os repetidores optoelectrónicos são projetados para operarem a um ritmo de transmissão específico, não permitindo a sua alteração posterior. Além disso, os sistemas WDM requerem um repetidor dedicado a cada canal, o que confere custos elevados e torna os sistemas demasiado complexos.

Os sistemas limitados apenas pela atenuação requerem apenas a amplificação do nível de potência dos impulsos e a amplificação ótica permite amplificar a potência de todos os canais em simultâneo. De facto, a implementação de amplificadores óticos veio suportar e tornar viável a tecnologia WDM.

Um amplificador WDM deve apresentar algumas características, tais como: operar em grandes larguras de banda, permitir sinais de saída com potências elevadas, proporcionar ganho equalizado para todos os canais e com baixo ruído, prevenir a diafonia, ter ganho controlável, ser eficiente no uso de energia e ter baixo custo de produção.

De entre os amplificadores óticos existentes, destacam-se os amplificadores em fibra dopada com érbio, e os amplificadores de Raman em fibra ótica, designados, respetivamente, por EDFAs e RFAs, dos seus acrónimos em inglês *Erbium Doped Fiber Amplifier* e *Raman Fiber Amplifier*.

A amplificação de Raman em fibras óticas foi demonstrada pela primeira vez por Stolen e Ippen no princípio dos anos 70 do século XX [Stolen72] e em meados da década seguinte os RFAs eram já considerados uma tecnologia promissora. No entanto, como os RFAs requerem potências de bombeamento na ordem das dezenas de mW por dB de ganho [Bromage04], a escassez de fontes de bombeamento a emitir com elevada potência ótica e o surpreendente desenvolvimento e aplicação dos EDFAs nos sistemas de telecomunicações óticas, fizeram com que os RFAs ficassem por mais algum tempo restritos ao laboratório.

Quando comparados com os RFAs, os EDFAs são mais eficientes, necessitando apenas de décimos de mW de potência de bombeamento por dB de ganho [Bromage04]. Além disso, estes amplificadores são compactos e de baixo custo e destacaram-se dos restantes amplificadores de fibra dopada, por apresentarem ganhos elevados entre 1530 e 1570 nm (banda C), janela tipicamente mais utilizada nas comunicações óticas por coincidir com a região espectral onde as fibras de sílica apresentam menor atenuação [Desurvire94].

Utilizar SiO₂, o mesmo material constituinte das fibras monomodo usadas nas linhas de transmissão óticas, como meio hospedeiro dos iões de érbio, proporciona uma boa compatibilidade com componentes comuns de fibra ótica, através de acoplamento simples por fusão ou conectores. No entanto, é importante ter em consideração a atenuação que ocorre na junção entre uma fibra dopada com érbio (EDF) e uma fibra monomodo tipicamente utilizada nos sistemas de comunicações óticas. Esta atenuação deve-se a perdas de inserção que ocorrem principalmente devido à diferença entre o raio do núcleo da EDF (~2,6 µm) e o raio do núcleo da fibra monomodo (~5,2 µm).

Os primeiros EDFAs comercialmente disponíveis para sistemas WDM surgiram, de forma generalizada, em 1995 [Sun99]. Também por esta altura, o desenvolvimento de bombas adequadas para amplificação de Raman renovou o interesse nos RFAs e foram demonstradas vantagens destes amplificadores em relação aos EDFAs, em particular quando a fibra de transmissão era, ela própria, o meio de amplificação [Bromage04]. Além disso, os RFAs podem ser usados para obter ganho em qualquer banda de frequências, dependendo apenas do comprimento de onda da bomba.

Com o atual aumento de informação transmitida, a banda C está a atingir a saturação, sendo, por isso, necessário recorrer a uma maior largura de banda, expandindo a transmissão de informação, por exemplo, para a banda L, localizada entre 1570 e 1610 nm. Desta forma, os amplificadores óticos devem cobrir as bandas C+L.

Para isso, existem várias opções. O amplificador de Raman, como comentado anteriormente, permite amplificação em qualquer banda. Contudo, para a banda C, o EDFA continua a ser o eleito devido ao seu custo, à pouca influência dos efeitos não lineares, maturidade e divulgação. É também possível deslocar o ganho do EDFA para a banda L [Chung99, Yucel11], contudo, para esta banda o amplificador de Raman revela um melhor desempenho, com uma figura de ruído mais reduzida [Liaw06].

Desta forma, surge um novo *design* que pretende estender o espectro do ganho para as bandas C+L, com bom desempenho e um preço acessível: o amplificador híbrido EDFA/RFA, que utiliza o EDFA e o RFA, para amplificação, respetivamente, nas bandas C e L.

Os amplificadores óticos podem ter diferentes aplicações nos sistemas de comunicações óticas, como ilustrado na figura 1.1. A aplicação mais importante, nos sistemas de longa distância, consiste no uso dos amplificadores em linha, que substituem os repetidores optoelectrónicos. Podem ser utilizados vários destes amplificadores em cadeia, desde que o desempenho do sistema não esteja limitado pela acumulação de efeitos de dispersão, não linearidades da fibra e ruído do amplificador [Agrawal02].

Outra forma de usar os amplificadores óticos é colocá-los logo a seguir ao transmissor, de forma a aumentar a potência do sinal de transmissão. Estes amplificadores são denominados de pós-amplificadores, mais conhecidos pela sua designação em inglês *booster amplifiers*, e podem aumentar a distância de transmissão em 100 km, ou mais, dependendo do ganho do amplificador e das perdas da fibra [Agrawal02]. Também é possível aumentar a distância de transmissão, utilizando um pré-amplificador colocado logo atrás do recetor. Estes são muitas vezes utilizados para aumentar a sensibilidade do recetor. Os amplificadores podem ainda ser utilizados, por exemplo, para compensar perdas de distribuição em redes locais de acesso [Shimada94].

Consoante a aplicação do amplificador no sistema ótico, as características que lhe são exigidas também são diferentes. Um pós-amplificador necessita de uma elevada potência de saturação à saída (potência para a qual o ganho diminui 3 dB), evitando assim uma diminuição acentuada do ganho ou deterioração das características de transmissão do sinal logo no início do sistema [Shimada94]. Por outro lado, para os pré-amplificadores, a elevada potência de saturação à saída não é importante, sendo, no entanto, essencial ter um ganho elevado, baixo ruído, ser independente da polarização e exibir poucas perdas de inserção. Para os amplificadores em linha, todas as características atrás referidas são importantes, no entanto, para os amplificadores que compensam as perdas na distribuição dos sinais, destaca-se a relevância do ganho elevado e elevada potência de saturação à saída [Shimada94].

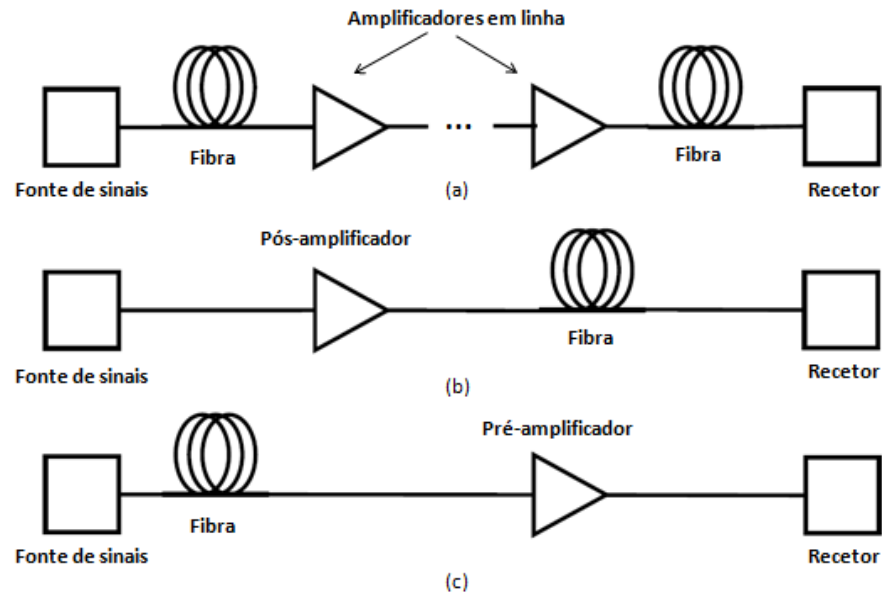


Figura 1.1 – Três aplicações para amplificadores óticos em sistemas óticos: (a) como amplificadores em linha; (b) como impulsionador da potência de transmissão; (c) como pré-amplificador do recetor. Baseado em [Agrawal02].

Um dos primeiros amplificadores híbridos EDFA/RFA, reportado em 1997 [Masuda97], representado na figura 1.2, consistia num estágio de amplificação de Raman distribuído contrapropagado, numa fibra de dispersão deslocada, e dois estágios de amplificação EDFA, intercalados por um equalizador de ganho. Este revelou um ganho máximo de 18 dB, com variação entre os valores mínimo e máximo de 3 dB, numa largura de banda de 65 nm (1549 – 1614 nm).

Após o primeiro, muitos amplificadores híbridos surgiram na literatura, discutindo-se diferentes configurações e desempenhos [Masuda00, Radic02, Tiwari09].

Em [Masuda00] apresentam-se quatro configurações, com maior destaque para as quais o esquema se encontra na figura 1.3. A configuração do amplificador do tipo I, distingue-se do apresentado na figura 1.2, por ter apenas um estágio de EDFA. O ganho obtido para este amplificador excedeu os 20 dB, com oscilação de 3 dB, numa largura de banda de 82,8 nm, abrangendo as bandas C e L. O amplificador do tipo II, que consiste num EDFA e dois estágios de amplificação discretos de Raman, apresentou valores de ganho que ultrapassaram os 25 dB, com oscilação de 3 dB, ao longo de uma largura de banda de 80,0 nm.

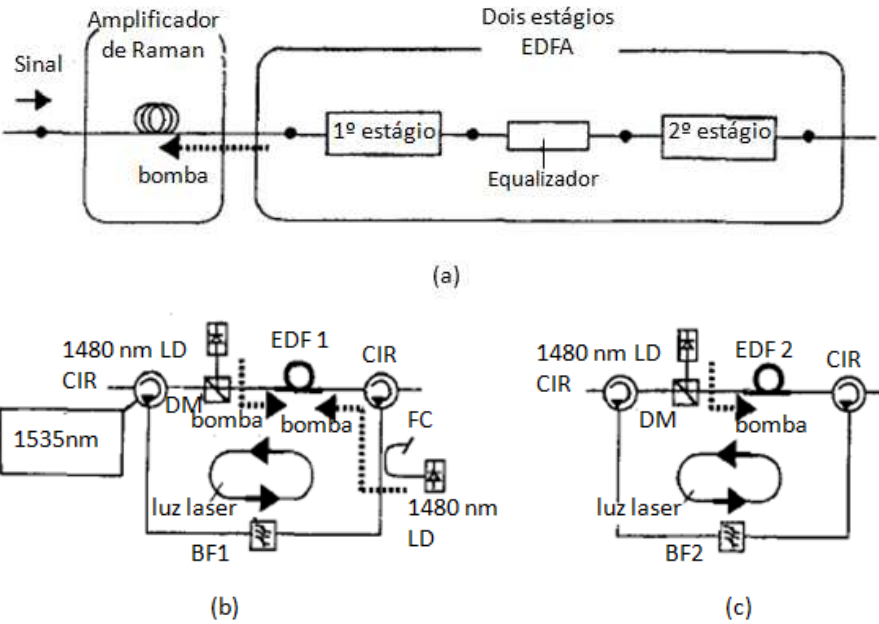


Figura 1.2 – Esquema da montagem do amplificador híbrido reportado em [Masuda97]: (a) Configuração do amplificador; (b) primeiro estágio EDFA; (c) segundo estágio EDFA. CIR: circulador; DM: espelho dicróico; FC: acoplador de fibra; BPF: filtro passa banda.

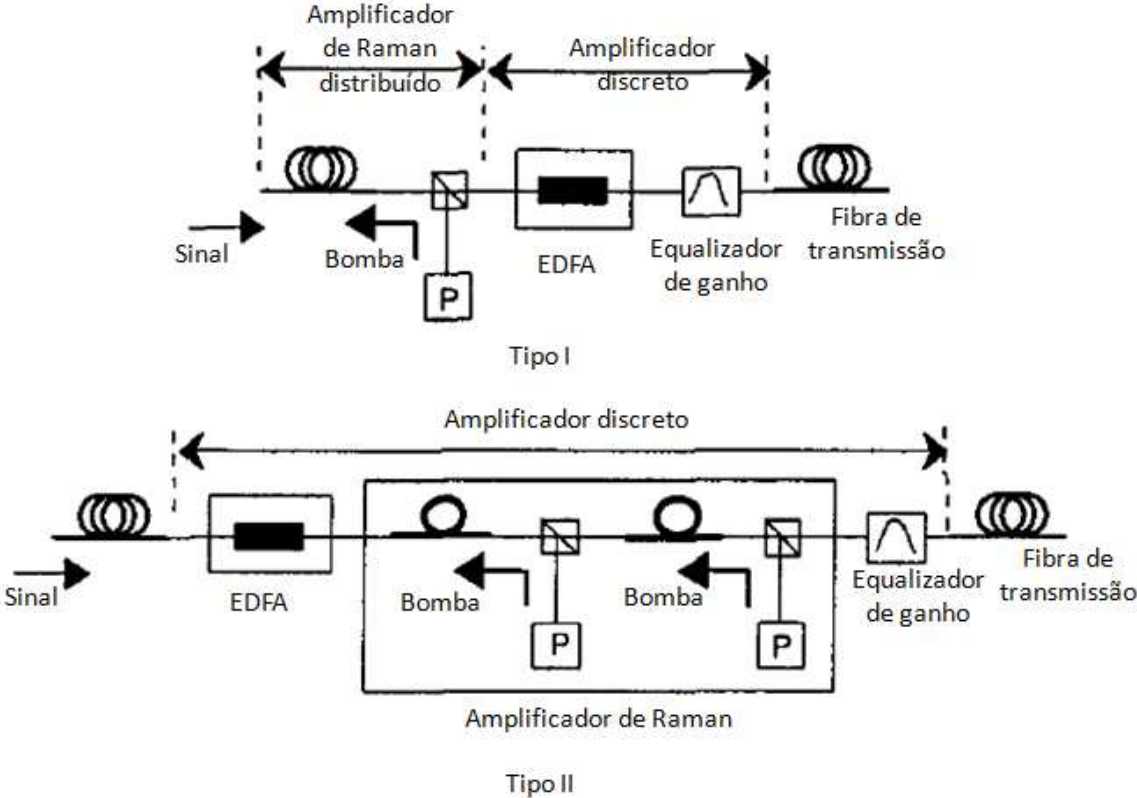


Figura 1.3 – Esquemas para amplificadores híbridos com configurações distintas: Tipo I e Tipo II [Masuda00]

A maior parte dos amplificadores híbridos EDFA/RFA utilizam mais do que uma fonte de bombeamento, por vezes em diferentes comprimentos de onda. No entanto, encontram-se também referências a amplificadores que partilham a mesma fonte de bombeamento entre os estágios de amplificação EDFA/RFA, e que procuram a otimização do rácio em que é feita a distribuição inicial da potência da bomba pelos dois amplificadores [Liaw06, Liaw09].

As principais vantagens dos amplificadores híbridos relacionam-se com o aumento da eficiência de bombeamento e possibilidade de equalização do ganho numa elevada largura de banda, com melhor desempenho do que os amplificadores baseados apenas no efeito de Raman.

Também têm sido estudadas diversas aplicações dos amplificadores híbridos. Exemplo disso é um amplificador híbrido bidirecional, com apenas uma fonte de bombeamento, aplicado teoricamente a uma rede de área local para transmissão bidirecional [Guo11]. Em [Healy07] a amplificação híbrida EDFA/RFA foi aplicada na transmissão de um sinal coerente de 280 Gbit/s, a mais de 1200 km. Os resultados apresentados em [Pizzinat03] indicam que os amplificadores híbridos EDFA/RFA contribuem para melhorar a compensação de perdas em sistemas de comunicações WDM de elevada taxa de fluxo de dados.

Tendo em conta as potenciais aplicações dos amplificadores híbridos EDFA/RFA nos sistemas de comunicações óticas, e as vantagens daí adjacentes, torna-se relevante o seu estudo e otimização. Por essa razão, na presente dissertação será apresentada a caracterização de amplificadores híbridos de bomba única, que poderão potenciar redução de custos quando comparados com amplificadores semelhantes mas com diversas fontes de bombeamento.

1.2 Objetivos

O presente trabalho apresenta-se como um estudo preliminar para o desenvolvimento de um amplificador híbrido EDFA/RFA para a banda C+L, bombeado por uma única fonte ótica, o que poderá potenciar eventuais reduções de custos, quando comparado com amplificadores híbridos equivalentes de duas ou mais bombas.

Pretende analisar-se individualmente os amplificadores EDFA e RFA, de forma a estudar o seu comportamento, e efetuar ajustes aos parâmetros utilizados na simulação, que são posteriormente utilizados no estudo do amplificador híbrido.

Estabeleceu-se que o amplificador híbrido a ser otimizado apresentaria um estágio de EDFA e outro de amplificação de Raman distribuído. Foram estudadas diferentes configurações e otimizados os comprimentos das fibras, para valores fixos das potências da bomba e sinais à entrada.

Pretende descrever-se qual a melhor configuração e as suas características, e em última análise concluir-se sobre a possibilidade de aplicação de amplificadores desta tipologia.

1.3 Estrutura da dissertação

A presente dissertação encontra-se estruturada em cinco capítulos, onde serão estudados diferentes aspetos relevantes para o desenvolvimento de um amplificador híbrido EDFA/RFA.

Neste primeiro capítulo, o trabalho é enquadrado no estado da arte, são apresentadas as motivações e os objetivos, e é descrita a estrutura da dissertação.

No capítulo dois são apresentados os princípios fundamentais de funcionamento do EDFA, bem como a sua caracterização com base em resultados experimentais e numéricos, através dos quais é possível aferir sobre a influência de diversos parâmetros no desempenho do amplificador. No capítulo três, o mesmo é feito para o RFA.

O capítulo quatro é dedicado ao estudo, experimental e numérico, do amplificador híbrido. A otimização deste amplificador, com base em alguns parâmetros pré-definidos, é também efetuada.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões do trabalho realizado, bem como algumas sugestões para desenvolvimento de trabalho futuro.

CAPÍTULO 2

Amplificadores de fibra dopada com érbio

Na secção 2.1 deste capítulo, é feita uma breve descrição da estrutura e princípios de funcionamento dos EDFAs, cujas características são discutidas na secção 2.2, com base nos estudos, numérico e experimental, efetuados. Pretende analisar-se a influência de parâmetros, como as potências de bombeamento e dos sinais à entrada, ou o comprimento da fibra dopada no desempenho dos EDFAs, em particular, em termos de ganho e de ruído.

2.1 Princípios de funcionamento

A configuração eletrónica do elemento érbio é dada por $[Xe] 6s^2 4f^{12}$, onde $[Xe]$ representa a configuração do átomo de xénon que inclui as subcamadas preenchidas 5s e 5p. A ionização do elemento érbio, bem como tipicamente para os restantes elementos terras raras, ocorre para formar um estado trivalente, em que são removidos dois eletrões da camada 6s e um eletrão da camada 4f, mantendo intactas as camadas externas 5s e 5p. Desta forma os eletrões da camada 4f ficam parcialmente blindados de perturbações de potenciais externos e por consequência as transições 4f-4f são pouco afetadas por campos elétricos externos [Bjarklev93].

Nos EDFAs os sinais são amplificados pelo processo da emissão estimulada. O sinal de bombeamento fornece energia ao sistema, permitindo a transição de iões do estado fundamental para estados excitados, promovendo a inversão da população. Quando os fotões do sinal de transmissão incidem no meio, provocam o decaimento de iões para o estado fundamental, processo que é acompanhado pela emissão de fotões caracterizados pela mesma fase, direção, frequência e polarização dos fotões incidentes. Este fenómeno repete-se sucessivamente ao longo da fibra, aumentando desta forma a potência do sinal de transmissão.

Para além da emissão estimulada, há também ocorrência de emissão espontânea na fibra. Como explicado anteriormente, o sinal de bombeamento potencia a excitação dos iões Er^{3+} . Numa fibra ótica de sílica os iões Er^{3+} têm um tempo médio de vida no estado excitado, findo o qual os iões decaem espontaneamente para o estado fundamental sem que exista interação de um fotão exterior. Os fotões resultantes da emissão espontânea não apresentam características de coerência com os fotões do sinal que se pretende amplificar, e ao serem propagados e amplificados em simultâneo com o sinal de transmissão dão origem ao fenómeno designado por emissão espontânea

amplificada, ou ASE, do seu acrónimo em inglês (*Amplified Spontaneous Emission*), que é a principal causa de ruído nos EDFAs [Agrawal02].

Para que o EDFA seja viável, é necessário que existam bombas, cuja energia do sinal de bombeamento coincida com as bandas de absorção do ião Er^{3+} na fibra, o que corresponde a sinais de bombeamento com comprimentos de onda à volta de 520, 590, 660, 800, 980 e 1480 nm [Bjarklev93]. As fontes mais comuns são os lasers semicondutores com emissão nos comprimentos de onda de 980 e 1480 nm [Shimada94] por serem compactas e proporcionarem elevada eficiência de amplificação, isto é, relação entre o ganho obtido e a potência da bomba.

Estudos espectroscópicos indicam que, à temperatura ambiente, os iões Er^{3+} podem ser interpretados como um sistema de três níveis [Shimada94]. A figura 2.1 mostra um diagrama parcial dos níveis de energia, e transições entre níveis, dos iões Er^{3+} numa fibra de SiO_2 [Bjarklev93]. Os níveis representados têm uma largura energética elevada, devido ao desdobramento provocado pela ação do campo cristalino em trono dos iões Er^{3+} , denominado efeito de Stark. No entanto a descrição como um sistema de três níveis é adequada devido ao efeito de termalização entre os subníveis de energia que mantem a população constante no interior dos níveis, permitindo considerar, por simplificação, cada um deles como um único nível de energia.

Independentemente do comprimento de onda de bombeamento, a inversão da população ocorre entre o nível $^4I_{13/2}$ que apresenta o tempo de vida mais elevado, tipicamente da ordem dos milissegundos, e o nível fundamental. Os eletrões presentes no nível $^4I_{13/2}$ decaem radiativamente para o estado $^4I_{15/2}$, emitindo fotões na região espectral da banda C [Shimada94].

A transição de eletrões do estado fundamental para o nível $^4I_{13/2}$ pode ocorrer direta ou indiretamente, respetivamente através de bombeamento a 1480 nm ou 980 nm, como representado na figura 2.1. A utilização de um sinal de bombeamento com comprimento de onda de 1480 nm permite um bombeamento direto para o estado superior do nível $^4I_{13/2}$, ocorrendo de seguida uma rápida termalização para os níveis energéticos inferiores, a partir dos quais se dá o decaimento para o nível $^4I_{15/2}$. Quando utilizado o bombeamento de 980 nm, os eletrões transitam do estado fundamental para o nível $^4I_{11/2}$ e posteriormente decaem não radiativamente, num curto intervalo de tempo ($\approx 7 \mu\text{s}$), para o nível $^4I_{13/2}$, a partir do qual se dá o decaimento radiativo para o nível $^4I_{15/2}$.

O ganho de um EDFA depende de diversos parâmetros, tais como: a concentração de iões de érbio, N_T , o comprimento da fibra dopada, L , o raio do núcleo, r_n , o raio da região dopada, que corresponde à zona do núcleo da fibra onde se encontram concentrados os iões de Érbio, r_d , a potência de bombeamento P_b , a potência dos sinais, P_s , e os coeficientes de absorção e ganho, respetivamente α^* e g^* . O ganho, G , é dado por [Agrawal02]:

$$G = \Gamma \exp\left[\int_0^L \exp(\sigma_e N_2 - \sigma_a N_1) dz\right] \quad 2.1$$

onde N_1 e N_2 são, respetivamente, as densidades populacionais dos níveis de energia ${}^4I_{15/2}$ e ${}^4I_{13/2}$, identificados na figura 2.1, Γ é o fator de sobreposição, σ_a e σ_e são, respetivamente, as secções eficazes de absorção e emissão.

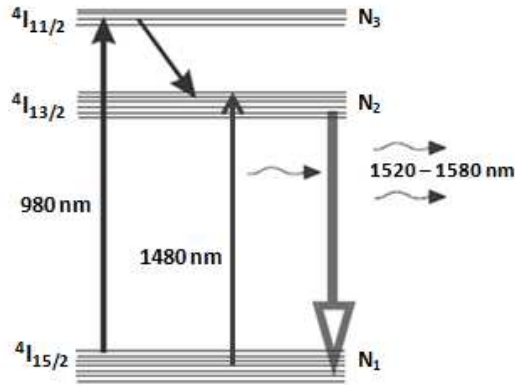


Figura 2.1 – Diagrama parcial dos níveis de energia, e transições entre níveis, dos íões de Er^{3+} numa fibra de SiO_2 . Baseado em [Shimada94].

O fator de sobreposição, que representa a sobreposição entre a região dopada pelos íões Er^{3+} e o modo fundamental de propagação do sinal ótico de transmissão na fibra, pode ser calculado por [Hapanowicz01]:

$$\Gamma = 1 - e^{-2r_d^2/w^2} \quad 2.2$$

onde w é o raio do modo fundamental.

As secções eficazes de absorção (σ_a) e emissão (σ_e) podem ser calculadas, respetivamente, pelas seguintes formas [Vasile07]:

$$\sigma_a = \frac{\alpha^*}{N_T \times \Gamma} \quad 2.3$$

$$\sigma_e = \frac{g^*}{N_T \times \Gamma} \quad 2.4$$

Experimentalmente, o ganho pode ainda ser obtido pela razão entre potências de saída, P_s^{out} , e entrada do sinal, P_s^{in} , no amplificador:

$$G = \frac{P_s^{out}}{P_s^{in}} \quad 2.5$$

A figura de ruído, NF, que quantifica o impacto do ruído num EDFA, depende do ganho, G , da potência da emissão espontânea amplificada, P_{ASE} , da frequência do sinal, ν , e da largura de banda à volta do sinal em causa, $\Delta\nu$, e é determinada pela expressão [Bjarklev93]:

$$NF = \frac{1}{G} \cdot \left(\frac{P_{ASE}}{\Delta\nu \cdot h \cdot \nu} + 1 \right) \quad 2.6$$

onde h é a constante de Plank. Foi demonstrado que o limite quântico, para o mínimo, da NF, obtido para ganhos muito elevados, é de 2 ou 3 dB [Desurvire02].

Outro parâmetro muito utilizado para avaliar o desempenho de amplificadores óticos, eliminando a influência do recetor, é a relação sinal-ruído ótica (OSNR). Esta relação é dada pela razão entre a potência do pico do sinal, P_s^{out} , e a potência da ASE, à saída do amplificador, dada pelo valor do nível de ruído na zona espectral do pico do sinal, numa dada largura de banda [Gariépy09]:

$$OSNR = \frac{P_s^{out}}{P_{ASE}} + \frac{b_{res}}{b_{ref}} \quad 2.7$$

onde b_{ref} é a referência de largura de banda ótica, tipicamente definida como 0,1 nm, e b_{res} corresponde à resolução do instrumento de medida.

Para o cenário em que o sinal é modulado com uma elevada taxa de transmissão, a potência do pico do sinal é menor que a potência integrada neste pico, pelo que a OSNR se obtém pela razão entre a potência integrada do sinal e a potência da ASE.

Em termos da montagem de um EDFA, existem três configurações básicas para o bombeamento, que podem ser observadas na figura 2.2: copropagante, contrapropagante e bidirecional. As denominações estão de acordo com os sentidos relativos de propagação do sinal e da bomba. Na configuração copropagante, o sinal de transmissão e de bombeamento percorrem a fibra no mesmo sentido, enquanto na montagem contrapropagante, a bomba é inserida no sentido contrário à propagação do sinal. A montagem bidirecional utiliza duas bombas inseridas em sentidos contrários.

Na secção 2.2 podem observar-se as implicações das diferentes configurações no desempenho dos amplificadores.

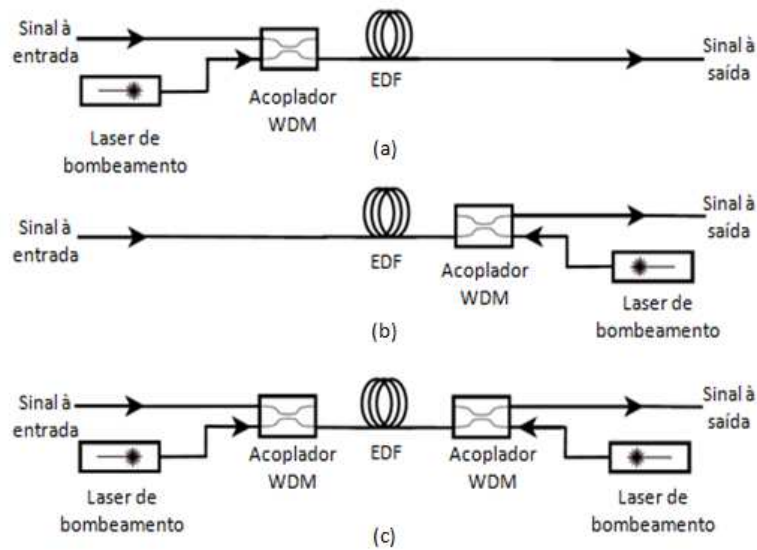


Figura 2.2 – Configurações básicas para o bombeamento dos EDFAs: (a) copropagante, (b) contrapropagante e (c) bidirecional. Os filtros e isoladores foram suprimidos da figura, apenas por simplificação do esquema.

2.2 Caracterização

Nesta secção, apresenta-se a caracterização experimental e numérica de um EDFA baseado numa fibra MetroGain™ EDF M-3 (1480/125) da Fibercore, cujos parâmetros se encontram na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Parâmetros da fibra EDF utilizada experimentalmente (M-3 (1480/125) Fibercore)

Absorção @ 1480 nm		3,45 dB / m
Pico de absorção (1530 nm)	α_{pico}	9,5 dB / m
Atenuação @ 1240 nm		5,8 dB / m
Comprimento de onda de corte	λ_c	1300 nm
Diâmetro do modo	w	5,2 μm
Abertura numérica	NA	0,24
Densidade de iões	N_T	$6,4 \times 10^{24} m^{-3}$

A montagem experimental do EDFA copropagante está ilustrada na figura 2.3. A fonte de sinais utilizada foi o laser semiconductor de cavidade externa, tipicamente designado por ECL do seu acrónimo em inglês (*external cavity laser*), OSICS-ECL 1600 da Photonetics. A fonte de bombeamento foi a FOL1402PLF-617-1480 da Fitel Technologies, com o pico de emissão a 1480 nm (202,56 THz). O acoplador WDM colocado antes da fibra foi o FWDM-1480/1550-1-2-NE-10W da Optinet, e o acoplador WDM colocado após

a fibra foi o WD1414-LW57NJ1 da JDSU Uniphase. O analisador de espectros óticos (OSA) utilizado foi o Advantest Q8384, com resolução de 0,1 nm.

Por limitação de equipamento não foi possível efetuar a caracterização experimental do EDFA para um cenário multicanal, optando-se, por isso, por enviar o sinal canal a canal com diferentes frequências. Esta caracterização permite averiguar algumas características do amplificador e validar o modelo numérico, que será utilizado num estudo posterior. No entanto, deverão registar-se valores de potência dos sinais à saída mais elevados, do que aqueles que seriam obtidos num cenário multicanal. Esta diferença verifica-se porque ao utilizar um sinal bombeamento com as mesmas características, o número de iões excitados para potenciar emissão estimulada será aproximadamente o mesmo nas duas situações. Assim, num cenário multicanal são propagados, em simultâneo, vários sinais com diferentes frequências, o que resulta na emissão de fotões com características correspondentes a cada sinal, enquanto no cenário monocanal o mesmo número de iões disponíveis contribui para a amplificação de um canal apenas, tendo este, por isso, um ganho mais elevado.

Na montagem experimental, foi utilizado um atenuador para controlar e igualar as potências dos diferentes sinais. O sinal a amplificar foi injetado, em conjunto com o sinal de bombeamento, na fibra dopada através de um acoplador. A potência de bombeamento excedente no final da EDF foi removida no filtro/acoplador, protegendo o OSA que, desta forma, recebe apenas o sinal amplificado. As perdas deste acoplador foram medidas ($\approx 0,47$ dB) e compensadas na potência dos sinais e ruído à saída. O isolador foi utilizado para proteger a fonte de sinais, de possíveis reflexões.

Experimentalmente foi estudada a influência da potência da bomba e do sinal no desempenho do EDFA. Foram utilizados 6 sinais com frequências distintas nas bandas C (191,04, 192,64 e 194,04 THz) e L (186,34, 187,84 e 189,44 THz), que correspondem aproximadamente aos comprimentos de onda nas bandas C (1569,27, 1557,04, 1545,00 nm) e L (1608,85, 1596,00, 1582,52 nm), e uma fibra dopada com 30 m de comprimento. Para o primeiro estudo utilizaram-se sinais com um valor de potência à entrada de -15 dBm e sinal de bombeamento com potência a variar entre 50 mW (≈ 17 dBm) e 225 mW ($\approx 23,52$ dBm). Para analisar o impacto da potência do sinal à entrada, esta foi variada entre -25 a 0 dBm e a potência de bombeamento fixada em 20 dBm. Todos os valores experimentais apresentados, e respetivas barras de erro, resultam da média de três medidas.

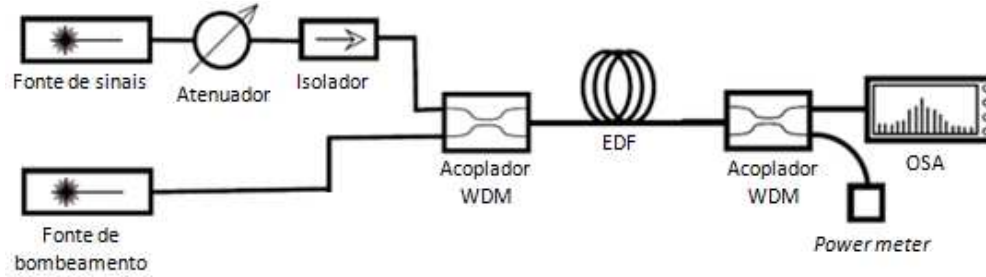


Figura 2.3 – Esquema da montagem experimental do EDFA copropagante.

Na figura 2.4 (a) pode observar-se que existe ganho em toda a largura de banda estudada, sendo este, como previsto, mais elevado na região da banda C. O decréscimo do ganho verificado para o sinal com frequência de 194,04 THz, ocorre porque, tendo em conta o comprimento da fibra, a potência do sinal à entrada e a potência de bombeamento consideradas, a inversão da população será menor do que aquela verificada num cenário em que todos os iões de érbio seriam excitados. De acordo com [Becker99], quando a inversão da população diminui, a diminuição do ganho na região dos 196 THz é mais acentuada do que na região dos 193 THz. Verifica-se também que o ganho, assim como a diferença entre os seus valores máximo e mínimo, geralmente designada por *ripple*, aumentam com o incremento da potência da bomba. Neste caso, para $P_b = 50$ mW, o ganho máximo é de, aproximadamente, 22,40 dB com um *ripple* de 11,15 dB, enquanto para $P_b = 200$ mW, o ganho máximo é de cerca de 30,52 dB e o *ripple* de 17,84 dB.

A evolução do ganho, com o aumento da potência de bombeamento, é mais evidente na figura 2.4 (b), onde se verifica, que o incremento da potência da bomba conduz ao aumento do ganho, até este estabilizar num determinado valor. O aumento do ganho deve-se ao acréscimo da população no estado excitado, que é maior, quanto mais elevada for a potência da bomba. No entanto, quando os iões de érbio estão no estado excitado em todo o comprimento da fibra, o aumento adicional da potência da bomba já não irá contribuir para o aumento da população deste estado e o ganho satura. Diferentes sinais saturam para diferentes potências de bombeamento, o que justifica o aumento do *ripple* verificado na figura 2.4 (a).

Com o aumento da potência de bombeamento, verifica-se também o aumento da figura de ruído e a diminuição da OSNR, comportamentos que se acentuam na região espectral em que o ganho é mais elevado. Contudo para 194 THz o ganho decresce, a figura de ruído aumenta e o OSNR diminui. A figura de ruído mínima registada para a potência de bombeamento de 50 mW é de 6,29 dB, enquanto a registada para a potência da bomba de 200 mW é de 6,48 dB. Por outro lado, os valores máximos da OSNR, registados para estas duas potências de bombeamento são, respetivamente, de 37,56 dB e 37,35 dB.

O ruído tem origem na emissão espontânea, que ocorre durante o processo de amplificação, mas também no ruído inicial, proveniente da fonte de bombeamento. Este ruído inicial é mais elevado na banda C, com valores à volta de -45 dBm, o que conduz ao aumento do ruído à saída, mais acentuado, nesta banda. O nível de ruído da fonte de bombeamento aumenta com o incremento da potência da bomba, e é amplificado em simultâneo com o sinal, o que justifica, quer o aumento da NF, quer a diminuição da OSNR, com o aumento da potência da bomba. A introdução de ruído inicial é uma limitação experimental, que poderá ser ultrapassada com a introdução de um filtro, que permita a transmissão no comprimento de onda do pico de potência da bomba (1480 nm), e filtre a potência na restante largura espectral.

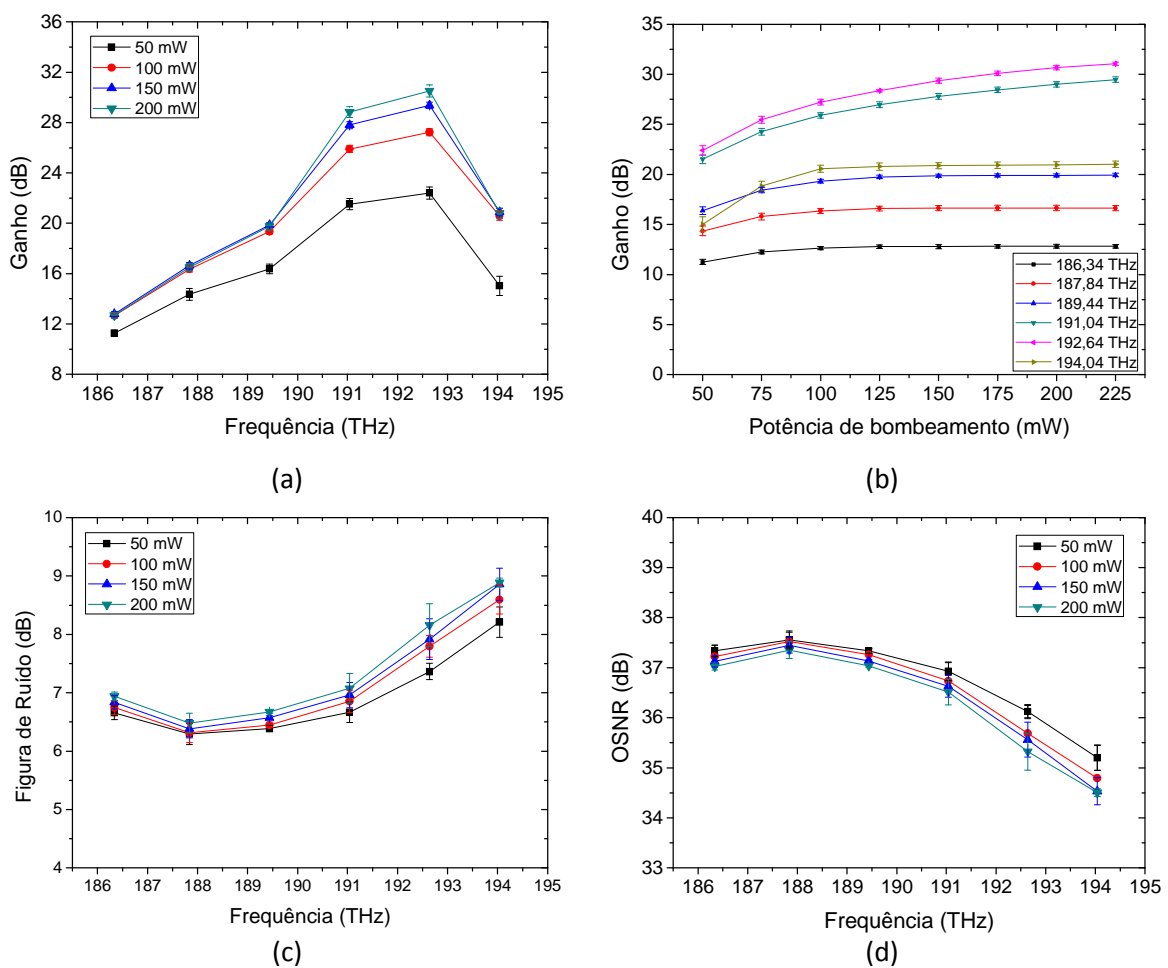


Figura 2.4 – (a) Ganho em função da frequência dos sinais para diferentes potências de bombeamento (50, 100, 150 e 200 mW) para uma EDF com 30 m de comprimento; (b) Ganho em função da potência de bombeamento para diferentes sinais; (c) Figura de ruído em função da frequência dos sinais; (d) OSNR em função da frequência dos sinais.

Na figura 2.5 (a), observa-se o comportamento do ganho, para seis sinais, com a variação da potência dos sinais à entrada. Com o aumento da potência, até cerca de

-20 dBm, o ganho apresenta-se aproximadamente constante para todos os sinais considerados, exceto para 191,04 e 192,64 THz, para os quais existe uma ligeira diminuição do ganho. Entre as potências de -20 dBm e -10 dBm, o ganho mantém-se constante para alguns sinais, no entanto, para outros, como é o caso dos sinais com frequências de 191,04 e 192,64 THz, o ganho sofre um decréscimo acentuado, que atinge uma diferença de 6,84 dB para o último sinal. A partir da potência dos sinais à entrada de -10 dBm, a diminuição do ganho verifica-se para todos os sinais, com exceção do sinal de 186,34 THz, cujo ganho diminui apenas para potências dos sinais à entrada superiores a -5 dBm.

A razão pela qual o ganho é mais elevado, e constante, para baixas potências do sinal à entrada, encontra-se relacionada com a inversão da população. Para baixas potências cada sinal é composto por menos fótons e os iões de érbio no estado excitado são suficientes para amplificar todo o sinal. No entanto, com o aumento da potência do sinal à entrada, os iões excitados pela bomba, deixam de ser suficientes para produzir emissão estimulada para todo o sinal, conduzindo, desta forma, à redução do ganho. Como sinais distintos saturam para diferentes potências do sinal à entrada, o *ripple* associado ao ganho, irá diminuir com o aumento da potência dos sinais.

Como se pode verificar, na figura 2.5 (b), para o EDFA considerado e para as potências dos sinais à entrada apresentadas, a figura de ruído aumenta com o incremento da potência do sinal.

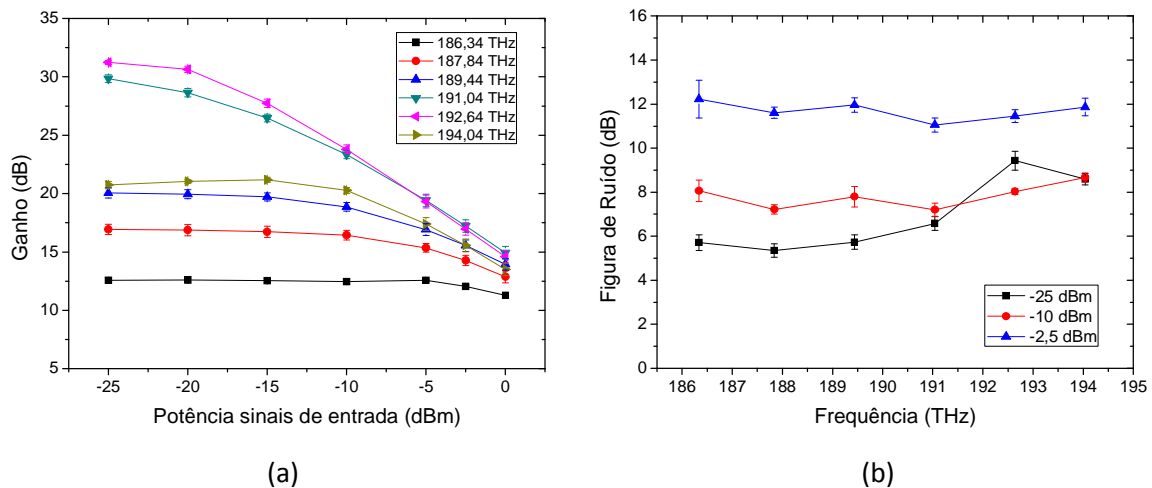


Figura 2.5 – (a) Ganho em função da potência dos sinais à entrada; (b) Figura de ruído em função da frequência dos sinais para as diferentes potências dos sinais à entrada.

Após a caracterização experimental, estabeleceu-se a comparação entre os valores obtidos experimental e numericamente e estudou-se, através de simulações, a influência do comprimento da fibra dopada, do comprimento de onda da bomba e da configuração de bombeamento no desempenho do EDFA.

O estudo numérico foi realizado com recurso ao programa comercial OptiSystem7[®] da Optiwave Software[®]. Foram definidos alguns parâmetros tais como: o tempo de vida dos iões Er³⁺ no estado metastável ⁴I_{13/2}, o raio do núcleo, o raio da região dopada e as secções eficazes de absorção e emissão.

O fator de sobreposição (Γ), e o raio do núcleo (r_n), foram calculados, respetivamente, pelas seguintes expressões [Hapanowicz01]:

$$\Gamma = \frac{\alpha(\lambda_{pico})}{N_T \cdot 5 \times 10^{-25}} \quad 2.8$$

$$r_n = \frac{\lambda_c \times V}{2\pi NA} \quad 2.9$$

onde $\alpha(\lambda_{pico})$ corresponde valor do pico da absorção, N_T é a concentração de iões Er³⁺ na fibra, λ_c é o comprimento de onda de corte e NA é a abertura numérica, cujos valores se encontram na tabela 2.1. O valor $5 \times 10^{-25} \text{ m}^2$ corresponde a uma aproximação do valor máximo da secção eficaz de absorção e V é a frequência normalizada da fibra que toma o valor de 2,405 para fibras monomodo, como é o caso. Os valores obtidos foram de 0,68 para o fator de confinamento, e 2,07 μm para o raio do núcleo.

O raio dopado, de 1,97 μm , foi obtido pela equação 2.2. Para o tempo de vida do ião Er³⁺ no estado metastável ⁴I_{13/2} foi utilizado o valor típico de 10 ms. As secções eficazes de absorção e emissão, ilustradas na figura 2.6, foram calculadas de acordo com as equações 2.3 e 2.4, onde foram utilizados os coeficientes de absorção e ganho presentes na folha de dados da fibra.

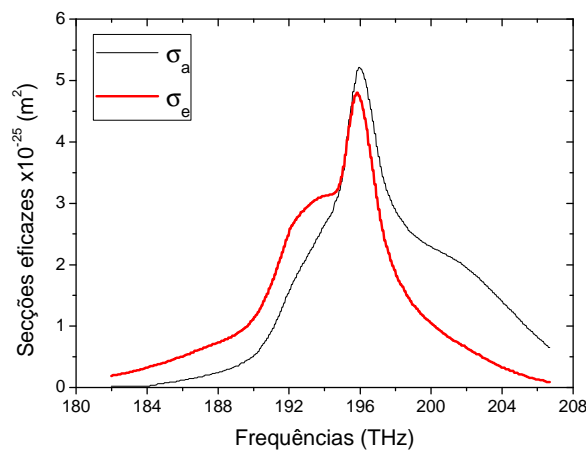


Figura 2.6 – Secções eficazes de absorção, σ_a , e emissão, σ_e , versus imagem no espelho de absorção e emissão do ião, para a fibra utilizada experimentalmente e no modelo numérico. Os valores foram calculados com base nas equações 2.3 e 2.4, utilizando os coeficientes de absorção e ganho presentes da folha de dados da fibra.

A figura 2.7 mostra a comparação entre os ganhos (a) e figuras de ruído (b) obtidos, experimental e numericamente, para um EDFA copropagado com 30 m de comprimento. Foi utilizada uma bomba com 20 dBm de potência e sinais à entrada com potência de -15 dBm.

No estudo numérico foram utilizados 80 sinais com frequências entre 186,34 e 194,24 THz (banda C+L), espaçados de 100 GHz entre si, e foram abordados dois cenários distintos: lançamento dos sinais na fibra canal a canal, da mesma forma que realizado experimentalmente, e com 80 canais, situação próxima da real nas comunicações óticas. As perdas de inserção na EDF, provenientes das fusões, devido à diferença entre os raios do modo da fibra padrão ($\approx 5,2 \mu\text{m}$) e da EDF ($\approx 2,6 \mu\text{m}$), foram estimadas, de acordo com [Chen11], em 2 dB. No cenário utilizado para as simulações, estas perdas foram consideradas com a introdução de um atenuador com o valor de 2 dB à entrada da EDF.

Como se pode observar na figura 2.7 (a), existe uma diferença acentuada entre os valores de ganho obtidos experimental e numericamente, para um canal, que atinge 6,34 dB na região de maior ganho. A diferença entre os ganhos simulados para um e oitenta canais, é ainda mais elevada, cerca de 11,25 dB, quando comparando os valores obtidos para o sinal que apresenta maior ganho no cenário de 80 canais, e 28,45 dB para o sinal com frequência 194,24 THz.

A diminuição abrupta do ganho na banda C, observada para a simulação com 80 canais, ocorre porque a fibra dopada, com 30 metros de comprimento, é demasiado longa para permitir a excitação de íons ao longo de todo o meio de propagação, para a potência utilizada, diminuindo assim a diferença entre as populações do estado excitado e fundamental. A variação da taxa de inversão da população provoca uma diminuição do ganho mais acentuada na banda C do que na banda L [Becker99].

No caso do ganho obtido experimentalmente, a diferença para o ganho simulado para apenas um canal pode estar relacionada com o ruído inicial, proveniente da fonte de bombeamento, que é introduzido na montagem experimental.

Numericamente, não foi considerada a existência de ruído inicial, o que, não só justifica que o ganho seja mais elevado na banda C, como reduz a figura de ruído em relação à experimental, em cerca de 2,07 dB. Por outro lado, a diferença entre as figuras de ruído simuladas para um e oitenta canais não é significativa, com exceção dos valores registados para os sinais com frequências superiores a 193 THz, para os quais o ganho do cenário multicanal é muito mais reduzido.

Daqui em diante, os resultados numéricos apresentados são obtidos para 80 canais, situação mais próxima da verificada nos sistemas de comunicações óticas.

Como se pode observar na figura 2.8 (a), o aumento do comprimento da fibra dopada conduz inicialmente a um aumento do ganho na banda C+L. No entanto, a partir dos 10 m de comprimento, o aumento do comprimento da fibra, traduz-se na redução do

ganho na banda C e aumento do ganho na banda L. Acontece que o aumento do meio de amplificação potencia o aumento do ganho. No entanto, para comprimentos elevados, a potência de bombeamento não é suficiente para excitar todos os íões presentes ao longo da fibra.

A figura de ruído, ilustrada na figura 2.8 (b), aumenta com o incremento do meio de amplificação, que varia entre 5 e 30 m de comprimento.

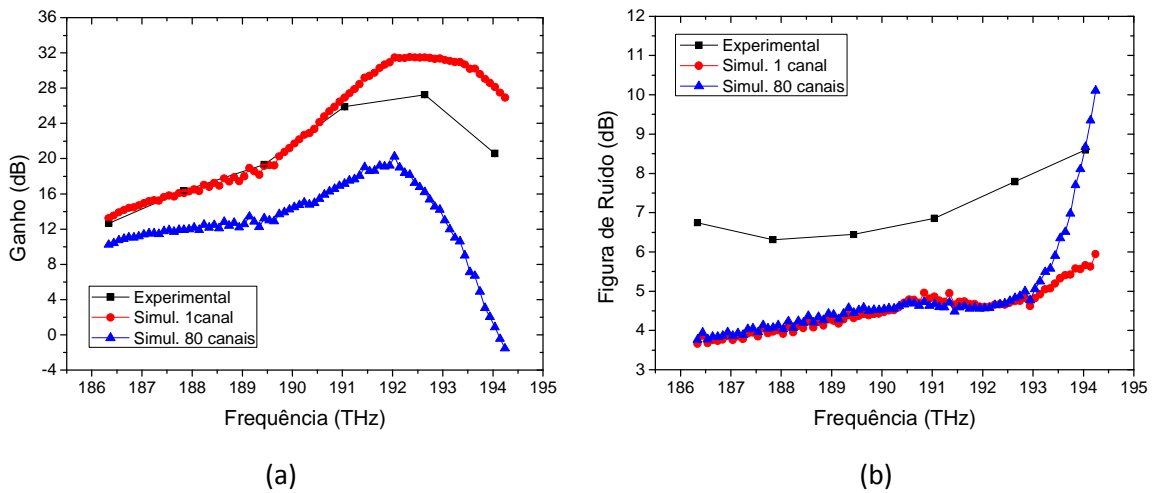


Figura 2.7 – (a) Ganho em função da frequência dos sinais; (b) Figura de ruído em função da frequência dos sinais. Experimental para 1 canal, e simulado com 1 e 80 canais.

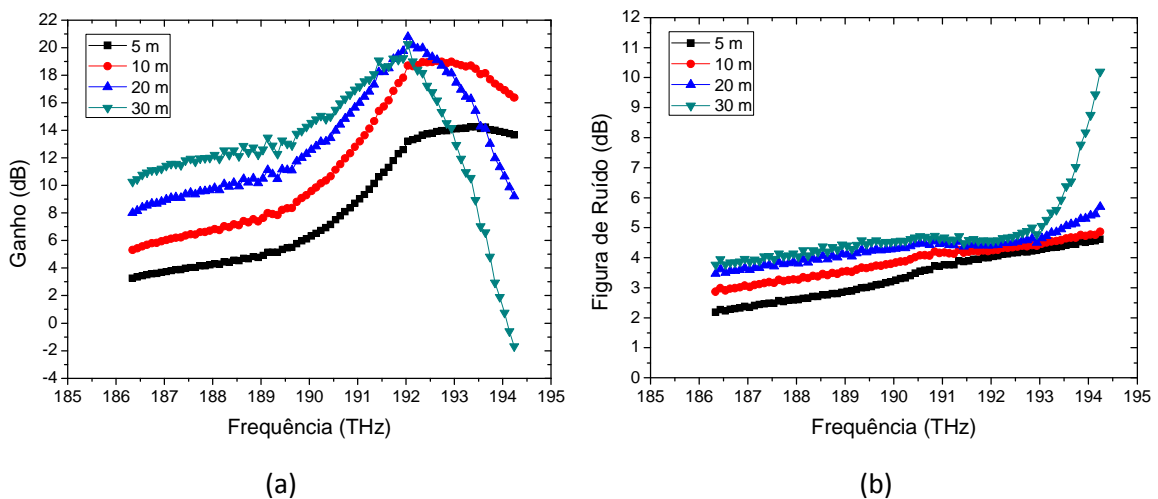


Figura 2.8 – Ganho (a) e figura de ruído (b) em função da frequência dos sinais, para diferentes comprimentos da EDF.

Como mencionado na secção anterior, a configuração de bombeamento do EDFA também influencia o seu comportamento. A figura 2.9 ilustra o ganho (a) e a figura de ruído (b), para três EDFAs com configurações copropagante, contrapropagante e bidirecional. Para as duas primeiras montagens utilizou-se uma bomba com comprimento

de onda de 1480 nm e potência de 20 dBm, enquanto para a configuração bidirecional foram utilizadas duas bombas de 1480 nm e 17 dBm de potência, perfazendo os mesmos 20 dBm no total de potência bombeada. Foi utilizada uma fibra dopada com 10 m e potência dos sinais à entrada de -15 dBm.

Como se pode observar na figura 2.9 (a), nas simulações para os EDFAs considerados, não se verificaram diferenças entre os ganhos obtidos com as três configurações. Por outro lado, na figura 2.9 (b), verifica-se que, a figura de ruído, apesar de semelhante para algumas frequências, para outras a configuração copropagante é aquela que confere figura de ruído mais reduzida, o que acontece porque esta montagem maximiza a inversão da população à entrada do sinal, onde a relação sinal-ruído é mais elevada, ao contrário do que acontece na configuração contrapropagante. A configuração bidirecional é uma junção das montagens co e contrapropagante, apresentando, por isso, uma figura de ruído intermédia à verificada para as outras duas configurações.

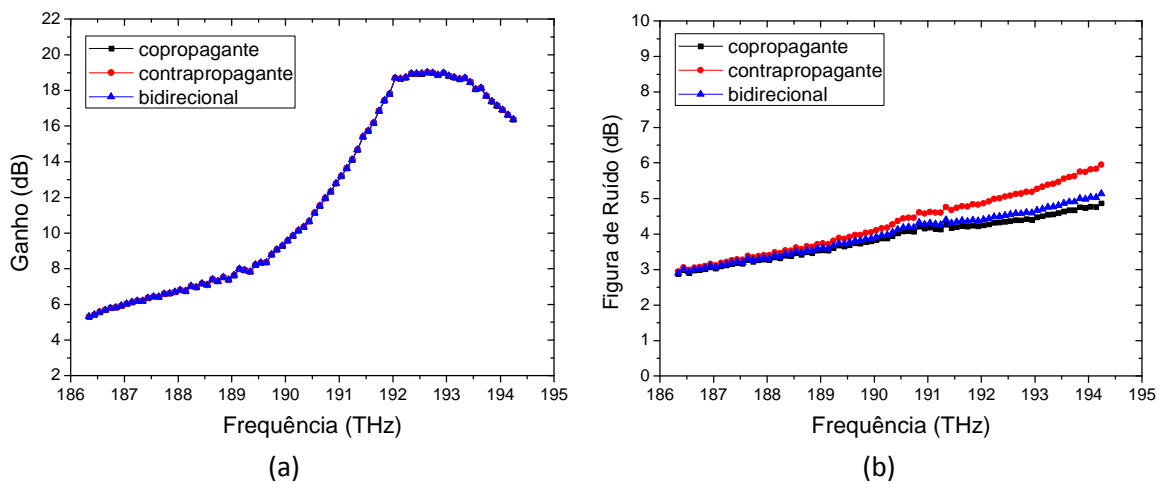


Figura 2.9 – Ganho (a) e figura de ruído (b) em função da frequência dos sinais, para diferentes configurações de bombeamento: copropagante, contrapropagante e bidirecional.

Neste capítulo, considerou-se apenas a variação individual de parâmetros, o que é importante para compreender a influência de cada um no comportamento dos EDFAs. No entanto, a otimização de um EDFA passa pelo ajuste combinado de diversos parâmetros.

CAPÍTULO 3

Amplificadores de Raman em fibra

Neste capítulo, são abordados os fundamentos teóricos essenciais à compreensão dos amplificadores de Raman em fibra, e a caracterização, experimental e numérica, destes amplificadores é apresentada. Da mesma forma que efetuado para os EDFAs, no capítulo anterior, pretende averiguar-se a influência da potência de bombeamento, potência dos sinais à entrada, comprimento da fibra e configurações de bombeamento, no desempenho dos RFAs.

3.1 Princípios de funcionamento

O efeito, ou espalhamento espontâneo, de Raman foi observado pela primeira vez em 1928 por C. V. Raman [Raman28] e consiste num fenómeno de espalhamento inelástico, no qual a frequência da radiação incidente é alterada pela interação com as vibrações do meio.

No efeito de Raman, um fóton incidente no meio com uma determinada energia é absorvido provocando a transição de uma molécula para um estado vibracional intermédio, ou virtual, que ao decair emite um fóton com energia diferente do primeiro. O fóton emitido pode apresentar energia inferior à do fóton absorvido, sendo a diferença entre as energias dos fótons dissipada no meio através de vibrações moleculares, transição de Stokes. Quando a molécula se encontra inicialmente num estado vibracional excitado, a energia vibracional da molécula é convertida em energia radiante e neste caso o fóton emitido tem uma energia superior à do fóton incidente, transição de anti-Stokes.

Em ambos os casos, as diferenças entre as energias dos fótons absorvido e emitido correspondem a diferenças entre níveis vibracionais específicos do material.

Como o processo de anti-Stokes depende da ocupação de níveis vibracionais excitados, este é muito menos provável do que o processo de Stokes para a temperatura ambiente, tornando-o irrelevante para as comunicações óticas [Bromage04].

A amplificação de Raman baseia-se no efeito do espalhamento de Raman estimulado, designado pelo seu acrónimo em inglês SRS (*Stimulated Raman Scattering*), fenómeno observado pela primeira vez, em 1962, por Eric J. Woodbury e Wom K. Ng [Woodbury62].

Na SRS, esquematizada na figura 3.1, um feixe ótico de transmissão e um feixe ótico de bombeamento, com frequência superior ao de transmissão, incidem

simultaneamente no meio, e ocorre transferência de energia do sinal mais energético para o menos energético, amplificando o sinal de transmissão. Para potências da bomba elevadas, os fótons espalhados aumentam rapidamente, o que dá origem ao ganho de Raman.

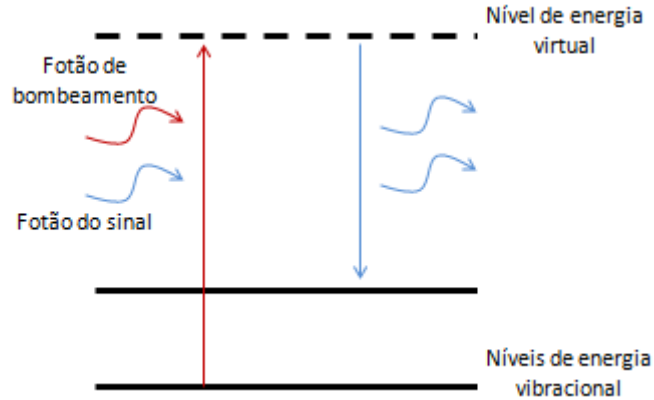


Figura 3.1 – Esquema do espalhamento de Raman estimulado.

Num material cristalino, o sinal de Stokes tem frequências bem definidas, no entanto, devido à natureza amorfa da sílica, nas fibras óticas de SiO_2 , o ganho de Raman estende-se continuamente num intervalo elevado de frequências, até cerca de 40 THz. O espectro dos coeficientes de ganho de Raman medido para a sílica pura, apresenta o seu pico deslocado de 13,2 THz do comprimento de onda da bomba [Stolen80], o que corresponde à diferença entre os níveis vibracionais da sílica.

Apesar da SRS poder ocorrer em qualquer tipo de fibra ótica, diferentes tipos de fibra apresentam diferentes amplificações. A área efetiva da fibra, A_{ef} , influencia significativamente o ganho do RFA, que como se pode ver na equação 3.1 [Rocha07], é maior quanto menor for a A_{ef} . Também o fator de polarização, k , influencia o ganho de Raman na fibra, C_r , que está dependente da polarização relativa dos sinais, cuja polarização não é mantida fixa ao longo da propagação na fibra monomodo tipicamente utilizada nos sistemas de comunicações óticas. O ganho obtido para sinais de transmissão e bomba copolarizados é cerca de uma ordem de magnitude superior ao ganho obtido para sinais polarizados ortogonalmente, no pico de ganho de Raman [Islam04]. Para sinais copolarizados k é igual a 1, enquanto para sinais com polarização aleatória utiliza-se k igual a 2.

$$C_r = \frac{g_r}{A_{ef}k} \quad 3.1$$

Uma vez que o ganho de Raman não está limitado a frequências específicas, como acontece com os EDFAs, e a sua forma espectral depende essencialmente da diferença entre as frequências do sinal de transmissão e de bombeamento, e não das suas

frequências absolutas, é possível obter ganho para qualquer frequência desejada, escolhendo apenas uma bomba adequada. Para além disso, de forma a obter uma maior largura espectral e ganho mais equalizado, pode utilizar-se mais do que uma bomba em simultâneo.

O ganho da potência do sinal de transmissão, G , pode ser obtido, como para o EDFA, pela razão entre a potência ótica do sinal no fim, P_s^{out} , e no início da fibra, P_s^{in} , (equação 2.5), ou pela razão entre as potências medidas no fim da fibra, com as fontes de bombeamento ligadas, $(P_s^{out})_{on}$, e desligadas, $(P_s^{out})_{off}$, designado por ganho *on/off*, $G_{on/off}$ [Bromage04]:

$$G_{on/off} = \frac{(P_s^{out})_{on}}{(P_s^{out})_{off}} \quad 3.2$$

O ganho *on/off* mede o ganho efetivo do RFA e relaciona-se com o ganho, G , da seguinte forma [Bromage04]:

$$G_{on/off}(dB) = G(dB) + \alpha_t(dB)L \quad 3.3$$

onde α_t é o coeficiente de perda das fibras para o comprimento de onda do sinal de transmissão.

Assim como em qualquer outro amplificador ótico, a amplificação nos RFAs tem associada a geração de ruído. A principal fonte de ruído num amplificador de Raman é a emissão espontânea amplificada (ASE), gerada pelo espalhamento espontâneo de Raman [Bromage04]. No entanto, existem outros fenómenos que limitam o desempenho dos RFAs. É o caso do espalhamento contrapropagante de Rayleigh, designado por SRB, do seu acrónimo em inglês (*single Rayleigh backscattering*), que é caracterizado pela transferência de parte da energia ótica contida em modos de propagação guiados para modos não guiados. A intensidade relativa de ruído, designada por RIN, do seu acrónimo em inglês (*relative intensity noise*), transferida do feixe de bombeamento para o feixe de transmissão também limita a relação sinal-ruído num RFA [Keita06]. Entre outros fenómenos, destaca-se também a diafonia entre canais e a mistura de quatro ondas, conhecida por FWM do seu acrónimo em inglês (*four wave mixing*), que consiste num efeito não linear em que se verifica a troca de energia entre canais com diferentes frequências, com a geração de sinais em novas frequências. Este fenómeno pode ocorrer entre os sinais de bombeamento, no caso de existir mais do que uma bomba, entre a bomba e o sinal e entre os diferentes canais de transmissão.

Admitindo a ASE como fonte de ruído dominante, a figura de ruído pode ser descrita pela equação 2.6 [Hensen98].

Como mencionado anteriormente, a amplificação de Raman pode ocorrer em qualquer tipo de fibra, o que permite utilizar as fibras já existentes nos sistemas como meio de amplificação, reduzindo custos e complexidade de implementação.

Quando a fibra bombeada é simultaneamente o meio de transmissão, o amplificador de Raman é designado por RFA distribuído. No entanto, também é possível concentrar a amplificação de Raman num determinado local na linha de transmissão, utilizando fibras com poucos quilómetros e com propriedades especiais, como as fibras de dispersão compensada, que proporcionam ganho mais elevado do que o verificado no mesmo comprimento para as fibras monomodo tipicamente utilizadas como meio de transmissão [Islam04]. A principal vantagem dos RFAs distribuídos é apresentarem uma relação sinal-ruído superior à dos RFAs discretos. No entanto, a aplicação de amplificadores de Raman distribuídos implica ter em consideração o meio de transmissão previamente implementado no sistema.

No que diz respeito à configuração de bombeamento dos amplificadores de Raman, como a SRS ocorre independentemente das direções relativas entre sinais de transmissão e bomba, são possíveis três esquemas de bombeamento distintos: copropagante, contrapropagante e bidirecional, sem que, teoricamente, existam alterações no ganho obtido. Estes três casos serão revistos mais à frente na caracterização do amplificador.

3.2 Caracterização

A montagem experimental utilizada, para a caracterização do RFA, está ilustrada na figura 3.2. Utilizou-se como fonte de bombeamento um laser de fibra ótica que funciona com base no espalhamento de Raman, IPG (RLR-10K-1480), com o pico de emissão a 1480 nm e uma potência máxima de 10 W, cujo espectro está ilustrado na figura 3.3. Utilizou-se a fibra monomodo SMF-28TM da Corning[®] com 40 km de comprimento. O restante equipamento é idêntico ao utilizado na montagem experimental do EDFA, descrita no capítulo anterior. As perdas do acoplador à saída da fibra foram medidas ($\approx 0,48$ dB) e compensadas na potência dos sinais e ruído à saída.

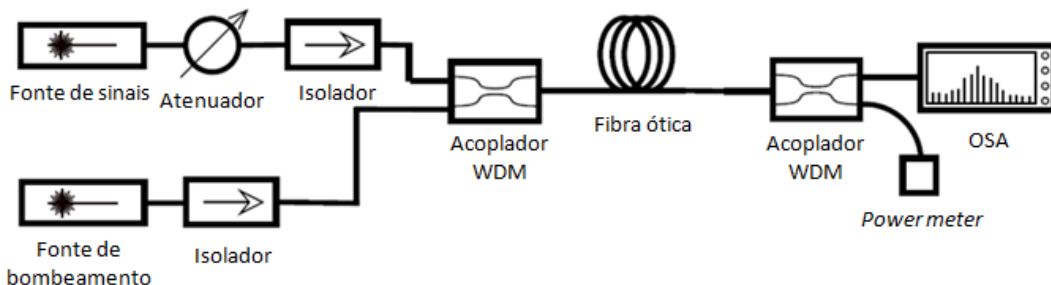


Figura 3.2 – Montagem experimental do RFA copropagante.

Para a simulação foi utilizado o OptiSystem7[®] da Optiwave Software[®]. Alguns parâmetros tais como: a atenuação, a área efetiva, os coeficientes de ganho de Raman, a temperatura, o fator de polarização e um valor para o retro espalhamento de Rayleigh, tiveram de ser definidos.

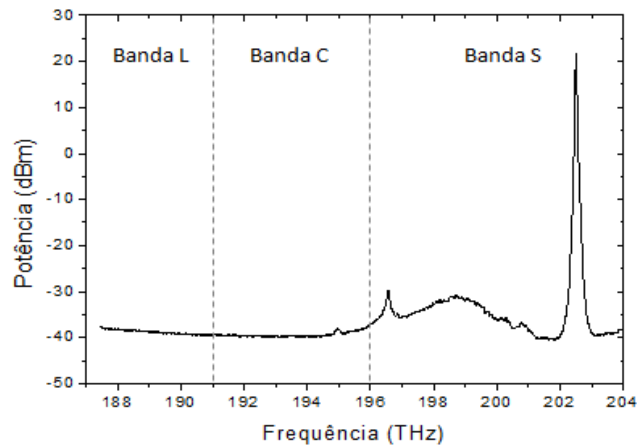


Figura 3.3 – Espectro de emissão do laser IPG (RLR-10K-1480), com potência de 30 dBm, medido com o OSA (Advantest Q8384), tendo sido utilizado um atenuador de 25 dB.

A atenuação, ilustrada na figura 3.4, consiste nos valores predefinidos pelo programa, para fibras com características semelhantes à utilizada experimentalmente. Na mesma figura estão apresentados os valores utilizados para a área efetiva. Estes foram calculados com base em dados para duas frequências diferentes presentes na folha de informação da fibra e na evolução destes para as diversas frequências, predefinida pelo programa. Na figura 3.5 podem observar-se os coeficientes de ganho de Raman normalizados, para a fibra utilizada, cujo pico é de $5,92 \times 10^{-14}$ m/W [Fugihara08]. A temperatura foi fixada nos 300 K, valor próximo da temperatura ambiente, e o fator de polarização em 2, uma vez que os sinais têm polarização aleatória ao longo da propagação na fibra. O valor utilizado para o retro espalhamento de Rayleigh foi de 5×10^{-5} km⁻¹, valor predefinido do programa.

Um RFA com 40 km de comprimento, configuração de bombeamento copropagante, potência da bomba de 30 dBm com pico de emissão no comprimento de onda de 1480 nm, e potência dos sinais à entrada de -15 dBm, foi caracterizado experimental e numericamente em termos do ganho, figura de ruído e OSNR, para sinais nas bandas C+L, entre 186,34 THz e 194,24 THz.

Da mesma forma que para o EDFA, a caracterização experimental do RFA foi feita para um cenário monocanal e os resultados apresentados correspondem à média de três medidas experimentais e respectivas barras de erro.

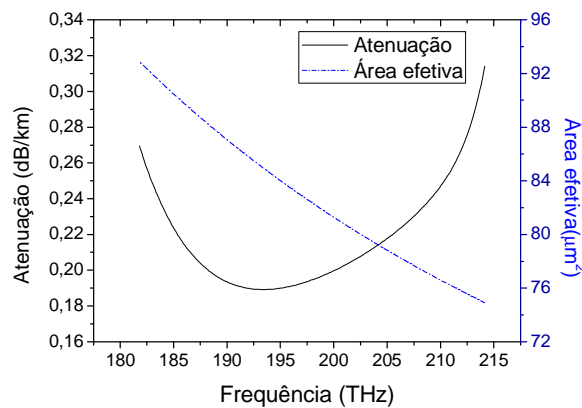


Figura 3.4 – Atenuação e área efetiva, utilizadas no modelo numérico, em função da frequência dos sinais. Atenuação pré-definida pelo programa e área efetiva calculada com base em dados para duas frequências diferentes presentes na folha de informação da fibra e na evolução destes para as diferentes frequências pré-definida pelo programa.

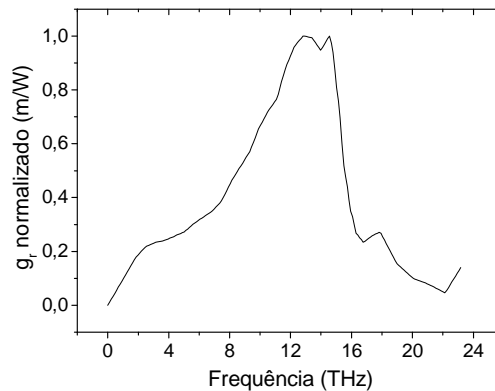


Figura 3.5 – Coeficientes de ganho normalizados, utilizados no modelo numérico, para uma fibra semelhante à utilizada experimentalmente [Fugihara08]. O pico máximo para os g_r é de $5,92 \times 10^{-14}$ m/W. O pico está a 56 meV.

Na figura 3.6 (a) são apresentados o ganho experimental e o ganho calculado numericamente, para um canal, conforme a prática, e para oitenta canais, cenário mais próximo do real nos sistemas de comunicações óticas. Para as simulações, são apresentados os resultados obtidos num cenário ideal, que não considera as perdas de inserção nas fibras, nem o ruído inicial, e pelo cenário cujos parâmetros foram ajustados de forma a obter resultados coerentes com os experimentais. Os ajustes efetuados serão explicados mais à frente.

Como se pode observar na figura 3.6 (a), existe uma diferença, de cerca de 5,5 dB, entre os resultados experimentais e simulados com o cenário ideal, para apenas um canal. Esta diferença pode estar eventualmente relacionada com as perdas de inserção na fibra, que são de difícil quantificação, e com a potência do ruído à entrada do amplificador, introduzido experimentalmente pelo nível de ruído da fonte de bombeamento, que não está a ser considerado na simulação. De forma a ter em conta

estes fatores, e por não ter sido possível colocar um valor para o ruído inicial na simulação, introduziu-se um atenuador com 5,5 dB à saída da fibra simulada. Este atenua a potência dos sinais à saída e, como se pode verificar na figura 3.6 (a), faz com que os resultados simulados para apenas um canal se aproximem dos valores experimentais. Este ajuste permite avaliar as perdas não contabilizadas e simular melhor o ganho.

A diferença entre os ganhos simulados para um e oitenta canais atinge um valor máximo de 2,13 dB, e deve-se ao facto, de no cenário multicanal, a potência da bomba se encontrar distribuída por uma banda espectral relativamente larga.

Nas figuras 3.6 (b) e (c), são apresentadas respetivamente a figura de ruído e a OSNR em função da frequência dos sinais. O facto da figura de ruído experimental ser mais elevada e a OSNR experimental mais baixa, em relação aos resultados simulados, poderá dever-se ao ruído inicial proveniente do sinal de bombeamento, que não está a ser considerado na simulação.

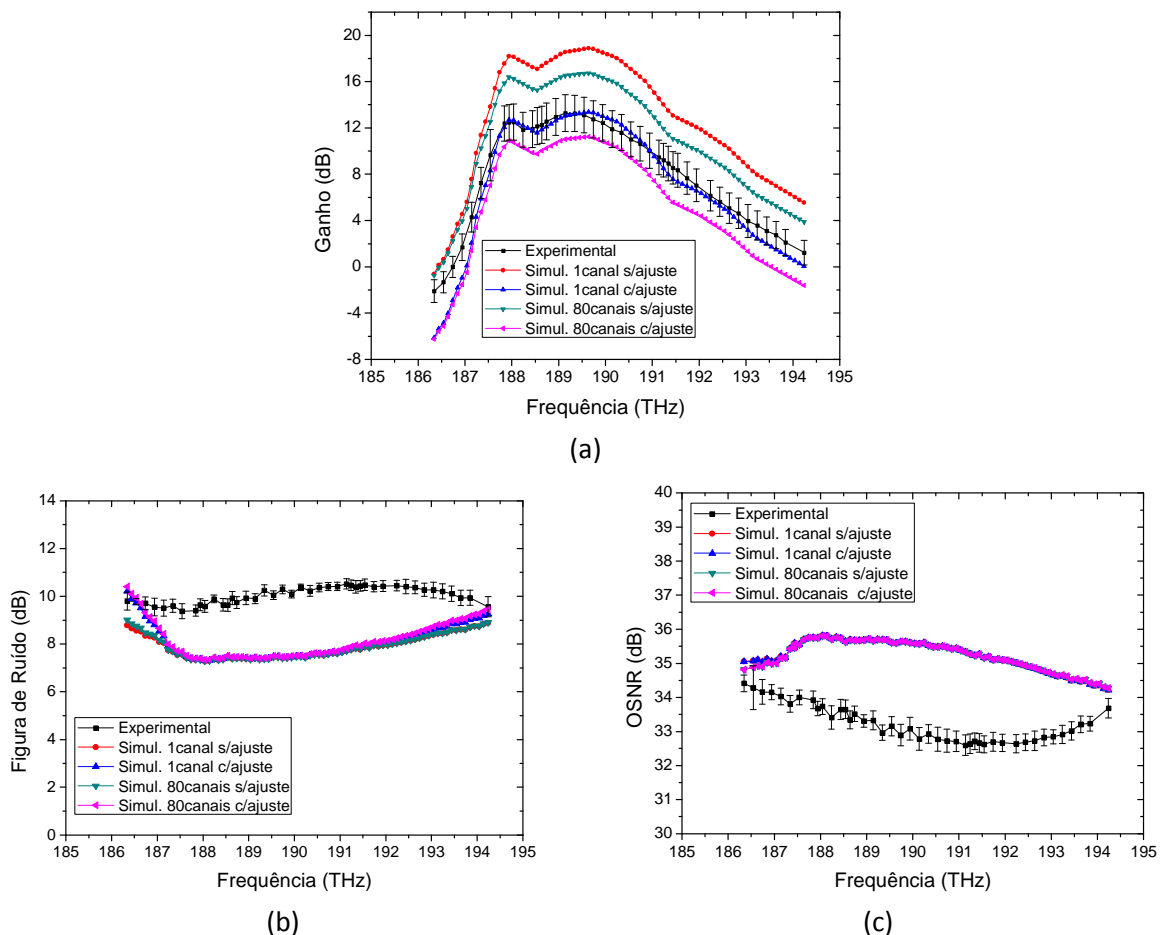


Figura 3.6 – Ganho (a), figura de ruído (b) e OSNR (c) em função da frequência dos sinais. (Experimental – dados obtidos experimentalmente para 1 canal; Simulação 1 canal s/ajuste e Simulação 80 canais s/ajuste – Simulações para 1 e 80 canais para a montagem ideal; Simulação 1 canal c/ajuste e Simulação 80 canais c/ajuste – Simulações para 1 e 80 canais após o ajuste da simulação)

Os resultados numéricos, que se apresentam de seguida, foram obtidos utilizando 80 canais e consideram o ajuste anteriormente efetuado aos parâmetros do modelo.

A figura 3.7 (a) mostra o aumento do ganho, e do *ripple*, com o aumento da potência da bomba. Enquanto que para a potência de bombeamento de 30 dBm, o ganho é positivo numa largura de banda de 6,4 THz, com valor máximo de 11,24 dB e *ripple* de 11,24 dB, para a potência de bomba de 36 dBm, o ganho é positivo numa largura de banda de 5,5 THz, com máximo é de 26,02 dB e o *ripple* de 25,59 dB.

O ganho aumenta porque com o incremento da potência da bomba aumenta o número de fótons de bombeamento que podem dar origem ao fenómeno de espalhamento de Raman estimulado e desta forma aumentar o ganho do amplificador.

O aumento do *ripple* dá-se porque de acordo com os coeficientes de ganho de Raman, o aumento do ganho é maior para os canais cujas frequências que se encontram desviados cerca de 13,2 THz da frequência da bomba, diferença que se acentua para potências de bombeamento elevadas.

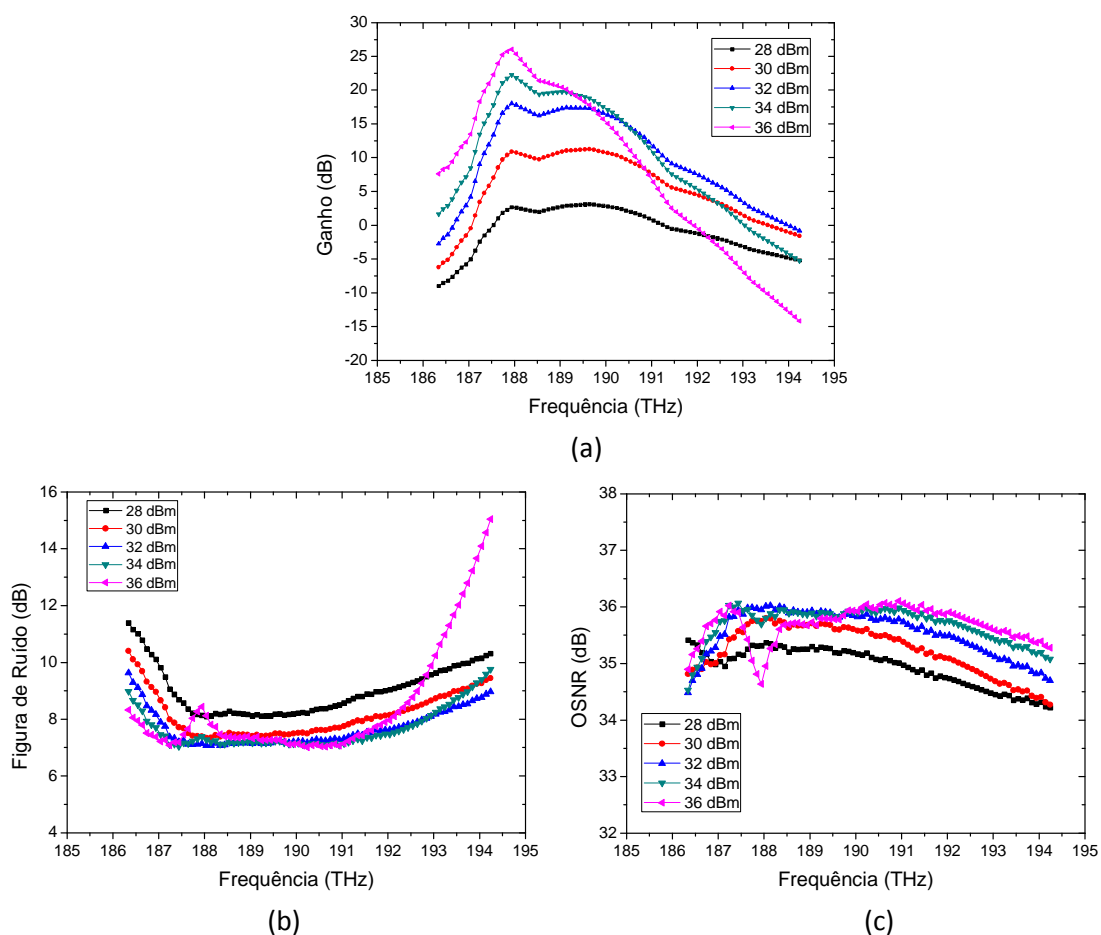


Figura 3.7 – Ganho (a), figura de ruído (b) e OSNR (c) em função da frequência dos sinais, para diferentes potências da bomba: 28, 30, 32, 34 e 36 dBm. Frequência da bomba=202,49 THz. Potência dos sinais = -15 dBm. Comprimento da fibra = 40 km.

De uma forma geral, como se pode observar na figura 3.7 (b) e (c), com o aumento da potência da bomba, até 34 dBm, a NF diminui e a OSNR aumenta. O *ripple* da NF e OSNR também aumenta, porque estas estão dependentes da potência do sinal à saída que está relacionada com os coeficientes de ganho de Raman.

No estudo da dependência do desempenho do amplificador com a potência do sinal à entrada, verifica-se na figura 3.8 (a) que o ganho, ao início constante, diminui com o aumento desta potência. Isto acontece porque sinais com potências mais elevadas consomem maior potência de bombeamento e esta deixa de ser suficiente para gerar o mesmo nível de amplificação, o que reduz a razão entre as potências do sinal à saída e à entrada. Por outro lado, quanto maior a potência dos sinais à entrada, maior irá ser a figura de ruído e mais baixa a OSNR.

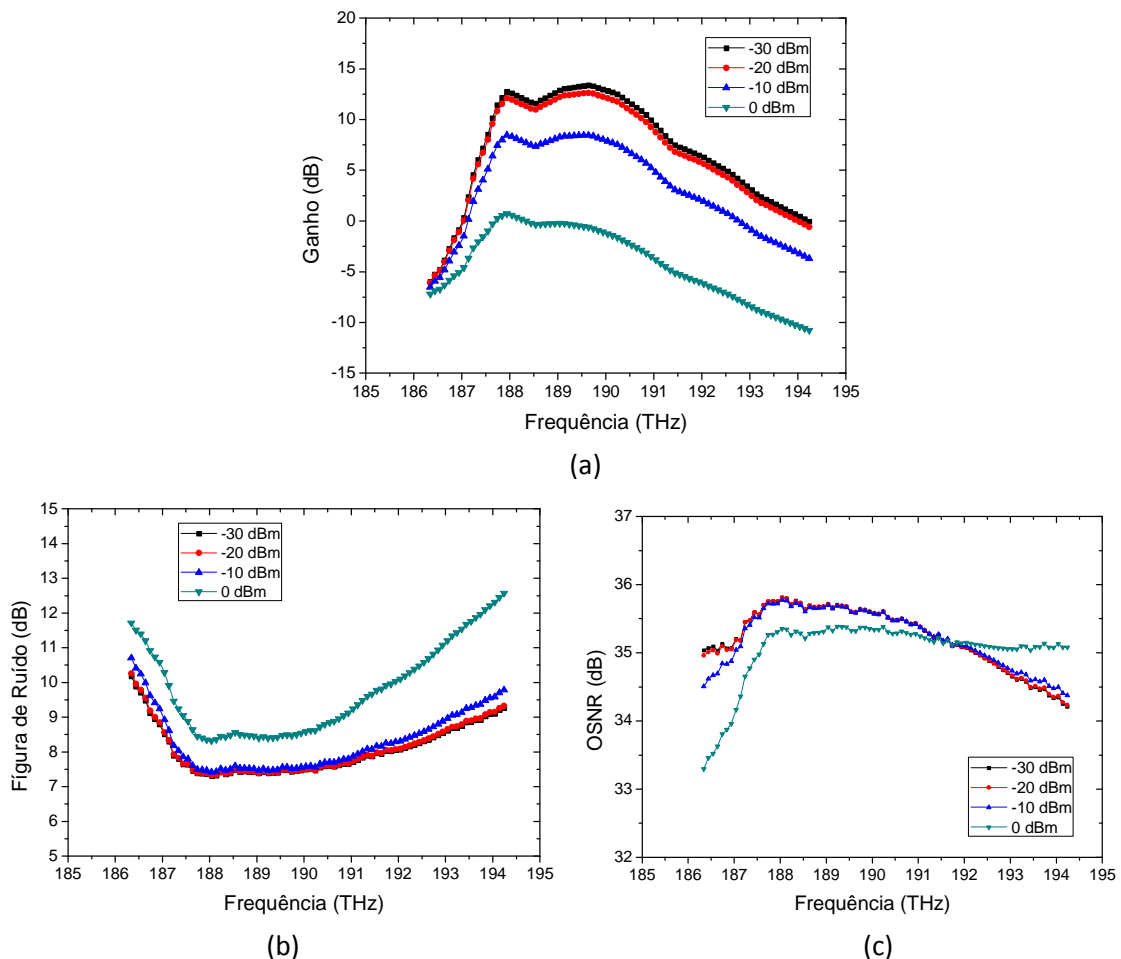


Figura 3.8 – Ganho (a), figura de ruído (b) e OSNR (c) em função da frequência dos sinais, para diferentes potências dos sinais à entrada: -30, -20, -10 e 0 dBm. Frequência da bomba=202,49 THz. Potência da bomba = 30 dBm. Comprimento da fibra = 40 km.

Na análise do desempenho do RFA, com base na alteração do comprimento da fibra, verifica-se na figura 3.9 (a), que o ganho aumenta até um determinado comprimento, cerca de 40 km, e que a partir daí, o aumento do comprimento da fibra conduz à diminuição do ganho. O aumento do comprimento da fibra representa o aumento do meio disponível para amplificação, o que aumenta o ganho. No entanto, a partir de um certo comprimento da fibra, a atenuação torna-se mais relevante e o ganho diminui [Headley05].

Com o aumento do comprimento da fibra, a figura de ruído aumenta e a OSNR diminui.

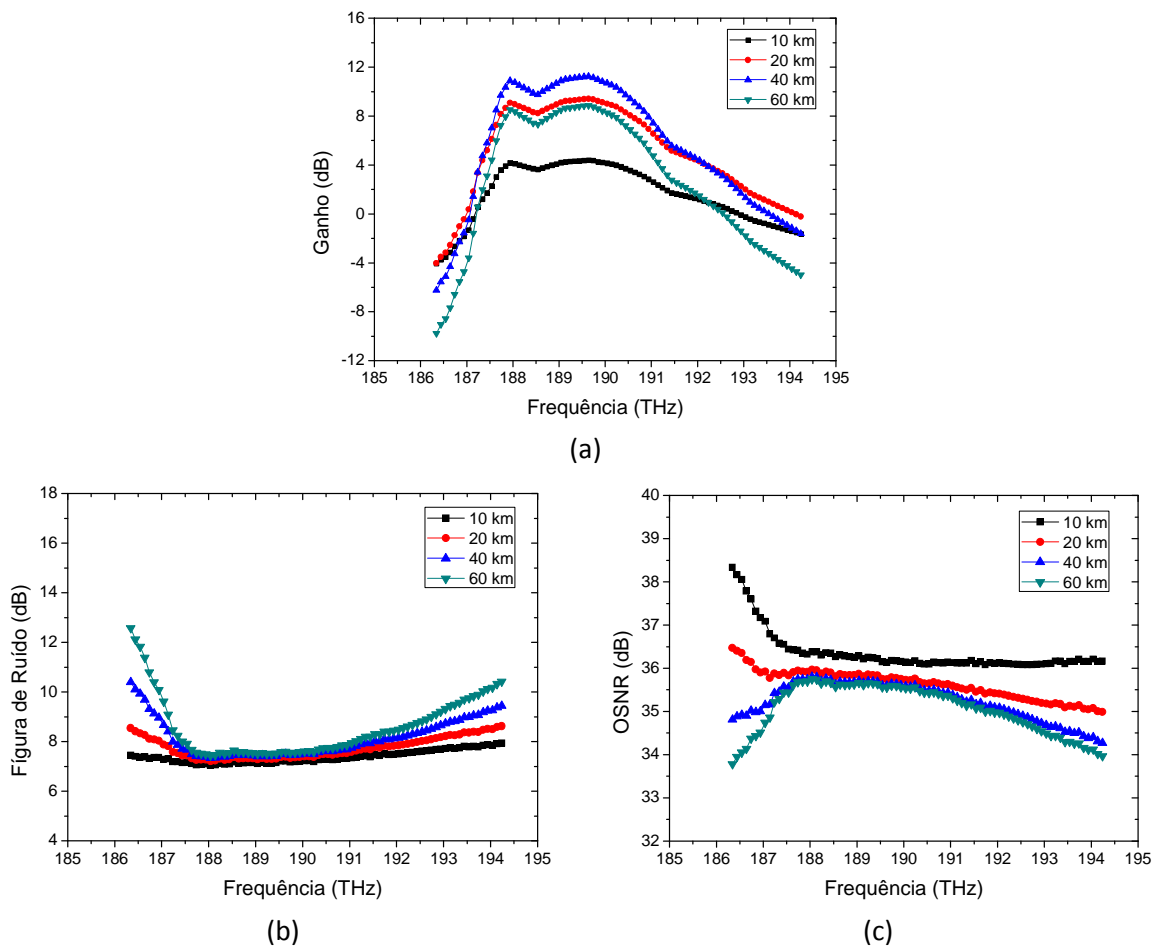


Figura 3.9 – Ganho (a), figura de ruído (b) e OSNR (c) em função da frequência dos sinais, para diferentes comprimentos da fibra: 10, 20, 40 e 60 km. Frequência da bomba=202,49 THz. Potência da bomba = 30 dBm. Frequência dos sinais= -15 dBm

No estudo para as diferentes configurações de bombeamento dos RFAs, é verificado o pressuposto teórico do ganho ser igual independentemente da direção relativa entre sinal bombeado e transmitido (figura 3.10 (a)). Na figura 3.10 (b) e (c) apresentam-se as figuras de ruído e OSNRs para as configurações copropagante,

contrapropagante e bidirecional. A figura de ruído é mais elevada e a OSNR mais baixa, para o amplificador contrapropagante, pois a amplificação é mais elevada no final da fibra, onde a relação sinal-ruído já se encontra deteriorada. Pelo contrário, a configuração copropagante, cuja maior amplificação ocorre no início da fibra, apresenta a figura de ruído mais baixa e a OSNR mais elevada. A configuração bidirecional reúne as duas condições atrás descritas e apresenta, por isso, resultados intermédios, de figura de ruído e OSNR, às outras duas configurações apresentadas. Uma vez que o ganho é semelhante entre as três configurações, e a configuração copropagante se destaca pela baixa figura de ruído e elevada OSNR, para o RFA analisado, esta é a configuração mais adequada. No entanto, na prática a configuração contrapropagante é muito utilizada, porque reduz o impacto de efeitos não lineares não desejados [Headley05].

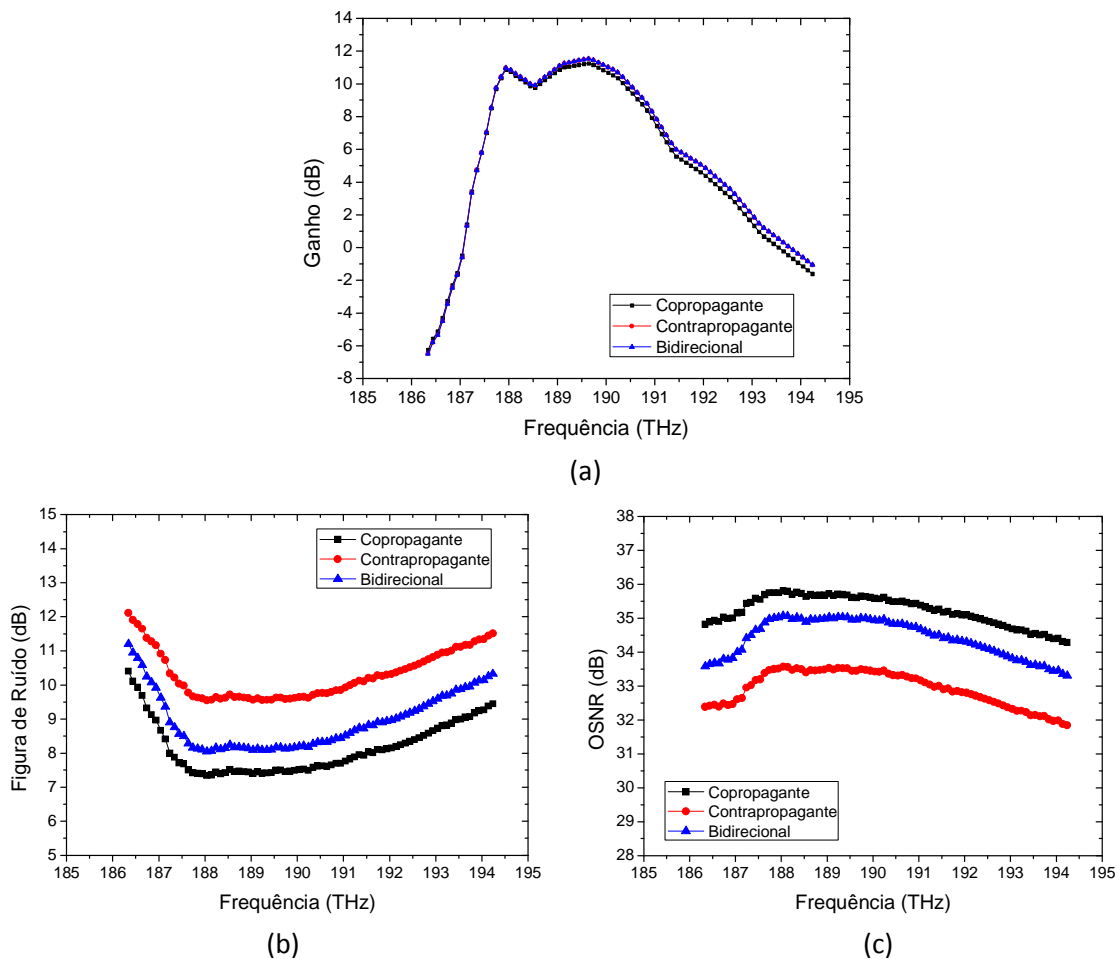


Gráfico 3.10 – Ganho (a), figura de ruído (b) e OSNR (c) em função da frequência dos sinais, para diferentes configurações de bombeamento: copropagante, contrapropagante e bidirecional. Frequência da bomba=202,49 THz. Potência de bombeamento=30 dBm. Potência dos sinais à entrada=-15 dBm. Comprimento da fibra = 40 km.

Neste capítulo, da mesma forma que para os EDFAs no capítulo anterior, averiguou-se a influência de diversos parâmetros no desempenho dos RFAs. Para a otimização de um amplificador de Raman é essencial o ajuste combinado dos diversos parâmetros estudados, bem como do comprimento de onda do sinal de bombeamento. Neste capítulo utilizou-se uma bomba comum para os sistemas de comunicações óticas a emitir nos 1480 nm, no entanto, como comentado anteriormente, é possível determinar a região a amplificar através da escolha adequada da fonte de bombeamento. Para amplificação na banda C, o comprimento de onda do sinal de bombeamento deveria ser próximo de 1451 nm.

CAPÍTULO 4

Amplificadores híbridos EDFA/RFA

Como discutido no capítulo 1, existem diversas configurações possíveis para os amplificadores híbridos EDFA/RFA. Sabe-se também, que da mesma forma que verificado, nos capítulos anteriores, para os EDFAs e RFAs, a otimização dos amplificadores híbridos está dependente do ajuste de múltiplos parâmetros.

Neste capítulo, apresentam-se duas configurações distintas para amplificadores híbridos, que partilham, no entanto, algumas características. Ambas são compostas por dois estágios de amplificação, um EDFA e um RFA distribuído, e utilizam apenas uma fonte de bombeamento copropagante. São considerados os cenários em que o RFA precede o EDFA, e vice-versa.

Para cada configuração, o comprimento da fibra onde ocorre amplificação de Raman é variado, e o comprimento da EDF otimizado de acordo com essa variação. Este estudo pretende concluir acerca do comprimento máximo de transmissão a que poderia ser aplicado cada um dos amplificadores, e com base no seu desempenho, qual o local do sistema mais adequado para a sua incorporação.

Os amplificadores híbridos podem também ser designados, por simplificação, por HA, do seu acrónimo em inglês (*hybrid amplifiers*).

O presente capítulo é composto por uma secção principal dedicada à caracterização, experimental e numérica, dos amplificadores híbridos, que se encontra subdividida em três secções. A subsecção 4.1.1 é dedicada à caracterização do HA, cujo estágio de amplificação de Raman precede o EDFA. A secção 4.1.2 apresenta a caracterização do HA em que o RFA é colocado após o EDFA. E por fim, na secção 4.1.3 estabelece-se uma comparação entre as duas configurações anteriormente analisadas.

4.1 Caracterização

Para a composição dos amplificadores híbridos, foram utilizadas as fibras MetroGain™ EDF M-3 (1480/125) da Fibercore, para o EDFA, e SMF-28 da Corning®, para o RFA. As características destas fibras encontram-se descritas nos capítulos 2 e 3.

Independentemente da configuração, todos os HAs, descritos nas subsecções seguintes, utilizam uma fonte de bombeamento, cujo espectro se encontra na figura 3.3, com comprimento de onda de 1480 nm e potência de 30 dBm. A potência dos sinais à entrada é de -15 dBm.

O ganho, figura de ruído e OSNR, foram respetivamente calculados com base nas equações 2.5, 2.6 e 2.7.

4.1.1 Configuração RFA-EDFA

Nesta subsecção apresenta-se a caracterização do desempenho do ganho, figura de ruído e OSNR, para amplificadores híbridos cujo estágio de amplificação de Raman precede o estágio do EDFA.

Antes da caracterização experimental, procedeu-se à otimização do comprimento da EDF para um HA copropagante com fibra de transmissão de 40 km, comprimento disponível no laboratório.

O estudo numérico foi realizado, novamente com recurso ao programa OptiSystem7[®] da Optiwave Software[®]. No esquema utilizado para a simulação foram introduzidos os ajustes efetuados nas caracterizações individuais do EDFA e RFA. Nos capítulos anteriores verificou-se a existência de perdas de inserção na EDF no valor de 2 dB, e a diferença de potência entre o RFA experimental e simulado de 5,5 dB. De forma a considerar estes valores no esquema da simulação do HA, foi introduzido um atenuador, com o valor de 7,5 dB, entre o RFA e o EDFA.

No Gráfico 4.1 mostram-se alguns dos resultados considerados no processo de otimização da EDF. Como se pode observar, o aumento do comprimento da fibra dopada conduz ao aumento do ganho na banda L e à diminuição do mesmo na banda C, o que está de acordo com o comportamento do EDFA verificado no capítulo 2. No caso do HA, o aumento do ganho na banda L proveniente do EDFA é somado ao ganho constante derivado do RFA. Na figura 4.2 (b) observa-se um aumento da figura de ruído, com o aumento do comprimento da EDF, em especial para os sinais e comprimentos onde o decaimento do ganho é mais acentuado, o que está de acordo com a equação 2.6.

Tendo em consideração os resultados apresentados na figura 4.1, escolheu-se o comprimento de 5 m para a EDF. Este amplificador apresenta ganho positivo entre 187,14 e 193,84 THz, cujo valor máximo é de 12,02 dB e o *ripple* de 11,95 dB. O valor mínimo da figura de ruído é de 7,44 dB.

A figura 4.2 apresenta o esquema da montagem experimental utilizada para caracterizar o referido amplificador. O equipamento foi o mesmo que o utilizado para a caracterização experimental do RFA, descrito no capítulo 3.

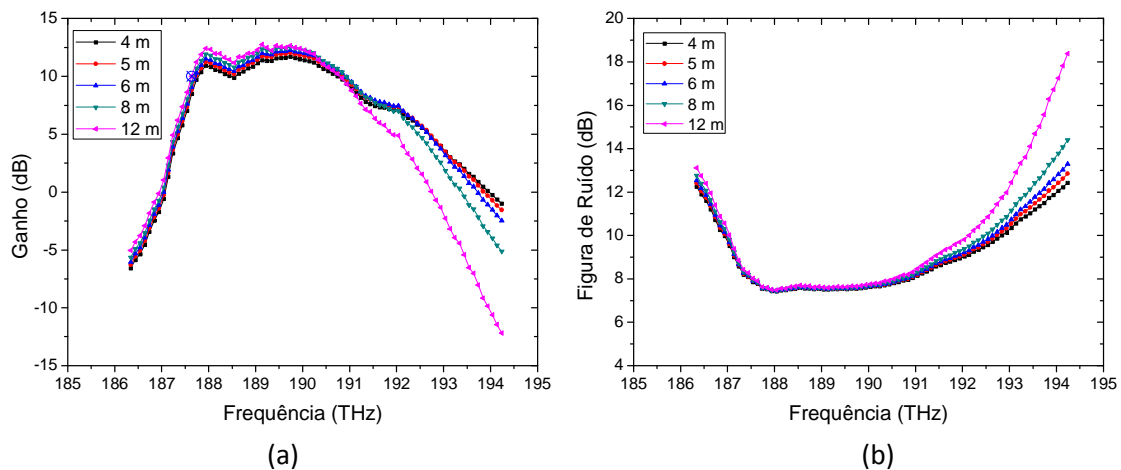


Figura 4.1 – HA com configuração RFA-EDFA: Ganho (a) e figura de ruído (b) em função da frequência dos sinais, para vários comprimentos de EDF: 4, 5, 6, 8 e 12 m. HA copropagado com 40km de SMF-28, $P_b = 30\text{dBm}$ e $P_s^{in} = -15\text{ dBm}$.

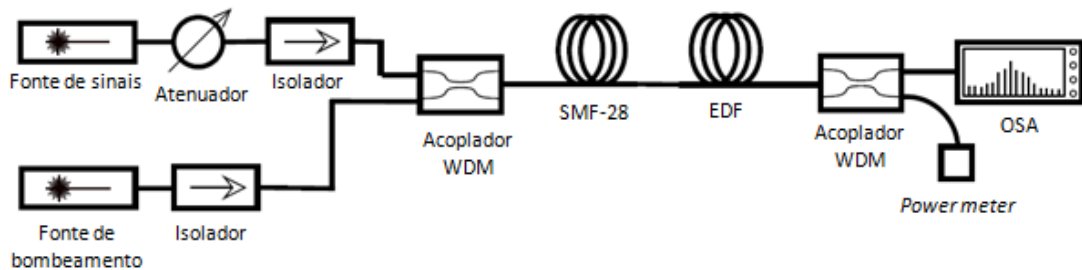


Figura 4.2 – Montagem experimental para o amplificador híbrido RFA – EDFA copropagado.

Por limitações do equipamento disponível, pois não existia o número de lasers pretendidos para o estudo multicanal, como aquele que é utilizado posteriormente nas simulações, a caracterização experimental realizou-se canal a canal. Apesar de se esperar um ganho mais elevado com o cenário monocanal do que com o multicanal, como foi verificado nos capítulos anteriores para o EDFA e RFA, estes dados permitem validar as simulações e extrapolar para o caso em que são injetados 80 canais em simultâneo na fibra. Os valores experimentais apresentados, e respetivas barras de erro, foram calculados com a média das três medidas realizadas. Através da figura 4.3 é possível comparar os resultados experimentais de ganho (a), figura de ruído (b) e OSNR (c), com os resultados simulados para 1 e para 80 canais. Os valores do ganho experimental e simulado para 1 canal são concordantes, sobretudo na banda L. Tendo em conta as caracterizações individuais do RFA e EDFA, a existência de uma diferença entre os resultados simulados para um e oitenta canais, mais acentuada na banda C, era já expectável. A diferença entre a figura de ruído e a OSNR experimentais e simuladas

deve-se ao ruído inicial, proveniente do espectro da fonte de bombeamento experimental, que não é considerado na simulação.

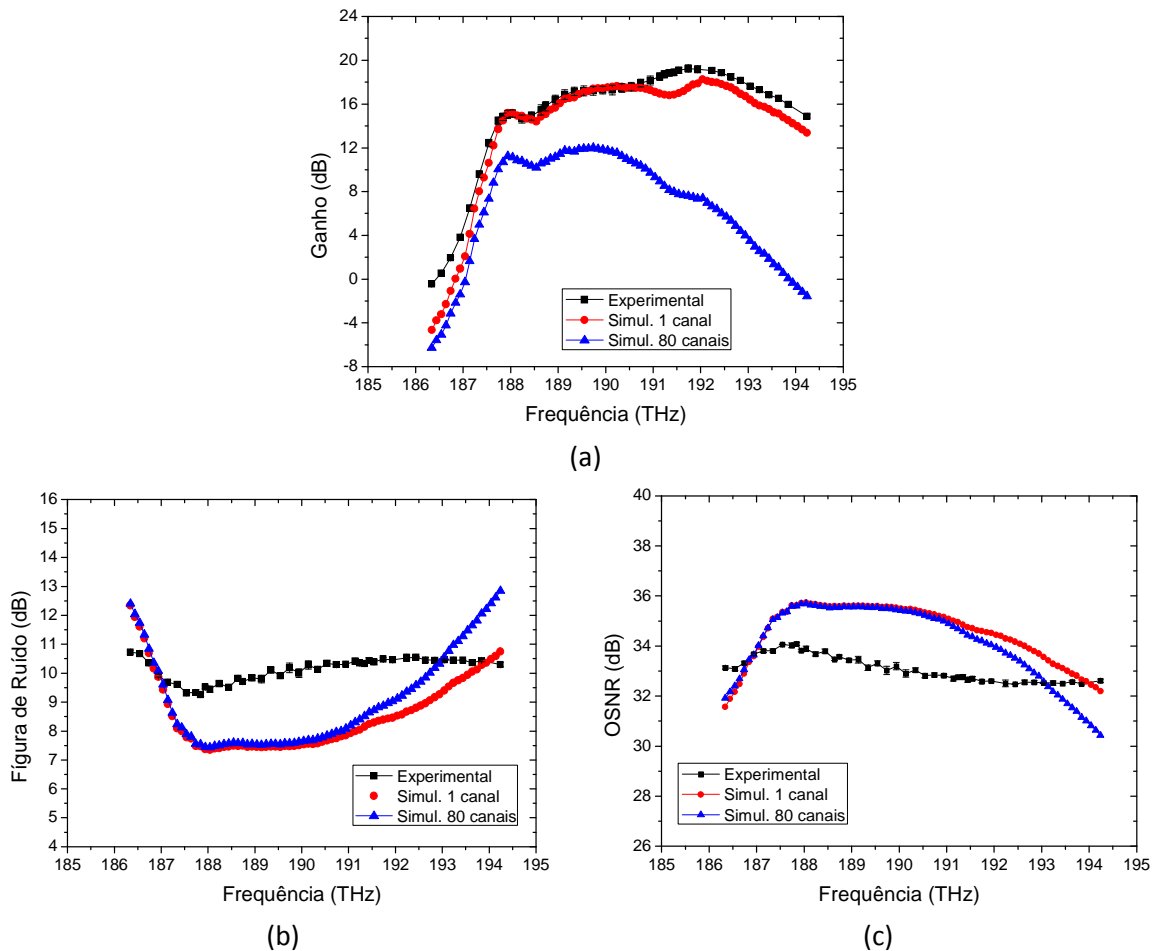


Figura 4.3 – HA com configuração RFA-EDFA: Ganho (a), figura de ruído (b) e OSNR (c), em função da frequência dos sinais, obtidos experimental e numericamente, para um e oitenta canais.

Os amplificadores híbridos são tipicamente utilizados para distâncias superiores a 100 km, pelo que é importante investigar qual a distância máxima de transmissão permitida pelo amplificador anteriormente descrito. Para isso, realizaram-se diversas simulações variando o comprimento da fibra de transmissão e otimizou-se o comprimento da EDF. A figura 4.4 apresenta os resultados obtidos para os diferentes comprimentos da SMF-28, já com os comprimentos das fibras dopadas corretamente ajustados.

A análise, efetuada no capítulo 3, para o ganho dos amplificadores de Raman, em função do comprimento da fibra de transmissão, permitiu concluir que, para potência de bombeamento de 30 dBm, e potência dos sinais à entrada de -15 dBm, o aumento do comprimento da SMF, para valores superiores a 40 km, conduz à redução do ganho dos sinais. Os valores da figura 4.4 corroboram esta conclusão, contudo, neste mesmo gráfico,

é possível observar algum ganho na banda C, proveniente da amplificação na EDF. Isto acontece porque devido à elevada eficiência de bombeamento do EDFA, a pouca potência do sinal de bombeamento que chega à EDF é ainda suficiente para gerar algum ganho.

Para 80 km de SMF, a potência da bomba que chega ao final do amplificador de Raman já não é suficiente para gerar amplificação no EDFA.

Independentemente dos comprimentos utilizados para a SMF e EDF, a figura 4.4 (b) revela que as figuras de ruído são sempre superiores a 7 dB, o que torna inviável a aplicação de qualquer um destes amplificadores num sistema de comunicações óticas.

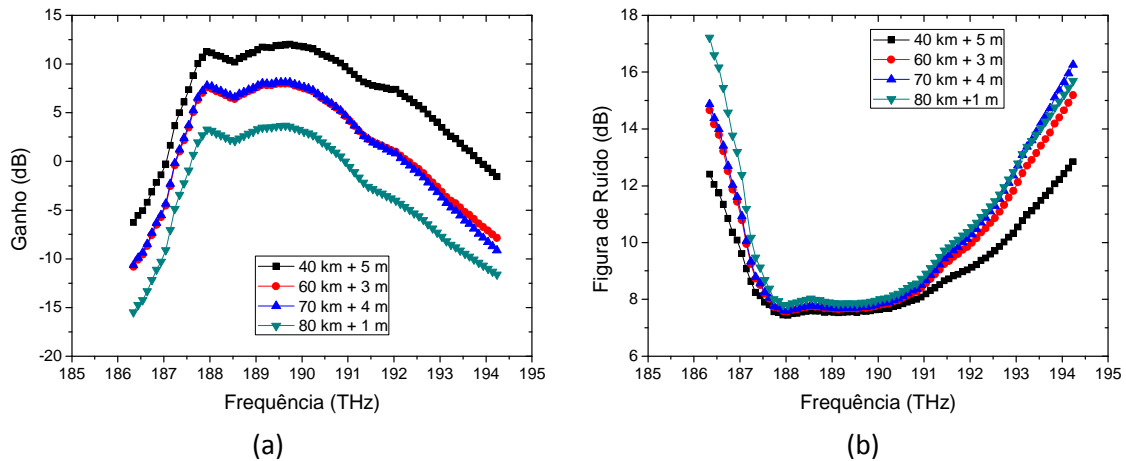


Figura 4.4 – HA com configuração RFA-EDFA: Ganho (a) e figura de ruído (b) em função da frequência dos sinais, obtidos para diferentes combinações dos comprimentos de fibra de transmissão com a fibra dopada. RFA seguido de EDFA.

4.1.2 Configuração EDFA-RFA

Nesta secção apresenta-se a caracterização, experimental e numérica, do ganho, figura de ruído e OSNR de amplificadores híbridos, cujo estágio de amplificação do EDFA precede o RFA.

Da mesma forma que efetuado na secção anterior, as simulações tiveram em consideração os ajustes efetuados nas caracterizações individuais do EDFA e RFA. Para isso, colocou-se um atenuador com 2 dB à entrada da EDF e um atenuador de 5,5 dB à saída do RFA.

Como se pode observar na figura 4.5 (a), para os comprimentos de fibra dopada considerados, a amplificação proveniente do EDFA aumenta com o incremento do comprimento da fibra, o que está de acordo com o observado na figura 2.9 (a). A diminuição do ganho na banda L, verificado para o comprimento da EDF de 8 m, ocorre porque há um maior consumo da potência de bombeamento no EDFA, diminuindo a bomba disponível para o RFA que deixa de ser suficiente para gerar amplificação de Raman ao longo de toda a SMF.

De acordo com a figura 4.5, o comprimento mais adequado para a fibra dopada, de um HA EDFA-RFA com 40 km de fibra SMF-28, é de 4 m. Apesar da montagem com esta EDF apresentar um *ripple* mais elevado ($\sim 8,92$ dB), do que as montagens com fibras dopadas de 2 e 3 m, o ganho é mais elevado, com valor máximo de 8,92 dB, e a figura de ruído mais baixa, mantendo-se abaixo de 6 dB, para a maioria das frequências da banda em que o ganho do amplificador é positivo (187,24 – 194,24 THz).

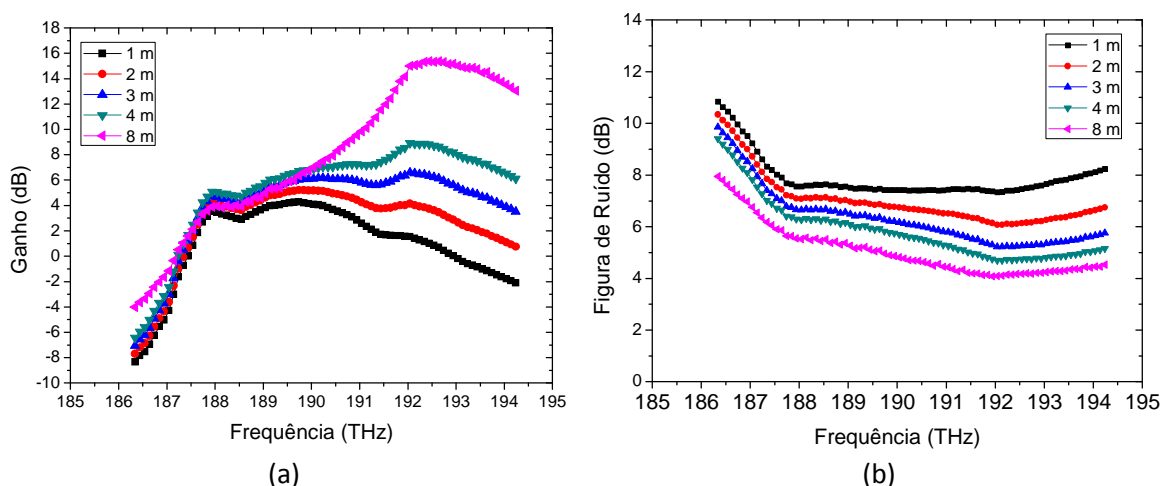


Figura 4.5 – HA com configuração EDFA-RFA: Ganho (a) e figura de ruído (b) em função da frequência dos sinais, obtidos para diferentes comprimentos da fibra dopada e 40 km de fibra SMF-28.

Experimentalmente utilizaram-se duas montagens distintas, em que ambas utilizaram uma EDF de 8 m e uma SMF de 40 km de comprimento. Numa primeira montagem experimental, o esquema utilizado foi semelhante ao ilustrado na figura 4.2, invertendo-se apenas a posição das fibras, colocando primeiro a EDF seguida da SMF. Nesta montagem os sinais com diferentes frequências foram lançados na fibra canal a canal.

A figura 4.6 contém o esquema da segunda montagem experimental. Ao equipamento utilizado no esquema da figura 4.2, foram adicionados 2 lasers do tipo ECL (OSICS-ECL 1520 e OSICS-ECL 1560 da Photonetics) e um acoplador WDM, para os sinais provenientes destes lasers. O acoplador utilizado foi o multiplexador DWDM24M1212C31 da Optilink. Nesta montagem experimental, os dois lasers introduzidos, permaneceram ligados com frequências na banda C de 193,33 e 193,50 THz com potência de -15 dBm, enquanto o restante procedimento experimental ocorreu com o lançamento individual dos canais na fibra. Esta segunda montagem experimental foi concebida com o intuito de diminuir a amplificação do ruído inicial proveniente da fonte de bombeamento na banda C.

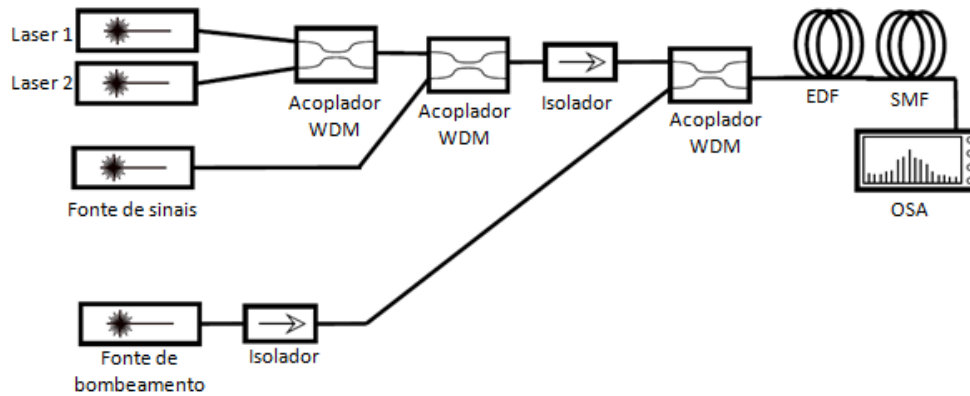


Figura 4.6 – Segunda montagem experimental para o amplificador híbrido EDFA – RFA copropagado.

Na figura 4.7 são apresentados os resultados para o ganho, figura de ruído e OSNR, em função da frequência dos sinais, para os dois cenários experimentais e para as simulações realizadas para um e oitenta canais. A montagem experimental com a introdução de dois sinais na banda C revelou, como desejado, uma diminuição da potência do ruído à saída do amplificador, diferença essa que atingiu 4,15 dB. No entanto, nesta configuração, como a potência de bombeamento é distribuída pelos três canais, o ganho diminui em relação ao obtido experimentalmente para a montagem em que não são introduzidos os dois sinais na banda C.

Quando comparadas as simulações com os resultados experimentais, a diferença mais acentuada ($\sim 6,45$ dB) é verificada na banda C, entre a simulação para um canal e o ganho obtido experimentalmente desta forma, o que se deverá ao ruído inicial presente na montagem experimental. Os resultados experimentais provenientes da montagem com a introdução dos dois sinais na banda C aproximam-se mais de uma situação multicanal, porque, neste caso, o sinal de bombeamento está a ser utilizado para amplificar três sinais com frequências distintas em simultâneo, ao contrário do que acontece na situação em que existe apenas um canal e em que toda a emissão estimulada no EDFA e todo o espalhamento de Raman estimulado no RFA contribuem para a amplificação deste único canal, pelo que o seu ganho é mais elevado. Na figura 4.7 (a) observa-se que os resultados obtidos desta forma apresentam valores de ganho muito próximos dos simulados para 80 canais. Na figura 4.7 (b) e (c) é possível verificar que a diferença entre as figuras de ruído e OSNR experimentais, obtidas com as duas montagens distintas, apresentam maior diferença na banda C, onde o ruído inicial foi atenuado na montagem identificada como Experimental 2.

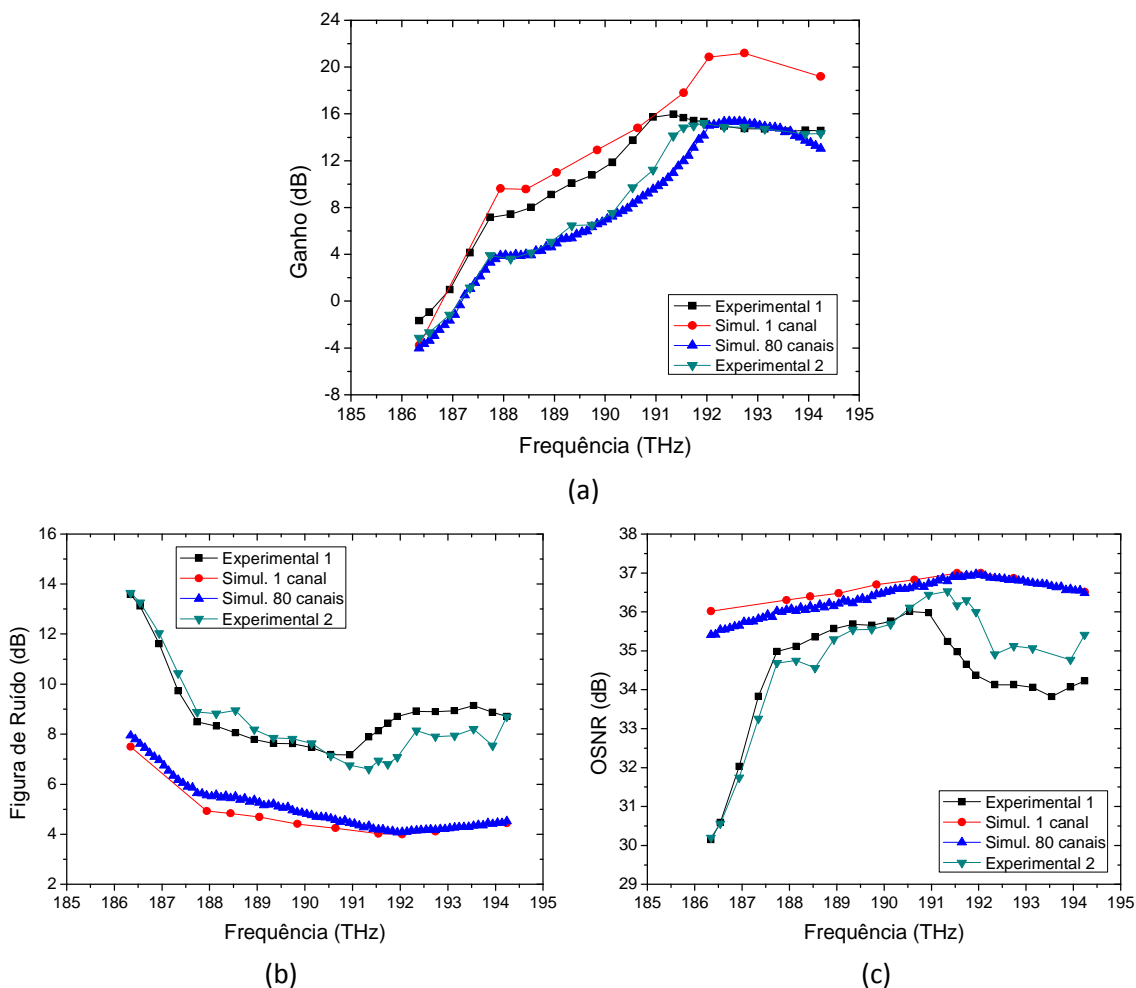


Figura 4.7 - HA com configuração EDFA-RFA: Ganho (a), figura de ruído (b) e OSNR (c), em função da frequência dos sinais. (Experimental 1 – montagem simples para 1 canal; Experimental 2 – montagem para um canal, com a introdução de dois sinais fixos na banda C)

Tal como efetuado na secção anterior, foram também averiguadas as diferenças no desempenho do amplificador híbrido EDFA-RFA para comprimentos mais elevados da SMF, com os respetivos ajustes do comprimento da fibra dopada.

Na figura 4.8 apresentam-se os resultados obtidos para o ganho e figura de ruído para diferentes combinações de comprimentos de cada um dos estágios de amplificação. Os melhores resultados em termos do conjunto de ganho máximo, equalização do ganho e figura de ruído, foram sempre obtidos para EDFAs com 4 m de comprimento, independentemente do comprimento do RFA. No entanto, caso o objetivo fosse a equalização do ganho, a escolha mais adequada recairia sobre uma EDF com apenas 2 m, que como verificado na figura 4.5 irá proporcionar menor ganho na banda C, aproximando-o dos valores obtidos para a banda L.

O aumento do comprimento da SMF conduz à redução do ganho do amplificador híbrido, porque o sinal está sujeito a uma maior atenuação ao longo da fibra. A figura de

ruído, ilustrada na figura 4.8 (b), aumenta com o crescimento da SMF. Para as montagens em que os RFAs têm comprimentos de 40 e 50 km, a figura de ruído é inferior a 6 dB para os canais com frequências entre 189,44 e 194,24 THz. Para a SMF de 50 km, o ganho máximo é de 7,56 dB, com *ripple* de 7,25 dB, na banda entre 187,84 e 194,24 THz. Para SMFs mais longas, o ganho do amplificador diminuí e a figura de ruído atinge valores superiores a 6 dB, o que limita a distância de transmissão.

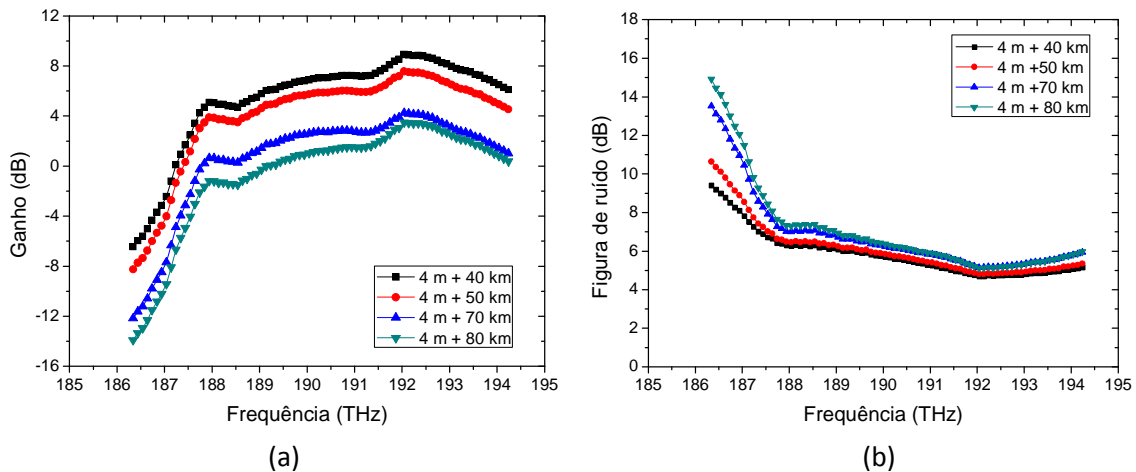


Figura 4.8 – HA com configuração EDFA-RFA: Ganho (a) e figura de ruído (b) em função da frequência dos sinais, obtidos para diferentes combinações dos comprimentos de fibra de transmissão com a fibra dopada.

4.1.3 Comparação entre configurações RFA-EDFA e EDFA-RFA

Como discutido no capítulo 1, as características necessárias para um determinado amplificador óptico, dependem daquela que será a sua aplicação.

Quando comparadas as duas configurações abordadas neste capítulo, verifica-se que o amplificador híbrido RFA-EDFA proporciona ganho mais elevado do que o EDFA-RFA, apresentando no entanto um *ripple* mais elevado. Se não fosse a limitação imposta pela figura de ruído elevada, o HA RFA-EDFA poderia ser utilizado como pós amplificador ou amplificador em linha, aplicações para as quais a equalização do ganho não é um fator determinante.

Por outro lado, o amplificador híbrido EDFA-RFA apresenta maior equalização do ganho e figura de ruído mais baixa, do que o verificado para o HA RFA-EDFA. Para as condições estudadas, estes amplificadores permitiram a amplificação ao longo de 50 km, com figura de ruído de aproximadamente 6 dB e ganho máximo de 7,56 dB, com *ripple* de 7,25 dB, na banda de frequências entre 187,44 e 194,24 THz. A equalização do ganho é possível através da otimização do comprimento da fibra dopada. Para uma SMF de 40 km, e EDF de 3 m, observa-se na figura 4.5 (a), ganho máximo de 6,61 dB, com *ripple* de

apenas 3,1 dB, numa largura de banda de 6,5 THz (187,74 – 194,24 THz). Amplificadores com ganho equalizado podem ser utilizados como pré-amplificadores.

CAPÍTULO 5

Considerações finais

5.1 Conclusões

Foi efetuado um estudo preliminar para o desenvolvimento de um amplificador híbrido EDFA/RFA para a banda C+L, bombeado por uma única fonte ótica, como era objetivo do trabalho.

Realizou-se uma caracterização individual dos amplificadores EDFA e RFA, o que permitiu compreender e prever alguns dos comportamentos observados para os amplificadores híbridos EDFA/RFA.

Na caracterização efetuada para o EDFA, observou-se que o ganho deste amplificador satura com o aumento da potência de bombeamento. A saturação do ganho foi também verificada com a diminuição da potência do sinal à entrada. Constatou-se ainda que ambas as potências de saturação variam consoante a frequência dos canais. O estudo numérico permitiu verificar que o ganho aumenta até um certo comprimento da fibra dopada, a partir do qual a continuação do aumento do comprimento causa perda acentuada de ganho na banda C, explicada pela diminuição da inversão de população. Para o EDFA estudado, verificou-se que o ganho não varia com a configuração de bombeamento. Tal como era esperado, a configuração copropagante foi a que apresentou figura de ruído mais baixa, enquanto a contrapropagante apresentou a mais elevada, e a bidirecional valores intermédios aos das outras duas configurações.

No estudo dos RFAs, verificou-se que o ganho satura com a redução da potência do sinal à entrada e que o aumento da potência de bombeamento conduz ao aumento do ganho e do *ripple* que está associado. Verificou-se o aumento da figura de ruído quer com o aumento da potência de bombeamento, quer com o aumento da potência dos sinais à entrada. De forma análoga ao que sucedeu com os EDFAs, o ganho dos RFAs aumentou com o comprimento da fibra até certo ponto. A partir de um dado comprimento limite, a amplificação deixa de se dar ao longo de toda a fibra e o ganho diminui. Confirmou-se que a curva de ganho é semelhante para as três configurações de bombeamento estudadas. Por outro lado, a configuração copropagante resultou na figura de ruído mais baixa e OSNR mais elevada. Mais uma vez, a configuração contrapropagante apresentou os resultados opostos, e a configuração bidirecional valores intermédios aos das outras duas.

Como era objetivo deste trabalho, foram de seguida estudados os desempenhos de dois amplificadores híbridos com configurações distintas: RFA-EDFA e EDFA-RFA,

ambas com apenas uma fonte de bombeamento copropagante de 1480 nm e potência de 30 dBm.

Apesar do amplificador híbrido RFA-EDFA apresentar valores de ganho mais elevados, o amplificador EDFA-RFA revelou vantagens em relação à equalização do ganho e à figura de ruído.

A principal limitação de ambas as configurações apresentadas relaciona-se com o nível da figura de ruído. Para o amplificador híbrido RFA-EDFA, todos os comprimentos analisados (entre 40 e 80 km) apresentam figuras de ruído superiores a 7 dB, o que condiciona a sua aplicação em sistemas de comunicações óticas. Para o HA EDFA-RFA, a sua utilização encontra-se limitada a um comprimento de cerca de 50 km, a partir do qual a figura de ruído é superior a 6 dB. Para este comprimento obteve-se ganho máximo de 7.56 dB, com *ripple* de 7,25 dB, na banda de frequências entre 187,84 e 194,24 THz. Caso a equalização do ganho seja um fator importante, neste último amplificador, isso é possível através do ajuste do comprimento da fibra dopada no EDFA.

Tendo em conta os resultados obtidos para os amplificadores híbridos analisados, pode concluir-se que o amplificador EDFA-RFA é mais flexível em termos de possíveis aplicações nos sistemas de comunicações óticas. Isto porque, apenas através do ajuste do comprimento da fibra dopada, pode ser utilizado como pós-amplificador ou amplificador em linha, aplicações para as quais se pode necessitar de ganhos não equalizados, ou como pré-amplificadores, para os quais a equalização do ganho é um fator determinante.

Existe ainda um caminho a percorrer em ordem a desenvolver e otimizar o amplificador híbrido proposto neste trabalho, e verificar as vantagens e desvantagens da sua aplicação aos sistemas de comunicações óticas, em relação aos amplificadores híbridos atuais. No entanto, o estudo efetuado permitiu obter resultados importantes, que serão úteis para desenvolvimento de trabalhos futuros.

5.2 Sugestões para trabalho futuro

Em trabalhos futuros a montagem experimental deverá ser aperfeiçoada, com a introdução de um filtro para a fonte de bombeamento.

De forma a desenvolver o estudo aqui iniciado, deverão ser averiguadas diferentes configurações de amplificadores híbridos EDFA/RFA de bomba única, por exemplo contrapropagantes.

A fim de concluir sobre a aplicabilidade destes amplificadores em sistemas de comunicações óticas, o estudo do desempenho na transmissão de dados será essencial.

Para que se comprovem as eventuais vantagens da utilização de um amplificador ótico híbrido de bomba única, deverá comparar-se o desempenho deste tipo de amplificador, com amplificadores híbridos equivalentes com duas fontes de bombeamento. Importante também, será efetuar o estudo tecno-económico sobre as diferenças entre utilizar uma bomba de 1 W, ou duas bombas de 500 mW cada.

Referências bibliográficas

- [Agrawal02] Agrawal, G. P., *Fiber-Optic Communications Systems*, Estados Unidos da América, John Wiley & Sons, 2002.
- [Becker99] Becker, P. M., Olsson, A. A., Simpson, J. R., *Erbium-Doped Fiber Amplifiers: Fundamentals and Technology*, Estados Unidos da América, Academic Press, 1999.
- [Bjarklev93] Bjarklev, A., *Optical Fiber Amplifiers: Design and System Applications*, Boston, Artech House, 1993.
- [Bromage04] Bromage, J., “Raman Amplification for Fiber Communications Systems”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 22, n.1, pp.79-93, janeiro 2004.
- [Chen11] Chen, Z. ,Xi, X. ,Zhang, W., Hou, J., Jiang, Z. “Low-Loss Fusion Splicing Photonic Crystal Fibers and Double Cladding Fibers by Controlled Hole Collapse and Tapering”, *Journal of Lightwave*, Vol. 29, n. 24, pp. 3744-3747, dezembro 2011.
- [Chung 99] Chung, H. S., Lee, M. S., Lee, D., Park, N., DiGiovanni, D. J., “Low noise, high efficiency L-band EDFA with 980 pumping”, *Electronics Letters*, Vol. 35, n. 13, pp. 1099-1100, junho 1999.
- [DeLange70] DeLange, O.E., Wide-Band Optical Communication Systems: Part II – Frequency-Division Multiplexing, *Proceedings of the IEEE*, vol. 58. n. 10, pp 1683-1970, outubro 1970.
- [Desurvire94] Desurvire, E., *Erbium-Doped Fiber Amplifiers: Principles and Applications*, Nova Iorque, John Wiley & Sons, 1994.
- [Desurvire02] Desurvire, E., Bayart, D., Desthieux, B., Bigo, S., *Erbium-Doped Fiber Amplifiers: Device and Systems Developments*, Nova Iorque, John Wiley & Sons, 2002.
- [Fugihara08] Fugihara, M. C., Pinto, A. N., “Low-Cost Raman Amplifier for CWDM Systems”, *Microwave and optical technology Letters*, Vol. 50, n. 2, pp. 297-301, fevereiro 2008.
- [Gariépy09] Gariépy, D. e He, G., “Measuring OSNR in WDM systems-effects of resolution bandwidth and optical rejection ratio”, *EXPO Electro-Optical Engineering*, Application note 098, 2009.

- [Guo11] Guo, M. N., Liaw, S.-K., Shum, P. P., Chen, N.-K., Hung, H.-K., Lin, C., "Single-wavelength-pump bi-directional hybrid amplifier for bi-directional local area network application", *Optics Communications*, Vol. 284, pp. 573-578, janeiro 2011.
- [Hapanowicz01] Hapanowicz, R., "Erbium Doped Fiber Characterization", Universidade Dumlupinar, junho, 2001. Disponível em http://mf.dumlupinar.edu.tr/~photonics/EDF_Characterization.pdf
- [Headley05] Headley, C., Agrawal, G. P., *Raman Amplification in Fiber Optical Communications Systems*, Estados Unidos da América, Elsevier Academic Press, 2005.
- [Healy07] Healy, T., Gunning, F. C. G., Pincemin, E., Cuenot, B., Ellis, A. D., "1,200 km SMF (100 km spans) 280 Gbit/s Coherent WDM Transmission using Hybrid Raman/EDFA Amplification", *European Conference on Optical Communications*, Berlin, setembro 2007.
- [Hensen98] Hansen, P. B., Eskildsen, L., Stentz, A.J., Strasser, T. A. , Judins, J., DeMarco, J. J., Pedrazzani, R., DiGiovanni, D. J., "Rayleigh Scattering Limitations in Distributed Raman Pre-Amplifiers", *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 1, pp. 159-161, janeiro 1998.
- [Islam04] Islam, M. N., *Raman Amplifiers for Telecommunications: Physical Principles*, Vol. 1, Nova Iorque, Springer, 2004.
- [Keita06] Keita, K., Delaye, P., Frey, R., Roosen, G., "Relative intensity noise transfer of large-bandwidth pump lasers in Raman fiber amplifiers", *Journal of Optical Society of America B*, Vol. 23, n. 12, pp. 2479-2485, dezembro 2006.
- [Liaw06] Shien-Kuei Liaw, "Investigate C+L Band EDFA/Raman Amplifiers by Using the Same Pump Lasers", *Proceedings of 9th Joint Conference on Information Sciences (JCIS2006)*, Artigo PNC-II, outubro 2006.
- [Liaw09] Liaw, S., Dou, L., Xu, A., Huang, Y., Optimally gain-flattened and dispersion-managed C+L-band hybrid amplifier using a single-wavelength pump laser, *Optics Communications* , n.282, pp. 4087-4090 , 2009.
- [Masuda97] Masuda, H., Suzuki, K.-I., Kawai, S., Aida, K., "Ultra-wideband optical amplification with 3 dB bandwidth of 65 nm using a gain-equalised two-stage erbium-doped fiber amplifier and Raman amplification", *Electronics Letters*, Vol. 33, n. 9, pp. 753-754, abril 1997.

- [Masuda00] Masuda, H., "Review of wideband hybrid amplifiers", *Optical Fiber Communications Conference*, Vol. 1, pp. 2-4, Baltimore, 2000.
- [Pizzinat03] Pizzinat, A., Santagiustina, M., Schivo, C., "Impact of Hybrid EDFA-Distributed Raman Amplification on a 4 x 40-Gb/s WDM Optical Communication System", *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 15, n. 2, fevereiro 2003.
- [Radic02] Radic, S., Chandrasekhar, S., Bernasconi, P., Centanni, J., Abraham, C., Copner, N., Tan, K., "Feasibility of Hybrid Raman/EDFA Amplification in Bidirectional Optical Transmission", *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 14, n. 2, fevereiro 2002.
- [Raman28] Raman, C.V., Krishnan K.S., "A new type of secondary radiation", *Nature (London)*, n. 121, pp. 501-502, 1928.
- [Rocha07] Rocha, A. M. S., *Amplificação de Raman Baseada em Fontes Ópticas Incoerentes*, Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro, 2007.
- [Shimada94] Shimada, S., Ishio, H., *Optical Amplifiers and their Applications*, Jonh Wiley & Sons, 1994.
- [Stolen72] Stolen, R. H., Ippen, E. P., "Raman gain in glass optical waveguides", *Applied Physics Letters*, Vol. 22, n. 6, pp. 276-278, março 1973.
- [Stolen80] Stolen, R. H., "Nonlinearity in Fiber Transmission", *Proceedings of the EEE*, Vol. 68, n. 10, pp. 1232-1236, outubro 1980.
- [Sun99] Sun, Y., Srivastava, A. K., Zhou, J., Sulhoff, J. W., "Optical Fiber Amplifiers for WDM Optical Networks", *Bell Labs Technical Journal*, pp.187-206, janeiro-março 1999.
- [Tiwari09] Tiwari, U., Thyagarajan, K., Shenoy, M. R., "Simulation and experimental characterization of Raman/EDFA hybrid amplifier with enhanced performance", *Optics Communications*, Vol. 282, n. 8, pp. 1563-1566, abril 2009.
- [Vasile07] Vasile, F. I., Schiopu, P., "The determination of the saturation power for erbium doped fiber amplifier", *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, Vol. 6, n. 4, pp. 1207-1212, dezembro 2004.
- [Woodbury62] Woodbury, E. J., Ng, W. K., "Ruby operation in the Near Ir", *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, 50, p. 2367, 1962.

- [Yucel11] Yucel, M., Goktas, H. H., Celebi, F. V., "Temperature independent length optimization of L-band EDFAs providing flat gain", *Optik – International Journal for Light and Electron Optics*, Vol. 122, n. 10, pp. 872-876, maio 2011.