

UNIVERSIDADE PRESBITERIANA MACKENZIE

Jair Fiuza de Toledo

Análise de um Amplificador *Raman* Distribuído nas Bandas S^+ e S
Utilizando a Fibra Óptica *TrueWave[®] Reach – Low Water Peak*

São Paulo
2006

Jair Fiuza de Toledo

Análise de um Amplificador *Raman* Distribuído nas Bandas S^+ e S^-
Utilizando a Fibra Óptica *TrueWave[®] Reach – Low Water Peak*

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-graduação em Engenharia
Elétrica da Universidade Presbiteriana
Mackenzie, como parte das exigências para
obtenção do Título de Mestre.

Orientadora Prof^a. Dr^a. Maria Aparecida G. Martinez

São Paulo
2006

Fiuza de Toledo, Jair

Análise de um Amplificador *Raman* Distribuído nas Bandas S^+ e S Utilizando a Fibra Óptica *TrueWave[®] Reach Low Water Peak*

São Paulo, Julho de 2006

pp. **80**

Dissertação de Mestrado – Universidade Presbiteriana Mackenzie,
Departamento de Engenharia Elétrica – Área de Telecomunicações

1. Efeito *Raman*, 2. Amplificação *Raman* distribuída, 3. *TrueWave[®] Reach Low Water Peak*, 4. Eficiência de ganho *Raman*, 5. Equações acopladas e 6. Ganho líquido e ganho *on-off*

Universidade Presbiteriana Mackenzie, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica – Área de Telecomunicações

Agradecimentos

Meus agradecimentos à Prof^a. Dr^a. Maria Aparecida G. Martinez, pois sem seus conhecimentos, sua capacidade de transmiti-los e de estabelecer desafios com dificuldades progressivas, este trabalho não seria possível. Sua dedicação, disponibilidade e rigor mais que contribuíram para a qualidade deste trabalho.

Agradeço ao colega Fausto Mizutani, que dedicou bastante do seu tempo em nossas longas conversas sobre o assunto, e Dario Bugatti pela ajuda.

Agradeço aos professores e colegas do Mackenzie pelo apoio.

Agradeço ao *Ole Lumholt*, da *OFS Fitel Denmark ApS*, pela sua enorme colaboração, gentilmente fornecendo informações.

Agradeço aos amigos por estarem presentes nos momentos de necessidade.

Aos meus Pais Alice e José, que me educaram sob a luz da verdade e do amor, meus Filhos Nathália e Marcelo, e minha Namorada Luciana, por entenderem os momentos de ausência, e pelo apoio incondicional de sempre. Muito obrigado.

Resumo

O desempenho de um amplificador *Raman* distribuído na *Banda – S* utilizando a fibra óptica *TrueWave[®] Reach – Low Water Peak* em um enlace de 100km é analisado através de simulações numéricas. O fabricante, a *OFS Fitel Denmark Ap*, caracterizou experimentalmente os parâmetros físicos da fibra óptica, tais como atenuação, dispersão, e eficiência de ganho *Raman* na *Banda – S*. A baixa absorção dessa fibra óptica na região espectral onde se localizam os *lasers* de bombeamento, em torno de $0,34\text{dB/km}$ para 1370nm , permite a utilização de 4 *lasers* de bombeamento com potências da ordem de dezenas de *mWatts*, para garantir um ganho *on-off* da ordem de 10dB em 70nm (1460 a 1530nm) na *Banda – S*.

Abstract

The performance of a distributed Raman amplifier at S – Band using the TrueWave® Reach – Low Water Peak fiber in a 100km span is analyzed through numerical simulations. The manufacturer, the OFS Fitel Denmark Ap, has experimentally characterized the physical parameters of the fiber, such as, attenuation, dispersion and Raman gain efficiency at Band – S . The low fiber attenuation around pump wavelength region, around 0,34 dB/km at 1370nm, allow the achievement of approximately 10dB over 70nm in the S – Band using 4 (four) pump lasers with pump power on the order of tenth of mWatts .

Índice analítico

Capítulo 1	10
Introdução.....	10
Capítulo 2	14
Fundamentos da amplificação <i>Raman</i> distribuída.....	14
2.1 Introdução.....	14
2.2 Espalhamento <i>Raman</i> espontâneo	15
2.3 Espalhamento <i>Raman</i> estimulado.....	17
2.4 Amplificador <i>Raman</i>	20
2.5 Amplificador <i>Raman</i> distribuído.....	23
2.6 Configurações do amplificador <i>Raman</i> distribuído.....	28
2.6.1 Amplificação <i>Raman</i> com <i>laser</i> de bombeamento co-propagante.....	29
2.6.2 Amplificação <i>Raman</i> com <i>laser</i> de bombeamento contra-propagante.....	29
2.6.3 Amplificação <i>Raman</i> com <i>lasers</i> de bombeamento combinados.....	30
Capítulo 3	32
A fibra óptica <i>TrueWave</i> [®] <i>Reach Fiber Low Water Peak</i>	32
3.1 Atenuação, área efetiva e eficiência de ganho <i>Raman</i> na <i>Banda – S</i> para a fibra óptica <i>TW</i> [®] <i>RFLWP</i>	32
3.2 Estimativa da eficiência de ganho <i>Raman</i> para <i>lasers</i> de bombeamento em outros comprimentos de onda.....	36
3.3 Eficiência de ganho <i>Raman</i> devido à interação entre os <i>lasers</i> de bombeamento ...	41
Capítulo 4	45
Análise da amplificação <i>Raman</i> distribuída na <i>Banda – S</i>	45
4.1 Equações da amplificação <i>Raman</i> distribuída.....	45

4.2	Análise da amplificação distribuída devido ao acoplamento entre os sinais e os <i>lasers</i> de bombeamento pares/gêmeos	50
4.3	Análise da amplificação distribuída devido ao acoplamento entre os sinais e os múltiplos <i>lasers</i> de bombeamento.	64
4.4	Análise da amplificação distribuída devido ao acoplamento entre os múltiplos <i>lasers</i> de bombeamento.	67
4.5.	Discussões finais	71
5	Conclusão	74
6	Referências	77

Lista de abreviaturas

<i>ASE</i>	<i>Amplified Spontaneous Emission</i>
<i>CWDM</i>	<i>Coarse Wavelength Division Multiplexing</i>
<i>DCF</i>	<i>Dispersion Compensating Fiber</i>
<i>DRA</i>	<i>Distributed Raman Amplifier</i>
<i>DSF</i>	<i>Dispersion Shifted Fiber</i>
<i>DWDM</i>	<i>Dense Wavelength-Division Multiplexing</i>
<i>EDFA</i>	<i>Erbium-Doped Fiber Amplifier</i>
<i>FWM</i>	<i>Four-Wave Mixing</i>
<i>LRA</i>	<i>Lumped Raman Amplifiers</i>
<i>NF</i>	<i>Noise Figure</i>
<i>NG</i>	<i>Net Gain</i>
<i>OSNR</i>	<i>Optical Signal-to-Noise Ratio</i>
<i>PDFFA</i>	<i>Praseodymium-doped fluoride fiber amplifier</i>
<i>SOA</i>	<i>Semiconductor Optical Amplifier;</i>
<i>SG</i>	<i>Signal Gain</i>
<i>SSMF</i>	<i>Standard Single Mode Fiber</i>
<i>SNR</i>	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>
<i>SRS</i>	<i>Stimulated Raman Scattering</i>
<i>TDFA</i>	<i>Thulium-Doped Fiber Amplifier</i>
<i>TW®FLWP</i>	<i>TrueWave® Reach Fiber Low Water Peak</i>

Capítulo 1

Introdução

A amplificação na *Banda – S* (1460 a 1530nm) é a próxima fronteira na evolução dos amplificadores ópticos. A *Banda – S* é adjacente à *Banda – C* (1530 a 1565nm) e menos sensível a perdas por curvatura do que para os comprimentos de onda acima de 1625nm. Apenas alguns poucos experimentos de transmissão de dados a altas taxas foram demonstrados na *Banda – S* [1].

Embora a demanda por aumento da capacidade de transmissão tenha diminuído no curto prazo, os avanços no desenvolvimento de amplificadores ópticos operando na *Banda – S* continuam crescendo [2]. Os desafios técnicos são inúmeros. A *Banda – S* tem 70nm de largura, portanto, o dobro do valor necessário para operação na *Banda – C*. Este fato torna muito difícil a obtenção de ganho plano cobrindo toda banda S, e como consequência esta vem sendo dividida na prática em *Banda – S⁺* (1460 a 1490nm) e *Banda – S* (1490 a 1530nm).

As tecnologias mais exploradas para amplificadores na *Banda – S* são os amplificadores *Raman* (*RA – Raman Amplifiers*) e os amplificadores de fibra óptica dopada com túlio (*TDFFA – Thulium Doped Fiber Amplifier*). Estes podem ser combinados, em uma configuração híbrida para obtenção de ganho plano na banda.

Como nas fibras ópticas dopadas com íons de érbio, a origem do ganho nos *TDFFA* é oriunda da emissão estimulada pelos íons dopantes, nesse caso túlio. No entanto o processo de

emissão estimulada por íons de túlio envolve íons acima do estado fundamental, tornando o processo de inversão de população menos eficiente do que no caso de íons de érbio [3].

Para contornar essa limitação várias configurações de *lasers* de bombeamento foram exploradas para otimizar o processo de emissão estimulada. O amplificador dopado a túlio de melhor desempenho tem pico de ganho em torno de 1470nm , e ganho suficiente para operação em 30nm na faixa de 1455 a 1485nm , *Banda-S⁺*. Estes são usualmente bombeados no comprimento de onda de 1050nm com *lasers* de itérbio bombeados por *lasers* de diodo. Estes apresentam um ganho de pequenos sinais em torno de 25dB e uma figura de ruído menor do que 7dB . O ganho destes dispositivos cai para comprimentos de onda acima de 1485nm . A extensão da operação dos *TDFAs* para comprimentos de onda acima de 1485nm tem sido explorada através de aplicação de alta dopagem de íons de túlio no núcleo da fibra óptica [3] ou a utilização de configurações de *lasers* bombeamento com dois comprimentos de onda [4]. Ambas apresentam ganho e banda limitados.

Os amplificadores *Raman* têm como seu maior atrativo a flexibilidade de se obter ganho em toda faixa de transmissão de uma fibra óptica. Esta flexibilidade depende apenas da disponibilidade de *lasers* de bombeamento em comprimentos de onda deslocados de $13,2\text{THz}$ para frequências mais altas (comprimentos de onda mais curtos) relativo aos valores do comprimento de onda da banda que se deseja operar [5]. Os amplificadores *Raman* discretos (*LRA – Lumped Raman Amplifiers*) são unidades discretas constituídas de alguns quilômetros de fibras ópticas e *lasers* de bombeamento montados no início e/ou final da fibra óptica. Usualmente estes utilizam fibras ópticas compensadoras de dispersão cujo raio de núcleo pequeno viabiliza um ganho de 5 a 10 vezes maior do que em fibras ópticas padrão. Alternativamente os amplificadores *Raman* distribuídos (*DRA – Distributed Raman*

Amplifiers) utilizam o próprio meio de transmissão como meio de ganho. Os *lasers* de bombeamento são lançados no final da fibra óptica, transferindo potência para os sinais que foram atenuados ao longo do enlace. O lançamento do sinal no final do enlace evita o aparecimento de efeitos não-lineares oriundos de altos níveis de potência de pico de sinal, o que é mais crítico no caso do sinal ser lançado no início da fibra óptica. Os amplificadores *Raman* distribuídos produzem baixo ruído se comparados com os discretos [5].

A atenuação na *Banda – S* é aumentada em 6% devido ao espalhamento *Rayleigh* em comparação com a *Banda – C* [6]. Sendo assim é necessário um ganho maior para garantir amplificação em um enlace de mesma distância. O comprimento de onda do *laser* de bombeamento necessário para operação na *Banda – S* localiza-se na região de absorção das moléculas de água da fibra óptica, centrada em torno de $1382nm$. Esta região se caracteriza pelas altas perdas. Uma maior perda se traduz em um maior nível de potência necessária para se atingir um mesmo nível de ganho, um menor comprimento efetivo e conseqüentemente maior ruído [7 e 8].

Neste trabalho alguns dos desafios técnicos para obtenção de amplificação *Raman* distribuída na *Banda – S* serão investigados e analisados através de simulações numéricas. Nestas os valores medidos da eficiência de ganho *Raman* de uma fibra óptica de baixa atenuação na região espectral em torno da absorção das moléculas de água, mais especificamente, a fibra óptica *TW®FLWP – TrueWave® Reach Fiber Low Water Peak* e outros parâmetros físicos também medidos como o coeficiente de dispersão, a área efetiva, e atenuação em função do comprimento de onda serão utilizados para analisar o desempenho da amplificação *Raman* distribuída em um enlace de fibra óptica de $100km$. A análise e desempenho da amplificação *Raman* distribuída será conduzida através da implementação das

equações que regem o comportamento do sinal e do *laser* de bombeamento ao longo do enlace para amplificação em toda *Banda – S*, ou seja, 70nm .

O desempenho da amplificação depende da interação entre os múltiplos sinais e múltiplos *lasers* de bombeamento, entre os múltiplos *lasers* de bombeamento, entre os múltiplos sinais, do retro espalhamento *Rayleigh* e do espalhamento *Raman* espontâneo amplificado. Além disso, essa fibra óptica apresenta o zero de dispersão nos comprimentos de onda dentro da *Banda – S*. Sendo assim produtos de mistura de quatro ondas (*FWM – Four Wave Mixing*) afetam o desempenho do amplificador. As análises apresentadas nesse trabalho não consideram o retro espalhamento *Rayleigh*, interação entre múltiplos sinais e os produtos de mistura de quatro ondas.

No capítulo 2, alguns conceitos importantes e essenciais à compreensão desse trabalho serão revisados, entre estes, o espalhamento *Raman* espontâneo e estimulado, a amplificação *Raman* e os amplificadores *Raman* discretos e distribuídos. No capítulo 3, as características físicas da fibra óptica utilizada nesse trabalho, a fibra óptica *TW®FLWP*, serão discutidas e exploradas, assim como a faixa espectral dos *lasers* de bombeamento necessários para cobrir a operação na *Banda – S*. Adicionalmente, a eficiência de ganho *Raman* para os *lasers* de bombeamento situados nessa faixa espectral será estimada a partir de valores experimentais. No capítulo 4, os parâmetros físicos e estimados introduzidos no capítulo 3 serão utilizados para simular numericamente o desempenho da amplificação *Raman* ao longo de um enlace de 100km . As conclusões do trabalho são discutidas no capítulo 5.

Capítulo 2

Fundamentos da amplificação *Raman* distribuída

O objetivo desse capítulo é introduzir conceitos físicos importantes para compreensão da amplificação *Raman* distribuída. Entres estes se destacam o espalhamento *Raman* espontâneo e o estimulado, e o espectro de ganho. Adicionalmente, os princípios de funcionamento dos amplificadores *Raman* distribuídos são introduzidos e as diferentes configurações de operação revisadas.

2.1 Introdução

O interesse pela amplificação *Raman* tem sua origem em três importantes características. A primeira é a sua capacidade de fornecer amplificação distribuída, ou seja, o sinal é amplificado à medida que se propaga na fibra óptica. A segunda é a possibilidade de fornecer ganho em qualquer comprimento de onda através da escolha de comprimentos de onda de *lasers* de bombeamento adequados. E a terceira, é o fato de que a largura de banda da amplificação pode ser expandida simplesmente adicionando-se mais comprimentos de onda de *laser* de bombeamento.

A perda sofrida pelo sinal é contra balanceada pelo amplificador distribuído em cada ponto do enlace ao longo da fibra óptica. Portanto, o amplificador distribuído é um balanceador da perda intrínseca da fibra óptica.

Nos anos 80, a amplificação *Raman* foi reconhecida como uma forma de compensar a atenuação nas fibras ópticas, e foram desenvolvidas pesquisas em sistemas de transmissão de longo alcance para demonstrar a transmissão ao longo de vários milhares de quilômetros usando amplificação *Raman* distribuída [9]. Porém, com o desenvolvimento e comercialização dos *EDFAs* no início dos anos 90, os trabalhos com os amplificadores *Raman* distribuídos deixaram de ser interessantes devido à baixa eficiência de potência do *laser* de bombeamento quando comparada à do *EDFA*.

Em meados dos anos 90, e nos anos seguintes, com a disponibilização de *lasers* de bombeamento de alta potência, vários experimentos de sistemas demonstraram os benefícios da amplificação *Raman* distribuída, incluindo experimentos submarinos sem repetidores [10] e terrestres de alta capacidade [11 e 12].

2.2 Espalhamento *Raman* espontâneo

O espalhamento *Raman* foi descoberto independente e quase simultaneamente em 1928 por grupos de pesquisa na Índia e Rússia [13 e 14], e se *Chandrasekhara Venkata Raman* não tivesse publicado o seu trabalho primeiro, o espalhamento *Raman* poderia ser conhecido como efeito *Landsberg-Mandelstam*. *Raman* recebeu o *Premio Nobel* em 1930 pela descoberta, mas não o compartilhou com os russos.

Para um entendimento do espalhamento *Raman* espontâneo, vamos considerar uma fonte de luz incidindo em um material, que pode ser sólido, líquido ou gás, com a luz espalhada sendo observada espectroscopicamente, como mostrado na Figura 1.

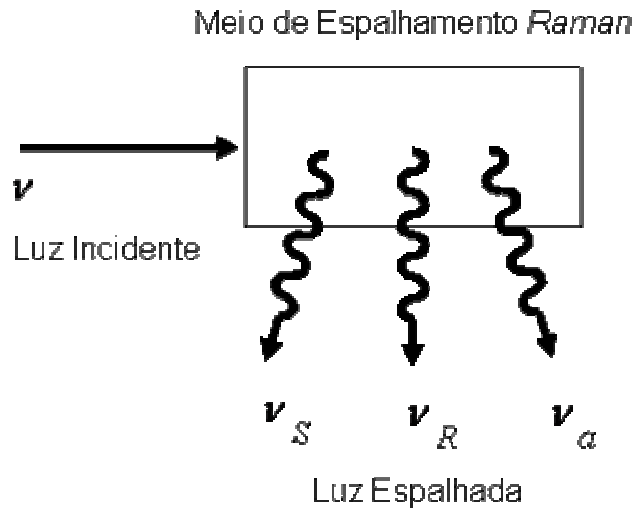


Figura 1. Diagrama do espalhamento *Raman* espontâneo. ν_S é a frequência deslocada para baixo, em relação à luz incidente, chamada de onda *Stokes* e ν_a onda anti-*Stokes*, deslocada para cima.

Em geral, a luz espalhada contém frequências diferentes daquelas da fonte incidente. Para a luz espalhada, as frequências deslocadas para baixo são chamadas frequências de *Stokes*, e as deslocadas para cima frequências anti-*Stokes*. As linhas *Stokes* são tipicamente ordens de magnitude mais intensas que as anti-*Stokes*.

O espalhamento *Raman* espontâneo também pode ser entendido através da utilização do diagrama de níveis de energia mostrado na Figura 2. O espalhamento *Raman Stokes* é a transição do estado de energia mais baixa, estado fundamental g , para um estado virtual associado a um estado excitado, estado n' , seguido de uma outra transição desse estado virtual para o estado final, estado n . O espalhamento *Raman anti-Stokes* é a transição do nível n para o nível g com n' servindo como nível intermediário.

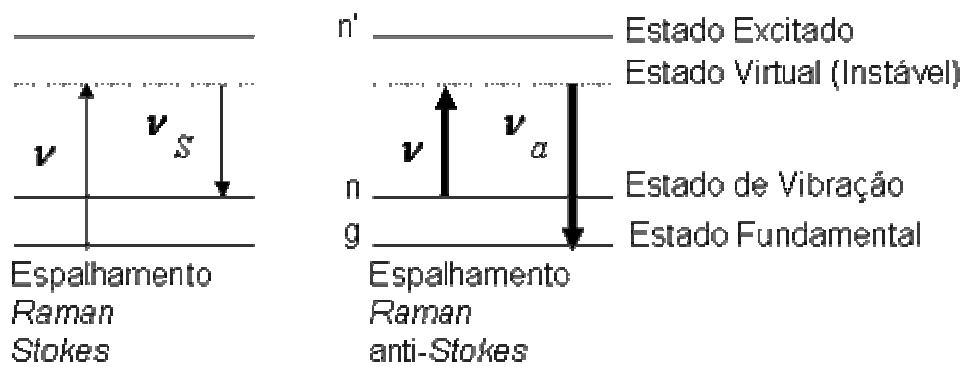


Figura 2. Diagrama de níveis de energia descrevendo o espalhamento *Raman Stokes* e o espalhamento *Raman anti-Stokes*.

As linhas *anti-Stokes* são tipicamente muito mais fracas que as *Stokes* porque, em equilíbrio térmico, a população no nível n é menor que a população no nível g pelo fator de Boltzmann $e^{(-h\omega_{ng}/kT)}$ [15].

2.3 Espalhamento *Raman* estimulado

O espalhamento *Raman* espontâneo é tipicamente um fenômeno fraco. Mesmo para uma matéria densa, a seção de choque de espalhamento por unidade de volume para o espalhamento *Raman* espontâneo é de aproximadamente $10^{-6} 1/cm$. Portanto, ao se propagar por um meio de espalhamento *Raman* de $1cm$, somente aproximadamente 1 parte em 10^6 da radiação incidente será espalhada na frequência *Stokes*.

Porém, sob a excitação de uma intensa fonte de *laser*, pode ocorrer um espalhamento altamente eficiente denominado espalhamento *Raman* estimulado (*SRS – stimulated Raman scattering*). O *SRS* é um processo de espalhamento através do qual 10% ou mais da energia da fonte de *laser* incidente é frequentemente convertida em frequência *Stokes*. Uma outra diferença entre os espalhamentos *Raman* espontâneo e estimulado, é que o espontâneo

acontece em uma emissão isotrópica e o estimulado em um cone nos sentidos co-propagante e contra-propagante. O *SRS* foi descoberto por *Woodburry* e *Ng* em 1962.

Um modelo clássico para descrever o *SRS* assume que a radiação óptica interage com um modo vibracional de uma molécula, conforme mostrado na Figura 3.

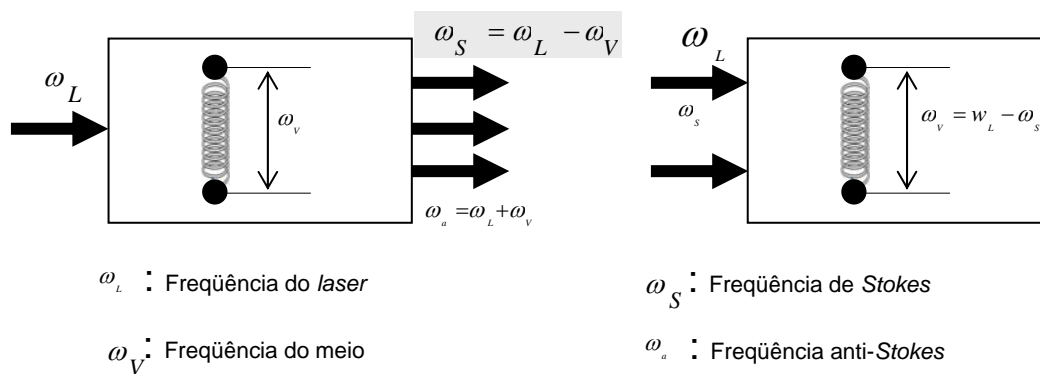


Figura 3. Diagrama descrevendo o *SRS* através de um modelo clássico.

Na Figura 3, as vibrações moleculares modulam o índice de refração do meio, de frequência ω_V , e impõem frequências laterais no *laser*, e o campo *Stokes* na frequência $\omega_S = \omega_L - \omega_V$ interage com o *laser* para produzir a modulação de intensidade total, que modulada coerentemente, excita a oscilação molecular na frequência $\omega_V = \omega_L - \omega_S$.

3. Espectro de ganho *Raman*

O espectro de ganho *Raman* é a distribuição de todas as frequências *Stokes* geradas através do espalhamento *Raman*, e depende da frequência da luz incidente e do material. Em geral, o ganho máximo ocorre em uma frequência de bombeamento $13,2\text{THz}$ acima da frequência do sinal.

A figura 4 mostra a eficiência de ganho *Raman* para três diferentes tipos de fibra óptica [16].

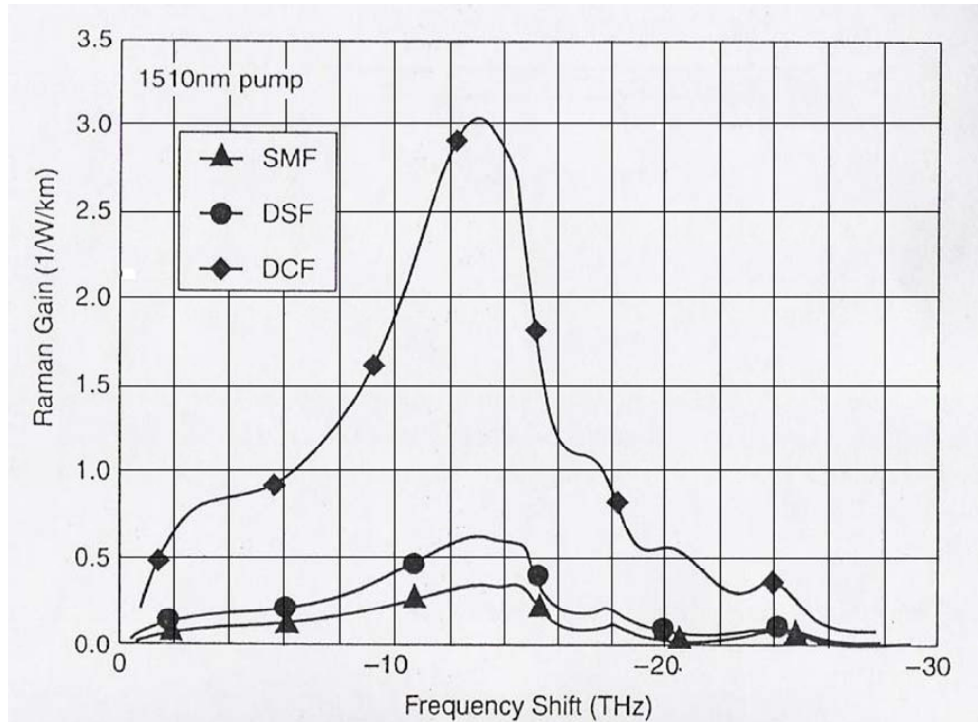


Figura 4. Eficiência de ganho *Raman* para a *SSMF* – *Standard Single-mode Fiber*, *DSF* – *Dispersion Shifted Fiber* e *DCF* – *Dispersion Compensating Fiber*, com o comprimento de onda do *laser* de bombeamento em 1510nm.

O espalhamento *Raman* pode ser usado para amplificar sinais ópticos desde que se propaguem em uma fibra óptica junto com um *laser* de bombeamento de alta potência e que a diferença entre as frequências dos sinais esteja dentro do espectro de ganho *Raman*. O *laser* de bombeamento é o sinal de alta potência que será espalhado inelasticamente para produzir fótons na frequência *Stokes*, que é a frequência do sinal que se deseja amplificar. Como o sinal se propaga na mesma fibra óptica que o *laser* de bombeamento, ele estimula a emissão de fótons na mesma frequência e na mesma modulação que ele.

2.4 Amplificador *Raman*

As fibras ópticas atenuam a propagação da luz como qualquer outro material. No caso da fibra óptica de sílica, a atenuação é relativamente muito pequena, e particularmente no intervalo de comprimento de onda de $1000nm$ a $1600nm$ está entre $0dB/km$ e $1dB/km$, sendo $0,2dB/km$ para $1550nm$. No caso de um sistema de comunicação de fibra óptica de longa distância, alcançando milhares de quilômetros, a recuperação da potência de sinal perdida é feita por repetidores de sinal, com o sinal óptico sendo recebido por um receptor, passado por uma conversão óptica-elétrica, por uma amplificação elétrica, por uma re-temporização, por uma re-formatação, e por uma conversão elétrica-óptica, e então reenviado por um transmissor.

O distanciamento entre repetidores é um fator importante no desenho de sistemas de transmissão. Repetidores posicionados a pequenas distâncias implicam em custos elevados, enquanto posicionados a longas distâncias tornam-se um desafio técnico. Em muitos trabalhos publicados, o comprimento dos enlaces tem sido definido ao redor dos $80km$ a $100km$ para transmissão terrestre de longa distância. Recentemente, foi publicado um trabalho sobre um sistema, sem erros, com 40 canais a $10Gb/s$ de $2400km$, com enlaces de $200km$. Esse resultado foi possível devido aos altos níveis de ganho *Raman*, tais como $22dB$ de contra-propagação e $14,5dB$ de co-propagação [17].

Esses regeneradores se tornaram complexos e caros, e vários tipos de amplificadores ópticos foram estudados e desenvolvidos durante os anos 80. Amplificadores de *laser* semicondutor foram estudados inicialmente, mas o interesse foi direcionado para amplificadores baseados em fibra óptica devido às questões práticas relacionadas às perdas,

polarização, e *crosstalk*. Amplificadores fibra-*Raman* requeriam alta potência do *laser* de bombeamento, entre 0,5W e 1,0W, e amplificadores fibra-*Brillouin* podiam operar em baixa potência do *laser* de bombeamento, mas em pequena largura de banda.

Com a demanda por maiores distâncias, amplificadores ópticos se tornaram componentes essenciais em sistemas de transmissão para longas distâncias. O *SOA* – *semiconductor optical amplifier*, o *EDFA* e o *Raman optical amplifier* diminuíram os efeitos de dispersão e atenuação melhorando o desempenho de sistemas de transmissão para longas distâncias. Um outro tipo de amplificador óptico, o *PDFFA* – *Praseodymium-doped fluoride fiber amplifier*, utilizando fibra óptica confeccionada com *Zirconium Fluoride* ou *Hafnium Fluoride*, mostrou alguma promessa, mas ainda não apresentou o desempenho necessário para aplicações em banda larga [2].

Os amplificadores ópticos desempenharam um importante papel na revolução das telecomunicações que se iniciou nos anos 90. Pela primeira vez, sistemas de comunicações de ópticos usando amplificadores internos puderam operar em múltiplos enlaces de fibra óptica sem altos custos de regeneração.

Uma vantagem muito importante dos amplificadores *Raman* é sua capacidade de fornecer ganho para qualquer comprimento de onda de sinal [18 e 19], e permitir sua distribuição ao longo do enlace de transmissão [17], ao contrário dos amplificadores ópticos baseados em íons terras-raras. Essa característica torna o amplificador *Raman* particularmente atrativo para sistemas de comunicação por ondas de luz, nos quais existe uma grande necessidade de se aumentar continuamente a quantidade de comprimentos de onda de sinais aumentando a largura de banda de transmissão em sistemas *DWDM* – *Dense Wavelength-*

division Multiplexing. A janela de comprimentos de onda sobre a qual a amplificação é obtida é conseguida simplesmente pela combinação de múltiplos comprimentos de onda de *lasers* de bombeamento.

Em adição à capacidade de fornecer ganho em qualquer largura de comprimentos de onda, o amplificador *Raman* oferece também um ótimo desempenho de ruído. Uma vez que a amplificação ocorre em um significativo comprimento da própria fibra óptica, tipicamente 20km, a potência de sinal não cai tanto quanto cairia em um sistema convencional baseado em *lumped amplification* (amplificação discreta). Assim, o *SNR* – *signal-to-noise ratio* na amplificação distribuída é melhor que na amplificação discreta.

Portanto, o amplificador *Raman* é uma maneira muito simples de se obter o cancelamento da perda em fibras ópticas. Tudo que é necessário para tornar uma fibra óptica de transmissão em amplificador é lançar uma luz de *laser* de bombeamento junto com a luz de sinal.

Com a colocação de *lasers* de bombeamento com apropriados comprimentos de onda em posições apropriadas no enlace de fibra óptica, pode ser obtido um ganho plano e com a largura de banda em qualquer comprimento de onda, distribuído ao longo da fibra óptica de transmissão, ou em “*lumped*” (discreto) elementos tais como módulos compensadores de dispersão [17].

Os amplificadores *Raman* apresentam as seguintes propriedades:

- A amplificação por efeito *Raman* pode ser indistintamente usada em todas as fibras ópticas até hoje instaladas nas redes de telecomunicações;

- O ganho, dentro do espectro fotônico, pode ser ajustado ou adequado, pela injeção de *lasers* de bombeamento operando em diversos comprimentos de onda;
- O ganho ocorre longe do final da fibra óptica, e para uma determinada potência do *laser* de bombeamento, é aproximadamente inversamente proporcional à área efetiva (A_{eff} - *effective area*) da fibra óptica. Por exemplo, para uma dada potência do *laser* de bombeamento, o ganho *Raman* em uma fibra óptica com uma $A_{eff} = 80 \mu m^2$ é quase 30 % maior que em uma fibra óptica com $A_{eff} = 102 \mu m^2$ [20];
- O ganho, ao contrário de outros tipos de amplificadores ópticos, não é vinculado a uma ou duas regiões do espectro fotônico. Os amplificadores *Raman* permitem curvas características com regiões lineares que possibilitam ganho para comprimentos de onda desde 300nm até 2000nm .

A amplificação *Raman* pode ser dividida em dois tipos:

- Com o uso de *LRA* – *discrete* ou *lumped Raman amplifier* (amplificador *Raman* discreto);
- Com o uso de *DRA* – *distributed Raman amplifier* (amplificador *Raman* distribuído).

2.5 Amplificador *Raman* distribuído

Os *DRA*s – *distributed Raman amplifier* se apresentam nos dias de hoje como talvez a melhor das soluções de amplificação para enlaces ópticos de qualquer natureza e qualquer distância.

Como já foi dito, a utilização das fibras ópticas que foram instaladas desde o início da implementação das redes ópticas de longa distância e de ultra-longa distância [18], é um

diferencial que pode ser amplamente aproveitado pelo uso de *DRAs*, que em conjunto com amplificadores ópticos existentes ou não, podem aumentar consideravelmente as distâncias entre os enlaces, com a diminuição da *ONSR*.

A Figura 5 nos mostra as curvas de um sinal, respectivamente com e sem a amplificação *Raman* versus a distância máxima possível de um enlace óptico.

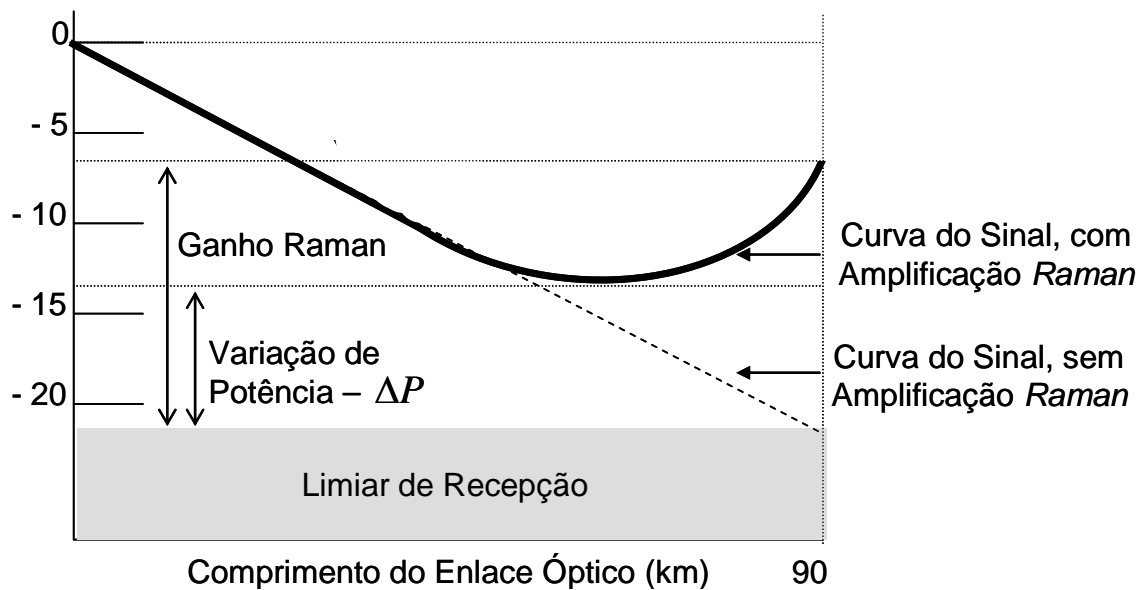


Figura 5. Diagrama com as curvas de um sinal se propagando ao longo de uma fibra óptica, com e sem amplificação *Raman*.

A seqüência de Figuras 6 até 9 ilustra como se processa a introdução da amplificação *Raman* em um enlace óptico pré-existente. Na Figura 6, a linha tracejada representa como se comporta a amplificação em um enlace óptico que não emprega a amplificação *Raman*.

Observe-se que há invasão da região onde ocorrem os efeitos não-lineares, e também da região onde se dá a interação com os ruídos, degradando de forma grave o desempenho deste enlace óptico.

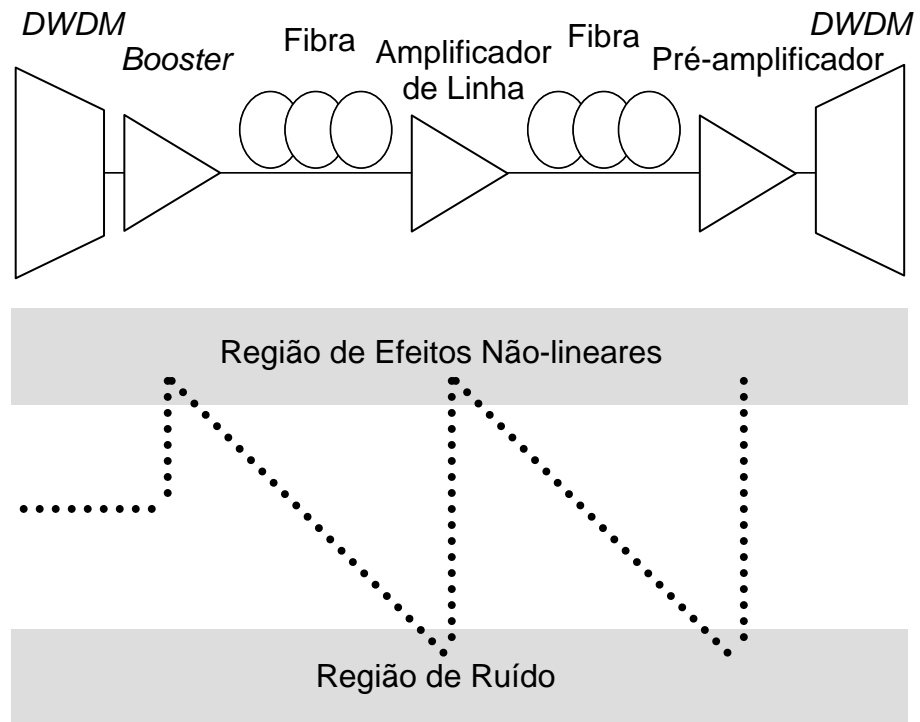


Figura 6. Diagrama com a amplificação do sinal em um enlace sem a aplicação da amplificação *Raman*.

Na Figura 7, introduziu-se no enlace ótico a amplificação *Raman* por meio de dois *DRA*s, com a curva pontilhada representando a amplificação gerada.

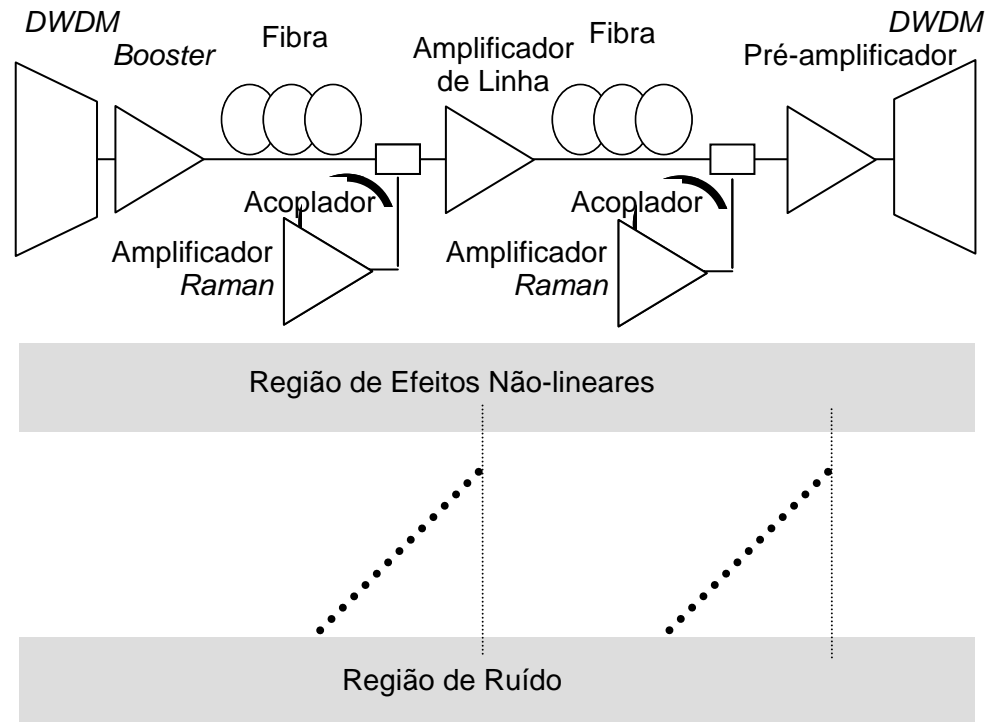


Figura 7. Diagrama com a amplificação do sinal em um enlace com a aplicação da amplificação *Raman*.

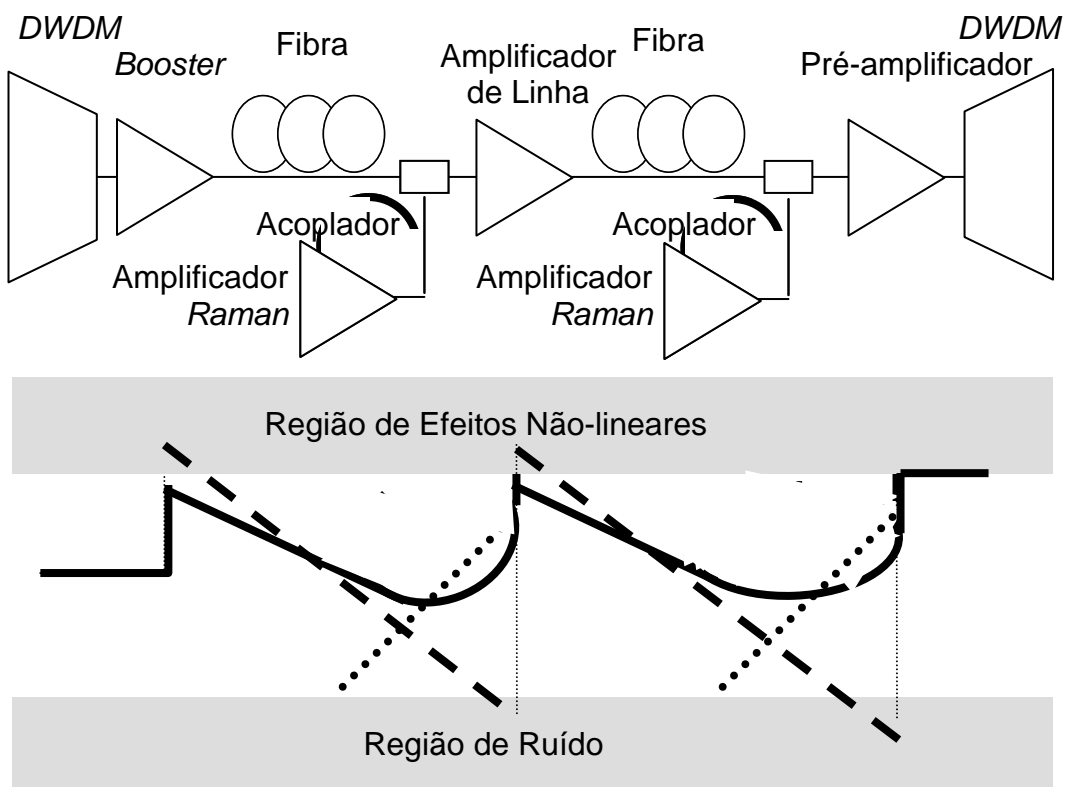


Figura 8. Diagrama com a amplificação do sinal resultante da aplicação da amplificação *Raman*.

Na Figura 8 pode ser observado o resultado apresentado pela interação da amplificação *Raman* no enlace.

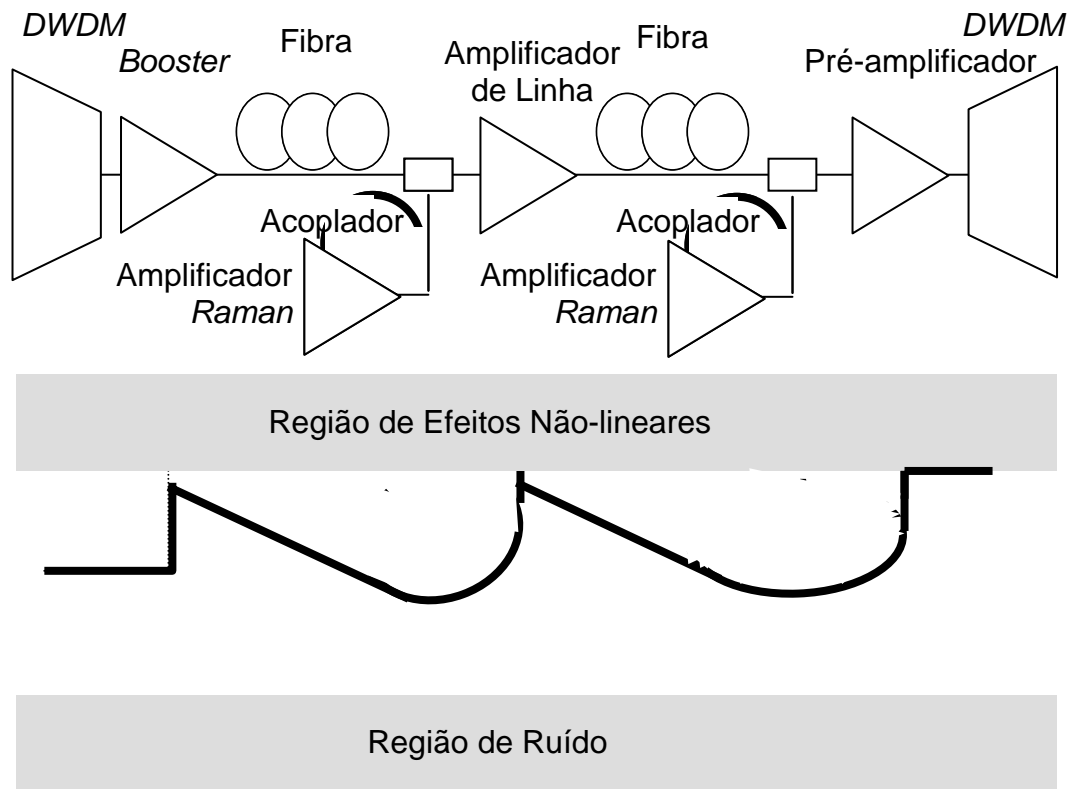


Figura 9. Diagrama com a amplificação do sinal resultante da aplicação da amplificação *Raman*.

Na Figura 9, a linha cheia representa a curva de ganho de amplificação resultante, e pode-se facilmente notar as vantagens apresentadas no aumento de ganho, sem entrar na região dos efeitos não-lineares, ao mesmo tempo em que a região de ruído é evitada.

Como principais vantagens advindas do uso do *DRA*s, além da anteriormente citada, ou seja, o uso em redes ópticas já existentes há algum tempo, onde os cabos de fibras ópticas, não possuem características tão boas em relação aos recentemente desenvolvidos, podemos citar as seguintes:

- A amplificação ocorre distante do final da fibra óptica, onde a potência do sinal ainda é alta [20];
- Permitem a utilização de sistemas *DWDM* com menor espaçamento entre os canais;
- Possibilitam a utilização de sistemas *DWDM* com altas taxas de transmissão;
- Reduzem sobremaneira os efeitos não-lineares, por possibilitar a operação com níveis menores de sinal;
- Melhoria da figura de ruído (*NF – noise figure*) com relação aos amplificadores discretos;
- Melhoria do *OSNR – optical to signal-to-noise ratio* [19 e 20];
- Permite perdas maiores, o que implica em distâncias maiores entre os pontos de regeneração;
- Permite a utilização de uma região de comprimento de onda arbitrária [18 e 19];
- Amplificação mais uniforme ao longo do enlace óptico;
- Pode também ser utilizado para aumentar a largura de banda dos *EDFAs* com amplificadores em sistema híbridos [18].

2.6 Configurações do amplificador *Raman* distribuído

De acordo com o posicionamento do *laser* de bombeamento e seu sentido de propagação, os amplificadores *Raman* podem ser classificados em três configurações diferentes. Em configuração com *laser* de bombeamento co-propagante e com *laser* de bombeamento contra-propagante, e em configuração com *lasers* de bombeamento combinados.

2.6.1 Amplificação *Raman* com *laser* de bombeamento co-propagante

O *laser* de bombeamento é colocado no início da fibra óptica do enlace que se deseja amplificar, com o sinal e o *laser* de bombeamento se propagando no mesmo sentido, como mostra a Figura 10, e suas características são:

- Alto ganho;
- Aumento das flutuações indesejáveis de ruído, devido ao efeito do *laser* de bombeamento;
- A amplificação vai decrescendo ao longo do enlace;
- Sinais ópticos lançados na fibra óptica com altos níveis de potência podem gerar efeitos não-lineares.

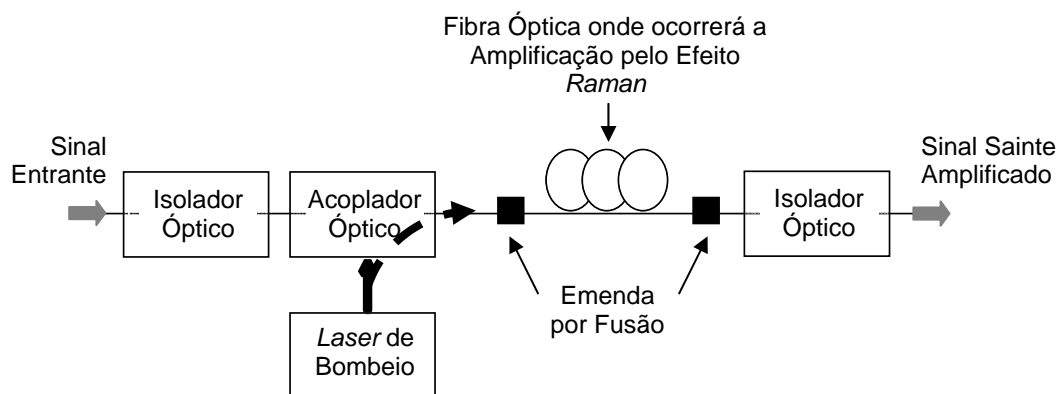


Figura 10. Diagrama da amplificação *Raman* distribuída com *laser* de bombeamento co-propagante.

2.6.2 Amplificação *Raman* com *laser* de bombeamento contra-propagante

O *laser* de bombeamento é colocado na extremidade da fibra óptica do enlace que se deseja amplificar, com o sinal e o *laser* de bombeamento se propagando em sentidos contrários, como ilustrado na Figura 11, e suas principais características são:

- As flutuações indesejáveis de ruído devido ao efeito de *laser* do bombeamento são atenuadas;
- Os sinais ópticos podem ser lançados na fibra óptica, com níveis de potência menores para evitar os efeitos não-lineares;
- Praticamente independente do ganho de polarização;
- A amplificação ocorre somente a partir da segunda metade do enlace.

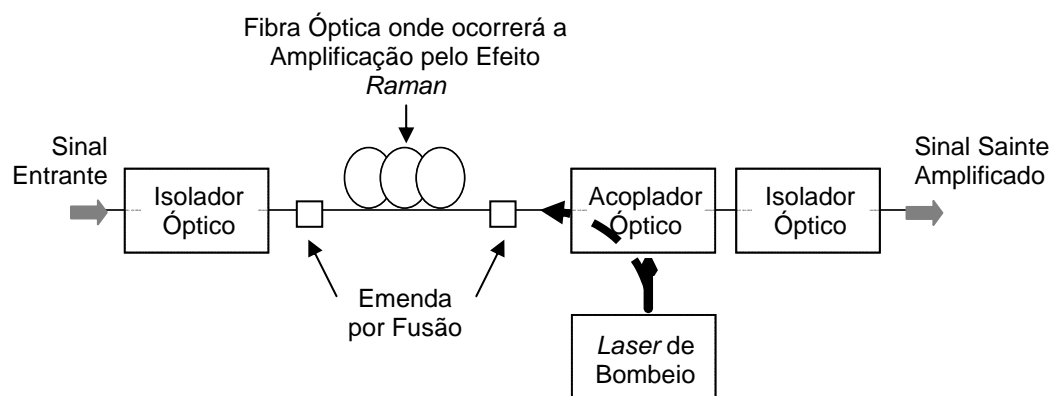


Figura 11. Diagrama da amplificação *Raman* distribuída com *laser* de bombeamento contra-propagante.

2.6.3 Amplificação *Raman* com *lasers* de bombeamento combinados

Conforme mostrado na Figura 12, são usados dois *lasers* de bombeamento, sendo um colocado no início da fibra óptica do enlace e um outro colocado na extremidade deste enlace, ou seja, é a combinação da amplificação *Raman* com *laser* de bombeamento co-propagante e da amplificação *Raman* com *laser* de bombeamento contra-propagante.

Poder-se-ia pensar que este tipo de amplificação *Raman* com *lasers* de bombeamento combinados seria superior a dos dois tipos anteriormente descritos. Entretanto, não é assim, como é visto por algumas de suas características descritas abaixo:

- Possui maior ganho quando comparado á amplificação *Raman* com *laser* de bombeamento contra-propagante;
- Com relação á amplificação *Raman* com *laser* de bombeamento co-propagante o ruído inerente ao acoplamento com a fonte do *laser* de bombeamento é menor;
- A amplificação ocorre em todo o enlace óptico, diminuindo a *ASE* – *amplified spontaneous emission*, e abaixando o *OSNR* .

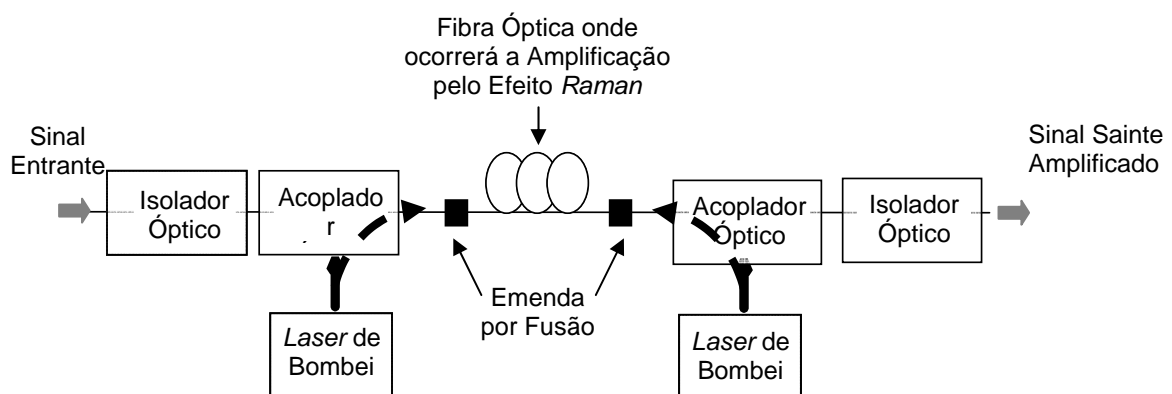


Figura 12. Diagrama da amplificação *Raman* distribuída com *lasers* de bombeamento combinados.

A tabela abaixo dá uma melhor compreensão, das características apresentadas pelos três tipos de configurações.

	Contra-Direcional	Co-Direcional	Combinado
Ganho	↑	↑↑↑	↑↑
Ruído (*)	↑	↑↑↑	↑↑
Efeito não-linear	↑	↑↑	↑↑↑
Amplificação	Ocorre a partir da metade do enlace	Diminui ao longo do enlace	Ocorre em todo o enlace

Nota: (*) - Devido ao acoplamento com a fonte do *laser* de bombeamento.

Capítulo 3

A fibra óptica *TrueWave[®] Reach Fiber Low Water Peak*

O objetivo deste capítulo é apresentar e discutir os parâmetros físicos da fibra óptica utilizada para a amplificação *Raman*, ou seja, a *TW[®]RFLWP – TrueWave[®] Reach Fiber Low Water Peak*, e descrever o procedimento utilizado para estimar parâmetros, como eficiência de ganho *Raman*, para *lasers* de bombeamento em comprimentos de onda diferentes. Na seção 3.1, a curva de atenuação e os valores de área efetiva medidos são apresentados junto com a curva da eficiência de ganho *Raman* especialmente caracterizada pela *OFS Fitel Denmark Aps* para a *Banda – S* [21 e 22]. Na seção 3.2 é discutido o procedimento utilizado para estimar a eficiência de ganho *Raman* para outros comprimentos de onda dos *lasers* de bombeamento. Os *lasers* de bombeamento adicionais são necessários para viabilizar a amplificação em 70nm na *Banda – S*. Para finalizar, os acoplamentos entre os *lasers* de bombeamento devidos ao espalhamento *Raman* são discutidos na seção 3.3.

3.1 Atenuação, área efetiva e eficiência de ganho *Raman* na *Banda – S* para a fibra óptica *TW[®]RFLWP*

A fibra óptica *TW[®]RFLWP*, fabricada pela *OFS Fitel Denmark ApS*, escolhida para esse estudo, apresenta uma perda abaixo de 0,35dB/km na região de 1400nm - região do pico de água, e opera em sistemas de longas distancias e altas taxas de transmissão. A *OFS* menciona uma transmissão na *Banda – S* de 40 canais a 10Gb/s em um enlace de 1200km com um sistema *Raman* amplificado. A *TW[®]RFLWP*, devido à sua baixa atenuação na região do pico de água, permite a utilização de sistemas *CWDM – Coarse Wavelength Division Multiplexing*

em toda a banda de comprimentos de onda de 1310 a 1625nm . A curva de atenuação da fibra óptica $TW^{\text{®}}RFLWP$ é mostrada na Figura 13. Nesta, os pontos experimentais são mostrados destacados com o símbolo ‘o’, e utilizados em conjunto com um método de interpolação para gerar a curva sólida, cobrindo a faixa de comprimento de onda de 1310 a 1650nm .

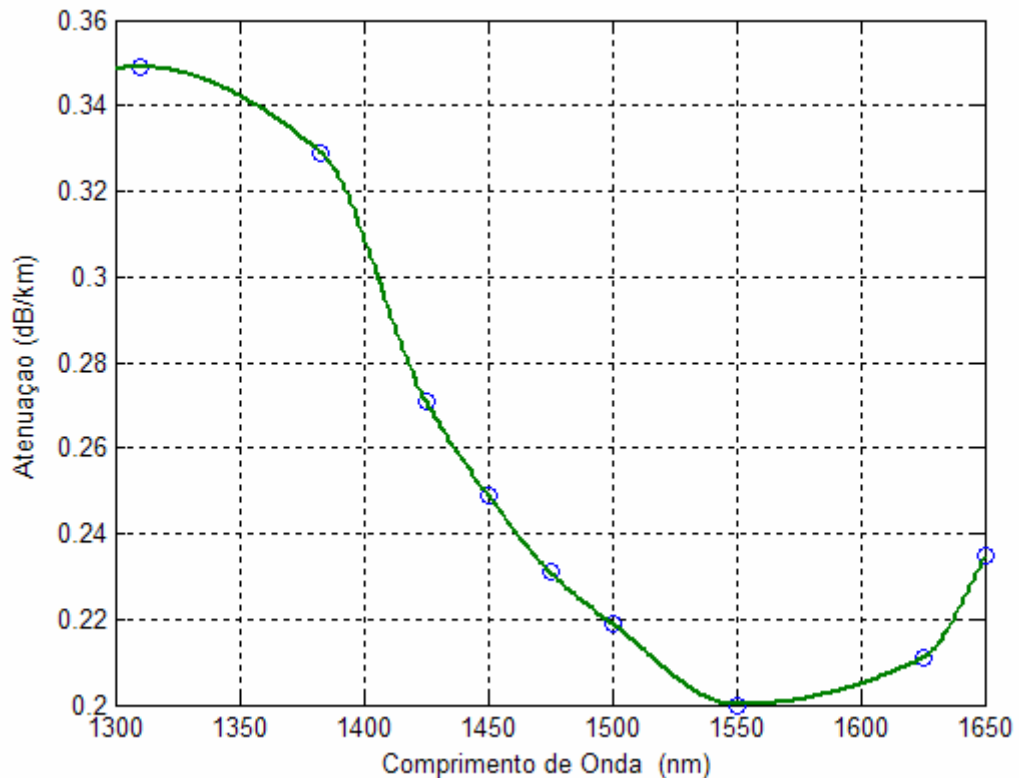


Figura 13. Curva de atenuação em função do comprimento de onda para fibra óptica $TW^{\text{®}}RFLWP$. Os valores experimentais são mostrados com o símbolo ‘o’ e a curva sólida ilustra a curva gerada utilizando um método de interpolação.

A área efetiva da fibra óptica é outro parâmetro de extrema relevância na estimativa da eficiência de ganho *Raman*. Esta é definida como a área efetivamente iluminada por um *laser* que se acopla a fibra óptica. A fibra óptica é um guia de onda dielétrico de simetria cilíndrica. Como todo guia, este possui uma resposta em frequência que depende do material que constitui a fibra óptica, da geometria do guia e da frequência de operação do guia. Estas características são traduzidas no parâmetro adimensional do guia de onda, o parâmetro V . Os

valores experimentais da área efetiva da fibra óptica $TW^{\text{®}}RFLWP$ foram disponibilizados pelo fabricante [21 e 22] e são mostrados na Figura 14, com os símbolos “o” correspondendo aos pontos experimentais, e a curva sólida apresentada como resultado de um método de interpolação aplicado aos pontos.

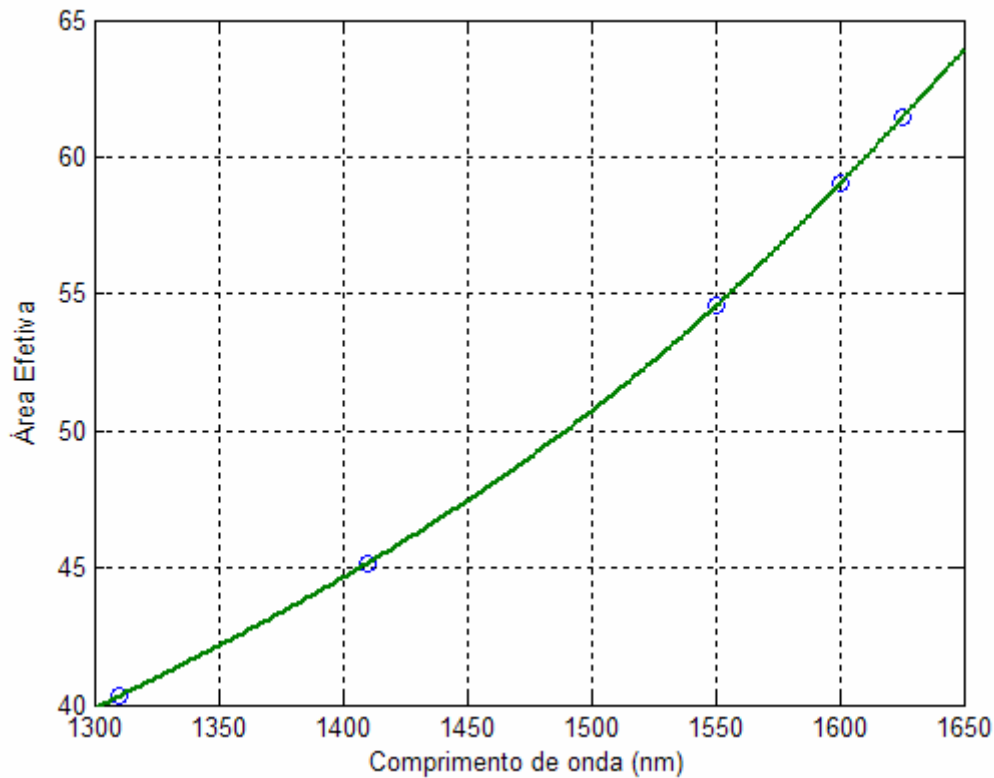


Figura 14. Pontos experimentais com valores de área efetiva em função do comprimento de onda, ‘o’, e curva obtida com aplicação de método de interpolação aos pontos experimentais.

A curva da eficiência de ganho *Raman* da fibra óptica $TW^{\text{®}}RFLWP$ foi especialmente medida para comprimentos de onda de sinal na *Banda-S*, utilizando um *laser* de bombeamento de comprimento de onda de 1420nm , como mostrado na Figura 15. A eficiência de ganho *Raman* é definida como a razão entre o coeficiente de ganho *Raman*, g , e a área efetiva da fibra óptica no comprimento de onda do sinal A_{eff} . Esta é medida em unidades de $(\text{Wkm})^{-1}$. Para o *laser* de bombeamento de comprimento de onda de 1420nm , a

eficiência de ganho *Raman* é máxima para um sinal deslocado em frequência do *laser* de bombeamento de $13,2\text{THz}$. Em comprimento de onda, o comprimento de onda de sinal para o qual se obtém o máximo espalhamento *Raman* encontra-se localizado em $1502,3\text{nm}$. A máxima eficiência é de $0,659(\text{Wkm})^{-1}$.

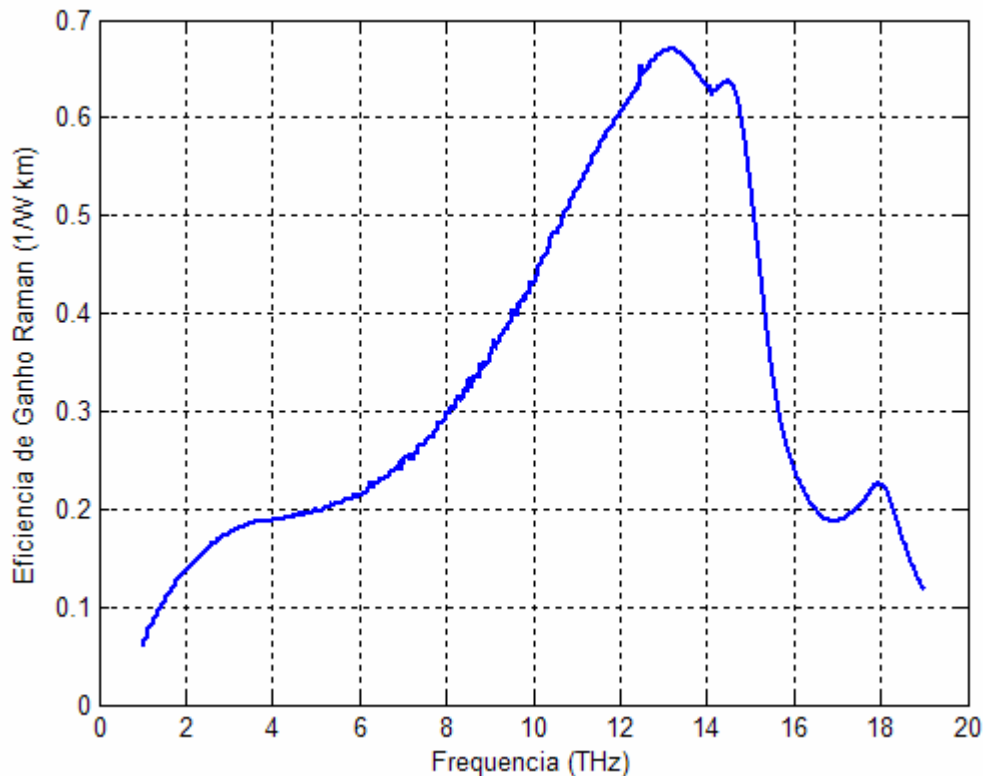


Figura 15. Eficiência de ganho *Raman* em função da diferença de frequências de sinal e do *laser* de bombeamento para um comprimento de onda de 1420nm .

Para cobrir a operação em toda faixa de comprimento de onda que define a *Banda – S*, é necessário adicionar *lasers* de bombeamento em outros comprimentos de onda, e conseqüentemente é necessário estimar a eficiência de ganho *Raman* para esses comprimentos de onda dos *lasers* de bombeamento. A seção 3.2 descreve o procedimento utilizado para definir os comprimentos de onda dos *lasers* de bombeamento adicionais e estimar a eficiência de ganho *Raman*.

3.2 Estimativa da eficiência de ganho *Raman* para *lasers* de bombeamento em outros comprimentos de onda

Para cobrir operação em toda *Banda – S* é necessário adicionar *lasers* de bombeamento com comprimentos de onda adequados. A eficiência de ganho *Raman* para esses *lasers* de bombeamento em outros comprimento de onda pode ser estimada a partir dos valores medidos de acordo com a relação [23 e 24]

$$C_R^E(\lambda_p, \lambda_s) = \frac{\lambda_i}{\lambda_s} \frac{A_{eff}(\lambda_i)}{A_{eff}(\lambda_s)} C_R^M(\lambda_k, \lambda_i). \quad (1)$$

Na Equação (1), $C_R^M(\lambda_k, \lambda_i)$ e $A_{eff}(\lambda_i)$ são os valores medidos da eficiência de ganho *Raman* e da área efetiva, $A_{eff}(\lambda_i)$, nos comprimentos de onda de seus *lasers* de bombeamento λ_k e de sinal λ_i , respectivamente e $C_R^E(\lambda_p, \lambda_s)$ e $A_{eff}(\lambda_s)$ a eficiência de ganho *Raman* e área efetiva desejadas nos comprimentos de onda dos *lasers* de bombeamento e de sinal λ_p e λ_s respectivamente.

Considerando-se 8 sinais separados de 10nm na *Banda – S*, os respectivos comprimentos de onda dos *lasers* de bombeamento que garantem máxima eficiência de ganho *Raman* para cada sinal encontram-se 13,2THz deslocado com relação ao sinal. A Tabela I relaciona os comprimentos de onda do sinal λ_s , o comprimento de onda do *laser* de bombeamento que garante máxima eficiência de ganho *Raman* λ_p , e o respectivo deslocamento de 13,2THz em unidades de comprimento de onda, $\Delta\lambda_{Max}$. Note que o deslocamento em frequência é positivo, ou seja, para se obter espalhamento *Raman* a

freqüência do *laser* de bombeamento deve ser maior do que a freqüência do sinal. Analogamente, o comprimento de onda do *laser* de bombeamento deve ser menor do que o comprimento de onda do sinal, ou seja, o *laser* de bombeamento está deslocado para o vermelho em relação ao sinal.

Tabela I. Comprimento de onda do sinal com separação de $10nm$, λ_s , comprimento de onda do *laser* de bombeamento, λ_p , que garante máxima eficiência de ganho *Raman* para um sinal de comprimento de onda λ_s , a diferença de comprimento de onda entre o sinal e o *laser* de bombeamento correspondente a $13,2THz$, $\Delta\lambda_{Max}$.

λ_s (nm)	λ_p (nm)	$\Delta\lambda_{Max}$ (nm)
1460	1371,7	88,318
1470	1380,5	89,495
1480	1389,3	90,679
1490	1398,1	91,871
1500	1406,9	93,070
1510	1415,7	94,276
1520	1424,5	95,489
1530	1433,3	96,710

Utilizando os valores medidos da eficiência de ganho *Raman*, mostrados na Figura 15, e os valores medidos da área efetiva para a fibra óptica $TW^{\circ}RFLWP$, mostrados na figura 14, a eficiência de ganho *Raman* para os comprimentos de onda dos *lasers* de bombeamento listados na Tabela I são calculados e mostrados na Figura 16.

A eficiência de ganho *Raman* é inversamente proporcional ao comprimento de onda, conforme indicado pela Equação (1). No início da *Banda – S*, como pode ser verificado na Tabela II, a eficiência de ganho *Raman* é de $0,751(Wkm)^{-1}$ enquanto no final da banda é de

$0,65(Wkm)^{-1}$, ou seja, uma variação em torno de 15%. A contribuição mais significativa para o espalhamento *Raman* vem do *laser* de bombeamento localizado a $13,2THz$ do sinal, que denominamos de *laser* de bombeamento gêmeo ou par. No entanto, a contribuição dos *lasers* de bombeamento não-gêmeos ou não-pares não é desprezível, e sua contribuição é fundamental para o desempenho do amplificador. A Tabela II relaciona a contribuição dos diferentes *lasers* de bombeamento nos comprimentos de onda dentro da *Banda – S*. Note que os valores da diagonal principal da matriz 8×8 de valores de eficiência de ganho *Raman* são as contribuições dos *lasers* de bombeamento pares. Uma vez que o *laser* de bombeamento não se encontra sintonizado a $13,2THz$ do sinal, sua contribuição ao espalhamento *Raman* do respectivo sinal decresce. Por exemplo, o *laser* de bombeamento no comprimento de onda de $1371,7nm$ é o gêmeo/par do sinal de comprimento de onda de $1460nm$, com uma eficiência de espalhamento de $0,751(Wkm)^{-1}$. Os demais *lasers* de bombeamento contribuem para espalhamento do mesmo sinal com uma eficiência menor, e o decréscimo chega a 76% do valor máximo, variando de $0,751$ a $0,181(Wkm)^{-1}$.

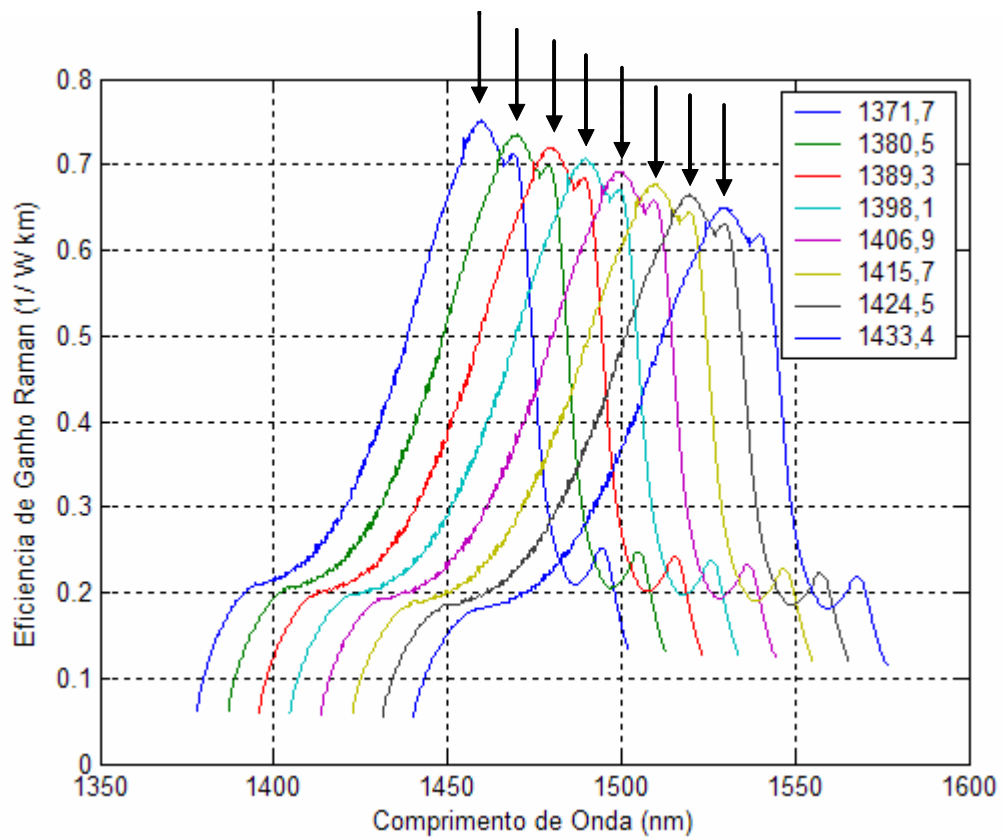


Figura 16. Valor estimado da eficiência de ganho *Raman* em função do comprimento de onda de *laser* de bombeamento de 1420nm para os comprimentos de onda de *lasers* de bombeamento adicionais. As setas identificam o valor máximo da eficiência de ganho *Raman* nos comprimentos de onda de sinal de 1460 , 1470 , 1480 , 1490 , 1500 , 1510 , 1520 e 1530nm .

Tabela II. Eficiência de ganho *Raman* para todos os comprimentos de onda de *laser* de bombeamento relacionados nos comprimentos de onda de sinal na *Banda – S*.

		Comprimento de Onda do <i>Laser</i> de bombeamento (nm)							
		1371,7	1380,5	1389,3	1398,1	1406,9	1415,7	1424,5	1433,3
Comprimento de Onda de Sinal (nm)	1460	0,751	0,649	0,514	0,386	0,288	0,229	0,195	0,181
	1470	0,705	0,736	0,638	0,507	0,375	0,290	0,230	0,194
	1480	0,271	0,694	0,721	0,627	0,500	0,373	0,284	0,224
	1490	0,220	0,271	0,682	0,707	0,616	0,486	0,374	0,282
	1500	0,163	0,213	0,272	0,669	0,693	0,605	0,482	0,370
	1510	-----	0,169	0,207	0,271	0,656	0,678	0,593	0,473
	1520	-----	-----	0,176	0,201	0,272	0,643	0,664	0,581
	1530	-----	-----	-----	0,182	0,195	0,272	0,631	0,650

A Expressão (1) utilizada na estimativa dos valores de eficiência de ganho *Raman*, para outros comprimentos de onda dos *lasers* de bombeamento adicionados para cobrir a faixa de 70nm é verificada a partir da comparação com dados experimentais para *Banda – C*.

A Tabela III apresenta a eficiência de ganho *Raman* estimada para os comprimentos de onda de sinal da *Banda – S*, calculados com o auxílio da Equação (1) e dos dados experimentais da eficiência de ganho *Raman* da *Banda – C*. Comparando-se os dados das Tabelas II e III, pode-se verificar que seus valores sofrem variação a partir da segunda casa decimal.

Tabela III. Eficiência de ganho *Raman* para todos os comprimentos de onda de bombeio relacionados nos comprimentos de onda de sinal na *Banda – S* , calculados a partir dos dados experimentais da *Banda – C* .

		Comprimento de Onda do <i>Laser</i> de Bombeamento (nm)							
		1371,7	1380,5	1389,3	1398,1	1406,9	1415,7	1424,5	1433,3
Comprimento de Onda de Sinal (nm)	1460	0,746	0,649	0,514	0,400	0,303	0,235	0,187	0,171
	1470	0,710	0,730	0,638	0,507	0,396	0,302	0,234	0,183
	1480	0,278	0,696	0,716	0,626	0,501	0,392	0,300	0,233
	1490	0,219	0,279	0,683	0,702	0,615	0,493	0,388	0,298
	1500	0,160	0,212	0,278	0,670	0,687	0,603	0,486	0,382
	1510	-----	0,168	0,206	0,278	0,658	0,673	0,592	0,479

3.3 Eficiência de ganho *Raman* devido à interação entre os *lasers* de bombeamento

A amplificação *Raman* cobrindo toda a *Banda – S* implica em uma faixa espectral de $70nm$. Nestas condições deve-se investigar a possibilidade de um *laser* de bombeamento de menor comprimento de onda espalhar um outro de maior comprimento de onda. Esta possibilidade é investigada para a fibra óptica $TW^{\circledR}RFLWP$ e os *lasers* de bombeamento com comprimentos de onda entre $1371,7$ e $1433,3nm$.

As curvas de eficiência de ganho *Raman* superpostas á posição espectral dos comprimentos de onda dos *lasers* de bombeamento são utilizadas para ilustrar esse conceito, conforme mostrado na Figura 18. O *laser* de bombeamento de comprimento de onda de $1371,7nm$ encontra-se destacado pela seta de cor azul e identificado com a letra (a). O *laser* de bombeamento com comprimento de onda de $1371,7nm$ é responsável pela geração de uma curva de eficiência de ganho *Raman*, também destacada com a cor azul e correspondente letra

(a). Os demais *lasers* de bombeamento seguem a mesma correspondência de identificação de cores e letras.

Note a interseção entre as curvas e as setas na Figura 18. A seta identificada como (a) não intercepta nenhuma curva, já a seta identificada como (b) intercepta a curva (a), a seta identificada como (c) intercepta as curvas (a) e (b), a seta identificada como (d) intercepta as curvas (a), (b) e (c), a seta identificada como (e) intercepta as curvas (a), (b), (c) e (d), a seta identificada como (f) intercepta as curvas (a), (b), (c), (d) e (e), a seta identificada como (g) intercepta as curvas (a), (b), (c), (d), (e) e (f), a seta identificada como (h) intercepta as curvas (a), (b), (c), (d), (e), (f) e (g).

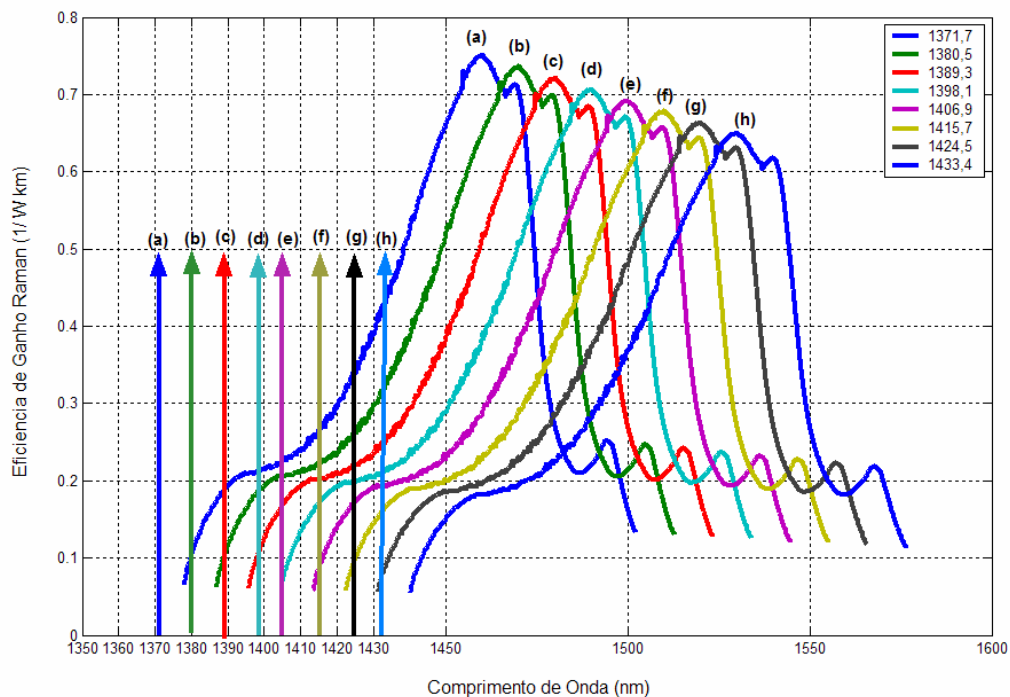


Figura 18. Curva da eficiência de ganho *Raman* em função do comprimento de onda para 8 sinais e 8 *lasers* de bombeamento entre 1371,7 e 1433,3nm. As setas correspondem à localização espectral dos respectivos *lasers* de bombeamento.

De acordo com a Tabela IV, os *lasers* com bombeamento de maior comprimento de onda recebem energia por espalhamento *Raman* dos *lasers* de bombeamento de menor comprimento de onda. Sendo assim, é esperado que necessitem de menor potência para garantir o mesmo ganho.

Capítulo 4

Análise da amplificação *Raman* distribuída na *Banda – S*

O objetivo deste capítulo é conduzir as análises da amplificação *Raman* distribuída na *Banda – S* em um enlace de fibra óptica $TW^{\otimes}RFLWP$ de 100km. Na seção 4.1, as equações não-lineares acopladas que simulam o comportamento da amplificação *Raman* distribuída são apresentadas e discutidas. Parâmetros que permitem analisar a contribuição de cada efeito físico separadamente são introduzidos e as análises conduzidas nas seções subsequentes.

4.1 Equações da amplificação *Raman* distribuída

O perfil de ganho de amplificadores *Raman* distribuídos deve incluir interações entre os vários *lasers* de bombeamento e sinais, entre os vários *lasers* de bombeamento, emissão espontânea amplificada e atenuação dos sinais e dos *lasers* de bombeamento, de acordo com as equações acopladas não-lineares [23, 26, 27 e 28]

$$\frac{dP_{s,i}}{dz} = -\alpha_{s,i}P_{s,i} + \sum_{\substack{j \\ (\lambda_i > \lambda_j)}} \varepsilon_{i,j}^3 C_{i,j}^R (P_{p,j}^f + P_{p,j}^b) P_{s,i} + \sum_{\substack{j \\ (\lambda_i > \lambda_j)}} 2\varepsilon_i^1 [C_{i,j}^R (P_{p,j}^f + P_{p,j}^b)] N_i \quad (1.a)$$

$$\begin{aligned} \frac{dP_{p,j}^f}{dz} = & -\alpha_{p,j}P_{p,j}^f - \sum_{\substack{i \\ (\lambda_i > \lambda_j)}} \varepsilon_{i,j}^3 \left(\frac{v_{p,j}}{v_{s,i}} C_{j,i}^R P_{s,i} \right) P_{p,j}^f - \sum_{\substack{i \\ (\lambda_i > \lambda_j)}} \left(4\varepsilon_i^1 N_i \frac{v_{p,j}}{v_{s,i}} C_{j,i}^R \right) P_{p,j}^f + \\ & + \left[\sum_{\substack{k \\ (\lambda_k < \lambda_j)}} C_{j,k}^R P_{p,k}^f - \sum_{\substack{k \\ (\lambda_k > \lambda_j)}} \frac{v_{p,k}}{v_{p,j}} C_{k,j}^R P_{p,k}^f \right] \varepsilon_{k,j}^2 P_{p,j}^f \end{aligned} \quad (1.b)$$

$$\begin{aligned}
\frac{dP_{p,j}^b}{dz} = & +\alpha_{p,j}P_{p,j}^b + \sum_{\substack{i \\ (\lambda_i > \lambda_j)}} \varepsilon_{i,j}^3 \left(\frac{v_{p,j}}{v_{s,i}} C_{j,i}^R P_{s,i} \right) P_{p,j}^b + \sum_{\substack{i \\ (\lambda_i > \lambda_j)}} \left(4\varepsilon_i^1 N_i \frac{v_{p,j}}{v_{s,i}} C_{j,i}^R \right) P_{p,j}^b - \\
& - \left[\sum_{\substack{k \\ (\lambda_k < \lambda_j)}} C_{j,k}^R P_{p,k}^b - \sum_{\substack{k \\ (\lambda_k > \lambda_j)}} \frac{v_{p,k}}{v_{p,j}} C_{k,j}^R P_{p,k}^b \right] \varepsilon_{k,j}^2 P_{p,j}^b
\end{aligned} \tag{1.c}$$

Nas Equações (1.a) – (1.c), o sub-índice $i = 1, \dots, N_s^{Max}$ identifica um comprimento de onda do sinal específico dentro das *Banda – S*, que vai de 1460 a 1530nm, com um espaçamento entre canais de 10nm, com $i = 1$ correspondendo a $\lambda_{s,1} = 1460nm$ e $i = N_s^{Max}$ a $\lambda_{s,N_s^{Max}} = 1530nm$. $P_{s,i}$ e $\alpha_{s,i}$ são a potência média e a atenuação para o sinal de comprimento de onda $\lambda_{s,i}$, e frequência $v_{s,i}$. O sub-índice $j = 1, \dots, N_p^{Max}$ identifica um comprimento de onda do *laser* de bombeamento, variando de 1371,7 a 1433,3nm, com $j = 1$ correspondendo a $\lambda_{p,1} = 1371,7nm$ e $j = N_p^{Max}$ a $\lambda_{p,N_p^{Max}} = 1433,3nm$. $P_{p,j}^x$ e $\alpha_{p,j}$ são a potência média e a atenuação para o *laser* de bombeamento de comprimento de onda $\lambda_{p,j}$, com sua respectiva frequência v_{pj} , e $x = f, b$ indica o *laser* de bombeamento co-propagante ou contra-propagante. N_i representa a potência do ruído na largura de banda Δv ao redor do sinal com frequência $v_{s,i}$, com $N_i = h v_{s,i} \Delta v$. O sub-índice k indica o *laser* de bombeamento com comprimento de onda com valor mais baixo que transfere energia para o *laser* de bombeamento com comprimento de onda com valor mais alto. $C_{R,m,n}$ indica a eficiência de ganho *Raman* de um sinal com comprimento de onda λ_n para um sinal com comprimento de onda λ_m .

O primeiro e segundo termos da Equação (1.a) representam a atenuação do sinal de comprimento de onda λ_i , e o acoplamento dos *lasers* de bombeamento co-propagante e contra-propagante de comprimento de onda λ_j com o sinal de comprimento de onda λ_i . Este acoplamento é proporcional à eficiência de ganho *Raman* $C_{i,j}^R$ e as potências dos *lasers* de bombeamento $(P_{p,j}^f + P_{p,j}^b)$. O terceiro termo na Equação (1.a) representa o ruído causado pela *ASE* gerado pelo *laser* de bombeamento co-propagante de comprimento de onda λ_j e pelo *laser* de bombeamento contra-propagante de comprimento de onda λ_i . Este termo é proporcional ao dobro da eficiência de ganho *Raman* $C_{i,j}^R$, e as potências dos *lasers* de bombeamento $(P_{p,j}^f + P_{p,j}^b)$, e a potência do ruído N_i . O primeiro e segundo termo da Equação (1.b) representam a atenuação do *laser* de bombeamento co-propagante de comprimento de onda λ_j , e a depleção do sinal de comprimento de onda λ_i devido a interação com o *laser* de bombeamento co-propagante de comprimento de onda λ_j . Este acoplamento é proporcional à eficiência de ganho *Raman*, $C_{j,i}^R$, a razão entre as frequências do *laser* de bombeamento e sinal, $\frac{\nu_{p,j}}{\nu_{s,i}}$ e a potência de sinal $P_{s,i}$. O terceiro termo da Equação (1.b) representa o ruído causado pela *ASE* gerado pelo *laser* de bombeamento co-propagante de comprimento de onda λ_j . Este ruído é proporcional a eficiência de ganho *Raman* $C_{j,i}^R$, a potência do ruído N_i , a razão entre as frequências de *laser* de bombeamento e sinal, $\frac{\nu_{p,j}}{\nu_{s,i}}$ e a potência do *laser* de bombeamento co-propagante $P_{p,j}^f$. O quarto termo da Equação (1.b) representa a depleção do *laser* de bombeamento co-propagante de comprimento de onda λ_k devido a interação com o *laser* de bombeamento co-propagante de comprimento de onda λ_j . Esta depleção é proporcional a diferença entre a potência do *laser* de bombeamento co-propagante de

comprimento de onda λ_k afetada pela eficiência de ganho *Raman* $C_{j,k}^R$ e a potência do *laser* de bombeamento co-propagante de comprimento de onda λ_k afetada pela eficiência de ganho *Raman* $C_{k,j}^R$, e pela razão entre as frequências de *laser* de bombeamento $\frac{V_{p,k}}{V_{p,j}}$, e a potência do *laser* de bombeamento co-propagante de comprimento de onda λ_j . A Equação (1.c) é análoga a Equação (1.b). Nesta, o índice identificando o *laser* de bombeamento co-propagante, f , é substituído pelo índice b , identificando o *laser* de bombeamento contra-propagante.

Para dar maior flexibilidade às análises, a contribuição dos diferentes fenômenos físicos foi isolada com a inserção dos parâmetros $\varepsilon_i^1, \varepsilon_{k,j}^2$ e $\varepsilon_{i,j}^3$ nas Equações (1.a) – (1.c). Estes assumem valores “1” ou “0”. Se $\varepsilon_i^1 = 0$ ou $\varepsilon_i^1 = 1$ os efeitos da emissão espontânea amplificadas são desconsiderados ou considerados na análise. Se $\varepsilon_{i,j}^3 = 1$ para $i = j$, e $\varepsilon_{i,j}^3 = 0$ para $i \neq j$ analisa-se apenas a contribuição entre sinal e *laser* de bombeamento pares/gêmeos. Se $\varepsilon_{k,j}^2 = 1$ para $k \neq j$ as interações entre os múltiplos *lasers* de bombeamento são consideradas, e caso $\varepsilon_{k,j}^2 = 0$ para $k \neq j$, as interações entre os múltiplos *lasers* de bombeamento são desconsideradas.

Para facilitar as discussões é conveniente ilustrar através do diagrama da Figura19, a organização dos índices que identificam os *lasers* de bombeamento j e os sinais i em ordem crescente de comprimento de onda. Esta organização é utilizada para escrever as equações da amplificação *Raman*. Sendo assim, a definição de sinal 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 identifica os sinais de comprimento de onda 1460, 1470, 1480, 1490, 1500, 1510, 1520 e 1530nm respectivamente, e a definição de *laser* de bombeamento 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 identifica

os *lasers* de bombeamento de comprimento de onda 1371,7, 1380,5, 1389,3, 1398,1, 1406,9, 1415,7, 1424,5 e 1433,3nm.

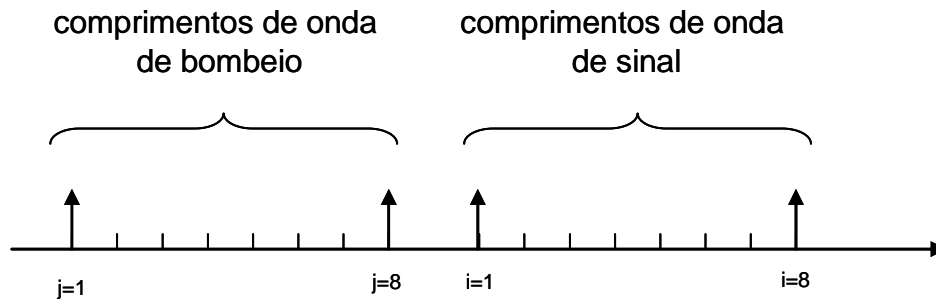


Figura 19. Diagrama que identifica os comprimentos de onda do *laser* de bombeamento e do sinal segundo os índices i e j respectivamente.

Outro dado relevante na análise é o valor do coeficiente de perda nos comprimentos de onda do sinal e do *laser* de bombeamento. Os valores foram obtidos através de interpolação dos pontos experimentais e encontram-se relacionados na Tabela V.

Tabela V. Valor da atenuação em dB/km para nos comprimentos de onda de *laser* de bombeamento e sinal.

$\lambda_p(\text{nm})$	$\alpha_p(\text{dB/km})$	$\lambda_s(\text{nm})$	$\alpha_s(\text{dB/km})$
1371,7	0,34416	1460	0,24131
1380,5	0,33250	1470	0,23417
1389,3	0,31988	1480	0,22817
1398,1	0,30688	1490	0,22332
1406,9	0,29410	1500	0,21900
1415,7	0,28213	1510	0,21473
1424,5	0,27154	1520	0,21053
1433,3	0,26273	1530	0,20657

4.2 Análise da amplificação distribuída devido ao acoplamento entre os sinais e os *lasers* de bombeamento pares/gêmeos

No limite em que cada *laser* de bombeamento se acopla a cada sinal de forma independente (acoplamento entre sinal e *lasers* de bombeamento pares/gêmeos), ou seja, mantendo apenas os termos do somatório para $i = j$ na Equação (1.a), e desprezando-se os termos que representam a depleção dos níveis de potência do *laser* de bombeamento nas Equações (1.b) e (1.c), o que é aplicável quando $P_{s,i} \ll \alpha_{p,j} / C_{i,j}^R$, as interações entre os múltiplos *lasers* de bombeamento e os termos que representam o ruído no conjunto de Equações (1), se reduzem a seguinte forma

$$\frac{dP_{s,i}}{dz} = -\alpha_{s,i} P_{s,i} + \sum_{\substack{j \\ (\lambda_i > \lambda_j)}} C_{i,j}^R [P_{p,j}^f + P_{p,j}^b] P_{s,i}, \text{ com } i = j \quad (2.a)$$

$$\frac{dP_{p,j}^f}{dz} = -\alpha_{p,j} P_{p,j}^f \quad (2.b)$$

$$\frac{dP_{p,j}^b}{dz} = +\alpha_{p,j} P_{p,j}^b \quad (2.c)$$

Nesse limite as equações da amplificação *Raman*, reduzidas às Equações (2.a)-(2.c), possuem solução analítica. A razão entre a potência de sinal no final do enlace e a potência de sinal no início de enlace é definida como ganho líquido do sinal de comprimento de onda λ_i , e é dado pela expressão algébrica:

$$G_{\text{líquido}}^i = \frac{P_{s,i}(L)}{P_{s,i}(0)} = e^{-\alpha_{s,i}L} e^{C_{i,j}^R L_{\text{eff}} [P_{p,j}^f(0) + P_{p,j}^b(L)]}. \quad (3)$$

Na Equação (3), L é o comprimento do enlace, nesse caso $100km$, $\alpha_{s,i}$ é o coeficiente de perda da fibra óptica para o sinal de comprimento de onda $\lambda_{s,i}$. $P_{p,j}^f(0)$ é o valor da potência média do *laser* de bombeamento de comprimento de onda $\lambda_{p,j}$ co-propagante no início da fibra óptica $P_{p,j}^b(L)$ é o valor da potência média do *laser* de bombeamento de comprimento de onda $\lambda_{p,j}$ contra-propagante no final da fibra óptica $C_{i,j}^R$ é a eficiência de ganho *Raman* responsável pelo acoplamento entre o sinal de comprimento de onda $\lambda_{s,i}$ com o *laser* de bombeamento de comprimento de onda $\lambda_{p,j}$. O comprimento efetivo da fibra óptica, L_{eff} é o comprimento para o qual ocorre o ganho *Raman* e é dado por

$$L_{eff} = \frac{[1 - e^{-\alpha_{p,j}L}]}{\alpha_{p,j}} \quad (4)$$

Como pode ser verificado pela Equação (3) o ganho líquido cai exponencialmente com o coeficiente de perda do sinal, e cresce exponencialmente com o produto da eficiência de ganho *Raman*, o comprimento efetivo da fibra óptica e a potência do *laser* de bombeamento.

As Equações (1.a)-(1.c) foram resolvidas numericamente para o seguinte conjunto de parâmetros: $\varepsilon_{i,j}^3 = 1$ para $i = j$, e $\varepsilon_{i,j}^3 = 0$ para $i \neq j$, $\varepsilon_i^1 = 0$ e $\varepsilon_{k,j}^2 = 0$ para $k \neq j$, e os resultados comparados com os obtidos através da aplicação da Equação (3), conforme ilustrado na Figura 20. Na simulação, os *lasers* de bombeamento 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 são lançados no início da fibra óptica em co-propagação com os sinais 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8. Na Figura 20, o ganho líquido em *dB* é mostrado para valores de potência igual a 0, 30, 60, 90, 120 e 150*mW* para os sinais na *Banda – S*. Os resultados calculados utilizando método numérico (curvas sólidas) reproduzem os valores determinados algebricamente (pelo símbolo, ‘□’) para

todos os valores de potência dos *lasers* de bombeamento simulados, validando a solução numérica das equações.

Na ausência dos *lasers* de bombeamento, ou seja, a curva correspondente a $0mW$ da Figura 20, o ganho líquido varia de $-24dB$ para o comprimento de onda mais curto a $-21dB$ para o comprimento de onda mais longo. Essa variação de $3dB$ é uma consequência da dependência inversamente proporcional do coeficiente de perda com o comprimento de onda dos sinais na *Banda-S* para a fibra óptica. Para os valores de potência de *lasers* de bombeamento variando de 0 a $150mW$ pode-se notar um aumento do ganho líquido da ordem de 6 a $7dB$. Uma vez que as perdas dos sinais são descartadas, pode-se verificar a contribuição efetiva do espalhamento *Raman* nos sinais. Essa quantidade é definida como ganho *on-off*. Assim como no caso do ganho líquido pode-se derivar uma expressão analítica para o ganho *on-off*, que é dada por:

$$G_{on-off} = \frac{P_{s,i}(L) \text{ com os bombeios ligados}}{P_{s,i}(L) \text{ com os bombeios desligados}} = e^{C_{i,j}^R L_{eff} (P_{i,j}^f(0) + P_{i,j}^b(L))} \quad (5)$$

Note que a Equação (5) coincide com a Expressão (3) se descartado o termo de perdas da última.

Na Figura 21, o ganho *on-off* é calculado para os 8 comprimentos de onda de sinal e para os 6 valores de potência utilizados nas simulações mostradas na Figura 20.

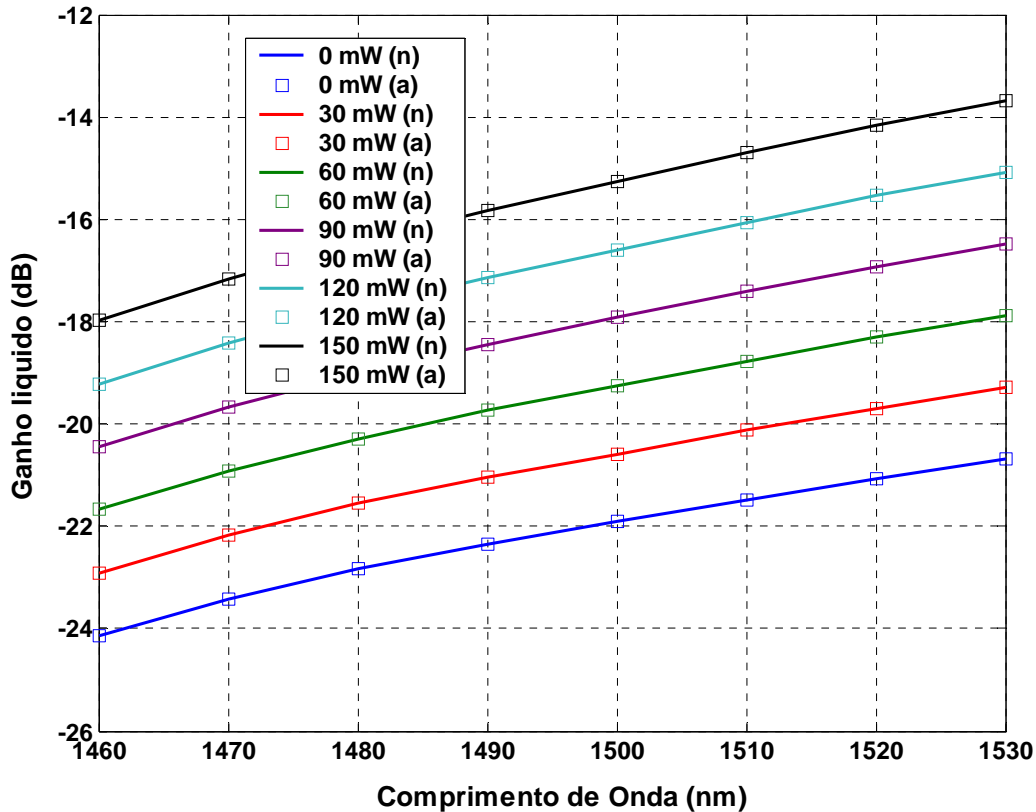


Figura 20. Ganho líquido em 100km de enlace na *Banda-S* em função da potência dos *lasers* de bombeamento. Os *lasers* de bombeamento 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 são co-propagantes com os sinais 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8. Estes são lançados na fibra óptica com os mesmos valores de potência. Os símbolos correspondem aos valores calculados pela expressão analítica e as curvas sólidas são calculadas por um algoritmo numérico.

Na ausência de *laser* de bombeamento, o ganho *on-off* é igual a 0dB. Para cada aumento de 30mW na potência dos *lasers* de bombeamento, o ganho líquido aumenta de aproximadamente 1dB para todos os comprimentos de onda. No entanto, para o ganho *on-off*, esse aumento não é uniforme para todos os comprimentos de onda. Este comportamento fica mais evidenciado para a curva correspondente a potência de 150mW, onde o ganho *on-off* é cerca de 1dB maior para os comprimentos de onda mais longos. Essa característica está relacionada com o coeficiente de perda ser inversamente proporcional ao comprimento de onda dos *lasers* de bombeamento para a fibra óptica $TW^{\text{®}}RFLWP$, conforme mostrado na Tabela V. Sendo assim, é necessário um maior valor de potência para garantir o mesmo ganho

nos comprimentos de ondas mais curtos. O único fator que favorece os comprimentos de ondas mais curtos é a eficiência de ganho *Raman*, que como discutido no capítulo anterior é inversamente proporcional ao comprimento de onda.

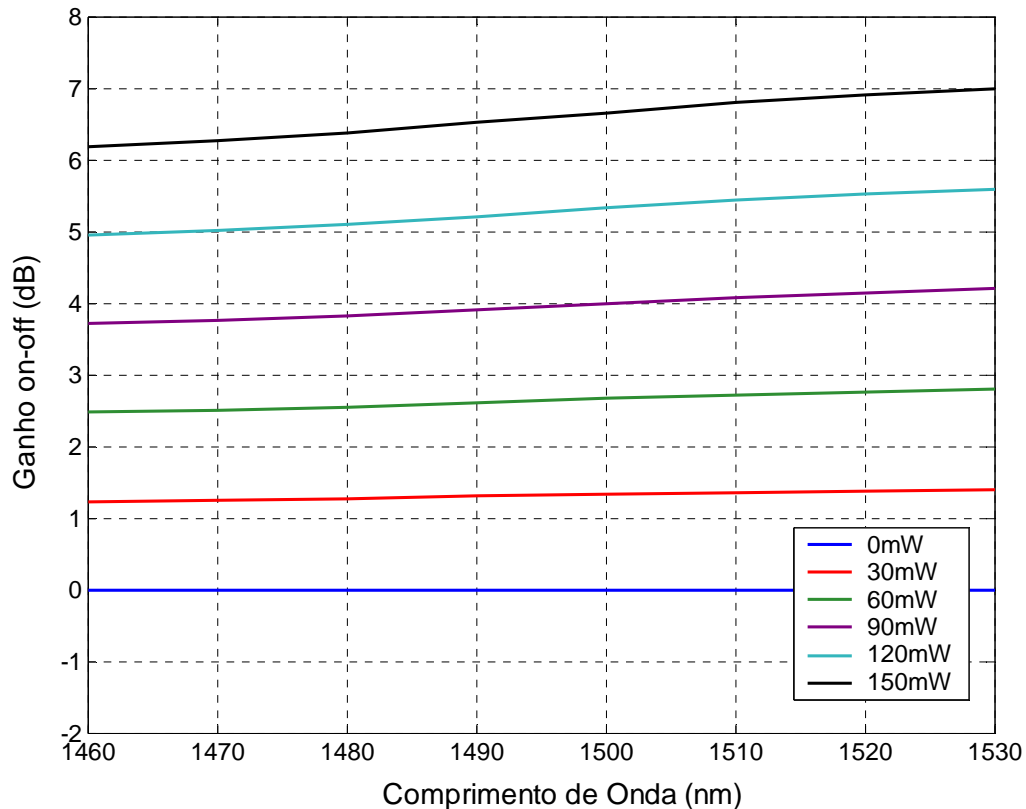


Figura 21. Ganho *on-off* em 100km de enlace na *Banda-S* em função da potência do *laser* de bombeamento. Os *lasers* de bombeamento 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 são co-propagantes com os sinais com valor de potência uniforme.

O comportamento dos sinais e dos *lasers* de bombeamento ao longo do enlace de 100km é explorado no conjunto de Figuras 22 - 30. As Figuras 22 e 23 mostram o comportamento dos sinais 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 devido à interação com os *lasers* de bombeamento 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 contra-propagantes, e o comportamento dos *lasers* de bombeamento 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 ao longo de 100km de enlace, respectivamente.

Os *lasers* de bombeamento são lançados no final da fibra óptica, todos com potência igual a $150mW$ e são atenuados ao se aproximarem do início do enlace, como mostrado na Figura 23. Os *lasers* de bombeamento de comprimento de onda mais longo são menos atenuados do que os de comprimento de onda mais curto, pois o coeficiente de perda é inversamente proporcional ao comprimento de onda nessa região espectral da fibra óptica. Os sinais lançados no início da fibra óptica são atenuados e têm um aumento de potência ao interagir com os *lasers* de bombeamento no final do enlace por volta de $90km$, como mostrado na Figura 22.

A região em torno de $90km$ é analisada com mais detalhe na Figura 24. Nesta, pode-se verificar que os sinais de comprimento de onda mais longo têm um aumento de sinal antes dos sinais de comprimento de onda mais curto. Essa característica é uma consequência direta da dependência da perda na fibra óptica com o comprimento de onda. Para a região espectral de interesse, as perdas são inversamente proporcionais ao comprimento de onda, o que torna os sinais de comprimento de onda mais curto, acoplados aos *lasers* de bombeamento de comprimento de onda mais curto, mais “sensíveis” as perdas do enlace. Essa sensibilidade se reflete tornando necessário um nível de potência do *laser* de bombeamento mais alto para se obter aumento do nível de sinal. Um maior nível de potência à medida que se aproxima do final do enlace.

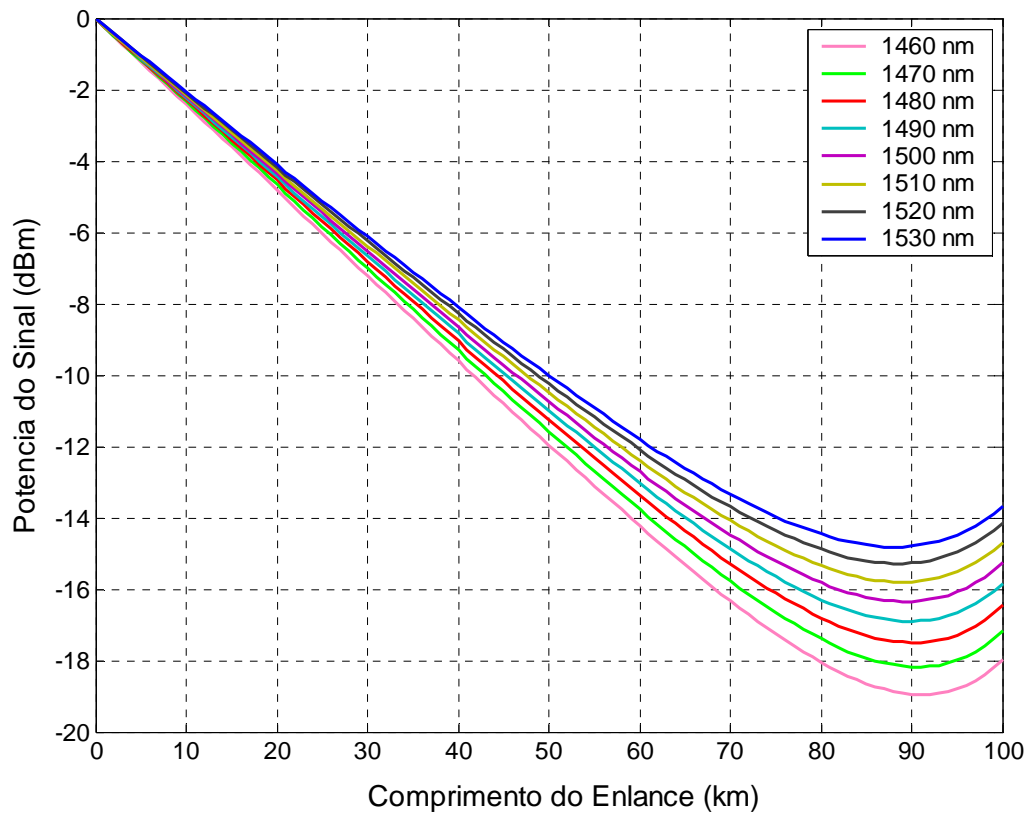


Figura 22. Potência dos sinais 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 em dBm em função do comprimento do enlace. Os *lasers* de bombeamento 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 são lançados no final da fibra óptica, ou seja, contra-propagantes com os sinais e com uma potência igual a $150mW$. Ao interagirem com os *lasers* de bombeamento, na região dos $90km$, os sinais têm um aumento de potência.

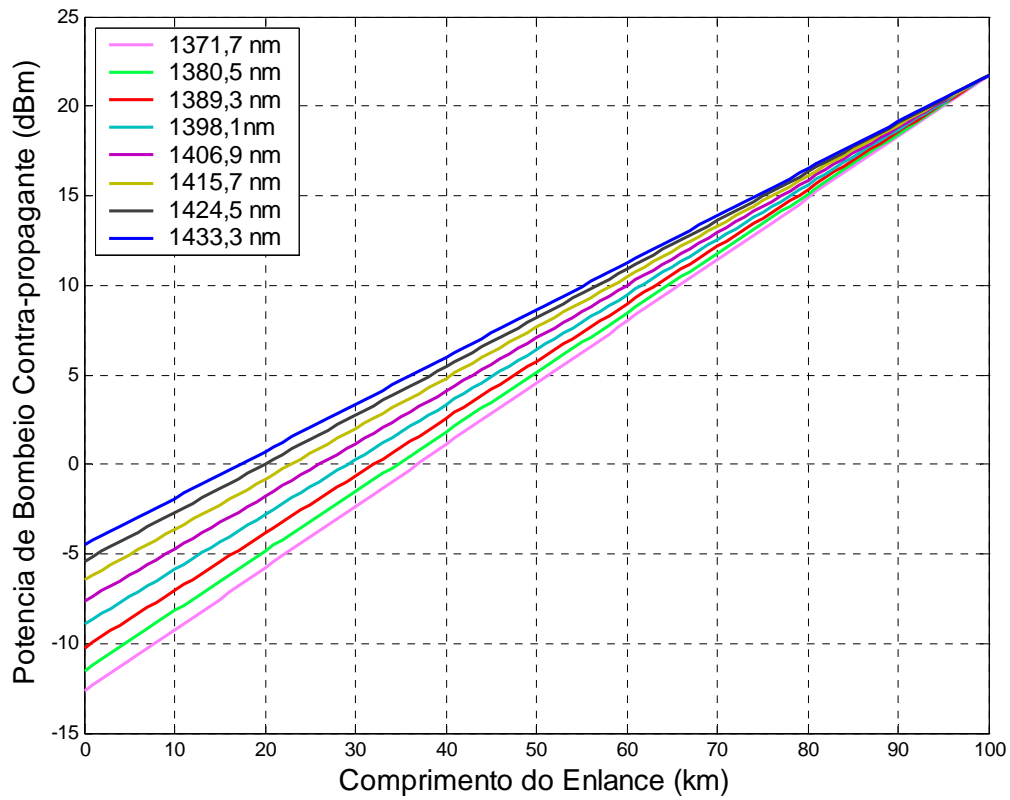


Figura 23. Potência dos *lasers* de bombeamento 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 em *dBm* em função do comprimento do enlace. Os *lasers* de bombeamento são lançados no final do enlace, ou seja, contra-propagantes com os sinais e com uma potência igual a $150mW$.

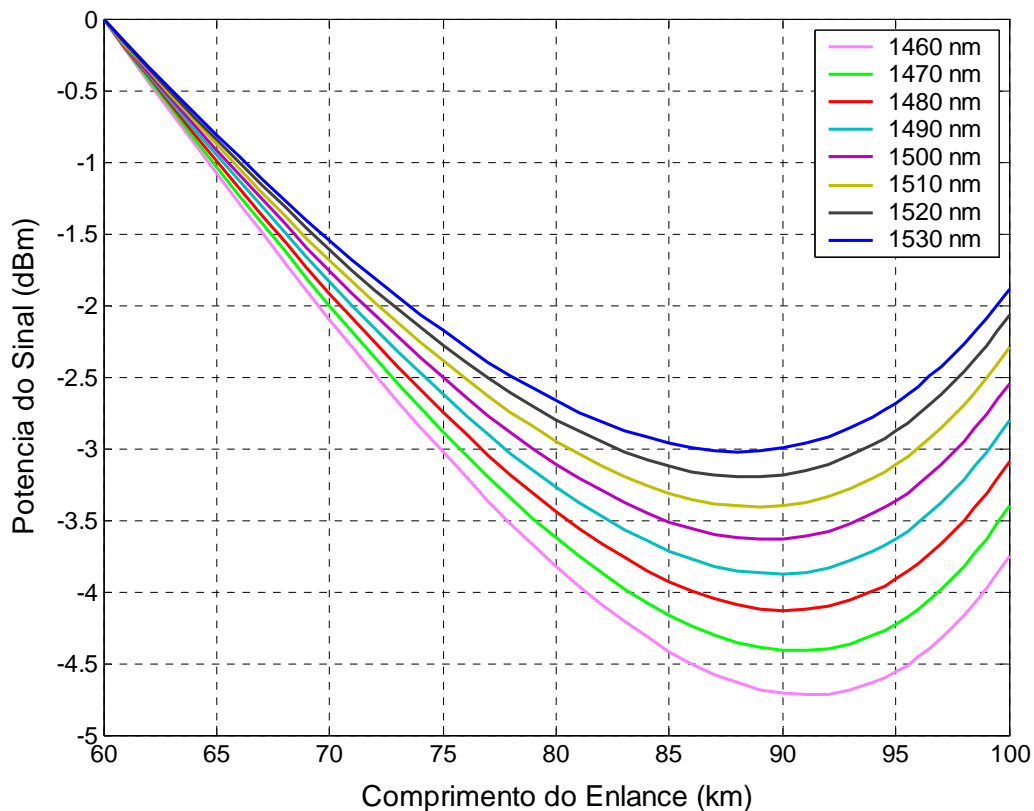


Figura 24. Potência dos sinais 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 em dBm em função do comprimento do enlace. A região de 60 a 100km é expandida em relação aos resultados da Figura 22. Os *lasers* de bombeamento 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 são lançados no final da fibra óptica, ou seja, contra-propagantes com os sinais e com uma potência igual a 150mW .

As Figuras 25 e 26 mostram o comportamento dos sinais 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 devido à interação com os *lasers* de bombeamento 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 co-propagantes, e o comportamento dos *lasers* de bombeamento 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 ao longo de 100km e enlace, respectivamente. Os *lasers* de bombeamento são lançados no início da fibra óptica, todos com potência igual a 150mW e são atenuados ao longo do enlace, como mostrado na Figura 26. Os sinais têm um aumento de potência de sinal no início do enlace, e a partir de 10km a perda da fibra óptica contribui para a diminuição dessa taxa de crescimento do sinal e do *laser* de bombeamento, e passa a dominar o comportamento do sinal ao longo da fibra óptica por volta de 20km, como mostrado na Figura 25.

Os *lasers* de bombeamento de comprimento de onda mais curtos são atenuados mais rapidamente, pois o coeficiente de perda é inversamente proporcional ao comprimento de onda. Note ainda, que os sinais de comprimentos de onda mais curtos começam a perder sinal, e cruzam a região de ganho para a região de perda antes dos sinais de comprimento de onda mais longos, como mostrado na Figura 26. Esse comportamento é uma consequência direta da dependência da perda da fibra óptica com o comprimento de onda.

A região em torno de 10km é mostrada com mais detalhe na Figura 27. Como a atenuação da fibra óptica $TW^{\text{®}}RFLWP$, para a região espectral de interesse, é inversamente proporcional ao comprimento de onda, os sinais de comprimentos de onda mais longos possuem uma taxa menor de decréscimo com o comprimento do enlace.

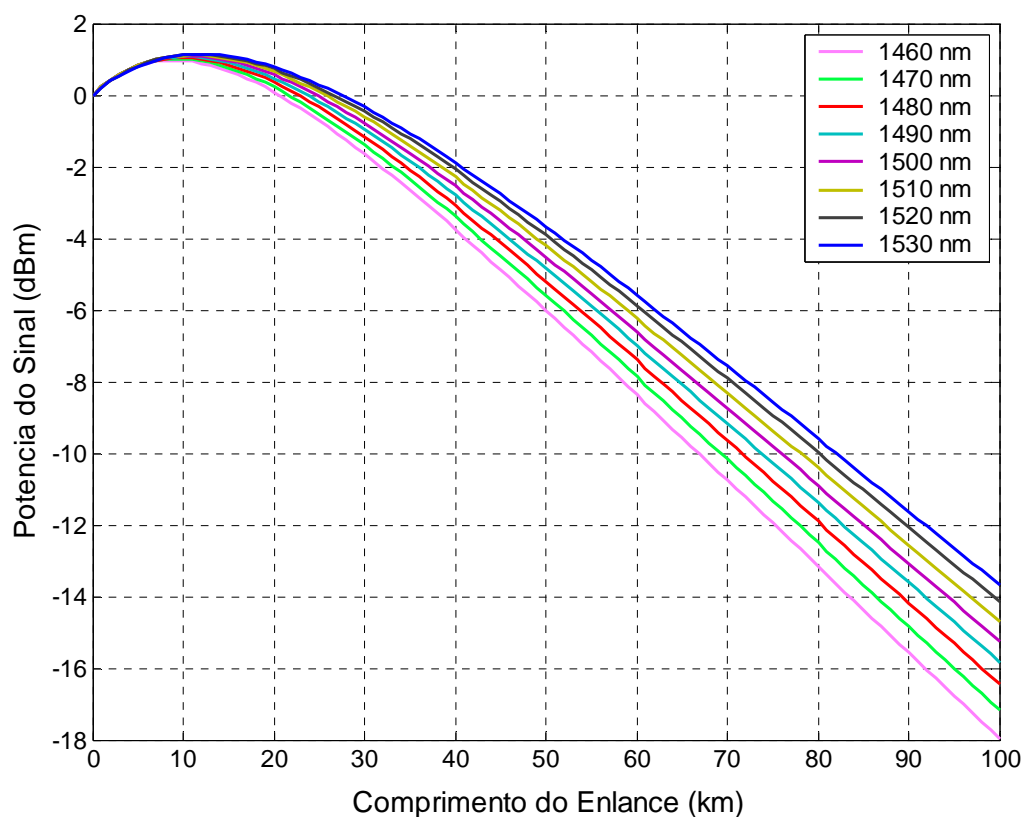


Figura 25. Potência dos sinais 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 em dBm em função do comprimento do enlace. Os *lasers* de bombeamento 1, 3, 5 e 7 encontram-se desligados e os *lasers* de bombeamento 2, 4, 6 e 8 são lançados no início da fibra óptica, ou seja, co-propagantes

com os sinais, ao atingirem a região dos 10km .

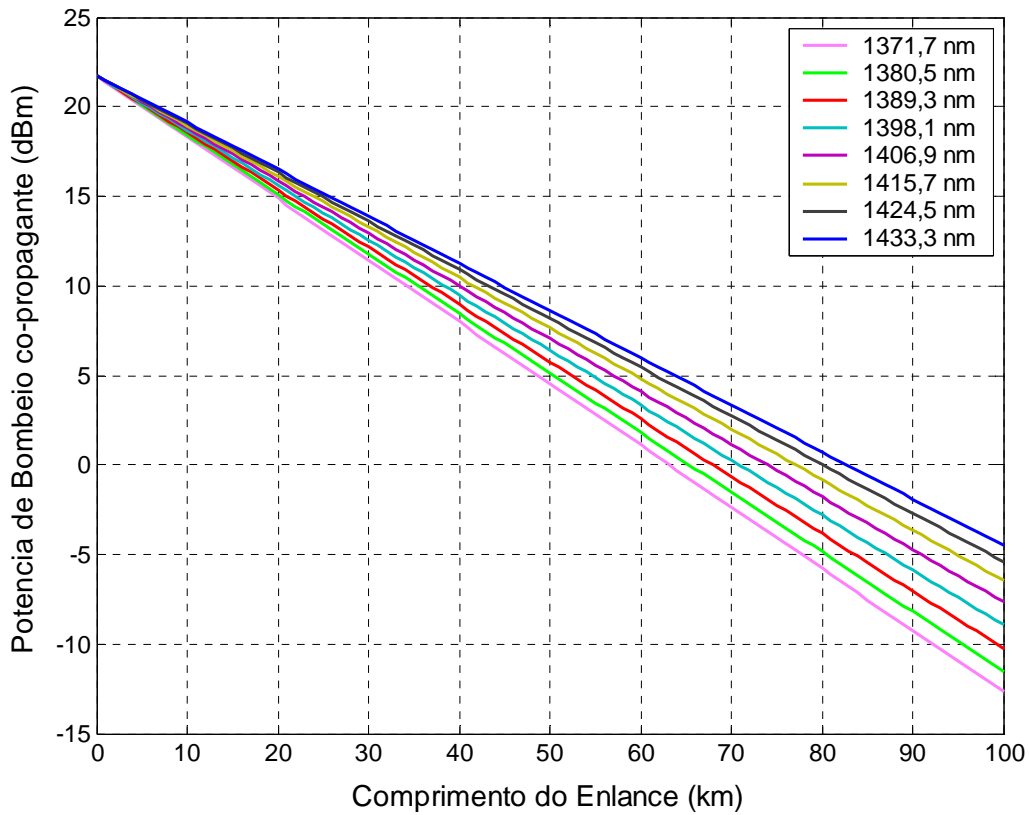


Figura 26. Potência dos *lasers* de bombeamento 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 em *dBm* em função do comprimento do enlace. Os *lasers* de bombeamento são lançados início do enlace, ou seja, co-propagantes com os sinais e com uma potência igual a 150mW . A perda na fibra óptica contribui para a diminuição da taxa de crescimento do sinal e do *laser* de bombeamento, e passa a dominar o comportamento do sinal ao longo da fibra por volta de 20km .

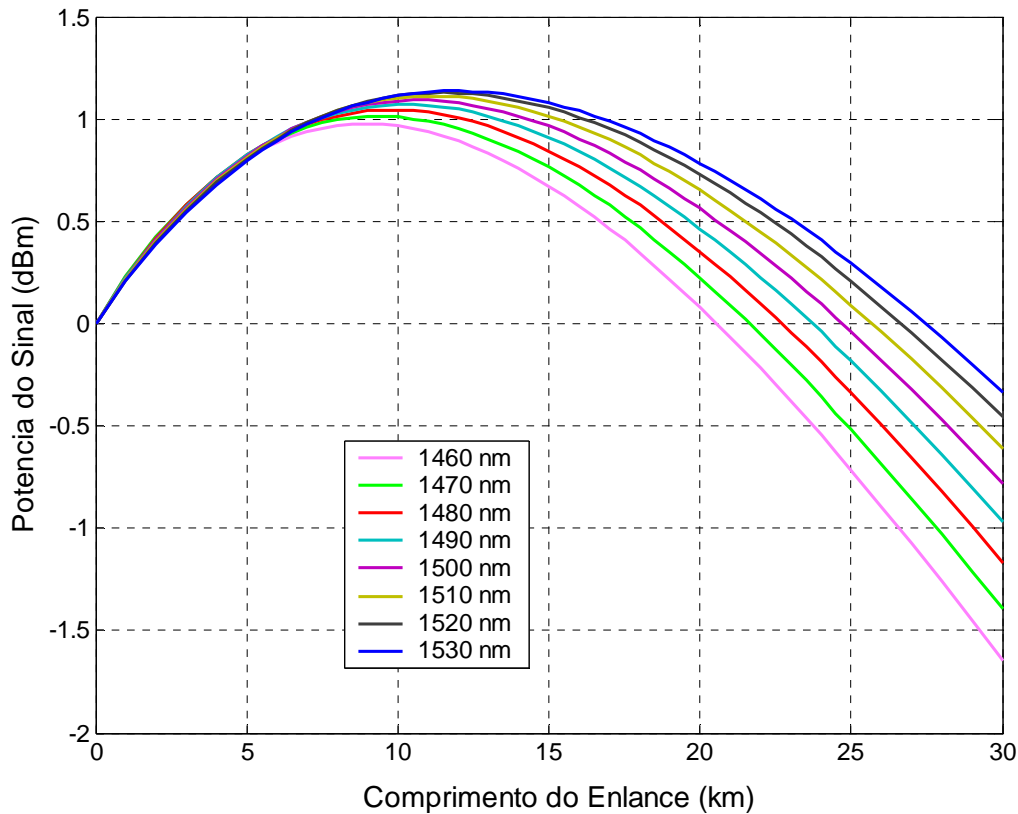


Figura 27. Potência dos sinais 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 em dBm em função do comprimento do enlace. Os *lasers* de bombeamento 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 são lançados no início da fibra óptica, ou seja, co-propagantes com os sinais.

A Figura 28 mostra o comportamento dos sinais 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 devido à interação com os *lasers* de bombeamento 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 contra-propagantes e co-propagantes, em uma configuração de *lasers* de bombeamento combinados.

Os *lasers* de bombeamento contra-propagantes são lançados no final da fibra óptica, todos com potência igual a $150mW$ e são atenuados ao se aproximarem do início do enlace. Os *lasers* de bombeamento co-propagantes são lançados no início da fibra óptica, todos com potência igual a $150mW$ e são atenuados ao longo do enlace. O perfil de distribuição de sinal é uma superposição dos perfis obtidos nas Figuras 25 e 22.

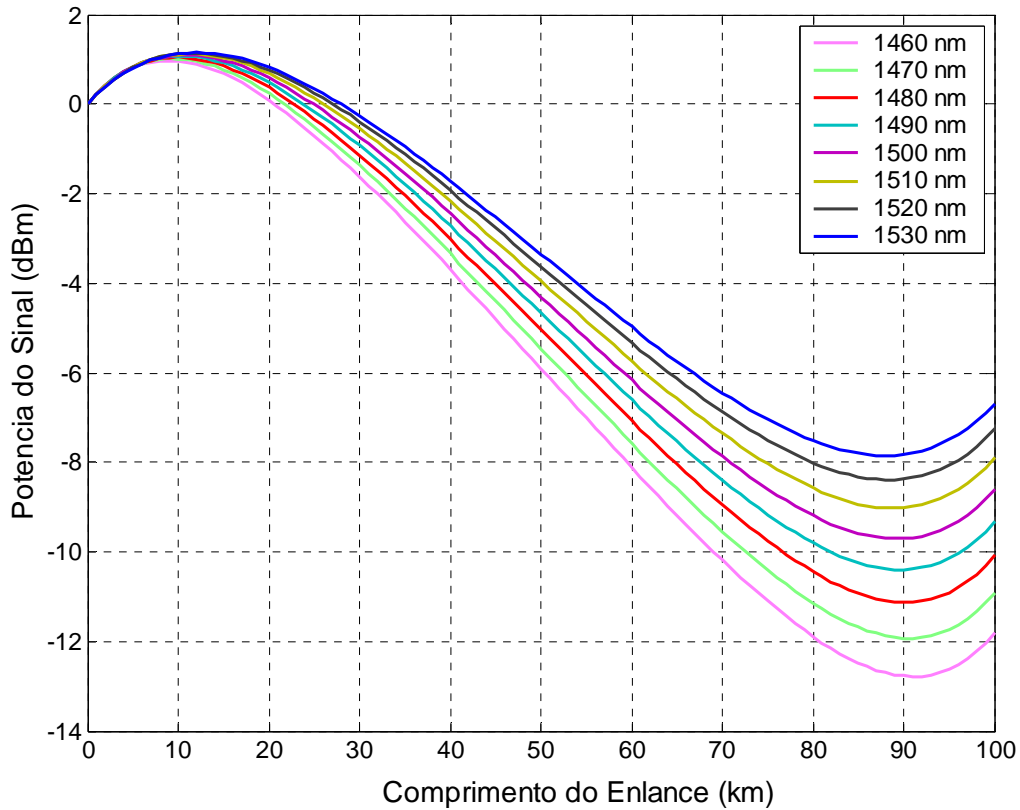


Figura 28. Potência dos sinais 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 em dBm em função do comprimento do enlace. Os *lasers* de bombeamento contra-propagantes 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 são lançados no final da fibra óptica, ou seja, contra-propagantes com os sinais e com uma potência igual a $150mW$.

Na configuração de *lasers* de bombeamento combinados, o ganho líquido e o ganho *on-off* são alterados conforme Figura 29 e 30 respectivamente. Note que o comportamento qualitativo discutido para o ganho líquido e ganho *on-off* nos casos co-propagante e contra-propagante, permanece o mesmo dos casos em que os *lasers* de bombeamento são co-propagantes e contra-propagantes, conforme discutido nas Figuras 25 e 22. No entanto, quantitativamente, nota-se uma diferença de $6dB$ nas curvas do ganho líquido e do ganho *on-off*. Como os valores de potência são iguais, tem-se o dobro do valor de potência comparado com o caso co-propagante, dando origem a essa diferença.

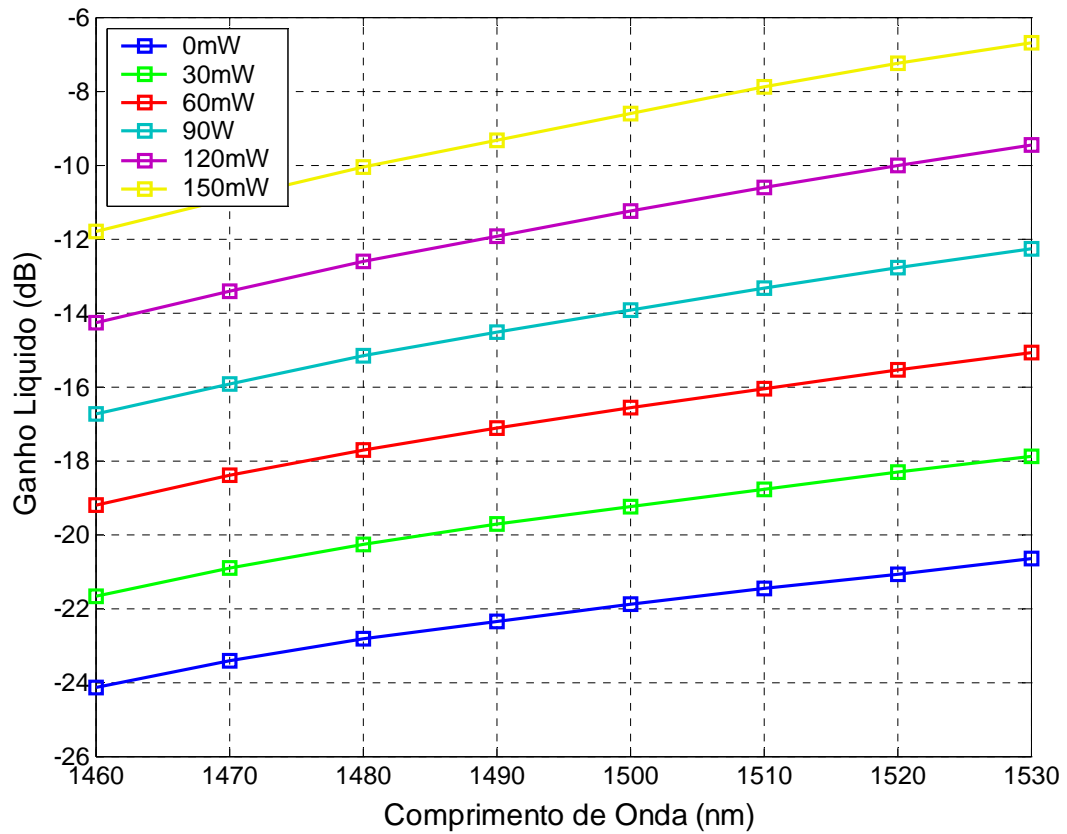


Figura 29. Ganho líquido em 100km de enlace na *Banda - S* em função da potência dos *lasers* de bombeamento. Os *lasers* de bombeamento 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 são co-propagantes e contra-propagantes com os sinais 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8. Estes são lançados na fibra óptica com os mesmos valores de potência.

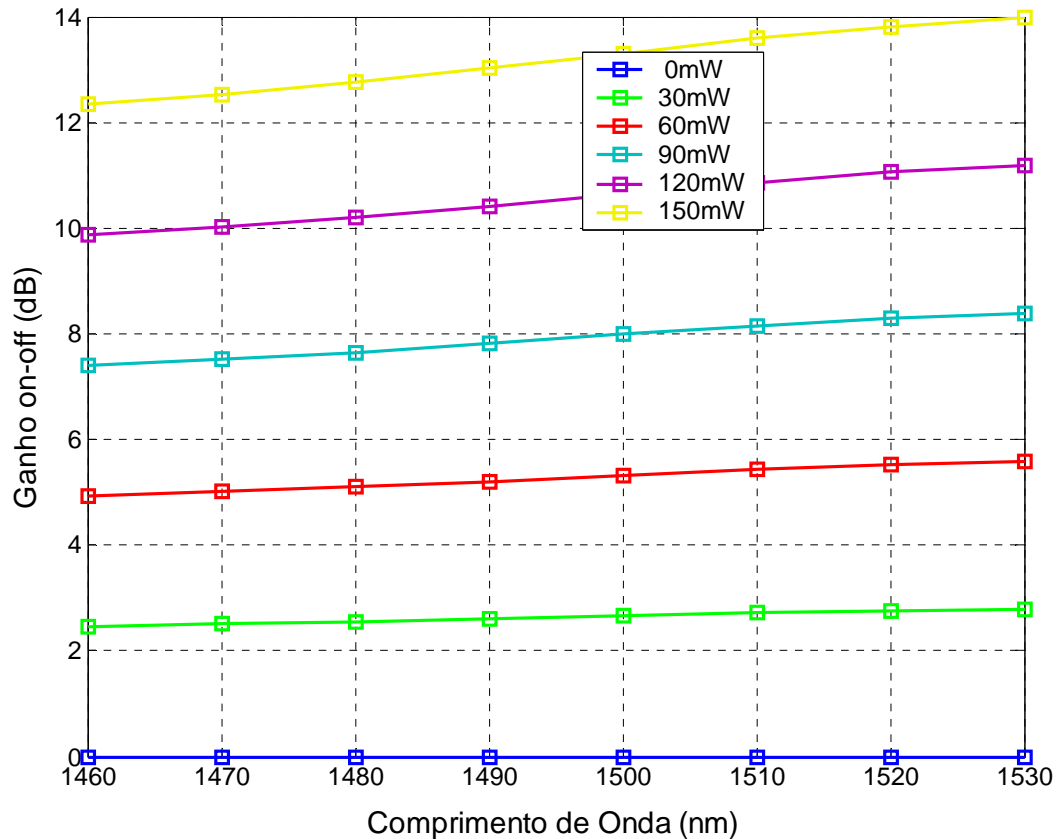


Figura 30. Ganho *on-off* em 100km de enlace na *Banda-S* em função da potência dos *lasers* de bombeamento. Os *lasers* de bombeamento 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 são co-propagantes e contra-propagantes com os sinais 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8. Todos os *lasers* de bombeamento são lançados na fibra com potências iguais.

4.3 Análise da amplificação distribuída devido ao acoplamento entre os sinais e os múltiplos *lasers* de bombeamento.

A contribuição mais significativa para o espalhamento *Raman* vem do *laser* de bombeamento localizado a $13,2THz$ do sinal, que denominamos de *laser* de bombeamento gêmeo ou par. No entanto, a contribuição dos *lasers* de bombeamento não-gêmeos ou não-pares não é desprezível, conforme discutido na seção 3.2.

No conjunto de resultados mostrados nas Figuras 31-32 as Equações (1.a)-(1.c) foram resolvidas numericamente para o seguinte conjunto de parâmetros: $\varepsilon_{i,j}^3 = 1$ para $i = j$, e $\varepsilon_{i,j}^3 = 1$ para $i \neq j$, $\varepsilon_i^1 = 0$ e $\varepsilon_{k,j}^2 = 0$ para $k \neq j$. Assim sendo, a interação entre os sinais e os *lasers* de bombeamento leva em conta os *lasers* de bombeamento gêmeos e não-gêmeos, as perdas dos sinais e dos *lasers* de bombeamento.

A contribuição dos múltiplos *lasers* de bombeamento nos múltiplos sinais leva a um aumento no ganho *on-off* em relação ao valor devido aos *lasers* de bombeamento gêmeos (veja Figura 31). Uma outra característica que chama atenção na Figura 31 é a diferença do ganho *on-off* para comprimento de onda no início da banda comparado com os valores no final da banda. Os comprimentos de ondas no início de banda apresentam um ganho *on-off* em torno de 10dB acima dos comprimentos de onda no final banda, para potência dos *lasers* de bombeamento de 90, 120 e 150mW. Essa diferença cai para 1 e 3dB para as potências de 30 e 60mW respectivamente. A diferença pode ser compreendida qualitativamente com a análise da Tabela II no capítulo 3. A Tabela II resume os valores da eficiência de ganho *Raman* levando em conta a interação entre os múltiplos *lasers* de bombeamento com os múltiplos sinais. Note que os *lasers* de bombeamento com comprimento de onda mais curto possuem uma maior eficiência de ganho *Raman* do que os *lasers* de bombeamento com comprimento de onda mais longo. Adicionalmente estes também são mais afetados pelos *lasers* de bombeamento não-gêmeos. A curva da eficiência de ganho *Raman* varia mais significativamente para os sinais cujo comprimento de onda localiza-se a esquerda do valor máximo da curva, do que para os sinais cujo comprimento de onda localiza-se a direita do valor máximo da curva. O comportamento do ganho *on-off* para todos os sinais em função da potência de bombeamento é mostrado na figura 32.

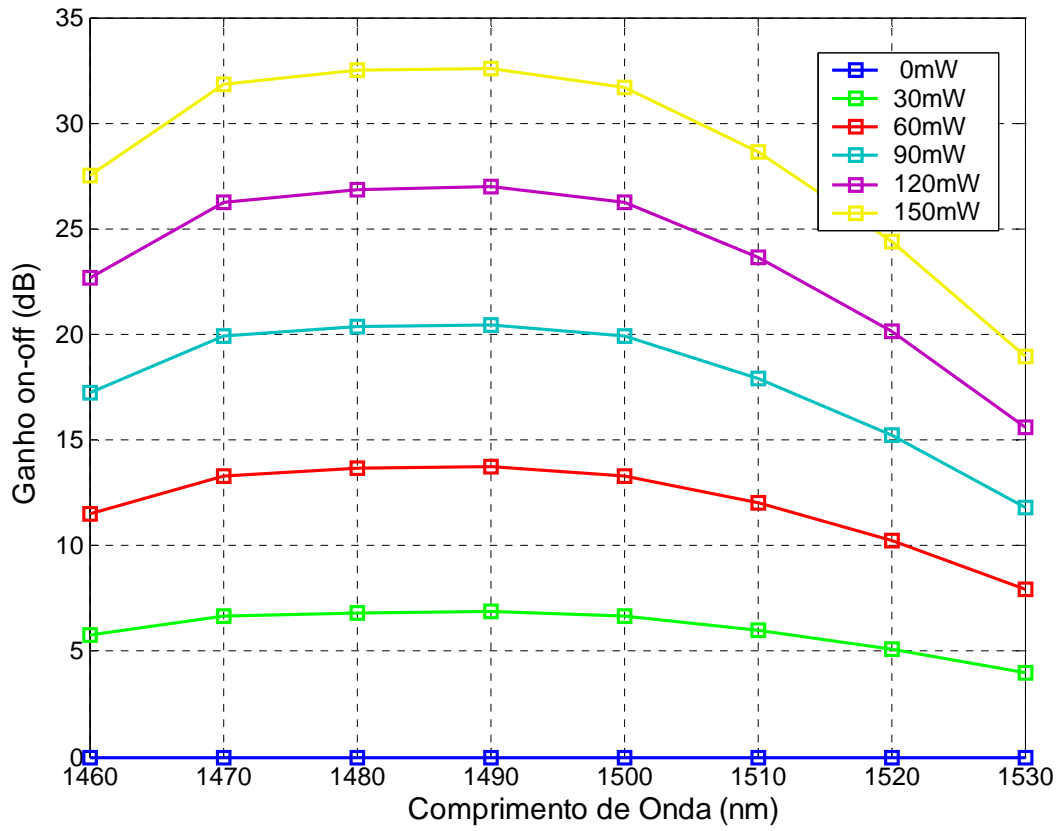


Figura 31. Ganho *on-off* em 100km de enlace na *Banda-S* em função da potência dos *lasers* de bombeamento. Os *lasers* de bombeamento 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 são contra-propagantes com os sinais 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8. Todos os *lasers* de bombeamento são lançados na fibra com potências iguais.

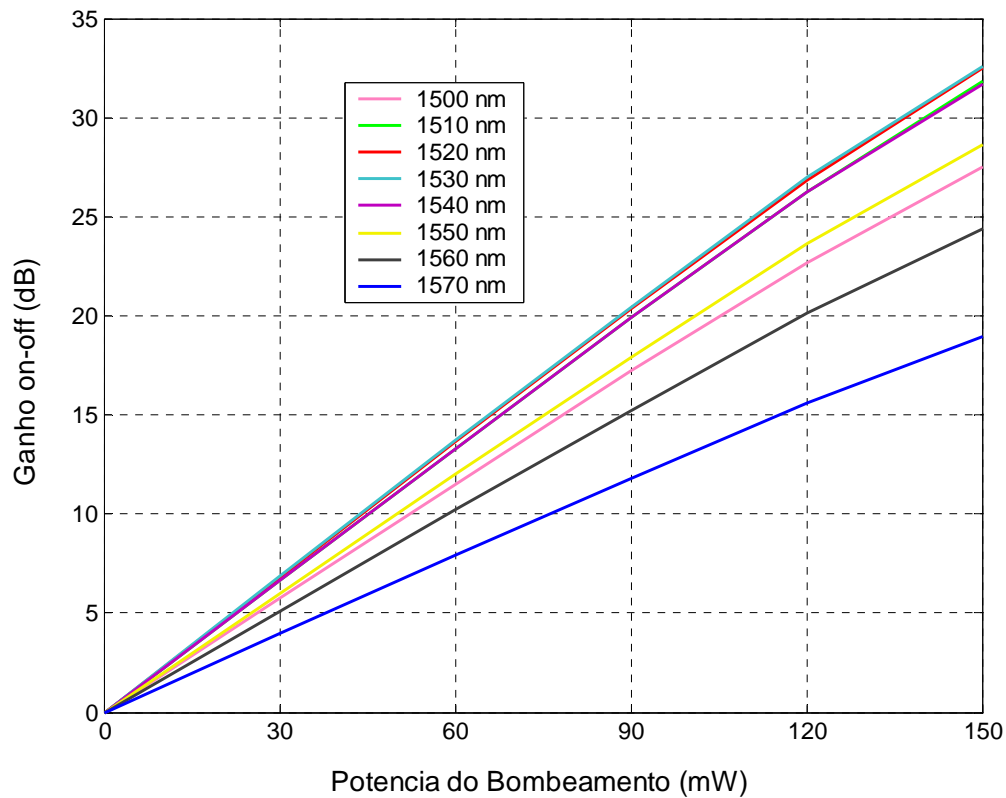


Figura 32. Ganho *on-off* para os sinais 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 em função da potência dos *lasers* de bombeamento. Os *lasers* de bombeamento 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 são contra-propagantes com os sinais 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8. Todos os *lasers* de bombeamento são lançados na fibra com potências iguais.

4.4 Análise da amplificação distribuída devido ao acoplamento entre os múltiplos *lasers* de bombeamento.

No conjunto de resultados mostrados nas Figuras 33-35 as Equações (1.a)-(1.c) foram resolvidas numericamente para o seguinte conjunto de parâmetros: $\varepsilon_{i,j}^3 = 1$ para $i = j$, e $\varepsilon_{i,j}^3 = 1$ para $i \neq j$, $\varepsilon_i^1 = 0$ e $\varepsilon_{k,j}^2 = 1$ para $k \neq j$. Assim sendo, a interação entre os sinais e os *lasers* de bombeamento leva em conta os *lasers* de bombeamento gêmeos e não-gêmeos, as perdas dos sinais e dos *lasers* de bombeamento e a interação entre os múltiplos bombeamentos são consideradas.

A interação entre bombeamentos transfere potência dos *lasers* de bombeamento de comprimento de onda mais curto para os *lasers* de bombeamento comprimento de onda mais longos. Essa característica é verificada nas simulações das Equações (1) na presença e ausência da interação entre bombeamentos. Os resultados são mostrados nas Figuras 33 e 34. Os *lasers* de bombeamento são todos lançados com uma potência de $150mW$ no final de fibra. Na ausência de interação entre os bombeamentos estes alcançam o início da fibra com uma potência que varia de -13 a $-5dBm$ para os comprimentos de onda de bombeamento mais curtos e mais longos, respectivamente.

Na presença da interação entre bombeamentos, os *lasers* de bombeamentos de comprimento de onda mais curtos têm a potência reduzida de $-13dBm$ para aproximadamente $-38dBm$. Os comprimentos de onda de $1380,5$ e $1389,1nm$ também apresentam uma redução na potência no início do enlace devido a interação entre bombeamentos de 20 e $10dB$ respectivamente. A interação entre sinais e bombeamentos ocorre efetivamente em torno de $90km$. Nesta região nota-se uma redução da potência de bombeamento dos *lasers* de bombeamento de comprimento de onda mais curto e um aumento da potência dos *lasers* de comprimento de onda mais longos. Essa característica se reflete no ganho *on-off* mostrado na Figura 35.

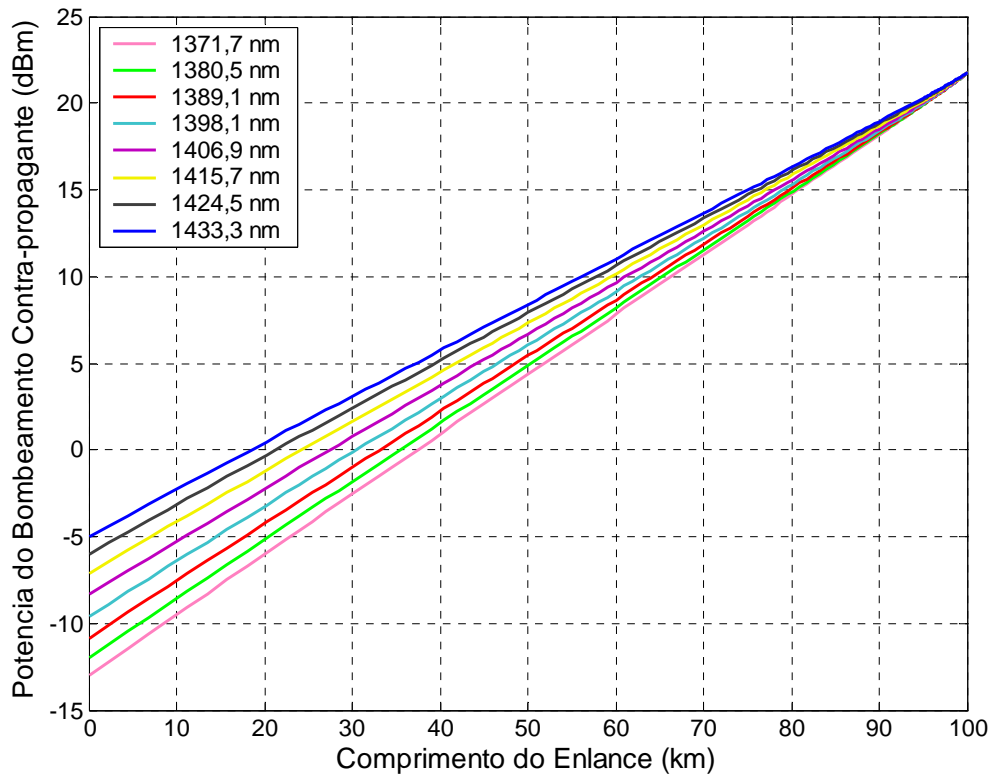


Figura 33. Potência dos *lasers* de bombeamento 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 em *dBm* em função do comprimento do enlace. Os *lasers* de bombeamento são lançados no final do enlace, ou seja, contra-propagantes com os sinais e com uma potência igual a $150mW$. Na ausência da interação entre os bombeamentos.

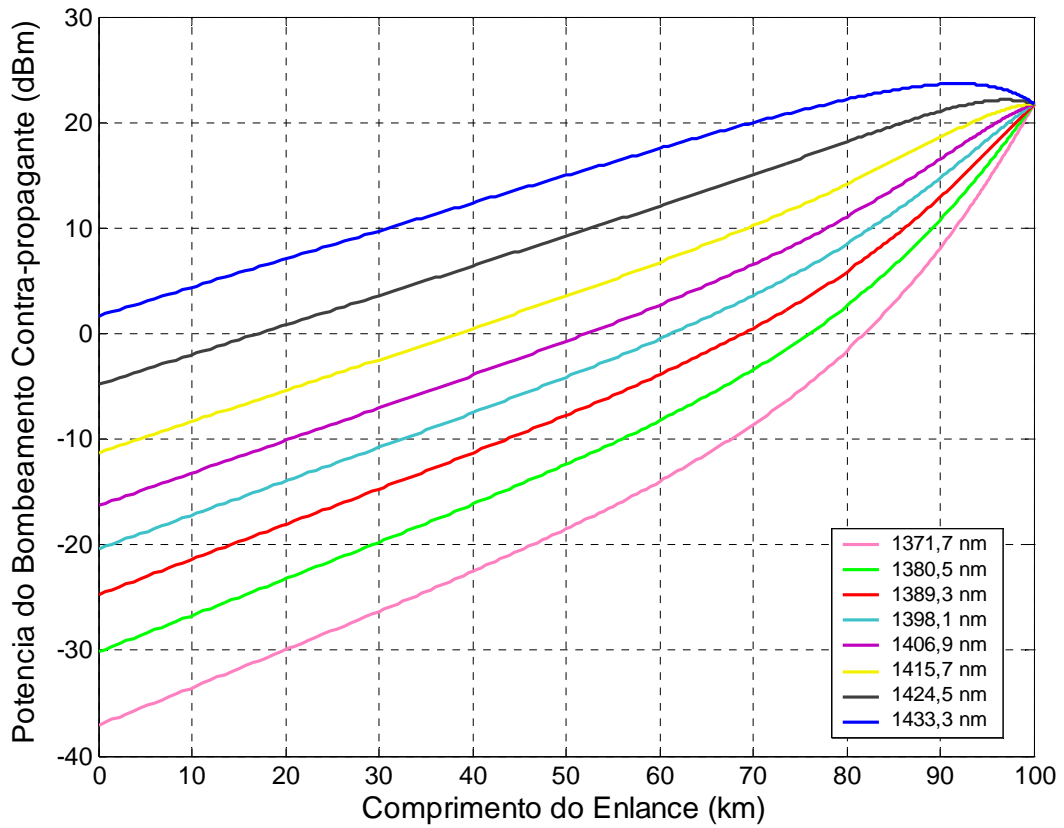


Figura 34. Potência dos *lasers* de bombeamento 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 em *dBm* em função do comprimento do enlace. Os *lasers* de bombeamento são lançados no final do enlace, ou seja, contra-propagantes com os sinais e com uma potência igual a $150mW$. Na presença da interação entre os bombeamentos.

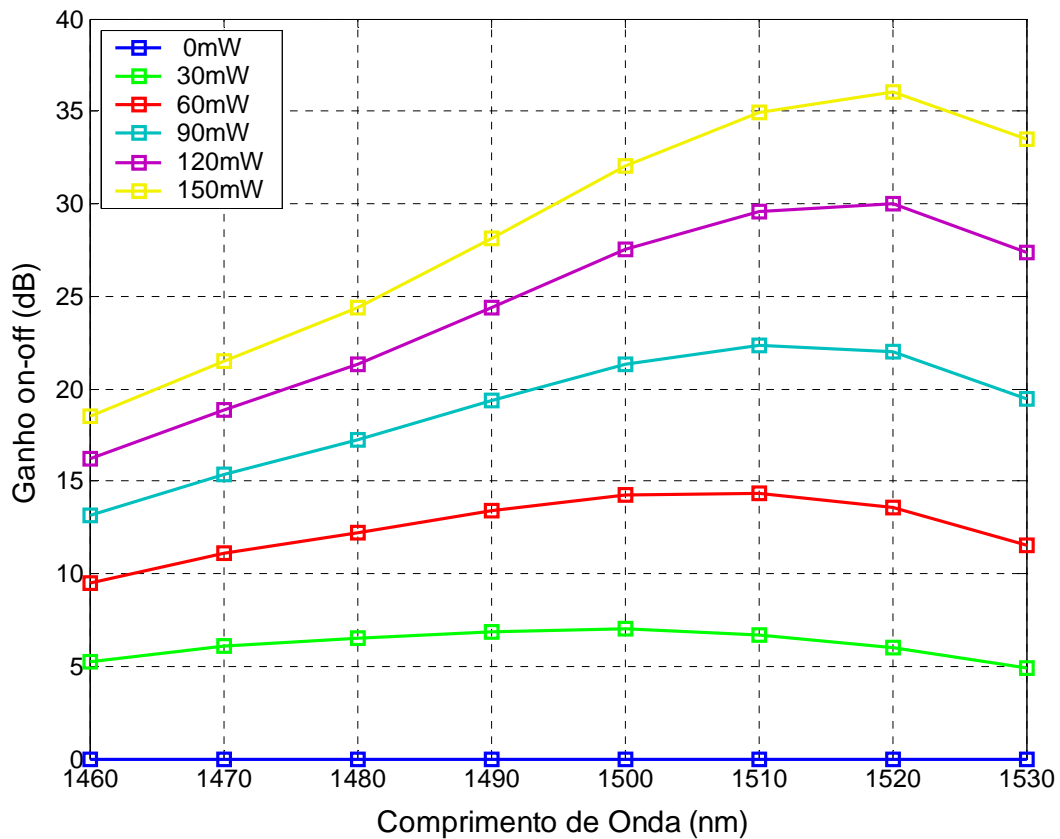


Figura 35. Ganho *on-off* em 100km de enlace na *Banda-S* em função da potência dos *lasers* de bombeamento. Os *lasers* de bombeamento 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 são contra-propagantes com os sinais 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8. Estes são lançados na fibra óptica com os mesmos valores de potência no final da fibra óptica. As interações entre os múltiplos *lasers* de bombeamento e as interações entre os múltiplos sinais com os múltiplos *lasers* de bombeamento são considerados.

4.5. Discussões finais

Em aplicações práticas é recomendável reduzir o número de *lasers* de bombeamento.

O ganho *on-off* quando 4 *lasers* de bombeamento encontram-se ligados é mostrado na Figura 36. Os *lasers* de bombeamento ligados são o 1, 3, 5, e 7. Nota-se um redução no valor do ganho *on-off* como esperado, no entanto o perfil permanece praticamente inalterado.

Para se obter um ganho mais plano para a *Banda-S* deve-se ajustar o valor das potências de bombeamento dos 4 bombeamentos. Em todas as análises conduzidas anteriormente, estas foram mantidas iguais. Um simples ajuste na potência do *laser* de bombeamento permite uma redução na variação do ganho *on-off* ao longo de todo o espectro de comprimento de onda, garantindo um ganho *on-off* quase plano conforme mostrado na Figura 37. Esse ajuste consiste de um aumento de 75% (262,5 para 150mW) na potência do *laser* de bombeamento 1 e uma redução de 70% (45 para 150mW) na potência do *laser* de bombeamento 5.

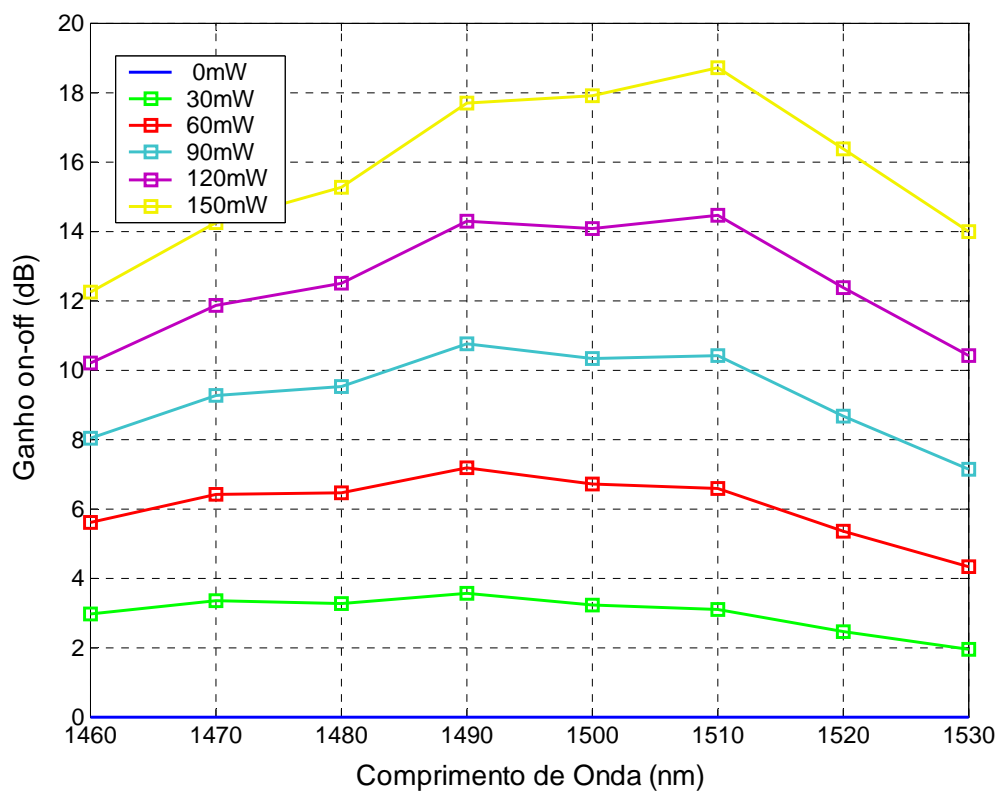


Figura 36. Ganho *on-off* em 100km de enlace na *Banda-S* em função da potência dos *lasers* de bombeamento. Os *lasers* de bombeamento 1, 3, 5, e 7 são contra-propagantes com os sinais 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8. Estes são lançados na fibra óptica com os mesmos valores de potência no final da fibra óptica.

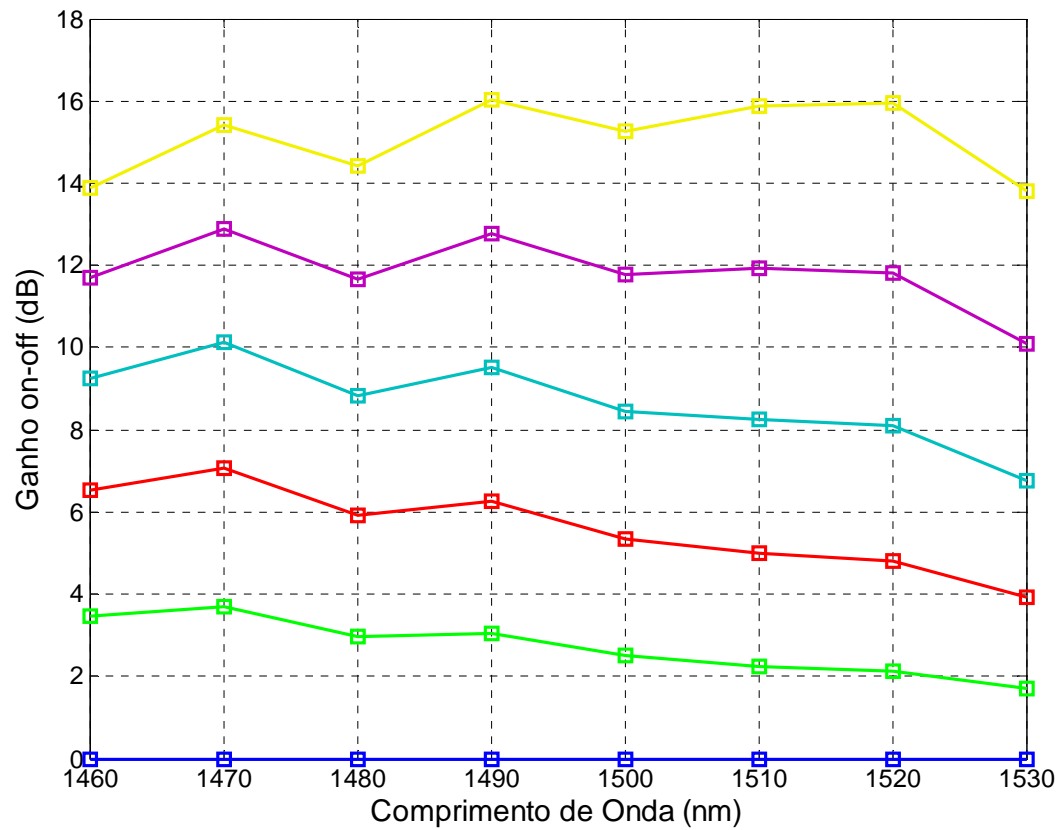


Figura 37. Ganho *on-off* em 100km de enlace na *Banda-S* em função da potência dos *lasers* de bombeamento. Os *lasers* de bombeamento 1, 3, 5, e 7 são contra-propagantes com os sinais 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8. Os valores de potência dos *lasers* de bombeamento correspondem aos utilizadas na legenda da Figura 36, com os seguintes ajustes: 75% de aumento no *laser* de bombeamento 1 e uma redução de 70% no *laser* de bombeamento 5.

5 Conclusão

As propriedades de área efetiva, atenuação, dispersão e eficiência de ganho *Raman*, medidas do espalhamento *Raman* para a fibra óptica *TrueWave[®] Reach -Low Water Peak* foram utilizadas para analisar e desenhar um amplificador *Raman* distribuído para cobrir todo o espectro de $70nm$ de comprimento de onda da *Banda – S* em um enlace de $100km$ com 8 sinais, espaçados de $10nm$, e 8 *lasers* de bombeamento.

Como ponto inicial, a partir das informações do fornecedor sobre a eficiência de ganho *Raman* para o *laser* de bombeamento em $1420nm$, foram construídas as curvas de eficiência de ganho *Raman* para os 8 canais, foi verificado que a eficiência de ganho *Raman* é maior para *lasers* de bombeamento de menor comprimento de onda, que sua máxima eficiência ocorre em $13,2THz$ de deslocamento do comprimento de onda do sinal para o comprimento de onda do *laser* de bombeamento, ou seja, o par sinal/bombeamento gêmeo ou par.

Utilizando as equações não-lineares acopladas que simulam o comportamento da amplificação *Raman* distribuída, e considerando o ruído causado pela emissão espontânea amplificada (*ASE – amplified spontaneous emission*), foram feitas as análises da amplificação distribuída.

Na amplificação distribuída devido ao acoplamento entre os sinais e os *lasers* de bombeamento ou gêmeos/pares, na ausência dos *lasers* de bombeamento, o ganho líquido varia de $-24dB$ para o comprimento de onda mais curto a $-21dB$ para o mais longo, e o ganho *on-off* é de $0dB$. Para os valores de potência de *lasers* de bombeamento variando de 0 a $150mW$ pode-se notar um aumento no ganho líquido da ordem de 6 a $7dB$, aumentando

aproximadamente $1dB$ para todos os comprimentos de onda. No entanto, para o ganho *on-off*, esse aumento não é uniforme para todos os comprimentos de onda. Este comportamento fica mais evidenciado para a curva correspondente a potência de $150mW$, onde o ganho *on-off* é cerca de $1dB$ maior para os comprimentos de onda mais longos.

Na amplificação distribuída devido ao acoplamento entre os sinais e os múltiplos *lasers* de bombeamento ou não-gêmeos/não-pares, os comprimentos de ondas no início de banda apresentam um ganho *on-off* em torno de $10dB$ acima dos comprimentos de onda no final banda, para potência dos *lasers* de bombeamento de 90 , 120 e $150mW$. Essa diferença cai para 1 e $3dB$ para as potências de 30 e $60mW$ respectivamente.

Na amplificação distribuída devido ao acoplamento entre os múltiplos *lasers* de bombeamento, todos lançados com uma potência de $150mW$ no final de fibra óptica, na ausência de interação entre os bombeamentos, alcançam o início da fibra óptica com uma potência que varia de -13 a $-5dBm$ para os comprimentos de onda de bombeamento mais curtos e mais longos, respectivamente. Os *lasers* de bombeamentos de comprimento de onda mais curtos têm a potência reduzida de $-13dBm$ para aproximadamente $-38dBm$. Os comprimentos de onda de $1380,5$ e $1389,1nm$ também apresentam uma redução na potência no início do enlace devido a interação entre bombeamentos de 20 e $10dB$ respectivamente. A interação entre sinais e bombeamentos ocorre efetivamente em torno de $90km$.

As simulações e análises conduzidas nesse trabalho permitiram de forma simples e direta, ou seja, com a redução do número e um simples balanço de potência de *lasers* de bombeamento, dimensionar a operação de amplificador *Raman* distribuído em $70nm$ de banda para um enlace de $100km$ utilizando uma fibra óptica *TrueWave[®] Reach -Low Water*

Peak. Utilizando-se 4 *lasers* de bombeamento com potências da ordem de dezenas de *miliWatts* pode-se obter um ganho *on-off* em torno de 12*dB* com variação menor do que 2,5*dB* em toda a banda.

Efeitos como retro-espalhamento *Rayleigh* duplo (*DRBS* – *double Rayleigh backscattering*) e mistura de quatro ondas (*FWM* – *four-wave mixing*) não foram implementados neste trabalho e conseqüentemente não foram analisados. A mistura de quatro ondas merece especial atenção em função dos *lasers* de bombeamento de comprimento de onda mais curtos encontrarem-se próximos ao *zero* de dispersão da fibra óptica e será objeto de trabalhos futuros.

6 Referências

- [1] *J. Bromage et al., "S-band all-Raman amplifiers for 40x10 Gb/s transmission over 6x100km of non-zero dispersion fiber", in Proc. Optical Fiber Conference, Post Deadline Paper, 2003*
- [2] *Caspary, R., Unrau, U. B. e Kowalsky, W., "Recent Progress on S – Band Fiber Amplifiers", Technical University of Braunschweig, Institut of fur Hochfrequenztechnik, 2003*
- [3] *R. LAUDARES, Rogério; "Modelagem de amplificadores de fibra dopada com túlio". Dissertação de Mestrado, Universidade Presbiteriana Mackenzie, 2005*
- [4] *T. Kasamatsu et al., "Novel 1.50- μm band GS-TDFA by using a dual wavelength pumping of 1.05 μm and 1.56 μm ", OFC'99, PD1 (1999)*
- [5] *M. Islam, "Raman Amplifiers for Telecommunications", IEEE Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 8, N^o 3, Pág. 548-559, May 1999*
- [6] *P.M. Krummirch, R.E.Neuhauser, and C. Glingener, "Bandwidth limitations of broadband distributed Raman Amplifier for WDM Systems", in Proc. Optical Fiber Conference, 2003*
- [7] *H. Kidorf, K. Rottwitt, M. Nissov et al, "Pump Interactions in a 100-nm Bandwidth Raman Amplifier", IEEE Phot. Tech. Letter, Vol. 11, N^o 5, Pág. 530- 532, May 1999*
- [8] *N. R. Newbury, "Pump-Wavelength Dependence of Raman Gain in Single-Mode Optical Fibers", Journal of Lightwave Technology, Vol. 21, Pág. 3364-3373, December,2003*
- [9] *L. F. Mollenauer, R. H. Stole e M. N. Islam, Opt. Lett., 10, 229, 1985*
- [10] *P. B. Hansen, L. Eskildsen, S. G. Grubb, S. K. Korotky, T. A. Strasser, J. E. J. Alphonse, J. J. Veselka, D. J. Di Giovanni, D. W. Peckham e D. Truxal, Electron. Lett., 32, 1018, 1996*
- [11] *T. N. Nielsen, A. J. Stentz, K. Rottwitt, D. S. Vengsarkar, Z. J. Chen, P. B. Hansen, J. H. Park, K. S. Feder, S. Cabot, S. Stulz, D. W. Peckham, L. Hsu, C. K. Kan, A. F. Judy, S. Y. Park, L. E. Nelson e L. Gruner-Nielsen, IEEE Photon. Technol. Lett., 12, 1079, 2000*

- [12] B. Chu, L. Leng, L. E. Nielsen, L. Gruner-Nielsen, Y. Qian, J. Bromage, S. Stulz, S. Kado, Y. Emori, S. Namiki, P. Gaarde, A. Judy, B. Palsdottir e R. L. Lingle, Jr, “3.2Tb/s(80×42.7Gb/s) transmission over 20×100km of non-zero dispersion fiber with simultaneous C+L band dispersion compensation”, (Optical Fiber Communication Conferences, Anaheim, CA, March 2002, postdeadline paper FC8
- [13] C. V. Raman e K. S. Krishnan, “A new type of secondary radiation”, *Nature* 121:501-502,1928, *The optical analogue of the Compton effect*, 121:711, 1928
- [14] G. S. Landsberg e L. I. Mandelstam, “Eine neue erscheinung bei der lichtzerstreuung in kristallen”, *Naturwissenschaften*, 16:557-558, 1928
- [15] Boyd, R. W., *Nonlinear Optics*, ESU
- [16] Islam, M. N., “Raman Amplifiers for Telecommunications 1 – Physical Principal”, Springer, 2004
- [17] Bouteiller, J. C., Bromage, J., Thiele, H. J., Nelson, L. E., Brar, K. e Stulz S., “Um processo de otimização para transmissão de longa-distância Raman amplificada”, *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 16, Nº 1, January 2004
- [18] Mandelbaum, I. e Bolshtyansky, M., “Amplificador Raman em fibra Single-mode fiber – SMF”, *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 15, Nº 12, December 2003
- [19] Fukai, C., Nakajima, K., Zhou, J., Tajima, K., Kurokawa, K. e Sankawa, I., “Um estudo de um desenho de uma fibra ótima para amplificação Distribuída Raman em um sistema de transmissão”, *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 15, Nº 11, Nov. 2003
- [20] Taylor, N. e Grochocinski, J., “O impacto da Área Efetiva da fibra em sistemas utilizando amplificação Raman”, January 2002
- [21] OFS Fitel Denmark Aps, “True Wave® Reach Fiber Low Water Peak”, 2005
- [22] Lumholt, O., “True Wave® Reach Fiber Low Water Peak”, 2005
- [23] N. R. Newbury, “Pump-Wavelength Dependence of Raman Gain in Single-Mode Optical Fibers”, *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 21, Pág. 3364-3373, December 2003.

- [24] *L.A.M. Saito, P.D. Taveira, P.B. Gaarde, K. De Souza and E.A. De Souza, "Multi-pump discrete Raman amplifier for CWDM system in the O-band", submitted for publication to International Telecommunication Symposium . ITS 2006*
- [25] *Agrawal, G. P., "Nonlinear Fiber Optics", 2nd Ed., San Diego, CA, Academic Press, 1995*
- [26] *Bromage, J., "Raman Amplification for Fiber Communications Systems", Journal of Lightwave Technology, Vol. 22, N^o 1, Janeiro 2004*
- [27] *Xu, B. e Pearce, M. B., "Analysis of Noise Amplification by a CW Pump Signal Due to Fiber Nonlinearity", IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 16, N^o 4, April 2004*
- [28] *Cani, S.P.N., "Signal Gain and Degradation in Fiber Raman Amplifiers", International Telecommunication Symposium, Natal, Brasil, 2002*
- Srivastava, A. K. e SUN, Y., "Advances in erbium-Doped Fibre Amplifiers", Ch. 4, Optical Fibre Telecommunications IV-A, Components edited by Ivan Kaminow and Tingye Li, 2002, USA*
- Stolen, R. H., "Polarization effects in fiber Raman and Brillouin lasers", IEEE J. of Quantum Electron., Vol. QE-15, Pág. 1157, 1979*
- Stolen, R. H, Lee, C. e Jain, R. K., "Development of the stimulated Raman spectrum in single-mode silica fibers", JOSA B, Vol. 1, Pág. 52, 1984*
- VPIcomponent Maker, Optical Amplifier User's Manual, Document Part Number CMF-UM01-10*
- K. Rottwitt, J. Bromage, M. Du and A.J. Stentz, "Design of distributed Raman amplifiers", ECOC'00, paper 4.4.1*
- Wang, S. e Fan, C., "Generalised Attenuation Coefficients and a Novel Simulation Model for Raman Fiber Amplifiers", IEEE Proc. – Optoelectron, Vol. 148, N^o 3, Pág. 156-159, June 2001*
- Agrawal, G. P., "Applications of Nonlinear Fiber Optics", San Diego, CA, Academic Press, 2001*

OFS Fitel Denmark Aps, "TrueWave[®] Reach Fiber Low Water Peak", 2005

Headley, C. e Agrawal, G. P., "Raman Amplification in Fiber Optical Communication Systems", Elsevier Academic Press, Pág. 132-133, 2005

Bromage, J., "Raman Amplification for Fiber Communication Systems", Óptical Fiber Communication Conference, Paper TUC1, Atlanta, 2003

Ramaswani, R e Sivaragan, K. N., "Optical Networks – A Practical Perspective", Sec. Edition, 2002

*Headley, C. e Agrawal, G. P., "Raman Amplification in Fiber Optical Communication Systems
Elsevier Academic Press, 2005*

Islam, M. N., "Raman Amplifiers for Telecommunications 2 – Sub-Systems and Systems", Springer, 2003

M. Islam, "Raman Amplifiers for Telecommunications", IEEE Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 8, N^o 3, Pág. 548-559, May 1999

P.M. Krummirch, R.E.Neuhauser, and C. Glingener, "Bandwidth limitations of broadband distributed Raman Amplifier for WDM Systems", in Proc. Optical Fiber Conference, 2003.

H. Kidorf, K. Rottwitt, M. Nissov et al, "Pump Interactions in a 100-nm Bandwidth Raman Amplifier", IEEE Phot. Tech. Letter, Vol. 11, N^o 5, Pág. 530-532, May 1999