

UNIVERSIDADE PRESBITERIANA MACKENZIE

Fausto Hossamu Mizutani

ANÁLISE DE UM AMPLIFICADOR RAMAN DISTRIBUÍDO COBRINDO AS
BANDAS C e S, UTILIZANDO A FIBRA ÓPTICA
TRUEWAVE® REACH LOW WATER PEAK.

São Paulo

2006

FAUSTO HOSSAMU MIZUTANI

ANÁLISE DE UM AMPLIFICADOR RAMAN DISTRIBUÍDO COBRINDO AS
BANDAS C e S, UTILIZANDO A FIBRA ÓPTICA
TRUEWAVE[®] REACH LOW WATER PEAK.

Dissertação apresentada à Universidade
Presbiteriana Mackenzie, como requisito
à obtenção do título de Mestre em
Engenharia Elétrica.

Orientadora: Dr^a. MARIA APARECIDA GONÇALVES MARTINEZ.

São Paulo
2006

FAUSTO HOSSAMU MIZUTANI

Aos meus pais que me educaram sob a luz da verdade e do amor, à minha esposa Elizabeth e aos meus filhos Rafael e Guilherme que sempre me apoiaram e me incentivaram para a realização desse trabalho.

AGRADECIMENTOS

À Deus, que, através da sua infinita sabedoria, deu-me força, coragem e persistência para a conclusão deste trabalho.

À prof^a Dr^a Maria Aparecida Gonçalves Martinez, pela sua dedicação, orientação e principalmente pela sua amizade, é que foi possível alcançar mais uma etapa da minha jornada.

Aos membros da banca, prof^a. Dr^a. Maria José Pontes e prof. Dr. Cristiano José Santiago De Matos pelas suas importantes sugestões.

Ao Jair Fiúza de Toledo, um grande amigo que sempre compartilhou sua amizade e seus conhecimentos.

Aos amigos Samuel e Rafael, que colaboraram no desenvolvimento da codificação.

Ao Mestre Ole Lumholt, da *OFS Fitel Denmark ApS*, pela grande colaboração prestada ao fornecer características da fibra *TrueWave[®] Reach LWP*.

RESUMO

O desempenho de um amplificador Raman distribuído na banda C e S utilizando a fibra *TrueWave[®] Reach LWP* em 100 km de enlace é analisado através de simulações numéricas. Os parâmetros físicos da fibra, como atenuação, dispersão, e eficiência de ganho Raman para bandas C e S foram caracterizados experimentalmente pelo fabricante, a OFS Denmark. Em torno de quatro lasers de bombeamento são necessários para garantir um ganho *on-off* da ordem de 15 dB em 70 nm (1500 nm a 1570 nm), cobrindo a operação na banda C e S.

ABSTRACT

The performance of a distributed Raman amplifier at C and S bands using the *TrueWave[®] Reach LWP* fiber in 100 km span is analyzed through numerical simulations. The physical parameters of the fiber, such as, attenuation, dispersion, and Raman gain efficiency for C and S bands were experimentally characterized by the manufacturer, the OFS Denmark. It is required around four pumping lasers to assure an on-off gain of approximately 15dB in 70 nm (1500nm to 1570 nm), covering operation in the C and S band.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	
INTRODUÇÃO.....	13
1.1 -O Sistema de Comunicação Óptica.....	13
1.2- Objetivos e organização do trabalho.....	20
CAPÍTULO 2	
AMPLIFICADORES RAMAN DISTRIBUÍDOS.....	28
2.1 - Introdução.....	28
2.2 - Princípio de funcionamento dos amplificadores Raman.....	29
2.3 - Análise do amplificador Raman distribuído.....	33
CAPÍTULO 3	
A FIBRA ÓPTICA <i>TRUEWAVE[®] LOW WATER PEACK REACH</i>	39
3.1 – As perdas da fibra da TrueWave [®] Reach LWP.....	39
3.2 - A dispersão da fibra TrueWave [®] Reach LWP.....	41
3.3 - A eficiência de ganho Raman.....	43
3.4 - Interação entre as múltiplas fontes de bombeamento.....	49
CAPÍTULO 4	
ANÁLISE DA AMPLIFICAÇÃO RAMAN NA BANDA C e S.....	52
4.1 - Acoplamento independente entre as fontes de bombeamento e as fontes de sinal.....	52
4.2 – Acoplamento independente entre as fontes de bombeamento e as fontes de sinal na presença da interação entre as fontes de bombeamentos.....	59
4.3 – Acoplamento independente e não independente entre as fontes de bombeamento e as fontes de sinal na ausência de interação entre os bombeamentos.....	63
4.4 - Acoplamento independente e não independentes entre sinais e bombeamento na presença da interação entre os bombeamentos.....	66
4.5 - Considerações finais.....	69
CAPÍTULO 5	
CONCLUSÕES.....	71
Apêndice A.....	74
Apêndice B.....	75

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Elementos que constituem um enlace digital de fibras ópticas mostrando desde o transmissor até o receptor.....	14
Figura 2 - Diferentes comprimentos de onda utilizados e as bandas de operação.....	21
Figura 3 - Espalhamento Stokes.....	30
Figura 4 - Espalhamento anti Stokes.....	30
Figura 5 - Perfil do coeficiente de ganho Raman.....	31
Figura 6 - Coeficiente de ganho Raman para três diferentes tipos de fibra.....	37
Figura 7 - Curva de atenuação de duas fibras ópticas retiradas do manual do fabricante.....	40
Figura 8 – Curva de atenuação medida pelo fabricante da fibra <i>TrueWave® Reach LWP</i> onde foram sobrepostos setas indicando a posição espectral de oito fontes de sinal e de bombeamento.....	41
Figura 9 - Dispersão da <i>TrueWave® LWP</i> comparada com a NZDF retirada do manual do fabricante.....	42
Figura 10 - A curva de dispersão, cujos pontos experimentais foram fornecidos pelo fabricante, com sobreposição de setas, indicando a posição espectral das fontes de sinal e de bombeamento.....	43

Figura 11 - Eficiência de ganho Raman em função do deslocamento de frequência entre laser de sinal e o laser de bombeio para um comprimento de onda de bombeio de 1453 nm	44
Figura 12 – Curvas da eficiência de ganho Raman em função do deslocamento em frequência Δf	47
Figura 13 - Curvas da eficiência de ganho Raman em função do comprimento de onda do sinal λ_s	48
Figura 14 – Curvas da eficiência de ganho Raman para as múltiplas fontes de bombeamento superposta a localização espectral dos respectivos comprimentos de onda de bombeamento.....	50
Figura 15 - Potência dos sinais em função do comprimento do enlace, com fontes de bombeamentos contra-propagantes, de potências iguais a 150 mW	55
Figura 16 - Potência dos sinais em função do comprimento do enlace, com fontes de bombeamentos contra-propagantes, igual a 150 mW	56
Figura 17 - Potência dos bombeamentos em função do comprimento do enlace, com fontes de bombeamentos contra-propagantes, de potências iguais a 150 mW	56
Figura 18. Ganho líquido em 100 km de enlace para valores de potência das fontes de bombeamento contra-propagantes variando de 0 a 150 mW	58
Figura 19 - Ganho <i>on/off</i> em 100 km de enlace em função da potência de bombeamento com as fontes de bombeamento contra-propagantes.....	59
Figura 20 - Potência dos sinais em função do comprimento do enlace, com as fontes de bombeamento contra-propagantes, de potências iguais a 150 mW	62
Figura 21 - Potência dos bombeamentos em função do comprimento do enlace, com as fontes de bombeamentos contra-propagantes, de potências iguais a 150 mW	62
Figura 22 - Ganho <i>on/off</i> para os sinais em função da potência de bombeamento, com as fontes de bombeamento contra-propagantes, de potências iguais a 150 mW	63
Figura 23 - Ganho <i>on-off</i> em 100 km de enlace para valores de potência bombeamento contra-propagantes variando de 0mW a 150 mW	65

Figura 24 - Ganho <i>on-off</i> em 100 km de enlace em função da potência das fontes de bombeamento contra-propagantes de mesmo valor de potência.....	66
Figura 25 - Ganho <i>on-off</i> em 100 km de enlace para valores de potência das fontes de bombeamento contra-propagantes variando de 0mW a 150 mW	68
Figura 26 - Potência dos sinais em função do comprimento do enlace, com fontes de bombeamentos contra-propagante, de potências iguais a 150 mW	68
Figura 27 - Ganho <i>on-off</i> em 100 km de enlace para valores de potência das fontes de bombeamento são contra-propagantes variando de 0mW a 150 mW	69
Figura 28 - Ganho <i>on-off</i> em 100 km de enlace para valores de potência das fontes de bombeamento 1, 3 ,5 e 7 contra-propagantes variando de 0mW a 150 mW , com os sinais 1, 2 , 3 , 4 , 5, 6 , 7 e 8 sendo que os quatro bombeamentos são lançados com os seguintes valores de potência: 100% maior para o bombeamento 1, igual para o bombeamento 3, reduzido de 60% para o bombeamento 5, e aumentado de 25% para o bombeamento 7.....	70

LISTA DE TABELAS

Tabela I - Bandas de transmissão e as faixas espectrais.....	23
Tabela II - Oito pares de fontes de sinal de comprimento de onda (λ_s) e fontes de bombeamento (λ_p), a diferença em comprimento de onda entre elas.....	45
Tabela III - Comprimentos de onda do sinal e do bombeamento e suas respectivas atenuações e áreas efetivas.....	46
Tabela IV - Eficiência de ganho Raman para o acoplamento entre as múltiplas fontes de bombeamento e as múltiplas fontes de sinal.....	48
Tabela V – Eficiência de ganho Raman entre as múltiplas fontes de bombeamento.....	51
Tabela VI – Atenuação da fibra TrueWave [®] Reach Low Water Peak para cada comprimento de onda de sinal (λ_s) e de bombeamento (λ_p).....	55

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 - O Sistema de Comunicação Óptica

Em sistemas de comunicações a fibras ópticas, a luz é o elemento responsável pelo transporte da informação de um ponto a outro e o meio material é a fibra óptica. Um enlace digital de fibras ópticas, segundo KEISER, 2000, é constituído de vários elementos como mostrados na figura 1.

O transmissor óptico tem a finalidade de converter o sinal elétrico em sinal óptico e lançá-lo na fibra. Ele é constituído de um circuito *drive*, associado a uma fonte óptica que pode ser um laser semiconductor ou um diodo emissor de luz (LED), um modulador e um acoplador de canal. O regenerador irá restaurar as características da forma de onda do sinal óptico. O receptor irá converter o sinal óptico em elétrico. A potência óptica lançada na fibra é um dos parâmetros mais importantes no projeto, pois é ele quem irá limitar o espaçamento entre os amplificadores ou repetidores. Essa potência é frequentemente expressa em unidades de *dBm*, utilizando como referência a potência de 1 *mW* (1miliwatts). Assim, a potência medida em unidades de *dBm* é

definida como: $P_{ot}(dBm) = 10 \log\left(\frac{potência}{1mW}\right)$.

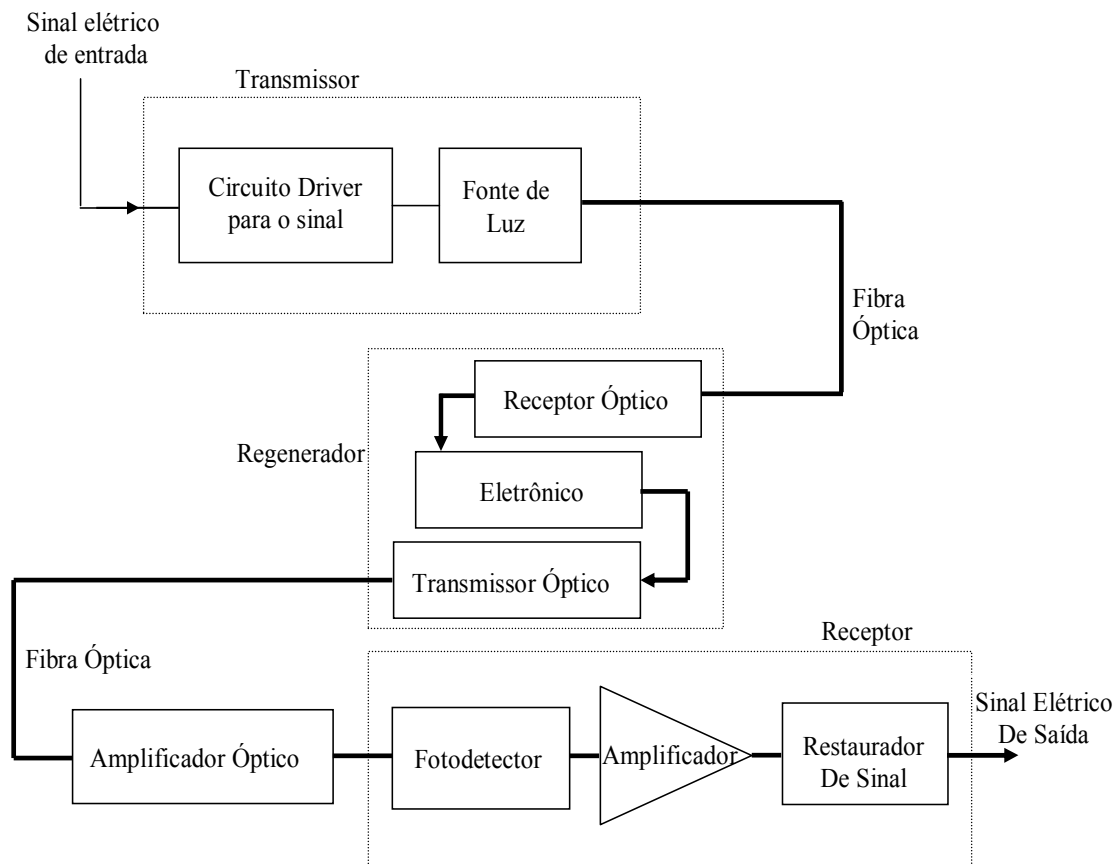


Figura 1 - Elementos que constituem um enlace digital de fibras ópticas mostrando desde o transmissor até o receptor.

Nos sistemas digitais, os sinais elétricos assumem dois valores possíveis o “*bit* 1” e o “*bit* 0” (*bit* é a forma compacta de *binary digit*) que são representados pelos “0” (zeros) e “1” (uns) que são convertidos em sinais ópticos através de um modulador. Assim, o sinal elétrico “1” é transmitido como um pulso de luz, enquanto que o sinal elétrico “0” é representado pela ausência de luz. A quantidade “0” de e “1” transmitidos por segundo representa a taxa de transmissão (*bit rate*). O objetivo principal nestes sistemas é transmitir através da fibra óptica, a maior quantidade de *bits* por segundo, de tal modo a percorrer a máxima distância de transmissão possível e cometendo o mínimo de erro possível. No final da fibra, cada pulso óptico que chega no receptor, tem que ter

uma energia mínima para manter uma precisão específica na interpretação de zeros e uns. Essa precisão é medida através da razão de erro de bit (BER). A BER especifica a probabilidade média de identificação de bits incorretos e é determinada por:

$$BER = \frac{\textit{bits lidos erroneamente}}{\textit{total de bits que chegam no receptor}} \quad [\textit{GHATAK, 2002}]$$

A potência média mínima de cada pulso óptico que chega no receptor necessária para realizar um determinado BER é dada por $P_{r,\min} = B.W_p/2$ onde B é a taxa de bits, W_p é a energia mínima de cada pulso óptico e o fator $1/2$ representa a igual probabilidade de ocorrer os eventos um “1” ou um “0” [BUCK, 1995].

As fibras ópticas utilizadas nos sistemas de comunicações são guias de ondas fabricadas com materiais dielétricos transparentes capazes de transportar a luz visível e a luz infravermelha por longas distâncias. A fibra óptica é um cilindro de vidro, constituída por um núcleo e uma casca com diferentes índices de refração. O índice de refração do núcleo é um pouco maior que o da casca para garantir a reflexão total da luz na interface núcleo-casca e conseqüentemente guiar a luz dentro do núcleo. Essa reflexão total ocorre quando o ângulo de incidência da luz for maior que o ângulo crítico.

As fibras ópticas apresentam como características de transmissão, baixas perdas e uma larga janela de transmissão na qual um grande número de canais com sinais ópticos podem ser transmitidos simultaneamente em uma única fibra, através de uma técnica denominada Multiplexação por Divisão de Comprimento de onda (WDM – *Wavelength Division Multiplexing*), transportando voz, dados e sinais de vídeo.

A perda e a distorção gerada pela fibra óptica são fatores importantes na degradação do sinal. A perda do sinal óptico é atribuída à atenuação na fibra quando um sinal propaga-se através dela. A distorção do sinal óptico é gerada pela dispersão e pela não linearidade da fibra.

A atenuação representa a perda de potência do sinal e conseqüentemente limita a distância de transmissão. A dispersão modal em uma fibra monomodo, não existe, mas há um outro tipo de dispersão denominada dispersão cromática ou dispersão da velocidade de grupo que surge devido à dependência da frequência com o índice de refração do meio. Esta da origem a um alargamento do pulso óptico, pois as componentes espectrais do sinal irão propagar-se com diferentes velocidades, provocando uma interferência intersimbólica (*crosstalk*) e conseqüentemente provocando um aumento no BER (*Bit Error Rate*) do sistema. Essa dispersão normalmente é medida em unidades de $\frac{ps}{km.nm}$ (picosegundo / quilômetro.nanômetro).

Além da atenuação e da dispersão na fibra óptica observa-se também os efeitos não lineares (NLE). A preocupação em propagar simultaneamente vários sinais com diferentes comprimentos de onda na mesma fibra óptica tornou possível o surgimento dos sistemas WDM. Nos sistemas que utilizam essa tecnologia é importante o estudo do efeito não linear. Para superar a atenuação do sinal em longos percursos da fibra com elevada taxa de transmissão, há a necessidade da utilização de laser de elevada potência. Desta maneira, o fenômeno da não linearidade que ocorrem nas fibras ópticas é o resultado da elevada taxa de dados transmitidos, do comprimento da transmissão, do número de comprimentos de ondas a serem transmitidos e do aumento do nível de

potência lançado na fibra. Assim, o efeito da não linearidade pode torna-se um fator limitante para o desempenho dos sistemas de transmissão de longas distâncias e altas taxas de transmissão.

A não linearidade da fibra pode ser classificada em dois tipos: por espalhamento estimulado e devido a dependência do índice de refração com a intensidade do campo elétrico aplicado [AGRAWAL, 2001]. O efeito não linear por espalhamento tem como origem a aplicação de elevado campo elétrico da luz injetada no núcleo da fibra. Ele afeta a energia do pulso óptico que é transmitido na fibra óptica através da interação entre as ondas de luz com a vibração molecular da sílica. Nesse efeito, uma parcela da energia da onda de luz é transferida à outra ao longo de toda fibra. A perda de energia é absorvida pela vibração das moléculas do meio material. Os mais importantes efeitos dentro dessa categoria são os espalhamentos estimulados *Brillouin* (SBS – *Stimulated Brillouin Scattering*), Raman (SRS - *Stimulated Raman Scattering*). O segundo tipo de efeito, conhecido como efeito Kerr, efeito esse gerado pela dependência do índice de refração com a intensidade do campo elétrico que, por sua vez, causa um deslocamento de fase dependente do campo óptico, produzindo os seguintes efeitos: a mistura de quatro ondas (*Four-Wave Mixing- FWM*), a auto-modulação de fase (SPM – *Self-Phase Modulation*) e a modulação de fase cruzada (*Cross-Phase Modulation – XPM*) [BARYVEL, 2002, ASO, 2000]

No espalhamento estimulado Brillouin, a interação das ondas de luz com a vibração molecular do meio material, causará o seu espalhamento, gerando bandas laterais em torno da frequência original separadas da frequência de vibração do meio material. Uma parcela da energia da luz incidente será transferida para essas bandas

laterais. Essa luz deslocada sofre amplificação, quando ela se movimenta em sentido oposto à das ondas de luz (contra-propagante). No espalhamento estimulado Raman, a transferência de energia ocorre de forma similar ao espalhamento Brillouin, gerando bandas laterais, porém mais separadas em relação ao comprimento de onda da luz incidente.

A mistura de quatro ondas (*Four-Wave Mixing*) é predominante nos sistemas WDM onde são utilizados vários sinais de diferentes frequências. A dependência do índice de refração com a intensidade do campo aplicado induz uma mudança de fase, isto é, a fase é modulada dentro de um canal originando novas ondas de frequência ν_i, ν_j, ν_k que interagem produzindo quatro ondas nas frequências $\nu_i \pm \nu_j \pm \nu_k$ com $i, j \neq k$. Dependendo das frequências individuais, estes sinais podem estar muito próximos de um dos canais transmitidos, resultando em um significativo *crosstalk* para este canal. A mistura de quatro ondas também é dependente do espaçamento entre canais e da dispersão cromática da fibra óptica.

Os efeitos não lineares que modificam a forma do pulso óptico que é transmitido na fibra óptica são a auto-modulação de fase (SPM – *Self-Phase Modulation*) e a modulação de fase cruzada (*Cross-Phase Modulation* – XPM). A auto modulação de fase e a modulação de fase cruzada, como foi mencionado anteriormente, são dois efeitos gerados pela dependência do índice de refração da fibra com a intensidade do campo óptico. Esta dependência é dada pela equação [AGRAWAL, 2002, CANI, 2003]:

$$n = n_0 + n_2 \frac{P}{A_{ef}} = n_0 + n_2 I \quad (1.1)$$

onde n_0 é o índice de refração linear da fibra, n_2 o índice de refração não linear da fibra, P a potência do sinal óptico, A_{ef} a área efetiva da fibra e I a intensidade do sinal óptico.

A auto modulação de fase (SPM) está relacionada com a fase deslocada auto induzida sofrida pelo pulso óptico durante a sua propagação ao longo da fibra. A intensidade da SPM é obtida da fase do sinal óptico através da equação [AGRAWAL, 2002]

$$\phi = (n_0 + n_2 I) k_0 L_{ef} \quad (1.2)$$

onde $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$, λ é o comprimento de onda do sinal óptico e L_{ef} o comprimento efetivo da fibra. Assim, os deslocamentos de fase devido a SPM são dados pela equação [AGRAWAL, 2002]

$$\phi_{NL} = n_2 k_0 I L_{ef} \quad (1.3)$$

A modulação de fase cruzada (XPM) ocorre quando dois ou mais sinais ópticos são transmitidos simultaneamente em uma fibra como ocorre nos sistemas WDM. Nesses sistemas, a fase deslocada não linear de um determinado canal depende não somente da potência daquele canal, mas também da potência dos outros canais. Para dois sinais de intensidades I_1 e I_2 a fase total do primeiro sinal, incluindo SPM e XPM é dada pela equação [AGRAWAL, 2002]:

$$\phi_{NL} = n_2 k_0 L_{ef} (I_1 + 2I_2) \quad (1.4)$$

Devido à atenuação ao longo da fibra óptica, existe a necessidade de restaurar o sinal utilizando um amplificador óptico, isto é, a potência de cada sinal deverá ser amplificada de tal modo a compensar as perdas de transmissão, em um determinado estágio da fibra óptica. A potência do sinal diminui exponencialmente com a distância z medida ao longo da fibra através da equação:

$$P(z) = P(0)e^{-\alpha z} \quad (1.5)$$

onde $P(z)$ é a potência do sinal à distância z ; $P(0)$ é a potência do sinal no início da fibra em $z = 0$; α é o coeficiente de atenuação da fibra. O coeficiente de atenuação da fibra é normalmente medido em dB/km (decibel / quilômetro) e pode ser obtido através da equação:

$$\alpha(\text{dB}/\text{km}) = \frac{10}{z} \log \left[\frac{P(0)}{P(z)} \right] \quad (1.6)$$

1.2 – Objetivos e organização do trabalho.

A utilização de diferentes comprimentos de onda de operação em sistemas de comunicações ópticos é uma decorrência das perdas das fibras disponíveis na época assim como a disponibilidade de fontes e detectores nestes comprimentos de onda. A Figura 2, obtida de KEISER, G. *Optical Fiber Communications*, capítulo 1, pág 12, ilustra os diferentes comprimentos de onda utilizados, e respectiva banda de operação

denominada por razões históricas de primeira, segunda e terceira janela respectivamente.

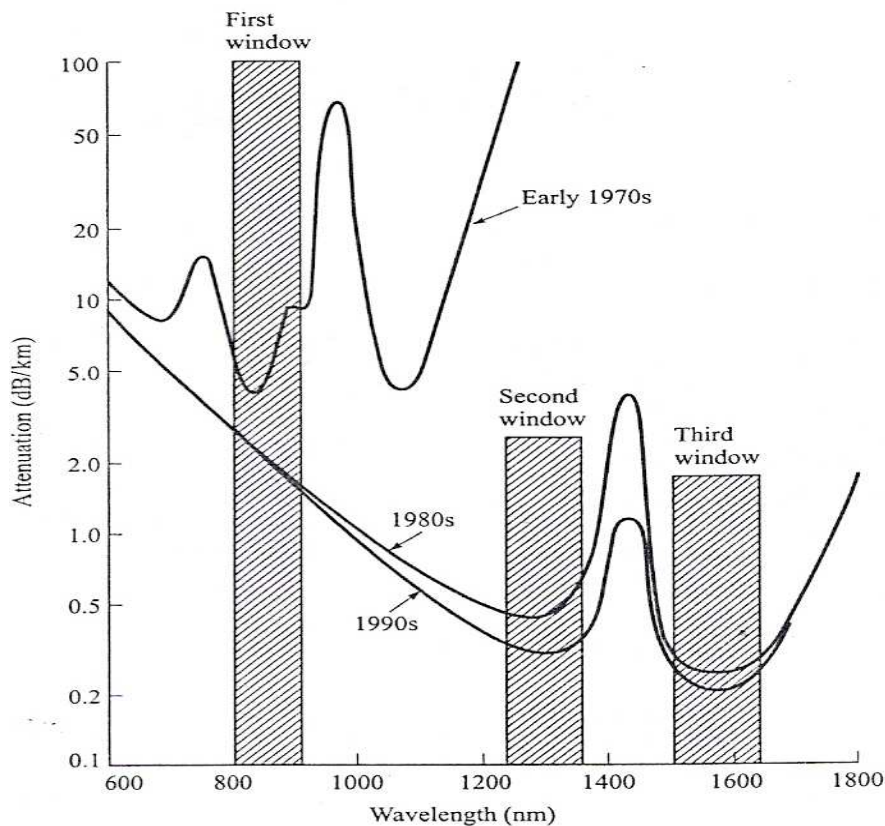


Figura 2 - Diferentes comprimentos de onda utilizados e as bandas de operação obtida de KEISER, G. *Optical Fiber Communications*, capítulo 1, pág 12.

A primeira geração dos sistemas de comunicação que fizeram uso da luz como transporte de informação, foi comercializado em 1980, operando na janela de transmissão de 820 *nm* (nanometro = 10^{-9} m), com uma taxa de 45 *Mb/s* (mega bits por segundo = 10^6 bit por segundo), utilizando-se de repetidores espaçados de 10 km. A segunda janela foi implantada em 1987, operando na região de 1300 *nm* transmitindo a uma taxa de 1,7 *Gb/s* (giga = 10^9), com repetidores espaçados de 50 km, distância essa limitada pelas perdas na fibra óptica da ordem de 0,5 *dB/km* . Em 1990, operando na faixa de 1550 *nm* , surgiu a terceira geração, transmitindo a uma taxa de 2,5 *Gb/s* ,

utilizando um espaçamento entre repetidores entre 60 km a 70 km. A dispersão foi controlada utilizando-se da fibra óptica de dispersão deslocada (DSF – *Dispersion Shifted Fiber*) que apresenta uma dispersão mínima próximo a 1550 nm [PAVANASAM, 2004].

O desenvolvimento de amplificadores ópticos, mais especificamente de fibra dopada com érbio, viabilizou um maior espaçamento entre os repetidores. Estes combinados com a técnica de multiplexação de comprimentos de onda (WDM) levou a um grande aumento nas taxas de transmissão, chegando a 10 Tb/s (tera = 10¹²), em 2001.

A evolução dos sistemas de múltiplos comprimentos de onda introduziu uma nova nomenclatura para designar as diferentes faixas espectrais de operação dos sistemas de comunicação ópticos. A faixa de comprimentos de onda de torno de 1550 nm define a banda C (*conventional*), cobrindo 40 nm de 1530 nm a 1570 nm. A faixa adjacente superior a banda C é denominada banda L (*long*), cobrindo 50 nm de 1570 nm a 1620 nm. A faixa adjacente superior a banda L define a banda U (*ultralong*) cobrindo 50 nm de 1620 nm a 1670 nm. A faixa adjacente inferior a banda C define a banda S (*short*), cobrindo 70 nm de 1460 nm a 1530 nm. A faixa adjacente inferior a banda S define a banda E (*extended*) cobrindo 100 nm de 1360 nm a 1460 nm. A faixa adjacente inferior a banda E define a banda O (*original*) cobrindo 100 nm de 1260 nm a 1460 nm. A tabela I resume as diferentes bandas e as correspondentes faixas espectrais.

Tabela I - Bandas de transmissão e as faixas espectrais.

Bandas de Transmissão	Faixas Espectrais
O (<i>original</i>)	1260 <i>nm</i> a 1460 <i>nm</i>
E (<i>extended</i>)	1360 <i>nm</i> a 1460 <i>nm</i>
S (<i>short</i>)	1460 <i>nm</i> a 1530 <i>nm</i>
C (<i>conventional</i>)	1530 <i>nm</i> a 1570 <i>nm</i>
L (<i>long</i>)	1570 <i>nm</i> a 1620 <i>nm</i>
U (<i>ultralong</i>)	1620 <i>nm</i> a 1670 <i>nm</i>

Embora a demanda por banda tenha diminuído no curto prazo, novos tipos de amplificadores vêm sendo desenvolvidos para utilizar totalmente a janela espectral de baixa perda das fibras ópticas.

Uma alternativa aos amplificadores de fibra dopada com érbio, que cobrem a banda C [EMORI, 2000] e banda L, são os amplificadores Raman. A faixa de ganho dos amplificadores Raman, ao contrário dos amplificadores de fibra dopada com íons terra raras, não é restrita a diferença entre os níveis de energia entre os íons de terras raras. A princípio esta pode ser obtida em qualquer banda de operação dos sistemas ópticos. Essa característica se deve ao princípio de funcionamento desses amplificadores, o espalhamento Raman estimulado.

Os amplificadores Raman são do tipo concentrados ou distribuídos. Os concentrados utilizam usualmente uma fibra dopada com germânio, e fontes de bombeamento espalham sinais em um comprimento de fibra da ordem de alguns quilômetros. Os amplificadores distribuídos por sua vez utilizam a próprio meio de transmissão, uma

fibra padrão ou DCF, onde fontes de bombeamento são lançadas para compensar as perdas de sinal através do espalhamento Raman dos mesmos.

A amplificação Raman distribuída é amplamente explorada nas bandas C e L. Por exemplo, ISLAM, 2004, cita a experiência realizada por Terahara et al que utilizou a amplificação Raman distribuída nas bandas C e L, em um sistema de transmissão WDM. Eles transmitiram 1.28 Tb/s em 840 km de fibra monomodo padrão com uma distância entre repetidores de 140 km. O amplificador Raman distribuído é um amplificador que pode apresentar uma extensa largura de banda, utilizando toda fibra óptica como meio de amplificação e o sinal é amplificado através do efeito não linear de espalhamento estimulado da fibra, cujo efeito irá ocorrer para uma elevada potência de bombeamento. Dentre as principais vantagens da amplificação Raman distribuída (DRA) pode-se destacar: (i) proporciona uma elevada capacidade de transmissão assim como um maior espaçamento entre repetidores, baixo nível de ruído comparado em relação ao gerado pelo EDFA, pois a amplificação ao longo da fibra proporciona uma melhoria na OSNR (relação sinal / ruído óptico), esta é limitada pela interferência dos múltiplos percursos devido duplo ao espalhamento Rayleigh [ZHENG, et al, 2002], (ii) embora o espectro da eficiência de ganho Raman em uma fibra monomodo convencional tem uma largura de banda em torno de 40 THz , esse espectro é plano numa banda de comprimento de onda muito estreita. Para obter um espectro plano de banda larga utilizam-se múltiplos comprimentos de onda de bombeamento [THYAGARAJAN, 2003].

Por outro lado, existem propostas de configuração híbrida, ou seja, combinações de diferentes tipos de amplificadores, dentre elas podem-se destacar a proposta

analisada em [SEO et al, 2005] que com um simples comprimento de onda de bombeamento obteve amplificação nas bandas S e C. Nesta configuração, foram utilizados fibras Raman cuja casca foi dopada com érbio e alumínio e o núcleo dopado com germânio. Os sinais da banda S foram amplificados pelo espalhamento Raman estimulados no núcleo e os da banda C pela transição radioativa dos íons de érbio da casca.

Uma fibra de dispersão não nula, mais especificamente a fibra *TrueWave*, [NIELSEN et al, 2000] foi utilizada em um sistema de transmissão cobrindo as bandas C e L, numa configuração híbrida de amplificadores em linha. O primeiro estágio utiliza o ganho Raman na fibra de transmissão, cujos bombeamentos Raman para as bandas C e L foram de 600 mW em 1447 nm e 220 mW em 1485 nm , respectivamente, seguida por dois estágios amplificadores a fibra dopada com érbio (EDFAs), independentes, um para sinais da banda C e outro para os da banda L.

O desenvolvimento de amplificadores para banda S vem sendo foco de intensa investigação nos últimos quatro anos. Esta apresenta alguns desafios. A obtenção de ganho para os 70 nm da banda S, dobro do valor necessário para operação na *Banda - C*, torna difícil a obtenção de ganho plano cobrindo toda banda S. Como consequência essa é dividida na prática em *Banda - S⁺* (1450 a 1490nm) e *Banda - S* (1490 a 1530nm). Os amplificadores Raman e os amplificadores de fibra dopada com túlio são as tecnologias mais exploradas para amplificadores na banda S. Estes podem ser combinados, em uma configuração híbrida para obtenção de ganho plano na banda.

O maior desafio na obtenção de ganho Raman distribuído na banda S são as altas perdas na região em torno de 1350 nm das fibras convencionas. Os comprimentos de onda das fontes de bombeamentos para banda S encontram-se na região espectral de absorção das moléculas de hidroxila, o que torna o espalhamento Raman ineficiente.

A extensão da operação dos sistemas ópticos para banda S só se tornou viável com a fabricação de fibras ópticas com baixa atenuação em torno do comprimento de onda de 1350 nm , região de altas perdas nas fibras convencionais devido a absorção de moléculas de hidroxila, conforme ilustrado na figura 2.

Neste trabalho o desempenho da amplificação Raman distribuída em um enlace de 100 km utilizando a fibra *TrueWave® Reach Low Water Peak* é analisado para operação em toda banda C, assim como a possibilidade de extensão para banda S. A banda S^+ não poderá ser coberta uma vez que os lasers de bombeamento para cobrir amplificação na banda C encontram-se posicionados espectralmente na banda S^+ . As análises serão conduzidas através de simulações numéricas. Os parâmetros utilizados no modelo são obtidos experimentalmente, entre estes, o coeficiente de perdas em função do comprimento de onda, a área efetiva em função do comprimento de onda, e a eficiência de ganho Raman para banda C e para banda S.

Para a obtenção do ganho plano de banda larga de um sistema WDM, utiliza-se de múltiplos bombeamentos com comprimentos de onda bem definidos e com um adequado nível de potência. Na prática, o ganho da amplificação depende da interação entre os múltiplos sinais e bombeamentos, entre os múltiplos bombeamentos, entre os múltiplos sinais, do duplo espalhamento Rayleigh e espalhamento *Raman* espontâneo

amplificado. A mistura de quatro ondas torna-se relevante quando os comprimentos de onda das fontes de bombeamento encontram-se próximos ao zero da dispersão da fibra. As análises apresentadas nesse trabalho não consideram o retro espalhamento *Rayleigh*, interação entre múltiplos sinais e os produtos de mistura de quatro ondas.

Os fundamentos da amplificação Raman distribuída são revisados no capítulo 2. No capítulo 3, as propriedades ópticas da fibra *TrueWave® Reach Low Water Peak* são apresentadas. Adicionalmente, o procedimento de estimativa da eficiência de ganho Raman para as múltiplas fontes de bombeamento necessário à amplificação em 70nm, cobrindo as bandas S e C, é discutido. A interação entre as múltiplas fontes de bombeamento é considerada, e a eficiência de ganho Raman entre as fontes de bombeamento é estimada. No capítulo 4, as equações não lineares que simulam o comportamento dos amplificadores Raman distribuídos são implementadas, e as análises são conduzidas em 100 km de enlace. Os efeitos que contribuem para amplificação são analisados isoladamente, sendo estes, a interação entre as fontes de bombeamento e sinais independentes (separação igual a 13,2 THz), interação entre as fontes de bombeamentos, e a interação entre as fontes de bombeamento e sinais não independentes (separação diferente de 13,2 THz). Esse procedimento permite avaliar a contribuição de cada efeito no ganho *on/off*. Para finalizar as conclusões são apresentadas no capítulo 5.

CAPÍTULO 2

AMPLIFICADORES RAMAN DISTRIBUÍDOS

O objetivo desse capítulo é conceituar o efeito Raman, introduzir e discutir os princípios de funcionamento dos amplificadores Raman, analisar o amplificador Raman Distribuído.

2.1 – Introdução.

O efeito Raman foi descoberto pelo físico indiano Sir Chandrasekhara Venkata Raman, em 1928, que recebeu por este feito o Prêmio Nobel em 1930.

No início dos anos 70, R.H. Stolen, E.P. Ippen e A.R. Tynes demonstraram o espalhamento Raman nas fibras ópticas, porém eram raros os trabalhos publicados que envolviam a amplificação Raman devido à dificuldade em obter baixas perdas na fibra e a ausência no mercado de uma adequada fonte de bombeamento. No final dos anos 80 e início dos anos 90, os trabalhos com a amplificação Raman foram totalmente abandonados devido à comercialização dos EDFAs que apresentavam uma extensa largura de banda do ganho estendendo de 1530 *nm* a 1570 *nm*. Na metade dos anos 90, com o desenvolvimento das fontes de bombeamento de elevada intensidade, ressurgiu o interesse pela amplificação Raman. Da metade dos anos 90 e parte do ano 2000, a amplificação Raman tornou-se objeto de pesquisa dos sistemas de transmissão à fibra óptica [ISLAM, 2002].

Uma das características fundamentais que ocorrem nos amplificadores Raman é a capacidade de nos fornecer o ganho do sinal em qualquer comprimento de onda, o que não ocorre com os EDFAs, pois está restrita às bandas C e L. Devido a essa característica, a amplificação Raman tem um grande atrativo para as aplicações DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*) onde será possível aumentar o número de comprimento de onda permitido pela extensa largura de banda da transmissão das fibras ópticas [ISLAM, 2002, BROMAGE, 2004, ROTTWITT, 2002].

2.2 – Princípio de funcionamento dos amplificadores Raman.

O efeito Raman espontâneo foi descoberto por Raman em 1928, através de um espectroscópio, utilizando um feixe de luz e um meio material, que pode ser um líquido ou um gás. A interação entre o campo eletromagnético da luz e o meio material gera o espalhamento da luz, isto é, a luz sofre um desvio em relação ao feixe incidente. Observam-se na luz espalhada produzida pelas moléculas do meio, componentes de mesma frequência que a luz incidente, denominada espalhamento Rayleigh, e luz com frequência maior e menor que a da luz incidente. Essas novas componentes que têm sua frequência deslocada para baixo são denominadas frequências de Stokes, e outras que são deslocadas para frequência maior são denominadas frequências anti-Stokes, em relação à frequência da luz incidente. Estes espalhamentos podem ser entendidos através do diagrama de níveis de energia como ilustram as figuras 3 e 4. O espalhamento Raman Stokes consiste na transição do estado fundamental g ao nível virtual associado ao nível excitado n' seguida pela transição do nível virtual ao estado final n e ω representa a frequência angular do sinal e ω_s a do espalhamento Raman Stokes.

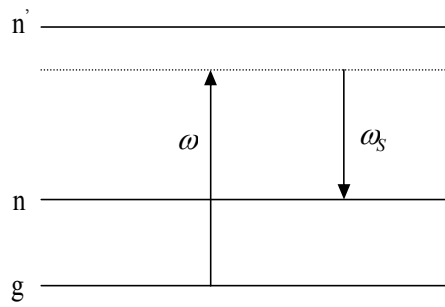


Figura 3 - Espalhamento Stokes.

O espalhamento Raman anti Stokes ocorre na transição do nível n ao nível g, com n' servindo como um nível intermediário, onde ω representa a frequência angular do sinal e ω_a a do espalhamento Raman anti Stokes.

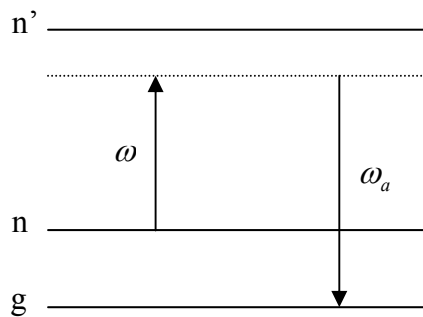


Figura 4 - Espalhamento anti Stokes.

Pode-se observar que neste caso, a molécula já possui uma determinada energia de vibração, resultante da energia térmica, e quando um fóton o atinge, leva-o ao estado de nível virtual e em seguida, decai para o estado fundamental. No processo, um fóton de energia é emitido.

Na descrição da mecânica quântica, quando um campo óptico (luz) incide em uma molécula do meio este induzirá um momento do dipolo, produzindo uma oscilação.

Esta oscilação do dipolo induzido irá gerar uma radiação óptica na mesma frequência do campo óptico, porém com uma fase deslocada que dependerá do índice de refração do meio e também contêm termos com a soma e a diferença entre as frequências ópticas e vibracionais das moléculas, que irá originar o espalhamento Raman da luz re-irradiada. Os fótons são espalhados inelasticamente pela vibração molecular quantizada, denominada fônons ópticos. A energia do fóton espalhado pode apresentar uma perda (estrutura molecular é aquecida) ou pode apresentar um ganho (estrutura molecular é esfriada), produzindo um deslocamento na frequência da luz. As componentes da luz espalhada têm suas frequências deslocadas para frequências menores, denominadas frequências Stokes ou para maiores, denominadas frequências anti Stokes [BROMAGE, 2004].

O espectro do coeficiente de ganho Raman para a fibra de sílica é o mostrado na figura 5 obtido de ISLAM, vol. 1, pág. 2, 2004.

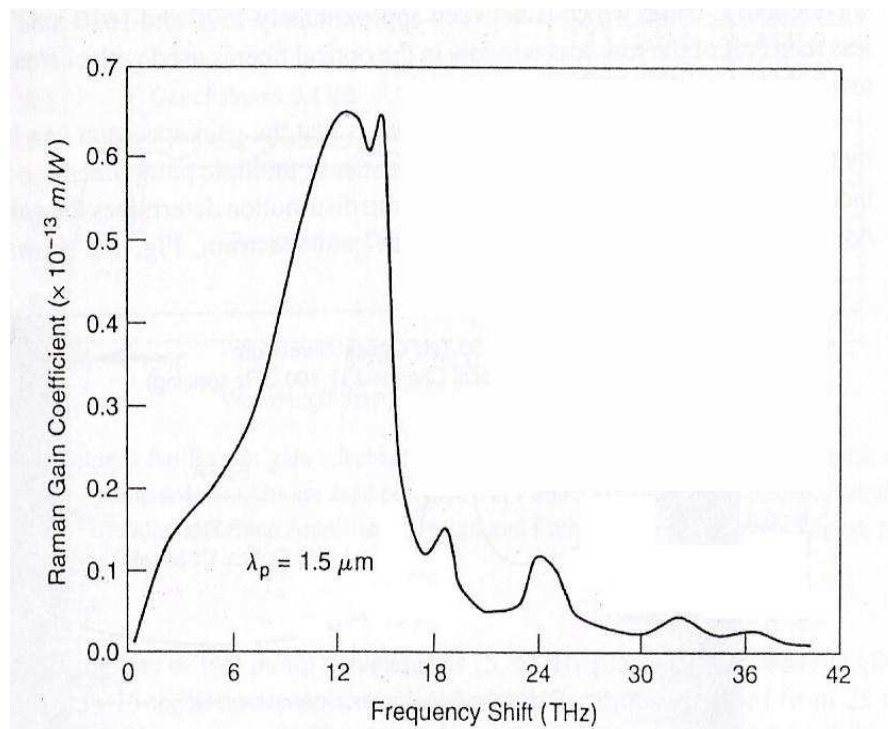


Figura 5 - Perfil do coeficiente de ganho Raman obtido de ISLAM, vol. 1, pág 2, 2004, onde mostra o coeficiente de ganho Raman para uma potencia de bombeamento de $1.5 \mu\text{m}$.

Devido à natureza amorfa do vidro, o espectro apresenta uma banda larga e vários picos. Esta banda larga é gerada pelos níveis de vibração das moléculas. Dessa forma, frequência de bombeamento ω_p pode diferir da frequência Stokes ω_s de uma grande extensão. O ganho Raman tem uma forma espectral que depende da separação entre as frequências do sinal e do bombeamento e não de suas frequências absolutas. O máximo do ganho Raman ocorre quando a frequência deslocada Raman $\Omega_R = \omega_p - \omega_s$ entre o bombeamento e a de Stokes está em torno de $13,2 \text{ THz}$ com uma largura de banda 40 THz . Em 1500 nm este pico de $13,2 \text{ THz}$ corresponde aproximadamente a 100 nm . Para obter esse valor utiliza-se a expressão: $\Delta\lambda = \frac{-\lambda^2 \Delta f}{c}$ obtida de $c = \lambda \cdot f$, derivando-se λ em relação a f onde c é a velocidade da luz ($\cong 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$). Assim, $\Delta\lambda \cong 100 \cdot 10^{-9} \text{ m}$. Isto significa que se o bombeamento está próxima de 1450 nm , a banda do ganho ocorre em torno de 1550 nm .

O processo Raman espontâneo é um processo isotrópico, isto é, ocorre em todas as direções. O espalhamento Raman pode ser estimulado pelo sinal através de uma apropriada frequência deslocada do bombeamento. O espalhamento Raman estimulado (SRS) é um processo de transferência de energia de um sinal para outro de menor frequência, permitindo a amplificação do sinal (ganho Raman).

A transferência de energia irá ocorrer quando a molécula de um meio material interage com uma onda de elevada intensidade e o meio tem sua susceptibilidade dielétrica modificada conduzindo ao acoplamento entre a onda incidente e as ondas de Stokes, isto é, a intensidade da onda incidente pode ser transferida para as ondas de

Stokes (CANI, 2003). Do ponto de vista da mecânica quântica um fóton de bombeio é transformado em um segundo fóton do sinal que é idêntico ao primeiro e a energia restante produz um fônon óptico e o sinal será amplificado. Os SRS podem ocorrer nos dois sentidos de propagação, a favor do sinal e contrário ao sinal.

2.3 – Análise do amplificador Raman distribuído.

Quando um feixe de luz de elevada intensidade propaga em uma fibra, gera efeitos não lineares tais como a mistura de quatro ondas (FWM – *Four Wave Mixing*), instabilidade modulacional (MI - *Modulational Instability*) e o espalhamento Raman estimulado (SRS – *Stimulated Raman Scattering*) [DINDA, 2000].

Nos processamentos de sinais e nas comunicações ópticas esses fenômenos não lineares interferem nas transmissões de longas distâncias e nos sistemas WDM. Para controlar esses fenômenos não lineares, vários mecanismos têm sido adotados. Por exemplo, para controlar a geração da indesejável banda lateral do MI considera-se uma configuração nos quais todas as componentes da frequência de bombeamento são linearmente polarizadas, no regime de dispersão normal, para uma fibra monomodo.

Os amplificadores Raman podem ser classificados em duas categorias: a amplificação Raman distribuída (DRA) e a amplificação Raman discreta (ou *lumped*). O amplificador Raman distribuído é um amplificador de banda larga, cuja amplificação ocorre ao longo de toda fibra enquanto que o discreto é confinado em um pedaço de fibra, localizado em um ponto do sistema de transmissão, semelhante ao EDFA, para se obter o ganho.

A amplificação Raman distribuída, como foi dito anteriormente, utiliza a fibra de transmissão como meio de amplificação. Essa amplificação é realizada através do espalhamento Raman estimulado (SRS) que ocorre ao aplicamos uma potência de bombeamento de elevada intensidade. Na emissão estimulada o fóton incidente do bombeamento utiliza sua energia para criar um outro fóton idêntico de energia reduzida na menor frequência e a energia restante é absorvida pelo meio na forma de vibração molecular (fônon óptico).

Da mesma forma que o EDFA, o bombeamento pode ser configurada de duas formas em relação ao sentido de propagação do sinal: o bombeamento de mesmo sentido que o sinal (*forward pumping*) e o bombeamento em sentido oposto ao sinal (*backward pumping*). No primeiro, o sinal e o bombeamento propagam-se no mesmo sentido (co-propagante) e no segundo o bombeamento propaga-se em sentido contrário ao do sinal (contra-propagante).

Na configuração co-propagante, e considerando que o sinal propaga-se ao longo do eixo z, as variações das potências de sinal e a de bombeamento são dadas pelas equações acopladas:

$$\frac{dP_s}{dz} = -\alpha_s P_s + \frac{g_R}{A_{ef}} P_p \cdot P_s \quad (2.3.1)$$

$$\frac{dP_p}{dz} = -\alpha_p P_p - \frac{\omega_p}{\omega_s} \cdot \frac{g_R}{A_{ef}} P_p \cdot P_s \quad (2.3.2)$$

O primeiro termo, do segundo membro de cada uma das igualdades, representa as atenuações do sinal e do bombeamento gerados pela fibra e o segundo termo representa

as trocas de potência entre o sinal e o bombeamento; α_s e α_p são os coeficientes de atenuação para o sinal e o bombeamento, considerando as perdas na fibra; P_p e P_s são as potências do bombeamento e do sinal; g_R é o coeficiente de ganho Raman; A_{ef} é a área efetiva do núcleo da fibra, ω_p e ω_s são as frequências angulares do bombeamento e do sinal.

Para simplificar a solução pode-se desprezar o segundo termo do segundo membro da equação (2.3.2) que é o responsável pela depleção do bombeamento pelo sinal. Assim, a equação (2.3.2) fica:

$$\frac{dP_p}{dz} = -\alpha_p P_p \quad (2.3.3)$$

cuja solução é:

$$P_p(z) = P_p(0)e^{-\alpha_p z} \quad (2.3.4)$$

Substituindo (2.3.4) em (2.3.1), tem-se:

$$\frac{dP_s}{dz} = -\alpha_s P_s + \frac{g_R}{A_{ef}} P_p(0)e^{-\alpha_p z} P_s \quad (2.3.5)$$

cuja solução é:

$$P_s(z) = P_s(0) \exp\left(-\alpha_s z + \frac{g_R}{A_{ef}} P_p(0) L_{ef}\right) \quad (2.3.6)$$

onde $L_{ef} = \frac{1 - e^{-\alpha_p z}}{\alpha_p}$ é o comprimento efetivo da fibra.

A equação (2.3.6) mostra como a potência do sinal varia ao longo do eixo z . A relação g_R/A_{ef} é denominada eficiência do ganho Raman (C_R).

Considerando a configuração contra-propagante, com o sinal propagando no sentido positivo de z a partir da origem e o bombeamento em sentido oposto a z a partir de $z = L$, as variações das potências do sinal e do bombeamento em relação ao eixo z são dadas pelas equações acopladas:

$$\frac{dP_s}{dz} = -\alpha_s P_s + \frac{g_R}{A_{ef}} P_p \cdot P_s \quad (2.3.7)$$

$$\frac{dP_p}{dz} = +\alpha_p P_p + \frac{\omega_p}{\omega_s} \cdot \frac{g_R}{A_{ef}} P_p \cdot P_s \quad (2.3.8)$$

Fazendo a mesma consideração anterior onde foi desprezada a depleção do bombeamento, a equação (2.3.8) fica:

$$\frac{dP_p}{dz} = \alpha_p P_p \quad (2.3.9)$$

cuja solução é:

$$P_p(z) = P_p(L) e^{\alpha_p(z-L)} \quad (2.3.10)$$

onde $P_p(L)$ representa o bombeamento na posição $z = L$. Substituindo (2.3.9) em (2.3.7), tem-se:

$$\frac{dP_s}{dz} = -\alpha_s P_s + \frac{g_R}{A_{ef}} P_p(L) e^{\alpha_p(z-L)} \cdot P_s \quad (2.3.11)$$

cuja solução é:

$$P_s(z) = P_s(0) \cdot \exp \left[\frac{g_R}{A_{ef}} P_p(L) e^{\alpha_p(z-L)} L_{ef} - \alpha_s \cdot z \right] \quad (2.3.12)$$

A equação (2.3.12) mostra a potência do sinal variando com a posição medida ao longo do eixo z.

A eficiência do ganho Raman g_R/A_{ef} é inversamente proporcional à área efetiva do núcleo. Para se obter o máximo ganho pelo efeito Raman, deve-se utilizar a fibra que apresenta a menor área efetiva. Dentre os vários tipos de fibra comerciais, a fibra de dispersão compensada (DCF) é aquela que apresenta a menor área efetiva. A figura 6, obtida de ISLAM, vol. 1, pág. 9, 2004, mostra o coeficiente de ganho Raman para três diferentes tipos de fibra.

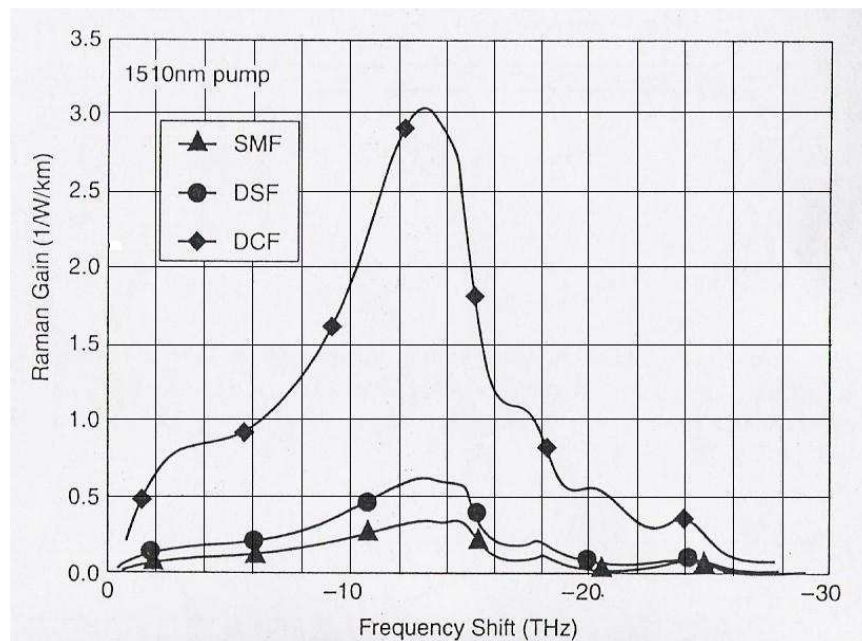


Figura 6 - Coeficiente de ganho Raman para três diferentes tipos de fibra, obtido de ISLAM, *Raman Amplifiers for Telecommunicatios* 1, pág 9, 2004.

A eficiência do ganho Raman é medida no sistema internacional de unidades em $(W.m)^{-1}$. Portanto, o coeficiente de ganho Raman g_R será medida em $W^{-1}.m$

Nas equações analisadas anteriormente, não se levou em conta o ruído responsável pela degradação do sinal no receptor. Nos amplificadores Raman que utilizam comprimentos de fibras de alguns quilômetros, a inclusão do ruído é um fator importante no dimensionamento dos sistemas de transmissão óptica. Dentre as várias fontes de ruído pode-se destacar: a) Ruído gerado pela amplificação da emissão espontânea (ASE) é própria de todos os amplificadores ópticos e pode ser limitado utilizando um filtro com uma banda limitada; b) Espalhamento duplo de Rayleigh (DRS) é um fenômeno onde ocorrem dois sentidos de espalhamento, o contra-propagante e o co-propagante devido à composição não uniforme do vidro. Quando um sinal interage com as moléculas constituintes da fibra óptica, sofre um espalhamento, gerando um outro sinal que se propaga em sentido oposto ao sinal original e possui a mesma frequência. Este novo sinal espalhado é novamente espalhado em sentido contra-propagante e também sofre um novo espalhamento em sentido contrário ao seu, contribuindo como ruído ao sinal que chega ao amplificador [CANI, 2003].

Em geral, a utilização do DRA melhora a figura de ruído e suas características de amplificação em uma fibra óptica dependem da concentração e do tipo de dopantes utilizados. O efeito da amplificação Raman será maior quanto menor for a área efetiva do núcleo da fibra, porém o aumento na concentração dos dopantes tem um limite que é a perda da transmissão e a minimização da área efetiva produz uma degradação na transmissão do sinal devido aos efeitos não lineares gerados. FUKAI, 2003, determinaram numericamente parâmetros ótimos da fibra óptica proporcionando uma utilização efetiva do DRA.

CAPÍTULO 3

A FIBRA ÓPTICA *TRUEWAVE® LOW WATER PEACK REACH*

O objetivo deste capítulo é apresentar as propriedades de perdas e dispersão da fibra *TrueWave® Reach Low WaterPeak* nas seções 3.1 e 3.2. A curva de eficiência de ganho Raman, caracterizada experimentalmente para comprimento de onda de 1453 nm , é discutida na seção 3.3 assim como o procedimento utilizado para estimar curvas de eficiência de ganho Raman para fontes de bombeamento de outros comprimento de onda. Para finalizar na seção 3.4, a interação entre as múltiplas fontes de bombeamento é introduzida e sua contribuição avaliada para as fontes de bombeamento de interesse.

3.1 – As perdas da fibra da *TrueWave® Reach LWP*.

A fibra óptica *TrueWave® Reach LWP* foi escolhida pela possibilidade em utilizar na transmissão DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexed*) cobrindo as bandas S, C e L de 1460 nm à 1625 nm . Esta apresenta uma baixa atenuação na região do pico d'água e permite a utilização de canais CWDM sobre todo intervalo de comprimento de onda de 1310 nm até 1620 nm , como mostra a figura 71. No comprimento de onda de 1383 nm a atenuação típica é menor que $0,35\text{ dB/km}$. Na figura 7, a curva de perdas de uma fibra padrão (*Standard Single-Mode Fiber*) e da fibra

1 Figura retirada do manual da fibra *TrueWave® Reach LWP* encontrado no seguinte endereço na internet:
<http://www.ofsoptics.com/fiber/category.php?txtCategoryId=1022260265447>

TrueWave[®] Reach LWP são mostradas onde as diferentes faixas espectrais são destacadas.

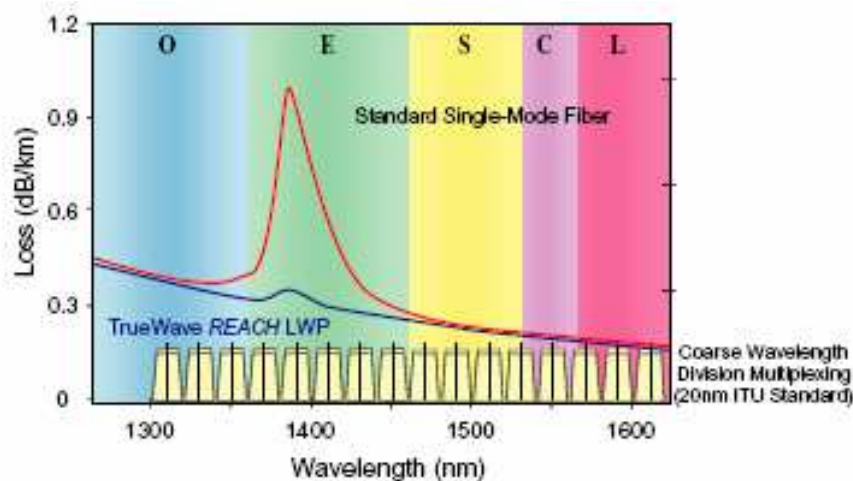


Figura 7 - Curva de atenuação de duas fibras ópticas retiradas do manual do fabricante.

A curva de atenuação medida pelo fabricante da fibra *TrueWave[®] Reach LWP* é mostrada na figura 8. Adicionalmente são sobrepostos à curva de atenuação, setas indicando a posição espectral de oito fontes de sinal e de bombeamento de comprimentos de onda situados na faixa espectral de interesse, ou seja, de 1500 *nm* a 1570 *nm* e 1406,6 *nm* a 1468,0 *nm*, respectivamente. O comprimento de onda das fontes de bombeamento, identificados com setas, encontram-se localizados a 13,2 *THz* dos respectivos sinais que também são representados na figura 8.

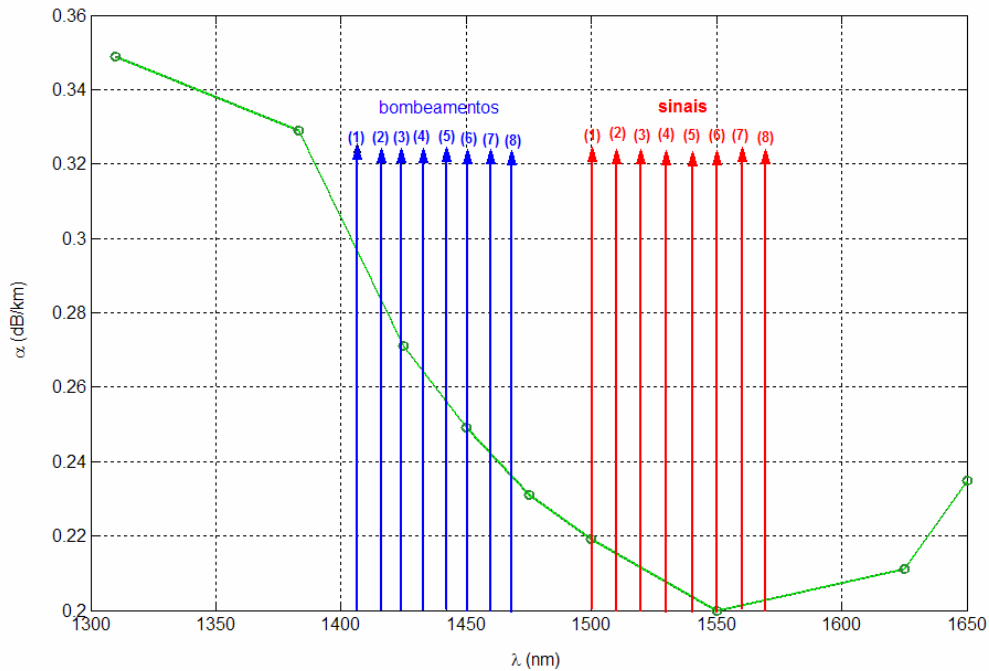


Figura 8 – Curva de atenuação medida pelo fabricante da fibra *TrueWave® Reach LWP* onde foram sobrepostos setas indicando a posição espectral de oito fontes de sinal e de bombeamento.

3.2 - A dispersão da fibra *TrueWave® Reach LWP*.

A dispersão cromática de uma fibra óptica é função do comprimento de onda. A figura 9, mostra a curva de dispersão da fibra *TrueWave® Reach LWP* cobrindo as três bandas de transmissão S, C e L, comparada com a fibra NZDF (*Non Zero Dispersion Fiber*) de elevada área efetiva. Nota-se que a inclinação da curva de dispersão (*dispersion slope*) da fibra NZDF é superior a inclinação da fibra *TrueWave® Reach LWP*.

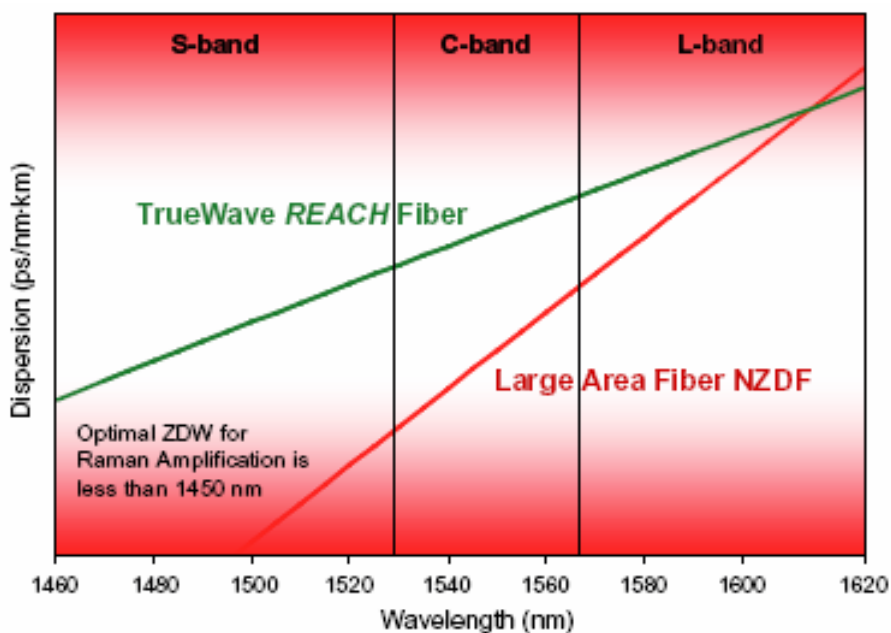


Figura 9 - Dispersão da *TrueWave*[®] LWP comparada com a NZDF retirada do manual do fabricante

Na transmissão em múltiplas faixas espectrais, como banda S, C e L, é interessante que o tanto o valor absoluto do coeficiente de dispersão como a inclinação dentro das faixas espectrais seja pequena. Este comportamento permite uma pequena variação da dispersão com o comprimento de onda. A curva de dispersão, cujos pontos experimentais foram fornecidos pelo fabricante, encontra-se ilustrados na figura 10. A posição espectral das fontes de sinal e de bombeamento encontra-se superposta a curva de dispersão. O zero de dispersão da fibra *TrueWave*[®] Reach LWP encontra-se em torno de 1386 nm, como mostrado na figura 10. Mistura de quatro ondas entre as fontes de bombeamento e sinal torna-se relevante no desempenho de amplificadores Raman distribuído, quando os comprimentos de onda de bombeamento localizam-se em torno do zero de dispersão da fibra.

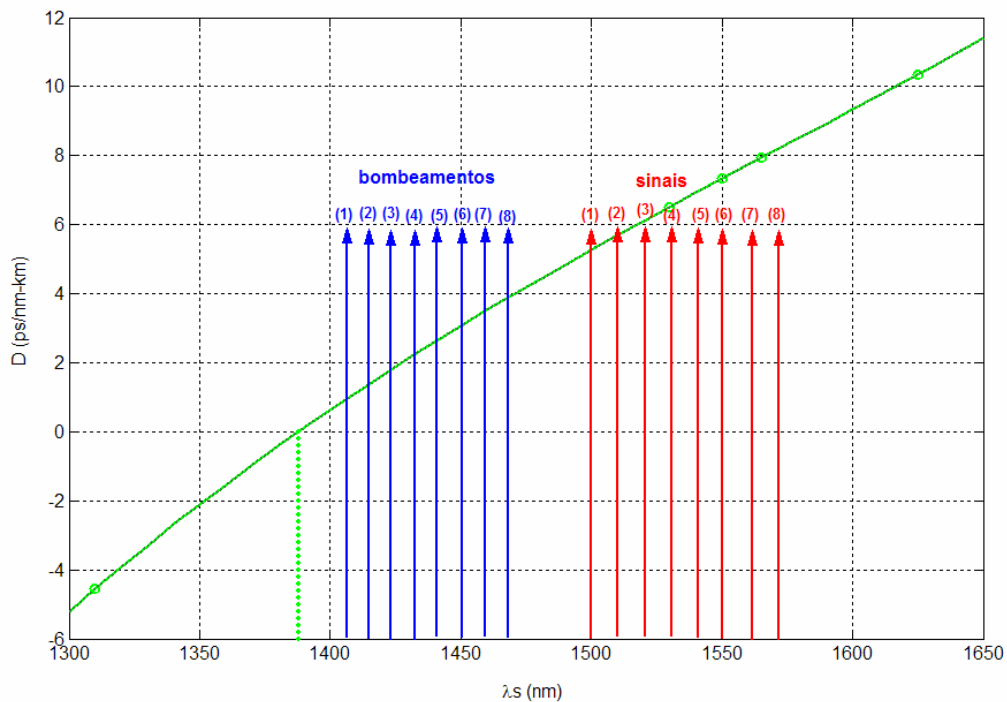


Figura 10 - A curva de dispersão, cujos pontos experimentais foram fornecidos pelo fabricante, com sobreposição de setas, indicando a posição espectral das fontes de sinal e de bombeamento.

3.3 - A eficiência de ganho Raman.

A eficiência de ganho Raman da *TrueWave[®] Reach Fiber Low Water Peak* medida pelo fabricante para comprimentos de onda de sinal na banda C, utilizando uma fonte de bombeamento de comprimento de onda em 1453 nm , é mostrada na Figura 11. A curva da eficiência de ganho Raman é mostrada em função do deslocamento da frequência de sinal relativa à frequência da fonte de bombeamento. Para se ter a máxima eficiência de ganho Raman, o comprimento de onda da fonte de bombeamento deve estar deslocado em relação ao do sinal de $13,2 \text{ THz}$. Esse deslocamento em termos de comprimento de onda equivale a $99,8 \text{ nm}$. Dessa maneira, o comprimento de onda de sinal para o qual obtém-se máximo espalhamento Raman encontra-se localizado em $1553,8 \text{ nm}$ e a máxima eficiência corresponde a $0,6146 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$.

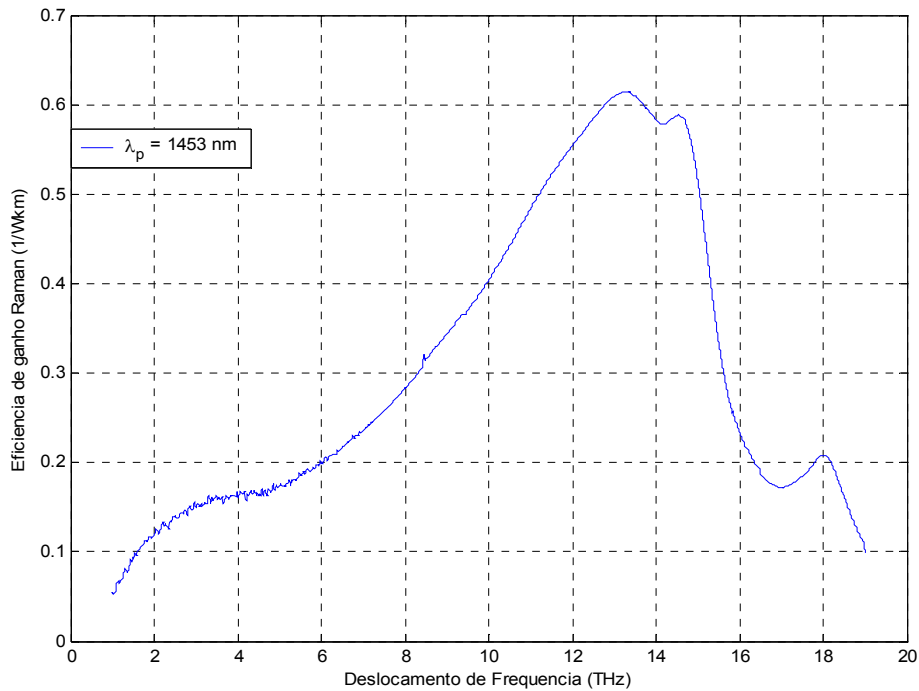


Figura 11 - Eficiência de ganho Raman em função do deslocamento de frequência entre laser de sinal e o laser de bombeamento, para um comprimento de onda de bombeamento de 1453 nm .

A obtenção de ganho Raman nas bandas S e C (1500 nm a 1570 nm) requer a utilização de múltiplas fontes de bombeamento. As oito fontes de sinal dentro da banda S e C, espaçadas de 10 nm, são individualmente espalhadas com máxima eficiência por oito fontes bombeamento localizados a 13,2 THz dos respectivos sinais. A tabela II relaciona os pares de comprimentos de ondas das fontes de sinal e o respectivo comprimento de onda das fontes de bombeamento. Adicionalmente, a diferença em comprimento de onda entre as fontes de sinal e de bombeamento é listada na última coluna da tabela II.

Tabela II - Oito pares de fontes de sinal de comprimento de onda do sinal (λ_s) e fontes de bombeamento (λ_p), a diferença em comprimento de onda entre elas.

λ_s (nm)	λ_p (nm)	$\Delta\lambda$ (nm)
1500	1406,6	93,367
1510	1415,4	94,576
1520	1424,2	95,793
1530	1433,0	97,018
1540	1441,8	98,249
1550	1450,5	99,488
1560	1459,3	100,730
1570	1468,0	101,990

A curva de ganho Raman relativa às oito fontes de bombeamento listadas na Tabela III é estimada a partir dos dados experimentais da curva de ganho Raman para o comprimento de onda de bombeamento de 1453 nm , de acordo com seguinte relação (NEWBURRI, 2003 e SAITO, 2006):

$$C_R^E(\lambda_p, \lambda_s) = \frac{\lambda_i}{\lambda_s} \frac{A_{eff}(\lambda_i)}{A_{eff}(\lambda_s)} C_R^M(\lambda_k, \lambda_i) \quad (3.3.1)$$

onde $C_R^M(\lambda_k, \lambda_i)$ e $A_{eff}(\lambda_i)$ são os valores da eficiência de ganho Raman e área efetiva medidos no comprimento de onda 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 no comprimento de onda de bombeamento e de sinal λ_p e λ_s respectivamente.

O fabricante das fibras disponibilizou os dados experimentais das áreas efetivas nos comprimentos de onda do sinal e do bombeamento, $A_{\text{eff,s}}$ e $A_{\text{eff,p}}$, respectivamente.

Tabela III - Comprimentos de onda do sinal e do bombeamento e suas respectivas áreas efetivas.

λ_s (nm)	$A_{\text{eff,s}}(\mu\text{m}^2)$	λ_p (nm)	$A_{\text{eff,p}}(\mu\text{m}^2)$
1500	50,717	1406,6	44,989
1510	51,435	1415,4	45,465
1520	52,175	1424,2	45,952
1530	52,941	1433,0	46,450
1540	53,732	1441,8	46,961
1550	54,550	1450,5	47,484
1560	55,395	1459,3	48,021
1570	56,265	1468,0	48,571

Substituindo os comprimentos de onda de sinal, respectivas áreas efetivas e eficiências de ganho Raman medidas na equação (3.3.1), podem-se estimar as curvas de eficiência de ganho Raman para os comprimentos de onda das fontes de bombeamento relacionadas na Tabela III. A curva de eficiência de ganho Raman é mostrada, em função do deslocamento de frequência Δf , na figuras 12. Note que o pico da curva de eficiência de ganho Raman ocorre em torno de um deslocamento de frequência de 13,2 THz para todos os comprimentos de onda de bombeamento. Note ainda que a eficiência de ganho Raman é inversamente proporcional ao comprimento de onda. Este aumento é em torno de 20% para os valores de pico da eficiência de ganho Raman.

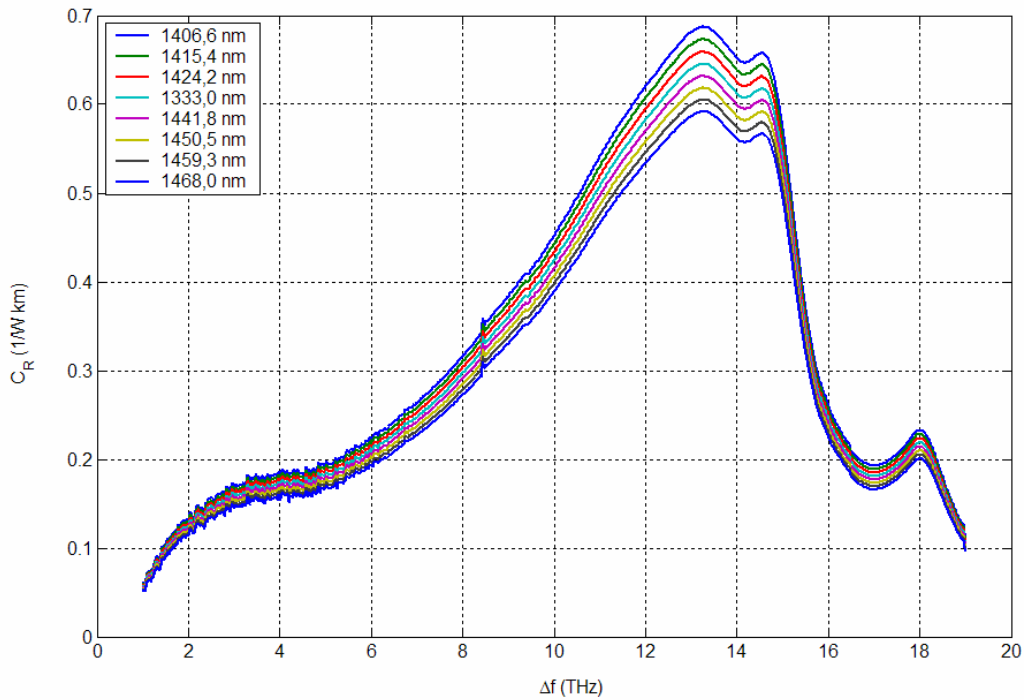


Figura 12 – Curvas da eficiência de ganho Raman em função do deslocamento em frequência Δf .

As curvas de eficiência de ganho Raman podem ser mostradas em função do comprimento de onda do sinal, conforme ilustrado na figura 13. Adicionalmente, setas nas posições espectrais das fontes de sinal foram superpostas no gráfico da figura 13. Note que um determinado sinal recebe máximo acoplamento da fonte de bombeamento par. No entanto, a contribuição das demais fontes de bombeamento não é desprezível. O valor da eficiência de ganho Raman para essas múltiplas interações encontra-se resumido na tabela IV. Note que a diagonal principal da matriz de valores da tabela IV corresponde a contribuição das fontes de bombeamento localizadas a $13,2 THz$ das respectivas fontes de sinal (pare sinal / bombeamento). Os pares são $(1500/1406,6) nm$, $(1510/1415,4) nm$, $(1520/1424,2) nm$, $(1530/1433,0) nm$, $(1540/1441,8) nm$, $(1550/1450,5) nm$, $(1560/1459,3) nm$ e $(1570/1468,0) nm$.

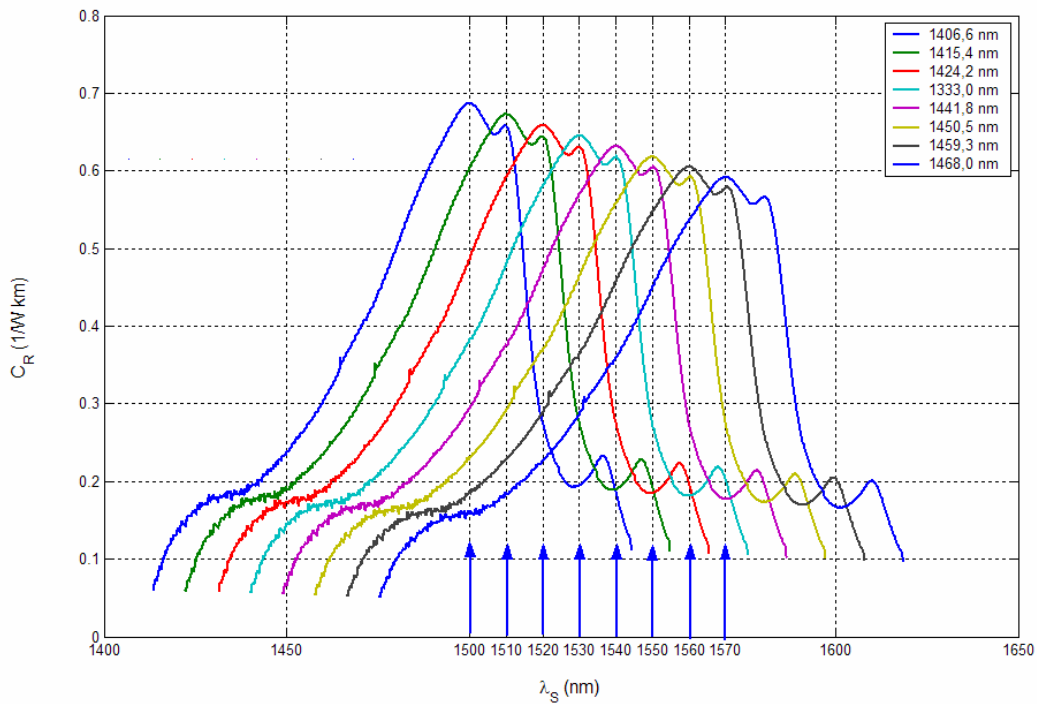


Figura 13 - Curvas da eficiência de ganho Raman em função do comprimento de onda do sinal λ_S .

Tabela IV - Eficiência de ganho Raman para o acoplamento entre as múltiplas fontes de bombeamento e as múltiplas fontes de sinal.

COMPRIMENTO DE ONDA DE BOMBEAMENTO (NM)

	1406,6	1415,4	1424,2	1433,3	1441,8	1450,5	1459,3	1468,0
1500	0.687	0.603	0.486	0.382	0.294	0.231	0.186	0.158
1510	0.657	0.673	0.592	0.479	0.375	0.292	0.228	0.185
1520	0.276	0.645	0.659	0.581	0.471	0.367	0.289	0.226
1530	0.194	0.277	0.632	0.645	0.569	0.465	0.364	0.286
1540	0.187	0.189	0.274	0.618	0.631	0.558	0.457	0.358
1550	----	0.193	0.185	0.274	0.604	0.618	0.547	0.450
1560	----	----	0.199	0.181	0.274	0.590	0.605	0.536
1570	----	----	----	0.202	0.177	0.275	0.578	0.591

3.4 - Interação entre as múltiplas fontes de bombeamento.

Um outro aspecto que precisa ser considerado para uma faixa espectral da ordem de 70 nm é a interação entre as múltiplas fontes de bombeamento. Este é o acoplamento entre as múltiplas fontes de bombeamento, ou seja, o espalhamento Raman das fontes de bombeamento de maior comprimento pelas fontes de bombeamento de menor comprimento de onda.

A interação entre as múltiplas fontes de bombeamento pode ser melhor compreendida com o auxílio da figura 14. Nesta, as curvas de eficiência de ganho *Raman* para as oito fontes de bombeamento são mostradas, assim como a posição espectral (setas identificadas com letras) das respectivas fontes de bombeamento. Utilizou-se correspondência de cores e letras para as curvas de eficiência de ganho Raman gerado pela fonte de bombeamento específica. Por exemplo, a fonte de **bombeamento** com comprimento de onda de $1406,6\text{ nm}$ é responsável pela geração de uma curva de eficiência de ganho *Raman*, também destacada com a cor azul e correspondente letra (a).

Vale ressaltar a interseção entre as curvas e as setas na Figura 14. A seta identificada como (a) não intercepta com 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), e assim sucessivamente.

O comprimento de onda de bombeio de $1406,6 \text{ nm}$ não recebe energia, pois é a fonte de bombeamento de comprimento de onda mais curto. A segunda fonte de bombeamento, de comprimento de onda em $1415,4 \text{ nm}$, recebe uma parcela de energia da fonte de bombeamento com comprimento de onda em $1406,6 \text{ nm}$ (curva verde); A terceira a fonte de bombeamento, de comprimento de onda de $1424,2 \text{ nm}$, recebe energia das fontes de bombeamento de comprimentos de onda de $1406,6 \text{ nm}$ e de $1415,4 \text{ nm}$; e assim sucessivamente. A Tabela V mostra o valor desse acoplamento, a eficiência de ganho Raman, entre as múltiplas fontes de bombeamento.

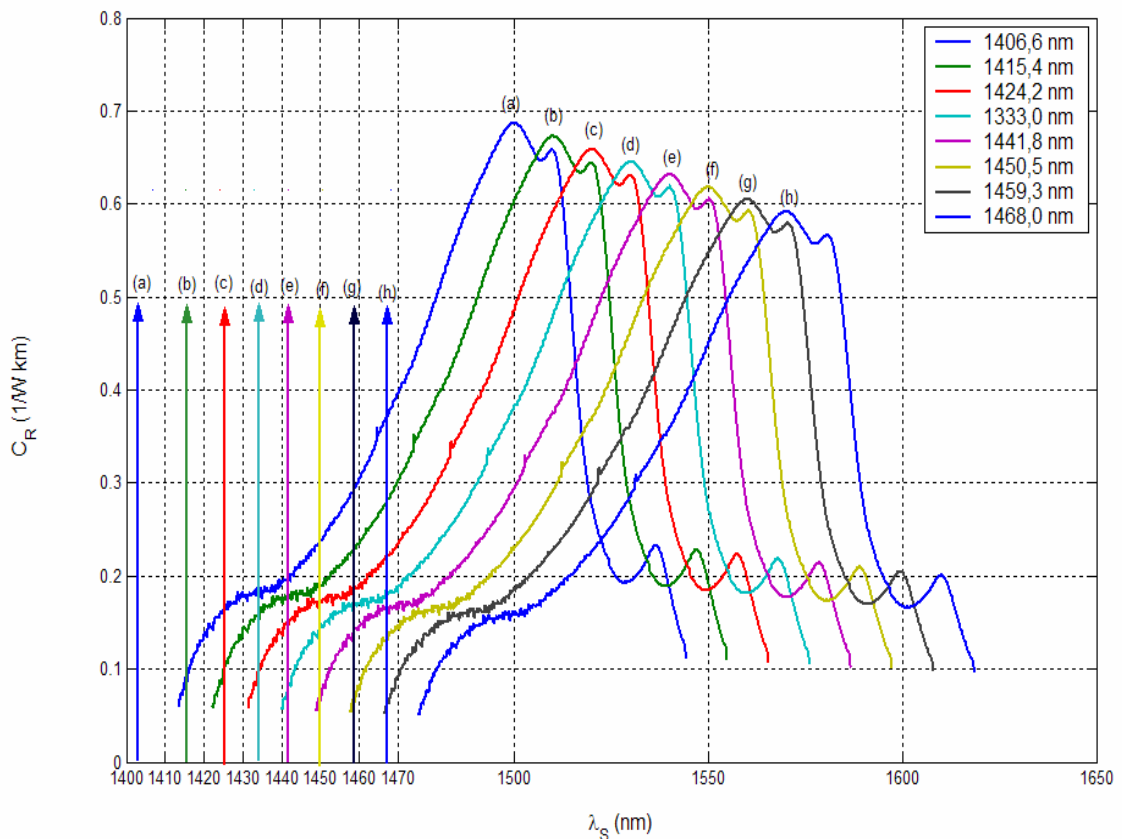


Figura 14 – Curvas da eficiência de ganho Raman para as múltiplas fontes de bombeamento superposta a localização espectral dos respectivos comprimentos de onda de bombeamento.

CAPÍTULO 4

ANÁLISE DA AMPLIFICAÇÃO RAMAN NA BANDA C e S

O objetivo deste capítulo é analisar a evolução dos sinais em um enlace de 100 km utilizando a fibra *TrueWave® Reach Low WaterPeak*. As análises serão conduzidas através da solução numérica das equações acopladas e não lineares que modelam a troca de energia entre as fontes de sinal e bombeamento. Na seção 4.1 as análises serão conduzidas levando em conta apenas o acoplamento independente das fontes de bombeamento com as respectivas fontes de sinal. A interação entre as fontes de bombeamento é adicionada a análise na seção 4.2. A interação entre as fontes de bombeamento no limite do acoplamento independente e não independente é analisada na seção 4.3. Para finalizar, todos os processos são considerados na seção 4.4.

4.1 – Acoplamento independente entre as fontes de bombeamento e as fontes de sinal.

As equações que regem o comportamento dos níveis de potência de sinal e bombeamento, quando as fontes de bombeamento se acoplam de forma independente a cada sinal são dadas por [BROMAGE, 2004, NEWBURRY, XU, 2004 e NEVES, 2002]:

$$\frac{dP_{s,i}}{dz} = -\alpha_{s,i} P_{s,i} + \sum_{\substack{j \\ (\lambda_i > \lambda_j)}} C_{i,j}^R [P_{p,j}^f + P_{p,j}^b] P_{s,i}, \text{ com } i = j \quad (4.1.1)$$

$$\frac{dP_{p,j}^f}{dz} = -\alpha_{p,j} P_{p,j}^f \quad (4.1.2)$$

$$\frac{dP_{p,j}^b}{dz} = +\alpha_{p,j} P_{p,j}^b \quad (4.1.3)$$

No conjunto de equações (4.1), o sub-índice $i = 1, \dots, N_s^{Max}$ identifica um determinado comprimento de onda do sinal dentro das bandas S e C que varia de 1500 nm a 1570 nm utilizando um espaçamento entre canais de 10 nm . Se $i = 1$, isto significa que $\lambda_{s,1} = 1500 \text{ nm}$ e $i = N_s^{Max}$, $\lambda_{s,N_s^{Max}} = 1570 \text{ nm}$. $P_{s,i}$ e $\alpha_{s,i}$ representam a potência média e a atenuação para o sinal de comprimento de onda $\lambda_{s,i}$, com sua respectiva frequência $\nu_{s,i}$. O sub-índice $j = 1, \dots, N_p^{Max}$ representa o comprimento de onda do bombeamento, variando de $1406,6 \text{ nm}$ a $1468,0 \text{ nm}$. Se $j = 1$ corresponde a $\lambda_{p,1} = 1406,6 \text{ nm}$ e $j = N_p^{Max}$ a $\lambda_{p,N_p^{Max}} = 1468,0 \text{ nm}$. $P_{p,j}^x$ e $\alpha_{p,j}$ são a potência média para o bombeamento e atenuação, para o bombeamento de comprimento de onda $\lambda_{p,j}$, com sua respectiva frequência $\nu_{p,j}$, e $x = f, b$ indica se o bombeamento é co-propagante ou contra-propagante. $C_{i,j}^R$ indica a eficiência de ganho Raman devido ao acoplamento de um bombeamento de comprimento de onda λ_j com um sinal de comprimento de onda λ_i . Note que os termos que levam em conta a depleção dos níveis de potência de bombeamento foram desprezados, aproximação válida quando $P_{s,i} \ll \alpha_{p,j} / C_{i,j}^R$.

O primeiro e segundo termos da equação (4.1.1) são responsáveis pelas perdas dos níveis de potência dos sinais de comprimento de onda λ_i , e o acoplamento entre as fontes de bombeamento co-propagantes e contra-propagantes de comprimento de onda λ_j , respectivamente. O acoplamento é proporcional à eficiência de ganho Raman $C_{i,j}^R$ e as potências de bombeamento $(P_{p,j}^f + P_{p,j}^b)$.

Os valores da atenuação para os comprimentos de onda de interesse encontram-se relacionados na tabela VI. Estes foram extraídos dos valores experimentais, fornecidos pelo fabricante, através de um procedimento de interpolação numérica.

Tabela VI – Atenuação da fibra *TrueWave® Reach Low Water Peak* para cada comprimento de onda de sinal (λ_s) e de bombeamento (λ_p).

λ_s (NM)	α_s (DB/KM)	λ_p (NM)	α_p (DB/KM)
1500	0,2190	1406,6	0,2945
1510	0,2142	1415,4	0,2825
1520	0,2092	1424,2	0,2718
1530	0,2046	1433,0	0,2630
1540	0,2012	1441,8	0,2554
1550	0,2000	1450,5	0,2486
1560	0,2002	1459,3	0,2418
1570	0,2008	1468,0	0,2355

As equações (4.1) foram solucionadas numérica e algebricamente (veja seção 2.3 do capítulo 2), e os resultados são mostrados na seqüência de figuras 15 - 17. Os oito sinais são lançados no início da fibra com uma potência de 1 mW , e os oito bombeamentos no final da fibra em uma configuração contra-propagante com uma potência de 150 mW . Os sinais 7 e 8 são indistinguíveis para a escala do gráfico. Uma mudança de escala e na faixa de valores do eixo y e eixo x da figura 15 permite distinguir os sinais 7 e 8, como evidenciado na figura 16. As perdas dominam o comportamento dos sinais na maior parte do enlace. Essa tendência muda em torno de

90 km quando os bombeamentos transferem energia para os sinais devido ao espalhamento Raman. A potência de bombeamento em 90 km é de aproximadamente 18 dBm, como mostra a figura 17. Nota-se que os sinais no final da banda são espalhados com mais eficiência. Estes se encontram acoplados aos bombeamentos de maior comprimento de onda, que por sua vez são menos atenuados do que os de menor comprimento de onda. Sendo assim, com o mesmo valor de potência, os canais no final da banda são mais eficientemente acoplados aos seus respectivos bombeamentos do que os sinais no início da banda.

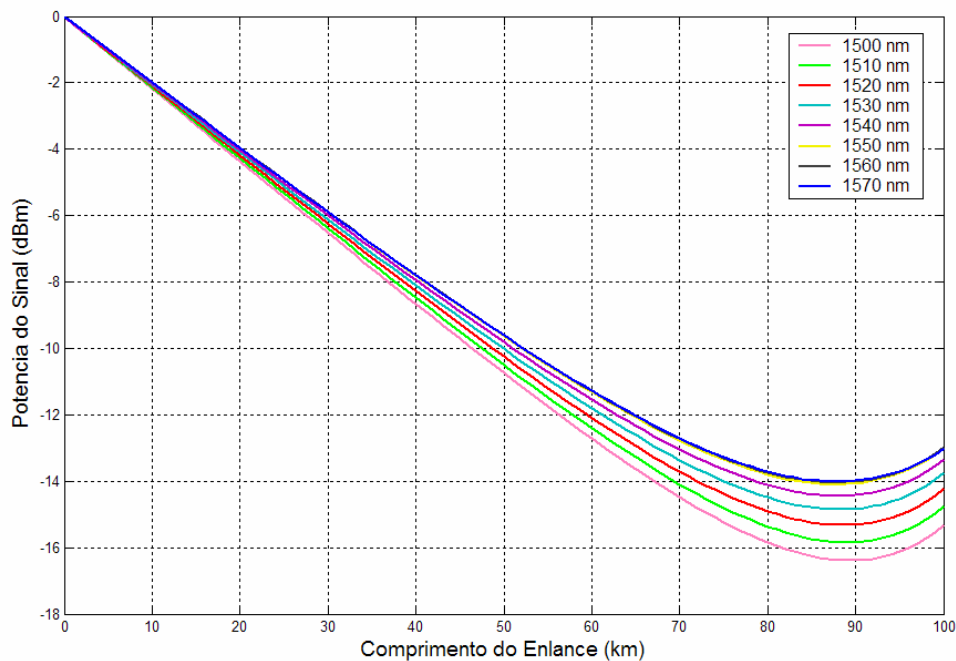


Figura 15 - Potência dos sinais 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 em dBm em função do comprimento do enlace. As fontes de bombeamento 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 são lançadas no final da fibra óptica, ou seja, contra-propagantes com os sinais. Todas as fontes de bombeamento tem potência igual a 150 mW.

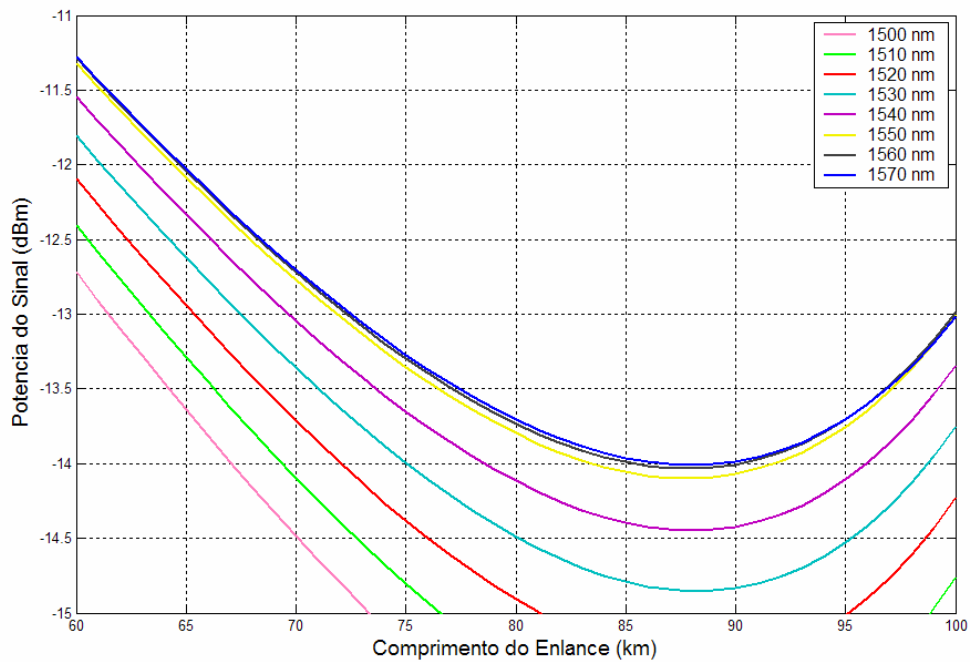


Figura 16 - Potência dos sinais 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 em dBm em função do comprimento do enlace. As fontes de bombeamento 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 são lançadas no final da fibra óptica, ou seja, contra-propagantes com os sinais. Todas as fontes de bombeamento tem potência igual a 150 mW .

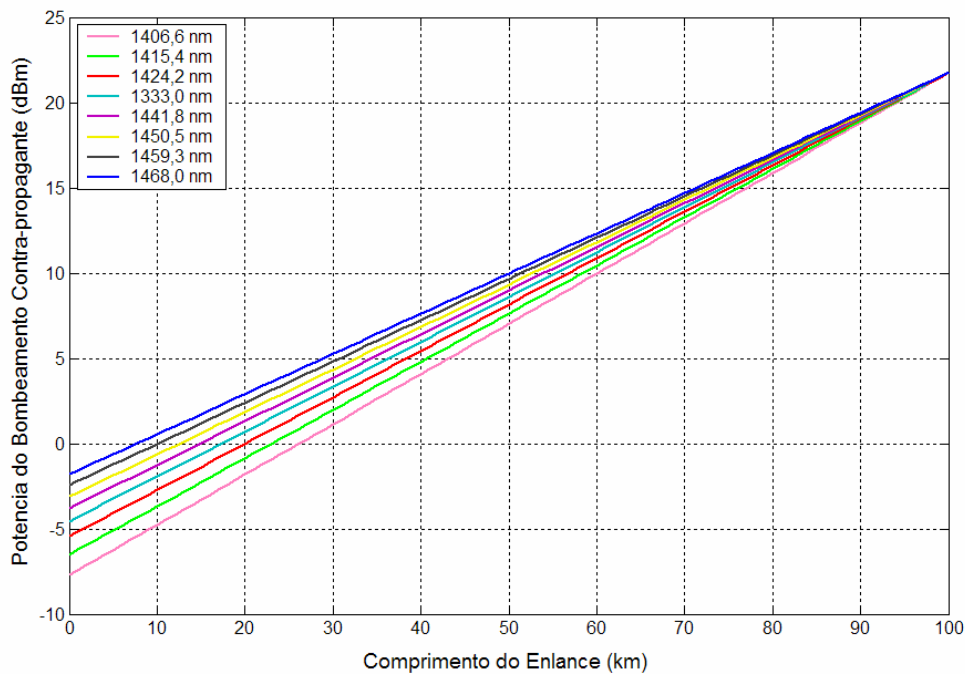


Figura 17 - Potência dos bombeamentos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 em dBm em função do comprimento do enlace. As fontes de bombeamento 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 são lançadas no final da fibra óptica, ou seja, contra-propagantes com os sinais. Todas as fontes de bombeamento tem potencia igual a 150 mW .

Um parâmetro interessante de se verificar é o ganho líquido, ou *net gain* (NG), do amplificador. Este é definido como a razão entre as potências do sinal na saída e na entrada da fibra óptica conforme a expressão:

$$NG = 10 \log_{10} \frac{P_s(L)}{P_s(0)} \quad (4.1.4)$$

O ganho líquido para os sinais é mostrado para valores de potências das fontes de bombeamento variando de 0 a 150 mW na figura 18. A curva correspondente a 0 mW , o ganho líquido varia de -22 dB no início da banda a -20 dB no final da banda. Nessa situação os sinais são todos atenuados. O ganho líquido encontra-se 2 dB acima para os comprimentos de onda no final da banda, comparado com os comprimentos de onda no início da banda. Essa característica se deve ao comportamento da atenuação para os comprimentos de onda de bombeamento. Quanto maior a atenuação, menor o comprimento efetivo do enlace, sendo assim, para o mesmo valor de potência, estes atingem um ganho maior. Os comprimentos de onda de 1550 nm , 1560 nm e 1570 nm apresentam, aproximadamente, o mesmo valor de ganho líquido. Essa característica é uma consequência de o valor da atenuação nesses comprimentos de onda ser aproximadamente o mesmo (a diferença encontra-se na quarta casa decimal depois da vírgula em dB/km). A curva correspondente à potência de 150 mW encontra-se em torno de 7 dB acima da curva correspondente a 0 mW .

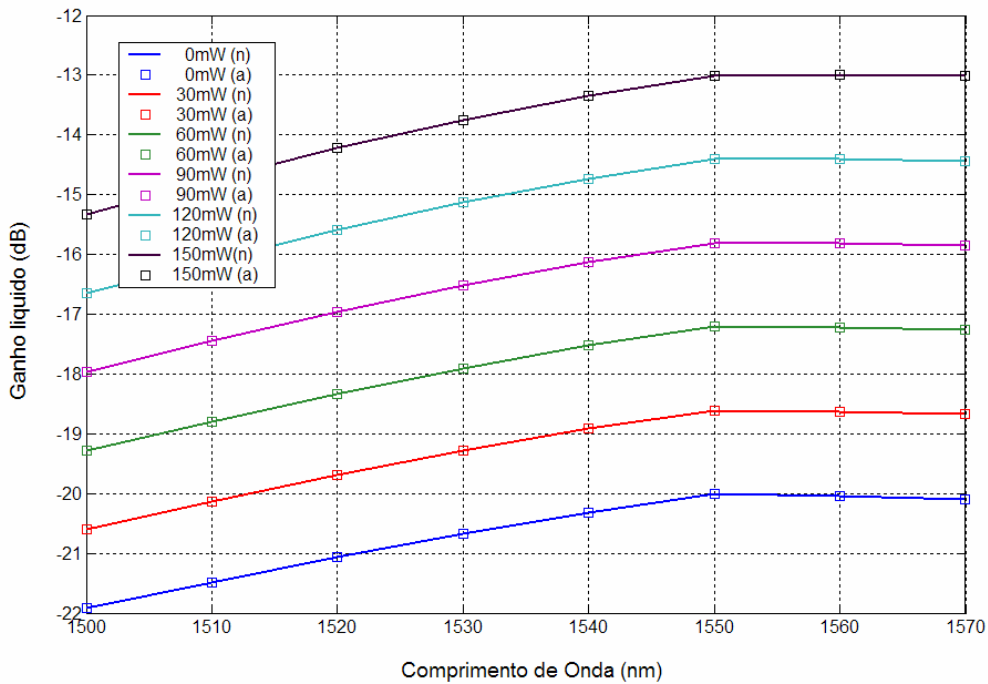


Figura 18. Ganho líquido em 100 km de enlace para valores de potência das fontes de bombeamento variando de 0 a 150 mW . As fontes de bombeamento 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 são contra-propagantes com os sinais 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 . Os símbolos correspondem aos valores calculados pela expressão analítica e as curvas sólidas são calculadas pelo algoritmo numérico.

No caso de um amplificador distribuído, a figura de mérito mais interessante é o ganho *on/off*, pois descarta as perdas da fibra. Este é definido como a razão entre a potência do sinal na presença e na ausência do bombeamento, ou seja:

$$G_{on,off} = 10 \log_{10} \frac{P_s(L)_{com\ bombeamento}}{P_s(L)_{sem\ bombeamento}} \quad (4.1.5)$$

O ganho *on/off* para os comprimentos de onda de sinal é mostrado para valores de potência de bombeamento variando de 0 a 150 mW, na figura 19. A curva correspondente à potência de 0 mW apresenta um ganho *on-off* de 0 dB. Nota-se que, para cada aumento de potência de 30 mW, o ganho *on-off* aumenta cerca de 1 dB. Esse aumento é aproximadamente uniforme para todos os comprimentos de onda. Na curva

correspondente à potência de 150 mW , o ganho *on-off* no final da banda encontra-se cerca $0,5\text{ dB}$ acima dos comprimentos de onda no início da banda. A diferença de $0,5\text{ dB}$ é uma consequência da dependência inversamente proporcional, do coeficiente de ganho Raman com o comprimento de onda de bombeamento.

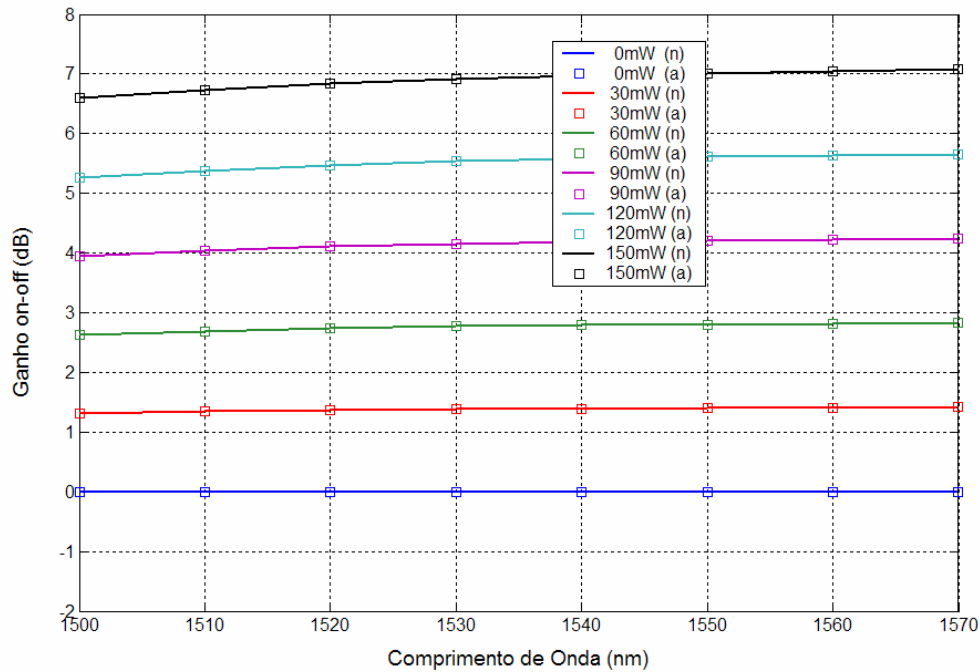


Figura 19 - Ganho *on/off* em 100 km de enlace em função da potência das fontes de bombeamento. As fontes de bombeamento 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 são contra-propagantes com os sinais 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8. Os símbolos correspondem aos valores calculados pela expressão analítica e as curvas sólidas são calculadas por um algoritmo numérico.

4.2 – Acoplamento independente entre as fontes de bombeamento e as fontes de sinal na presença da interação entre as fontes de bombeamentos.

O conjunto de equações (4.1) que rege o comportamento dos níveis de potência de sinal e bombeamento, quando as fontes de bombeamento se acoplam de forma

independente a cada sinal e quando se leva em conta às interações entre as fontes de bombeamentos, é modificado como:

$$\frac{dP_{s,i}}{dz} = -\alpha_{s,i}P_{s,i} + \sum_{\substack{j \\ (\lambda_i > \lambda_j)}} C_{i,j}^R [P_{p,j}^f + P_{p,j}^b] P_{s,i} \quad , \text{ com } i = j \quad (4.2.1)$$

$$\frac{dP_{p,j}^f}{dz} = -\alpha_{p,j}P_{p,j}^f - \sum_{\substack{i \\ (\lambda_i > \lambda_j)}} \left(\frac{v_{p,j}}{v_{s,i}} C_{j,i}^R P_{s,i} \right) P_{p,j}^f + \left[\sum_{\substack{k \\ (\lambda_k < \lambda_j)}} C_{j,k}^R P_{p,k}^f - \sum_{\substack{k \\ (\lambda_k > \lambda_j)}} \frac{v_{p,k}}{v_{p,j}} C_{k,j}^R P_{p,k}^f \right] P_{p,j}^f \quad (4.2.2)$$

$$\frac{dP_{p,j}^b}{dz} = +\alpha_{p,j}P_{p,j}^b + \sum_{\substack{i \\ (\lambda_i > \lambda_j)}} \left(\frac{v_{p,j}}{v_{s,i}} C_{j,i}^R P_{s,i} \right) P_{p,j}^b - \left[\sum_{\substack{k \\ (\lambda_k < \lambda_j)}} C_{j,k}^R P_{p,k}^b - \sum_{\substack{k \\ (\lambda_k > \lambda_j)}} \frac{v_{p,k}}{v_{p,j}} C_{k,j}^R P_{p,k}^b \right] P_{p,j}^b \quad (4.2.3)$$

O segundo termo da equação (4.2.2) representa a depleção da *j-esima* fonte de bombeamento devido à interação com o *i-esimo* sinal. O terceiro termo da equação (4.2.2) representa o acoplamento da *k-esima* fonte de bombeamento co-propagante de comprimento de onda λ_k com a *j-esima* fonte de bombeamento de comprimento de onda λ_j com uma eficiência de ganho Raman $C_{j,k}^R$, e a depleção da *j-esima* fonte de bombeamento co-propagante de comprimento de onda λ_k devido a interação com a fonte de bombeamento co-propagante de comprimento de onda λ_j com uma eficiência de ganho Raman $C_{k,j}^R$.

As equações (4.2) foram resolvidas utilizando método numérico e os resultados são mostrados nas figuras 20 a 22. O comportamento dos sinais ao longo do enlace é bastante modificado. Os sinais no final da banda chegam com uma potência em torno de -13 dBm , na ausência da interação entre as fontes de bombeamento. Na presença dessa

interação a potência dos sinais de 1560 *nm* e 1570 *nm* tem um aumento em torno de 3 *dB* e 13 *dB*, respectivamente. No entanto, os sinais no início da banda chegam ao final do enlace com uma potência menor na presença da interação entre os bombeamentos do que na ausência. Por exemplo, os sinais de 1550 *nm* e 1520 *nm* tem um decréscimo de potência da ordem de 5 *dB* e 4 *dB*, respectivamente. Esta transferência de potência dos sinais de menor comprimento de onda para os sinais de maior comprimento de onda é mediada pelas fontes de bombeamento. Os bombeamentos de menor comprimento de onda transferem energia para os de maior comprimento de onda, como pode ser verificado na figura 21. O bombeamento de menor comprimento de onda 1406,6 *nm* chega ao início do enlace com um nível de potência em torno de 28 *dBm* do valor que chegaria na ausência de interação entre os bombeamentos.

O impacto da interação entre bombeamentos no ganho *on/off* pode ser verificado na figura 22. Nesta, a dependência do ganho *on/off* com a potência de bombeamento é mostrada para todos os sinais dentro da banda. O sinal de 1570 *nm* tem um ganho *on/off* em torno de 23 *dB* acima do canal de 1500 *nm*.

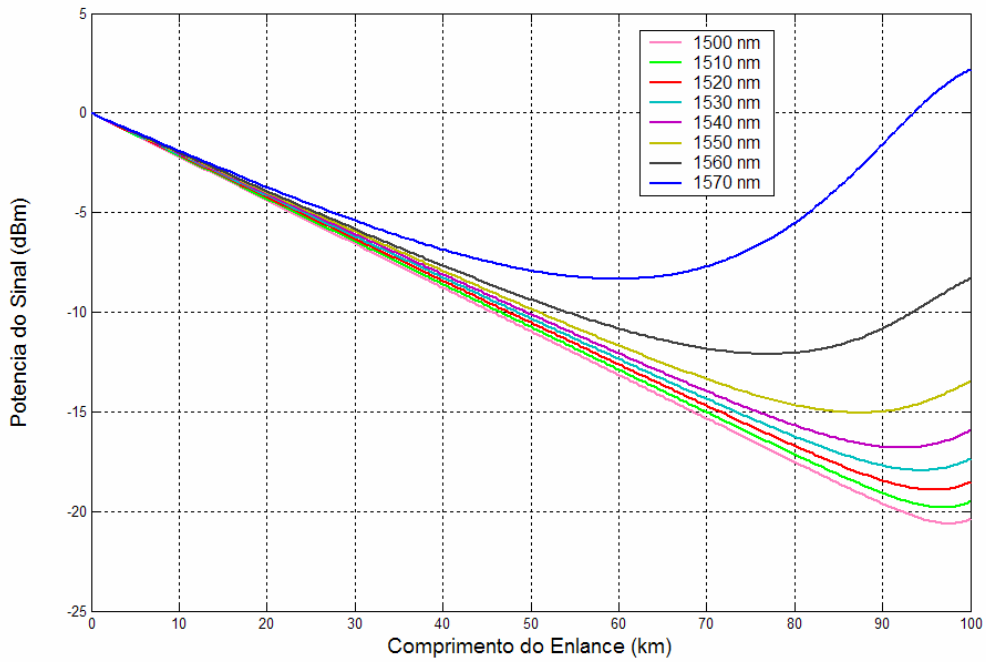


Figura 20 - Potência dos sinais 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 em dBm em função do comprimento do enlace. As fontes de bombeamento 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 são lançadas no final da fibra óptica, ou seja, contra-propagantes com os sinais. Todas as fontes de bombeamento têm potência igual a 150 mW .

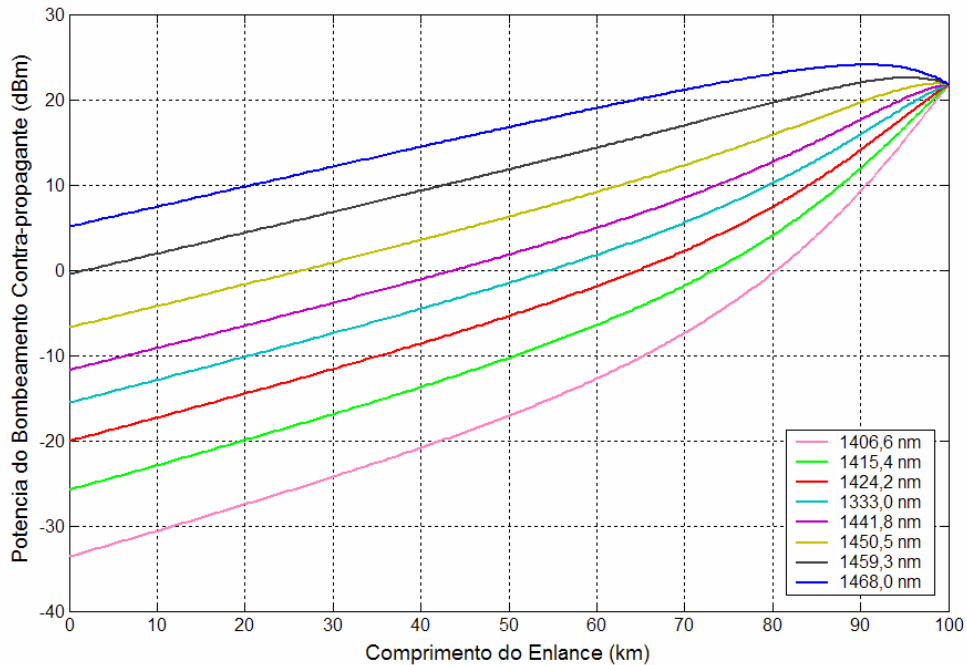


Figura 21 - Potência dos bombeamentos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 em dBm em função do comprimento do enlace. As fontes de bombeamento 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 são lançadas no final da fibra óptica, ou seja, contra-propagantes com os sinais. Todas as fontes de bombeamento tem potência igual a 150 mW .

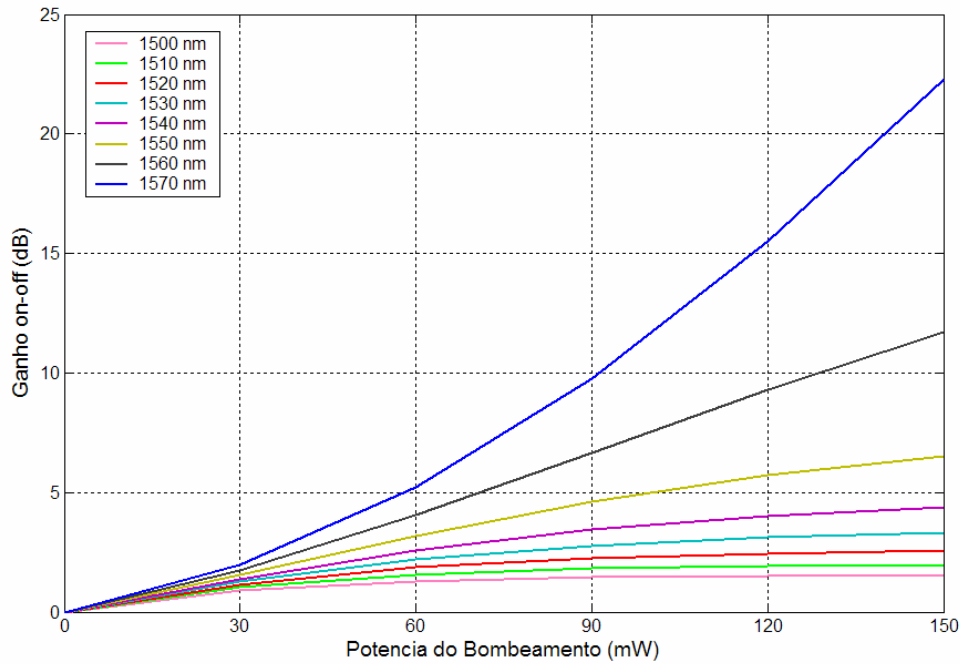


Figura 22 - Ganho *on/off* para os sinais 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 em função da potência de bombeamento. As fontes de bombeamento 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 são lançadas no final da fibra óptica, ou seja, contra-propagantes com os sinais e com uma potência igual a 150 *mW* .

4.3 – Acoplamento independente e não independente entre as fontes de bombeamento e as fontes de sinal na ausência de interação entre os bombeamentos.

O conjunto de equações (4.1) que rege o comportamento dos níveis de potência de sinal e bombeamento, quando as fontes de bombeamento se acoplam de forma não independente a cada sinal e na ausência de interação entre os bombeamentos, é modificado como:

$$\frac{dP_{s,i}}{dz} = -\alpha_{s,i} P_{s,i} + \sum_{(\lambda_i^j > \lambda_j)} C_{i,j}^R (P_{p,j}^f + P_{p,j}^b) P_{s,i} \quad (4.3.1)$$

$$\frac{dP_{p,j}^f}{dz} = -\alpha_{p,j} P_{p,j}^f - \sum_{\substack{i \\ (\lambda_i > \lambda_j)}} \left(\frac{\nu_{p,j}}{\nu_{s,i}} C_{j,i}^R P_{s,i} \right) P_{p,j}^f \quad (4.3.2)$$

$$\frac{dP_{p,j}^b}{dz} = +\alpha_{p,j} P_{p,j}^b + \sum_{\substack{i \\ (\lambda_i > \lambda_j)}} \left(\frac{\nu_{p,j}}{\nu_{s,i}} C_{j,i}^R P_{s,i} \right) P_{p,j}^b \quad (4.3.3)$$

A equação (4.3.1) tem o mesmo significado que a equação (4.2.1). A única diferença é que a última não exclui a interação com bombeamentos não independentes, ou seja, não restringe o somatório para valores de $i = j$. O segundo termo da equação (4.3.2) é responsável pela depleção do nível de potência do sinal de comprimento de onda λ_i devido à interação com o bombeamento co-propagante de comprimento de onda λ_j . O acoplamento é proporcional à eficiência de ganho Raman, $C_{j,i}^R$, à razão entre as frequências de bombeamento e sinal, $\nu_{p,j}/\nu_{s,i}$ e à potência de sinal $P_{s,i}$. A equação (4.3.3) é análoga à equação (4.3.2) para os bombeamentos contra-propagantes.

As equações (4.3) foram resolvidas numericamente e os resultados são mostrados nas figuras 23 e 24. O ganho *on/off* na banda de interesse é mostrado para valores de potência iguais para todas as fontes de bombeamento e variando de 0 *mW* a 150 *mW*. Nota-se um aumento considerável do ganho *on/off* quando a interação entre sinais e bombeamentos é não independente, ou seja, todos os bombeamentos interagem com todos os sinais, não apenas com os pares. Esse aumento varia de 7 *dB* a 23 *dB* no início da banda, e de 6 *dB* a 18 *dB* no final da banda. A eficiência de ganho Raman é inversamente proporcional ao comprimento de onda do sinal; sendo assim, no limite de acoplamento não independente, estes são favorecidos. A figura 24 ressalta essa

característica, mostrando a dependência do ganho *on/off* para todos os canais dentro da banda.

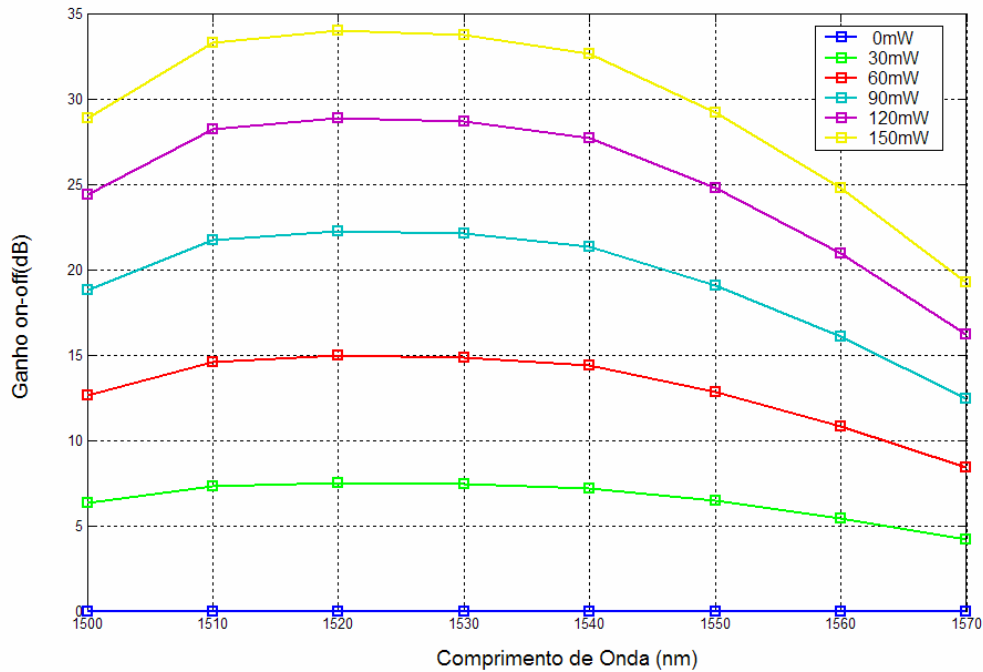


Figura 23 - Ganho *on-off* em 100 km de enlace para valores de potência das fontes de bombeamento variando de 0mW a 150 mW. As fontes de bombeamento 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 são contra-propagantes com os sinais 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8. Os oito bombeamentos são lançados na fibra óptica com o mesmo valor de potência.

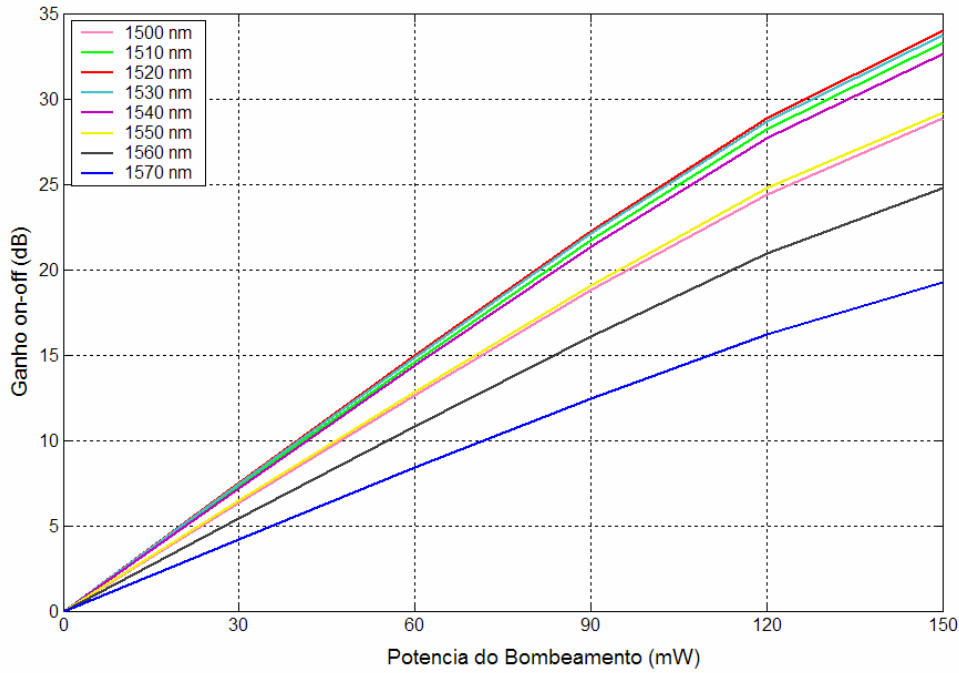


Figura 24 - Ganho *on-off* em 100 km de enlace em função da potência das fontes de bombeamento. As fontes de bombeamento 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 são contra-propagantes com os sinais 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8. Os oito bombeamentos são lançados na fibra óptica com o mesmo valor de potência.

4.4 - Acoplamento independente e não independentes entre sinais e bombeamento na presença da interação entre os bombeamentos.

As equações que modelam o comportamento dos sinais e bombeamento, levando em conta interação independente e não independente entre os sinais e bombeamentos e a interação entre os bombeamentos, são dadas por:

$$\frac{dP_{s,i}^f}{dz} = -\alpha_{s,i} P_{s,i}^f + \sum_{\substack{j \\ (\lambda_i > \lambda_j)}} C_{i,j}^R (P_{p,j}^f + P_{p,j}^b) P_{s,i}^f \quad (4.4.1)$$

$$\frac{dP_{p,j}^f}{dz} = -\alpha_{p,j} P_{p,j}^f - \sum_{\substack{i \\ (\lambda_i > \lambda_j)}} \left(\frac{v_{p,j}}{v_{s,i}} C_{j,i}^R P_{s,i}^f \right) P_{p,j}^f + \left[\sum_{\substack{k \\ (\lambda_k < \lambda_j)}} C_{j,k}^R P_{p,k}^f - \sum_{\substack{k \\ (\lambda_k > \lambda_j)}} \frac{v_{p,k}}{v_{p,j}} C_{k,j}^R P_{p,k}^f \right] P_{p,j}^f \quad (4.4.2)$$

$$\frac{dP_{p,j}^b}{dz} = +\alpha_{p,j} P_{p,j}^b + \sum_{\substack{i \\ (\lambda_i > \lambda_j)}} \left(\frac{v_{p,j}}{v_{s,i}} C_{j,i}^R P_{s,i} \right) P_{p,j}^b - \left[\sum_{\substack{k \\ (\lambda_k < \lambda_j)}} C_{j,k}^R P_{p,k}^b - \sum_{\substack{k \\ (\lambda_k > \lambda_j)}} \frac{v_{p,k}}{v_{p,j}} C_{k,j}^R P_{p,k}^b \right] P_{p,j}^b \quad (4.4.3)$$

As equações foram resolvidas numericamente e os resultados são mostrados na figuras 25 e 26. O ganho *on/off* para todos os bombeamentos ativos e valores iguais de potência variando de 0 mW a 150 mW é mostrado na figura 25. O ganho *on/off* é maior para os comprimentos de onda no final da banda. Essa diferença é da ordem de 15 dB . Como discutido anteriormente, esta característica é uma consequência da interação entre os bombeamentos. Os bombeamentos de menor comprimento de onda transferem energia para os de maior comprimento de onda, reduzindo o ganho para os sinais no início da banda e aumentando o ganho para os sinais no final da banda. A potência dos sinais ao longo da fibra é mostrada na figura 26, reforçando essa discussão.

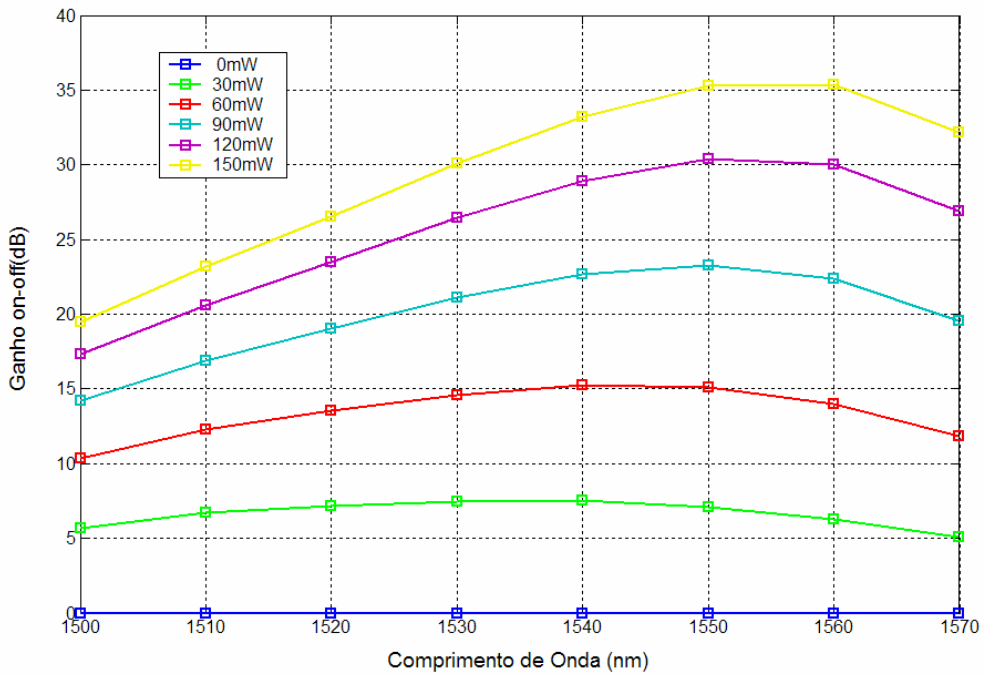


Figura 25 - Ganho *on-off* em 100 km de enlace para valores de potência das fontes de bombeamento variando de 0mW a 150 mW . As fontes de bombeamento 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 são contra-propagantes com os sinais 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 . Os oito bombeamentos são lançados na fibra óptica com o mesmo valor de potência.

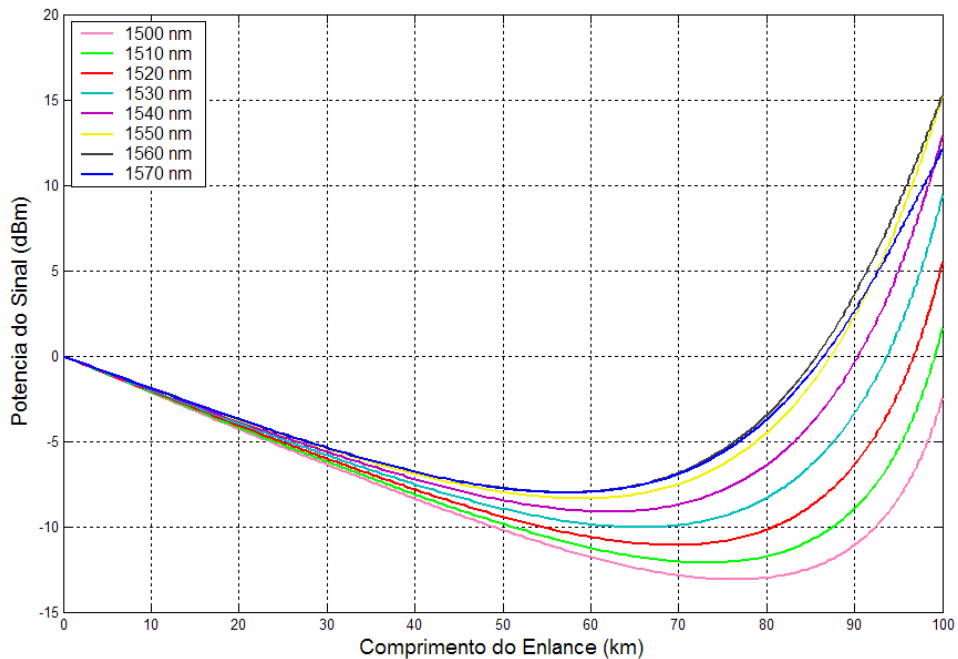


Figura 26 - Potência dos sinais 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 em dBm em função do comprimento do enlace. As fontes de bombeamento 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 são lançadas no final da fibra óptica, ou seja, contra-propagantes com os sinais. Todas as fontes de bombeamento tem potência igual a 150 mW .

4.5 - Considerações finais

Para fins práticos, o número de fontes de bombeamento deve ser reduzido. O ganho *on/off* com as fontes de bombeamentos 1, 3, 5 e 7 ativadas é mostrado na figura 27. A redução do número de fontes ativadas reduz a ganho *on/off* em torno de 15 dB. No entanto, o perfil do ganho permanece praticamente inalterado.

Em todas as análises conduzidas nas seções anteriores, os valores das fontes de bombeamento foram mantidos iguais. Ajuste nos valores de potência dos bombeamentos permite a obtenção de uma resposta mais plana para toda banda de amplificação. .

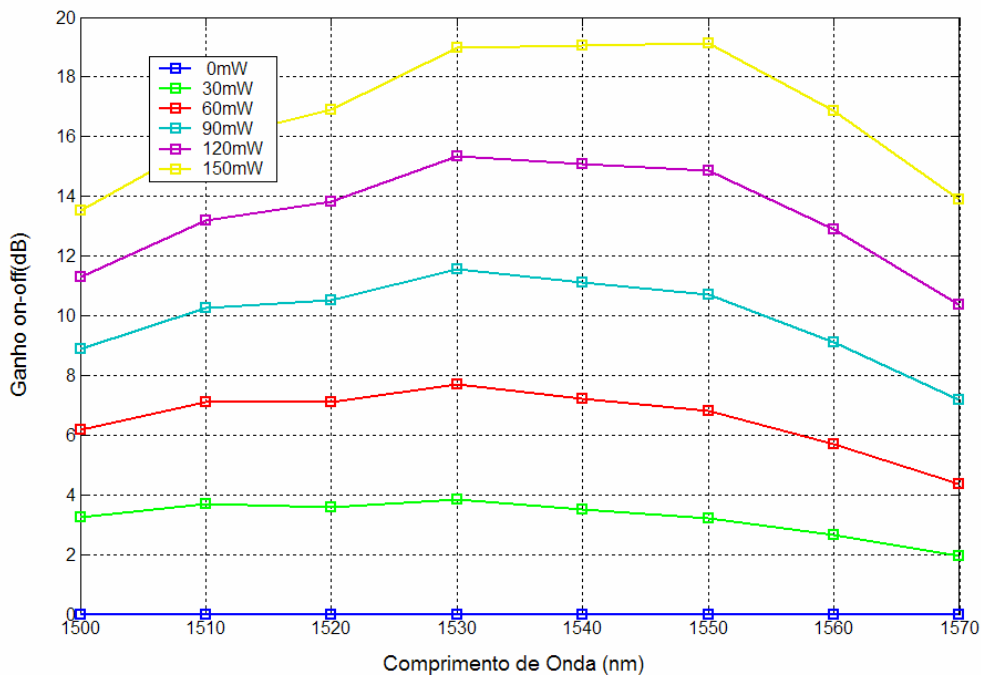


Figura 27 - Ganho *on-off* em 100 km de enlace para valores de potência das fontes de bombeamento variando de 0mW a 150 mW. As fontes de bombeamento 1, 3, 5 e 7 são contra-propagantes com os sinais 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8. Os quatro bombeamentos são lançados na fibra óptica com o mesmo valor de potência.

A figura 28 mostra o ganho on/off com os seguintes ajustes de potência das fontes de bombeamento. A potência de bombeamento do bombeamento 1 é aumentada em 100%. O bombeamento 3 permanece inalterado, o bombeamento 5 é reduzido em 40% e o bombeamento 7 é aumentado em 25%. Esse ajuste permite atingir um ganho em torno de 15 dB com variação menor do que 1 dB para 70 nm de banda, cobrindo da banda S e a banda C.

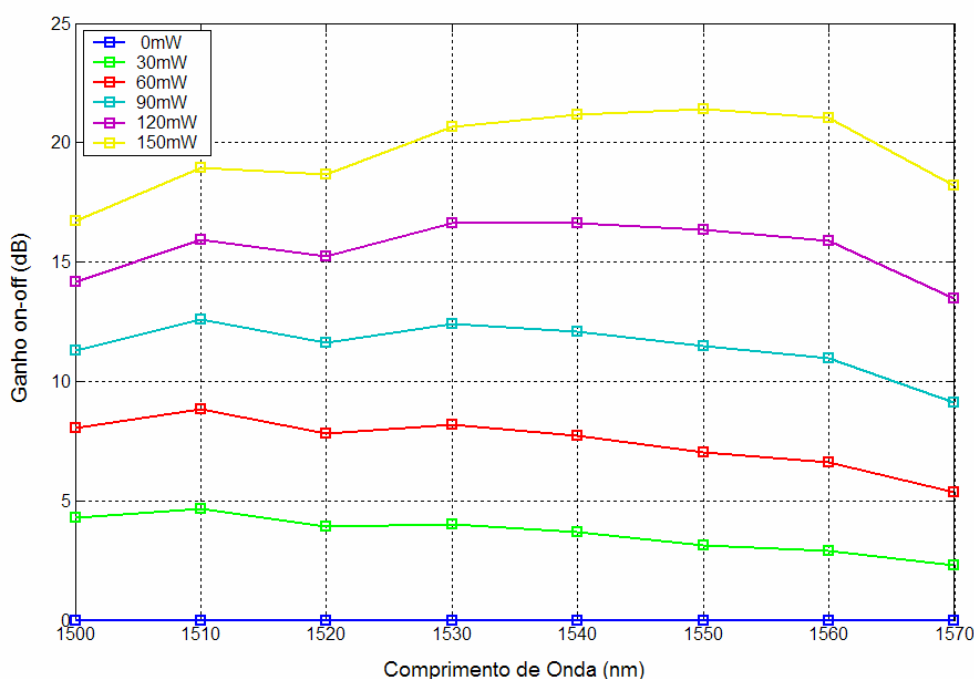


Figura 28 - Ganho *on-off* em 100 km de enlace para valores de potência das fontes de bombeamento variando de 0mW a 150 mW. As fontes de bombeamento 1, 3, 5 e 7 são contra-propagantes com os sinais 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8. Os quatro bombeamentos são lançados na fibra óptica com valores de potência relativos ao indicado na legenda do gráfico. 100% maior do mesmo para o bombeamento 1, igual para o bombeamento 3, reduzido de 40% para o bombeamento 5, e aumentado de 25% para o bombeamento 7.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

Nesta dissertação, foram analisados inicialmente os sistemas de comunicação a fibras ópticas e a necessidade de se utilizar amplificadores para a restauração do sinal transmitido. Em seguida, o conceito sobre o espalhamento Raman espontâneo e estimulado foi estudado, por ser essencial à compreensão desse trabalho. Os parâmetros físicos da fibra *TrueWave[®] Reach LWP* tais como atenuação, dispersão e eficiência de ganho *Raman* para as bandas C e S foram analisados e estimados com o objetivo de utiliza-los nas simulações da amplificação Raman Distribuída.

Através de dados fornecidos pelo fabricante da *TrueWave[®] Reach LWP*, isto é, a eficiência de ganho *Raman* para o bombeamento em 1453 nm , foram construídas as curvas de eficiência de ganho *Raman* para 8 sinais de comprimentos de onda de 1500 nm a 1570 nm , com espaçamento entre sinais de 10 nm , onde verificou-se que sinal recebe máximo acoplamento da fonte de bombeamento par com o pico da curva de eficiência de ganho Raman, ocorrendo em torno de um deslocamento de frequência de $13,2\text{ THz}$ para todos os comprimentos de onda de bombeamento, e que há um aumento em torno de 20% para esses valores de pico. A contribuição das demais fontes de bombeamento não é desprezível, pois ela afeta a eficiência de ganho Raman.

A evolução do sinal e do bombeamento é descrita pelas equações acopladas não-lineares e estas foram solucionadas numericamente.

No acoplamento independente entre as fontes de bombeamento e as fontes de sinal, os oito sinais são lançados no início da fibra com uma potência de 1 mW , e os oito bombeamentos no final da fibra em uma configuração contra-propagante com uma potência de 150 mW . A potência de bombeamento em 90 km é de aproximadamente 18 dBm . Mantendo o mesmo valor de potência, os canais no final da banda são mais eficientemente acoplados aos seus respectivos bombeamentos do que os sinais no início da banda. O ganho líquido para os sinais foi analisado com potências das fontes de bombeamento variando de 0 a 150 mW . Para a potência de 0 mW , o ganho líquido varia de -22 dB no início da banda a -20 dB no final da banda enquanto que para a potência de 150 mW , encontra-se em torno de 7 dB acima da potência correspondente a 0 mW . O ganho *on/off* para a potência de 0 mW apresenta um ganho de 0 dB e que para cada aumento de potência de 30 mW esse ganho aumenta cerca de 1 dB . Para a potência de 150 mW , o ganho *on-off*, no final da banda encontra-se cerca $0,5\text{ dB}$ acima dos comprimentos de onda no início da banda.

No acoplamento independente entre as fontes de bombeamento e as fontes de sinal e na presença da interação entre as fontes de bombeamentos a potência dos sinais de 1560 nm e 1570 nm tem um aumento em torno de 3 dB e 13 dB , respectivamente enquanto que os sinais no final da banda chegavam com uma potência em torno de -13 dBm , na ausência da interação entre as fontes de bombeamento. No entanto os sinais no início da banda chegam ao final do enlace com uma potência menor na presença da interação entre os bombeamentos do que na ausência. Por exemplo, os sinais de 1550 nm e 1520 nm tem um decréscimo de potência da ordem de 5 dB e 4 dB respectivamente. O bombeamento de menor comprimento de onda $1406,6\text{ nm}$

chega ao início do enlace com uma nível de potência em torno de 28 dB abaixo do valor que chegaria na ausência de interação entre os bombeamentos.

No acoplamento independente e não independente entre as fontes de bombeamento e as fontes de sinal na ausência de interação entre os bombeamentos, observa-se um aumento considerável do ganho *on/off* quando a interação entre sinais e bombeamentos é não independente, variando de 7 dB a 23 dB no início da banda, e de 6 dB a 18 dB no final da banda. No limite de acoplamento não independente, os sinais no início da banda são favorecidos.

No acoplamento independente e não independentes entre sinais e bombeamento na presença da interação entre os bombeamentos, o ganho *on/off*, para todos os bombeamentos ativos e valores iguais de potência variando de 0 mW a 150 mW , é maior para os comprimentos de onda no final da banda. A diferença é da ordem de 15 dB .

Para fins práticos o número de fontes de bombeamento deve ser reduzido. O ganho *on/off* com as fontes de bombeamentos 1, 3, 5 e 7 reduz o ganho em torno de 15 dB , permanecendo inalterado o perfil do ganho. Em todas as análises conduzidas, os valores das fontes de bombeamento foram mantidos iguais. O ajuste nos valores de potência dos bombeamentos permite a obtenção de uma resposta mais plana para toda banda de amplificação. Esses ajustes ocorrem da seguinte forma: bombeamento 1 é aumentada em 100%, o bombeamento 3 permanece inalterado, o bombeamento 5 é reduzido em 40% e o bombeamento 7 é aumentado em 25%.

Apêndice A

Dedução das equações (3.4) e (3.6)

$$\frac{dP_s}{dz} = -\alpha_s P_s + \frac{g_R}{A_{ef}} P_p \cdot P_s \quad (2.3.1)$$

$$\frac{dP_p}{dz} = -\alpha_p P_p - \frac{\omega_p}{\omega_s} \cdot \frac{g_R}{A_{ef}} P_p \cdot P_s \quad (2.3.2)$$

$$\frac{dP_p}{dz} = -\alpha_p P_p \quad (2.3.3)$$

$$\frac{dP_p}{P_p} = -\alpha_p \cdot dz \Rightarrow \int_{P_p(0)}^{P_p(z)} \frac{dP_p}{P_p} = -\int_0^z \alpha_p \cdot dz$$

$$\ln P_p(z) - \ln P_p(0) = -\alpha_p \cdot z \Rightarrow \ln \frac{P_p(z)}{P_p(0)} = -\alpha_p \cdot z$$

$$\frac{P_p(z)}{P_p(0)} = e^{-\alpha_p \cdot z} \Rightarrow P_p(z) = P_p(0) \cdot e^{-\alpha_p \cdot z} \quad (2.3.4)$$

Substituindo (2.3.4) em (2.3.1), tem-se:

$$\frac{dP_s}{dz} = -\alpha_s P_s + \frac{g_R}{A_{ef}} P_p(0) \cdot e^{-\alpha_p \cdot z} \cdot P_s \quad (2.3.5)$$

$$\frac{dP_s}{P_s} = -\alpha_s dz + \frac{g_R}{A_{ef}} P_p(0) \cdot e^{-\alpha_p \cdot z} dz \Rightarrow \int_{P_s(0)}^{P_s(z)} \frac{dP_s}{P_s} = -\int_0^z \alpha_s \cdot dz + \int_0^z \frac{g_R}{A_{ef}} \cdot P_p(0) \cdot e^{-\alpha_p \cdot z} dz$$

$$\ln P_s(z) - \ln P_s(0) = -\alpha_s \cdot z + \frac{g_R}{A_{ef}} \cdot P_p(0) \cdot \left(\frac{-1}{\alpha_p} \right) \cdot e^{-\alpha_p \cdot z} - \frac{g_R}{A_{ef}} \cdot P_p(0) \cdot \left(\frac{-1}{\alpha_p} \right)$$

$$\ln \frac{P_s(z)}{P_s(0)} = -\alpha_s \cdot z + \frac{g_R}{A_{ef}} \cdot P_p(0) \cdot \frac{1}{\alpha_p} \left(-e^{-\alpha_p \cdot z} + 1 \right)$$

$$P_s(z) = P_s(0) \exp \left[-\alpha_s \cdot z + \frac{g_R}{A_{ef}} \cdot P_p(0) \cdot \left(\frac{1 - e^{-\alpha_p \cdot z}}{\alpha_p} \right) \right] \quad (2.3.6)$$

Apêndice B

Dedução das equações (2.3.10) e (2.3.12)

$$\frac{dP_s}{dz} = -\alpha_s P_s + \frac{g_R}{A_{ef}} P_p \cdot P_s \quad (2.3.7)$$

$$\frac{dP_p}{dz} = +\alpha_p P_p + \frac{\omega_p}{\omega_s} \cdot \frac{g_R}{A_{ef}} P_p \cdot P_s \quad (2.3.8)$$

$$\frac{dP_p}{dz} = \alpha_p P_p \quad (2.3.9)$$

$$\frac{dP_p}{P_p} = \alpha_p dz \Rightarrow \int_L^z \frac{dP_p}{P_p} = \int_0^{z-L} \alpha_p dz$$

$$\ln P_p(z) - \ln P_p(L) = \alpha_p(z-L) \Rightarrow \ln \frac{P_p(z)}{P_p(L)} = \alpha_p(z-L)$$

$$\frac{P_p(z)}{P_p(L)} = e^{\alpha_p(z-L)} \Rightarrow P_p(z) = P_p(L) e^{\alpha_p(z-L)} \quad (2.3.10)$$

Substituindo (2.3.10) em (2.3.7), tem-se:

$$\frac{dP_s}{dz} = -\alpha_s P_s + \frac{g_R}{A_{ef}} P_p(L) e^{\alpha_p(z-L)} \cdot P_s \Rightarrow \frac{dP_s}{P_s} = -\alpha_s dz + \frac{g_R}{A_{ef}} P_p(L) e^{\alpha_p(z-L)} dz$$

$$\int_0^z \frac{dP_s}{P_s} = -\int_0^z \alpha_s dz + \int_0^z \frac{g_R}{A_{ef}} P_p(L) e^{\alpha_p(z-L)} dz$$

$$\ln P_s(z) - \ln P_s(0) = -\alpha_s \cdot z + \frac{g_R}{A_{ef}} \cdot P_p(L) e^{\alpha_p(z-L)} \cdot \frac{1}{\alpha_p} - \frac{g_R}{A_{ef}} \cdot P_p(L) e^{-\alpha_p \cdot L} \cdot \frac{1}{\alpha_p}$$

$$\ln \frac{P_s(z)}{P_s(0)} = -\alpha_s \cdot z + \frac{g_R}{A_{ef}} \cdot P_p(L) e^{\alpha_p(z-L)} \cdot \frac{1}{\alpha_p} \left(1 - \frac{e^{-\alpha_p \cdot L}}{e^{\alpha_p(z-L)}} \right)$$

$$\ln \frac{P_s(z)}{P_s(0)} = -\alpha_s \cdot z + \frac{g_R}{A_{ef}} \cdot P_p(L) e^{\alpha_p(z-L)} \cdot \frac{1}{\alpha_p} (1 - e^{-\alpha_p \cdot z})$$

$$P_s(z) = P_s(0) \exp \left[-\alpha_s \cdot z + \frac{g_R}{A_{ef}} \cdot P_p(L) e^{\alpha_p(z-L)} \cdot L_{ef} \right] \quad (2.3.11)$$

BIBLIOGRAFIA

- AGRAWAL, G.P., *Nonlinear fiber Optics*, 2nd edition, Academic Press, 1995.
- AGRAWAL, G.P., *Nonlinear Fiber Optics*, Academic Press, 2001.
- AGRAWAL, G.P., *Fiber Optic Communication Systems*, 3rd ed., John Wiley & Son Inc.Publication, New York, 2002.
- ASO, O., TADAKUMA, M., NAMIKI, S., *Four Wave Mixing in Optical Fibers and it Application*, Furukawa Review, n} 19, 2000.
- BAYVEL,P. & KILLEY, R., Nonlinear Optical Effects in WDM Transmission, chapter 13, *Optical Fibre Telecommunications IV-B, Systems and Impairments*, edited by Ivan Kaminow and Tingye Li, 2002, USA.
- BOYD, R.W., *Nonlinear optics*, Academic Press Limited, New York, 1992.
- BRISTIEL, B., et al, *Intrinsic Noise Figure Derivation for Fiber Raman Amplifiers From Equivalent Noise Figure Measurement*, IEEE Lightwave Technologies in Instrumentation & Measurement Conference, New York, USA, Octobre 2004.
- BROMAGE,J., et al, *40x10 Gb/s S-band transmission over 600 km of non zero dispersion fibre*, Optical Society of America, 2002.
- BROMAGE, J., *Raman Amplification for Fiber Communications Systems*, Journal of Lightwave Technology, vol. 22, n°1, January, 2004.
- BUCK, J.A., *Fundamentals of Optical Fibers*, ed. John & Sons, USA, 1995.
- CANI,S.P.N., *Análise de Sinais em Amplificadores Raman*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo, 2003.
- CONNELY, M.J., *Semiconductor Optical Amplifier*, Kluwer Academic Publishers, Boston, USA, 2002.

DINDA, P.T., MILLOT, G., LOUIS, P., *Simultaneous achievement of Suppression of modulational Instability and Recduction of Stimulated Raman Scattering in Optical Fiber by Orthogonal Pumping*, Optical Society of America, vol. 17, n° 10, October, 2000.

FUKAI,G.; Nakajima,K.; Zhou,J.; and Tajima,K., *A study of the Optimum Fibre Design for a Distributed Raman Amplification Transmission Systems*, IEEE Photonics Technology Letter, vol. 15, n° 11, November 2003.

GHATAK, A. & THYAGARAJAN, K., *Intoduction to Fiber Optics*, ed. Cambridge University Press, 2002.

ISLAM, M.N., *Raman Amplifier for Telecommunication 1: Physical Principles*, ed. Springer-Verlag Inc., New York, 2004.

ISLAM, M.N., *Raman Amplifier for Telecommunication*, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Eletronics, vol. 8, n° 3, May/June, 2002.

KEISER, G., *Optical Fiber Communications*, 3rd ed., McGraw-Hill, USA, 2000.

KIDORF, H., ROTTWITT, K., NISSOV,M., *Pump Interactions in a 100 nm Bandwidth Raman Amplifier*, IEEE Photonics Technology Letters, vol. 11, n° 5, pp.530-532, May 1999.

LAUDARES; *Modelagem de Amplificadores de Fibra Dopada com Túlio*, Dissertação, Universidade Presbiteriana Mackenzie, 2004.

MIN, B., LEE, W.J., PARK, N., *Efficient Formulation Raman Amplifier Propagation Equation with Average Power Analysis*, IEEE Photonics Technology Letters, vol. 12, n° 11 November 2000.

NEVES, S. P., FREITAS, M. CALMON, L.C., *Signal Gain and Degradation in Fiber Raman Amplifiers*, International Telecommunication Symposium, Natal, Brazil, 2002.

NEWBURRY, N.R., *Pump-wavelength Dependence of Raman Gain in Single-mode Optical Fibers*, Journal of Lightwave Technology, Vol. 21, Pág. 3364-3373, December 2003.

NIELSEN, T.N., et al, *3.2-Tb/s Transmission Over 3x100 km of Nonzero-Dispersion Fiber Using Dual C- and L-Band Distributed Raman Amplification*, IEEE Photonics Technology Letters, vol. 12, nº 8, August 2000.

RAMASWAMI, R. and SIVARAJAN, K.N., *Optical Network: a Practical Perspective*, 2nd edition, ed. Morgan Kaufmann Publishers, USA, 2002.

ROTTWITT, K. and STENZ, A.J., *Raman Amplification in Lightwave Communication Systems, Optical Fibre Telecommunications IV-A, Components* edited by Ivan Kaminow and Tingye Li, USA, 2002.

SAKAMOTO, T., *S band fiber optic amplifier*, NTT Photonics Laboratories, Japan.

SEO, H.S., CHUNG, W.L., AHN, J.T., *S+C Bands Amplification in Distributed Erbium-Doped Raman Fiber*, IEEE Photonics Technology Letters, vol. 17, nº 6, June 2005.

SRIVASTAVA, A.K. AND SUN, Y., *Advances in erbium-Doped Fiber Amplifiers*, chapter 4, Optical Fiber Telecommunications IV-A, Components edited by Ivan Kaminow and Tingye Li, 2002, USA.

THYAGARAJAN, K. e KAKKAR, C., *Fiber Design for Broad-Band Gain-Flattened Raman Fiber Amplifier*, IEEE Photonics Technology Letters, vol. 15, nº 12, December, 2003.

THYAGARAJAN, K. e KAKKAR, C., *Novel Fiber Design for Flat Gain Raman Amplification Using single Pump and Dispersion Compensation in S Band*, Journal of Lightwave Technology, vol. 22, nº 10, October, 2004.

THYAGARAJAN, K. e KAKKAR,C., *Fiber Design for broad-Band Gain-Flattened Raman Fiber Amplifier*, IEEE Photonics Technology Letters , vol. 15, n° 12, December, 2003.

WANG, S., FAN, C., *Generalised Attenuation Coefficients and a Novel Simulation Model for Raman Fiber Amplifiers*, IEE Proceedings Optoelectronics, vol. 148, n° 3, June 2001.

XU, B. and PEARCE, M. B., *Analysis of Noise Amplification by a CW Pump Signal Due to Fiber Nonlinearity*, IEEE Photonics Technology Lrtters, vol. 16 n° 4, April 2004.

ZHENG, X., et al, *Analysis in Distributed Raman Amplifier*, Optics Communications, June 2002.