UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO

GABRIEL DUARTE DE ANDRADE

OTIMIZAÇÃO DE AMPLIFICADORES RAMAN EM FIBRAS DE TELÚRIO E FÓSFORO

VITÓRIA – ES
DEZEMBRO/2017

GABRIEL DUARTE DE ANDRADE

OTIMIZAÇÃO DE AMPLIFICADORES RAMAN EM FIBRAS DE TELÚRIO E FÓSFORO

Projeto de Graduação do aluno **Gabriel Duarte de Andrade**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Prof. Dr. Carlos Eduardo Schmidt Castellani
Orientador

Prof. Dra. Maria José Pontes
Examinadora

Prof. Dr. Marcelo Eduardo Vieira Segatto
Examinador

Gabriel Duarte de Andrade
Aluno

VITÓRIA – ES
DEZEMBRO/2017

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Seção transversal e longitudinal de uma fibra ótica padrão de raio do núcleo a e raio da casca b mostrando a propagação da luz por reflexão interna total 9
Figura 2 - Esquema do sistema de amplificação Raman otimizado a multi-bombeios 25

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Curva de atenuação da SMF 10
Gráfico 2 - Variação do parâmetro D da dispersão em função do comprimento de onda para uma SMF 13
Gráfico 3 - Perfil de ganho Raman em fibras de sílica 15
Gráfico 4 - Ganho Raman em função do deslocamento em frequência do bombeio para a fibra de Telúrio. 25
Gráfico 5- Atenuação em função do comprimento de onda para a fibra de Telúrio 26
Gráfico 6 - Ganho médio e *ripple* em função do comprimento da fibra de Telúrio, para sistemas otimizados com 2 bombeios. 28
Gráfico 7 - Ganho em função do comprimento de onda para sistema otimizado com 2 bombeios usando 100 m de fibra de Telúrio 28
Gráfico 8 - Ganho médio e *ripple* em função do comprimento da fibra de Sílica, para sistemas otimizados com 2 bombeios. 29
Gráfico 9 - Ganho médio e *ripple* em função do comprimento da fibra de Telúrio, para sistemas otimizados com 3 bombeios. 30
Gráfico 10 - Ganho em função do comprimento de onda para sistema otimizado com 3 bombeios usando 210 m de fibra de Telúrio 30
Gráfico 11 - Ganho médio e ripple em função do comprimento da fibra de Sílica, para sistemas otimizados com 3 bombeios. 31
Gráfico 12 - Ganho Raman em função do deslocamento em frequência do bombeio para a fibra de Fósforo 35
Gráfico 13 - Atenuação em função do comprimento de onda para a fibra de Fósforo 35
Gráfico 14 - Ganho médio e *ripple* em função do comprimento da fibra de Fósforo, para sistemas otimizados com 2 bombeios. 36
Gráfico 15 - Ganho em função do comprimento de onda para sistema otimizado com 2 bombeios usando 6 km de fibra de Fósforo 37
Gráfico 16 - Ganho médio e *ripple* em função do comprimento da fibra de Fósforo, para sistemas otimizados com 3 bombeios 38
Gráfico 17 - Ganho em função do comprimento de onda para sistema otimizado com 3 bombeios usando 4km de fibra de Fósforo 38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados da otimização em fibras de Telúrio para dois bombeios 29
Tabela 2 - Resultados da otimização em fibras de Telúrio para três bombeios 31
Tabela 3 - Resultados para otimização com 2 bombeios 38
Tabela 4 - Resultados para otimização com três bombeios 39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASE *Amplified spontaneous emission* (Ruído de emissão espontânea);

BVP *Boundary value problem* (Problema de valor de contorno);

DBR *Double Rayleigh backscattering* (Espalhamento duplo de Rayleigh);

EDFA *Erbium Doped Fiber Amplifier* (Amplificador a fibra dopada com Érbio);

ENLSE *Extended nonlinear Schörendiger equation* (Equação não-linear de Schrödinger estendida);

GVD *Group velocity dispersion* (Dispersão da velocidade de grupo)

IV Infravermelho

SMF *Standard single-mode fiber* (Fibra monomodo padrão);

SNR *Signal-to-noise ratio* (Relação sinal-ruído)

SRS *Stimulated Raman Scattering* (Espalhamento estimulado de Raman);

TOD *Third-order dispersion* (Dispersão de terceira ordem)

UV Ultravioleta

UFES Universidade Federal do Espírito Santo

WDM *Wavelength Division Multiplexing* (Multiplexação por divisão de comprimento de onda).

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 8
1.1 Fibra ótica 9
1.1.1 Atenuação 10
1.1.2 Dispersão 11
1.2 Amplificadores Raman 13
1.2.1 Espalhamento Estimulado de Raman 14
1.3 Justificativa do trabalho 15
2 MODELAGEM 17
2.1 Modelos utilizados 17
2.2 Modelo Numérico 18
2.3 Modelo Analítico 19
2.4 Comparação entre os modelos 21
2.5 Heurística utilizada 21
3 OTIMIZAÇÃO EM FIBRAS DE TELÚRIO 23
3.1 Revisão bibliográfica 23
3.2 Configuração e técnicas de otimização 24
3.3 Resultados 27
3.3.1 Sistemas com dois bombeios 27
3.3.2 Sistemas com três bombeios 30
3.4 Conclusões 32
4 OTIMIZAÇÃO EM FIBRAS DE FÓSFORO 33
4.1 Revisão bibliográfica 33
4.2 Configuração e técnicas de otimização 34
4.3 Resultados 36
4.3.1 Sistemas com dois bombeios 36
4.3.2 Sistemas com três bombeios 38
4.4 Conclusões 39
5 CONCLUSÃO 41
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 43
ANEXO A 46

RESUMO

Neste trabalho é apresentada a otimização de amplificadores Raman utilizando fibras dopadas com Telúrio e Fósforo. Nele, são discutidas algumas características de fibras óticas e amplificação Raman e são detalhados os métodos utilizados durante o processo de otimização. Também são discutidas as vantagens de utilizar os novos materiais para a construção dos amplificadores. Ao final da otimização são elaborados gráficos que mostram a variação do ganho dos amplificadores em relação ao comprimento da fibra e, para o caso otimizado, o ganho em relação ao comprimento de onda. Ao final, são feitas as considerações e mencionada a intenção de realizar trabalhos futuros com fibras de Fósforo durante o curso de Mestrado em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Espírito Santo. O presente trabalho será enviado para publicação em período internacional com a seguinte referência, caso seja aceito: G. D. de Andrade, H. R. O. Rocha, M. J. Pontes, M. E. V. Segatto, C. E. S. Castellani, **"Study and optimization of Raman amplifiers in Tellurite-based optical fibers for wide-band telecommunication systems"**, (2018).

1 INTRODUÇÃO

O advento dos sistemas de comunicação na sociedade moderna despertou a necessidade de propagação de sinais por distâncias cada vez maiores e com taxas de transmissões muito elevadas. A fase de estudos para o desenvolvimento de sistemas de comunicação empregando fibras óticas começou por volta dos anos 1975 (1); a capacidade de usar tais fibras como canal de comunicação já era conhecida nos anos 60, entretanto, uma dificuldade imposta para sua utilização era a alta perda nas fibras, em torno de 1000 dB/km (1). A evolução na tecnologia permitiu com que a perda nas fibras de sílica chegasse ao patamar de 0,2 dB/km para o comprimento de onda de 1,55 µm em 1979 (1), assegurando um aumento nas distâncias de transmissão em milhares de quilômetros.

Nos primeiros sistemas de comunicação utilizando fibras óticas, a limitação da perda nas fibras era compensada com regeneração elétrica (2), princípio pelo qual o sinal ótico era convertido para elétrico, amplificado e convertido novamente para ótico, antes de ser retransmitido. Além de cara, a regeneração elétrica tinha um impacto negativo na taxa de transmissão dos sistemas (2).

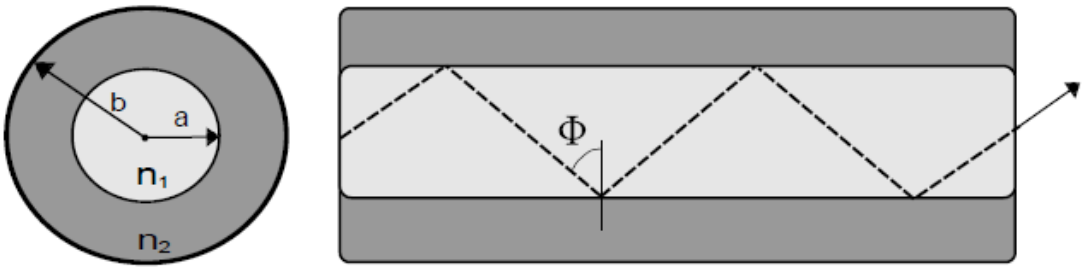
O desenvolvimento de amplificadores óticos foi, então, de suma importância para a disseminação de tais sistemas de comunicação com fibras óticas. Inicialmente, surgiram duas tecnologias: amplificadores a fibra dopada com Érbio – EDFA (*Erbium Doped Fiber Amplifier*) e amplificadores Raman (2). Os primeiros sistemas utilizavam EDFA porque era possível obter ganhos elevados com lasers de bombeio com potência muito menor do que a requerida por amplificadores Raman (1). O posterior desenvolvimento da tecnologia de lasers, no entanto, possibilitou a utilização de amplificadores Raman nos sistemas de comunicação, trazendo consigo vantagens significativas, como a flexibilidade na escolha da banda dos sinais e a construção - usando as configurações adequadas - de um amplificador com perfil de ganho plano ao longo de uma larga faixa espectral (3).

Neste Capítulo, serão apresentados conceitos elementares sobre fibras óticas e amplificadores Raman, e, posteriormente, a motivação de utilizar tais amplificadores em fibras de Telúrio e Fósforo.

1.1 Fibra ótica

Fibra ótica é um elemento capaz de guiar a luz através do princípio da reflexão interna total (1). Sua forma consiste em um núcleo cilíndrico de vidro de índice de refração n_1 rodeado por uma casca igualmente de vidro com índice de refração n_2, conforme ilustrado na Fig. 1. A diferença nos índices de refração da casca e do núcleo é ocasionada pela diferença do material com que cada elemento é dopado (4), sendo que o valor do índice de refração do núcleo é maior do que a da casca, condição para que haja a reflexão interna total.

Figura 1- Seção transversal e longitudinal de uma fibra ótica padrão de raio do núcleo a e raio da casca b mostrando a propagação da luz por reflexão interna total



Fonte: Extraído de (3)

Pela abordagem da ótica geométrica, é possível obter uma justificativa para que ocorra a reflexão interna total. Quando um feixe de luz incide sobre a interface dos dois meios com um ângulo Φ maior do que $\Phi_c = \arcsin(n_2/n_1)$, nenhuma luz é transmitida e tudo é refletido (1).

Outro fator importante para as fibras óticas é a quantidade de modos que podem ser propagados. Temos a equação, onde λ é o comprimento de onda da luz, a é o raio do núcleo e n_1 e n_2 são os índices de refração citados acima:

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \tag{1.1}$$

Para que a fibra seja mono modo, o valor de V não pode ultrapassar 2,405. Pela equação 1.1 é possível perceber que o raio do núcleo é fator preponderante para determinar a quantidade de modos que serão propagados na fibra (1).

1.1.1 Atenuação

O uso das fibras óticas para transmissão de dados tornou-se viável apenas quando os níveis de perda nas fibras decresceram durante a sua fase de aprimoramento, nos anos 70 (1). Pelo fato da atenuação ser um fator limitante às distâncias de transmissão, o surgimento dos amplificadores óticos permitiu que as distâncias fossem sobrepujadas em milhares de quilômetros, com a compensação das perdas acumuladas ao longo da fibra.

Sendo z o eixo de propagação do feixe de luz em uma fibra ótica, a mudança na potência P dos sinais propagados na fibra segue a lei de Beer, onde α é o coeficiente de atenuação:

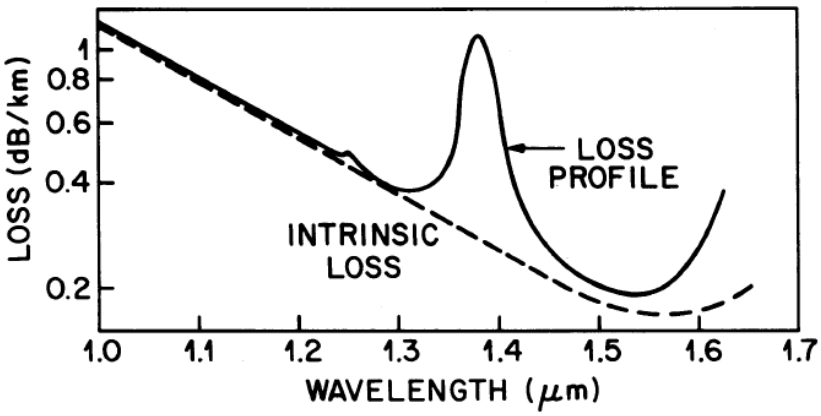
$$\frac{dP}{dz} = -\alpha P \tag{1.2}$$

Sendo a potência inicial P_{in} do sinal transmitido na origem da fibra de comprimento L, a potência de saída P_{out} pode ser escrita integrando-se os dois lados da igualdade da lei de Beer:

$$P_{out} = P_{in} e^{-\alpha L} \tag{1.3}$$

As perdas nas fibras estão diretamente relacionadas ao comprimento de onda em que à luz é transmitida, o Gráfico 1 mostra a curva de atenuação da SMF.

Gráfico 1 - Curva de atenuação da SMF



Fonte: Extraído de (4)

Os princípios físicos mais significativos que descrevem as perdas nas fibras são o espalhamento Rayleigh e a absorção do material.

O espalhamento Rayleigh é um mecanismo de perdas que acontece devido a variações microscópicas na densidade (1). As variações na densidade acarretam em variações no índice de refração ao longo da fibra, numa escala menor do que a comprimento de onda da luz. Como resultado desse processo, a perda na fibra pode ser estimada em dB/km como (1):

$$\alpha_R = \frac{C}{\lambda^4} \tag{1.4}$$

O coeficiente C varia de 0,7 a 0,9 $dB\mu m/km$ dependendo do material do núcleo da fibra (1). Para a fibra de sílica em 1,55 μm, os valores de α_R variam de 0,12 a 0,16 dB/km; isso indica que, nesse comprimento de onda, se for levado em consideração que a perda na fibra é de 0,2 dB/km conforme ilustra a Figura 2, o espalhamento Rayleigh é o fator predominante de perdas.

As perdas por absorção do material na região no comprimento de onda de 0,5 a 2,0 μm estão relacionadas à impureza na fibra (1). A contribuição majoritária a essas perdas vem dos íons OH que possuem harmônicos de ressonância de vibração em 1,39 μm, 1,24 μm e 0,95 μm (1). A perda por absorção intrínseca não é muito significativa na região mencionada de comprimento de onda, tornando-se mais evidente para comprimentos de onda menores do que 0,4 μm, onde a ressonância dos elétrons causa uma grande absorção UV e para comprimentos de onda acima de 2,0 μm, região onde a ressonância de vibração se torna expressiva.

1.1.2 Dispersão

A dispersão em fibras óticas está sempre relacionada à dependência que a velocidade de fase da luz tem em relação a outros parâmetros (3). Em fibras multi-modo, a dispersão ocorre porque a luz propagada em diferentes modos possui diferentes velocidades (1). Este efeito não aparece em fibras monomodo porque toda potência é transmitida em apenas um modo de propagação, entretanto, a dispersão aparece em tais fibras pelo fato de que quando a luz se propaga em comprimentos de ondas diferentes, ela viaja com velocidades diferentes gerando

tempos distintos de propagação para as parcelas que compõe o sinal. O efeito da dispersão nas fibras é crítico à propagação de pulsos ópticos nas fibras porque componentes espectrais diferentes associadas a esses pulsos propagando em velocidades diferentes acarretam no alargamento desses pulsos (4).

Os efeitos da dispersão podem ser equacionados expandindo-se a constante β do modo de propagação em uma série de Taylor, em torno da frequência central ω_0 (4):

$$\beta(\omega) = n(\omega)\frac{\omega}{c} = \beta_0 + \beta_1(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2}\beta_2(\omega - \omega_0)^2 + \ \dots, \tag{1.5}$$

onde:

$$\beta_m = \left(\frac{d^m\beta}{d\omega^m}\right)_{\omega=\omega_0} \qquad (m = 0,1,2,\dots) \tag{1.6}$$

Os coeficientes β_1 e β_2 estão relacionados com o índice de refração e suas derivadas (4), onde v_g é a velocidade de grupo e n_g é o índice de grupo:

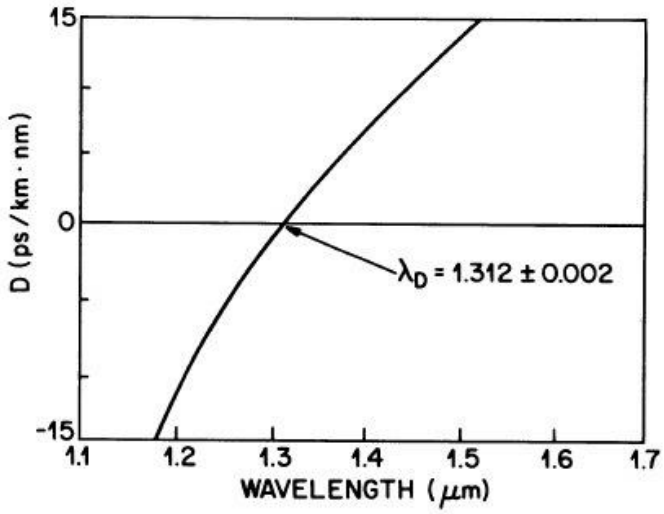
$$\beta_1 = \frac{1}{v_g} = \frac{n_g}{c} = \frac{1}{c}(n + \omega\frac{dn}{d\omega}) \tag{1.7}$$

$$\beta_2 = \frac{1}{c}(2\frac{dn}{d\omega} + \omega^2\frac{d^2n}{d\omega^2}) \tag{1.8}$$

Em aspectos físicos, o coeficiente β_1 é inversamente proporcional à velocidade de grupo que um pulso ótico com diferentes componentes espectrais se move, enquanto β_2 representa a dispersão da velocidade e é responsável pelo alargamento do pulso (4). Esse princípio físico é conhecido como dispersão da velocidade de grupo (GVD) e β_2 é o coeficiente ligado a este fenômeno. O parâmetro D da dispersão pode ser então definido como (3):

$$D = \frac{d\beta_1}{d\lambda} = -\frac{2\pi c}{\lambda^2}\beta_2 \ \approx \frac{\lambda}{c}\frac{d^2n}{d\lambda^2} \tag{1.9}$$

Gráfico 2 - Variação do parâmetro D da dispersão em função do comprimento de onda para uma SMF



Fonte: Extraído de (4)

O valor λ_D é conhecido como o comprimento de onda cujo coeficiente D de dispersão para a fibra ótica é nulo. A dispersão em função do comprimento de onda para uma fibra de sílica monomodo está ilustrada no Gráfico 2. A partir do gráfico pode-se perceber que o comprimento de onda para o qual D é nulo está em torno de 1,31 μm. Para comprimentos de onda próximos de λ_D, ou para pulsos da ordem de femtossegundos, a dispersão de ordem superior se torna significante (3), sendo levado em consideração o coeficiente β_3, chamado de parâmetro de dispersão de terceira ordem (TOD).

Para comprimentos de onda menores do que λ_D é dito que a fibra está em regime de dispersão normal (4), onde as componentes do espectro de maior frequência viajam mais lentamente do que as componentes de menor frequência. Por outro lado, para comprimentos de onda maiores do que λ_D as componentes de maior frequência viajam mais rápido do que as componentes de menor frequência, conhecido como regime de dispersão anômalo.

1.2 Amplificadores Raman

Conforme citado anteriormente, o surgimento dos amplificadores óticos desencadeou o desenvolvimento de amplificadores Raman que são dispositivos óticos capazes de aumentar a potência de uma banda de sinais através de um princípio não-linear chamado de

Espalhamento Estimulado de Raman (SRS). A amplificação Raman ocorre pela transferência de energia de canais de bombeio que recebem uma grande quantidade de energia para os demais canais de sinal (2). A amplitude dessa transferência é definida pela curva de ganho Raman da fibra utilizada para construção do amplificador Raman.

Em comparação com o EDFA, o amplificador Raman apresenta vantagens no que tange a sua aplicabilidade. Primeiramente, o SRS ocorre em qualquer tipo de fibra não sendo necessária a fabricação de fibras especiais; outra vantagem é o fato de que o ganho Raman pode acontecer em qualquer comprimento alocando-se apropriadamente os bombeios, enquanto no EDFA os comprimentos de onda dos bombeios e dos sinais são definidos pelos níveis de ressonância do Érbio (4). Além disso, a SNR em amplificadores Raman é, geralmente, melhor do que nos EDFAs.

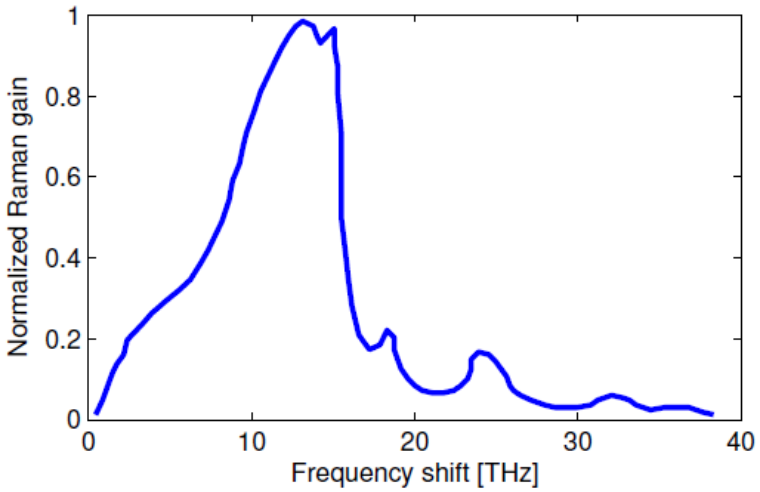
1.2.1 Espalhamento Estimulado de Raman

Quando a luz se propaga em um meio, ela sofre interações com as moléculas desse meio e ao longo de sua trajetória sofre espalhamentos que podem ser elásticos ou inelásticos. Uma vez que não há troca de energia entre a luz e as moléculas do meio, os fótons são apenas desviados preservando-se sua frequência original, configurando-se então o espalhamento elástico, como o Espalhamento de Rayleigh (1).

Por outro lado, chama-se de espalhamento inelástico, o espalhamento em que parte da energia do fóton fica retida nas moléculas do meio após a colisão, essa energia retida causa nas moléculas uma excitação vibracional. Nessa situação, o fóton é espalhado com um frequência menor do que a original, causando uma variação no comprimento de onda da luz. Podemos citar o efeito Raman como um caso de espalhamento inelástico.

O efeito Raman ocorre de forma espontânea e aleatória, dependendo do tipo de material, porque os fótons são espalhados em fases e direções não predeterminadas. Todavia, havendo outro sinal no comprimento de onda do fóton espalhado, o fóton passará a ser emitido em fase com o sinal, amplificando a sua intensidade. Esse fenômeno é chamado de Espalhamento Estimulado de Raman (SRS), fundamento da amplificação ótica usada nos amplificadores Raman. Para a fibra de sílica, o perfil de ganho Raman está ilustrado no Gráfico 3.

Gráfico 3 - Perfil de ganho Raman em fibras de sílica



Fonte: Extraído (3)

É possível identificar que a curva de ganho Raman para a fibra de sílica se estende em uma faixa larga de aproximadamente 40 THz, tendo seu valor predominante próximo a 13 THz. A curva de ganho Raman de um determinado tipo de fibra permite a construção de amplificadores Raman cuja alocação dos bombeios resultará em ganhos no comprimento de onda previamente escolhidos conhecendo-se o deslocamento em frequência que acarretará na amplificação desejada.

1.3 Justificativa do trabalho

A motivação deste trabalho de conclusão de curso é de utilizar outros tipos de fibras dopadas com Telúrio e Fósforo para construir amplificadores que apresentem um ganhado elevado e perfil plano ao longo de uma banda de sinais larga. A utilização desses novos materiais possibilitará a investigação de outros perfis de ganho Raman em fibras que apresentam não-linearidades maiores que as da fibra de Sílica e a possibilidade de alocar os bombeios de maneira diferente para proporcionar os resultados. O ganho de Raman nas fibras de sílica é relativamente baixo, exigindo alguns quilômetros de fibra para a construção de amplificadores. Já as fibras de Telúrio e Fósforo apresentam uma curva de ganho com maiores coeficientes, sendo possível a utilização de fibras de menor comprimento e também o uso de bombeios com potência menor, simplificando o sistema e reduzindo os custos.

Outra razão pela qual escolheu-se realizar esse estudo baseado nas fibras citadas é a possibilidade da otimização dos amplificadores em comprimentos de onda cujas curvas de atenuação e de ganho fogem ao padrão delimitado por fibras de sílica, acima de 2 µm. A busca por novos materiais está relacionada com a possibilidade de se transmitir em um espectro diferente do habitual; as fibras de Telúrio e o Fósforo possuem esse perfil.

Alguns estudos já têm sido realizados utilizando essas fibras, entretanto, a abordagem desse trabalho é realizar a otimização dos amplificadores Raman para dois e três bombeios. Desta maneira, pretende-se obter a curva de ganho e de *ripple* por comprimento de fibra, para as configurações propostas. Para a configuração de dois bombeios, será utilizado o método da busca exaustiva, onde serão adotados limites superiores e inferiores de potência dos bombeios e dos comprimentos de onda, para uma janela de 80nm (1520 a 1600 nm). Já para configuração de três bombeios será utilizada a heurística descrita por (5).

2 MODELAGEM

Neste capítulo será abordada a modelagem utilizada para os amplificadores Raman, bem como a heurística utilizada para a otimização a três bombeios. Para o caso com dois bombeios, utilizou-se um método de busca exaustiva gerando centenas de milhares de casos através do modelo analítico. A inserção de um terceiro bombeio está atrelada ao aumento do tempo de processamento do algoritmo, por isso para otimizar os amplificadores Raman com dois ou três foram utilizados métodos diferentes devido ao esforço computacional exigido para realização de cada processo. O aumento da potência de bombeio também é um fator limitante ao uso do modelo analítico para três bombeios, que foi solucionado com o modelo numérico. Os modelos utilizados foram descritos por (6) e (7), onde a dedução completa dos resultados pode ser encontrada.

2.1 Modelos utilizados

Na modelagem de amplificadores Raman, podemos escrever a propagação da potência dos sinais P_s e dos bombeios P_p por meio das equações diferenciais 2.1 e 2.2 (2). A variável C_r representa a eficiência do ganho Raman para a fibra analisada, α_s é a atenuação no comprimento de onda do sinal (s) e α_p é a atenuação no comprimento de onda do bombeio (7), enquanto w_s e w_p são as frequências angulares para o sinal (s) e para o bombeio (p), respectivamente.

$$\frac{dP_s}{dP_z} = C_r P_p P_s - \alpha_s P_s \tag{2.1}$$

$$\pm\frac{dP_p}{dP_z} = -\frac{w_p}{w_s} C_r P_p P_s - \alpha_p P_p \tag{2.2}$$

O embasamento matemático para resolver as equações 1 e 2 envolve um método estendido das equação não lineares de Schrödinger – ENLSE (*Extended nonlinear Schrödinger Equations*) (4) ou a utilização de alguma aproximação de estado estacionário (8). A abordagem da ENLSE não está no escopo desse projeto de graduação, utilizando-se então a aproximação do estado estacionário.

A aproximação de estado estacionário utilizada possui duas vertentes. Considerando a propagação da potência, tem-se o modelo numérico, que leva em consideração a depleção do bombeio, a dispersão, o ruído de emissão espontânea – ASE (*Amplified Spontaneous Emission*) e o espalhamento duplo de Rayleigh – DBR (*Double Rayleigh Backscattering*), permitindo chegar aos valores de ganho e *ripple* para a configuração simulada. O modelo analítico não leva em cômputo a depleção dos bombeios, ASE e DBR e, embora algumas aproximações devam ser consideradas, permite estimar com certa precisão os valores de ganho e *ripple*. A grande vantagem do modelo analítico é o fato de que o esforço computacional requerido para a simulação é muito menor do que para o modelo numérico. Desta maneira, pode-se realizar a investigação de diversas configurações de amplificadores Raman a múltiplos bombeios para uma vasta faixa de comprimento de ondas de sinais e bombeios com diferentes potências.

2.2 Modelo Numérico

O modelo numérico do estado estacionário surge do desenvolvimento mais completo das equações 2.1 e 2.2, onde mais efeitos físicos são incluídos. As equações não-lineares acopladas na equação 2.3 regem a evolução dos bombeios e dos e são obtidas a partir do desencadeamento da ENLSE (7).

$$\begin{aligned}\frac{dP_\nu^\pm}{dz} = & \mp \alpha_\nu P_\nu^\pm \pm \varepsilon_\nu P_\nu^\mp \pm P_\nu^\pm \sum_{\mu>\nu} \frac{C_{R,\mu\nu}}{\Gamma}.(P_\mu^+ + P_\mu^-) \\ & \pm 2N_{E,\nu} \sum_{\mu>\nu} \frac{C_{R,\mu\nu}}{\Gamma}.(P_\mu^+ + P_\mu^-).T_N \mp P_\nu^\pm \sum_{\mu<\nu} \frac{\nu}{\mu} \frac{C_{R,\mu\nu}}{\Gamma}.(P_\mu^+ + P_\mu^-) \\ & \mp P_\nu^\pm \sum_{\mu<\nu} \frac{\nu}{\mu} \frac{C_{R,\mu\nu}}{\Gamma} 4N_{E,\mu}.\left[1 + 1\Big/\left(\exp\left[\frac{h(\mu-\nu)}{kT}\right] - 1\right)\right].\end{aligned} \tag{2.3}$$

Os sobrescritos + e – indicam as direções de propagação da no eixo z, positivo e negativo, respectivamente; α_ν é o coeficiente de atenuação; P_ν e P_μ são as potências óticas nas frequências lineares ν e μ que podem ser tanto de sinal quanto de bombeio. A eficiência do ganho Raman $C_{R,\mu\nu}$ entre tais potências é descrita por $C_{R,\mu\nu} = g_{\mu\nu}/A_{eff,\mu}$, em que $g_{\mu\nu}$ é o

ganho Raman na frequência μ em virtude do bombeio na frequência ν e $A_{eff,\mu}$ é a área efetiva da fibra na frequência μ (7).

A definição das variáveis não citadas encontra-se no Anexo A. A equação 2.3 pode ser resolvida numericamente usando-se um método der resolução de problema de contorno – BVP (*Boundary value* problem), conforme descrito por (7). A solução dessa equação gera os resultados de ganho e *ripple*, com bastante precisão e confiança, mesmo não sendo usada a abordagem da ENLSE onde se calcula, também, a evolução dos campos elétricos e dos sinais computados. Esta abordagem tem um tempo de execução maior do que o modelo analítico, que será detalhado *a posteriori*. O motivo pelo qual essa abordagem foi utilizada para as simulações envolvendo amplificadores Raman com 3 bombeios é a utilização da heurística proposta por (5) que inclui o modelo numérico de estado-estacionário em seu desenvolvimento. Além disso, o modelo numérico produz resultados de simulação bastante fidedignos e apropriados para a otimização dos amplificadores.

2.3 Modelo Analítico

A equação 3 fornece o fundamento matemático para o modelo analítico. Esse modelo considera as interações bombeio-bombeio e as interações sinal-bombeio (7), levam em conta também os efeitos que dependem do comprimento de onda, como as mudanças nos valores da atenuação dos sinais e as variações da área efetiva. Não são contabilizados no modelo analítico os seguintes efeitos: depleção dos bombeios, os efeitos ASE e DRB e a variação da atenuação dos bombeios em relação ao comprimento de onda. Dessa forma, chega-se a evolução da potência para um amplificador Raman com bombeio contra-propagante, em três frequências distintas μ, η e σ é dada pelas equações 2.4, 2.5 e 2.6 (7):

$$\frac{dP_\sigma}{dz} = \alpha P_\sigma - \frac{C_{R,\sigma\mu} P_\mu}{\Gamma} P_\sigma - \frac{C_{R,\sigma\eta} P_\eta}{\Gamma} P_\sigma, \tag{2.4}$$

$$\frac{dP_\eta}{dz} = \alpha P_\eta - \frac{C_{R,\eta\mu} P_\mu}{\Gamma} P_\eta - \frac{\eta C_{R,\sigma\eta} P_\sigma}{\sigma\,\Gamma} P_\eta, \tag{2.5}$$

$$\frac{dP_\mu}{dz} = \alpha P_\mu - \frac{\mu C_{R,\eta\mu} P_\eta}{\eta\,\Gamma} P_\mu - \frac{\mu C_{R,\sigma\mu} P_\sigma}{\sigma\,\Gamma} P_\mu. \tag{2.6}$$

$P_{\mu,\eta,\sigma}$ é o valor da potência ótica para as frequências subscritas e α é o valor da atenuação dos bombeios que no modelo é invariante em relação ao comprimento de onda. O desenvolvimento do método disposto em (6) e (7) retorna o efeito da atenuação, mediante ao valor da potência atenuada, conforme a equação 2.7, onde $P_{\mu,\eta,\sigma}\,(L)$ é potência de entrada do bombeio para z = L. O comprimento total da fibra é L.

$$P_{\mu,\eta,\sigma}\,(z) = P_{\mu,\eta,\sigma}\,(L)\exp[-\alpha(L-z)] \tag{2.7}$$

A resposta do modelo analítico, para N bombeios contra-propagantes, após serem consideradas interações entre 3 frequências arbitrárias é definida pela equação 8 (7):

$$\begin{aligned} P_\rho(z) = {} & P_\rho(L)\exp[-\alpha(L-z)] \\ & \exp\left[\sum_{\Psi>\rho}\left[A(\rho,\Psi)\frac{1-\exp[\Lambda(z)B(\Psi,\varphi)]}{B(\Psi,\varphi)}\right]\right] \\ & \exp\left[\sum_{\Psi<\rho}\left[\frac{-\rho}{\Psi}A(\rho,\Psi)\frac{1-\exp[\Lambda(z)B(\Psi,\varphi)]}{B(\Psi,\varphi)}\right]\right]. \end{aligned} \tag{2.8}$$

Onde, $A(\rho,\Psi) = C_{R,\rho\Psi}\,P_\Psi(L)$, $B(\Psi,\varphi) = \sum_{\varphi<\Psi}\frac{\Psi C_{R,\Psi\varphi}P_\varphi(L)}{\varphi} - \sum_{\varphi>\Psi}\Psi C_{R,\Psi\varphi}P_\varphi(L)$ e $\Lambda(z) = {-\big(1-\exp\big(-\alpha(L-z)\big)\big)}\big/{\Gamma\alpha}$.

Na equação 8, ρ,Ψ e φ são as frequências óticas dos bombeios e P_ρé a potência do bombeio (7). Finalmente, pode-se demonstrar conforme (9) que para frequência ótica ν e N_p bombeios, o ganho do sinal pode ser descrito pela equação 2.9.

$$G(\nu,L) = \exp[-\alpha_\nu L]\exp\left[\int_0^L\left(\sum_{N_p}\frac{C_{R,\rho\nu}}{\Gamma}P_\rho(z)dz\right)\right] \tag{2.9}$$

Apesar das simplificações, o modelo analítico gera resultados confiáveis para condições em que a potência dos bombeios não é muita alta, porque esse modelo não leva em consideração a depleção dos bombeios pelos sinais. Essa é a razão do modelo analítico não ser tão efetivo

para otimizar amplificadores a três bombeios, porque o valor da potência aumenta muito. Além disso o tempo de execução da abordagem analítica é muito menor do que o encontrado para o modelo numérico.

2.4 Comparação entre os modelos

O intuito desde capítulo no referido trabalho não é de demonstrar todos os passos da resolução matemática dos modelos numérico e analítico, mas sim de apontar para as referências quem elaboraram os métodos e de traçar um paralelo entre a utilização dos modelos citados. Para a otimização dos amplificadores Raman a dois bombeios, será utilizado o modelo analítico pela sua capacidade de fornecer resultados rápidos e concisos, permitindo, por conseguinte, a simulação de centenas de milhares de configurações de amplificadores para posterior análise e escolha. Já o modelo numérico será utilizado na otimização a três bombeios por estar ligado à heurística (explicada no item a seguir) que permitiu a simulação e a escolha das melhores configurações de amplificador.

A utilização de diferentes modelos para otimizar amplificadores com 2 e 3 bombeios deve-se primeiramente ao fato de que, ao inserir um bombeio a mais, o tempo de execução para o modelo analítico apresenta um aumento muito elevado, inviabilizando a realização de centenas de milhares de casos em busca do ponto ótimo. Outra razão já citada é a discrepância da reposta do modelo analítico quando a potência de bombeio aumenta muito. Usa-se, então. o modelo numérico porque o analítico já não apresentava mais resultados razoáveis. A utilização do modelo numérico está atrelada a uma heurística citada no item a seguir.

2.5 Heurística utilizada

A heurística utilizada para a otimização a três bombeios foi proposta e descrita por (5). Ela consiste em um algoritmo genético que realoca os comprimentos de onda dos bombeios e suas potências para gerar a resposta de ganho e *ripple* mais otimizada. A utilização do modelo numérico ao invés do analítico nessa heurística deve-se ao fato de que o modelo numérico é mais robusto quando o valor da potência dos bombeios aumenta muito. Com dois bombeios há a possibilidade de realizar o teste de vários casos para posterior escolha, situação que é impossível para três bombeios porque a resposta já não é congruente devido ao aumento

excessivo da potência. Desta maneira é necessário usar uma heurística que nos permita não realizar centenas de milhares de testes de tempo de simulação elevado para obter as respostas. O número de iterações realizadas para gerar sistemas de amplificação Raman a três bombeios é a virtude que torna essa técnica de imprescindível utilização, porque o custo computacional, que até mesmo o modelo analítico teria para realizar a otimização a três bombeios, impossibilitaria a busca por respostas otimizadas para essa quantidade de sinais de bombeio.

A heurística proposta se trata de um problema de otimização que visa maximizar o ganho e minimizar o *ripple* para um conjunto de variáveis que definem a região de variação dos comprimentos de onda dos bombeios, a potência máxima por bombeio e potência de bombeio total do sistema. A heurística promove uma solução inicial através do deslocamento dos comprimentos de onda dos bombeios e variação das potências para gerar a melhor relação ganho x *ripple.* A solução inicial é novamente otimizada utilizando um algoritmo genético de evolução elitista que preserva as soluções dominantes e as emprega no processo de otimização. O tamanho dos cromossomos é definido como $2N_p$, onde N_p é o número de bombeios e os outros N_p valores são as potências de cada bombeio (5). A solução inicial é definida como parte da população inicial do algoritmo genético, a fim de gerar melhores resultados para a relação ganho x *ripple.*

Após a geração dos resultados de simulação aplicando a técnica, o melhor *trade-off* de ganho e *ripple* foi escolhido para cada comprimento de fibra analisado, gerando então os resultados apresentados nos capítulos 3 e 4.

3 OTIMIZAÇÃO EM FIBRAS DE TELÚRIO

Neste capítulo são apresentadas a análise numérica e a otimização de um sistema de amplificação Raman discreto a multi-bombeios usando fibras óticas dopadas com Telúrio para obtenção do ganho. Utilizando as técnicas de otimização de busca exaustiva, heurística e algoritmo genético, será possível explorar o alto ganho Raman em fibras de Telúrio e o espectro com múltiplos picos para produzir ganhos médios em torno de 10 dB com *ripples* na região de 3 dB em uma banda muito larga de amplificação para sinais com comprimento de onda entre 1520 e 1600 nm, usando apenas três bombeios com menos de 800 mW cada. Foram obtidos sistemas otimizados para diferentes comprimentos de fibra, mostrando que amplificadores Raman discretos construídos à base de fibras dopadas com Telúrio, possuindo apenas 100 metros de comprimento, podem prover ganhos altos e baixos *ripples* em uma banda de 80 nm. Foram avaliados, também, sistemas mais simples com apenas dois bombeios.

3.1 Revisão bibliográfica

O desenvolvimento nas últimas décadas da tecnologia de fibras óticas dopadas com Telúrio (TeO_2) tem permitido a sua utilização em diversas aplicações como dispositivos óticos não-lineares nas regiões de IV-próximo e IV-intermédio (10). Por sua composição permitir a passagem de luz no comprimento de até 5-6 µm (11) e apresentar níveis altos de não linearidades, esse tipo de fibra se torna ideal para geração de luz supercontínua (12), amplificação paramétrica (13) e lasers Raman (14) na região do espectro que não pode ser coberta por fibras de sílica. Além disso, fibras à base de TeO_2 apresentam solubilidade alta a íons de terras-raras, permitindo-lhes serem usadas como dispositivos de emissão de luz nos mais variados comprimentos de onda quando dopadas com elementos como o Yttérbio (Yb^{+3}), o Túlio (Tm^{+3}) e o Hólmio (Ho^{+3}) (15).

Outro aspecto importante das fibras à base de Telúrio é que, além do alto nível de não linearidade, elas apresentam ganhos Raman que são de 30 a 50 vezes os da fibra de sílica (11) (16), que podem ser aumentados adaptando essas fibras em geometria PCF (4) (17) ou combinando-as com fibras à base de Germânio (18) ou Flúor (19). Essa característica já foi explorada em muitos estudos (14) e demonstrações experimentais de *shifters* Raman (20) e lasers (21) em várias regiões do espectro. Entretanto, o número de pesquisas dedicadas a

analisar a utilização de fibras à base de TeO_2 como fonte de ganho Raman em sistemas de telecomunicação é, ainda, modesto (22), (23), (24).

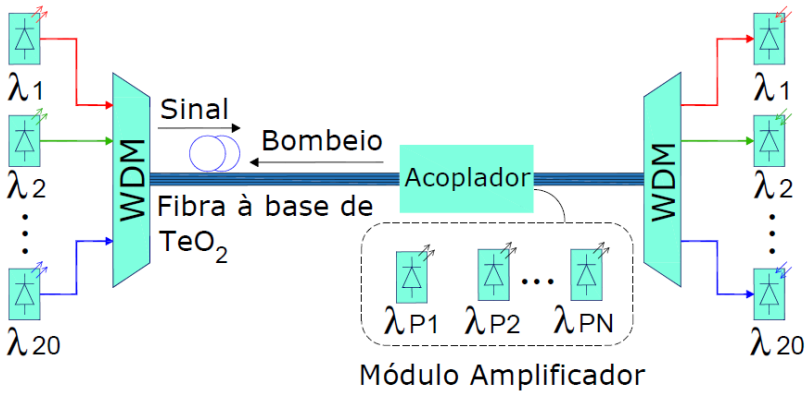
Amplificação em banda larga em fibras de Telúrio já foi realizada para faixas de comprimento de onda até 160 nm (23), (24). Ainda que ganhos médios maiores do que 10 dB tenham sido obtidos nesses sistemas, nenhum cuidado especial foi considerado para reduzir os valores de *ripple* – que foi da ordem de 10 dB em (23) e maior do que 20 dB em (24). Essa questão foi objeto de discussão em (22) onde um *ripple* da ordem de 1 dB foi alcançado para uma largura de banda de 160 nm. Contudo, esse valor baixo de *ripple* foi obtido ao custo da utilização de um sistema de bombeios muito mais complexo, utilizando-se 8 deles (22).

Neste capítulo é apresentada uma otimização de amplificadores Raman em configuração multi-bombeios para uma largura de banda de 80 nm que permite a obtenção de ganhos elevados - mantendo-se o *ripple* baixo (~2 dB) – usando apenas 2 ou 3 bombeios com potência máxima de 800 mW por bombeio. Os amplificadores foram otimizados a partir de técnicas analíticas e numéricas rápidas e usuais, que permitiram também a otimização do comprimento da fibra como meio de ganho. A fim de evidenciar os benefícios do uso de fibras à base de TeO_2 como amplificadores Raman discretos, foi executada uma comparação com sistemas otimizados com fibras de sílica empregando-se as mesmas técnicas. Os resultados alcançados frisam o potencial de aplicação de tais fibras em amplificação Raman com tamanho reduzido de fibra e ganho alto em bandas largas nos sistemas de telecomunicação.

3.2 Configuração e técnicas de otimização

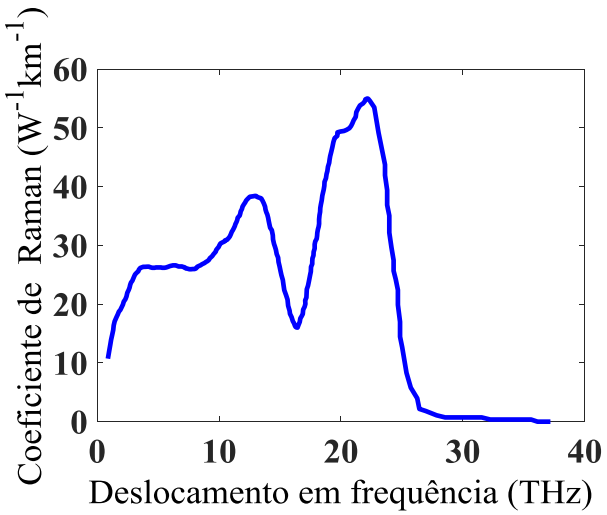
A configuração utilizada nas simulações está ilustrada na Figura 2. Foram utilizados 20 sinais igualmente espaçados no intervalo de comprimento de onda de 1520 a 1600 nm com -5 dBm cada, que são acoplados na fibra de Telúrio com dois ou três bombeios contra-propagantes.

Figura 2 - Esquema do sistema de amplificação Raman otimizado a multi-bombeios



O modelo de fibra usado nas simulações foi baseado na fibra demonstrada por (24) de onde os dados foram extraídos. A curva de ganho Raman está ilustrada no Gráfico 4 na qual é possível identificar o pico de ganho igual a 55 $W^{-1}.km^{-1}$ obtido para um *shift* em frequência de 22,2 THz.

Gráfico 4 - Ganho Raman em função do deslocamento em frequência do bombeio para a fibra de Telúrio.

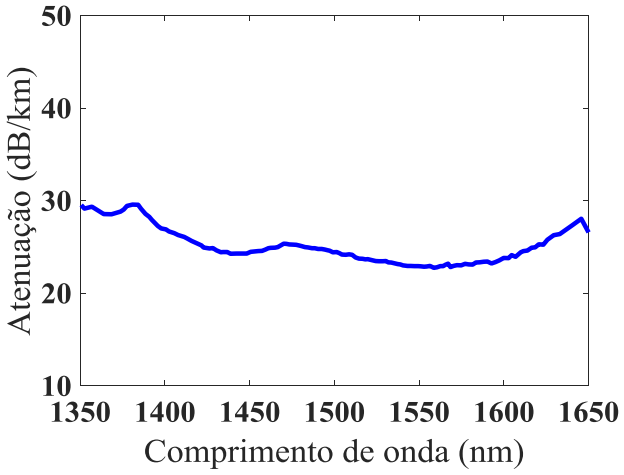


Fonte: (15)

Pode-se também perceber que a curva de ganho da fibra à base de TeO_2 apresenta um segundo pico de ganho para um *shift* de frequência perto de 13 THz de valor 38,4 $W^{-1}.km^{-1}$, que ainda é de magnitude maior do que o ganho obtido com fibras SMF.

A característica de possuir um segundo pico com ganho elevado faz das fibras de Telúrio um meio muito interessante para gerar amplificação Raman em banda larga, porque além de serem utilizados diferentes bombeios combinados para gerar um ganho uniforme, os diversos picos associados aos bombeios são igualmente usados no processo de otimização, podendo resultar na diminuição do número de bombeios requeridos. A atenuação em função do comprimento de onda pode ser vista no Gráfico 5, onde o valor de 27,6 dB/km é correspondente a 1550 nm.

Gráfico 5- Atenuação em função do comprimento de onda para a fibra de Telúrio



Os valores altos de atenuação impedem esta fibra de ser aplicada para geração de ganho e transmissão ao mesmo tempo. Entretanto, os altos picos da curva de ganho Raman permitem o uso de pequenos comprimentos de fibra (algumas centenas de metros) em configurações de amplificadores discretos, minimizando os efeitos da atenuação alta.

No processo de otimização, os comprimentos de onda dos bombeios variaram de 1360 a 1500 nm e suas potências iniciais de 600 a 800 mW cada, de modo assegurar que está sendo proposto um sistema de custo reduzido. O sistema com 2 bombeios foi otimizado utilizando uma técnica de busca exaustiva baseada na encontrada em (25), a qual utiliza um modelo analítico simplificado muito rápido (9) para simular sistemas multi-bombeios permitindo a geração de centenas de milhares de configurações diferentes dentro de alguns minutos. A velocidade desta técnica permitiu a geração de todas as combinações possíveis, variando-se cada comprimento de onda dos bombeios no passo de 2 nm e cada respectiva potência no passo de 20 mW para os intervalos supracitados, totalizando 609961 casos diferentes. A fim

de assegurar a exatidão dos resultados finais, as melhores configurações foram simuladas novamente usando um modelo numérico muito preciso, similar ao feito em (25).

O sistema com três bombeios foi otimizado utilizando uma heurística rápida, primeiramente proposto em (5), que neste processo de otimização é empregada para encontrar uma solução inicial que posteriormente é novamente otimizada usando um algoritmo genético, que também está descrito em (5). Ambas heurísticas simulam os sistemas de amplificação Raman usando um modelo numérico muito preciso e não apenas uma solução analítica aproximada. A diferença entre as técnicas usadas para o sistema com 3 bombeios se dá porque o modelo analítico utilizado para o sistema com 2 bombeios não é robusto o bastante para gerar soluções apuradas quando a potência total de bombeio ultrapassa valores de aproximadamente 1,8 Watts.

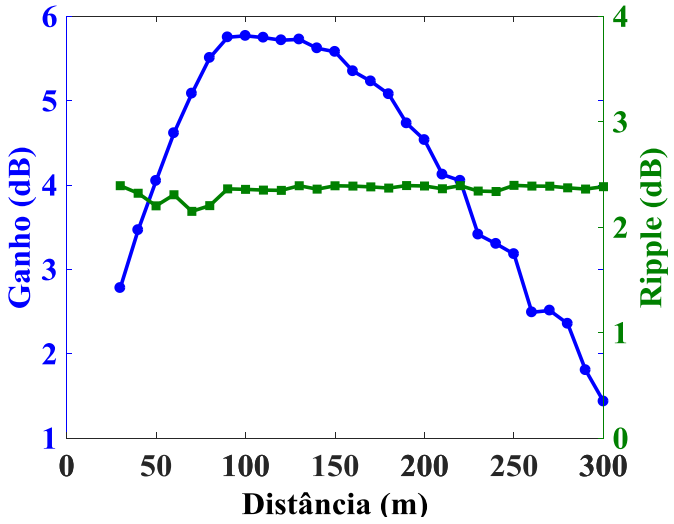
Finalmente, o processo de otimização para as fibras de TeO_2 utilizou comprimentos variando de 30 a 300 metros, para encontrar não só o melhor esquema de bombeios mas também o comprimento de fibra que permite que o processo produza os resultados com maiores ganhos e baixo *ripple*. Otimizações usando SMFs como meio de amplificação Raman foram obtidas sob as mesmas condições de bombeio para comprimento de fibras variando de 1 a 100 km, permitindo a comparação entre os dois sistemas de amplificação.

3.3 Resultados

3.3.1 Sistemas com dois bombeios

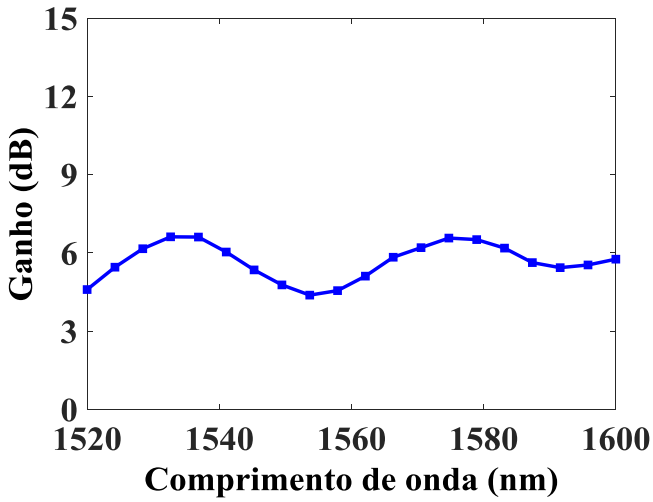
Para os sistemas com dois bombeios os maiores *net gains* alcançados mantendo-se o *ripple* em torno de 2,5 dB podem ser visualizados como função do comprimento da fibra de TeO_2 no Gráfico 6.

Gráfico 6 - Ganho médio e *ripple* em função do comprimento da fibra de Telúrio, para sistemas otimizados com 2 bombeios.



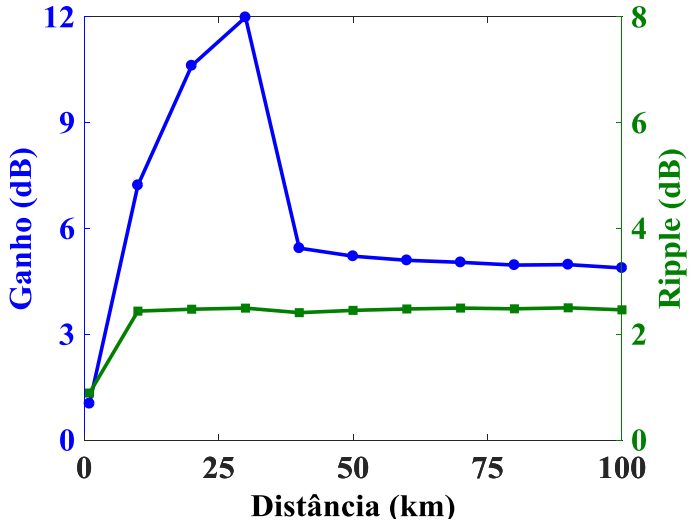
Os maiores ganhos médios estão por volta de 5,8 dB e podem ser obtidos para comprimentos de fibra entre 90 e 140 m. Para comprimentos maiores, a alta atenuação da fibra reduz rapidamente o ganho atingível, impedindo seu uso como amplificador para comprimentos maiores do que 300 metros. O melhor sistema otimizado acontece quando se utiliza 100 metros de fibra, os comprimentos de onda dos bombeios são 1398 nm e 1434 nm e suas potências são, respectivamente, 800 mW e 720 mW. Para esta configuração, ganho líquido, como função do comprimento de onda, pode ser visto no Gráfico 7.

Gráfico 7 - Ganho em função do comprimento de onda para sistema otimizado com 2 bombeios usando 100 m de fibra de Telúrio



Uma otimização semelhante foi realizada para a fibra padrão SMF como meio de ganho e o resultado para o ganho e o *ripple* obtidos estão dispostos no Gráfico 8.

Gráfico 8 - Ganho médio e *ripple* em função do comprimento da fibra de Sílica, para sistemas otimizados com 2 bombeios.



Valores altos para ganhos médios da ordem de 12 dB podem ser atingidos para uma gama de comprimentos de fibra menores do que 40 km. Para distâncias maiores do que essa, o ganho começa a decrescer para valores menores do que 6 dB e se aproxima de 4,5 dB para comprimentos maiores do que 75 km. O maior ganho médio alcançado - mantendo-se o *ripple* menor do que 2,5 dB - foi encontrado para 30 km de SMF, com os comprimentos de onda dos bombeios iguais a 1428 nm e 1476 nm, e suas respectivas potências iguais a 800 mW e 620 mW. Um resumo dos melhores resultados encontrados no processo de otimização - para sistemas com 2 bombeios, com fibras de Sílica e Telúrio - está descrito na Tabela 1. Este resultado enfatiza o fato de que, dependendo da distância de transmissão, esquemas com amplificadores discretos bastante curtos usando fibras de TeO_2 como meio de ganho e apenas dois bombeios com potência moderada podem ser uma solução simples e com custo reduzido para substituir ou ser utilizada em conjunto com amplificação Raman difundida em sistemas de telecomunicação de banda larga.

Tabela 1 – Resultados da otimização em fibras de Telúrio para dois bombeios

Fibra	$\lambda_{1,2}$ (nm)	$P_{1,2}$ (mW)	Ganho (dB)	Ripple (dB)	Comprimento (m)
Sílica SMF	1428,0 1476,0	800,0 620,0	11,99	2,49	30.000
TeO_2	1398,0 1434,0	800,0 720,0	5,79	2,36	100

3.3.2 Sistemas com três bombeios

Os resultados para ganho médio e *ripple* em função do comprimento da fibra de TeO_2 estão ilustrados no Gráfico 9. Ganhos médios da magnitude de 10 dB são atingidos para um número diverso de comprimentos de fibra que apresentam *ripples* em torno de 3 dB. O sistema com o maior ganho que apresenta *ripple* menor do que 3 dB foi encontrado para 210 m de fibra. Os comprimentos de onda dos bombeios são 1384,7, 1452,6 e 1483,6 nm, com potência de 786,4, 782,9 e 777,4 mW, respectivamente. O ganho em função do comprimento de onda para essa configuração pode ser visto no Gráfico 10 que mostra um ganho médio de 9,98 dB e *ripple* de 2,55 dB.

Gráfico 9 - Ganho médio e *ripple* em função do comprimento da fibra de Telúrio, para sistemas otimizados com 3 bombeios.

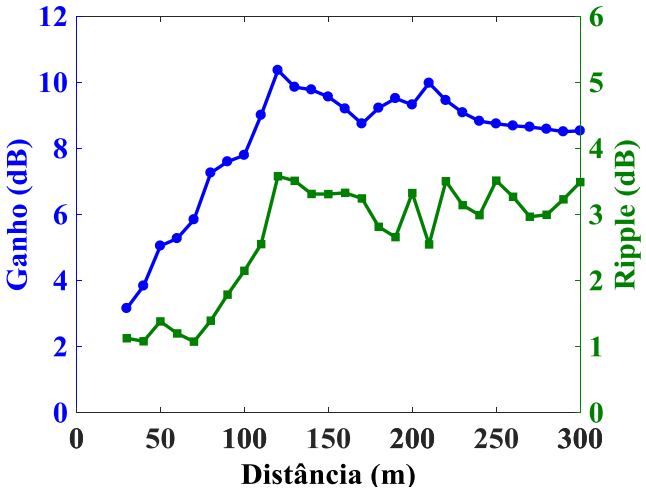
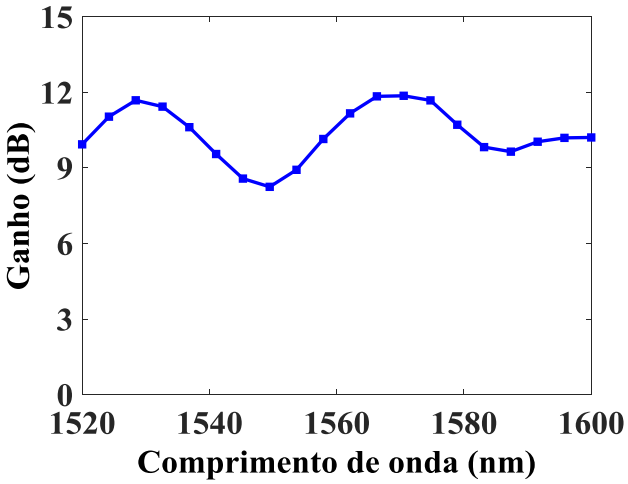
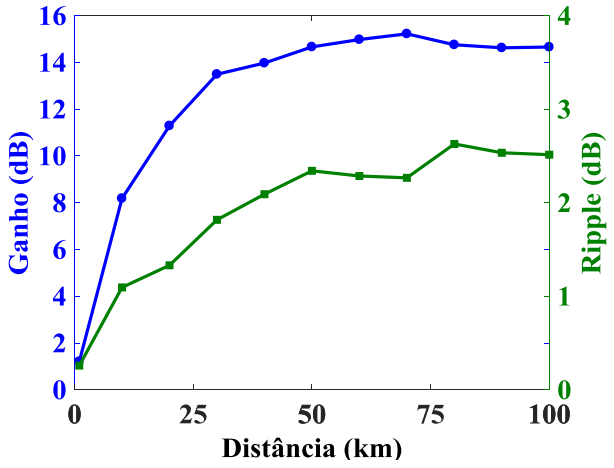


Gráfico 10 - Ganho em função do comprimento de onda para sistema otimizado com 3 bombeios usando 210 m de fibra de Telúrio



Novamente para estabelecer uma comparação, uma otimização para sistemas de amplificação Raman com três bombeios foi realizada para fibras SMF e os resultados para o ganho médio e *ripple* em função do comprimento da fibra podem ser vistos no Gráfico 11. Ganhos médios próximos de 15 dB foram alcançados para todos os comprimentos de fibra maiores do que 50 km, mantendo-se ainda *ripples* menores do que 3 dB. Entretanto, para 20 km de fibra o ganho médio cai para, aproximadamente, 11 dB, sendo ainda menor para distâncias mais curtas.

Gráfico 11 - Ganho médio e ripple em função do comprimento da fibra de Sílica, para sistemas otimizados com 3 bombeios.



Esta queda no ganho para pequenos comprimentos de SMF é esperada uma vez que o baixo ganho Raman em fibras de Sílica não permite que amplificadores com ganhos médios altos sejam construídos quando a fibra de transmissão não é extensa o suficiente. Esse resultado reforça que um esquema de amplificação Raman com três bombeios e fibra de TeO_2 simples e curto pode ser utilizado como módulo de amplificação discreta para prover ganhos altos para sistemas de telecomunicação os quais não podem ser obtidos a partir de amplificação distribuída apenas sob certas condições. Os melhores casos de otimização para os sistemas com 3 bombeios estão disponíveis na Tabela 2.

Tabela 2 - Resultados da otimização em fibras de Telúrio para três bombeios

Fibra	$\lambda_{1,2,3}$ (nm)	$P_{1,2,3}$ (mW)	Ganho (dB)	Ripple (dB)	Comprimento (m)
Sílica SMF	1421,9 1435,1 1476,4	887,9 801,6 699,4	15,22	2,27	70.000
TeO_2	1384,7 1452,6 1483,6	786,4 782,9 777,4	9,98	2,55	210

3.4 Conclusões

Neste capítulo foi demonstrado que o alto ganho Raman presente nas fibras de Telúrio e sua característica de possuir dois picos podem ser explorados para construir amplificadores discretos com trechos curtos de fibra com aplicação em sistemas de telecomunicações de banda larga. Foram executadas otimizações não apenas em termos do comprimento de onda e da potência dos bombeios, mas também analisando diferentes comprimentos de fibra usada como meio de ganho. Sistemas com 2 e 3 bombeios com potência moderada permitiram ganhos médios de 5,8 e 10 dB, respectivamente, alcançáveis mantendo-se o *ripple* em torno de 2,5 dB para uma largura de banda de 80 nm. Foram realizadas comparações com sistemas Raman difundidos usando apenas SMF, enfatizando que, para certas distâncias de transmissão, o ganho atingido por um amplificador de fibra de TeO_2 com apenas algumas centenas de metros pode ser maior.

4 OTIMIZAÇÃO EM FIBRAS DE FÓSFORO

Neste capítulo são apresentadas a análise numérica e a otimização de um sistema de amplificação Raman discreto a multi-bombeios usando fibras óticas dopadas com Fósforo para obtenção do ganho. Utilizando as mesmas técnicas de otimização do capítulo anterior será possível utilizar o espectro com múltiplos picos da fibra de Fósforo para produzir ganhos médios em torno de 8 dB com *ripples* na região de 3 dB na mesma banda de amplificação mencionada anteriormente e com os mesmos requisitos para a potência utilizada nos três bombeios. Foram obtidos sistemas otimizados comprimentos de fibra de 1 a 10 quilômetros, mostrando que amplificadores Raman discretos construídos à base de fibras dopadas com Fósforo, possuindo alguns quilômetros de comprimento, podem prover ganhos altos e baixos *ripples* em uma banda de 80 nm. Os sistemas com dois bombeios foram igualmente analisados.

4.1 Revisão bibliográfica

A utilização de fibras dopadas com P_2O_5 tem encontrado aplicações devido a sua característica de possuir picos espaçados em sua curva de ganho Raman (26). Essa característica permitiu a realização de estudos na área de construção de *lasers* Raman de bombeios contínuos (27) e também de *lasers* com geração de pulsos na ordem de picossegundos (27). A presença de vários picos na curva de ganho torna a otimização de amplificadores Raman mais flexível, permitindo a construção de amplificadores com banda muita larga e *ripples* muito baixos, conforme investigado e apresentado na seção de resultados.

Outro aspecto importante das fibras à base de Fósforo é que, ao contrário das fibras de Telúrio, elas apresentam uma atenuação razoável sendo possível realizar através dessas fibras a amplificação dos sinais e também transmiti-los por longas distâncias. Uma vantagem da fibra de Fósforo em relação à sílica é possuir atenuação menor atenuação na região de 2 μm, podendo servir para substituir a sílica na transmissão em distâncias da ordem de ~20 km, com sinais em bandas que vão de 1,5 a 1,9 μm - vantagem que não foi explorada por falta de dados

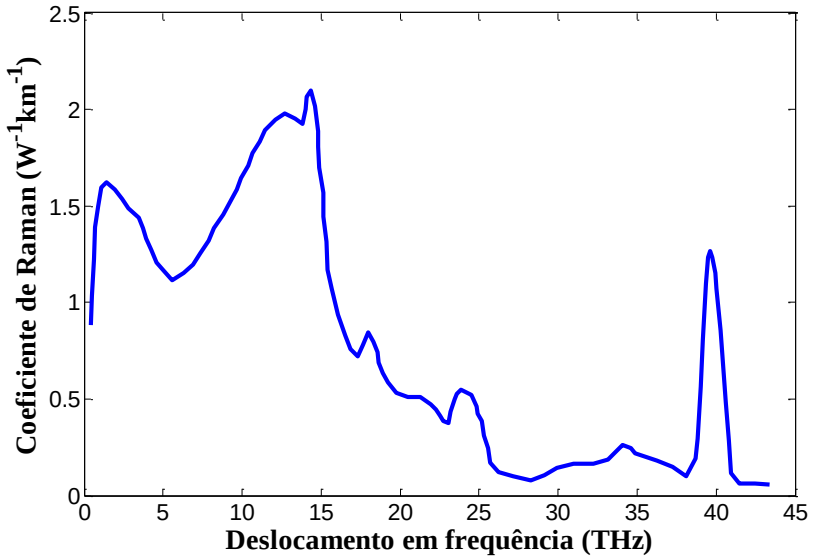
experimentais mas será analisada em trabalhos futuros. Desta forma, usando a característica de múltiplos picos e baixo valor de perdas, a investigação de amplificadores Raman nesse tipo de fibra é bastante interessante, a fim de encontrar sistemas menos complexos que explorem as vantagens encontradas no material.

Neste capítulo é apresentada uma otimização de amplificadores Raman de mesma configuração da apresentada no capítulo anterior, para a mesma largura de banda de 80 nm, que permite a obtenção de ganhos elevados - mantendo-se o *ripple* baixo (~2 dB) – usando, novamente, apenas 2 ou 3 bombeios com potência baixa. A fim de enfatizar as vantagens do uso de fibras à base de P_2O_5 como amplificadores Raman discretos, foi feita a comparação com os resultados dos com fibras de sílica empregando-se as mesmas técnicas. Os resultados reforçam a capacidade que as fibras de Fósforo possuem na construção de amplificadores Raman de perfil de ganho plano, com valor de ganho médio alto e *ripple* baixo.

4.2 Configuração e técnicas de otimização

A configuração utilizada nas simulações é idêntica à ilustrada na Figura 2 e descrita no capítulo anterior. A fibra utilizada nas simulações teve seus dados extraídos de (28). A curva de ganho Raman pode ser analisada no Gráfico 12, sendo possível verificar a existência de um pico de ganho igual a 2,1 $W^{-1}.km^{-1}$ para um *shift* em frequência de 14,3 THz. O modelo de fibra usado possui, também, um espectro com outros picos sendo útil na otimização dos bombeios, pois permite dinamizar a alocação dos bombeios gerando ganhos planos e reduzindo a potência de bombeio. Os outros picos mais notáveis estão em 1,4, 12,7 e 39,6 THz, com valores de 1,62, 1,98 e 1,27 $W^{-1}.km^{-1}$, respectivamente.

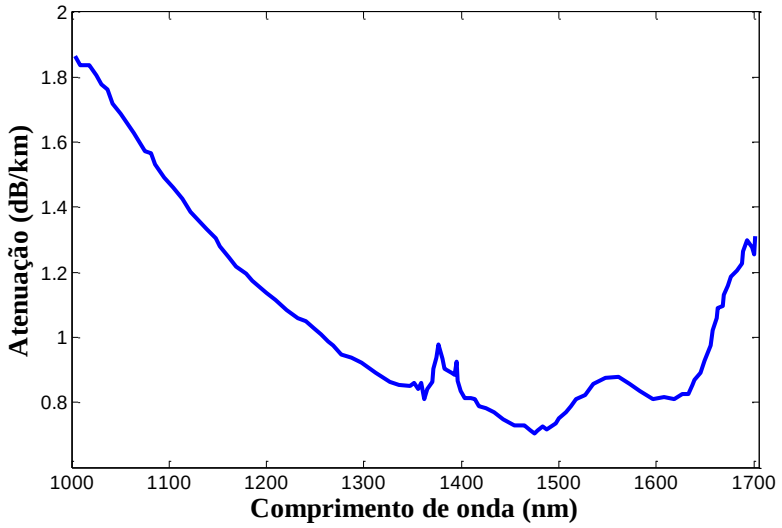
Gráfico 12 - Ganho Raman em função do deslocamento em frequência do bombeio para a fibra de Fósforo.



Fonte: Extraído de (28)

A atenuação em função do comprimento de onda para a fibra de Fósforo pode está disposta no Gráfico 13. Pode-se verificar que a característica da fibra dopada com Fósforo é muito diferente da fibra de Telúrio, porque ela possui um valor de atenuação e uma curva de ganho Raman muito menor do que as das fibras de Telúrio. A atenuação da fibra de Fósforo é menor do que 2 dB/km para todo o comprimento entre 1000 e 1700 nm.

Gráfico 13 - Atenuação em função do comprimento de onda para a fibra de Fósforo



Fonte: Extraído de (28)

Embora a configuração do sistema utilizado para as otimizações seja o mesmo, a diferença de característica das fibras leva a uma escolha de parâmetros diferenciados. O processo de otimização, para a fibra de Fósforo leva em consideração comprimentos de onda dos bombeios variando de 1360 a 1510 nm, para aproveitar a existência do pico em torno dos 40 THz, enquanto as potências iniciais continuam sendo de 600 a 800 mW cada, para garantir o custo reduzido dos sistemas. A diferença entre a escolha do modelo analítico ou numérico para dois ou três bombeios é igualmente justificada e a metodologia da otimização é a mesma apresentada anteriormente

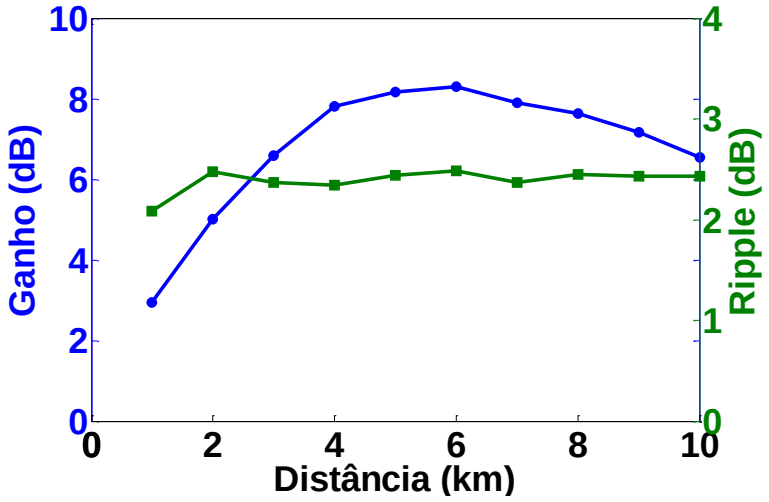
O processo de otimização para as fibras de Fósforo, utilizou comprimentos variando de 1 a 10 quilômetros porque a curva de ganho Raman da fibra requer a construção de amplificadores mais extensos, uma vez que a amplificação não é da magnitude da que ocorre nas fibras de Telúrio, mas sendo menor do que o comprimento exigido para a construção de amplificadores com SMF.

4.3 Resultados

4.3.1 Sistemas com dois bombeios

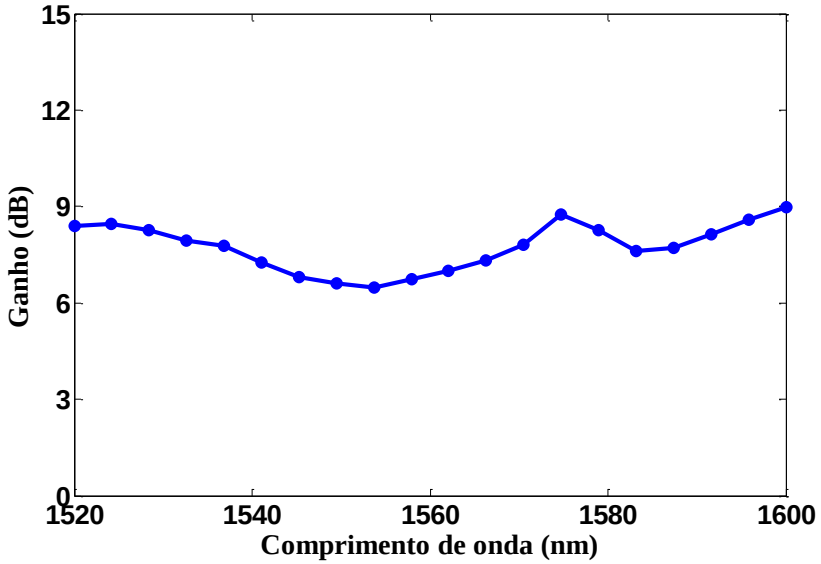
Para os sistemas com dois bombeios os maiores *net gains* alcançados mantendo-se o *ripple* em torno de 2,5 dB podem ser visualizados como função do comprimento da fibra de Fósforo no Gráfico 14.

Gráfico 14 - Ganho médio e *ripple* em função do comprimento da fibra de Fósforo, para sistemas otimizados com 2 bombeios.



Para os valores de comprimento de fibra entre 4 e 8 quilômetros podem ser encontrados os maiores ganhos médios em torno volta de 8,2 dB. Para comprimentos de fibra menores do que 4 quilômetros não ocorre uma amplificação substancial, por mais que o *ripple* seja da mesma ordem de grandeza. Para os comprimentos maiores do que 8 quilômetros simulados, o ganho não aumenta mais porque a atenuação já produz efeitos consideráveis. O melhor sistema otimizado acontece quando se utiliza 6 quilômetros de fibra, os comprimentos de onda dos bombeios são 1464 nm e 1510 nm e suas potências são, respectivamente, 800 mW e 780 mW. Para esta configuração, o *net gain*, como função do comprimento de onda, pode ser visto no Gráfico 15.

Gráfico 15 - Ganho em função do comprimento de onda para sistema otimizado com 2 bombeios usando 6 km de fibra de Fósforo



Em comparação com as fibras de Sílica, conforme mostrado no Gráfico 8, a construção de amplificadores Raman com fibra dopada com Fósforo resulta numa diminuição do comprimento da fibra, uma vez que o ganho maior que 8 dB para a fibra de sílica só acontece para comprimentos maiores de 20 quilômetros. Por outro lado, para a fibra de Fósforo um amplificador de 5 quilômetros já produz um ganho considerável. Este resultado reforça a utilização de novos materiais para construção de amplificadores Raman que podem ainda ser analisados em outros comprimentos de onda além do espectro coberto pelas fibras de sílica. A Tabela 3 resume todos os melhores resultados encontrados para a otimização com dois bombeios.

Tabela 3 - Resultados para otimização com 2 bombeios

Fibra	$\lambda_{1,2}$ (nm)	$P_{1,2}$ (mW)	Ganho (dB)	Ripple (dB)	Comprimento (m)
Sílica SMF	1428,0 1476,0	800,0 620,0	11,99	2,49	30.000
TeO_2	1398,0 1434,0	800,0 720,0	5,79	2,36	100
Fósforo	1464,0 1510,0	800,0 780,0	8,29	2,48	6.000

4.3.2 Sistemas com três bombeios

Os resultados para ganho médio e *ripple* em função do comprimento da fibra de Fósforo estão ilustrados no Gráfico 16. Ganhos médios maiores do que 7,8 dB são atingidos para todos comprimentos de fibra, exceto para 1 e 2 quilômetros, mantendo-se os *ripples* em torno de 2,5 dB. O sistema otimizado de maior ganho foi encontrado para 4 quilômetros de fibra. Os comprimentos de onda dos bombeios são 1441,36, 1452,41 e 1498,67 nm, com potência de 743,6, 774,7 e 757,4 mW, respectivamente. O ganho em função do comprimento de onda para essa configuração pode ser visto no Gráfico 17 que mostra um ganho médio de 10,89 dB e *ripple* de 2,01 dB. Podemos perceber que essa configuração de amplificador permitiu um perfil de ganho bastante plano para a banda de 80 nm.

Gráfico 16 - Ganho médio e *ripple* em função do comprimento da fibra de Fósforo, para sistemas otimizados com 3 bombeios

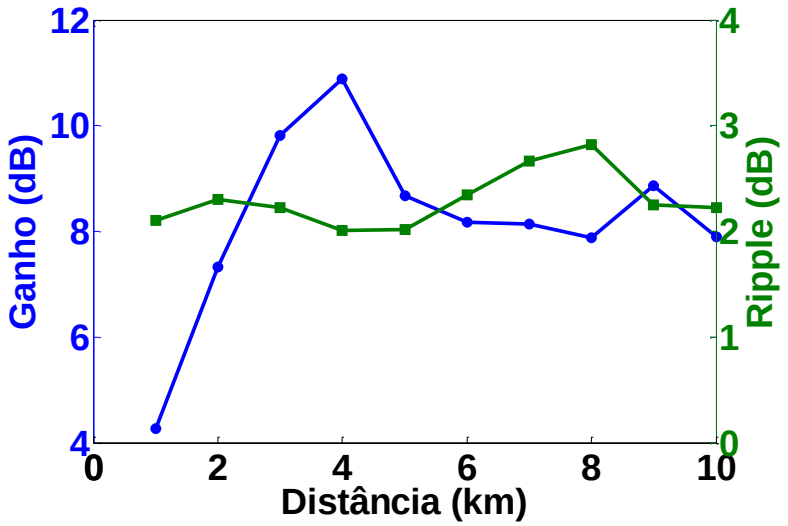
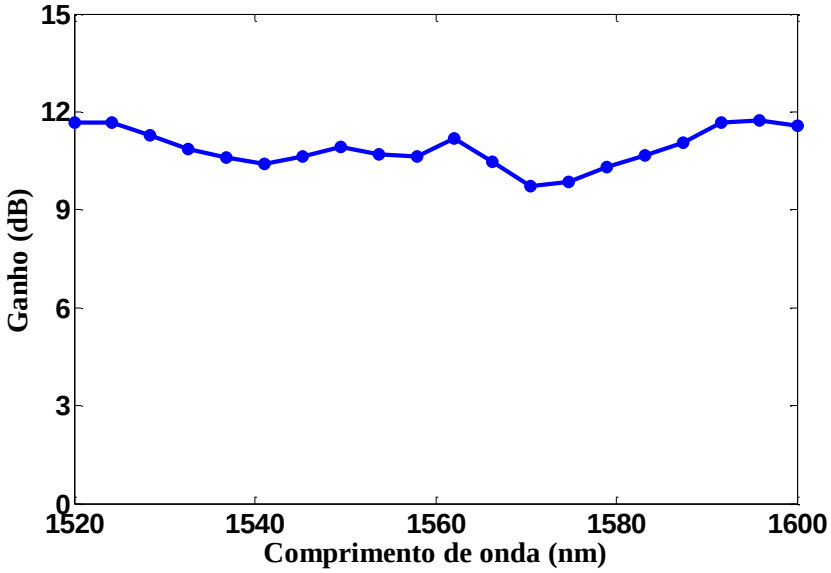


Gráfico 17 - Ganho em função do comprimento de onda para sistema otimizado com 3 bombeios usando 4km de fibra de Fósforo



Traçando novamente uma comparação com as SMFs, o resultado para a otimização dos amplificadores com três bombeios em fibras de Fósforo proporciona ganhos maiores do que 10 dB e com comprimentos de fibra muito menores do que o comprimento requerido para as SMFs. Além disso, o *ripple* não ultrapassa o valor de 3 dB para amplificadores com até 10 quilômetros de extensão. Esses resultados são satisfatórios quando deseja-se construir amplificadores de ganho considerável e de tamanho menor dos que os habituais, podendo também realizar conjuntamente a transmissão de dados. Todos os valores dos sistemas otimizados a três bombeios estão dispostos na Tabela 4.

Tabela 4 - Resultados para otimização com três bombeios

Fibra	$\lambda_{1,2,3}$ (nm)	$P_{1,2,3}$ (mW)	Ganho (dB)	Ripple (dB)	Comprimento (m)
Sílica SMF	1421,9 1435,1 1476,4	887,9 801,6 699,4	15,22	2,27	70.000
TeO_2	1384,7 1452,6 1483,6	786,4 782,9 777,4	9,98	2,55	210
Fósforo	1441,36 1452,41 1498,67	743,6, 774,7 757,4	10,89	2,01	4.000

4.4 Conclusões

Neste capítulo foi demonstrado que o perfil de ganho Raman presente nas fibras de Fósforo e sua característica de possuir múltiplos picos e baixa atenuação podem ser resultar na

construção de amplificadores com tamanho reduzido se comparado aos comprimentos exigidos para a fibra de sílica, com um ganho alto e *ripple* baixo, em sistemas de telecomunicações de banda larga, bem com a construção de amplificadores distribuídos de tamanhos razoáveis para transmissão de sinais junto da amplificação. Foram executadas as técnicas de otimização apresentadas no capítulo. Sistemas com 2 e 3 bombeios com potência moderada permitiram ganhos médios de 8,3 e 10,9 dB, respectivamente, alcançáveis mantendo-se o *ripple* em torno de 2,5 dB para uma largura de banda de 80 nm. Foram repetidas as comparações com sistemas Raman difundidos usando apenas SMF, reforçando a importância de fibras de materiais diferentes para a construção de amplificadores menores com boa capacidade de amplificação e de manter o ganho plano, aliada à transmissão.

5 CONCLUSÃO

Neste projeto de graduação, primeiramente foram apresentadas algumas características das fibras óticas e de seus fenômenos óticos e posteriormente apresentados os princípios físicos dos Amplificadores Raman. Em sequência, foi apresentado todo o ferramental matemático utilizado nos modelos analítico e numérico, a heurística empregada e as técnicas de modelagem que permitiram a realização da otimização dos sistemas de amplificação Raman para dois e três bombeios.

A partir dos resultados encontrados em simulação, foi possível projetar amplificadores Raman discretos em fibras de Telúrio com dois e três bombeios contra-propagantes utilizando apenas algumas dezenas de metros que produziram ganhos médios de 5,8 e 10 dB, com o *ripple* em torno de 2,5 dB. Esses resultados comprovam a eficácia da utilização da fibra dopada com Telúrio para construção de estágios de amplificação em sistemas de telecomunicação porque é possível amplificar os sinais em uma banda larga de 80 nm usando poucos metros de fibras na elaboração de um amplificador. A característica da fibra de TeO_2 de possuir dois picos de ganho Raman permite também a utilização de uma potência de bombeio menor para atingir valores desejáveis de ganho, além de poder utilizar faixas do espectro em que a fibra de sílica já não pode ser utilizada.

Posteriormente, foi repetida a mesma metodologia de otimização para as fibras dopadas de Fósforo e os sistemas com 2 e 3 bombeios otimizados apresentaram ganho médio de 8,3 e 10,9 dB, respectivamente, alcançáveis mantendo-se o *ripple* igualmente em torno de 2,5 dB para a mesma largura. Os resultados encontrados, ratificaram a relevância das fibras de novos materiais com maiores não-linearidades para construir sistemas de amplificação com a banda plana e com bombeios que não requeiram uma potência muito exorbitante. Também foi possível demonstrar que os comprimentos de fibra requeridos, tanto para o Telúrio quanto para o Fósforo, na construção de amplificadores Raman são menores do que é necessário empregando SMFs, outra vantagem da exploração desses materiais. No caso do Fósforo, o material é um possível substituto à transmissão de sinais junto com a amplificação para distâncias na ordem de ~20 km. Pretende-se, em trabalhos futuros, analisar a construção de amplificadores Raman com fibras de Fósforo utilizando uma banda de sinais em que não se pode utilizar a fibra de sílica (1,5 a 1,9 μm), devido à atenuação.

Conclui-se, então, que através da otimização dos sistemas de amplificação Raman, as técnicas utilizadas apresentaram resultados concordantes com o uso de materiais diversos na construção de tais amplificadores, resultando em sistemas menos complexos, menores e que apresentam um perfil de ganho plano para uma banda larga de sinais.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1 AGRAWAL, G.P. **Fiber-Optic Communication Systems**. 2a. Ed., New York, John Wiley & Sons, Inc., 1997.

2 HEADLEY C.; AGRAWAL G. P. (editors). **Raman Amplification in Fiber Optical Communication Systems**. N. Y., Elsevier Academic Press, 2005.

3 Castellani, C.E.S. **All-fibre wavelength versatile short pulsed laser sources**. 2013. Departament of Physics, Imperial College, London.

4 AGRAWAL, G.P., **Nonlinear Fiber Optics**. Academic Press, 2001.

5 H. R. O. Rocha, C. E. S. Castellani, J. A. L. Silva, M. J. Pontes, M. E. V. Segatto, **"Fast optimization of multipump raman amplifiers based on a simplified wavelength and power budget heuristic"**, Opt. Eng. 54, 015105 (2015).

6 Cani, Shirley Peroni Neves. **Uma contribuição ao modelamento analítico em amplificadores Raman**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica). Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2007.

7 Castellani, Carlos Eduardo Schmidt. **Amplificadores Raman em fibras microestruturadas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2009.

8 S. P. Cani, M. Freitas, R. T. Almeida, and L. C. Calmon, **"Raman amplifier performance of dispersion compensating fibers,"** em Proceedings of SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoeletronics Conference (IMOC 2003), (Iguazu Falls, Brazil, 2003), 553-558.

9 S. P. Cani, L. C. Calmon, M. J. Pontes, M. R. N. Ribeiro, M. E. V. Segatto, and A.V. T. Cartaxo, **"An analytical approximated solution for the gain of broadband Raman amplifiers with multiple counter-pumps,"** J. Lightwave Technol. 27, 944-951 (2009).

10 Aoxiang Lin, Aidong Zhang, Elizabeth J. Bushong, and Jean Toulouse, **"Solid-core tellurite glass fiber for infrared and nonlinear applications,"** Opt. Express 17, 16716-16721 (2009).

11 N. Manikandan, Aleksandr Ryasnyanskiy, Jean Toulouse, **"Thermal and optical properties of TeO2ZnOBaO glasses,"** Journal of Non-Crystalline Solids 358, 947951 (2012).

12 Clement Strutynski, Paul Froidevaux, Frdric Dsvdavy, Jean-Charles Jules, Grgory Gadret, Abdelkrim Bendahmane, Karol Tarnowski, Bertrand Kibler and Frdric Smektala, **"Tailoring supercontinuum generation beyond 2_m in step-index tellurite fibers,"** Opt. Lett. 42, 247-250 (2017).

13 Tonglei Cheng, Koji Asano, Zhongchao Duan, Tong Hoang Tuan, Weiqing Gao, Dinghuan Deng, Takenobu Suzuki, Yasutake Ohishi, **"Design and optimization of tellurite hybrid microstructured optical fiber with high nonlinearity and low flattened chromatic dispersion for optical parametric amplification,"** Optics Communications 318, 105-111 (2012).

14 Gongwen Zhu, Lixiang Geng, Xiushan Zhu, Li Li, Qian Chen, R. A. Norwood, T. Manzur, and N. Peyghambarian, **"Towards ten-watt-level 3-5 m Raman lasers using tellurite fiber,"** Opt. Express 23, 7559-7573 (2015).

15 D. Manzani, Y. Ledemi, I. Skripachev, Y. Messaddeq, S. J. L. Ribeiro, R. E. P. de Oliveira, and C. J. S. de Matos, **"Yb3+, Tm3+ and Ho3+ triplydoped tellurite core-cladding optical fiber for white light generation,"** Opt. Mater. Express 1, 1515-1526 (2011).

16 Robert Stegeman, Ladislav Jankovic, Hongki Kim, Clara Rivero, George Stegeman, Kathleen Richardson, Peter Delfyett, Yu Guo, Alfons Schulte, and Thierry Cardinal, **"Tellurite glasses with peak absolute Raman gain coefficients up to 30 times that of fused silica,"** Opt. Lett. 28, 1126-1128 (2003).

17 Tonglei Cheng, , Tong Hoang Tuan, Xiaojie Xue, Dinghuan Deng, Takenobu Suzuki, Yasutake Ohishi,**"Optical solitons and supercontinuum generation in a tellurite microstructured optical fiber,"** Optics Communications 369, 159-163 (2016).

18 Mathieu Boivin, Mohammed El-Amraoui, Yannick Ledemi, Steeve Morency, Ral Valle, and Youns Messaddeq, **"Germanate-tellurite composite fibers with a high-contrast step-index design for nonlinear applications,"** Opt. Mater. Express 4, 1740-1746 (2014).

19 Jie Lia, Xusheng Xiaob, Shaoxuan Gua, Yantao Xub, Zhiguang Zhoub, Haitao Guo, **"Preparation and optical properties of TeO2BaOZnOZnF2 fluoro-tellurite glass for mid-infrared fiber Raman laser applications,"** Optical Materials 66, 567-572 (2017).

20 Tonglei Cheng, Weiqing Gao, Xiaojie Xue, Takenobu Suzuki, and Yasutake Ohishi, **"Experimental investigation of multiple Raman peak properties in a hundred-meter tellurite fiber,**" Opt. Mater. Express 6, 3438-3445 (2016).

21 Guanshi Qin, Meisong Liao, Takenobu Suzuki, Atsushi Mori, and Yasutake Ohishi, **"Widely tunable ring-cavity tellurite fiber Raman laser,"** Opt. Lett. 33, 2014-2016 (2008).

22 Guanshi Qin, Rajan Jose, and Yasutake Ohishi, **"Design of Ultimate Gain-Flattened O-, E-, and S+ C+ L Ultrabroadband Fiber Amplifiers Using a New Fiber Raman Gain Medium,"** J. Lightwave Technol. 25, 2727-2738 (2007).

23 Hiroji Masuda, Atsushi Mori, Koji Shikano, and Makoto Shimizu, **"Design and Spectral Characteristics of Gain-Flattened Tellurite-Based Fiber Raman Amplifiers,"** J. Lightwave Technol. 24, 504-515 (2006).

24 A. Mori, H. Masuda, K. Shikano and M. Shimizu, **"Ultra-Wideband Tellurite-Based Fiber Raman Amplifier,"** J. Lightwave Technol. 21, 1300-1306 (2003).

25 C. E. S. Castellani, S. P. N. Cani, M. E. V. Segatto, M. J. Pontes, and M. A. Romero, **"Design methodology for multi-pumped discrete Raman amplifiers: case-study employing photonic crystal fibers,"** Opt. Express 17, 14121-14131 (2009).

26 Evgeny M. Dianov. **"Advances in Raman Fibers,"** J. Lightwave Technol. 20, 1457-1462 (2002).

27 Sergey Kobtsev, Sergey Kukarin and Alexey Kokhanovskiy, **"Solid-core tellurite glass fiber for infrared and nonlinear applications,"** Opt. Express 23, 18548-18553 (2015).

28 Institution of the Russian Academy of Sciences. **Phosphorus Doped Fibers.** Moscou, Rússia.

ANEXO A

Esse anexo possui a definição das variáveis não mencionadas da equação 2.3 :

T é a temperatura absoluta da fibra;

Γ é o fator de polarização;

k é a constante de Boltzmann;

$N_{E,\nu}$ é a potência de ruído devido à emissão espontânea em uma banda $\Delta\nu$ em torno da frequência ν, que apresenta a seguinte relação $N_{E,\nu} = h\,\nu\,\Delta\nu$;

h é a constante de Planck;