

# Metodologia de Projeto de Amplificadores Raman Distribuídos: Minimização de Bombeios Considerando Restrições dos Componentes

Juliano R. F. Oliveira<sup>†\*</sup>, Uiara C. Moura\*, Alexandre P. Freitas\* e Júlio C. R. F. Oliveira\*

**Resumo**—Este artigo apresenta uma metodologia para projeto de amplificadores Raman distribuídos com múltiplos lasers de bombeio. O objetivo dessa metodologia é determinar os comprimentos de onda e os níveis de potência dos lasers de bombeio, maximizando ganho com perfil espectral plano. Utilizando as restrições físicas dos componentes ópticos, são avaliadas todas as combinações de bombeio no projeto do amplificador Raman distribuído. Foram projetados amplificadores com 2, 3 e 4 lasers de bombeio, obtendo bons resultados comparados com outros métodos de otimização utilizados na literatura. Os resultados obtidos apresentaram ganho *on-off* de 27,93 dB com *ripple* aproximado de 1 dB utilizando 3 lasers de bombeios.

**Palavras-Chave**—amplificadores ópticos, amplificadores distribuídos, otimização, espalhamento Raman, redes WDM.

**Abstract**—This paper presents an optimized design methodology of distributed Raman amplifiers with multiple pump lasers. The goal of this methodology is determine the pump laser wavelengths and their powers, maximizing the amplifier gain with flat spectral profile. Using the physical constraints from optical components, it was evaluated all pump combinations for the distributed Raman amplifiers design. It was designed amplifiers with 2, 3 and 4 pump lasers, obtaining good results compared with other optimization methods. The results obtained show *on-off* gain of 27,93 dB with approximated ripple of 1 dB with 3 pump lasers.

**Keywords**—optical amplifiers, distributed amplifiers, optimization, Raman scattering, WDM networks.

## I. INTRODUÇÃO

As redes ópticas foram desenvolvidas com o intuito de suprir as necessidades de comunicações em altas taxas, uma vez que as mesmas possibilitam transmissões de sinais de alta capacidade, sendo pouco suscetíveis às interferências eletromagnéticas [1]-[2]. Hoje em dia com a popularização da internet a demanda por capacidade de comunicação é cada vez mais elevada, e os provedores deste tipo de serviço pressionam cada vez mais em busca de maiores taxas de transmissão de dados aliadas a baixos custos.

Para superar as limitações das redes ópticas devido principalmente à atenuação das fibras ópticas nos enlaces de longas distâncias, surgiram os amplificadores ópticos. Na década de 1990, os amplificadores a fibra dopada com Érbio (EDFA) surgiram para permitir sistemas de longa distância (*long haul*),

especialmente os sistemas com multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM), por meio da redução da quantidade de regeneradores elétricos. O EDFA possui alta eficiência de conversão de bombeio em sinal, necessitando de pouca potência de bombeio para prover altos ganhos aos sinais amplificados por ele, porém, o possui um espectro de ganho limitado e insere ruído ao sistema. Outra estratégia de amplificação óptica baseada em efeitos não lineares da fibra é o amplificador Raman, este possui baixa eficiência de conversão de bombeio em sinal, fato que o tornou viável somente após o desenvolvimento de lasers de alta potência. Em contrapartida, pode prover ganho em qualquer faixa espectral e, em sua configuração de amplificação distribuída, amplifica os sinais ao longo do enlace inserindo efetivamente menos ruído que o EDFA. Inicialmente os amplificadores Raman foram utilizados com intuito de estender os enlaces e/ou aumentar sua capacidade de transmissão de dados.

As taxas de transmissão dos canais nos sistemas de comunicações ópticas estão aumentando, devido principalmente à utilização de formatos avançados de modulação que visam uma melhora na eficiência espectral dos canais. Canais ópticos com formatos avançados de modulação necessitam que as redes ópticas reduzam ainda mais a inserção de ruído para permitir o tráfego nas mesmas. Como os sistemas modernos estão no limite da inserção de ruído para as taxas atuais, o amplificador Raman se apresenta como uma solução viável para efetivamente inserir menos ruído no sistema.

Os principais parâmetros a serem determinados no projeto de um amplificador Raman multi-bombeios são os comprimentos de onda dos lasers de bombeio e suas respectivas potências, de modo ao amplificador fornecer alto valor de ganho *on-off* e baixo *ripple* (planicidade), em resumo o amplificador Raman trata-se de um sistema MIMO [3] (*Multiple Input – Multiple Output*) a ser otimizado, que exige métodos robustos para obter boas soluções.

A otimização de amplificadores Raman através de algoritmos robustos foram apresentadas em [3]-[8]. Em [3] o método apresentado dividiu o problema em duas partes, o que possibilitou um decréscimo no *ripple*, porém a convergência do algoritmo genético apresentado para projeto do amplificador Raman é relativamente lenta. Em [5], o algoritmo utilizado aproxima a curva de ganho Raman através de linhas assintóticas (técnica de compensação geométrica), para reduzir o tempo de

\* Juliano R. F. Oliveira, Uiara C. Moura, Alexandre P. Freitas e Júlio C. R. F. Oliveira, Fundação CPqD, Campinas, Brasil, E-mails: jrfo@cpqd.com.br, umoura@cpqd.com.br, afreitas@cpqd.com.br e julioc@cpqd.com.br.

† Juliano R. F. Oliveira, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil, jrfo@sc.usp.br. Este trabalho foi financiado pelo FUNTEL.

convergência. Em [4], [6] e [8], um algoritmo mais robusto combinou a compensação geométrica com técnicas de algoritmos genético-híbridos, mostrando uma redução no tempo de convergência.

Neste artigo, foi proposta uma metodologia de projeto de amplificadores Raman (distribuído) em fibras *standard* (SSMF-28), utilizando as limitações físicas dos componentes ópticos para reduzir o espaço amostral das combinações, permitindo avaliar todas as combinações de lasers de bombeios (para quantidade de lasers definida em projeto).

Na seção II é apresentado o modelo numérico completo do amplificador Raman utilizado e a metodologia de projeto de amplificadores Raman, exemplificada via projeto de um amplificador Raman contra-propagante com três lasers de bombeio. Na seção III, os resultados obtidos no projeto de amplificadores Raman com 2, 3 e 4 lasers de bombeio são apresentados, e na seção IV, as conclusões são exibidas.

## II. METODOLOGIA DE PROJETO DE AMPLIFICADORES RAMAN DISTRIBUÍDOS

Um das maiores dificuldades no projeto de amplificadores Raman com múltiplos lasers de bombeios e perfil espectral de ganho plano são: a natureza não linear do ganho Raman, as influências das interações bombeio-bombeio, bombeio-sinal e sinal-sinal.

Procedimentos de otimização podem ser executados para aperfeiçoar os sistemas com múltiplos parâmetros e múltiplos alvos [9]. Porém, este processo demanda muito tempo de processamento, uma vez que a potência de bombeio para determinado ganho Raman é afetada por diversos fatores, incluindo o coeficiente de ganho Raman, efeitos de polarização, comprimento da fibra, perda na fibra no comprimento de onda de bombeio, depleção do bombeio e interação Raman entre bombeios [10].

Por esse motivo, é necessário fornecer ao processo de otimização um ponto de partida preciso para os parâmetros de entrada, especialmente em relação aos comprimentos de onda [9] e [10].

Com esta finalidade, neste artigo foi desenvolvida uma metodologia para definir os comprimentos de onda dos bombeios, e os valores iniciais das potências, para alimentar precisamente um otimizador de múltiplos parâmetros, no projeto do amplificador Raman distribuído que nos forneça uma boa relação entre alto ganho *on-off* e perfil de ganho espectral plano.

Nesta seção é apresentado o modelo numérico utilizado na simulação do amplificador Raman distribuído, seguido da descrição da metodologia de projeto de amplificadores Raman alvo deste trabalho via projeto exemplo de um amplificador Raman distribuído com três lasers de bombeio.

### A. Modelo Numérico do Amplificador Raman

Neste trabalho é considerada a modelagem de amplificadores Raman empregada no software de simulação OptiSystem<sup>®</sup>. O modelo considera os seguintes efeitos do amplificador Raman distribuído: interações bombeio-bombeio, sinal-sinal e bombeio-sinal, dependência da emissão espontânea Raman com a temperatura, o espalhamento Raman estimulado, depleção de

bombeio devido à transferência de energia Raman, geração de Stokes de ordens superiores, múltiplos retro-espalhamentos Rayleigh, perdas na fibra e a emissão espontânea de ruído. O modelo analítico que considera estes efeitos é apresentado na Equação 1:

$$\begin{aligned} \frac{dP_f(z, \nu)}{dz} = & \alpha(\nu)P_f(z, \nu) + \gamma(\nu)P_b(z, \nu) + P_f(z, \nu) \sum_{\nu < \zeta} \frac{g_r(\nu - \zeta)}{K_{\text{eff}} A_{\text{eff}}} [P_f(z, \zeta) \\ & + P_b(z, \zeta)] + h\Delta\nu \sum_{\nu < \zeta} \frac{g_r(\nu - \zeta)}{A_{\text{eff}}} [P_f + P_b] [1 + \exp([h(\zeta - \nu)/kT] - 1)^{-1}] \\ & - P_f(z, \nu) \sum_{\nu > \zeta} \frac{g_r(\nu - \zeta)}{K_{\text{eff}} A_{\text{eff}}} \frac{\nu}{\zeta} [P_f(z, \zeta) + P_b(z, \zeta)] \\ & - 2h\nu\Delta\nu P_f(z, \nu) \sum_{\nu > \zeta} \frac{g_r(\nu - \zeta)}{A_{\text{eff}}} [1 + \exp([h(\nu - \zeta)/kT] - 1)^{-1}] \end{aligned} \quad (1)$$

onde  $\nu$  e  $\zeta$  são as frequências [Hz] dos sinais que estão interagindo,  $\alpha(\nu)$  é o coeficiente de atenuação na fibra [N/m],  $\gamma$  é o coeficiente do retro espalhamento Rayleigh [N/m],  $g_r(\nu - \zeta)$  o coeficiente do ganho Raman para a diferença de frequência,  $\nu - \zeta$  [m/W], e  $P_b(z, \nu)$  representa a potência refletida em [W]. Já os parâmetros  $A_{\text{eff}}$ ,  $K_{\text{eff}}$ ,  $\Delta\nu$ ,  $h$ ,  $k$  e  $T$  são respectivamente a área efetiva do núcleo [m<sup>2</sup>], fator de polarização, intervalo de frequência [Hz], constante de Planck ( $6,6260693 \cdot 10^{-34}$  [J.s]), constante de Boltzmann ( $1,3806503 \cdot 10^{-23}$  [J/K]) e temperatura (K).

Devido ao fato de se considerar um grande número de efeitos, esta modelagem exige uma grande capacidade computacional, o que leva a um consumo de tempo relativamente elevado para realizar as simulações. Para efeito de redução do tempo de processamento é utilizada uma técnica de cálculo a qual divide o comprimento total de fibra em segmentos menores concatenados a fim de calcular a propagação para pequenos sinais. Para eliminar a dependência da distância  $z$  foi feito o cálculo da potência média que é transmitida de um trecho a outro.

### B. Metodologia de projeto de amplificadores Raman

A metodologia proposta neste trabalho é executada em duas fases. Na primeira fase, a quantidade de bombeios é escolhida, considerando suas potências nominais. Através de um modelo simplificado do amplificador Raman, o resultado gerado (ganho espectral combinado) é analisado buscando as melhores configurações de comprimentos de onda que forneçam alto ganho e baixo *ripple*. Em seguida, o modelo numérico completo do amplificador Raman é utilizado para avaliar mais realisticamente o *ripple*. A segunda fase consiste no aperfeiçoamento do *ripple* através de algoritmos de correção de inclinação espectral que atuam nas potências dos bombeios, finalizando a otimização via algoritmo LMS Levenberg-Marquardt.

A Figura 1 ilustra o fluxograma da metodologia de projeto de amplificadores Raman distribuído proposta neste trabalho. O método será descrito nas próximas seções através do projeto de um amplificador Raman distribuído contra-propagante, com três lasers de bombeio.

### C. Restrições de componentes ópticos

Para o projeto de um amplificador Raman distribuído, deve-se inicialmente escolher a quantidade de lasers de bombeio e considerar as restrições físicas e comerciais dos componentes

ópticos. Neste projeto, as seguintes restrições foram consideradas:

$$g_R(\omega) = g_{Rmax} \sum_{i=1}^{N_m} A_i \exp\left[-(\omega - \omega_{v,i})^2 / \Gamma_i^2\right] \quad (2)$$

Na Equação 2,  $g_R$  é o coeficiente de ganho Raman,  $N_m$  é o número de termos usados para a decomposição,  $\omega_{v,i}$  é a frequência central do  $i$ -ésimo perfil gaussiano,  $\Gamma_i = FWHM_i / (2\sqrt{\ln 2})_i \approx 0.6 \cdot FWHM_i$ , onde  $FWHM_i$  é a largura completa na metade do perfil gaussiano máximo.

Em seguida, foram calculadas todas as combinações possíveis entre 100 comprimentos de onda de lasers de bombeio, tomados  $n$  a  $n$ , onde  $n$  é o número de lasers de bombeio do amplificador Raman. Para cada bombeio individual, foi calculado o ganho Raman considerando um enlace de 100 km de fibra *standard* (SSMF-28), utilizando uma modelagem mais simplificada que o amplificador Raman apresentado na Equação 1. Isto foi feito para reduzir o tempo de processamento e adquirir uma informação confiável para que se possa utilizar a Equação 1 nos passos seguintes de otimização dos lasers de bombeio.

Esta abordagem simplificada leva em consideração apenas o efeito Raman estimulado (SRS) e a perda por atenuação na fibra, como ilustrado as Equações 3.1 e 3.2 [2].

$$\frac{dP_S}{dz} = \frac{g_R}{A_{eff}} P_p P_S - \alpha_S P_S \quad (3.1)$$

$$\frac{dP_p}{dz} = -\alpha_p P_p \quad (3.2)$$

onde  $z$  é a distância (km),  $P_S$  e  $P_p$  são os níveis de potência do sinal e de bombeio respectivamente [W],  $\alpha(v)$  é o coeficiente de atenuação na fibra [N/m],  $g_R$  é o coeficiente do ganho Raman [m/W] e  $A_{eff}$ , a área efetiva do núcleo [m<sup>2</sup>].

Após o cálculo do ganho Raman para cada bombeio, utilizando as equações 3.1 e 3.2, a contribuição logarítmica de ganho para cada uma das combinações de bombeios foi somada [9] e [10]. A Figura 2 ilustra as curvas de ganho para três bombeios e a soma dos mesmos.

O ganho máximo e *ripple* (planicidade) do perfil de ganho resultante da soma de cada combinação de comprimentos de onda de bombeios foram calculados e dispostos em um vetor para que, a partir desses valores, a escolha dos comprimentos de onda dos lasers de bombeio Raman possa ser realizada.

Este vetor com os valores de ganho máximo e *ripple* foi varrido de três formas diferentes:

Busca 1: Procurando primeiro o maior ganho e depois o menor *ripple*;

Busca 2: Procurando primeiro o menor *ripple* e depois o maior ganho;

Busca 3: Procurando a máxima diferença entre ganho e o *ripple*.

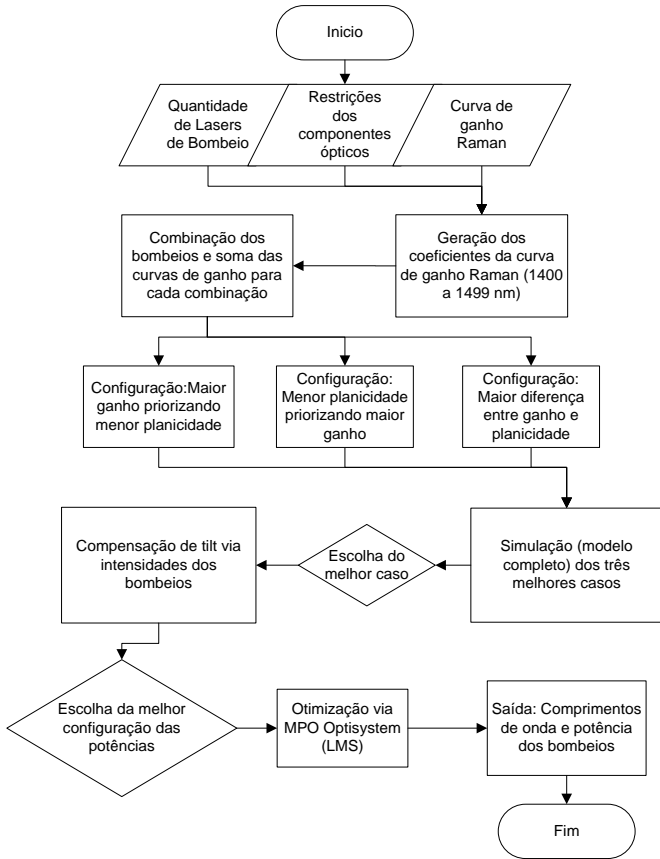


Fig. 1. Fluxograma da metodologia de projeto de amplificadores Raman.

- Lasers de bombeio com comprimento de onda na região de 14XX nm (1400 a 1499 nm);
- Resolução de 1 nm entre os lasers de bombeio, devido aos lasers comerciais apresentarem esta granularidade;
- Espaçamento mínimo de 5 nm entre os lasers de bombeio, que corresponde ao espaçamento mínimo prático entre bombeios em um acoplador de um bombeio Raman WDM;
- Nível máximo de potência de 360 mW para todos os bombeios.

Com estas restrições, o espaço de soluções pode ser reduzido, acarretando em um tempo menor de avaliação das combinações de bombeio.

#### D. Determinação dos comprimentos de onda dos lasers de bombeio

A partir das considerações do item II-C e os dados experimentais do coeficiente de ganho Raman normalizado para fibra *standard* (SSMF-28) [9], a Equação 2 apresentada em [11] foi utilizada, e através do *toolbox* de ajuste de curvas do Matlab<sup>®</sup> foram obtidos os parâmetros da equação de ganho espectral (3 coeficientes x 10 termos, por bombeio) para todos os bombeios (1400 a 1499 nm). A Equação 2 aproxima com fidelidade a curva de ganho Raman em fibras ópticas.

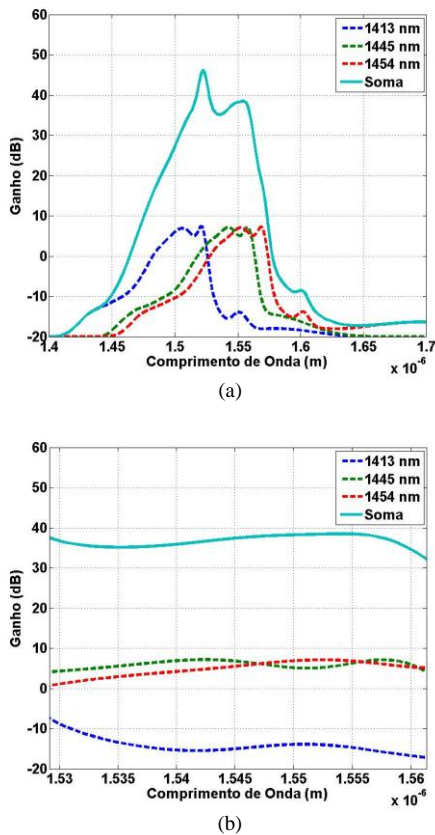


Fig. 2. Perfis de ganho Raman para três bombeios individuais e combinado para várias bandas (a), e ressaltando a banda C (b).

Para o amplificador Raman contra-propagante com três lasers de bombeios, os valores encontrados para cada busca, a partir das equações simplificadas 3.1 e 3.2, encontram-se na TABELA I.

TABELA I COMPRIMENTOS DE BOMBEIO PARA CADA TIPO DE BUSCA.

| Busca | P1 (nm) | P2 (nm) | P3 (nm) | Ganho de rede (dB) | Ripple (dB) |
|-------|---------|---------|---------|--------------------|-------------|
| 1     | 1439    | 1446    | 1452    | 60,02              | 13,04       |
| 2     | 1413    | 1445    | 1454    | 43,02              | 7,537       |
| 3     | 1440    | 1445    | 1450    | 61,94              | 14,17       |

Cada caso apresentado na TABELA I foi simulado no Optisystem®, considerando os efeitos da equação 1. Nas simulações foram considerados dez sinais de entrada na Banda C, a partir de 192 THz a 196,05 THz espaçados de 450 GHz, com potência de -1 dBm/canal (80 canais com potência de -10 dBm/canal). O bombeio em 1413 nm teve que ser substituído por um de 1420 nm devido à disponibilidade comercial.

TABELA II RESULTADO DAS SIMULAÇÕES PARA CADA CASO DE BUSCA.

| Busca | Ganho de rede (dB) | Inclinação (dB) | Bombeio (mW) |
|-------|--------------------|-----------------|--------------|
| 1     | 10,99              | 4,464           | 335*         |
| 2     | 9,32 (10,68)       | 1,36 (1,47)     | 335 (360)    |
| 3     | 11,18              | 3,798           | 335*         |

\* Potência de 360 mW por bombeio foi reduzida para 335 mW para convergência do modelo.

Analisando os resultados das simulações apresentados na TABELA II, o tipo de busca 2 (1420, 1445 e 1454 nm) surge como a melhor configuração de comprimentos de onda de bombeio entre as combinações avaliadas, devido a mesma apresentar a melhor relação entre *ripple* e ganho de rede.

E. Determinação das intensidades dos lasers de bombeio

Para melhorar o *ripple* do perfil de ganho da combinação escolhida no item III-D, foi feito um ajuste da inclinação do perfil a partir da escolha adequada das potências dos lasers bombeio. Para tanto, os ganhos de rede de cada canal foram utilizados para determinar a inclinação de ganho, e com os valores das potências de bombeio com uma inclinação oposta (aplicado sobre as potências dos bombeios), a inclinação do perfil de ganho foi compensada. Vários índices de inclinação foram utilizados, fixando uma das potências no máximo (360 mW) e variando as proporções das demais, para em seguida determinar a que melhor ajusta o *ripple* considerando os efeitos não-lineares presentes no modelo simulado no Optisystem®. Os resultados da simulação de cada proporção entre bombeios máximo e mínimo encontram-se na TABELA III.

TABELA III RESULTADO DAS SIMULAÇÕES DO OPTISYSTEM® PARA CADA PROPORÇÃO ENTRE BOMBEIOS MÁXIMO E MÍNIMO PARA AMPLIFICADOR RAMAN COM 3 BOMBEIOS CONTRA-PROPAGANTE.

| %  | P1 (mW) | P2 (mW) | P3 (mW) | Ganho rede (dB) | Ripple (dB) |
|----|---------|---------|---------|-----------------|-------------|
| 90 | 360     | 334,3   | 340,0   | 9,78            | 1,33        |
| 80 | 360     | 308,6   | 320,0   | 8,76            | 1,18        |
| 70 | 360     | 282,9   | 299,9   | 7,69            | 1,27        |

F. Otimização do amplificador Raman projetado

Analisando a TABELA III, identifica-se o ponto de inflexão do *ripple* quando a potência mínima está em 80% da potência máxima. Foram escolhidos os dados desse ponto como os iniciais para realizar otimização de múltiplos parâmetros via algoritmo LMS Levenberg-Marquardt, com os dados dos pontos de 90% e 70% sendo utilizados como os limites superiores e inferiores, respectivamente.

Fixando a potência do bombeio 1 (P1) em 360 mW e passando como parâmetros para o algoritmo LMS as potências de bombeio 2 (P2) e 3 (P3), com seus respectivos valores de bombeio inicial (80%), máximo (90%) e mínimo (70%), buscou-se o ganho máximo, e o *ripple* de ganho espectral mínimo. O resultado da otimização para o amplificador distribuído com 3 lasers de bombeio foi: 360 mW para o laser de 1420 nm, 334,309 mW para o laser de 1445 nm e 299,981 mW para o laser de 1454 nm. Com ganho de rede de 8,942 dB e *ripple* de 1,142 dB.

III. RESULTADOS

Os procedimentos descritos no item II foram realizados para projeto de amplificadores Raman distribuído para sinais na banda C (~ 30 nm de largura de banda), com 2, 3 e 4 lasers de bombeio nas configurações contra e co-propagantes.

Os resultados finais encontram-se na TABELA IV para os amplificadores em configuração contra-propagante e co-propagante, respectivamente.

TABELA IV RESULTADO DA OTIMIZAÇÃO DO GANHO E RIPPLE PARA AMPLIFICADORES RAMAN CONTRA-PROPAGANTE (CO-PROPAGANTE).

| 2 bombeios | Potência (mW) | Ganho de rede (dB) | Ganho on-off (dB) | Ripple (dB)      |
|------------|---------------|--------------------|-------------------|------------------|
| 1441 nm    | 248,2 (360,0) | 1,742<br>(-3,347)  | 20,72<br>(15,64)  | 2,550<br>(2,255) |
| 1446 nm    | 360,0 (220,1) |                    |                   |                  |
| Soma (mW)  | 608,2 (580,1) |                    |                   |                  |
| 3 bombeios |               |                    |                   |                  |
| 1420 nm    | 360,0 (360,0) | 8,942<br>(-0,536)  | 27,93<br>(18,44)  | 1,142<br>(0,991) |
| 1445 nm    | 334,3 (312,2) |                    |                   |                  |
| 1454 nm    | 300,0 (232,2) |                    |                   |                  |
| Soma (mW)  | 994,3 (904,4) |                    |                   |                  |
| 4 bombeios |               |                    |                   |                  |
| 1420 nm    | 360,0 (360,0) | 8,640<br>(-0,387)  | 27,63<br>(18,60)  | 1,385<br>(1,139) |
| 1444 nm    | 200,7 (264,2) |                    |                   |                  |
| 1449 nm    | 146,3 (189,2) |                    |                   |                  |
| 1456 nm    | 280,8 (108,0) |                    |                   |                  |
| Soma (mW)  | 987,8 (921,4) |                    |                   |                  |

Analisando os resultados da TABELA IV, pode-se ver que o amplificador Raman na configuração contra-propagante proporciona ganho de rede maior que o co-propagante, porém, o amplificador co-propagante proporciona *ripple* e relação sinal ruído óptica (OSNR) melhor que o contra-propagante.

Em todas as configurações de amplificadores Raman projetadas neste trabalho, o amplificador Raman com três lasers de bombeio possui um desempenho superior para o ganho e o *ripple* quando comparado com o amplificador com dois lasers de bombeio. Além disso, os valores de ganho e *ripple* para o amplificador Raman com três lasers de bombeio também possuem melhor desempenho que o amplificador Raman com quatro lasers de bombeios. Isto ocorre devido à análise ser restrita apenas à banda C.

Em [8] e [9] foram desenvolvidos amplificadores Raman com diferentes metodologias e algoritmos de otimização (considerando sinais na banda C). A TABELA V, resume os métodos/algoritmos e resultados para comparação com a metodologia desenvolvida neste trabalho.

TABELA V COMPARAÇÃO DE RESULTADOS ENTRE O AMPLIFICADOR RAMAN DESENVOLVIDO E OUTRAS METODOLOGIAS DE PROJETO.

| Método / Algoritmo | Raman LMS [9] | Raman genético [8] | Raman híbrido [8] | Raman Projetado |
|--------------------|---------------|--------------------|-------------------|-----------------|
| Enlace (km)        | 25            | 100                | 100               | 100             |
| Bombeios           | 4             | 5                  | 5                 | 3               |
| Bomb. Máx. (mW)    | 799,9         | 1350,1             | 1910,7            | 994,3           |
| Ganho (dB)         | 9             | -                  | -                 | 8,942           |
| Gan. on-off (dB)   | -             | 14,2               | 22,5              | 27,93           |
| Ripple (dB)        | 2             | 1                  | 1                 | 1,142           |

De acordo com a TABELA V, pode-se observar que o amplificador Raman projetado neste trabalho utiliza um laser de bombeio a menos que em [9] (fibra de transmissão DS), para alcançar distância maior de enlace e *ripple* melhor, lançando menos potência na fibra de transmissão.

Comparando com os algoritmos apresentados em [8], para uma mesma distância e tipo de fibra, os amplificadores

projetados neste trabalho fornecem ganho *on-off* 5 dB maior, com dois lasers de bombeio a menos, lançando menos potência de bombeio na fibra, porém com 0,142 dB a mais de *ripple*.

#### IV. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi desenvolvida uma metodologia de projeto de amplificadores Raman distribuído co-propagante e contra-propagante que, para uma determinada quantidade de laser de bombeio, busca o melhor custo benefício entre *ripple* e ganho.

A metodologia de projeto de amplificadores Raman distribuído desenvolvida neste trabalho considera as restrições físicas dos componentes ópticos, visando um projeto otimizado possível de ser montado experimentalmente, e produzindo bons resultados no projeto de amplificadores Raman distribuído.

Outro fator importante foi que a metodologia apresentada considera todo o espaço amostral das combinações de bombeio (para o número de bombeios definidos), que é reduzido quando se aplica as restrições físicas dos componentes ópticos, diminuindo consideravelmente o tempo de projeto do amplificador Raman desejado.

Conclui-se também através da análise dos resultados da TABELA IV e TABELA V que no projeto de um amplificador Raman distribuído para sinais na banda C (~30 nm de largura de banda) é desnecessário utilizarmos mais que três lasers de bombeio para obter a melhor relação entre ganho e *ripple* para o amplificador projetado.

#### REFERÊNCIAS

- [1] R. Ramaswami and K. N. Sivarajan, "Optical networks: a practical perspective", 2nd ed. London: Academic Press, 2001.
- [2] Headley and G. P. Agrawal, "Raman Amplification in Fiber Optical Communication Systems", San Diego, CA: Academic, 2005
- [3] E. Perlin and H. G. Winful, "Optimal design of flat-gain wide-band fiber raman amplifiers", IEEE J. Lightwave Technology, vol. 20, no. 2, p. 250, Feb. 2002.
- [4] X. Liu and B. Lee, "Optimal design for ultra-broad-band amplifier", IEEE J. Lightwave Technology, vol. 21, no. 122, p. 3446, Dec. 2003.
- [5] Z. Li, C. Liu, J. Chen and C. Zhao, "A fast and stable method for raman amplifier propagation equations", Optics Express, vol. 12, no. 3, p. 436, 2004.
- [6] X. Liu, J. Chen, C. Lu and X. Zhou, "Optimizing gain profile and noise performance for distributed fiber raman amplifiers", Optics Express, vol. 12, no. 24, p. 6053, 2004.
- [7] K. Fujimura, A. Oguri, T. Nakajima, Y. Emori, S. Namiki and M. Sakano, "Applying a numerical simulation technique to the design of WDM-pumped raman amplifiers, and methods for the automatic determination of pump powers", Furukawa Review, vol. 25, no. 1, 2004.
- [8] C. M. Ferreira, M. H. M. Paiva, M. J. Pontes, M. E. V. Segatto and M. Freitas, "Algoritmo Híbrido Genético-Fuzzy Aplicado no Projeto de Amplificadores Raman", SBrT 2009, Blumenau, Brasil.
- [9] T.H. Coskun, I.M. Uzunov and J. Klein, "Automated optimization tools help to design gain flattened broadband Raman amplifiers", WDM solutions, March-April, pp. 18-20, 2003.
- [10] Y. Emori, S. Kado and S. Namiki, "Broadband flat-gain and low-noise Raman amplifiers pumped by wavelength-multiplexed high-power laser diodes" Optical Fiber Technology, vol. 8, no. 2, p. 107-122, 2002.
- [11] Felinskyi, "Nonlinear fitting of the complex Raman gain profile in single-mode optical fibers", 11<sup>th</sup> Int. Conf. on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory, p. 378, 2006.