

# Análise da eficiência de amplificadores Raman em sistemas ópticos dinâmicos

Daniel Gatti Máximo, Lucas de Miranda Henrique e Shirley P. Neves Cani

**Resumo**—Este artigo analisa a eficiência de um amplificador Raman previamente otimizado com um conjunto de bombesios na configuração contra-propagante, quando submetido a variações no sistema. A configuração inicial de bombesios foi trocada pela co-propagante e a quantidade de sinais e a separação entre eles também foram variadas. A eficiência foi testada através da análise dos resultados de ganho dos sinais e *ripple* de ganho. Também foi observada a qualidade dos bits dos sinais através da análise do diagrama de olho.

**Palavras-Chave**—Amplificadores Raman, Comunicações Ópticas.

**Abstract**—This paper analyzes the efficiency of a Raman amplifier previously optimized with a set of pumps in a counter-pumped configuration when submitted to changes in the system. The initial pump configuration was changed to co-pumped and the number of signals and its separation were varied. The efficiency of the amplifier was checked through the analysis of the results of the net gain and the ripple. The quality of the bits of the signals has been also observed by eye diagram pattern.

**Keywords**—Raman Amplifiers, Optical Communication.

## I. INTRODUÇÃO

Os amplificadores ópticos baseados no efeito não linear do espalhamento de Raman estimulado - amplificadores Raman, são amplificadores de banda larga que vêm atraindo a atenção desde os anos 80. Estes amplificadores apresentam a vantagem de utilizarem a própria fibra como meio de transmissão e de propiciarem ganho plano e elevado em uma banda larga de sinais através de um conjunto de *lasers* de bombeio que é acoplado ao sistema. O grande desafio destes amplificadores é especificar de forma precisa a quantidade de *lasers* de bombeio, bem como seus respectivos comprimentos de onda e níveis de potência, que atenderão às especificações de ganho e *ripple* de ganho desejados para o sistema [1]. A configuração dos bombesios (co-propagante, contra-propagante ou bi-direcional), o tipo de fibra, a banda dos sinais e a potência dos sinais são fatores que impactam diretamente no projeto desses amplificadores.

Atualmente existem diversos trabalhos na literatura propondo métodos que facilitam a busca do conjunto de bombesios que atenderão às especificações iniciais de ganho e *ripple* de ganho do sistema. Em Cani, *et al.* [2] é proposto um método analítico que é uma ferramenta rápida a ser utilizada na busca dos *lasers* de bombeio. Técnicas de otimização do ganho em amplificadores Raman utilizando métodos que envolvem o uso de algoritmos genéticos também foram apresentadas em alguns trabalhos [3-5]. No entanto, um fato que merece ser investigado é a robustez destes amplificadores otimizados, ou seja, uma vez que foi definido um conjunto e uma

configuração de bombesios que atenderá as especificações de um sistema é possível obter resultados semelhantes caso o sistema sofra algumas modificações? Baseado neste questionamento este trabalho se propõe a investigar o comportamento de ganho, *ripple* de ganho e qualidade dos bits em sistemas dinâmicos, uma vez que nas redes de comunicações ópticas o fluxo de informações não é sempre constante. A idéia se baseia em utilizar um conjunto de bombesios previamente otimizado para o projeto de um amplificador Raman na configuração contra-propagante operando em um sistema implementado em fibra monomodo padrão (SMF) e verificar se este conjunto otimizado ainda atende às especificações iniciais de ganho e *ripple* de ganho caso a configuração mude para co-propagante e ocorram mudanças na largura de banda dos sinais a serem amplificados.

## II. METODOLOGIA

Simulações da propagação de sinais ópticos em amplificadores Raman podem ser executadas basicamente por três diferentes aproximações. O problema pode ser tratado numericamente através das equações não lineares de Schrödinger estendida (ENLSE) [6,7], ou através de equações de estado estacionário (*continuous wave* - CW) [8]. Como alternativa, uma solução analítica simplificada pode ser aplicada na análise de sinais em estado estacionário [2]. O método numérico de ENLSE possibilita analisar a propagação de sinais modulados sob a condição de efeitos dispersivos e não lineares de auto modulação de fase (SPM), modulação cruzada de fase (XPM) e espalhamento Raman estimulado (SRS). O método numérico de estado estacionário permite o cálculo da evolução da potência óptica de sinais e bombesios ao longo da fibra. Em ambos os métodos numéricos estão incluídos a total interação entre bombesios-sinais, bombesios-bombesios e sinais-sinais, a emissão espontânea amplificada (ASE) e o espalhamento duplo de Rayleigh (DRS). No método analítico é desprezado a depleção dos bombesios, e os efeitos de ASE e DRS, porém este método é uma ferramenta rápida e, portanto, bastante importante no processo de otimização dos amplificadores Raman [2]. Os três métodos previamente citados foram utilizados na investigação proposta neste trabalho.

## III. RESULTADOS

Com o intuito de limitar nosso espaço de investigação assumimos a configuração de um amplificador Raman previamente otimizado, cujos dados são: 75 km de fibra SMF; 20 sinais multiplexados em comprimento de onda na banda C com separação inicial entre eles de 100 GHz; três *lasers* de bombeio contra-propagantes com  $\lambda_{p1} = 1445$  nm,  $\lambda_{p2} = 1448$  nm e  $\lambda_{p3} = 1455$  nm, cada um com 333 mW de potência. O ganho médio dos sinais (*net gain*) e o *ripple* de

ganho obtidos neste sistema foram 6,57 dB e 0,23 dB, respectivamente.

Para investigar a robustez do conjunto de bombeios apresentado acima, mantivemos os 75 km de fibra SMF e os mesmos comprimentos de onda e as mesmas potências de bombeio, porém, mudamos a configuração para a co-propagante. Na seqüência, variamos a quantidade de sinais propagantes simultaneamente na banda C e a separação entre eles. A proximidade entre os sinais é um fator que pode influenciar negativamente na qualidade dos bits devido à maior ação dos efeitos não-lineares. Os parâmetros do amplificador analisados foram o ganho, o *ripple* de ganho e a qualidade dos bits que chegam ao receptor. Em todas as análises a potência dos sinais foi fixada em -10 dBm por canal.

A Figura 1 mostra os resultados de ganho médio dos sinais e *ripple* de ganho em função da quantidade de sinais propagantes e da separação entre eles. Os resultados foram obtidos através de simulações com o método numérico em regime estacionário e com o método analítico. Podemos observar na Figura 1 que o ganho não sofreu alterações significativas quando a configuração mudou para co-propagante e o número de sinais e a separação entre eles se alterou. Tanto nos resultados numéricos de ganho quanto nos analíticos o ganho médio dos sinais se manteve entre 6,3 dB e 6,7 dB. O *ripple* de ganho também não sofreu alterações significativas, com exceção da situação onde a separação é de 100 GHz. Este acréscimo no *ripple* se deve ao fato de que na configuração co-propagante a maior interação bombeios-sinais ocorre no início da transmissão onde os níveis de energia são maiores. Este fato associada à maior quantidade de sinais e ao maior afastamento entre eles faz com que a transferência de energia dos bombeios para os sinais não ocorra de forma simétrica ao longo de toda a banda. Esta combinação também contribui para a maior depleção dos bombeios e, conseqüentemente, para a saturação do amplificador. Esta saturação pode ser verificada na redução do ganho observado nos resultados numéricos da Figura 1. No entanto, em todas as situações analisadas o *ripple* ainda se manteve dentro de valores aceitáveis, ou seja, abaixo de 1 dB.

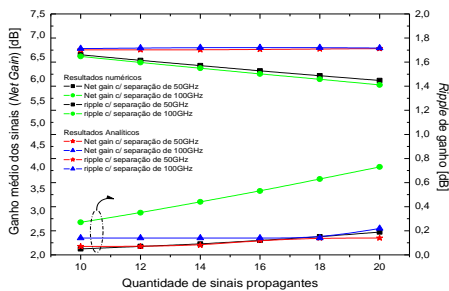


Fig. 1. Ganho médio e *ripple* de ganho em função da quantidade de sinais propagantes e da separação entre eles. A potência dos sinais foi fixada em -10 dBm por canal.

A Figura 2 ilustra o diagrama de olho do sinal que se encontra no meio da banda ocupada por 20 sinais com separação de 50 GHz e 100 GHz. A taxa de bits adotada foi de 2,5 Gbps por canal no formato NRZ. O sinal central é o que sofre a maior interferência devido ao efeito não linear de XPM. Podemos observar que apesar da configuração co-propagante

ser mais susceptível aos efeitos não-lineares, os bits chegaram com uma boa qualidade ao receptor, mesmo quando a separação entre os sinais foi de 50 GHz (Figura 2.a). O ganho médio dos 20 sinais e o *ripple* de ganho obtidos através do método numérico de ENLSE foram 6,22 dB e 0,16 dB, respectivamente para a separação de 50 GHz entre os sinais e 6,23 dB e 0,29 dB, respectivamente para a separação de 100 GHz entre os sinais. Podemos observar que os resultados são concordantes com os obtidos através da análise analítica e a numérica em regime estacionário.

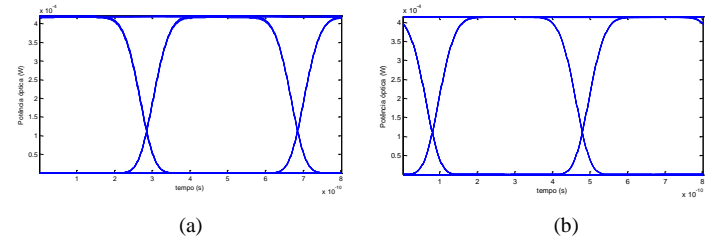


Fig. 2. Diagrama de olho obtido no final do enlace de 75 km de SMF do sinal central da banda de 20 sinais. a) Separação entre sinais de 50 GHz; b) Separação entre sinais de 100 GHz.

#### IV. CONCLUSÕES

Este trabalho investigou a eficiência de um amplificador Raman previamente otimizado quando submetido a variações no sistema. A configuração inicial de bombeios foi alterada e foram feitas alterações na banda dos sinais. Os resultados foram obtidos através dos métodos numéricos de análise de sinais em regime estacionário e de sinais modulados e através do método analítico aproximado. Os resultados obtidos através dos três métodos foram concordantes e mostraram que mesmo com alterações significativas do sistema o conjunto de bombeios previamente otimizado continuou fornecendo aproximadamente os mesmos níveis de ganho e *ripple* de ganho dos sinais apresentados no projeto inicial. Estes resultados comprovam a eficiência de amplificadores Raman implementados em redes ópticas dinâmicas.

#### REFERENCES

- [1] C. Headley, and G. P. Agrawal, "Raman Amplification in Fiber Optical Communication Systems", San Diego, CA, Academic Press, 2005.
- [2] S. P. N. Cani, L. C. Calmon, M. J. Pontes, M. R. N. Ribeiro, M. E. V. Segatto, and A. Cartaxo, "An analytical approximated solution for the gain of broadband Raman amplifiers with multiple counter-pumps," *IEEE Journal of Lightwave Technology*, vol. 27, no. 7, pp. 944–951, Abril 2009.
- [3] B. Neto, *et al.*, "Efficient use of hybrid Genetic Algorithms in the gain optimization of distributed Raman amplifiers," *Optics Express*, vol. 15, no. 26, pp. 17 520–17 528, Dec. 2007.
- [4] X. Liu and B. Lee, "Optimal design of fiber Raman amplifier based on hybrid genetic algorithm," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 16, no. 2, pp. 428–430, Fevereiro 2004.
- [5] G. C. M. Ferreira, S. P. N. Cani, M. J. Pontes, and M.E. V. Segatto, "Optimization of Distributed Raman Amplifiers Using a Hybrid Genetic Algorithm with Geometric Compensation Technique", trabalho submetido em fevereiro de 2011 para o *IEEE Photonics Journal*.
- [6] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics* (Academic Press, USA, 3rd edition, 2001), Chap.8.
- [7] S. P. N. Cani, M. Freitas, R. T. Almeida, and L. C. Calmon, "Raman amplifier performance of dispersion compensating fibers," in *International Microwave and Optoelectronics Conference - IMOC*, Foz do Iguaçu, 2003.
- [8] H. Kidorf, *et al.*, "Pump interactions in a 100-nm bandwidth Raman amplifier," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **11**, 530-532 (1999).