

# NOVA CONFIGURAÇÃO DE FIBRAS ÓPTICAS COM AMPLIFICAÇÃO RAMAN, SIMULADA COM O SOFTWARE VPI, UTILIZADO NA INDÚSTRIA E NO ENSINO.

Laércio Alves Nogueira<sup>1</sup> e Luiz Sérgio Zasnicoff<sup>2</sup>

**Abstract** — As perdas em fibras ópticas constituem fatores limitantes em transmissões de longa distância. Uma maneira prática de transmitir sinais com perdas reduzidas é a utilização de Amplificação Raman Distribuída. Como forma de se realizar uma transmissão otimizada, uma nova configuração híbrida de fibras ópticas é avaliada para sistemas de longa distância. Uma solução simples, e que apresenta bom resultado, é a configuração híbrida com apenas dois tipos de fibras em cascata, com bombeamento Raman por meio de um diodo laser. O objetivo é uma transmissão com perda desprezível, mantendo-se a variação total da potência do sinal de entrada, ao longo do enlace, menor que 2 dB, numa distância de 50 km. A linha é composta por um trecho de fibra monomodo (SMF – Single-Mode Fiber), e uma fibra com dispersão compensada (DCF-Dispersion-Compensating Fiber), com bombeamento Raman reverso (backward). Este trabalho apresenta as simulações desse experimento, por meio de simulações com o programa VPI.

**Index Terms** — Amplificadores ópticos, bombeamento reverso, fibras ópticas, espalhamento Raman.

## INTRODUÇÃO

Com a popularização da Internet, a tecnologia da camada física, ou de base, para a comunicação entre os usuários tem se tornado motivo de intensa pesquisa, visando à melhoria constante da rede, de forma a se atender cada vez mais um número maior de pessoas, com um aumento do tráfego e prestação de serviço com mais qualidade. Atualmente, IP (Internet Protocol) sobre WDM (Wavelength-Division Multiplexing) está recebendo muita atenção [1], pois neste esquema de comunicação uma grande capacidade de tráfego está ligada aos serviços IP. Num futuro próximo, a capacidade demandada será ainda maior, e para se conseguir este aumento de capacidade nos sistemas WDM, diminui-se a largura de espaçamento entre os canais.

No entanto, efeitos não-lineares, tais como FWM (Four-wave mixing) e XPM (Cross-Phase Modulation), entre outros, aumentam com a diminuição do espaçamento entre canais, limitando assim a distância de transmissão. A Amplificação Raman Distribuída (DRA) tem o potencial de aumentar consideravelmente a distância de transmissão. Ela permite diminuir perdas nas fibras pela utilização do próprio

meio físico como um amplificador. Como resultado, o sinal necessário na entrada para se conseguir certo valor da relação sinal/ruído óptica, é reduzido, o que diminui o aparecimento dos outros tipos de efeitos não-lineares.

O ruído óptico causado pelo DRA é menor do que o ruído dos EDFAS (Erbium-Doped Fiber Amplifiers). Assim, DRA permite não somente que se eliminem outros efeitos não-lineares, mas também melhora a relação sinal/ruído. As simulações foram realizadas por meio do software VPI TransmissonMaker™, um produto da empresa Virtual Photonics, Inc. A configuração utilizada para o DRA é a de bombeamento reverso (backward), porque o bombeamento Raman direto (forward) é geralmente menos eficiente em termos da relação sinal/ruído [2]. Costuma-se operar com um ganho do DRA abaixo de 20 dB, para se evitar espalhamento de Rayleigh.

Neste artigo, para se conseguir uma transmissão com perdas praticamente desprezíveis, uma configuração híbrida é utilizada, como esquema principal das simulações. Dois diferentes tipos de fibras são conectados em série, e adiciona-se a elas um DRA para compensar as perdas do enlace total. Utiliza-se uma fibra de sílica tipo monomodo (SMF – Single Mode Fiber), que apresenta relativamente alta dispersão cromática no comprimento de onda de 1.5 μm, mas que é efetiva na redução de efeitos não-lineares, em cascata com uma fibra de dispersão deslocada (DCF - Dispersion-Compensating Fiber), que compensa a dispersão acumulada.

O software VPI é a ferramenta utilizada para obtenção dos valores práticos. Os resultados da simulação validam os valores experimentais reportados nos artigos de Okuno [3], Tsukitani [4] e Kato [5].

## TEORIA

Espalhamento Raman estimulado (SRS, *stimulated Raman scattering*) é um processo não linear importante que pode transformar fibras ópticas em amplificadores Raman de banda larga e lasers Raman sintonizáveis.

Em muitos meios não lineares o espalhamento Raman espontâneo converte uma pequena fração ( $\sim 10^{-6}$ ) da onda incidente para uma outra onda a uma frequência deslocada de um valor determinado pelos modos vibracionais do meio. Este processo é o denominado efeito Raman e é descrito pela

<sup>1</sup> Laércio Alves Nogueira, Universidade Presbiteriana Mackenzie, R. da Consolação, 896, 01302-907, S. Paulo, SP, Brasil, lanogueira@telespcelular.com.br

<sup>2</sup> Luiz Sérgio Zasnicoff, Universidade Presbiteriana Mackenzie, Rua da Consolação, 896, 01302-907, S. Paulo, SP, Brasil, lszasnicoff@mackenzie.com.br

mecânica quântica como o espalhamento de um fóton incidente por uma molécula para um fóton de frequência menor enquanto ao mesmo tempo as moléculas fazem uma transição entre seus dois estados vibracionais. A onda incidente atua como bombeio para gerar a radiação com frequência deslocada chamada onda Stokes.

O crescimento inicial da onda Stokes é descrito por:

$$\frac{dI_s}{dz} = g_R I_p I_s \quad (1)$$

onde  $I_s$  é a intensidade de Stokes,  $I_p$  é a intensidade de bombeio e  $g_R$  é o coeficiente de ganho Raman. O coeficiente de ganho Raman está relacionado à parte imaginária da suscetibilidade não linear de terceira ordem.

A interação entre as ondas Stokes e a onda de bombeamento é dada pelas seguintes equações:

$$\frac{dI_s}{dz} = g_R I_p I_s - \alpha_s I_s \quad (2)$$

$$\frac{dI_p}{dz} = -\frac{\omega_p}{\omega_s} g_R I_p I_s - \alpha_p I_p \quad (3)$$

onde os coeficientes de absorção  $\alpha_s$  e  $\alpha_p$  representam as perdas nas fibras, nas frequências do bombeio e Stokes.

Estas equações podem ser derivadas rigorosamente utilizando as equações de Maxwell. A propriedade Raman de uma fibra óptica é representada pelo fator de amplificação Raman  $G_R$  (1/W/km). O coeficiente de ganho Raman,  $g_R$  (m/W) dividido pela área efetiva,  $A_{eff}$ , resulta no fator de ganho de Raman. Partindo-se da equação do fator de amplificação de Raman [6], dado pela equação (4), chega-se à equação da intensidade de sinal  $I_s(z)$  local a uma distância  $Z$  (km):

$$G_A = \frac{I_s(L)}{I_s(0)\exp(-\alpha_s L)} = \exp(g_R P_0 L_{eff} / A_{eff}) \quad (4)$$

onde:  $0 < z \leq L'$ , na primeira fibra.

$$I_s(z) = I_s(0)\exp[-a'_s + G_R P_p A e^{-a_p(L-L')} e^{-a'_p L'} \cdot (e^{a'_p z} - 1) / a'_p] \quad (5)$$

onde:  $L' < z \leq L$ , na segunda fibra.

$$I_s(z) = B I_s(L')\exp[-a'_s(z-L') + G_R P_p A e^{-a_p(L-L')} \cdot (e^{a'_p(z-L')} - 1) / a'_p] \quad (6)$$

onde  $A$  e  $B$  são valores lineares de perda na emenda entre as duas fibras e  $L_{eff}$  é conhecido como comprimento efetivo de interação, e é dado por:

$$L_{eff} = \frac{1}{\alpha_p} [1 - \exp(-\alpha_p L)] \quad (7)$$

O circuito da configuração híbrida é mostrado na figura 1, segundo a montagem utilizada por Okuno em 2001 e Kato, 1999.

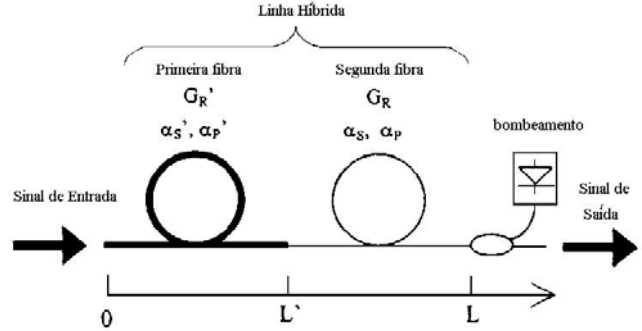


FIGURA 1.  
CONFIGURAÇÃO HÍBRIDA COM DRA E BOMBEIO REVERSO.

## SIMULAÇÕES

O *software* VPI disponibiliza para simulações modelos de fibras ópticas, dos quais foi utilizado nas simulações um modelo denominado de fibra NLS bidirecional (*Nonlinear Dispersive Fiber*, NLS). Este modelo de fibra simula a transmissão de um sinal não linear de banda larga em fibras ópticas, levando em consideração o fluxo de sinal bidirecional, espalhamento de Rayleigh múltiplo, espalhamento Raman estimulado e espontâneo, não linearidades de Kerr e efeitos de dispersão. O método de cálculo numérico utilizado é o “*split-step Fourier*”.

Com este *software* da VPI, o circuito mostrado na figura 1 foi implementado utilizando-se os blocos operacionais internos ao programa, e simulado com a configuração indicada na figura 2. Esta configuração representa o circuito real experimentado. O diagrama de blocos ilustra os componentes típicos existentes na biblioteca do VPI. Podemos notar os transmissores laser da banda C (1530-1570 nm), os lasers de bombeio DRA reversos, analisadores de espectro, trechos de fibras ópticas, osciloscópios etc.

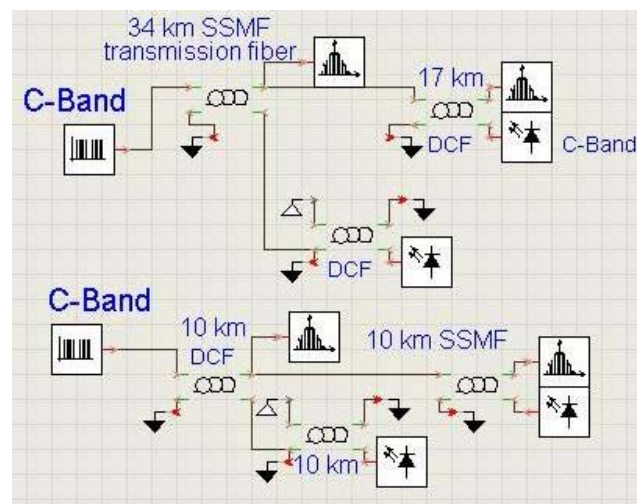


FIGURA 2  
CIRCUITO COM CONFIGURAÇÃO HÍBRIDA UTILIZADO PELO VPI.

Os parâmetros estabelecidos foram os mesmos utilizados pelos autores [3,4,5].

O enlace do primeiro trecho-circuito da figura 2 é composto por uma fibra SMF de 34 km acoplada a uma fibra DCF de 17 km. Para o segundo circuito da mesma figura 2, os dois comprimentos das duas fibras possuem 10 km, cada.

A figura 3 mostra a distribuição de potência do sinal observada pelo *Visualizer* do software VPI.

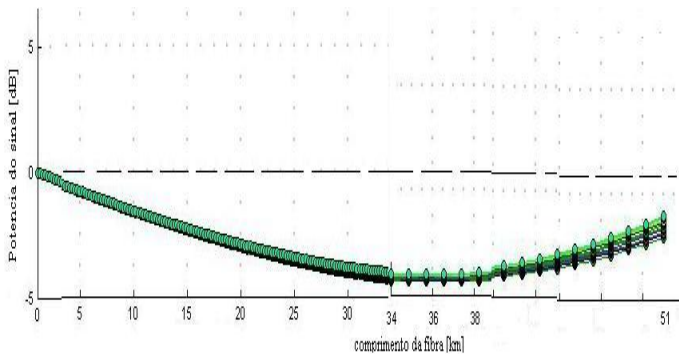


FIGURA 3

VARIAÇÃO DO SINAL DE ENTRADA NA FIBRA AO LONGO DO ENLACE DE 51 KM; ORDEM DA CONFIGURAÇÃO SMF NA FRENTE DA DCF.

Na figura 4, o sinal é observado internamente às duas fibras, no trecho de 10 km cada.

Duas configurações híbridas foram simuladas: a primeira, com 34 km de fibra SMF no primeiro trecho, e outra com 17 km adicionais de fibra DCF no segundo trecho; a segunda configuração utilizando utiliza um trecho de fibra DCF com 10 km de comprimento, à frente de um trecho de fibra SMF, também com 10 km.

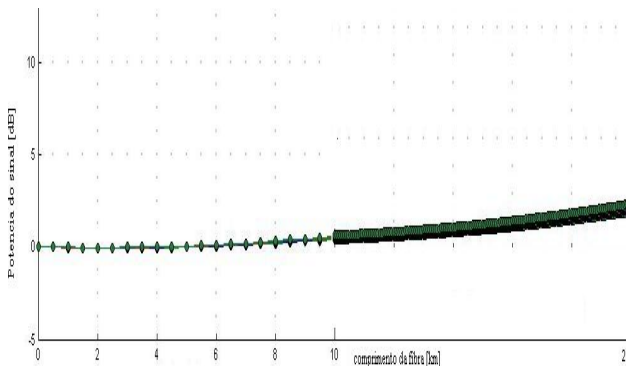


FIGURA 4

VARIAÇÃO DO SINAL DE ENTRADA NA FIBRA AO LONGO DO ENLACE DE 20 KM; ORDEM DA CONFIGURAÇÃO DCF NA FRENTE DA SMF.

Os parâmetros estabelecidos para as simulações são mostrados nas tabelas I e II.

TABELA I  
PARÂMETROS UTILIZADOS NA PRIMEIRA CONFIGURAÇÃO

	$\alpha_s$	L
Primeira fibra SMF	0,2	34 km
Segunda fibra DCF	0,3	17 km

TABELA II  
PARÂMETROS UTILIZADOS NA SEGUNDA CONFIGURAÇÃO

	$\alpha_s$	L
Primeira fibra DCF	0,3	10 km
Segunda fibra SMF	0,2	10 km

Os valores de bombeio utilizados foram de 20,4 dBm para as duas configurações.

O coeficiente  $\alpha_s$  adotado para a fibra DCF é de 0,26, e para a fibra SMF, é 0,20.

Os resultados ficaram muito próximos dos obtidos por Okuno em seu trabalho de 2001 [3].

A figura 3 mostra que a variação do sinal, para um enlace híbrido de aproximadamente 50 km, tem variação máxima de cerca de 5 dB.

Na figura 4, com a sugestão dada por Okuno de se utilizar a fibra DCF à frente da SMF, e para um enlace de 20 km, o amplificador Raman praticamente eliminou as perdas do sistema: a variação do sinal ficou abaixo de 2 dB.

Os resultados experimentais simulados com o software VPI mostram concordância com os valores calculados e simulados por Okuno e colaboradores.

## CONCLUSÕES

Uma nova configuração híbrida de fibras ópticas foi analisada por meio de simulação utilizando o software VPI. O sistema utilizou um laser de bombeio para originar o DRA, com o esquema de bombeamento reverso. Os valores obtidos indicam que a perda de energia do sinal pode ser confinada para valores menores que 2 dB, em enlaces de até 20 km de extensão, ou para menos que 5 dB, em enlaces de até 51 km.

Os resultados experimentais validam o uso da configuração para compensar perdas nas fibras e uso adequado em sistemas práticos.

Com as ferramentas do software VPI, específicas para comunicações ópticas, foi possível medir todas as variações dos sinais internamente às fibras dos enlaces, e observar o comportamento de suas possíveis interações. A utilização do software tornou o experimento mais rápido e confiável, pois o método de cálculo numérico utilizado por ele, “split-step Fourier” está sendo amplamente usado em implementações similares. Com os resultados obtidos através do VPI temos segurança em propor a configuração para implementação prática para a diminuição das perdas em sistemas de grande capacidade.

O software VPI tem enorme potencial para o ensino, e pesquisa na área de sistemas comunicações ópticas.

## REFERENCES

- [1] Takachio, N.; Suzuki, H., "Application of Raman-Distributed Amplification to WDM Transmission Systems Using 1.55- $\mu\text{m}$  Dispersion-Shifted Fiber", *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 19, No. 1, January 2001.
- [2] Forghieri, F.; Tkach, R. W., Chraplyvy A. R., "Bandwidth of cross talk in Raman amplifiers", *Proc. Optical Fiber Communications Conf.*, 1994, Paper FC6, pp. 294-295.
- [3] Okuno, T.; Tsuzaki, T.; Nishimura, M., "Novel Optical Hybrid Line Configuration for Quasi-Lossless Transmission by Distributed Raman Amplification", *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 13, No. 8, August 2001.
- [4] Tsukitani, M.; Kato, T.; Yanada, E., Hirano, M.; Nakamura M.; Ohga Y.; Onishi M.; Sasaoka, E.; Makio, Y.; Nishimura, M., "Low-loss dispersion-flattened hybrid transmission lines consisting of low-nonlinearity pure silica core fibers and dispersion compensating fibers", *Electronics Letters*, Vol. 36, No. 1, pp. 64-66, 2000.
- [5] Kato, T.; Hirano M.; Onishi, M.; Nishimura, M., "Ultra-low nonlinearity low-loss pure silica core fiber for long-haul WDM transmission", *Electronics Letters*, Vol. 35, No. 19, pp. 1615-1617, 1999.
- [6] Agrawal, G., P., *Nonlinear Fiber Optics*, New York: Academic, 1995.