

# MISTURA DE QUATRO ONDAS EM SISTEMAS WDM UTILIZANDO FIBRAS DS

Márcio Freitas, Luiz de Calazans Calmon, Renato Tannure R. Almeida  
Departamento de Engenharia Elétrica – Universidade Federal do Espírito Santo – UFES  
Caixa Postal 01-9011, CEP: 29060-970, Vitória – ES – Brasil  
Tel.: 027-3352644, Fax: 027-3352737, [mfreitas@ele.ufes.br](mailto:mfreitas@ele.ufes.br)

*Sumário – A influência do efeito da mistura de quatro ondas no desempenho de sistemas WDM, que utilizam fibras de dispersão deslocada, é analisada neste trabalho. Para isto, utilizou-se dois modelos, um analítico e outro baseado na solução numérica da equação não-linear de Schrödinger. Através destes modelos foram feitas análises do nível de potência dos sinais gerados e simulações que levavam em consideração variação do número de canais do sistema, bem como o comprimento de onda dos canais originais.*

## 1. INTRODUÇÃO

O desempenho de sistemas de comunicações óticas, que utilizam a multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM) para aumentar a capacidade de transmissão e os amplificadores óticos para aumentar o alcance do enlace sem a necessidade de regeneração, podem ser muito afetados pela degradação dos sinais devido aos efeitos não-lineares de 3ª ordem [1].

Em trabalhos anteriores, a influência de alguns destes efeitos não-lineares no desempenho de sistemas óticos foram analisados: auto-modulação de fase (SPM) [2,5], modulação cruzada de fase (XPM) [3,5] e espalhamento estimulado de Ramam (SRS) [4].

Uma outra fonte importante de degradação dos sinais em sistemas WDM é a mistura de quatro ondas (FWM). A FWM se torna uma fonte significativa de interferência entre canais sempre que o espaçamento entre eles e a dispersão sejam suficientemente pequenas para satisfazer a condição de casamento de fase (2). Em fibras com alto valor de dispersão, o efeito de FWM pode ser desconsiderado devido a baixa eficiência da FWM causado pelo descasamento de fase [6]. Para as fibras com dispersão deslocada (DS), onde a dispersão é muito baixa, a eficiência da FWM torna-se alta, provocando uma forte atuação do efeito de FWM no desempenho do sistema WDM.

O objetivo deste trabalho é analisar a atuação da FWM em fibras DS. Na seção 2 são descritos os dois modelos utilizados neste trabalho, um modelo analítico que descreve o nível de potência de uma banda lateral FWM, e um modelo baseado na solução numérica da equação que governa a propagação de sinais óticos em uma fibra. Na seção 3 são analisados os níveis de potência dos sinais gerados pela FWM, enquanto na seção 4 a penalidade em alguns sistemas WDM sob a atuação da FWM é analisado.

## 2. MODELO MATEMÁTICO

A mistura de quatro ondas é um efeito não linear de terceira ordem e é causada pela dependência do

índice de refração da fibra com a intensidade ótica do sinal que se propaga, tal como a SPM e a XPM [1].

Para duas ondas copropagantes, o batimento entre os dois canais gera bandas laterais nas frequências  $2f_i - f_j$  e  $2f_j - f_i$ , onde  $f_i$  e  $f_j$  são as frequências dos canais originais. No caso de três ondas se propagando com frequências  $f_i$ ,  $f_j$  e  $f_k$ , elas irão interagir e gerar outras 9 ondas em frequências:

$$f_{ijk} = f_i + f_j - f_k, \text{ para } k \neq i, j \quad (1)$$

A condição de casamento de fase para que este processo ocorra, é que as constantes de propagação das ondas envolvidas na mistura satisfaçam a seguinte relação para  $\Delta\beta = 0$ :

$$\Delta\beta = \beta_i + \beta_j - \beta_k - \beta_{ijk} \quad (2)$$

### A - Modelo Analítico

Considerando o pior caso, para ondas copolarizadas, e assumindo que os sinais de entrada não são depletados pela geração das bandas laterais, a potência de pico do sinal gerado é dada por [6]-[8]:

$$P_{ijk} = \left( \frac{D \cdot \gamma \cdot L_e}{3} \right)^2 \cdot P_i \cdot P_j \cdot P_k \cdot \eta \cdot e^{-\alpha L} \quad (3)$$

onde  $D = 3$  para 2 canais e  $D=6$  para 3 canais,  $\gamma$  é o coeficiente de não-linearidade,  $\alpha$  é o coeficiente de atenuação da fibra,  $L$  é o comprimento da fibra,  $L_e$  é o comprimento efetivo da fibra e  $P_i$ ,  $P_j$  e  $P_k$  são as potências de entrada dos sinais nas frequências  $f_i$ ,  $f_j$  e  $f_k$ , respectivamente.

O comprimento efetivo da fibra é dado por

$$L_e = \frac{1 - e^{-\alpha L}}{\alpha} \quad (4)$$

A eficiência,  $\eta$ , de FWM é

$$\eta = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + \Delta\beta} \cdot \left( 1 + \frac{4 \cdot e^{-\alpha L} \sin^2(\Delta\beta \cdot L/2)}{(1 - e^{-\alpha L})^2} \right) \quad (5)$$

onde o fator de casamento de fase,  $\Delta\beta$ , devido a dispersão e o espaçamento entre os canais é dada por

$$\Delta\beta = \frac{2\pi\lambda^2}{c} (f_i - f_k) \cdot (f_j - f_k) \cdot \left( D_c(\lambda) - \frac{\lambda^2}{c} \cdot \left( \frac{f_i + f_j}{2} - f \right) \cdot \frac{dD_c(\lambda)}{d\lambda} \right) \quad (6)$$

De acordo com [8], para a inclusão dos efeitos de SPM e XPM em (3), deve-se considerar a dependência com a intensidade ótica no fator de casamento de fase. Uma nova forma para o fator de casamento de fase é dada, então por

$$\Delta\beta' = \Delta\beta - \gamma \cdot (P_i + P_j - P_k) \cdot \frac{1 - e^{-\alpha L_e}}{\alpha \cdot L_e} \quad (7)$$

B – Modelo Numérico.

O modelo utilizado neste trabalho para simular uma fibra ótica monomodo se baseia na solução numérica de (8), o qual inclui perdas por atenuação, dispersão cromática, SPM, XPM e FWM. A equação que rege a propagação dos sinais é dada por

$$\frac{\partial A}{\partial z} - \frac{i}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} - \frac{1}{6} \beta_3 \frac{\partial^3 A}{\partial t^3} + \frac{\alpha}{2} A = -\frac{in_2 \omega_1}{cA_{eff}} |A|^2 \quad (8)$$

Onde  $A$  é a amplitude de variação lenta,  $\beta_2$  é o coeficiente de dispersão de 1ª ordem,  $\beta_3$  é o coeficiente de dispersão de 2ª ordem,  $n_2$  é o índice de refração não-linear da fibra e  $A_{eff}$  é a área efetiva.

A solução numérica de (8) é realizada através do método split-step de Fourier [1].

### 3. ANÁLISE DOS NÍVEIS DE POTÊNCIA

Para comparação dos modelos utilizaremos uma fibra DS com os seguintes dados:

Atenuação (dB/Km)	0.24
$A_{eff}$ ( $\mu\text{m}^2$ )	52
$\lambda_o$ (nm)	1550
$S_o$ (ps/nm <sup>2</sup> km)	0.075
D (ps/nm.km)	$S_o(\lambda - \lambda_o)$

Tabela 1 – Parâmetros da fibra DS utilizada

Considerando inicialmente um sistema WDM com dois canais CW propagando-se em um enlace de 80 Km, sendo a frequência de um dos canais (aqui chamado de  $f_i$ ) fixa em 193.1 THz (1553.6 nm), enquanto a frequência do outro canal,  $f_j$ , é variada. Pode-se ver na Fig. 1 a potência das 2 bandas laterais geradas.

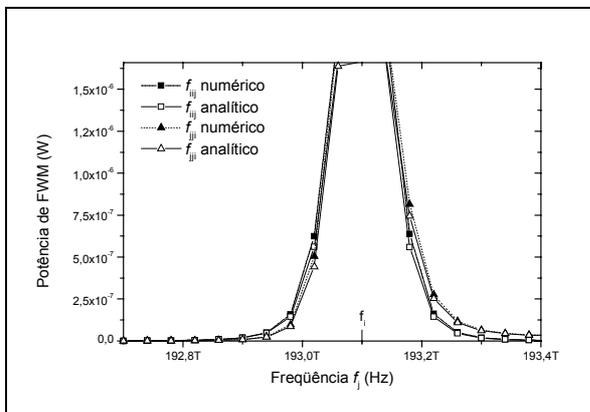


Figure 1 – Potência de FWM das duas bandas laterais geradas em  $2f_i - f_j$  e  $2f_j - f_i$  em função da frequência  $f_j$ , para uma fibra de 80 km. A frequência  $f_i$  está fixa em 193.1 THz (1553.6 nm) e a potência de cada canal é 7 dBm.

Os resultados mostram uma boa concordância entre os modelos numérico e analítico. Conforme se vê na Fig. 1, a medida que o espaçamento entre os canais diminui, a potência de FWM dos sinais aumenta devido à eficiência de FWM.

A Fig. 2 mostra a variação das potências de FWM com relação a potência média de entrada dos canais CW ( $i$  e  $j$ ) mantendo-se fixo os dois canais em 192.55 THz (1558 nm) e 192.46 THz (1558.8 nm), respectivamente. Conforme se esperava o aumento da potência dos sinais, aumentou a influência dos efeitos não-lineares e conseqüentemente a potência de FWM das bandas laterais geradas. O fato de a potência de  $2f_i - f_j$  (1557.3 nm) ser maior do que a de  $2f_j - f_i$  (1559.5 nm) se deve àquela banda lateral estar mais próxima do ponto de dispersão zero, o que proporciona uma melhor condição de casamento de fase, conseqüentemente uma melhor eficiência de FWM.

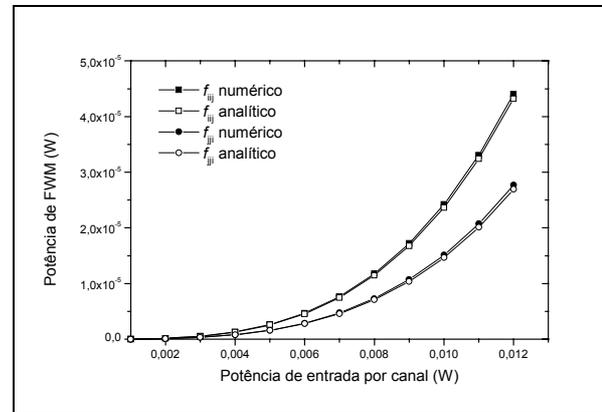


Figure 2 – Potência de FWM das duas bandas laterais geradas em  $2f_i - f_j$  e  $2f_j - f_i$  em função da potência média dos canais, para uma fibra de 20 km. A frequência  $f_i$  está fixa em 192.55 THz (1558 nm) e  $f_j$  em 192.46 THz (1558.8 nm).

Para um caso com três canais se propagando pela fibra, dois canais ( $f_i$  e  $f_k$ ) foram mantidos fixos, respectivamente, nas seguintes frequências 193.1 THz (1553.6 nm) e 193.25 THz (1552.4 nm), enquanto a frequência do outro canal,  $f_j$ , é variada. Na Fig. 3 pode-se ver a potência de 4 produtos de FWM gerados. Como pode-se notar, há uma diferença considerável entre os resultados numéricos e analíticos obtidos para algumas bandas laterais no ponto em que a frequência  $f_j$  é igual à 192.8 THz. Isto se deve basicamente ao fato de que, para  $f_j$  nesta frequência, a configuração das frequências  $f_i$ ,  $f_j$  e  $f_k$  gera algumas bandas laterais coincidentes, desta forma uma banda lateral interfere, construtivamente ou não, em outra banda. Como na solução numérica não é possível a separação da contribuição de cada banda lateral que caia na mesma frequência, ocorre esta diferença de resultados entre os modelos. De acordo com (1) as frequências das 9 bandas laterais geradas (para  $f_j = 192.8$  THz) seriam: 192.65 THz ( $f_i + f_j - f_k$ ), 192.95 THz ( $f_i + f_j - f_k$ ), 192.35 THz ( $f_j + f_j - f_k$ ), 192.95 THz ( $f_k + f_j - f_i$ ), 193.55 THz ( $f_k + f_i - f_j$ ), 193.7 THz ( $f_k + f_j - f_i$ ), 193.4 THz ( $f_k + f_k - f_i$ ), 193.4 THz ( $f_i + f_i - f_j$ ), 192.5 THz ( $f_j + f_j - f_i$ ).

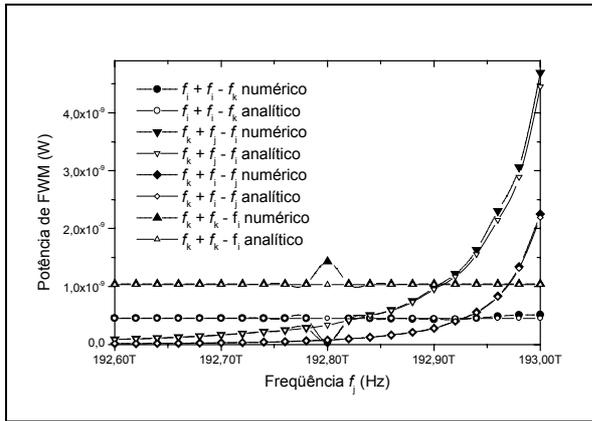


Figura 3 – Potência de FWM de quatro bandas laterais geradas em função da frequência  $f_j$ , para uma fibra de 80 km. A frequência  $f_i$  está fixa em 193.1 THz (1553.6 nm), enquanto  $f_k$  está fixa em 193.25 THz (1552.4 nm) e a potência de cada canal é 0 dBm.

#### 4. PENALIDADE DE FWM EM SISTEMAS ÓTICOS.

O sistema IM-DD em estudo é descrito na Fig. 4 sendo composto de um enlace com oito trechos de fibra DS com amplificadores óticos (sem a inclusão de ruído). O comprimento total do enlace é de 640 Km, com amplificadores espaçados em intervalos de 80 Km. Cada canal transmite uma seqüência de 128 pulsos pseudo-aleatórios, formato NRZ, à uma taxa de 10 Gb/s. A penalidade é obtida através da abertura do diagrama de olho em relação a situação “back-to-back”.

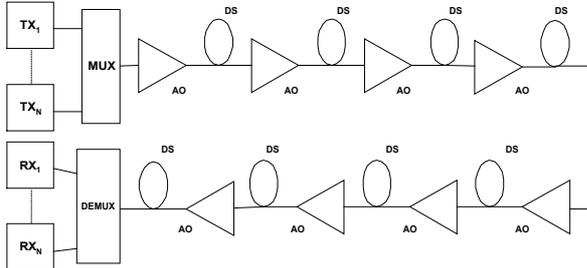


Figura 4 – Configuração do sistema

Para verificar a influência do número de canais no efeito de FWM, foi propagado inicialmente um único canal alocado no comprimento de onda de 1553.6 nm (que é considerado o canal central) e foi acrescentado após cada simulação mais um canal com separação de 100 GHz para os canais vizinhos mais próximos, até o sistema chegar a 8 canais. Portanto o comprimento de onda dos 8 canais serão 1553,6 nm, 1554,4 nm, 1552,8 nm, 1555.2 nm, 1552 nm, 1556 nm, 1551.2 nm e 1556.8nm.

Pode-se ver na Fig. 5 os resultados da penalidade do canal central fixo em 1553,6 nm encontrados para três potências de pico diferentes (0, 7 e 10 dBm). Para 0 dBm a penalidade aumenta com o número de canais até o sistema chegar a ter 5 canais, sofrendo pequenas variações de penalidade a partir deste número de canais. Com o aumento dos níveis de potência para 7 dBm e 10 dBm há um grande aumento da penalidade, ocorrendo inclusive o fechamento total do digrama de olho, limitando o número de canais do sistema WDM

à três, para a potência de 7 dBm, e à dois canais para 10 dBm, demonstrando a forte influência de FWM na degradação dos sinais e regiões de baixa dispersão.

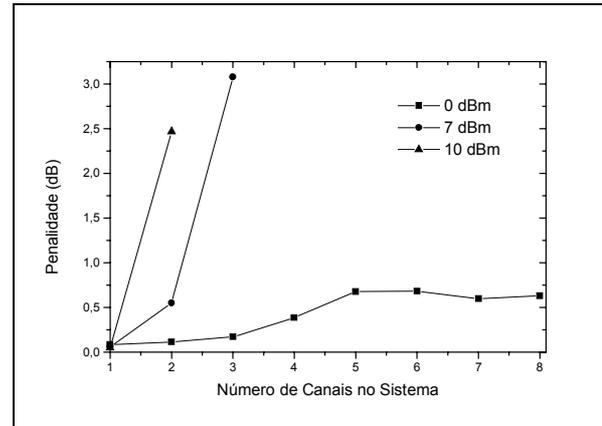


Figura 5 – Penalidade do canal central em função do número de canais em um sistema WDM para separação entre canais de 100 GHz, taxa de 10 Gb/s e diferentes potências de pico.

A penalidade por fechamento do diagrama de olho pode ser observado na Fig. 6, e refere-se ao caso de 1 e 2 canais para a potência de 10 dBm da Fig. 5.

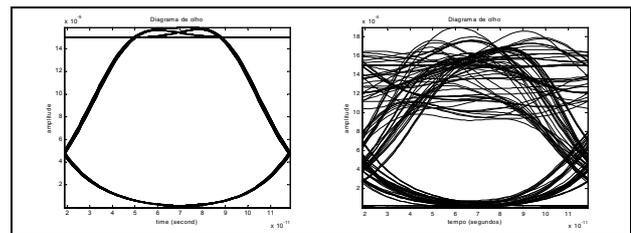


Figura 6 – Diagrama de olho referente ao caso anterior

Para visualizar a forte influência de FWM no caso anterior, repetiu-se as simulações, mas desta vez o modelo numérico utilizado baseou-se na solução das equações acopladas [3] que não incluem o efeito de FWM. Na Fig. 7 pode-se notar que considerando apenas SPM e XPM, a penalidade fica bem abaixo do encontrado na Fig. 5.

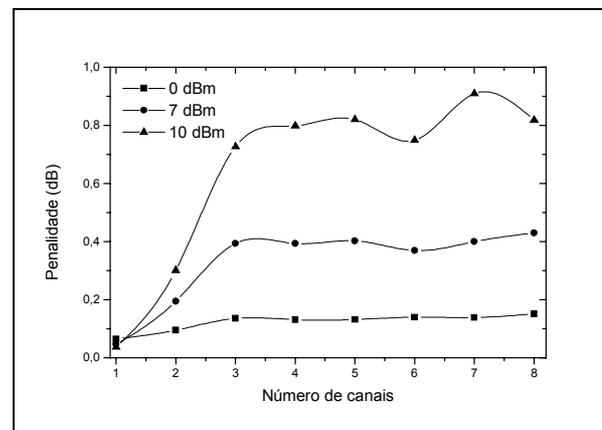


Figura 7 – Penalidade do canal central em função do número de canais em um sistema WDM, considerando apenas SPM e XPM, para separação entre canais de 100 GHz, taxa de 10 Gb/s e diferentes potências de pico.

Finalizando esta análise, foi simulado um sistema WDM com 4 canais variando-se o comprimento de

onda dos canais, mas mantendo-se a posição relativa dos canais ( $\lambda_1, \lambda_2 = \lambda_1 + \lambda_c, \lambda_3 = \lambda_1 - \lambda_c, \lambda_4 = \lambda_1 + 2 \cdot \lambda_c$ ) e o espaçamento entre eles. Desta forma pretendeu-se encontrar a região que apresentasse a menor penalidade para o sistema. A Fig. 8 mostra a penalidade do canal  $\lambda_1$  para as duas potências de pico utilizadas, 0 dBm e 10 dBm e espaçamento entre canais de 100 GHz ( $\lambda_c \cong 0.8nm$ ). Pode-se notar que numa região bem próxima do ponto de dispersão zero a penalidade tende a ser muito alta, principalmente para potências maiores, que se deve à alta eficiência de FWM. A medida que o sistema se afasta do ponto de dispersão zero, o aumento da dispersão causa uma diminuição da eficiência e consequentemente uma menor penalidade, mas aumentando-se ainda mais a dispersão, a penalidade volta a aumentar devido à dispersão ter se tornado o efeito dominante na degradação do sinal.

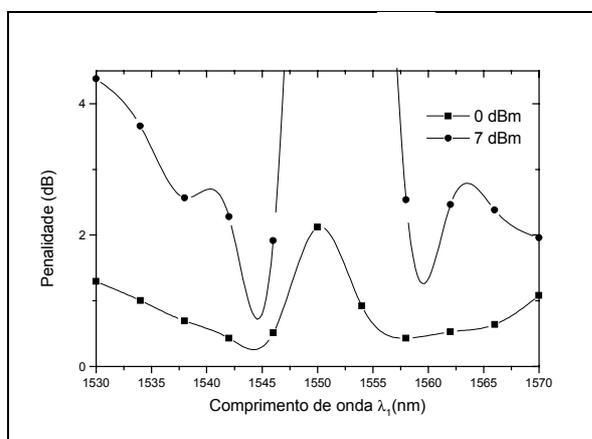


Figura 8 – Penalidade em um dos canais de um sistema WDM com 4 canais em função comprimento de onda deste, para uma separação entre canais de 100 GHz, taxa de 10 Gb/s e diferentes potências de pico.

## 5. CONCLUSÕES

Neste artigo, através de simulações, foi determinado a influência do número de canais e do espaçamento entre canais na atuação da mistura de quatro ondas uma fibra monomodo com dispersão deslocada. Verificou-se o aumento da potência dos sinais gerados por FWM com a diminuição do espaçamento entre canais e o aumento da potência dos canais originais.

Através da análise da penalidade por fechamento do diagrama de olho pode-se ver também que a influência do número de canais está ligado diretamente à região em que o sistema WDM está alocado. Quanto mais próximo do comprimento de onda de dispersão zero maior é a influência de FWM, tendendo a uma maior penalidade. Para se escolher a melhor região deve-se observar a relação entre os efeitos não-lineares e a dispersão.

## 6. REFERÊNCIAS

[1] G. P. Agrawal, "Nonlinear Fiber Optics", 2<sup>nd</sup>. Ed., NY, Academic Press, 1995.

[2] M. Freitas, R. T. Almeida, M. R. N. Ribeiro e L. C. Calmon, "Limits on Bit Rate Capacity Improvement Induced by SPM in Installed Standard Fiber Links at 1550nm", International Telecommunication Symposium IEEE, ITS'98, São Paulo, Brazil, 10-13 August 1998, pp 606-610.

[3] M. Freitas, L. de C. Calmon, R. T. R. Almeida, "Análise da Interferência entre Canais Causado pelo Efeito de Modulação Cruzada de Fase em Sistemas WDM", Simpósio Brasileiro de Telecomunicações SBT'99, Vila Velha, ES, pp 639-642.

[4] S. P. Neves, R. T. R. Almeida, M. Freitas, L. C. Calmon. "SRS and XPM in 32 Channel Multi-amplified WDM Optical Systems with DS Fibers at 10 Gb/s", Simpósio Brasileiro de Telecomunicações SBT'2000

[5] M. Freitas, "Modulação Não-Linear de Fase em Sistemas Ópticos", Dissertação de Mestrado, UFES, janeiro de 2000.

[6] R. M. Oliveira, "Níveis de Potência De FWM em Sistemas Ópticos WDM", Projeto de Graduação, UFES, Dezembro de 1997.

[7] k. Inoue and H. Toba, "Fiber Four-Wave Mixing in Multi-amplifier Systems with Chromatic Dispersion". J. Lightwave Technology, vol. 13, pp. 8993, January 1995.

[8] S. Song, C. T. Allen, K. R. Demarest, and R. Hui, "Intensity-Dependent Phase-Matching Effects on Four-Wave Mixing In Optical Fibers". J. Lightwave Technology, vol. 17, n° 11, pp. 2285-2290, November 1999.