

INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE CANAIS E ESPAÇAMENTO ENTRE CANAIS NA ATUAÇÃO DA MODULAÇÃO CRUZADA DE FASE EM SISTEMAS WDM

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

Sumário – A influência do número de canais e do espaçamento entre eles, em uma fibra padrão, é analisada através de sua resposta em frequência e de sua penalidade obtida através do fechamento do diagrama de olho em relação a situação “back to back”. Para isto foi utilizado um modelo baseado na solução numérica da equação não-linear de Schrödinger.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos a tecnologia de multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM) vem sendo extensivamente empregada nos sistemas óticos. Isto se deve basicamente ao fato dos sistemas WDM proporcionarem um maior aproveitamento da largura de banda fornecida pelas fibras óticas através da inserção de vários canais de transmissão simultaneamente em uma mesma fibra ótica, sendo cada canal em um comprimento de onda distinto.

Este aumento da capacidade de transmissão aliado ao aumento da intensidade ótica na fibra, devido também ao surgimento dos amplificadores óticos, causaram uma maior influência dos efeitos não-lineares no desempenho dos sistemas. Estes efeitos não-lineares incluem [1]: (1) o espalhamento estimulado de Raman (SRS), (2) o espalhamento estimulado de Brillouin (SBS), (3) a auto-modulação de fase (SPM), (4) a modulação cruzada de fase (XPM) e (5) a mistura de quatro ondas (FWM).

Como visto em [2] o efeito de modulação cruzada de fase pode provocar grandes distorções em sistemas WDM que utilizam fibras padrão e estas distorções aumentam significativamente com a diminuição da separação entre os canais, e serão tanto maiores quanto maiores forem as frequências de modulação (taxas de bits). Também pôde-se notar que aparentemente a degradação induzida por XPM não aumenta significativamente com o aumento do número de canais no sistema WDM.

Neste trabalho, será analisado com maior profundidade a influência do número de canais, aliado ao espaçamento entre os canais, na interferência causada pelo efeito de XPM tanto na resposta em frequência quanto na análise da penalidade por diagrama de olho.

2. ANÁLISE DA RESPOSTA EM FREQUÊNCIA PARA SISTEMAS WDM COM N CANAIS

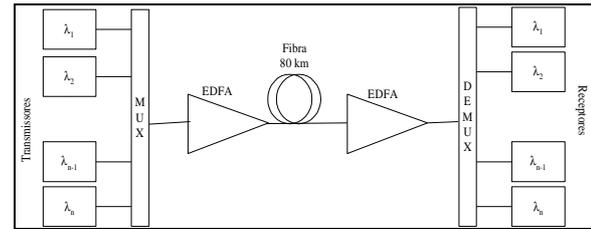


Figura 1 - Diagrama esquemático do sistema proposto para análise.

Conforme visto em [2,3], para sistemas WDM com n canais, as equações acopladas são generalizadas para os n canais e são escritas da seguinte forma:

$$\frac{\partial A_1}{\partial z} + b_{11} \frac{\partial A_1}{\partial t} + \frac{i}{2} b_{21} \frac{\partial^2 A_1}{\partial t^2} - \frac{1}{6} b_{31} \frac{\partial^3 A_1}{\partial t^3} + \frac{a}{2} A_1 = \frac{in_2 w_1}{cA_{eff}} \left[|A_1|^2 + \sum_{j=1}^n 2|A_j|^2 \right] A_1$$

$$\vdots$$

$$\frac{\partial A_n}{\partial z} + b_{1n} \frac{\partial A_n}{\partial t} + \frac{i}{2} b_{2n} \frac{\partial^2 A_n}{\partial t^2} - \frac{1}{6} b_{3n} \frac{\partial^3 A_n}{\partial t^3} + \frac{a}{2} A_n = \frac{in_2 w_n}{cA_{eff}} \left[|A_n|^2 + \sum_{j \neq n}^n 2|A_j|^2 \right] A_n$$

Onde A_j é a amplitude de variação lenta ($j = 1, \dots, n$), $\beta_{1j} = 1/v_{gj}$, v_{gj} é a velocidade de grupo, β_{2j} é o coeficiente de dispersão de 1ª ordem, β_{3j} é o coeficiente de dispersão de 2ª ordem, n_2 é o coeficiente de não-linearidade da fibra e A_{eff} é a área efetiva.

O procedimento para se obter a intensidade de modulação induzida por um sistema de n canais é feito através da propagação de n canais por um enlace de fibra ótica, sendo que o canal 1 é CW e os $(n-1)$ canais restantes são modulados por uma onda senoidal de frequência ω (procura-se centralizar o canal CW em relação aos outros canais). Após a propagação por 80 km de fibra, o espectro de frequência do canal 1 é analisado e o valor induzido na frequência ω é encontrado. Como parâmetro de medição da interferência dos canais vizinhos no canal CW utilizamos o índice de intensidade de modulação (IM) normalizada definido como $\left| \tilde{P}_{XPM}(\mathbf{w}) / \tilde{P}_n(\mathbf{w}) e^{-aL} \right|$ [4].

Para esta análise utilizou-se uma fibra monomodo padrão com os seguintes parâmetros assumidos: atenuação ($\alpha=0.21$ db/km), área efetiva ($A_{eff}= 80 \mu\text{m}^2$) e coeficiente de não-linearidade ($n_2=2.45 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$).

Simulou-se sistemas com 2, 3, 4, 5 e 6 canais, sendo que o canal 1 (CW) foi mantido fixo em 1550 nm.

Para uma separação simétrica entre os canais de 25 GHz os outros canais foram alocados em: canal 2 ($\lambda_2 = 1550.2$ nm), canal 3 ($\lambda_3 = 1549.8$ nm), canal 4 ($\lambda_4 = 1550.4$ nm), canal 5 ($\lambda_5 = 1549.6$ nm) e canal 6 ($\lambda_6 = 1550.6$ nm). A potência média por canal, neste caso é de 7dBm. Os resultados encontrados estão na fig. 2.

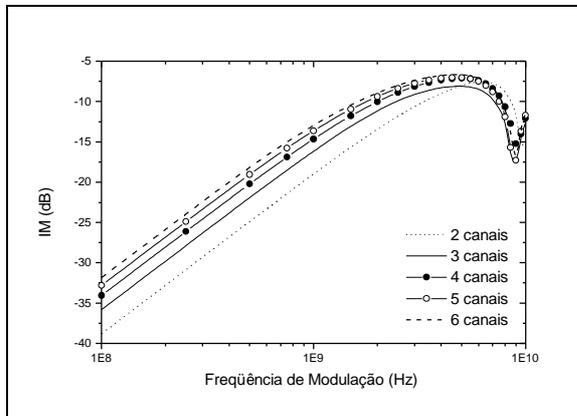


Figura 2 - Índice de intensidade de modulação normalizada em dB versus a frequência de modulação para sistemas com n canais (n = 2,...,6) para uma potência média de 7 dBm por canal e separação entre canais de 25 GHz.

Como pode-se ver na fig. 2, para frequências de modulação menores que 4 GHz há um aumento da intensidade induzida com o aumento do número de canais. Para frequências maiores que 4 GHz há um comportamento diferente devido ao descasamento de fase entre as diferentes contribuições de cada canal [3,4]. Outro fator importante a ser notado é a intensidade máxima induzida em cada sistema: para o sistema com dois canais $IM_{max} = -7.54$ dB, para 3 canais $IM_{max} = -8.09$ dB, para 4 canais $IM_{max} = -7.09$ dB, para 5 canais $IM_{max} = -7.00$ dB e 6 canais $IM_{max} = -6.65$ dB. Como pode-se ver, com exceção do sistema com 3 canais, houve um aumento da intensidade induzida máxima com o aumento do número de canais.

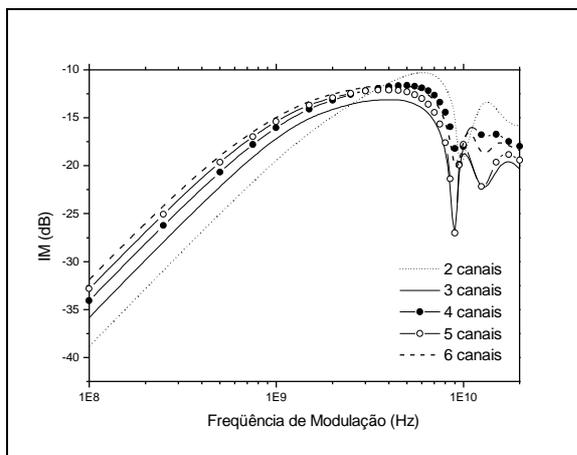


Figura 3 - Índice de intensidade de modulação normalizada em dB versus a frequência de modulação para sistemas com n canais (n = 2,...,6) para uma potência média de 7 dBm por canal e separação entre canais de 50 GHz.

Para um espaçamento entre os canais de 50 GHz os canais ficam alocados em: canal 2 ($\lambda_2 = 1550.4$

nm), canal 3 ($\lambda_3 = 1549.6$ nm), canal 4 ($\lambda_4 = 1550.8$ nm), canal 5 ($\lambda_5 = 1549.2$ nm) e canal 6 ($\lambda_6 = 1551.2$ nm). Sendo que o canal 1 continua fixo em 1550 nm. A potência média por canal, neste caso é de 7dBm. Os resultados encontrados são mostrados na fig. 3.

Novamente para as frequências mais baixas houve o aumento da intensidade induzida para o aumento do número de canais, havendo apenas uma diminuição no valor da frequência onde as curvas começam a se interceptar e o efeito do descasamento começa a ser notado. Neste caso, a frequência ficou em torno de 2 GHz. Esta fato, assim como o aumento das oscilações para as frequências maiores estão diretamente ligados ao aumento do efeito de desgarramento provocado pela maior separação entre os canais (como visto em [3] o aumento do efeito de desgarramento provoca um maior descasamento de fase entre as intensidades induzidas por cada canal). Os valores de intensidade máxima induzida para cada curva foram: para o sistema com dois canais $IM_{max} = -10.30$ dB, para 3 canais $IM_{max} = -13.13$ dB, para 4 canais $IM_{max} = -11.64$ dB, para 5 canais $IM_{max} = -12.11$ dB e 6 canais $IM_{max} = -11.59$ dB. Como pode-se ver a maior intensidade induzida ocorre para o sistema com dois canais, o que neste caso indica que para altas frequências de modulação o aumento do número de canais não provoca obrigatoriamente o aumento da intensidade induzida.

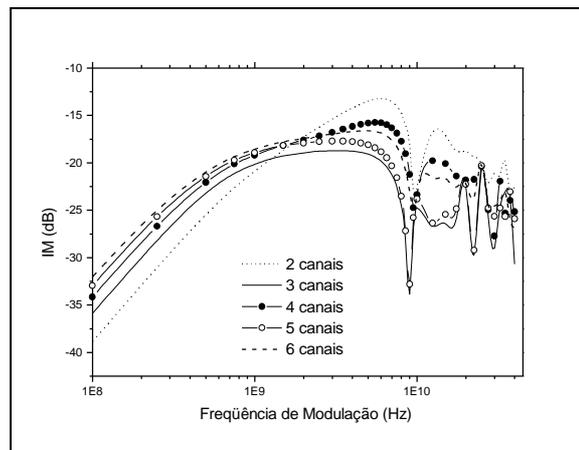


Figura 4 - Índice de intensidade de modulação normalizada em dB versus a frequência de modulação para sistemas com n canais (n = 2,...,6) para uma potência média de 7 dBm por canal e separação entre canais de 100 GHz.

Foi feita a mesma análise anterior para um espaçamento entre canais de 100 GHz. Desta vez os canais foram alocados em: canal 2 ($\lambda_2 = 1550.8$ nm), canal 3 ($\lambda_3 = 1549.2$ nm), canal 4 ($\lambda_4 = 1551.6$ nm), canal 5 ($\lambda_5 = 1548.4$ nm) e canal 6 ($\lambda_6 = 1552.4$ nm). O canal 1 continua em 1550 nm e a potência média em 7 dBm por canal.

Pode-se ver os resultados na fig. 4. Para baixas frequências, até 1 GHz, o aumento do número de canais causa um aumento da intensidade de modulação. Mais uma vez se nota o aumento do descasamento de fase com o aumento do espaçamento entre os canais. Os valores de intensidade induzida máxima para cada curva foram: para o sistema com dois canais $IM_{max} = -13.23$ dB, para 3 canais $IM_{max} =$

-18.71 dB, para 4 canais $IM_{max} = -15.76$ dB, para 5 canais $IM_{max} = -17.72$ dB e 6 canais $IM_{max} = -16.62$ dB. Como se vê o maior valor de intensidade induzida foi encontrado novamente para o sistema WDM com dois canais.

O que se pode concluir, em relação ao número de canais e a intensidade induzida, através dos gráficos de resposta em frequência aqui apresentados é que:

- para as frequências mais baixas o aumento do número de canais causam o aumento da intensidade induzida por XPM;
- Nas frequências mais altas o aumento do número de canais nem sempre significa aumento da intensidade induzida por XPM;
- O aumento do espaçamento entre os canais causa um maior descasamento de fase entre as intensidades induzidas pelos diferentes canais e diminui a intensidade máxima induzida por XPM.

3. IMPACTO DO EFEITO DE XPM EM SISTEMAS ÓTICOS PULSADOS

No item anterior foi visto a resposta em frequência de alguns sistemas óticos utilizando-se o índice de intensidade de modulação (IM) normalizada. Através dele, pode-se ter uma idéia da interferência causada por XPM entre os canais de um mesmo sistema.

Apesar de um mesmo sistema ter uma certa resposta em frequência que mostre um nível de interferência entre os canais, isto não pode ser traduzido diretamente em um aumento ou diminuição de penalidade sofrida pelo sistema. Como já foi demonstrado em [3,5], o aumento da influência dos efeitos não-lineares nem sempre causam um aumento de penalidade.

Na análise de resposta em frequência pode-se verificar que a intensidade induzida em um canal é causada principalmente pelos seus vizinhos mais próximos. Ocorrendo uma saturação para o aumento do número de canais. Para verificar esta saturação, só que agora em termos de penalidade obtida através do fechamento do diagrama de olho em relação a situação “back to back”, simulou-se primeiramente um sistema WDM com taxa de 10 Gb/s por canal, para uma fibra padrão com o comprimento de 80 km e com as mesmas características da fibra utilizada anteriormente na análise da resposta em frequência.

Propagou-se inicialmente um único canal localizado no comprimento de onda de 1550 nm e acrescentou-se após cada simulação mais um canal com separação de 50 GHz (1º caso) e 100 GHz (2º caso) entre os canais vizinhos mais próximos, até atingir-se um total de nove canais, Fig. 5. O trem de pulsos de cada canal consiste de 64 pulsos NRZ pseudo-aleatórios.

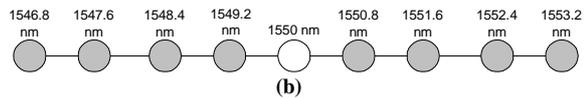
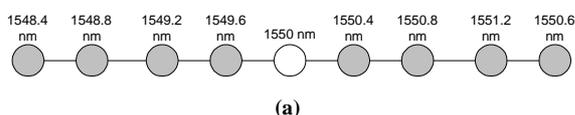


Figura 5 – Configuração dos canais para uma separação entre canais de (a) 50 GHz e (b) 100 GHz.

Devido a influência da configuração dos bits na penalidade causada por XPM [6], a simulação foi repetida para três conjuntos de seqüências diferentes para uma melhor análise da atuação do XPM.

Como se pode ver na Fig. 6, para uma separação entre canais de 50 GHz, há um crescente aumento da penalidade com o aumento do número de canais de 1 para 4 (seq. 1 e 2) e 1 para 6 (seq. 3). Após este aumento o que ocorre são pequenas oscilações que continuam com o aumento do número de canais. Provavelmente a penalidade irá se estabilizar em um valor para um número de canais acima de 9.

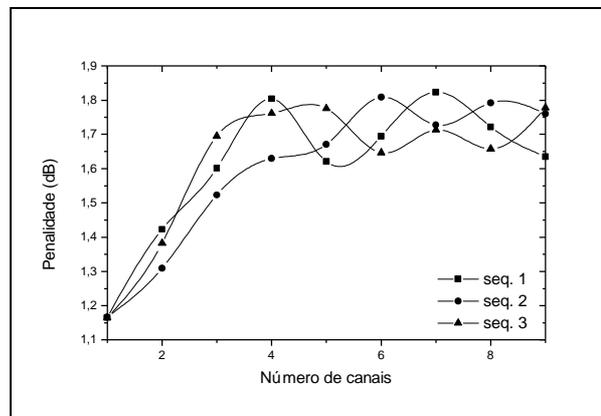


Figura 6 – Penalidade no canal central em função do número de canais para uma separação entre canais de 50 GHz, taxa de 10 GB/s e 7 dBm de potência média por canal.

Para 100 GHz de separação entre canais, Fig. 7, os valores encontrados para penalidade são menores que os encontrados para separação de 50 GHz, o que já era esperado devido ao aumento do efeito de desgarramento. O que se nota após o crescente aumento da penalidade com o número de canais é que as oscilações se apresentam mais suaves, tendendo a se estabilizar mais rápido que o sistema com separação entre canais de 50 GHz. Também pode-se ver uma maior diferença entre os resultados das diferentes seqüências.

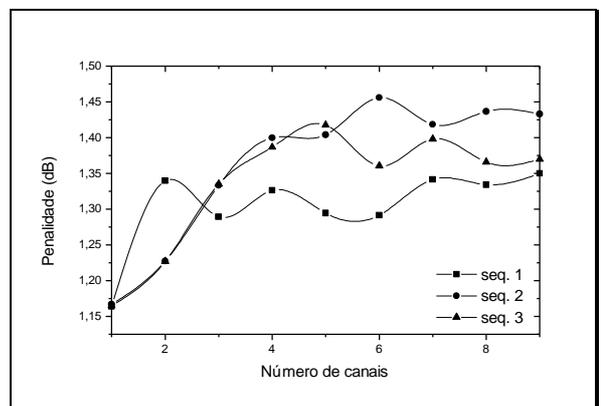


Figura 7 – Penalidade no canal central em função do número de canais para uma separação entre canais de 100 GHz, taxa de 10 GB/s e 7 dBm de potência média por canal.

Para visualizarmos o efeito da potência na atuação do XPM, aumentamos a potência média de 7 dBm para 10 dBm e repetimos as simulações para as duas separações entre canais anteriores. Na Fig. 8 podemos ver os resultados encontrados. Como era de se esperar houve um aumento da penalidade máxima atingida devido à maior influência do XPM com o aumento da potência. Com relação ao aumento do número de canais o comportamento das curvas se mostraram parecidas com o visto para potência média de 7 dBm, ou seja, com o aumento do número de canais a penalidade tende a variar menos e quanto maior é a separação mais rápido as curvas tendem a se estabilizar em um valor.

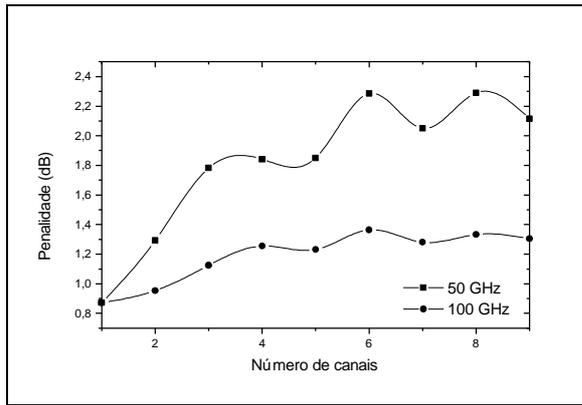


Figura 8 – Penalidade no canal central em função do número de canais para uma separação entre canais de 50 GHz e 100 GHz, taxa de 10 GB/s e 10 dBm de potência média por canal.

Em um outro caso, utilizou-se a mesma fibra padrão e repetiu-se o procedimento anterior para uma taxa de 2,5 Gb/s e espaçamento entre canais de 25 GHz (Fig. 9), 50 GHz e 100 GHz (Fig.5). O Canal a ser analisado foi mantido em 1550 nm.

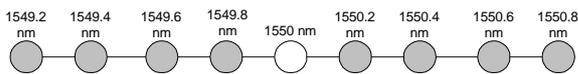


Figura 9 – Configuração dos canais para uma separação entre canais de 25 GHz.

Os resultados encontrados para 2.5 Gb/s e 25 GHz de separação, Fig. 10, diferem dos encontrados para 10 Gb/s. Como se pode ver a penalidade encontrada é bem menor, que a encontrada 10 Gb/s, devido a diminuição do efeito da dispersão. Outro fator importante a ser notado é o aumento da penalidade com o número de canais. Em nenhum momento uma tendência de estabilização foi percebida, não se mantendo o mesmo comportamento das curvas vistas anteriormente.

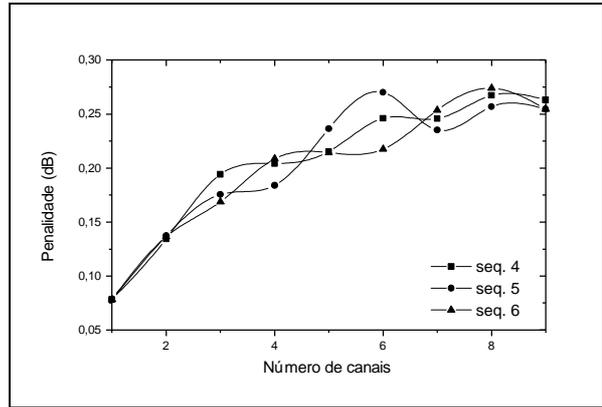


Figura 10 – Penalidade no canal central em função do número de canais para uma separação entre canais de 25 GHz, taxa de 2,5 GB/s e 7 dBm de potência média por canal.

Para separação entre canais de 50 GHz os resultados podem ser vistos na Fig. 11. Como pode-se ver houve uma diminuição da penalidade em relação a separação de 25 GHz devido ao aumento do efeito de desgarramento. Outro fator importante é o início de uma certa estabilização da penalidade, o que não se viu nas curvas da Fig. 10.

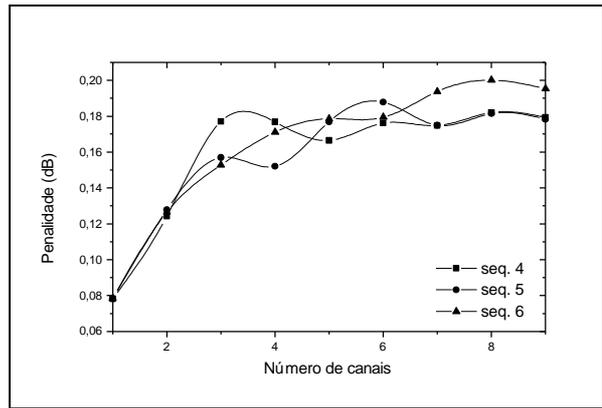


Figura 11 – Penalidade no canal central em função do número de canais para uma separação entre canais de 50 GHz, taxa de 2,5 GB/s e 7 dBm de potência média por canal.

Para separação entre canais de 100 GHz os resultados podem ser vistos na Fig. 12. Para esta separação entre canais, o que se vê é um comportamento bem mais estável das curvas com o aumento do número de canais.

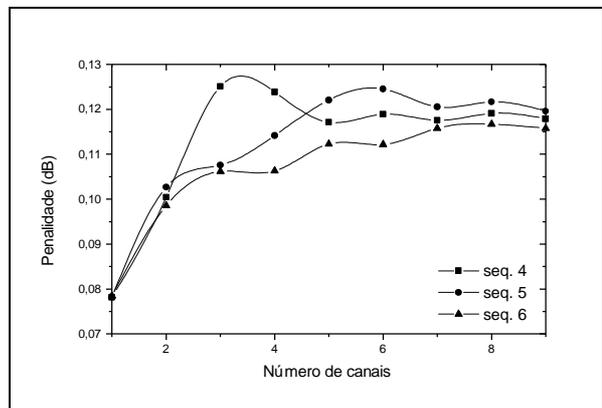


Figura 12 – Penalidade no canal central em função do número de canais para uma separação entre canais de 100 GHz, taxa de 2,5 GB/s e 7 dBm de potência média por canal.

4. CONCLUSÕES

Neste artigo, através de simulações, foi determinado a influência do número de canais e do espaçamento entre canais na atuação da modulação cruzada de fase em uma fibra monomodo padrão, onde verificou-se através da análise da resposta em frequência que há uma saturação da intensidade induzida por XPM com o aumento do número de canais e que o aumento do espaçamento entre os canais provoca a diminuição do valor de saturação.

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 ao espaçamento entre os canais. Quanto maior for o espaçamento entre os canais, menor será o número de canais para o qual a penalidade tenderá a se estabilizar. Outro fator importante é que pode-se considerar na maior parte dos casos os canais vizinhos mais próximos como os principais responsáveis pela penalidade.

Levando-se em consideração que os principais efeitos não-lineares que atuam nas fibras padrão são a auto-modulação de fase e modulação cruzada de fase, já que a alta dispersão desta fibra faz com que a mistura de quatro ondas possa ser desprezada, o que se conclui é que o aumento do número de canais (maior que 3 canais) em si não provoca, na maioria dos casos, significativos aumentos de penalidade.

5. REFERÊNCIAS

- [1] G. P. Agrawal, "Nonlinear Fiber Optics", 2nd. Ed., NY, Academic Press, 1995.
- [2] 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.
- [3] M. Freitas, "Modulação Não-Linear de Fase em Sistemas Ópticos", Dissertação de Mestrado, UFES, janeiro de 2000.
- [4] Adolfo V. T. Cartaxo, "Impact of Modulation Frequency on Cross Phase Modulation Effect in Intensity Modulation-Direct Detection WDM Systems", IEEE Photonics Technology, vol. 10, no. 9, pp. 1268-1270, September 1998.
- [5] 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.
- [6] A. J. Lucero, S. Ten, and V. L. da Silva, "Impact of Bit Pattern and Dispersion Variation on Cross-Phase Modulation Penalty", OFC'99 and IOOC'99, California, USA, ThC2, pp.37-39.