

Instabilidade Modulacional em Fibras de Dispersão Deslocada: Influência da Dinâmica da *FWM* e da Compensação de Dispersão

I.E. Fonseca, M.L.F. Abbade, E. Moschim

Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP
13081- 097, Campinas, São Paulo, Brasil.

RESUMO

Neste trabalho analisamos o relacionamento entre a Mistura de Quatro Ondas (*FWM*) e a Instabilidade Modulacional (*MI*), usando simulações numéricas. Nós consideramos dois canais se propagando por uma fibra óptica monomodo com dispersão deslocada. Nossos resultados sugerem que a dinâmica da *FWM* interfere no processo da *MI*, deslocando a frequência de ganho máximo de sua ocorrência. Este relacionamento pode ser aplicado em fibras altamente não lineares, as quais têm sido utilizadas para se fazer a conversão de comprimento de onda em redes de telecomunicações totalmente ópticas. Um método de gerenciamento de dispersão é sugerido como meio para inibir ou compensar a *MI*.

1. INTRODUÇÃO

Nestes últimos anos, o crescente aumento de tráfego nas fibras ópticas monomodo atualmente instaladas tem dado relevante importância aos limites impostos pelos efeitos não lineares. Em particular, a Mistura de Quatro Ondas (*FWM*) é um dos efeitos mais severos à transmissão da informação pela fibra em sistemas multiplexados em comprimento de onda (*WDM*) [1], limitando o espaçamento entre canais para uma dada taxa de erro. A Instabilidade Modulacional (*MI*) [2], a qual tem sido encarada como um processo de *FWM* [3], é outro importante efeito não linear. Em geral, a *MI* e a *FWM* se originam do mesmo princípio físico, mas a literatura recente [4] enfatiza que algumas diferenças entre elas devem ser levadas em conta.

Neste trabalho, é sugerido, através de simulações numéricas, que a dinâmica da *FWM* pode interferir no processo da *MI*, deslocando a frequência de máximo ganho da *MI*. É também mostrado que este deslocamento pode ser explicado através da inclusão do efeito da Modulação Cruzada de Fase (*XPM*). Uma estratégia utilizando compensação de dispersão é sugerida como meio de inibição ou minimização da *MI*.

Mesmo que nossas simulações usem potência relativa alta, nossos resultados podem ser estendidos [5] para níveis de potência mais baixos se nós considerarmos a propagação através de uma fibra altamente não linear. Estas novas fibras podem ter importante função em uma rede totalmente óptica [6].

Este trabalho está distribuído da seguinte maneira: a seção II apresenta o conceito de *FWM* e as principais equações analíticas usuais para a avaliação de seu impacto na transmissão de informação. A seção III aborda a *MI*. A seção IV apresenta uma política de gerenciamento de dispersão que pode ser utilizada para compensar a *MI*. A seção V são discutidos os resultados das simulações e, finalmente, a seção VI é apresentada a conclusão.

2. MISTURA DE QUATRO ONDAS

A Mistura de Quatro Ondas é um fenômeno que ocorre em meios não lineares e foi primeiramente estudada em fibras ópticas em [8], [9]. Seu impacto sobre sistemas *WDM* e suas aplicações têm sido analisados em diversos trabalhos na literatura recente [1], [9] – [15].

Fisicamente, a *FWM* é caracterizada pela geração de novas frequências a partir da interação entre as frequências (canais) que estão se propagando pela fibra. Estes canais, mediados pelas propriedades não lineares da fibra, fornecem parte de sua energia para a geração de sinais em novas frequências[3].

Em geral, se N canais são lançados na fibra, o número de canais gerados é dado por[11]:

$$\#_f = \frac{N^3 - N^2}{2} \quad (1)$$

No caso de três canais, em frequências f_i , f_j e f_k ($k \neq i, j$), os nove novos canais, são gerados pela *FWM* em [7]:

$$f_{ijk} = f_i + f_j - f_k \quad (2)$$

A eficiência da *FWM* é incrementada com a condição de casamento de fase dos canais propagantes [9]. As possibilidades para se obter um casamento de fase são [1]: (i) operar próximo do comprimento de onda de dispersão nula; (ii) operar no regime de dispersão anômalo (iii) utilizar espaçamento entre canais pequeno e baixos níveis de potência para os canais. Este trabalho apóia-se nos casos (i) e (ii).

Quando não existe depleção dos canais lançados, a potência dos canais gerados pela *FWM* é dada por [4]:

$$P_{ijk}(L) = \frac{\eta'}{9} D^2 \gamma^2 P_i P_j P_k \exp(-\alpha L) (L_{eff})^2 \quad (3)$$

na qual:

$$\eta' = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + (\Delta k')^2} \left\{ 1 + \frac{4 \exp(-\alpha L) \sin^2(\Delta k' L/2)}{[1 - \exp(-\alpha L)]^2} \right\} \quad (4)$$

$$\Delta k' = \Delta k - \gamma(P_i + P_j - P_k) \left\{ \frac{1 - \exp(-\alpha L_{eff})}{\alpha L_{eff}} \right\} \quad (5)$$

$$L_{eff} = \frac{1 - \exp(-\alpha L)}{\alpha} \quad (6)$$

$$\Delta k = \frac{2\pi\lambda_k^2}{c} \Delta f_{ik} \Delta f_{jk} \left[D_c + \frac{\lambda_k^2}{2c} (\Delta f_{ik} + \Delta f_{jk}) \frac{dD_c(\lambda_k)}{d\lambda} \right] \quad (7)$$

Nas equações (3)-(7), D é o fator de degenerescência (igual a 3 ou 6 para FWM degenerado e não degenerado, respectivamente), γ e α são, respectivamente, o coeficiente não linear e a atenuação da fibra, L é o comprimento da fibra, L_{eff} é o comprimento efetivo, Δk é o fator de casamento de fase linear (não depende da potência dos canais), $\Delta k'$ é o fator de casamento de fase não linear (depende da potência dos canais), η é a eficiência da FWM , D_c é a dispersão cromática, $dD_c/d\lambda$ é a taxa de variação da dispersão com relação ao comprimento de onda, λ_k é o comprimento de onda correspondente a onda na frequência f_k , $\Delta f_{mn} = |f_m - f_n|$ (com $m, n = i, j, k$) é o espaçamento entre os canais.

3. INSTABILIDADE MODULACIONAL

A Instabilidade Modulacional é outro fenômeno que ocorre em meios não lineares e dispersivos. No contexto de fibras ópticas, a MI foi primeiramente estudada em 1966 [16] e seus princípios físicos, sua formulação matemática, sua análise teórica e experimental, como também algumas aplicações estão apresentados em [17]-[24].

Fisicamente, a MI significa o enriquecimento dos sinais em torno dos canais propagantes. A MI pode acontecer nas seguintes situações: (i) interação entre um canal cw e uma perturbação, neste caso diz-se que a MI foi induzida pela Auto Modulação de Fase (SPM); (ii) interação entre dois ou mais canais que se propagam pela fibra, neste caso diz-se que a MI foi induzida pela Modulação Cruzada de Fase (XPM); (iii) interação entre os modos polarizados de uma fibra monomodo. Apenas os casos (i) e (ii) serão abordados neste trabalho.

No caso (i) a perturbação pode ser um ruído (por exemplo o ruído ASE) ou outro canal com intensidade baixa, que interage com o canal principal (alta potência) resultando num ganho de amplitude da perturbação, o qual é limitado a uma faixa de frequência de $\pm f_c$ em torno da frequência do canal principal. Frequência de corte da MI , f_c , é dada por [3]:

$$f_c = \sqrt{2} f_{MI} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{4\mathcal{P}}{|\beta_2|}} \quad (8)$$

Na última expressão, f_{MI} é a frequência onde o ganho dado pela MI é máximo, \mathcal{P} é a potência média na fibra e β_2 é o parâmetro de dispersão de velocidade de grupo (neste caso $\beta_2 < 0$ – regime de dispersão anômalo).

Para o caso de múltiplos canais, a MI pode ocorrer tanto no regime normal quanto no regime de dispersão anômala (todavia com maior intensidade no regime de dispersão anômala). Considerando apenas dois canais, o espaçamento entre os canais devem estar em frequências que obedecem [3]:

$$\left[\frac{f^2}{f_{c1}^2} + \text{sgn}(\beta_{21}) \right] \left[\frac{f^2}{f_{c2}^2} + \text{sgn}(\beta_{22}) \right] < 4 \quad (9)$$

na qual, em analogia com (8), f_{cj} é definida por:

$$f_{cj} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{4\gamma_j P_j}{|\beta_{2j}|}} \quad (10)$$

e $j(j= 1,2)$ é o índice que designa o canal, β_{2j} é o parâmetro de dispersão de velocidade de grupo do j -ésimo canal, P_j é a potência do canal analisado e γ_j é o coeficiente não linear da fibra.

Se os dois canais têm intensidades de potência próximas, o ganho induzido pela MI é, aproximadamente, dado por [25]:

$$g(\Omega) = \sqrt{\sqrt{\left(\frac{F_1 - F_2}{2}\right)^2 + C_{XPM}} - \frac{F_1 + F_2}{2}} \quad (11)$$

na qual:

$$C_{XPM} = 4\beta_{21}\beta_{22}\gamma_1\gamma_2 P_1 P_2 (2\pi f)^4 \quad (12)$$

$$F_j = 0.5\beta_{2j} (2\pi f)^2 \left[0.5\beta_{2j} (2\pi f)^2 + 2\gamma P_j \right]. \quad (13)$$

As equações acima não levam em conta a atenuação na fibra. Se a atenuação da fibra for considerada, devemos multiplicar a frequência de corte por $\exp(-\alpha z/2)$ [3].

4. COMPENSANDO A INSTABILIDADE MODULACIONAL

Como foi dito anteriormente, a MI é um fenômeno que ocorre em meios não lineares e dispersivos. Portanto, em fibras ópticas monomodo, a dispersão cromática é um parâmetro fundamental para o processo da MI . Neste trabalho é proposta uma estratégia para inibir ou minimizar o efeito da MI . A estratégia utilizada é o gerenciamento da dispersão cromática ao longo do enlace óptico. Isto está embasado no fato que a MI depende diretamente da dispersão cromática para se desenvolver. Portanto, uma correta política de gerenciamento ao longo do enlace pode compensar a dispersão cromática e consequentemente inibir o efeito da MI .

Gerenciamento de dispersão significa compensar a dispersão em um enlace óptico através de uma fibra com dispersão de sinal contrário chamada de Fibra de Compensação de Dispersão (DCF). Dessa forma, os canais que se propagam pela fibra experimentarão dispersão total aproximadamente nula ou dentro de um limite aceitável no final do enlace [26].

A estratégia utilizada neste trabalho é um pouco diferente dos métodos de compensação de dispersão citados na literatura [26], [27], [28], [29]. Neste caso, procurou-se compensar a dispersão acumulada nos primeiros 10km de fibra (aproximadamente metade do comprimento efetivo L_{eff}). Com isso, acredita-se que, como a dispersão total em 10km é aproximadamente nula, a MI não se manifesta, pois praticamente não ocorreu a interação entre a não linearidade e a dispersão. As simulações mostram que através desta estratégia, a MI é minimizada ou “compensada”.

A DCF utilizada foi a Fibra de Compensação de Dispersão Convencional ($cDCF$) que está apresentada em [29]. Estas fibras possuem alguns inconvenientes, como, por exemplo, serem pouco tolerantes a altos níveis de potência, e, portanto tenderem a excitar efeitos não lineares [26]. Felizmente, neste trabalho

foram utilizadas fibras *cDCF* de pequenos comprimentos (em torno de 0,3km), que minimizam a eficiência destes efeitos.

A compensação da dispersão foi feita de acordo com o seguinte modelo [30]:

$$\beta_2^{dcf} L^{dcf} + \beta_2^{st} L^{st} = 0 \quad (14)$$

Não houve preocupação com a dispersão de segunda ordem (β_3), já que o β_3 não influencia no ganho da *MI* [3].

O valor da dispersão foi calculado de acordo com a equação [27]:

$$D(\lambda) = \left(\frac{S_0}{4} \right) \left[\lambda - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^3} \right] \quad (15)$$

na qual: S_0 é a inclinação da curva de dispersão.

Espera-se que este método não seja muito eficiente para compensar a dispersão, pois a fibra está operando no regime não linear [27], todavia nossas simulações mostraram que este procedimento apresenta bons resultados para inibir a *MI*.

5. RESULTADOS NUMÉRICOS

Nesta análise, considera-se a propagação de dois canais em uma fibra monomodo com dispersão deslocada. Os resultados numéricos foram obtidos utilizando-se o simulador de sistemas fotônicos, PC-SimFo, desenvolvido no Laboratório de Tecnologias Fotônicas DT/FEEC/UNICAMP. Este *software* usa o método de Split-Step Fourier para resolver a Equação Não Linear de Schrödinger, a qual descreve a propagação dos pulsos ópticos pela fibra [3].

Cada canal carrega uma seqüência de 32 bits com formato de pulso *NRZ* (*Non-Return to Zero*). Apesar de ter sido utilizada modulação direta, a conversão eletro-óptica foi assumida ideal e nenhum *chirp* foi induzido nesta conversão.

A potência do canal principal (~ 17 dBm) foi aproximadamente dez vezes maior que a do segundo canal. Portanto, numa primeira aproximação, pode-se considerar o segundo canal como uma perturbação do principal. O comprimento de onda do canal principal foi ajustado em $\lambda_1 = 1553$ nm e do canal de perturbação em $\lambda_2 = (1553 + \Delta\lambda)$ nm, onde o $\Delta\lambda$ é o espaçamento entre os canais e foi variado na simulação.

Os parâmetros da fibra são: comprimento do enlace $L = 100$ km, coeficiente não linear $\gamma = 2.3$ (km.w)⁻¹, atenuação $\alpha = 0.22$ dB/km, comprimento de onda de dispersão nula $\lambda_0 = 1550$ nm, dispersão cromática $D = 0.2$ ps/nm.km em $\lambda = 1553$ nm, resultando numa inclinação da curva da dispersão cromática de 0.667 ps/nm².

De acordo com estes parâmetros, tanto o casamento de fase quanto o ganho máximo da *MI* induzida pela *SPM* deveriam acontecer em $\Delta\lambda = 0,7$ nm.

A Fig. 1, mostra a dependência entre a potência dos canais no final da fibra e o espaçamento entre eles. Como teoricamente esperado, foi observado que o canal *Anti-Stokes*, gerado pela *FWM*, exibe sua potência máxima para $\Delta\lambda = 0,7$ nm. Entretanto o mínimo da potência do canal principal foi deslocado para $\Delta\lambda = 0,5$ nm.

Para explicar está discrepância, deve-se considerar a dinâmica da *FWM* através da propagação dos pulsos ao longo da fibra. As Figs. 2 e 3 mostram, respectivamente, a evolução espectral dos canais inicialmente lançados na fibra e dos canais gerados pela *FWM*

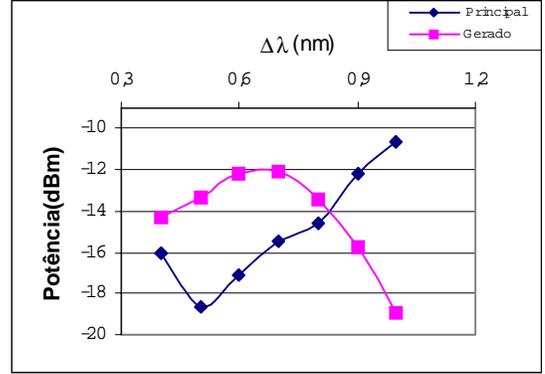


Figura 1: Potência dos canais principais e *Anti-Stokes* em função do espaçamento entre os canais, em $z = 100$ km

para $\Delta\lambda = 0,7$ nm e a potência média dos canais em função da distância de propagação. Na Fig. 2, as potências são normalizadas com relação à potência do canal principal na entrada da fibra.

Estas figuras sugerem que depois de uma certa distância de propagação (por volta do comprimento efetivo, L_{eff}): (i) a interação da *FWM* cessa [2] e (ii) que a potência dos canais em $(1553 \pm \Delta\lambda)$ nm se tornam maior que a potência do canal principal. As origens deste fenômeno estão, provavelmente, relacionadas com a assimetria do ganho da *MI*, como previsto em (8) ou (9) e com a alta eficiência da *FWM*.

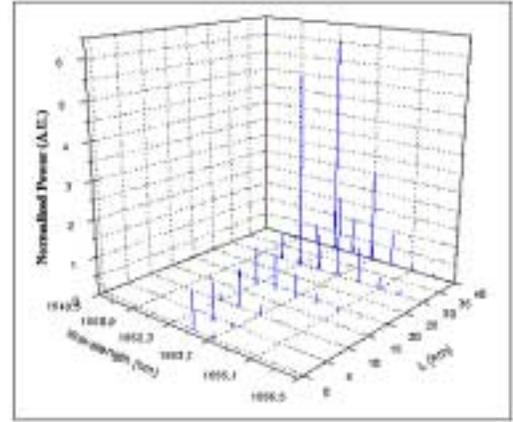


Figura 2: Evolução Espectral dos canais

Observamos também que em $z = 10$ km a *FWM* já havia gerado canais com potência relativamente alta. Além disso, a perturbação também começa a ter uma potência comparável com a potência do canal principal. Com isto, a *MI* induzida pela *SPM*, que necessita apenas de uma semente para se desenvolver, perde sua caracterização. O canal de *Anti-Stokes* gerado em $(1553 - \Delta\lambda)$ pela *FWM* também exibe uma intensidade da mesma ordem da dos canais lançados inicialmente na fibra. Este fato sugere que, pelo menos, de 10 km em diante a *MI* deveria ser induzida pela *XPM*.

Levando isto em conta e considerando a potência do canal principal em $z = 10$ km, nós plotamos a curva de ganho através de (11), na Fig. 4. Seu máximo está por volta de 0,5 nm, o que está em concordância com os resultados obtidos na simulação que estão mostrados na Fig. 1.

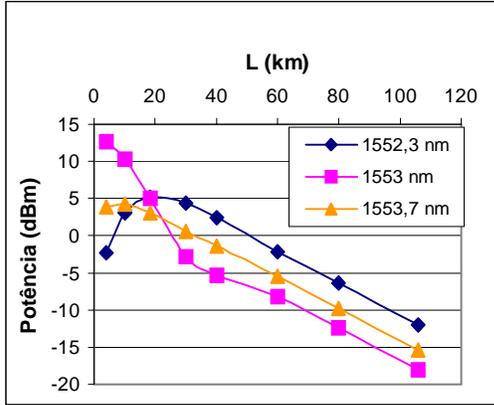


Figura 3: Dependência da potência média dos canais com a distância

Para tentar avaliar a distinção entre o processo da *MI* induzida pela *SPM* e pela *XPM*, a relação entre as potências do canal principal, P_1 , e do canal de perturbação, P_2 , foi incrementada, mas mantendo-se a potência média na fibra constante. Os resultados das simulações estão mostrados na Fig. 5. Foi observado que quando a relação P_1/P_2 é incrementada, o ganho máximo da *MI* se desloca para

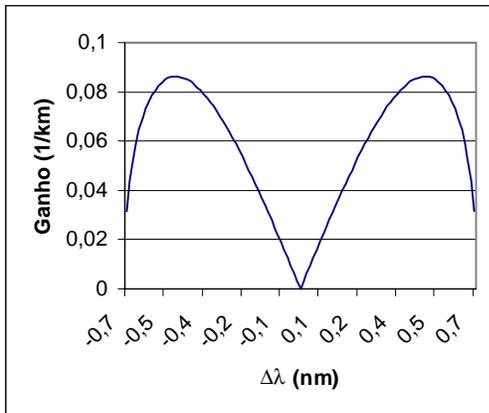


Figura 4: Ganho Espectral para a *MI* induzida pela *XPM*

$\Delta\lambda_{MI} = 0.7$ nm. Isto está em concordância com o ganho máximo esperado para a *MI* induzida pela *SPM* e sugere que a dinâmica da *FWM* perde sua importância se apenas uma semente está presente.

Na segunda parte deste trabalho nós fizemos a análise numérica da compensação da *MI* utilizando o gerenciamento da dispersão ao longo do enlace. A estratégia utilizada foi procurar compensar a dispersão dos primeiros 10 km e no final da fibra para evitar que a interação entre a dispersão e as não-linearidades desenvolva a *MI*. Nada impede que após os 10 km esta interação ocorra novamente, todavia pode ser que não seja mais suficiente para despertar a *MI*, já que restam poucos quilômetros para se atingir o L_{eff} (onde os efeitos não lineares não são mais tão eficazes [2]). Compensar a dispersão em 10 km foi escolhido porque o L_{eff} é de aproximadamente 20 km, neste comprimento os efeitos não lineares não são mais fortes [2]. Assim se quisermos inibir a *MI* temos que compensar a dispersão em comprimentos menores que L_{eff} .

Os parâmetros da *cDCF* utilizada foram: coeficiente não-linear $\gamma = 5$ (km.w)⁻¹, comprimento de onda de dispersão nula $\lambda_0 = 1312$ nm, dispersão cromática $D = -73.37$ ps/nm.km em $\lambda = 1553$ nm, atenuação $\alpha = 0.55$ dB/km, $S_0 = 0,093$ ps/nm² km [29].

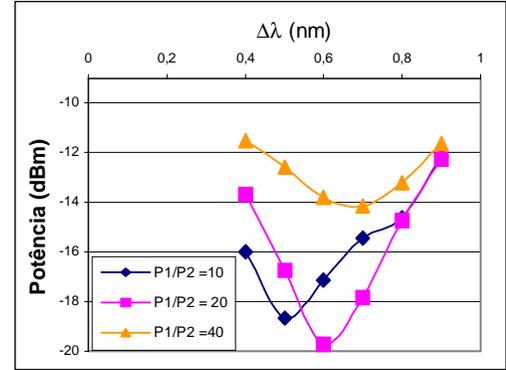


Figura 5: Deslocamento do $\Delta\lambda_{MI}$ para diferentes relações de potência entre os canais principal e de perturbação.

A curva obtida para o caso da Fig. 1 incluindo a compensação de dispersão é a Fig. 6. Perceba que a *MI* deixa de acontecer, ou seja, o ponto de ganho máximo da *MI* não aparece mais na curva.

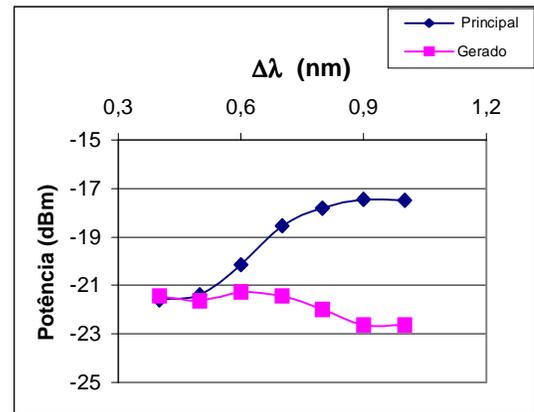


Figura 6: Potência dos canais Principal e Anti-Stokes em função do espaçamento entre os canais com compensação em $z = 10$ km e 100km.

Veja que a potência do canal principal aumenta e a do canal gerado diminui com o aumento da distância entre os canais (o que já era esperado).

Estas simulações nos mostram alguns pontos importantes. Primeiro, a *MI* induzida pela *XPM* precisa ser tomada em conta quando a *FWM* apresenta alta eficiência, isto é, quando a potência relativa entre os canais é apreciável. Além disso, a dinâmica da *FWM* perde sua importância quando a potência da perturbação é diminuída. Perceba também que, se a perturbação é apenas uma semente, a *MI* induzida pela *SPM* pode ser usada para explicar a evolução dos pulsos. Finalmente, a *MI* pode ser minimizada ou inibida se uma correta política de gerenciamento de dispersão for utilizada.

6. CONCLUSÃO

Neste trabalho apresentamos uma discussão, baseada em simulações numéricas, da competição entre a *MI* e a *FWM* e uma técnica de gerenciamento de dispersão que pode compensar a *MI*.

Embora os mecanismos físicos sejam os mesmos para a *MI* e *FWM*, existem alguns pontos que devem ser observados. Primeiro, quando a atenuação da fibra é nula, de (3) segue que a potência dos canais gerados pela *FWM* cresce linearmente com a distância, enquanto que a potência da perturbação ou da semente da *MI* cresce exponencialmente com a distância [3], [4]. Segundo, para o caso de termos um canal principal e uma perturbação, a *MI* necessita do regime de dispersão anômala para acontecer, ao passo que a *FWM* pode acontecer nos dois regimes de dispersão. Além disso, parece fisicamente razoável considerar a *FWM* um processo “quase contínuo” ao longo da distância da fibra. Isto é, os canais gerados na primeira interação podem interagir novamente entre si e com os canais principais, gerando novos canais., fazendo a *FWM* ocorrer em várias etapas [3].

Os resultados obtidos mostram que a dinâmica da *FWM* interfere na *MI*, quando os novos canais gerados têm seus níveis de potência incrementados para níveis comparáveis com os dos canais principais. Nesta situação, a *MI* induzida pela *SPM* pode não explicar a propagação dos sinais. Todavia, mostrou-se que se levarmos em conta uma certa distância na qual a *FWM* já tem suficientemente depletado o canal principal, de tal maneira que a perturbação possa ser considerada como um canal de potência relativa alta, a *MI* induzida pela *XPM* se torna mais apropriada para descrever a propagação dos sinais.

Embora os resultados das simulações numéricas tenham sido obtidos em fibras de dispersão deslocada e façam uso de níveis de potência relativamente altos, eles podem ser bastante relevantes se a propagação for feita em fibras de dispersão deslocada altamente não-lineares. Estas fibras, as quais podem ser utilizadas para conversão de comprimento de onda [6], têm valor do coeficiente não-linear ~ 6 vezes maior que o que foi usado na simulação numérica. Como o comprimento não linear é inversamente proporcional a este parâmetro e a potência média lançada na fibra, isto significa que, desprezando diferenças nas atenuações das fibras, os resultados deste trabalho podem ser estendidos para níveis de potência por volta de 5.7 dBm em fibras altamente não linear.

7. AGRADECIMENTOS

Agradecemos a H. L. Fragnito por frutíferas discussões.

8. REFERÊNCIAS

[1] F. Matera, M. Settembre, M. Tamburrini, M. Zitelli, S. Turitsyn, “Reduction of the four wave mixing in optically amplified links by reducing pulse overlapping”, *Optics Communications*, vol. 181, pp. 407-411, July 2000.

[2] D. F. Grosz, J. M. Chávez Boggio, and H. L. Fragnito, “Modulation instability effects on three-channel optically multiplexed communication systems”, *Optics Communications*, vol. 171, pp. 53-60, November 1999.

[3] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optic*, 2nd ed. New York Academic, 1995.

[4] S. Song, C. T. Allen, K. R. Demarest, R. Hui, “Intensity-Dependent Phase-Matching Effects on Four-Wave Mixing in Optical Fibers”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 17, pp. 2285-2290, November 1999.

[5] I. E. Fonseca, unpublished.

[6] O. Aso, S-I. Arai, T. Yagi, M. Tadakuma, Y. Suzuki, S. Namiki, “Efficient Fwm Based Broadband Wavelength Conversion Using A

Short High-Nonlinearity Fiber”, *IEICE Trans. Electron.*, vol. E83-C, pp. 816-822, Jun. 2000.

[7] K. O. Hill, D. C. Johnson, B. S. Kawasaki and R. I. MacDonald, “CW three-wave mixing in single-mode optical fibers”, *J. Appl. Phys.*, vol. 49, pp. 5098-5106, October 1978.

[8] R. H. Stolen, J. E. Bjorkholm, and A. Ashkin, “Phase-matched three-wave mixing in silica fiber optical waveguides”, *Applied Physics Letters*, vol. 24, pp. 308-310, April 1974.

[9] T. Yamamoto and M. Nakazawa, “Highly Efficient Four-Wave Mixing in an Optical Fiber with Intensity Dependent Phase Matching”, *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 9, pp. 327-329, March 1997.

[10] N. Shibata, R. P. Braun, and R. G. Waarts, “Phase-Mismatch Dependence of Efficiency of Wave Generation Through Four-Wave Mixing in a Single-Mode Optical Fiber”, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. QE-23, pp. 1205-1210, July 1987.

[11] R. W. Tkach, A. R. Chraplyvy, F. Forghieri, A. H. Gnauck, and R. M. Derosier, “Four-Photon Mixing and High-Speed WDM Systems”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 13, pp. 841-849, May 1995.

[12] I. Tomkos, I. Zacharopoulos, E. Roditi, D. Syvridis, A. Uskov, “Mechanisms of wave mixing and polarization sensitivity of the wavelength conversion in semiconductor optical amplifiers using two parallel polarized pumps”, *Optics Communications*, vol. 163, pp. 49-54, May 1999.

[13] W. Zeiler, F. Di Pasquale, P. Bayvel, and J. E. Midwinter, “Modeling of Four-Wave Mixing and Gain Peaking in Amplified WDM Optical Communication Systems and Networks”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 14, pp. 1933-1942, September 1996.

[14] F. Forghieri, R. W. Tkach, and A. R. Chraplyvy, “WDM Systems with Unequally Spaced Channels”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 13, pp. 889-897, May 1995.

[15] K. Inoue and H. Tobo, “Wavelength conversion experiment using fiber four-wave mixing”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 4, pp. 69-72, 1992.

[16] V. I. Bespalov and V. I. Talanov, “Filamentary structure of light beams in nonlinear liquids”, *JETP Lett.*, vol. 3, pp. 307-310, 1966.

[17] A. Hasegawa and F. Tappert, “Transmission of stationary nonlinear optical pulses in dispersive dielectric fibers. Anomalous Dispersion”, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 23, pp. 142-144, 1973.

[18] L. F. Mollenaver, R. H. Stolen, and J. P. Gordon, “Experimental observation of picosecond pulse narrowing and solitons in optical fibers”, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 45, pp. 1095-1098, 1980.

[19] A. Hasegawa and W. F. Brinkman, “Tunable coherent IR and FIR sources utilizing modulational instability”, *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-16, pp. 694-697, 1980.

[20] D. Anderson and M. Lisak, “Modulational instability of coherent optical-fiber transmission signals”, *Opt. Lett.*, vol. 9, pp. 468-470, 1984.

[21] M. Karlsson, “Modulational Instability in lossy optical fibers”, *J. Opt. Soc. Am. B/* vol. 12, pp. 2071-2077, November 1995.

[22] F. Kh. Abdullaev, S. A. Darmanyan, S. Birchoff, P. L. Christiansen M. P. Sorensen, “Modulational instability in optical fibers near the zero dispersion point”, *Optics Communications*, vol. 108, pp. 60-64, 1994.

[23] D. F. Grosz, C. Mazzali, A. Paradisi, and H. L. Fragnito, “Modulation Instability Induced Resonant Four-Wave-Mixing in

- WDM Systems”, *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 11, pp. 379-381, March 1999.
- [24] K. Tai, A. Hasegawa, and A. Tomita, “Observations of modulation instability in optical fibers”, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 56, pp. 135-138, 1986.
- [25] G. P. Agrawal, “Modulation Instability Induced by Cross-Phase Modulation”, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 59, pp. 880-883, August 1987.
- [26] Y. Danziger, D. Askegard, “High-Order-Mode fiber an innovative approach to chromatic dispersion management that enables optical networking in long-haul high-speed transmission systems”, *Optical Networks Magazine*, pp. 40-50, Janaury/February 2001.
- [27] M. R. C. Caputo, M. E. Gouvea, “Dispersion slope effects of the compesation dispersion fiber for broadband dispersion compensation in the presence of self-phase modulation”, *Optics Communications*, vol. 178, pp 323-331, May 2000.
- [28] Y. Suzuki, K. Mukasa, R. Sugizaki, K. Kokura, “Dispersion Managed Optical Transmission Lines and Fibers”, *IEICE TRANS. Electron*, vol. E83-C, June 2000.
- [29] R. J. Nuyts, Y. K. Park, P. Gallion, “ Performance Improvement of 10 Gb/s Standard Fiber Transmission Systems by Using the SPM Effects in the Dispersion Compensating Fibers”, *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 8, pp 1406-1408, October 1996.
- [30] G.P. Agrawal, “Optical Fiber Communications Systems”, 2nd ed., Jonh Wiley, 1997.