

Mistura de Quatro Ondas: Teoria, Simulações Computacionais e sua importância nas Redes Ópticas Transparentes

Iwanir Araújo da Silva Junior & Maria Regina Campos Caputo

Abstract - QoS is an important parameter for transparent optical networks performance and it has dependence with signal quality. When the signal stays on the optical domain (through of a lightpath) it can accumulate problems as nonlinear effects from the optical fibers. Physical impairments are very important when the optimization of the network is considered. In this article is examined the dependence of four wave mixing nonlinear effect in a DWDM system with various parameters, through numerical simulations with a software from VPI - Virtual Photonics Incorporation.

Index Terms - Four Wave Mixing, Transparent Networks, Physical Layer Impairments.

Resumo – Um importante parâmetro de desempenho da rede, a Qualidade de Serviço (QoS – Quality of Service), tem uma dependência com a qualidade do sinal. Na camada física o sinal permanece no domínio óptico (ao longo de uma rota totalmente óptica ou de um “lightpath”) e pode acumular degradações, como por exemplo, advindas dos efeitos não-lineares nas fibras ópticas. Assim os impedimentos advindos da camada física constituem-se numa importante métrica para a otimização da rede. Nesse artigo verifica-se a dependência do efeito não-linear MQO – Mistura de Quatro Ondas (FWM - Four Wave Mixing) em um Sistema Densamente Multiplexado por Divisão de Comprimento de Onda (DWDM – Dense Wavelength Division Multiplexing), o qual aqui se designa por sistema multiplexado, com diversos parâmetros através de simulações numéricas utilizando o Módulo de Transmissão do software VPI - Virtual Photonics Incorporation.

Palavras Chave - Mistura de Quatro Ondas, Redes Transparentes, Impedimentos de Camada Física.

I. INTRODUÇÃO

A otimização de *redes ópticas transparentes* [1], [2], [3], [4], [5], [6] para uma dada rede física de fibras ópticas, pode ser separada em duas etapas:

Etapla 1 - o projeto da *topologia virtual* (ou *topologia lógica*);

Etapla 2 - o roteamento e a escolha do comprimento de onda.

Um importante parâmetro de desempenho da rede, a Qualidade de Serviço (QoS – Quality of Service), tem uma dependência com a qualidade do sinal. Na camada física o sinal permanece no domínio óptico ao longo de uma rota

totalmente óptica e pode acumular degradações, por exemplo, advindas de efeitos não-lineares em fibras ópticas. Assim os impedimentos advindos da camada física constituem-se uma importante métrica para a otimização da rede.

Neste artigo é feita uma verificação da dependência do efeito não-linear da Mistura de Quatro Ondas – MQO (FWM - Four Wave Mixing) em um sistema multiplexado com diversos parâmetros tais como [7], [8], [9], [10]: comprimento do enlace, separação espectral entre canais, dispersão da fibra na região de transmissão dos canais bem como potência dos mesmos. A verificação foi feita através de simulações numéricas através do Módulo de Transmissão da VPI - Virtual Photonics Incorporation.

A partir dos resultados aqui obtidos pode-se calcular o fator Q (*função erf* ou *probabilidade gaussiana normalizada*) para cada canal. Muitos algoritmos destinados à definição da Topologia Virtual da rede (escolher as rotas totalmente ópticas que otimizam o seu desempenho) incluem os impedimentos da camada física como uma das métricas, limitando o valor do fator Q na hora de decidir dentre as rotas ópticas candidatas qual a melhor [11], [12], [13]. A escolha do comprimento de onda então é feita pesquisando-se os comprimentos de onda disponíveis e calculando-se as penalidades advindas da potência da MQO gerada pelos canais usados simultaneamente naquela rota. O fator Q de uma rota totalmente óptica pode flutuar quando conexões (canais) são estabelecidas ou desfeitas [13].

Este artigo está assim organizado: a secção 2 mostra o modelo analítico da teoria de MQO, na secção 3 está descrito o modelo numérico adotado nas simulações, na secção 4 são apresentados os resultados das simulações e a secção 5 apresenta-se as conclusões do trabalho.

II. MODELO ANALÍTICO

Através de um processo de MQO, a propagação simultânea de dois campos com frequências f_i e f_j geram bandas laterais nas frequências $2f_i - f_j$ e $2f_j - f_i$. No caso de três campos co-propagantes, nas frequências f_i, f_j e f_k ($i, j \neq k$), há a geração de um quarto termo com frequência $f_i + f_j - f_k$, com i, j e k podendo tomar valores entre 1 e 3. Nas redes ópticas transparentes se f_i é a frequência de uma dada rota totalmente óptica, f_j, f_k são as frequências da rota que compartilham a mesma rota física e são potencialmente fontes de geração de MQO.

Manuscrito recebido em 27 de março de 2006; revisado em 28 de fevereiro de 2007.

I. A. Silva Jr (iwanir.silva@vale.com) pertence à Companhia Vale do Rio Doce - VALE. Av. Dante Michelini, 5500 - Vitória - ES - Brasil - 29090-900 e M. R. C. Caputo (mreginacaputo@hotmail.com) pertence à Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais - PUC-MG - Belo Horizonte - MG - Brasil - 30000-000.

Para que o processo ocorra, o casamento de fase deve satisfazer a seguinte condição [14]:

$$\Delta\beta = \beta_i(f_i) + \beta_j(f_j) - \beta_k(f_k) - \beta_{ijk}(f_{ijk}) \quad (1)$$

onde $\Delta\beta$ é a diferença entre as constantes de propagação das ondas envolvidas no processo de MQO. Para um perfeito casamento de fase, $\Delta\beta$ deve ser igual a zero significando uma máxima eficiência do processo. β_i , β_j e β_k são as constantes de propagação respectivamente nas frequências f_i , f_j e f_k e β_{ijk} é a constante de propagação na frequência da onda gerada pelo processo de MQO.

No caso de ondas co-polarizadas e considerando-se a não depleção dos sinais de entrada (pela geração das bandas laterais) a potência gerada para uma banda lateral, P_{ijk} , na frequência f_{ijk} , é dada por [14]:

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

onde P_i , P_j e P_k são as potências de entrada dos sinais respectivamente nas frequências f_i , f_j e f_k ; L é o comprimento do enlace; d_{ijk} é o fator de degenerescência (igual a 3 para $i = j$ e igual a 6 para $i \neq j$); α é o coeficiente de atenuação da fibra; L_{eff} é o comprimento efetivo (no qual assume-se que a potência do sinal permanece constante [15]) e é dado por $L_{eff} = (1 - e^{-\alpha L}) / \alpha$. O coeficiente de não-linearidade γ depende da área efetiva da fibra A_{eff} , a qual depende da distribuição do modo propagante fundamental no núcleo da fibra [7], do índice de refração não-linear n_2 e do comprimento de onda λ e é dado por [7]:

$$\gamma = \frac{n_2 \omega_0}{c A_{eff}} \quad (3)$$

A eficiência MQO é definida pela relação entre a potência do sinal gerado com descasamento de fase e a potência do sinal gerado quando se tem um casamento de fase perfeito, $\Delta\beta = 0$, sendo dada por [14]:

$$\eta = \frac{P_{ijk}(L, \Delta\beta)}{P_{ijk}(L, \Delta\beta = 0)} \quad (4)$$

Pode-se expressar a eficiência da MQO em termos do comprimento da fibra e do descasamento de fase como:

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

na qual $\Delta\beta$ tem sua expressão dependente da dispersão da fibra e do espaçamento entre canais escrito da seguinte forma [14], [16]:

$$\Delta\beta = \frac{2\pi\lambda_k^2}{c} \Delta f_{ik} \Delta f_{jk} \left[D(\lambda_k) + \frac{\lambda_k^2}{2c} (\Delta f_{ik} + \Delta f_{jk}) \left(\frac{dD(\lambda_k)}{d\lambda} \right) \right] \quad (6)$$

onde $D(\lambda_k)$ é a dispersão cromática da fibra no comprimento de onda λ_k , $dD(\lambda_k)/d\lambda$ é a derivada da dispersão também designada por S_0 e $\Delta f_{mn} = |f_m - f_n|$ para $m, n = i, j, k$. Essa equação é chamada de fator de descasamento de fase linear, pois não depende da potência das ondas que interagem no processo de MQO.

A obtenção do descasamento de fase total, o qual inclui o descasamento de fase linear e a dependência da potência, foi realizado por SONG *et al.* (1999) [17] dado por:

$$\Delta\beta_T = \Delta\beta - \gamma (P_i + P_j - P_k) \left\{ \frac{1 - \exp(-\alpha L_{eff})}{\alpha L_{eff}} \right\} \quad (7)$$

A Eq. (7) inclui a dependência do descasamento de fase devido à potência das ondas que interagem na MQO, incluindo também os efeitos não-lineares de Automodulação de Fase – AMF (ou SPM - *Self Phase Modulation*) e Modulação de Fase Cruzada – MFC (ou XPM - *Cross Phase Modulation*).

Define-se um parâmetro designado *comprimento de coerência* L_{coh} , que é a distância que o campo eletromagnético na frequência f_{ijk} deve propagar na fibra antes que fique fora de fase por 180° com o campo eletromagnético gerado a partir da componente de polarização não-linear. Tal distância fará com que o processo de MQO deixe de ser significativo, ou seja, ocorrerá MQO se $L < L_{coh}$. O comprimento de coerência é dado por [17], [18], [19], [20]:

$$L_{coh} = \frac{2\pi}{\Delta\beta_T} \quad (8)$$

Para uma situação ideal no qual $\Delta\beta_T = 0$, tem-se o resultado de $L_{coh} = \infty$, indicando que um eficiente processo de MQO ocorre para todo L .

Ocorrerá interferência entre canais se os mesmos forem escolhidos com igual espaçamento espectral entre eles. Em caso contrário as frequências geradas pela MQO não irão se sobrepor com os canais originais. Assim com uma escolha das posições dos canais baseada nesse critério não haverá nenhuma das componentes geradas pela MQO que se situe na mesma posição de qualquer um dos canais originais [1], [20], [21], [22], [23].

A eficiência da MQO se torna significativa quanto melhor for satisfeita a condição de casamento de fase entre os campos ópticos co-propagantes. Essa condição é função da separação espectral entre canais do sistema multiplexado, do valor da dispersão cromática na região de operação do sistema, do valor da potência dos canais e do comprimento do enlace, como visto anteriormente.

III. MODELO NUMÉRICO

Para se comprovar a dependência do processo de MQO com os parâmetros citados anteriormente, considerou-se a solução

numérica da equação de propagação do pulso numa fibra óptica, a qual inclui os efeitos lineares de perda por atenuação e de dispersão cromática, como também os efeitos não-lineares de AMF e MQO. A equação de propagação do pulso é a conhecida equação não-linear de Schrödinger (ENLS) dada por [7], [21]:

$$\frac{\partial A(z, T)}{\partial z} + j \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A(z, T)}{\partial T^2} - \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 A(z, T)}{\partial T^3} + \frac{\alpha}{2} A(z, T) = j\gamma |A(z, T)|^2 A(z, T) \quad (9)$$

na qual $A(z, T)$ representa a envoltória do pulso variando lentamente, β_2 representa os efeitos da dispersão cromática de primeira ordem, conhecida como *dispersão de velocidade de grupo*–DVG e β_3 representa a dispersão cromática de segunda ordem, ou derivada da dispersão cromática de primeira ordem. Têm-se incluídos ainda os efeitos da perda, ou atenuação da fibra, através de α e do efeito da não-linearidade da fibra através do parâmetro γ .

A Eq. (9) serve como base para a análise dos efeitos lineares e não-lineares presentes numa fibra óptica e sua solução foi obtida pelo método numérico Split Step Fourier – SSF através de simulações realizadas pela ferramenta computacional Modulo de Transmissão da Virtual Photonics Inc. – VPI.

IV. RESULTADO E SIMULAÇÕES

A primeira parte deste item trata da influência da potência dos canais originais (rotas totalmente ópticas simultâneas na mesma rota) sobre a potência das componentes geradas pela MQO; depois se estuda a dependência da MQO com o comprimento da rota e também com a separação espectral entre os canais originais do sistema. E, finalmente, mostra-se influência da dispersão no processo de MQO ressaltando uma comparação do valor da potência de uma onda gerada pelo processo de MQO usando-se uma *fibra com dispersão deslocada* FDD [24] e uma *fibra com dispersão deslocada não nula* FDDNN [25], que são duas fibras amplamente utilizadas em sistemas multiplexados. Também foram calculados os valores das potências das componentes geradas pelo MQO no regime de dispersão anômalo e normal de uma fibra FDD.

A - Influência da potência dos canais Multiplexados

Como acontece em outros fenômenos não-lineares, ao se diminuir a potência do canal de transmissão, diminui-se a eficácia do processo não-linear [1], [7], [15]. Assim, a potência da onda gerada pelo processo de MQO cresce com o aumento da potência dos canais originais, como pode ser visto na Eq. (2).

Para confirmar simulou-se a propagação de dois canais sem modulação, um em 1558 nm ($f_1 = 192,55$ THz) e outro em 1558,8 nm ($f_2 = 192,46$ THz), numa fibra FDD [24] com 20 km. A Tabela 1 mostra os dados da fibra utilizada na simulação.

TABELA 1

PARÂMETROS DA FIBRA UTILIZADA NA SIMULAÇÃO DA POTÊNCIA GERADA PELA MQO EM RELAÇÃO À POTÊNCIA DE ENTRADA DOS CANAIS

Fibra FDD [24]			
A_{eff}	52 μm^2	S_0	0,075 ps/nm ² km
α	0,24 dB/km	D	$(\lambda - \lambda_0)S_0$
λ_0	1550 nm	L	20 km
γ	1,3 (w.km) ⁻¹		

A potência de entrada do canal 1 (P_1) é igual à do canal 2 (P_2), e varia de 1 a 12 mW. A Figura 1 mostra o comportamento das duas componentes geradas pela MQO, sendo P_{112} a potência da primeira componente $f_{112} = 2f_1 - f_2$ (=192,64 THz) e P_{221} a da segunda componente $f_{221} = 2f_2 - f_1$ (=192,37 THz).

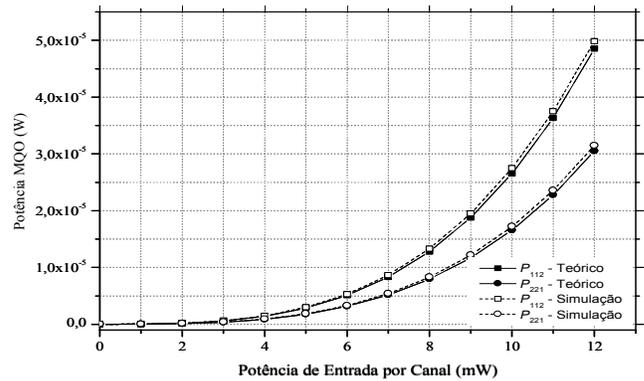


Fig. 1. Potência gerada pelo processo MQO em função da potência de entrada dos canais originais. Figura gerada pela ferramenta Mathcad [30] (teórica) e pelo VPI (simulação).

Assim com o aumento da potência dos canais, aumentou-se a potência das bandas laterais geradas em f_{112} e f_{221} , confirmando-se por simulação a previsão analítica da equação $f_{ijk} = f_i + f_j - f_k$. Pode-se observar que P_{112} é maior que P_{221} devido ao fato de que a componente gerada pela MQO em $f_{112} = 1557,3$ nm se encontra mais perto do comprimento de onda de dispersão zero, experimentando assim um menor valor de dispersão. Isso proporciona um melhor casamento de fase, visto que quanto menor for o valor da dispersão das ondas que estiverem interagindo no processo, maior será a eficiência do mesmo [1], [14], [15], [17], [20], [26], [27], [27].

As Figuras 2(a) e 2(b) mostram espectros observados na saída da fibra óptica utilizada na simulação para alguns dos valores de potência de entrada dos canais.

Outro fato observado nas figuras 2(a) e 2(b) é que ocorre a geração de novas componentes de frequência, em 192,28 THz ($\approx 1560,23$ nm) e 192,73 THz ($\approx 1556,58$ nm). Isto se deve ao fato de as duas componentes geradas anteriormente f_{112} e f_{221} estarem agora participando do processo de geração de outras componentes de frequência juntamente com os sinais originais em f_1 e f_2 . As novas ondas geradas são as combinações $f' = f_1 + f_{221} - f_{112} = 192,28$ THz e $f'' = f_1 + f_{112} - f_2 = 192,73$ THz.

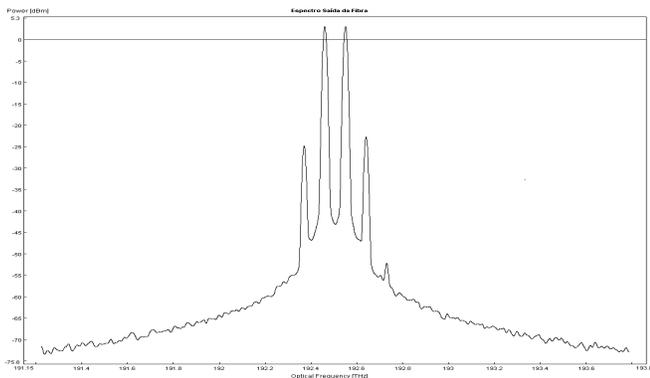


Fig. 2(a). Espectro óptico observado na saída da fibra óptica, mostrando o crescimento da MQO em função do aumento da potência de entrada dos canais para 6 mW .

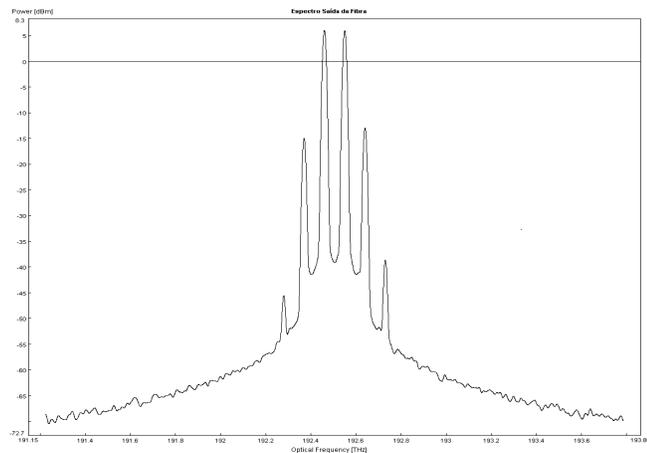


Fig. 2(b). Espectro óptico observado na saída da fibra óptica, mostrando o crescimento da MQO em função do aumento da potência de entrada dos canais para 12 mW (b).

B - Influência do comprimento do enlace

A análise potência da onda gerada pela MQO em relação à variação do comprimento da fibra pode ser feita considerando-se a propagação dos mesmos dois canais ($f_1 = 192,55$ THz e $f_2 = 192,46$ THz) utilizados anteriormente. Variando-se o comprimento da fibra, observa-se a variação da potência das ondas geradas. A Figura 3 confirma o comportamento citado.

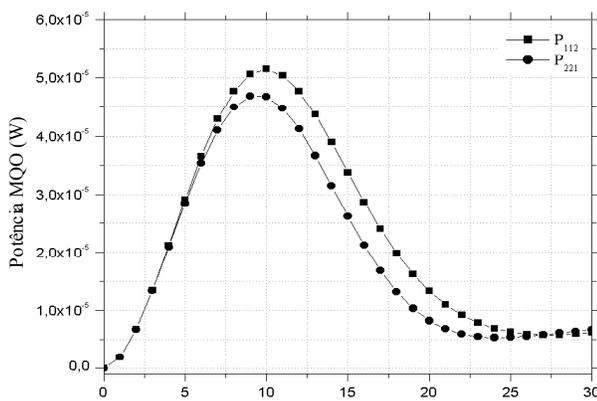


Fig. 3. Potência MQO como função do comprimento da fibra para as duas componentes de frequência P_{112} e P_{221} .

Usando-se a Eq. (8), pode-se calcular que $L_{coh112} \approx 26$ km para P_{112} e $L_{coh221} \approx 24$ km para P_{221} . Esses resultados também foram confirmados através da simulação de acordo com a Figura 3.

C - Influência da separação espectral entre canais do sistema Multiplexado

Analisa-se aqui a influência do aumento do espaçamento entre os canais originais na eficiência do processo de MQO e também a variação da posição espectral dos canais originais no processo de MQO considerando-se espaçamento igual e diferente entre eles.

Primeiro, analisou-se a influência do valor absoluto do espaçamento entre canais para um sistema com dois canais operando no regime anômalo de dispersão de uma fibra FDD [11]. A potência da onda gerada pela MQO é analisada em relação ao comprimento da fibra para dois valores de separação entre canais $\Delta f_1 = 100$ GHz e $\Delta f_2 = 200$ GHz, considerando $\lambda_0 = 1550$ nm. Para Δf_1 , utilizando $\lambda_1 = 1552$ nm e $\lambda_2 = 1552,8$ nm, mediu-se a potência da onda gerada em $f_{112} = 193,4$ THz. Já para Δf_2 , utilizando $\lambda_1' = 1552$ nm e $\lambda_2' = 1553,6$ nm, mediu-se a potência da onda gerada em $f_{112}' = 193,5$ THz. A Tabela 2 apresenta os dados dos canais usados na simulação e a Figura 4, a seguir, mostra os resultados obtidos na simulação.

TABELA 2

PARÂMETROS UTILIZADOS NA SIMULAÇÃO DA POTÊNCIA GERADA PELA MQO EM RELAÇÃO À VARIÇÃO DO COMPRIMENTO DA FIBRA PARA DIFERENTES VALORES DE SEPARAÇÃO ENTRE CANAIS.

Fibra FDD [24] ($\lambda_0 = 1550$ nm)			
Espaçamento	Canais		f_{MQO}
	Δf_1	$\lambda_1 = 1552$ nm	$f_1 = 193,3$ THz
	$\lambda_2 = 1552,8$ nm	$f_2 = 193,2$ THz	193,4 THz
Δf_2	$\lambda_1' = 1552$ nm	$f_1' = 193,3$ THz	f_{112}'
	$\lambda_2' = 1553,6$ nm	$f_2' = 193,1$ THz	193,5 THz

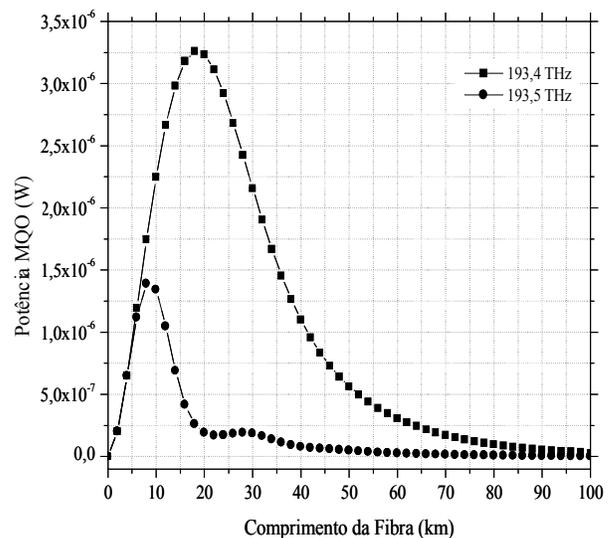
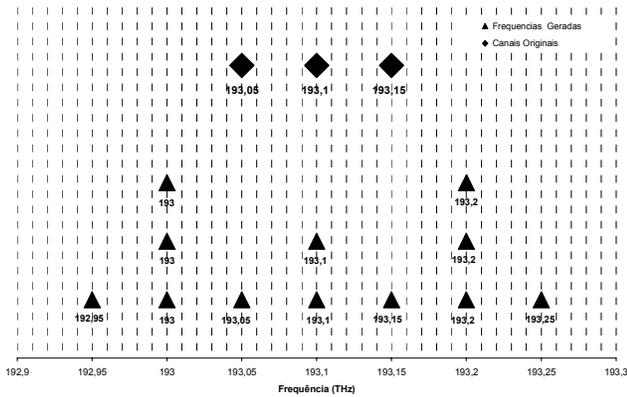


Fig. 4. Comparação de potência da onda gerada pela MQO para $f_{112} = 193,4$ THz e $f_{112}' = 193,5$ THz, considerando espaçamento entre canais de 100 GHz e 200 GHz respectivamente, para uma fibra FDD operando no regime de propagação Anômalo.

Pode-se constatar que, devido a um maior espaçamento entre canais e conseqüentemente o maior descasamento de fase, a componente de freqüência gerada pela MQO apresenta menor potência do que a onda gerada pela MQO com um espaçamento menor. Observa-se que a componente de freqüência gerada em $f_{112}' = 193,5$ THz ($\Delta f_2 = 200$ GHz) possui uma eficiência baixa já nos primeiros quilômetros da fibra enquanto que a componente em $f_{112} = 193,4$ THz ($\Delta f_1 = 100$ GHz) mantém-se com alta eficiência mesmo em comprimentos maiores da fibra. Isso pode ser entendido através da Eq. (8) que define o comprimento de coerência.

Faz-se agora a análise da influência da posição dos canais originais a fim de se constatar a interferência entre componentes espectrais geradas pela MQO e os canais originais. Utilizou-se um sistema com 3 canais com igual espaçamento ($f_1 = 193,05$ THz, $f_2 = 193,1$ THz $f_3 = 193,15$ THz) e com espaçamento diferente ($f_1 = 193,02$ THz, $f_2 = 193,1$ THz $f_3 = 193,15$ THz), uma fibra FDD [24] com 50 km na região de 1550 nm, considerando $\lambda_0 = 1550$ nm, e canais com potências iguais a 4 mW.



largura de banda total do sinal transmitido, exigindo que os amplificadores ópticos possuam ganho plano sobre uma largura de banda mais ampla [1], [20], [27], [29].

D - Influência da dispersão cromática na região de operação do sistema

Mesmo em fibras FDD uma significativa quantidade de dispersão estará presente em comprimentos de onda de operação além de 1560 nm, reduzindo assim o efeito da MQO. Quando se opera com comprimentos de onda além de 1560 nm pode-se usar além dos Amplificadores à Fibra Dopada com Érbio (AFDE) também os amplificadores baseados no efeito não-linear Raman [1], [7], [16].

Analisa-se agora a eficiência da MQO quanto à variação da dispersão sob a influência do espaçamento entre canais e o comprimento da fibra. Considera-se a região de operação do sistema afastada do comprimento de onda de dispersão zero da fibra, minimizando assim o efeito de geração de MQO, resultando na derivada da dispersão desprezível.

Na Figura 7 tem-se o comportamento da eficiência da MQO para uma fibra FDD, uma fibra padrão e uma fibra FDDNN todas operando na janela de 1550 nm. Esta figura foi obtida a partir da Eq. (5) fazendo $\Delta\beta_T = \Delta\beta$ e com o auxílio da ferramenta Mathcad [30].

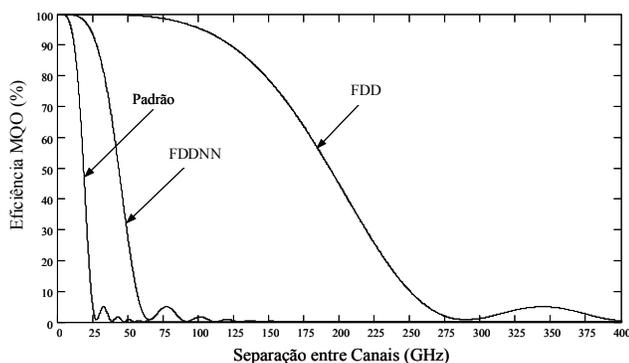


Fig. 7. Comparação da eficiência MQO entre uma fibra Padrão, uma fibra FDD e uma fibra FDDNN, com $\lambda = 1552$ nm, $\alpha=0,25$ dB/km e $L=10$ km.

Pode ser observado que a influência da dispersão na eficiência da MQO é caracterizada diferentemente para ambas as fibras. Isto se deve ao fato de que quanto maior for a dispersão, mais difícil será de se conseguir um perfeito casamento de fase. Assim com a presença da dispersão, as ondas co-propagantes terão menor probabilidade de se interferirem construtivamente num processo significativo de MQO [17], [20], [30]. Como a fibra FDDNN possui um valor de dispersão baixo em relação à fibra Padrão e alto em relação à fibra FDD, a eficiência dessa fibra na geração de produtos de MQO é intermediária entre as fibras Padrão e FDD. Isto é, para um mesmo comprimento da fibra, 10 km, e para uma mesma separação espectral entre os canais originais, a eficiência da MQO para a fibra FDDNN é maior do que para a fibra Padrão, porém menor do que para a fibra FDD na janela de 1550 nm.

V. CONCLUSÕES

Neste trabalho analisou-se o efeito não-linear de Mistura de Quatro Ondas. A ENLS foi solucionada numericamente através de uma ferramenta computacional, o Modulo de Transmissão da Virtual Photonics Inc. – VPI. Os resultados mostraram a dependência da eficiência de geração de novas componentes espectrais com a potência dos canais, separação entre eles, comprimento do enlace e nível de dispersão apresentado pela fibra na região de operação do sistema.

Constatou o aumento da potência da onda gerada pela MQO ao aumentar-se a potência dos canais de transmissão (no caso rotas ópticas concorrentes). Observou-se também o comportamento da eficiência MQO com a variação do comprimento da fibra. Pôde-se observar que para grandes espaçamentos entre canais, a onda gerada pelo processo de MQO terá eficiência apenas nos comprimentos iniciais da fibra. Isso evidencia que, ocorrerá o descasamento de fase entre as ondas co-propagantes já no início da fibra. Diminuindo o espaçamento entre canais, o descasamento ocorre para um comprimento da fibra maior.

O nível de dispersão apresentado pela fibra na região de operação do sistema influenciará significativamente nas condições do casamento de fase para que o processo de MQO ocorra, conforme os resultados apresentados.

Os resultados aqui obtidos servem como base para avaliação do desempenho de redes ópticas transparentes, onde o comprimento da fibra, no qual as rotas ópticas seguem concorrendo na mesma rota, definirá a eficiência do processo. Também a escolha de rotas ópticas com diferentes espaçamentos espectrais resultará em diferente eficiência do processo.

REFERÊNCIAS

- [1] Ramaswami, Rajiv; Sivarajan, Kumar N. Optical Networks: A Practical Perspective. 2nd Ed., San Diego – USA: Academic Press, 2002.
- [2] Steinkampa, Ansgar; Windmanna, Martin; Pachnicke, Stephan. More accurate simulation of dynamic transparent optical wavelength division multiplex networks. AEU - International Journal of Electronics and Communications vol. 61, Issue 3, p. 147-152, March 2007.
- [3] O'Mahony, M. J.; Politi, C.; Klionidis, D.; Nejabati, R.; Simeonidou, D. Future Optical Networks. Journal of Lightwave Technology, vol. 24, Issue 12, p. 4684-4696, Dec. 2006.
- [4] Nouchi, Pascale; Montmorillon, Louis-Anne de; Sillard, Pierre; Bertaina, Alain; Guenot, P. Optical fiber design for wavelength-multiplexed transmission. Comptes Rendus Physique, vol. 4, Issue 1, Pages 29-39, January-February 2003.
- [5] Souza Filho, Agostinho Linhares. Projeto de Redes Translúcidas de Longa Distância. Tese de Mestrado. FEEC/UNICAMP, 2003.
- [6] Naves, José Renato de Paula. Estratégias Evolutivas para a Rede Óptica a partir de Anéis WDM. Tese de Mestrado. FEEC/UNICAMP, 2002.
- [7] Agrawal, Govind; P. Fiber Optics Communication Systems. 3rd Ed., New York – USA: Wiley-Interscience, 2002.
- [8] Faisal, Mohammad; Islam, Mohammed Nazrul; Majumder, Satya Prasad. Performance comparison of wavelength shift keying WDM system and conventional on-off WDM system in presence of four-wave mixing Optik - International Journal for Light and Electron Optics, vol. 117, Issue 12, p. 55-562, December 2006.
- [9] Wegener, L. G. L.; Povinelli, M. L.; Green, A. G.; Mitra, P. P.; Stark, J. B.; Littlewood, P. B. The effect of propagation nonlinearities on the information capacity of WDM optical fiber systems: cross-phase modulation and four-wave mixing Physica D: Nonlinear Phenomena, vol. 189, Issues 1-2, p. 81-99, February 2004.

- [10] Wong, Kenneth K.Y.; Lu, Guo-Wei; Chen, Lian-Kuan. Experimental studies of the WDM signal crosstalk in two-pump fiber optical parametric amplifiers Optics Communications, vol. 270, Issue 2, p. 429-432, February 2007.
- [11] Ramamurthy B et al, Journal of Lightwave Technology, 17(10):1713-1723, outubro 1999.
- [12] Fonseca I E, Moisés R N Ribeiro, Hekio Waldman, XXI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, Brasil, Setembro de 2004.
- [13] Song, S.; Livas, J. Four-wave mixing induced Q-factor variations in WDM systems. Conference on Lasers and Electro-Optics - CLEO 2000. p. 341-342, 2000.
- [14] Shibata, Nori; BRAUN, Ralf P.; WAARTS, Robert G. Phase-Mismatch Dependence of Efficiency of Wave Generation Trough Four-Wave Mixing in a Single-Mode Optical Fiber. IEEE J. Quantum Electron., vol. QE-23, N° 07, p. 1205-1210, July 1987.
- [15] Keiser, Gerd. Optical Fibers Communications. 3rd Ed., USA: McGraw-Hill, 2000.
- [16] Inoue, Kyo; Toba, Hiromu. Error-Rate Degradation due to Fiber Four-Wave Mixing in Four-Channel FSK Direct-Detection Transmission. IEEE Photonics Technology Letters, vol. 03, N° 01, p. 77-79, January 1991.
- [17] Song, Shuxian et al. Intensity-Dependent Phase-Matching Effects on Four-Wave Mixing in Optical Fibers. J. Lightwave Technology, vol. 17, N° 11, p. 2285-2290, November 1999.
- [18] Hill, K. O. et al. CW three-wave mixing in single-mode optical fibers. J. Applied Physics, vol. 49, N° 10, p. 5098-5106, October 1978.
- [19] Stolen Roger H.; BJORKHOLM, John E. Parametric Amplification and Frequency Conversion in Optical Fibers. IEEE J. Quantum Electron., vol. QE-18, N° 07, p. 1062-1072, July 1982.
- [20] Araújo, Iwanir. Análise do Efeito Mistura de Quatro Ondas em Fibras Ópticas na Janela de 1550 nm. Dissertação de Mestrado. Instituto Nacional de Telecomunicações, 2003.
- [21] Abbade, Marcelo Luís Francisco. Contribuição para o Estudo de Não-Linearidades em Fibras Ópticas Monomodo. Tese de Doutorado. FEEC/UNICAMP, 2003.
- [22] Grosz, Diego F. Efeitos não lineares em sistemas de comunicação óptica de longas distancias e altas taxas. Tese de Doutorado. IFGW/UNICAMP, 1998.
- [23] Chavez Boggio, Jose Manoel. Efeitos não lineares em fibras ópticas de dispersão deslocada. Tese de Doutorado. IFGW/UNICAMP, 2001.
- [24] Corning Incorporated. Corning SMF/DS CPC6 Single Mode Dispersion-Shifted Optical Fiber, 1996.
- [25] Lucent Technologies. Fibra Óptica de Dispersão Deslocada Não Nula – TrueWave RS. 1998. Disponível em: <http://www.lucent.com>. Acesso em: dezembro 2002.
- [26] Freitas, Márcio; CALMON, Luiz de Calazans; Almeida, Renato Tannure R. Mistura de Quatro Ondas em Sistema WDM Utilizando Fibras DS. Anais do 19º Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, Fortaleza/CE, setembro de 2001.
- [27] Waarts, Robert G. et al. Nonlinear Effects in Coherent Multichannel Transmission through Optical Fibers. Proceedings of the IEEE, vol. 78, N° 08, p. 1344-1368, August 1990.
- [28] Wehmann, C.F.; Fernandes, L.M.; Sobrinho, C.S.; Lima, J.L.S.; Silva, M.G.; Almeida, E.F.; Medeiros Neto, J.A.; Sombra, A.S.B. Analysis of the four wave mixing effect (FWM) in a dispersion decreasing fiber (DDF) for a WDM system. Optical Fiber Technology, vol. 11, Issue 3, p. 306-318, July 2005.
- [29] Kojima, S. Numai, T. Theoretical analysis of modified repeated unequally spaced frequency allocations in FDM lightwave transmission systems. Journal of Lightwave Technology, vol. 24, Issue: 7, p. 2786 – 2797, July 2006.
- [30] Bogoni, A. Poti, L. Bononi, A. Accurate measurement of in-band FWM power in DWDM systems over nonzero dispersion fibers. IEEE Photonics Technology Letters, vol. 15, Issue 2 p. 260 – 262, February 2003.
- [31] Mathcad 2001 Professional for Windows 95/NT, version 6.0: Copyright © 1986-2001 Mathsoft, Inc. All rights reserved.

Maria Regina Campos Caputo: nasceu em São Tiago, MG, em 09 de abril de 1954. Possui os títulos de engenheira (INATEL 75), mestre e doutora (UFMG 93/2000). Foi professor adjunto II do INATEL (2001-2005) ministrando aulas no pós lato-sensu e mestrado, orientando 3 dissertações de mestrado e 4 monografias lato-sensu. Área de pesquisa: Redes Ópticas. É professora (desde 1999) do lato-sensu em engenharia de Telecomunicações da UFMG. É revisora de área da Optics Communications (Holanda) e Revista do Inatel. Foi consultora e proprietária da SOLITONS Engenharia Ltda (1994/2003) prestando consultoria técnica para: CVRD/95, ESCELSA/95 - Espírito Santo Centrais Elétricas e implementando cursos de "Redes Ópticas" para: Teleron/97, Petrobrás- Rio/ Salvador 95-97, Telemig/96, CBTU/97, CEB-Brasília/97, SERCONTEL -Paraná/98, ENERSUL/ MT/98. Trabalhou com planejamento, projeto e implantação de sistemas de grande porte via rádio e fibras ópticas nas empresas de consultoria técnica Engevis Engenharia S.A.- Belo Horizonte (85 à 89) e Main Engenharia S.A.- São Paulo (83 a 85), executando serviços para: Eletronorte (obras de ampliação do sistemas de telecomunicações em subestações no Mato Grosso), Furnas, Itaipu Binacional, Chesf, Eletrosul e Cemig. Trabalhou na Italtel Società Italiana Telecomunicazione - Belo Horizonte (79 a 82) com a fabricação de equipamentos de ondas portadoras e ESCELSA (78 a 81). Integrou comissões da ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 81/82. Possui diversas publicações técnicas em revistas nacionais e internacionais. Obteve os prêmios Telexpo/Equitel (3.º lugar-1995, 2.º lugar-1996, 4.º lugar-1999).



Iwanir Araújo da Silva Júnior nasceu em Formiga, MG, em 27 de setembro de 1977. Possui os títulos: Auxiliar Técnico de Química (Dom Belchior, 1995), Engenheiro Eletricista (CEFET-MG, 2001) e Mestre em Engenharia de Telecomunicações (Inatel, 2003).

Em 2003 participou do corpo docente do Departamento Acadêmico de Engenharia Elétrica – DAEE do CEFET-MG lecionando disciplinas de Eletrônica Digital, Sistemas de Comunicação e Desenho Técnico. De 2004 a 2005 atuou na área de engenharia de manutenção da MRS Logística S.A. desenvolvendo trabalhos no campo de confiabilidade de locomotivas e foi coordenador do Grupo de Controle de Perdas (SGMASST) sendo responsável pelas Oficinas de Manutenção de Conselheiro Lafaiete e Jeceaba. Na mesma empresa, atuou como Coordenador de Qualidade sendo responsável pela implantação do Sistema ISO 9001:2000 das mesmas oficinas e também como coordenador da área manutenção de locomotivas de toda as oficinas da MRS Logística S. A. sendo responsável por integrar toda a parte de implantação do Sistema de Gestão de Qualidade. Foi coordenador de implantação na área de manutenção do projeto piloto do Sistema de Gestão Integrado envolvendo as Normas ISO 9001:2000, OHSAS 18000:2002 e ISO 14001:2004. Desde 2006 trabalha na VALE onde atuou como Supervisor de Programação e Controle da Manutenção e no Grupo de Análise de Falhas ligado à Gerência de Sinalização, Telecomunicações e Energia da Estrada de Ferro Vitória Minas - EFVM. Atualmente atua na implantação do Sistema de Gerenciamento da Manutenção – SGM em toda as ferrovias VALE (EFVM, EFC e FCA), faz parte do Subcomitê de Planejamento e Gestão da Manutenção VALE e está ligado a Gerência de Gestão de Tecnologia. Tem interesse em pesquisas no campo de fibras ópticas e telecomunicações em geral bem como na área de engenharia elétrica, possui também interesse na área de confiabilidade, manutenção elétrica e eletroeletrônica, projetos, qualidade, sistemas de gerenciamento, análise de falha da manutenção, LCC, RCM e Planejamento e Controle buscando conhecimentos relacionados à Excelência da Manutenção e implementação de melhorias em processos de manutenção.