



ANÁLISES DA NÃO LINEARIDADE KERR EM SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO POR FIBRA ÓPTICA

Fabio B. de Sousa¹, Elizete R. Sabino², Márcio B. C. Costa³, Fiterlinge M. de Sousa⁴, Jorge Everaldo de Oliveira⁵, Osmar Tharllles B. de Oliveira⁶ e Marcos B. C. Costa⁷

^{1,2,3,4,5,6}, zete.iuiqui@gmail.com, marciocostamat@gmail.com, fiter22@gmail.com, joeveraldo@yahoo.com, osmar.borges@unifesspa.edu.br. Alunos do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pará, Belém - PA – Brasil.

⁷ marcocosta@ufpa.br. Professor Assistente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pará, Belém - PA – Brasil.

Resumo

O presente trabalho busca discutir alguns problemas que afetam as transmissões em uma fibra monomodo padrão (SMF – *Single Mode Fiber*), em especial a não linearidades *Kerr*, a qual foi analisada numericamente usando simulações no *OptiSystem*, através da variação da potência de entrada e o espaçamento entre canais. O diagrama de olho e espectro óptico serão utilizados como metodologias para a avaliação do desempenho dos sistemas.

Palavras-chave: Efeito *Kerr*; Potência; Espaçamento entre canais; degradação.

1. INTRODUÇÃO

Sem sobra de dúvidas a fibra óptica revolucionou os sistemas de telecomunicações, e quando se trata da capacidade de transmissão, eficiência energética, baixo custo e velocidade é bem superior aos cabos metálicos. Porém quando um sinal se propaga do transmissor para o receptor, a sua qualidade se degrada devido as obstruções na camada física da rede. Também em longas distâncias a SMF é passiva de dispersão, resultando em um alargamento dos pulsos entre outros problemas que poderão comprometer as transmissões em sistemas de Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda (WDM – *Wavelength Division Multiplex*). A necessidade de aplicar maiores potências no enlace é um fator determinante para o aparecimento das não-linearidades, dando origem às interferências, distorções, aumento da dispersão (BHUSARI, DESHMUKH E JAGDALE, 2016). Por isso é importante conhecer esses fenômenos, para que os mesmos não sejam mais deletérios aos sistemas de comunicação por fibra óptica. Portanto esta pesquisa utilizará métodos de análise do sinal em um enlace de fibra óptica, através dos resultados dos diagramas de olho e dos espectros ópticos apresentados

na seção 4, afim de verificar quais os efeitos não lineares que se manifestam ao se variar os parâmetros da rede, tais como: potência e espaçamento entre canais.

2. EFEITOS NÃO LINEARES NA FIBRA ÓPTICA

Qualquer dielétrico quando submetido a uma forte potência no seu campo eletromagnético, responde linearmente, portanto as fibras ópticas não são uma exceção. Nesse sentido a polarização P da luz na fibra óptica que é induzida por dipolos elétricos é não linear no campo elétrico E , que é dada por:

$$P = \varepsilon_0(\chi^1 \cdot E + \chi^2 : EE + \chi^3 : EEE + \dots) \quad (1)$$

Sendo ε_0 a permissividade do vácuo e χ^j é a susceptibilidade de ordem j , onde $j = (1, 2, \dots)$.

As não linearidades ópticas incluem: Dispersão *Raman* Estimulada, Espalhamento *Brillouin* Estimulado e o Efeito *Kerr*. Dependendo do tipo de sinal de entrada, a não linearidade *Kerr* que se origina da susceptibilidade de terceira ordem, apresenta três efeitos diferentes, como a automodulação de fase (SPM – *Self Phase Modulation*), Modulação de Fase Cruzada (XPM – *Cross Phase Modulation*) e Mistura de Quatro Ondas (FWM – *Four Wave Mixing*).

A propagação do sinal através da fibra óptica é governada pela Equação Não Linear de Schrödinger (NLSE) simplificada (AGRAWAL, 2002):

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

Onde A é a amplitude complexa do sinal óptico, β_2 e β_3 são os parâmetros de dispersão de segunda e terceira ordem, γ é o coeficiente não-linear, e α é a perda da fibra.

2.1 Automodulação de Fase (SPM)

Acontece em sistema de canal único, refere-se ao deslocamento de fase auto-induzido, um *chirp* de frequência (alongamento do pulso no domínio do tempo) dependente da intensidade da potência (Ibrahim; Talib; Zainab, 2016):

$$\phi_{NL} = \frac{2\pi}{\lambda} n_2 L |E|^2 \quad (3)$$

Em que n é o índice de refração, L é o comprimento da fibra, λ é o comprimento de onda do pulso e $|E|$ o módulo do campo elétrico.

2.2 Modulação de Fase Cruzada (XPM)

É semelhante ao efeito SPM, porém só ocorre quando há dois ou mais sinais ópticos (vários canais) se propagando através da Fibra. A expressão para o desvio de fase é dada por (IBRAHIM; TALIB E ZAINAB, 2016):

$$\phi_{NL} = \gamma L \left[P_i(t) + 2 \sum_{i \neq j} P_j(t) \right] \quad (4)$$

Onde $P_i(t)$ é a potência óptica do canal central, e $P_j(t)$ do j-ésimo canal.

2.3 Mistura de Quatro Ondas (FWM)

Acontece em sistema com vários canais, quando as ondas se misturam geram bandas laterais em $(2\omega_1 - \omega_2)$ e $(2\omega_2 - \omega_1)$. Estas bandas laterais passam junto com ondas originais e reduzem a força do sinal. O número de sinais recém-gerados é dado por:

$$FWM = \frac{N^2}{2}(N - 1)$$

Onde N é o número de componentes de frequência de entrada.

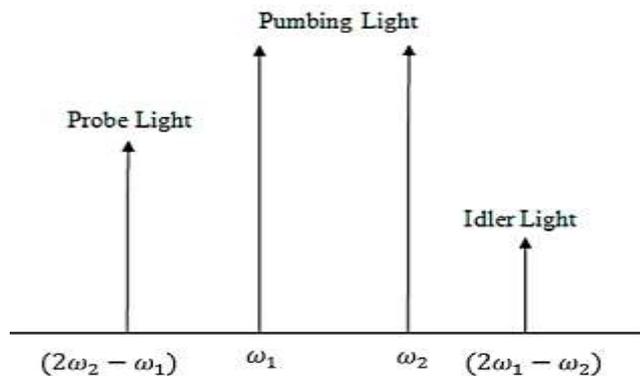


Figura 1 – Fenômeno da mistura de quatro ondas.
Fonte: IBRAHIM, TALIB E ZAINAB, 2016.

No FWM a dispersão varia conforme o comprimento de onda. Como as ondas geradas e as ondas do sinal têm velocidade de grupo diferentes, não há casamento de fase, reduzindo a transferência de potência para as novas frequências geradas e se qualquer onda gerada e a onda

do sinal tiverem o mesmo comprimento de onda, ocorrem interferências. As diferentes velocidades de grupo e o aumento da dispersão da fibra e do espaçamento entre canais, poderão diminuir o efeito de FWM (KEISER, 2008).

3. SIMULAÇÕES SPM, XPM E FWM

As redes simuladas no software *Optisystem*, foram desenvolvidas para estudar os efeitos de SPM, XPM e FWM. Como mostram as figuras 1 e 2 a seguir:

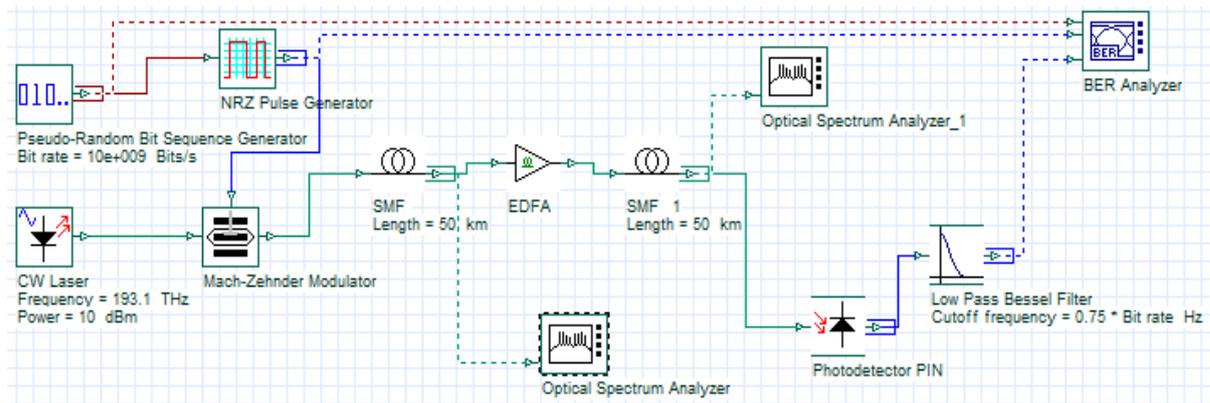


Figura 2 – Layout de simulação do SPM.

O *layout* de simulação SPM, mostra um sistema de comunicação óptico com um gerador de sequência de bits pseudo – aleatória, um modulador não retorno ao zero (NRZ – *Non Return to Zero*), um laser de onda contínua (CW – *Continuous Wave*), um modulador de amplitude *Mach – Zehnder* e um amplificador de fibra dopado com érbio (EDFA – *Erbium Doped Fiber Amplifier*), todos conectados em dois segmentos de fibra monomodo de 50 km de comprimento cada. Para gerar e analisar os diagramas de olho e espectro óptico são utilizados o analisador de *Bit Error Rate* (BER) e Analisador de Espectro Óptico. A taxa de transmissão utilizada é de 10 Gb/s, o comprimento de onda $\lambda = 1550 \text{ nm}$ e a frequência é de 193.1 THz.

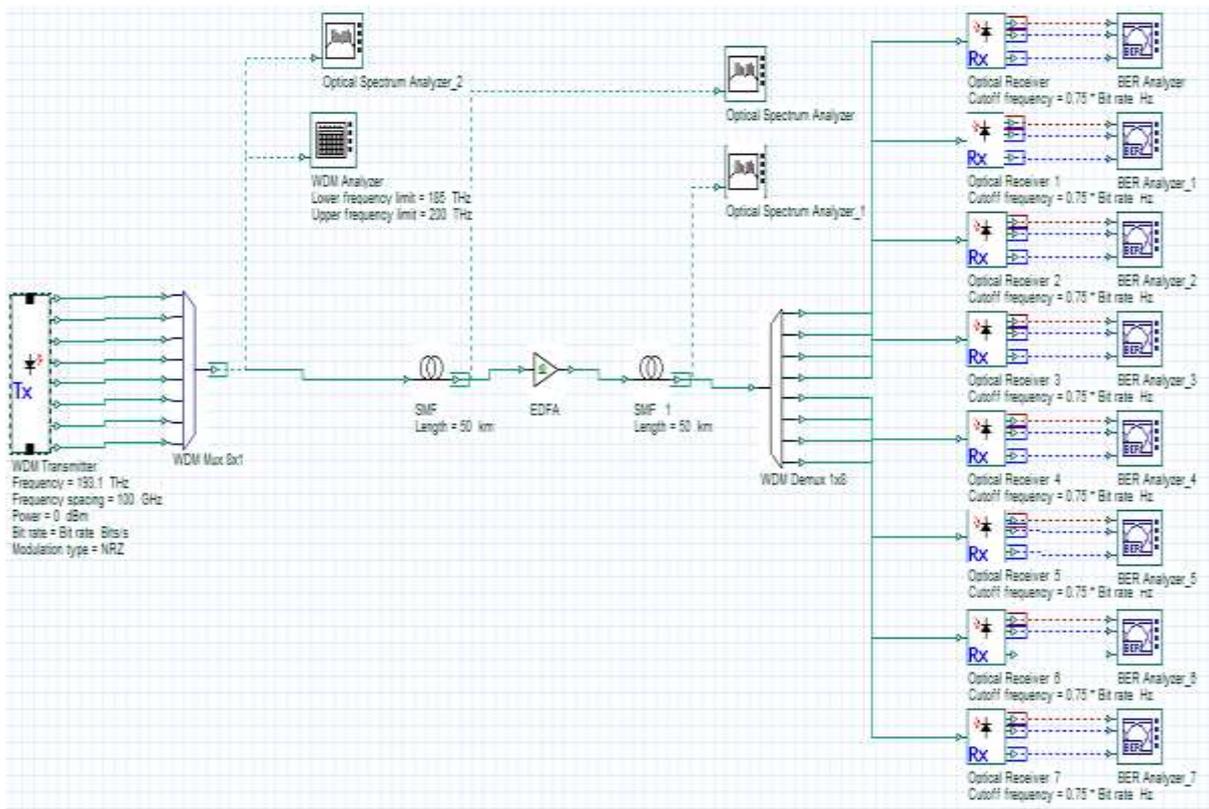


Figura 3 – Layout de simulação do XPM e FWM.

A figura 3 apresenta um sistema WDM com 8 transmissores e receptores, tem praticamente os mesmos componentes do projeto da figura 2, a frequência para o primeiro canal também é igual, mas para os demais canais há uma variação de 100 GHz a 300 GHz. As análises também são feitas pelos analisadores de BER e do espectro óptico.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a análise do desempenho dos sistemas levou-se em consideração o fator Q, BER e o espectro óptico. Nesta seção os resultados de automodulação de fase, modulação de fase cruzada e mistura de quatro ondas, serão apresentados através das variações da potência de entrada e espaçamento entre canais do sistema WDM ilustrado pela figura 3. Os gráficos de mesma categoria estão dispostos um do lado do outro para melhor visualização e comparação dos resultados.

4.1 Variação da Potência de Entrada no SPM, XPM e FWM

A potência de entrada está variando de -10 a 20 dBm distribuídas em 10 interações em 100 km de SMF, com taxa de bits de 10 Gb/s. O fator de qualidade e a BER foram medidos como mostram as figuras 4 e 5.

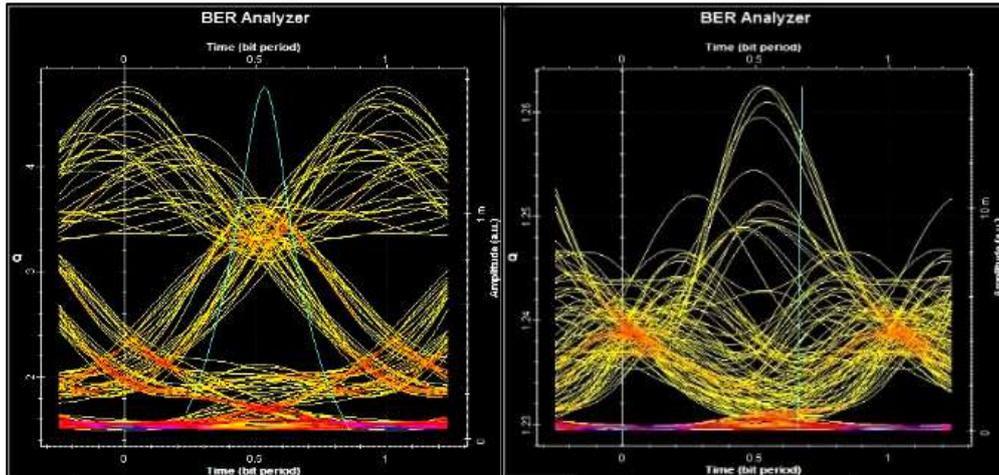


Figura 4 – Diagramas oculares para a automodulação de fase para -10 dBm (esquerda) e 10 dBm (direita).

A figura 4 mostra que o BER aumenta de $9,8 \times 10^{-7}$ para 0,07 quando a potência de entrada aumenta e o fator de Q diminui de 4,8 para 1,3. A abertura do olho diminui (olho estressado) com o aumento da potência de entrada, ou seja, a SPM cresce e o sinal fica degradado.

Para analisar o efeito de XPM os valores da potência de entrada foram comparados de 0 dBm e 16 dBm em um sistema WDM com 8 canais (fig. 2), como mostra a figura 3.

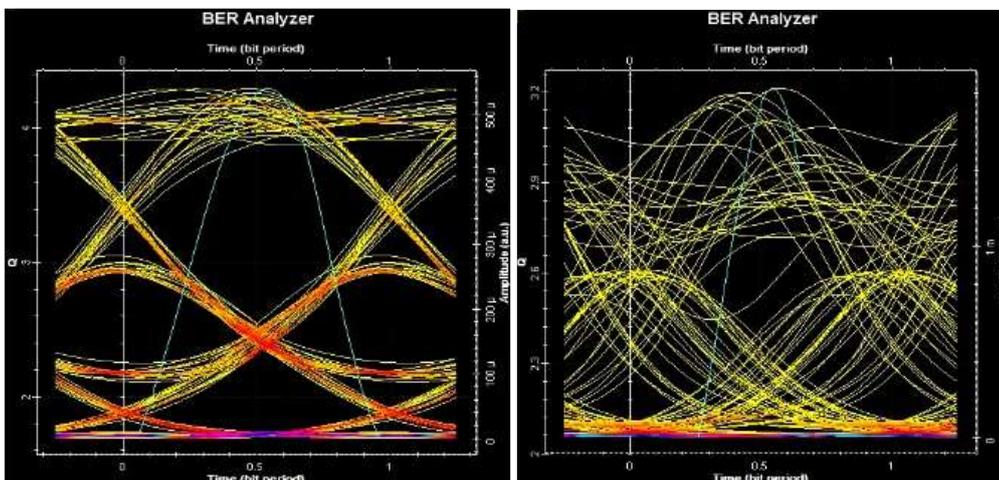


Figura 5 – Diagramas oculares modulação em fase cruzada para 0 dBm (esquerda) e 16 dBm (direita).

Como resultado a figura 5 mostra que o BER aumenta de $5,3 \times 10^{-6}$ para 0,0005 quando a potência de entrada aumenta e o fator de Q diminui de 4,4 para 3,2. Portanto o efeito XPM aumenta, degradando assim o desempenho do sistema.

Nas figuras 6 e 7 (direita) os resultados mostram que quando a potência aumenta de 0, 13 e 20 dBm na saída do sistema o FWM torna-se significativo, gerando mais produtos.

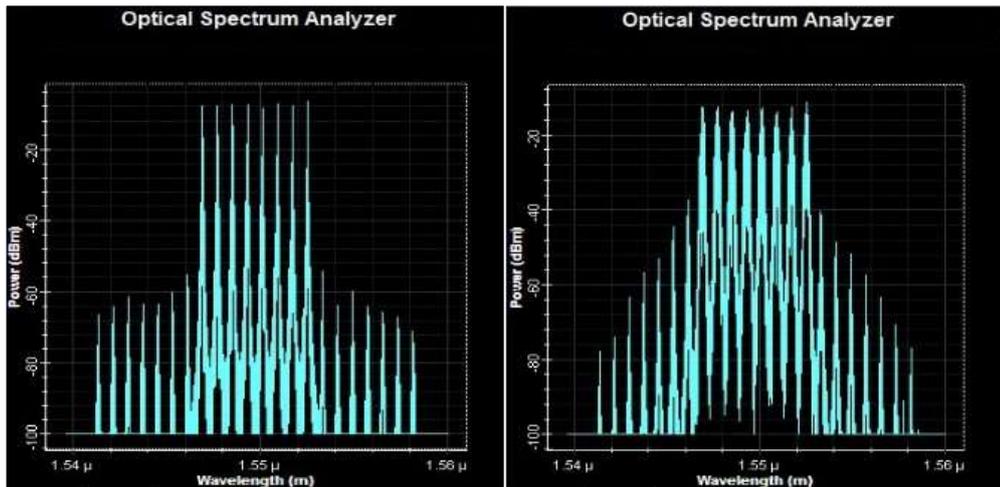


Figura 6 – Espectro óptico na saída da fibra quando a potência de entrada é de 13 dBm (esquerda) e 20 dBm (direita).

Isto mostra que com o aumento da potência o FWM também aumenta. Vale ressaltar que para esta simulação os parâmetros da fibra como dispersão e área efetiva permaneceram inalterados com 16 ps/nm/km e 80 m² respectivamente, porque as bandas laterais devido FWM são reduzidos quando o coeficiente de dispersão e a área efetiva da fibra são aumentados (BHUSARI, DESHMUKH, JAGDALE, 2016).

4.2 Efeito de FWM na Entra e Saída do Sistema

A figura 7 mostra os produtos do XPM na entrada e na saída do sistema.

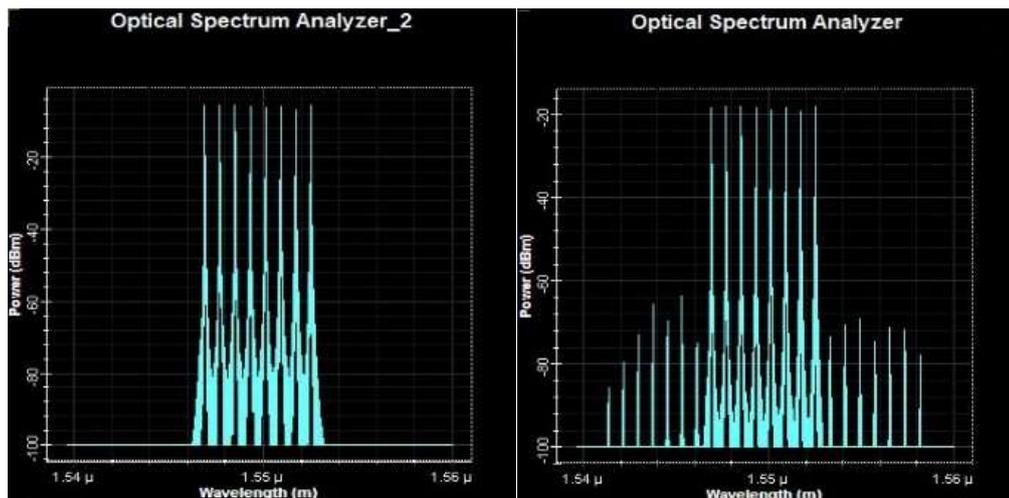


Figura 7 – Sinal óptico de entrada e saída do circuito FWM em 0 dBm.

Após se propagarem na fibra as ondas geraram 224 bandas laterais com potências variando de aproximadamente -64 a -87 dBm. Essas novas bandas são também denominadas produtos de FWM, os quais são prejudiciais aos sistemas de telecomunicações.

4.3 Variação do Espaçamento entre Canais no XPM e FWM

Na análise do diagrama de olho os valores do fator Q obtidos para espaçamentos entre canais de 100 GHz e 200 GHz foram 4,4 e 5,8 e o BER foram $5,3 \times 10^{-6}$ e $3,2 \times 10^{-9}$ respectivamente, isto é, quando se aumenta o espaçamento entre canais o XPM diminui. Conseqüentemente com o aumento do espaçamento entre canais houve uma redução da potência das bandas laterais, assim o efeito de FWM também é reduzido.

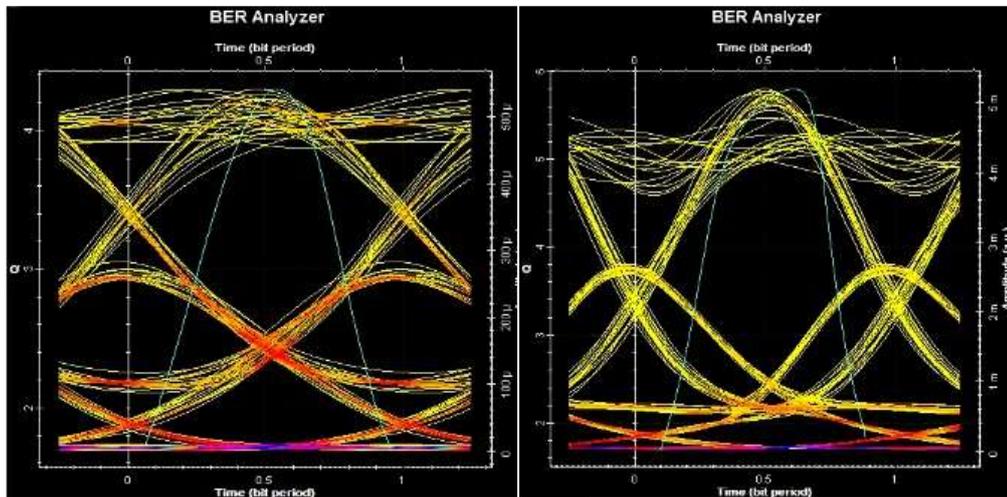


Figura 8: Diagramas oculares XPM com 100 GHz (esquerda) e 200 GHz (direita) canal espaçamento, respectivamente em 0 dBm.

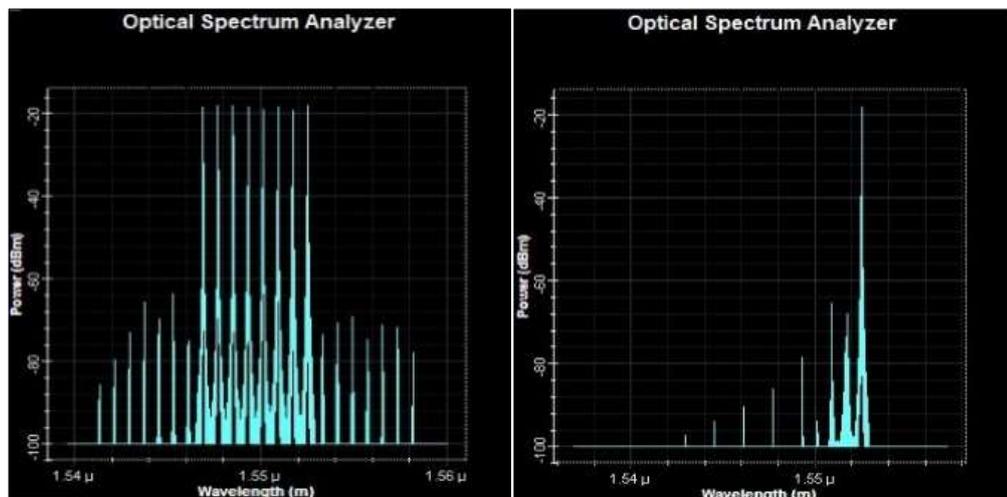


Figura 9 - Sinal de saída para FWM com espaçamentos de 100 GHz e 200 GHz respectivamente em 0 dBm.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho analisamos o desempenho das não linearidade *Kerr* em sistemas comunicação por fibra óptica através dos fatores Q e BER no diagrama de olho. Os comportamentos de SPM, XPM e FWM versus a potência de entrada e espaçamentos entre canais foram investigados. No geral os efeitos não lineares poderão gerar graves danos ao desempenho dos sistemas de telecomunicações por fibra óptica, mas se forem utilizados com técnicas especiais de regeneração poderão não ser mais problemas. Nossos trabalhos futuros serão pautados na análise dos efeitos não lineares, porém com o propósito de desenvolver sistemas capazes de realizar a regeneração 3 R (Reamplificação, Ressincronização e Reformatação) do sinal em uma rede totalmente óptica.

AGRADECIMENTOS

Ao desenvolvedor *OptiWave Inc.* do simulador *OptiSystem*. Ao Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado da UFPA e a Pró reitoria de Pós-graduação Pesquisa e Inovação Tecnológica da Unifesspa.

REFERÊNCIAS

- Agrawal G. P. *Fiber-Optic Communication Systems*, 3rd ed., John Wiley Sons, Inc., New York, NY, 2002.
- Bhusari Shraddha N.; Deshmukh Vikas U.; Jagdale Shantanu S. Analysis of SPM, XPM, and FWM in Fiber Optic Communication Using OptiSystem. *IJSTE - International Journal of Science Technology & Engineering* | Volume 2 | Issue 07 | January 2016.
- Ibrahim A. Murdas, Talib M. Abbas, Zainab A. Abbas. Numerical Simulation for Self Phase Modulation and Cross Phase Modulation in Optical Fiber. *International Journal of Science and Research (IJSR)*. 2016.
- Keiser Gerd. *Optical Fiber Communications*. Mcgraw Hill. Fourth Edition, 2008.
- Marvin Suraj Koshy and Pratheesh P. Analysis of SPM and FWM in Optical Fiber Communication System using Optisystem. *4 International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*. ISSN: 2278-0181. Vol. 3 Issue 3, March – 2014.
- Siraj Sidhik, Binu.S.Madhavan & V P Mahadhevan Pillai. Performance Analysis of SPM, XPM and FWM in an Optical Fiber using Optisystem. Conference: International Workshop on Optical Networking Technologies and Data Security, At Spain.