

Efeitos da Instabilidade de Modulação em Sistemas de Comunicações Ópticamente Amplificados: Fundamentos e Projeto de Sistemas

Renato T. R. de Almeida, Marcio Freitas, Moisés R. N. Ribeiro e Luiz de C. Calmon

Laboratório de Telecomunicações, Depto. de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo, Brasil
e-mail: renato.almeida@ele.ufes.br

Resumo. O advento dos amplificadores ópticos possibilitou sistemas de telecomunicações a fibra óptica com enlaces sem âncias é a interação entre o ruído de emissão espontânea, gerado pelos amplificadores ópticos, e o sinal, que caracteriza os fenômenos de instabilidade de modulação e de banda lateral. O presente trabalho descreve o modelamento de tais fenômenos e, através de simulações numéricas, procura verificar a influência da instabilidade de modulação na determinação de parâmetros como níveis de potência, características de dispersão da fibra e métodos de compensação de dispersão, permitindo uma análise com aplicação no projeto de sistemas ópticos multiamplicados.

Palavras-chave. instabilidade de modulação, instabilidade de banda lateral, ruído de emissão espontânea, amplificadores ópticos, sistemas ópticos multiamplicados.

I. Introdução

O desenvolvimento da tecnologia de amplificação óptica possibilitou a implementação de enlaces sem regeneradores da ordem de milhares de quilômetros. No entanto, a utilização de amplificadores ópticos acarreta a inserção periódica e cumulativa de ruído de emissão espontânea (ruído ASE) [1]. Para se garantir uma boa relação sinal ruído no receptor em tais sistemas, aumenta-se a potência do sinal, mas na medida em que níveis maiores de potência são utilizados, a fibra passa apresentar comportamento não linear [2].

Uma das consequências da operação em regime não linear de fibras ópticas é a interação do ruído ASE com o sinal, degradando a performance do sistema [3]. Tal interação pode ser causada pela ação conjunta da dispersão de velocidade de grupo e da auto-modulação de fase, quando é denominada instabilidade de modulação, e pela compensação concentrada e periódica de perdas, caso em que é denominada instabilidade de banda lateral [1][3][4].

Neste trabalho são estudados o comportamento do fenômeno da instabilidade de modulação com o objetivo de verificar a influência de parâmetros como níveis de potência, características de dispersão da fibra e métodos de compensação de dispersão, permitindo uma análise de aplicação direta no projeto de sistemas.

O método utilizado é constituído por uma abordagem analítica aproximada para a compreensão da origem do fenômeno, descritas nas seções II, III e V, e por simulações numéricas rigorosas (sem as simplificações do modelo analítico) baseadas na resolução da Equação Não Linear de Schrödinger pelo método Split Step de Fourier [3]. Na seção IV fala-se sobre a modelagem de amplificadores ópticos a fibra dopada com érbio (EDFA) [2]. A seção VI trata de métodos de compensação de dispersão, analisados aqui como

repetidores da ordem de milhares de quilômetros. Um limitante para se atingir tais dist uma forma de minimizar a degradação devido à instabilidade de modulação. Na seção VII estão os resultados obtidos e sua análise e a seção VIII consiste nas conclusões.

II. Modelagem de Sistemas Ópticos Não Lineares

A equação (1) governa a propagação de pulsos com envelope de amplitude de campo elétrico $A = A(z, T)$ no interior de fibras ópticas.

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

Os termos β_2 , β_3 , α e γ desta equação referem-se, respectivamente, aos efeitos de dispersão de primeira e segunda ordem, de atenuação, e ao efeito não linear de auto-modulação de fase nos pulsos que se propagam na fibra [3]. O tempo é representado pela variável normalizada $T = t - \beta z$, onde β é a constante de propagação, t é o tempo e z é a distância ao longo da fibra.

A equação (1) pode ser simplificada desconsiderando-se as perdas (α) e a dispersão de alta ordem (β_3), resultando em

$$i \frac{\partial A}{\partial z} = \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} - \gamma |A|^2 A. \quad (2)$$

A equação (2) é semelhante à Equação Não Linear de Schrödinger (ENLS). A solução estacionária de (2) para um sinal de potência óptica constante P_0 , correspondendo a um laser ideal funcionando sem modulação (estado CW), é dada por [3]:

$$A(z, T) = \sqrt{P_0} \exp(i\gamma P_0 z). \quad (3)$$

III. Instabilidade de Modulação

Pode-se observar em (3) que o sinal CW se propaga ao longo da fibra sem modificação de amplitude, sendo a única alteração causada pelo comportamento não linear da fibra a distorção de fase dependente de P_0 , dada pelo termo $\exp(i\gamma P_0 z)$.

Para se avaliar a estabilidade da solução estacionária, insere-se uma pequena perturbação a , mostrada na equação (4).

$$A(z, T) = (\sqrt{P_0} + a) \exp(i\gamma P_0 z) \quad (4)$$

Substituindo (4) em (2) e linearizando em a , obtêm-se

$$i \frac{\partial a}{\partial z} = \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 a}{\partial T^2} - \gamma P_0 (a + a^*). \quad (5)$$

onde a^* é o conjugado de a .

A solução geral para (5) tem a forma

$$a(z, T) = a_1 \cos(Kz - \Omega T) + ia_2 \sin(Kz - \Omega T), \quad (6)$$

onde K e Ω são o número de onda e a frequência da perturbação $a(z, T)$. Substituindo-se (6) em (5), obtêm-se um sistema de duas equações homogêneas para a_1 e a_2 . Esse sistema tem uma solução não trivial desde que se satisfaça a relação abaixo [3]:

$$K = \pm \frac{|\beta_2|}{2} \Omega \sqrt{\Omega^2 + \text{sgn}(\beta_2) \Omega_C^2}, \quad (7)$$

onde

$$\Omega_C^2 = \frac{4\gamma P_0}{|\beta_2|}. \quad (8)$$

A equação (7) representa a relação de dispersão entre o número de onda e a frequência da perturbação e depende criticamente do regime de dispersão ($\beta_2 < 0$ – regime anômalo, $\beta_2 > 0$ – regime normal). No regime normal de dispersão, K é real para todos os valores de Ω e o estado estacionário é estável. No entanto, se o regime de dispersão for anômalo, K se torna imaginário e a perturbação tende a crescer exponencialmente com z , caso se tenha $|\Omega| < \Omega_C$, que poderia ser chamada de frequência crítica.

O ganho introduzido na perturbação em função de sua frequência Ω é dado por

$$g(\Omega) = 2 \text{Im}(K) = |\beta_2| \Omega \sqrt{\Omega_C^2 - \Omega^2}, \quad (9)$$

que assume o valor máximo g_{\max} , para uma frequência de perturbação $\Omega_{g_{\max}}$ [3]:

$$g_{\max} = 2\gamma P_0, \quad (10)$$

$$\Omega_{g_{\max}} = \pm \frac{\Omega_C}{\sqrt{2}} = \pm \sqrt{\frac{2\gamma P_0}{|\beta_2|}}. \quad (11)$$

O espectro do ganho associado ao efeito de instabilidade de modulação está ilustrado na Fig. 1. Devemos observar que o ganho associado à perturbação tem seu espectro localizado em torno da frequência óptica do sinal CW (ω_0).

A instabilidade de modulação também pode ser interpretada como um processo de mistura de quatro ondas (*four-wave-mixing* – FWM) entre o sinal e o ruído com a condição de casamento de fase induzida pela auto-modulação de fase. Este casamento de fase tem seu máximo em $\omega_0 \pm \Omega_{g_{\max}}$, onde o ganho paramétrico da instabilidade de modulação também é máximo [3][5]. No domínio do tempo o feixe CW tende a se converter em um trem de pulsos cujo período é $T_m = 2\pi/\Omega_{g_{\max}}$ [3].

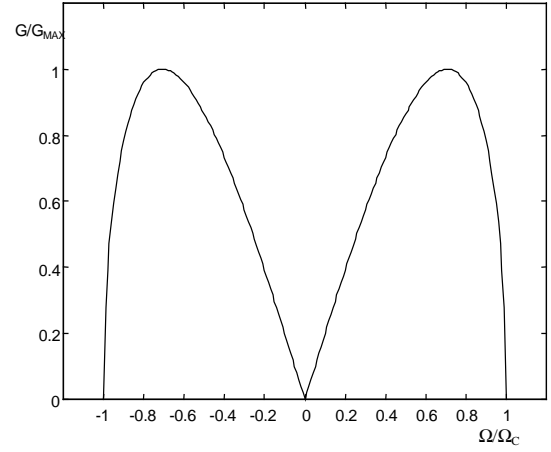


Figura 1. Espectro do ganho normalizado associado ao efeito de instabilidade de modulação de um feixe óptico CW de frequência ω_0 perturbado por um sinal de pequena intensidade de frequência $\omega_0 \pm \Omega$ numa fibra DS ($D = -4$ ps/nm² e $\gamma = 1.7$ W/km, sendo $\beta_2 = -\lambda^2 D / (2\pi c)$, onde $\lambda = 1550$ nm – comprimento de onda e $c = 3.10^8$ m/s – velocidade da luz no vácuo).

IV. Amplificação Óptica com Ruído

Consideremos um sistema óptico, em que a atenuação causada pela fibra é periodicamente compensada por amplificadores ópticos de ganho $G = \exp(\alpha Z_A)$ onde Z_A é o espaçamento entre amplificadores consecutivos (Fig. 2).

Cada amplificador insere ruído de emissão espontânea no sinal propagante. Dada uma banda óptica B_0 , este ruído tem potência média P_{ASE}

$$P_{ASE} = hf_0 (G - 1) \eta B_0, \quad (12)$$

onde hf_0 é a energia do fóton e η é o fator de emissão espontânea do amplificador[2].

O ruído de emissão espontânea também altera a fase do sinal, e a fase do ruído adicionada tem variância ϕ_{ASE} [2].

$$\phi_{ASE} = \frac{hf_0 (G - 1) \eta B_0}{2GP_{in}}, \quad (13)$$

onde P_{in} é a potência de entrada do sinal no amplificador.

A acumulação de ruído ao longo da cadeia de amplificadores pode tornar o efeito da instabilidade de modulação bastante significativo. Veja na Fig. 3 o efeito da instabilidade de modulação sobre um sinal CW com $P_0 = 5$ mw num enlace com 25 amplificadores espaçados de $Z_A = 50$ km, utilizando-se fibra DS ($D = \pm 4$ ps/nm², $\gamma = 2.6$ W/km, e $\lambda = 1550$ nm).

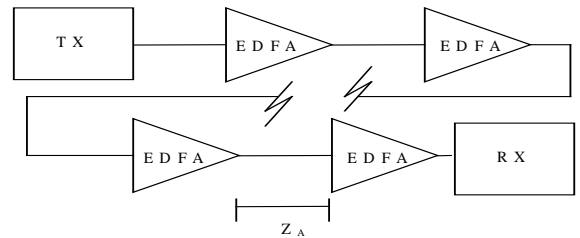


Figura 2. Modelo de um sistema opticamente amplificado sem compensação de dispersão.

O resultado mostrado na Fig. 3 se assemelha bastante aos apresentados por outros autores [1]. Na Fig. 3b observa-se o surgimento de picos significativos de potência em torno da frequência do sinal CW, proporcionais à potência utilizada, indicando o efeito do processo de FWM entre as componentes espectrais originárias do ruído e o sinal CW.

Em regime normal de dispersão (Fig. 3a), o efeito de auto-modulação de fase não proporciona um alargamento espectral tão significativo quanto no regime anômalo, mas observa-se mesmo assim o surgimento de produtos em torno da frequência do sinal CW, decorrentes do processo de instabilidade de banda lateral, descrito na próxima seção.

V. Instabilidade de Banda Lateral

A compensação da atenuação num enlace através de uma sequência periódica de amplificadores ópticos modula periodicamente o efeito de auto-modulação de fase, dado que este depende diretamente do nível de potência óptica do sinal (Fig. 4). Essa modulação pode gerar um casamento de fase entre as componentes espectrais do ruído e do sinal, que causa a amplificação paramétrica do ruído [1][6]-[9].

Tal fenômeno é denominado instabilidade de banda lateral, que se apresenta tanto em regime anômalo de dispersão quanto em regime normal. Sua intensidade é bem menor que a da instabilidade de modulação na situação proposta pela presente investigação, como se pode observar pela Fig. 3a.

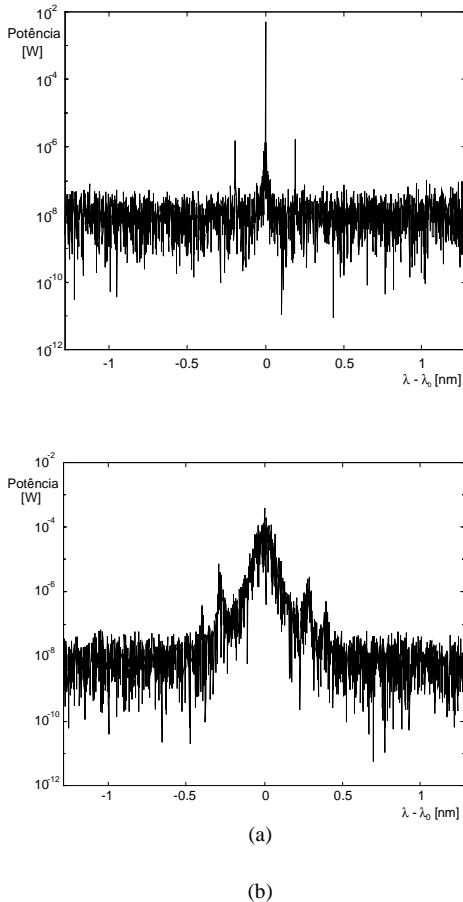


Figura 3. Espectro do sinal no receptor obtido com simulações numéricas para regime normal de dispersão, com $D = -4$ ps/(nm.km) (a) e em regime anômalo de dispersão, com $D = 4$ ps/(nm.km) (b) para transmissão de feixe CW com potência de 5 mw num enlace de 2500 km com 50 amplificadores espaçados de $Z_A = 50$ km.

Pode-se analisar a potência do sinal como se fosse uma função periódica $P(z)$ no domínio espacial z , com período Z_A . A função $P(z)$ assume um aspecto de queda exponencial em seu período, já que a atenuação é da forma $\exp(-\alpha z)$. Pode-se expandir a função $P(z)$ em uma série de Fourier da seguinte forma[1]:

$$P(z) = P_0 \left\{ C_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [A_n \cos(k_n z) + B_n \sin(k_n z)] \right\}, \quad (14)$$

onde

$$k_n = 2\pi n / Z_A, \quad C_0 = \bar{P} / P_0 = [1 - \exp(-\alpha Z_A)] / (\alpha Z_A)$$

$$C_n = C_0 / [1 - i(k_n / \alpha)], \quad A_n = 2 \operatorname{Re}[C_n], \quad B_n = -2 \operatorname{Im}[C_n] \text{ e}$$

$$\bar{P} = \frac{1}{Z_A} \int_0^{Z_A} P(z) dz = P_0 [1 - \exp(-\alpha Z_A)] / (\alpha Z_A).$$

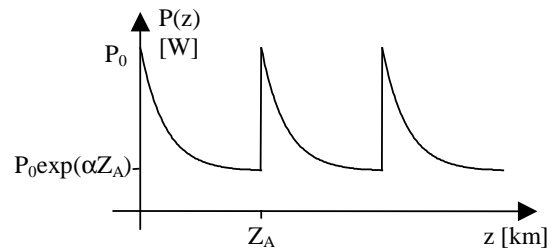


Figura 4. Modulação da potência do sinal através de um enlace com multiplificação óptica periódica. \bar{P} é a potência óptica média ao longo do enlace.

Aplicando um método de perturbação na proximidade da ressonância paramétrica causada pela modulação dada por $P(z)$, obtém-se o ganho paramétrico de potência causada pela instabilidade de banda lateral [1]:

$$g(\Omega) = \left\{ (2\gamma |C_n| P_0)^2 - (\beta_2 \Omega^2 + 2\gamma \bar{P} - k_n)^2 \right\}^{1/2}. \quad (15)$$

onde $|C_n| = C_0 / [1 + (k_n / \alpha)^2]^{1/2}$. O ganho máximo é obtido na exata ressonância, onde $(\beta_2 \Omega^2 + 2\gamma \bar{P} - k_n) = 0$, que ocorre em

$$\Omega_{g \max} = \pm \sqrt{\frac{k_n - \operatorname{sgn}(\beta_2) 2\gamma \bar{P}_0}{|\beta_2|}}. \quad (16)$$

O termo $\operatorname{sgn}(\beta_2)$ é o sinal de β_2 , que define o regime de dispersão. Para $n=0$, ou seja, quando não há variação periódica de potência, $g(\Omega)$ assume a forma determinada para a instabilidade de modulação, que ocorre somente em regime anômalo de dispersão.

VI. Métodos de Compensação da Dispersão

Os métodos de compensação de dispersão estudados nesse trabalho podem ser classificados em dois tipos básicos: com elementos concentrados localizados ao longo do enlace e via propagação de sinal em regimes de dispersão alternados, utilizando enlaces de fibras com parâmetros de dispersão de sinais contrários.

Considera-se, por questões de praticidade, que a compensação de dispersão com elementos concentrados seja realizada nos pontos onde existe também amplificação óptica. Define-se então N_D (17) como sendo o número de dispositivos de compensação de dispersão localizados ao longo do enlace.

$$N_D = Z_D / Z_A \quad (17)$$

onde Z_D é a distância entre dois dispositivos de compensação de dispersão consecutivos.

A compensação de dispersão distribuída, feita alternando-se o regime de propagação do sinal, ora anômalo, com parâmetro de dispersão $D_A > 0$, ora normal, com parâmetro de dispersão $D_N < 0$, será analisada para $D_A = -D_N$, de forma que $\bar{D} = 0$, onde

$$\bar{D} = \frac{1}{L} \int_0^L D(z) dz \quad (18)$$

sendo L o comprimento total do enlace.

VII. Resultados

Buscando quantificar os efeitos da interação não linear entre o ruído e o sinal, provido pelo fenômeno de auto-modulação de fase através dos processos de instabilidade de modulação, compara-se aqui os resultados obtidos para propagação em regime não linear com ruído e sem ruído. Essa interação provoca a degradação do sinal, medida através da análise de diagramas de olho, de onde se obtém as penalidades induzidas para cada caso proposto.

A performance dos sistemas aqui apresentados serão avaliados numa taxa de bits de 2.5 Gb/s, num enlace com $L = 1000$ km e $Z_A = 50$ km. Os parâmetros de dispersão aqui utilizados têm valores de $|D| = 5$ a 1 ps/(nm.km), comuns em fibras DS disponíveis no mercado.

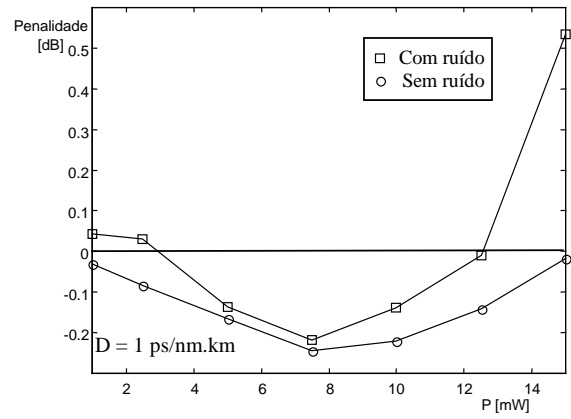
Podemos dividir os resultados em quatro seções:

- Sistemas sem compensação de dispersão.
- Sistemas com compensação de dispersão periódica feita com elementos concentrados
- Sistemas com compensação de dispersão distribuída.

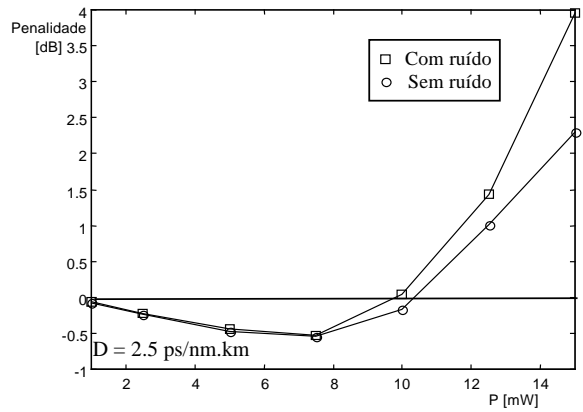
A. Sistemas sem compensação de dispersão

É onde se observa a maior degradação no sinal em regime não linear. Os resultados a seguir mostram a penalidade induzida em regime não linear com ruído e sem ruído com a variação de P_0 , para dispersão anômala com $D = 1$ ps/(nm.km) (Fig. 5a) e $D = 2.5$ ps/(nm.km) (Fig. 5b).

Pela Fig. 5 pode se constatar que, apesar do aumento da degradação para altos valores de potência, existe uma faixa onde se consegue penalidades negativas, representando uma abertura do diagrama de olho com relação aos limites iniciais. Isso é causado pela compressão dos bits promovido pela auto-modulação de fase no regime de dispersão anômala [10]. Com o aumento da potência observa-se claramente a degradação devido à instabilidade de modulação, através da diferença entre as penalidades obtidas para os casos com e sem ruído.



(a)



(b)

Figura 5. Evolução da degradação do sinal em regime anômalo de dispersão com a variação da potência em regime não linear com ruído (quadrados) e sem ruído (círculos), com $D = 1$ ps/(nm.km) (a) e 2.5 ps/(nm.km) (b).

Percebe-se que o uso de fibras com baixa dispersão cromática acarreta uma menor degradação em ambos os casos. No entanto, convém citar que tal escolha pode agravar bastante os efeitos de mistura de quatro ondas em sistemas WDM. Para valores mais altos de D , a diferença entre a degradação obtida para os casos com e sem ruído tende a diminuir, pois mesmo que o valor do ganho de instabilidade de modulação aumente (9), ele passa a agir sobre uma banda menor em torno da frequência do sinal CW (8).

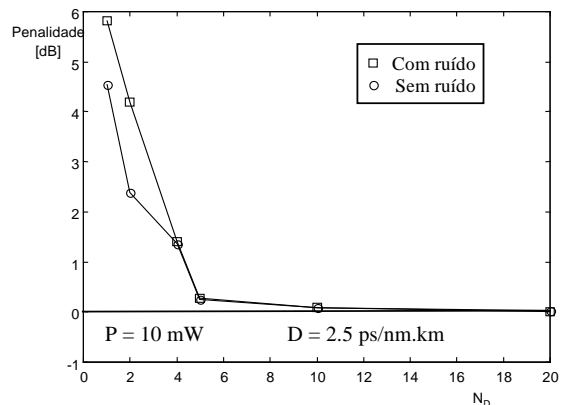


Figura 6. Influência do número de elementos de compensação de dispersão N_D , localizados periodicamente ao longo do enlace, na degradação do sinal.

B. Sistemas com compensação de dispersão através de elementos concentrados

Fixando-se a potência em $P_0 = 10$ mw e a dispersão em $D = 2.5$ ps/(nm.km), observa-se na Fig. 6 a influência do número de elementos de compensação de dispersão N_D localizados ao longo do enlace na degradação do sinal.

O caso com menor penalidade resultante corresponde a elementos de compensação de dispersão o mais distribuídos possível ao longo do enlace, neste caso, localizados a cada ponto de amplificação ($N_D = 20$). No entanto, a partir de um determinado valor de compensadores de dispersão, neste caso cinco elementos, consegue-se uma redução substancial da penalidade induzida. Este ponto é importante pois representa uma escolha de projeto de relativo baixo custo de instalação, caso se decida pela correção da instabilidade de modulação através da compensação da dispersão com elementos concentrados.

C. Sistemas com compensação de dispersão distribuída

Foram feitas simulações para sistemas com compensação distribuída com procurando analisar a influência da variação de P_0 e ΔD , dado por

$$\Delta D = D_A - D_N \quad (19)$$

Procura-se investigar aqui a influência de ΔD em sistemas com compensação distribuída total. Para tanto, a potência foi primeiramente fixada em $P_0 = 10$ mw, obtendo-se os resultados descritos pela Fig. 7.

Vemos pela Fig. 7 que a penalidade tende a crescer quanto maior são os valores de dispersão utilizados, o que está de acordo com a conclusão obtida para o caso de sistemas sem compensação de dispersão (Fig. 5). A observação referente à utilização de baixos valores de dispersão em sistemas WDM feita nos comentários do item A também se aplica a este caso.

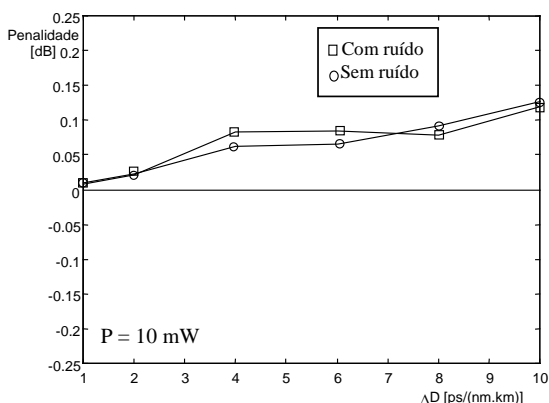


Figura 7. Penalidades obtidas variando-se ΔD para $\bar{D} = 0$ e $P_0 = 10$ mw para sistemas com compensação distribuída total.

Buscando avaliar o efeito do nível de potência em sistemas com compensação distribuída total, fixou-se $\Delta D = 8$ ($D = \pm 4$ ps/(nm.km)), obtendo os resultados descritos pela Fig. 8, onde se vê o efeito do uso de baixas potências em sistemas multiamplicados, que acarreta um aumento na penalidade induzida pelo ruído. Para altas potências,

igualmente, a degradação tende a crescer, mas os casos com e sem ruído têm degradações praticamente iguais nessa faixa, indicando a correção do efeito instabilidade de modulação.

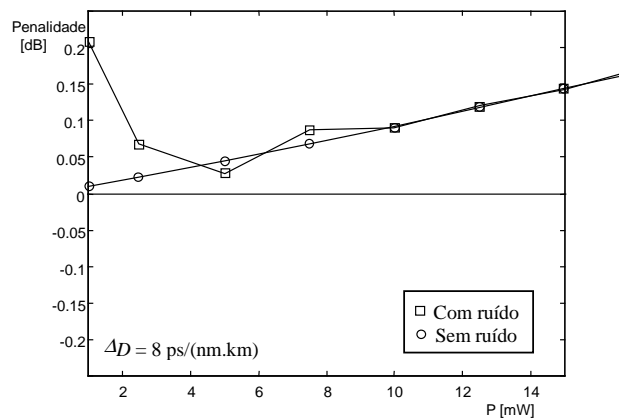


Figura 8. Penalidades obtidas variando-se ΔD para $\bar{D} = 0$ e $P_0 = 10$ mw para sistemas com compensação distribuída total para.

Isso indica que o uso de compensação distribuída praticamente elimina o efeito de instabilidade de modulação, como já sugerido no item B. Além disso, a penalidade se mantém em valores não superiores a 0.15 dB para potências de 5 a 15 mw.

VIII. Conclusão

Alternativas de projeto de sistemas multiamplicados envolvendo diferentes níveis de potência transmitida, esquemas de compensação de dispersão e características de dispersão e não linearidade da fibra óptica vêm se tornando cruciais devido ao crescente aumento dos níveis de potência dos sistemas ora em estudo. O avanço e a crescente demanda por sistemas usando WDM também envolvem a consideração dos efeitos não lineares como um fator por vezes dominante na causa de degradação do sinal transmitido.

Quanto maior a distribuição da compensação de dispersão, mais eficiente a correção do efeito de instabilidade de modulação, mas também maior é o custo de implantação, que culmina no caso que envolve a utilização de fibras distintas, praticamente inviável em sistemas já instalados. Nesse caso, a melhor escolha seria a inserção de dispositivos concentrados para a compensação de dispersão, devido à praticidade e aos menores custos envolvidos.

A correta determinação dos parâmetros de projeto citados nesse artigo pode assegurar ao sistema a operação em potências relativamente altas com penalidade sob níveis satisfatórios, necessidade inerente aos sistemas com amplificadores ópticos, devido à inserção de ruído, e aos sistemas WDM, devido ao número de canais empregados, onde se faz necessário o aumento de potência não só por causa do ruído, mas também por causa dos efeitos de interação entre canais.

REFERÊNCIAS

- [1] E. Desurvire, *Erbium-Doped Fiber Amplifiers: Principles and Applications*, 1st ed., New York: Wiley, 1994.

- [2] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, 2nd ed., San Diego: Academic, 1995.
- [3] C. Lorattanasane e K. Kikuchi, "Parametric instability of optical amplifier noise in long-distance optical transmission systems," *J. Quantum Electron.*, vol. 33, pp. 1068-1074, 1997.
- [4] R. Hui, M. O'Sullivan, A. Robinson and M. Taylor, "Modulation instability in multispan optical amplified imdd systems: theory and experiments," *J. Lightwave Technol.*, vol. 15, pp. 1071-1081, 1997.
- [5] D. Marcuse, "Single-channel operation in very long nonlinear fibers with optical amplifiers at zero dispersion," *J. Lightwave Technol.*, vol. 9, pp. 356-361, 1991.
- [6] F. Matera, A. Mecozzi, M. Romagnoli, e M. Settembre, "Sideband instability induced by periodic power variation in long-distance fiber links," *Opt. Lett.*, vol. 18, pp. 1499-1501, 1993.
- [7] C. Lorattanasane e K. Kikuchi, "Design of long-distance optical transmission systems using midway optical phase conjugation," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 7, pp. 1375-1377, 1995.
- [8] K. Kikuchi, C. Lorattanasane, F. Futami, and S. Kaneko, "Observation of quasi-matched four-wave mixing assisted by periodic power variation in a long-distance optical amplifier chain," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 7, pp. 1378-1380, 1995.
- [9] D. Marcuse, "Noise properties of four-wave mixing of signal and noise," *Electron. Lett.*, vol. 30, pp. 1175-1177, 1994.

tese sob o título "Modulação Cruzada de Fase em Sistemas Ópticos".

Renato T.R. de Almeida graduou-se Bacharel em Engenharia Elétrica, em 1998, pela Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), instituição em que iniciou seu contato com pesquisas em Sistemas Ópticos. Desde 1994, realiza projetos na área de softwares educacionais para ensino de Eletromagnetismo. Iniciou seus estudos no programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, pela UFES, em 1997, como aluno especial, sendo efetivado, em 1998, como estudante de Mestrado em dedicação exclusiva e bolsista do CNPq, estudando Sistemas Ópticos Multiamplificados.

Luiz de Calazans Calmon graduou-se em Engenharia Elétrica – Telecomunicações, em 1976, pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-RJ). Em 1979, concluiu o Mestrado em Engenharia Elétrica – Telecomunicações no CETUC da PUC-RJ. Em 1985, concluiu o Doutorado em Engenharia Elétrica pelo University College London, Inglaterra. É professor do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), desde 1979. Atualmente desenvolve pesquisa na área de Comunicações Ópticas junto ao Mestrado em Engenharia Elétrica da UFES.

Moisés R. N. Ribeiro é Bacharel em Engenharia Elétrica – Telecomunicações pelo Instituto Nacional de Telecomunicações de Santa Rita do Sapucaí, MG (INATEL), desde 1992. Em 1996, recebeu o título de Mestre em Engenharia Elétrica – Telecomunicações pela Universidade Estadual de Campinas, SP (UNICAMP). É professor do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Espírito Santo (DEL-UFES), desde 1995. Atualmente, está se graduando PhD em Engenharia Elétrica pela Universidade de Essex, Inglaterra.

Márcio Freitas graduou-se Bacharel em Engenharia Elétrica, em 1997, pela Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Iniciou seus estudos no programa de Pós-graduação da Engenharia Elétrica – UFES, em 1997, em dedicação exclusiva como bolsista da CAPES, estudando Efeitos Não Linearidades em Sistemas Ópticos de Telecomunicações. Atualmente, está em processo de defesa de