

LIMITES DE APLICAÇÃO DE FIBRAS COMPENSADORAS DE DISPERSÃO EM SISTEMAS ÓPTICOS NRZ DE LONGO ALCANCE A 10 GB/S

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

Laboratório de Telecomunicações

Depto. de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo,
Av. Fernando Ferrari, s/n, Campus de Goiabeiras, CEP 29060-970, Vitória, ES

SUMÁRIO

A escolha de um método de compensação de dispersão adequado representa uma decisão muito importante em sistemas que operam em altas taxas e longas distâncias. Este trabalho investiga a aplicabilidade da fibra compensadora de dispersão em um sistema de longo alcance obedecendo aos critérios recomendados pelo ITU-T (G.692). Busca estabelecer parâmetros de projeto que permitam a operação numa ampla faixa de potências com baixa distorção e BER, utilizando o menor comprimento possível de fibra compensadora de dispersão.

1. INTRODUÇÃO

Estuda-se atualmente sistemas ópticos IM/DD operando em taxas superiores a 10 Gb/s. Isso corresponde à transmissão de pulsos ópticos com largura por vezes inferior a 10 ps. A ação da dispersão cromática em tais pulsos é crítica, sobretudo para enlaces de longo alcance, que requerem muitas vezes a aplicação do gerenciamento da dispersão [1] [2].

Através da aplicação de técnicas apropriadas, o gerenciamento da dispersão reduz a degradação causada pelo alargamento dos pulsos ópticos [1]. Uma categoria dessas técnicas se baseia no uso de trechos de fibra compensadora de dispersão colocados ao longo do enlace óptico.

Neste trabalho são analisadas diferentes formas de aplicação da fibra compensadora de dispersão em um sistema multi-amplificado de longo alcance transmitindo a 10 Gb/s. O objetivo principal é investigar a influência do efeito não linear de auto-modulação de fase no processo de compensação da dispersão.

Na Seção 2 faz-se uma descrição sucinta do modelo utilizado para a composição do método de simulação e do processo de interação entre a dispersão e a auto-modulação de fase. A Seção 3 descreve o sistema óptico em estudo e os elementos que o compõem. A Seção 4 compõe-se de resultados e comentários, e na Seção 5 estão as conclusões.

2. MODELO DE PROPAGAÇÃO

O modelo adotado para simular as condições propostas nesse trabalho se baseia em (1) [3], onde $A=A(z,T)$ é a amplitude de campo elétrico do sinal numa dada polarização, b_2 , b_3 , a e g são respectivamente os termos de dispersão cromática, dispersão de alta ordem,

atenuação e não linearidade da fibra óptica. A dependência temporal é representada por $T = t - bz$, onde b é constante de fase, t é o tempo e z é a coordenada espacial na direção da propagação.

$$\frac{\partial A}{\partial z} + j \frac{b_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} - \frac{b_3}{6} \frac{\partial^3 A}{\partial T^3} + \frac{a}{2} A = jg |A|^2 A \quad (1)$$

Na presença da auto-modulação de fase, o padrão de distorção do perfil temporal dos pulsos ópticos depende do regime de dispersão [3]. Para propagação não linear em um regime de dispersão normal ($b_2 > 0$), os pulsos tendem a sofrer alargamento temporal, prejudicando a performance do sistema em qualquer hipótese [4]. Se o regime de dispersão for anômalo ($b_2 < 0$), haverá uma faixa de valores de potência do sinal e dispersão onde ocorrerá o interessante efeito de compressão dos pulsos [5].

A Fig. 1 ilustra a influência do efeito da propagação de um pulso gaussiano em regime não linear com dispersão anômala (círculos) e normal (quadrados), em comparação com a propagação em regime linear ($\gamma = 0$) com dispersão anômala (asteriscos) e normal (triângulos) num enlace de 10 km de comprimento.

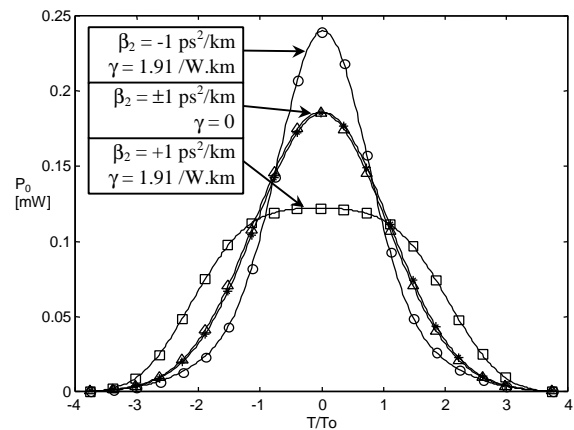


Figura 1. Resultados da simulação da propagação de um pulso gaussiano com $P_0 = 20$ mW e $T_0 = 10$ ps por uma distância de 10 km em fibra não linear ($\gamma = 1.91$ /W.km) com dispersão anômala (círculos) e normal (quadrados), e em fibra linear ($\gamma = 0$) com dispersão anômala (asteriscos) e normal (triângulos). Dados: $\alpha = 0.25$ dB/km, $\beta_2 = \pm 1$ ps²/km, $\beta_3 = 0.121$ ps³/km.

Analisando a Fig. 1, quando a propagação é linear os resultados se mostram praticamente independentes do

regime de dispersão (asteriscos – dispersão anômala, triângulos – dispersão normal). Podemos observar a compressão de pulsos na curva relativa à propagação em regime não linear com dispersão anômala (círculos). Com dispersão normal (quadrados), a não linearidade faz com que o pulso se alargue mais que o observado no caso linear (asteriscos e triângulos).

3. CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA ÓPTICO

O sistema óptico em estudo é composto de um enlace com oito trechos de fibra monomodo padrão operando em $\lambda = 1550$ nm (fibra DP – dispersão anômala), entre os quais estão colocados amplificadores ópticos (AO), como mostrado na Fig.2. Para cada enlace entre amplificadores é alocado um dispositivo de compensação de dispersão, constituído de um trecho de fibra compensadora de dispersão (fibra CD – dispersão normal). O comprimento total do enlace foi fixado em 640 km, com amplificadores espaçados de 80 km entre si, segundo as recomendações do ITU-T dadas em [6].

Dependendo da localização do trecho de fibra CD em relação ao enlace de fibra DP, teremos a pré-compensação da dispersão (Fig. 2a) ou a pós-compensação da dispersão (Fig. 2b).

Um dos objetivos dessa investigação é minimizar o comprimento de fibra CD, que possui alto coeficiente de atenuação (Tab. 1). Como o ganho dos amplificadores é proporcional ao comprimento dos trechos de fibra CD e também proporcional à intensidade de ruído ASE inserido no processo de amplificação, a diminuição do comprimento de fibra CD ajuda a melhorar a relação sinal/ruído do sistema.

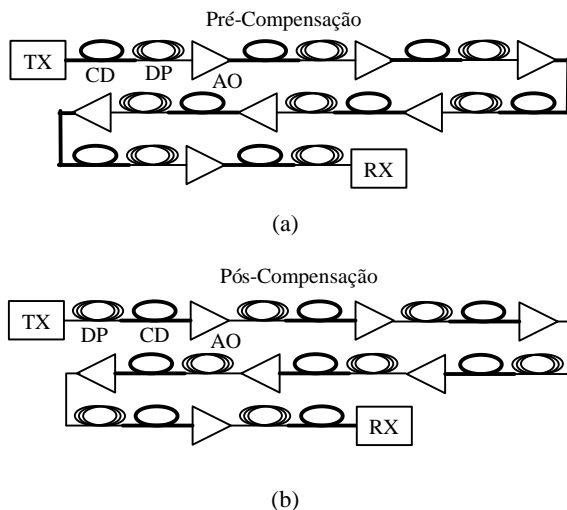


Figura 2. Diagramas do sistema óptico multi-amplificado em estudo com a aplicação (a) da pré-compensação e (b) da pós-compensação da dispersão.

O gerenciamento de dispersão é idêntico para todos os enlaces entre amplificadores e, variando-se os comprimentos dos trechos de fibra DP e fibra CD,

obtem-se diferentes valores de dispersão cromática média \bar{b}_2 (2) para o enlace.

$$L_{DP} \cdot b_2^{DP} + L_{CD} \cdot b_2^{CD} = \bar{b}_2 \quad (2)$$

Em (2), L_{DP} e L_{CD} são, respectivamente, os comprimentos dos trechos de fibra DP e fibra CD. A variação de L_{DP} e L_{CD} resulta em duas situações: compensação parcial da dispersão ou compensação total da dispersão. Para a compensação parcial, o regime médio de dispersão pode ser anômalo (subcompensação: $\bar{b}_2 < 0$) ou normal (sobrecompensação: $\bar{b}_2 > 0$). Para a compensação total da dispersão ($\bar{b}_2 = 0$), temos $L_{DP} = 66.69$ km e $L_{CD} = 13.31$ km, segundo os dados das fibras mostrados na Tab. 1 [8] [9].

Fibra	λ_0 [nm]	γ [1/W.km]	α [dB/km]	$\beta_{2 \lambda=1.55\mu m}$ [ps ² /km]	$\beta_{3 \lambda=1.55\mu m}$ [ps ³ /km]
DP	1310	1.15	0.25	-21.63	18.18
CD	<<1550	3.10	0.50	108.34	-66.55

Tab. 1. Características da fibra monomodo padrão (fibra DP) e fibra compensadora de dispersão (fibra CD) adotadas nas simulações.

Os amplificadores ópticos têm ganho constante e de magnitude tal que compense a perda de energia que ocorre no enlace precedente. Quando se insere ruído nas amplificações, adota-se uma figura de ruído $F = 4$ dB para cada amplificador.

O sinal óptico adotado como base das simulações é composto de seqüências semi-randômicas de 64 bits tipo NRZ, e é transmitido em $\lambda = 1550$ nm.

4. RESULTADOS

Inicialmente foi investigado o comportamento do sistema supondo amplificações sem ruído para análise da distorção do pulso através da penalidade associada. Essa análise preliminar mostra a dependência da distorção dos pulsos com relação à localização do trecho de fibra CD, dispersão média e potência do sinal.

Posteriormente, foi inserido ruído ASE em cada ponto de amplificação [10], contabilizando-se também a degradação causada pela sua acumulação. Neste último caso, a performance do sistema é medida pela probabilidade de erro (BER).

A penalidade é calculada através da relação em dB entre o fechamento dos diagramas de olho do sinal transmitido pelo enlace e a situação “back-to-back”. Com isso garante-se que a penalidade obtida deve-se unicamente a distorções causadas nos processos de propagação e amplificação.

A probabilidade de erro é calculada através da modelagem estatística dos valores de amplitude no instante de decisão do diagrama de olho. A partir dos

parâmetros das funções densidade de probabilidade obtidas para os eventos “bit 1” e “bit 0” dessa primeira análise, obtém-se a probabilidade de erro pelo método proposto em [1].

4.1 Amplificações sem ruído

Nesta seção analisa-se em primeiro lugar a situação de compensação total da dispersão, que idealmente em regime linear de propagação elimina a distorção causada pela dispersão cromática, recuperando o formato original dos pulsos. O objetivo é mostrar a influência da não linearidade e da localização da fibra CD no padrão de distorção dos pulsos pelos diagramas de olho obtidos. A seguir são mostrados resultados que compreendem também situações de compensação parcial da dispersão.

Considerando a compensação total da dispersão, foram obtidos os resultados da Fig. 3 para propagação de sinal com potência de pico $P_0 = 6$ mW. No sistema com pós-compensação (Fig. 3a), os pulsos isolados tendem a se alargar e no sistema com pré-compensação (Fig. 3b), tendem a se comprimir, mesmo garantindo-se $\bar{b}_2 = 0$ para ambos os casos.

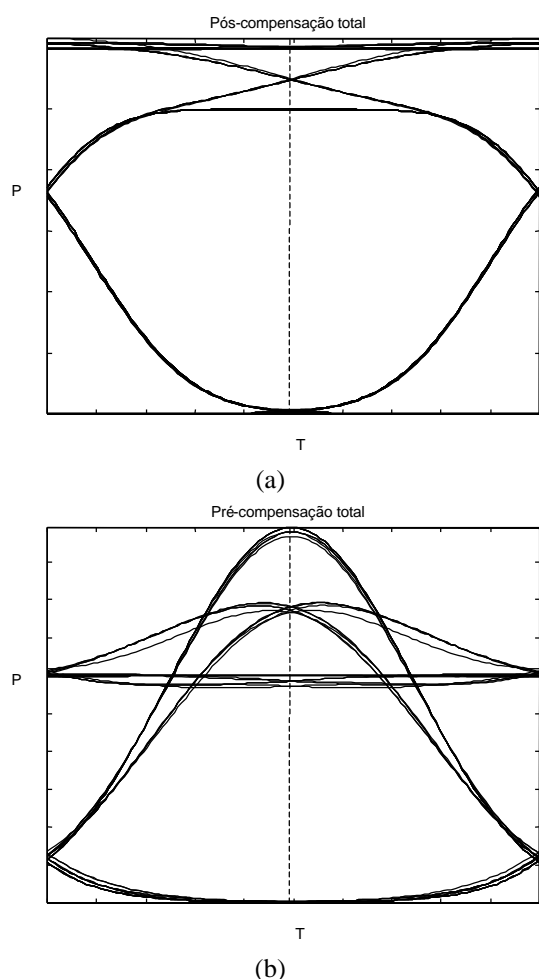


Figura 3. Diagramas de olho obtidos da simulação de propagação de sinal em regime não linear aplicando-se a (a) pós-compensação total e (b) pré-compensação total da dispersão.

Caso a propagação fosse linear, a compensação total da dispersão recuperaria o formato dos pulsos. No entanto, os efeitos cumulativos da interação da auto-modulação de fase com os diferentes valores de dispersão das fibras CD e DP distorce os pulsos.

Com base nos resultados mostrados na Fig. 1, pode-se estabelecer uma relação de similariedade entre a pré-compensação total com uma situação de propagação com dispersão anômala (Fig. 1 – círculos), ambos em regime não linear, pois nestes casos há compressão de pulsos. No caso da pós-compensação total, há similariedade com os resultados obtidos para propagação não linear com dispersão normal (Fig. 1 – quadrados).

É importante observar que a diferença no padrão de distorção dos pulsos se deve exclusivamente à troca de posição do trecho de fibra CD em cada enlace entre amplificadores. Esses resultados indicam que, para propagação não linear, o padrão de distorção dos pulsos sofre uma influência dominante do regime de dispersão do trecho de fibra que fica no final de cada enlace.

No caso da pré-compensação total da dispersão (Fig. 3b), a influência da não linearidade não implicou numa significativa degradação da transmissão (penalidade de 0.24 dB). No sistema onde se faz a pós-compensação total da dispersão (Fig. 3a) ocorre o alargamento dos pulsos, que causa uma degradação substancialmente maior (penalidade de 0.86 dB).

Aplicando-se a compensação parcial da dispersão, foram obtidos os resultados das Fig. 4 e 5. A Fig. 4 apresenta os resultados para pós-compensação e na Fig. 5 estão os resultados para pré-compensação da dispersão. As Figs. 4a e 5a são gráficos tridimensionais no formato dispersão média \bar{b}_2 [ps²/km] X potência de pico P_0 [mW] X penalidade [dB]. Nas Figs. 4b e 5b estão os diagramas de curvas de nível de penalidade com incrementos de 0.1 dB entre 0 a 1 dB relativos às superfícies mostradas nas Figs. 4a e 5a. Convém observar que cada gráfico comporta resultados relativos à sobrecompensação ($\bar{b}_2 > 0$) e subcompensação ($\bar{b}_2 < 0$) da dispersão.

Uma análise geral da Fig. 4 mostra uma estreita região de penalidade abaixo de 0.2 dB, que ocorre entre os limites $P_0 \leq 5$ mW e $|\bar{b}_2| < 0.8$ ps²/km. O aumento da penalidade com a potência é súbito para a sobrecompensação e compensação total da dispersão ($\bar{b}_2 \geq 0$). A penalidade permanece abaixo de 0.5 dB para subcompensação da dispersão no intervalo $-1.5 < \bar{b}_2 < -1$ ps²/km, mesmo para altos valores de potência ($P_0 > 20$ mW). Para a pós-compensação total da dispersão ($\bar{b}_2 = 0$), a penalidade aumenta rapidamente com a potência, ultrapassando 0.5 dB para $P_0 = 4$ mW. Isto indica a influência dominante do regime normal de dispersão da fibra CD na degradação dos pulsos, que tendem a se alargar nesse caso.

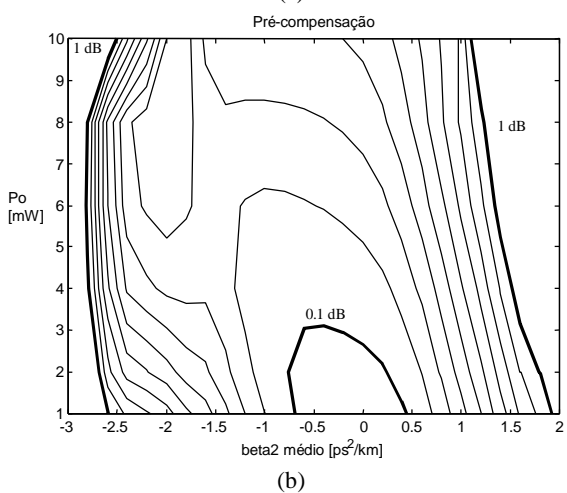
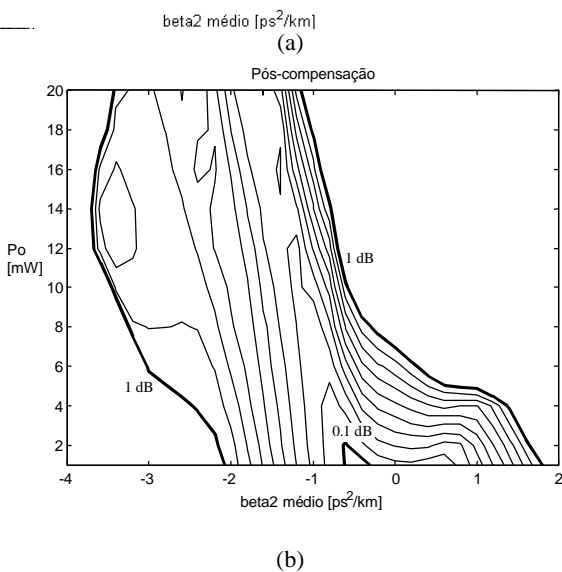
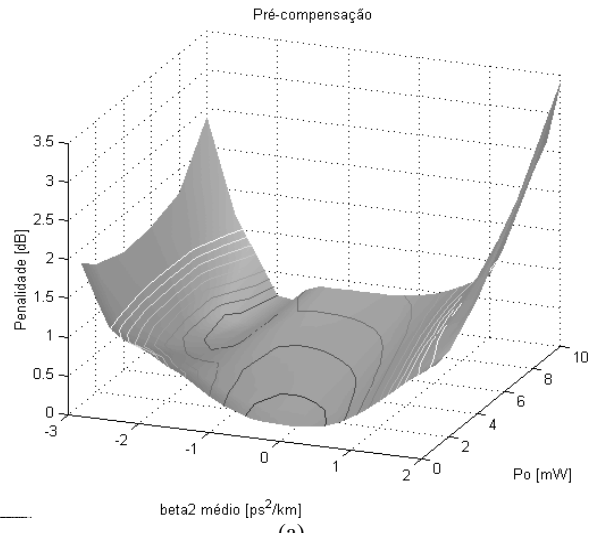
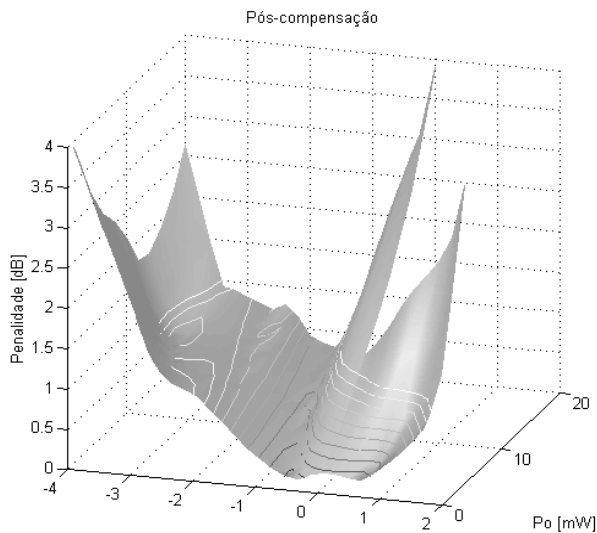


Figura 4. Penalidade [dB] para a pós-compensação da dispersão, em função da dispersão média \bar{b}_2 e da potência P_0 , em (a) gráfico tridimensional e (b) curvas de nível com incrementos de 0.1dB entre 0 e 1 dB de penalidade. As curvas em negrito em (b) referem-se às penalidades de 1 dB e 0.1 dB.

Há também, na Fig. 4, uma região interessante: entre os limites $-3.6 < \bar{b}_2 < -3.1$ ps²/km e $11 < P_0 < 16$ mW aproximadamente, a penalidade permanece abaixo de 0.8 dB, mesmo para esses altos valores de dispersão e potência. Isso se deve à compressão de pulsos provida pela auto-modulação de fase, que proporciona uma abertura do diagrama de olho nesta região de dispersão desde que o nível de potência seja suficiente.

Os resultados obtidos para pré-compensação de dispersão (Fig. 5) mostram um comportamento mais uniforme para a penalidade, que se mantém abaixo de 0.2 dB para uma larga região entre os limites $-1 < \bar{b}_2 < 0.7$ ps²/km e $P_0 \leq 6$ mW.

Figura 5. Penalidade [dB] para a pré-compensação da dispersão, em função da dispersão média \bar{b}_2 e da potência P_0 , em (a) gráfico tridimensional e (b) curvas de nível com incrementos de 0.1dB entre 0 e 1 dB de penalidade. As curvas em negrito em referem-se às penalidades de 1 dB e 0.1 dB.

Para a pré-compensação da dispersão (Fig. 5), a penalidade aumenta suavemente com o aumento da potência e a região onde ocorre a compressão de pulsos em alta potência e dispersão se situa entre os limites $-2 < \bar{b}_2 < -1.7$ ps²/km e $6 < P_0 < 9$ mW, com penalidade menor que 0.2 dB. A pré-compensação faz com que essa região ocorra em valores mais baixos dispersão média e potência de pico, e apresenta menor penalidade que para a pós-compensação da dispersão (Fig. 4).

A penalidade não aumenta tanto com a potência na pré-compensação total da dispersão ($\bar{b}_2 = 0$) quanto na pós-compensação total, mantendo-se abaixo de 0.4 dB mesmo para $P_0 = 10$ mW. Isso ocorre porque agora a fibra DP se encontra no final de cada enlace entre amplificadores. A influência dominante de sua dispersão anômala na distorção dos pulsos tende a comprimi-los ao invés de alarga-los, tornando a penalidade menos

sensível ao aumento da potência para compensação total e sobrecompensação da dispersão.

4.2 Amplificações com ruído ASE

O ruído inserido em cada amplificador se acumula ao longo do enlace diminuindo a relação sinal/ruído (SNR). A transmissão de sinal em baixa potência torna a propagação mais linear, o que minimiza a influência da não linearidade na compensação de dispersão, mas a acumulação de ruído impõe um limite inferior para o nível de potência adotado. Nesta seção serão investigadas as consequências da acumulação do ruído e as regiões de operação em que se obtém uma boa performance de transmissão. Deve-se observar que a degradação causada pela mistura não linear de sinal com ruído é muito pequena devido à alta dispersão das fibras utilizadas (Tab. 1) [4] [7].

Os resultados obtidos manipulando-se \bar{b}_2 e P_0 são mostrados na Fig. 6a para pós-compensação de dispersão e na Fig. 6b, para pré-compensação de dispersão. Nessas figuras temos diagramas de curva de nível relacionando a dispersão média \bar{b}_2 [ps^2/km], a potência de pico P_0 [mW] e o logaritmo da probabilidade de erro $\log_{10}(\text{BER})$. Os diagramas de curvas de nível têm incrementos de $\Delta\log_{10}(\text{BER}) = 1$, na faixa de $-22 \leq \log_{10}(\text{BER}) \leq -12$. A taxa de erro admissível para tais sistemas segundo [6] é $\text{BER} = 10^{-12}$, cuja curva $\log_{10}(\text{BER}) = -12$ está em negrito.

Podemos ver na Fig. 6a que a pós-compensação da dispersão oferece transmissão com $\text{BER} < 10^{-12}$ numa extensa região de valores para \bar{b}_2 e P_0 . Podemos delimitar duas situações de operação interessantes: em baixa potência, ($2 < P_0 < 6$ mW) para uma ampla faixa de \bar{b}_2 , tanto para subcompensação como para sobrecompensação ($-1.5 < \bar{b}_2 < 1.5$ ps^2/km), ou fazendo $\bar{b}_2 \cong -1$ ps^2/km , para uma ampla faixa de potências ($2 < P_0 < 20$ mW). O ponto de operação que permite o menor comprimento de fibra CD para $\text{BER} < 10^{-12}$ é $\bar{b}_2 = -1.7$ ps^2/km e $P_0 = 6$ mW, o que resulta em $L_{\text{CD}} = 10.88$ km. Isso representa uma redução de 2.43 km em cada trecho de fibra CD com relação ao comprimento necessário para compensação total da dispersão.

Para a pré-compensação da dispersão (Fig. 6b), vemos que a região de operação onde se garante $\text{BER} < 10^{-12}$ é bem restrita, situando-se entre os limites $-0.5 < \bar{b}_2 < 1$ ps^2/km e $1.5 < P_0 < 5$ mW. A utilização do menor trecho possível de fibra CD, $L_{\text{CD}} = 11.54$ km, ocorre para $\bar{b}_2 = -0.7$ ps^2/km e $P_0 = 2$ mW, que corresponde a uma diminuição de apenas 1.77 km em cada trecho de fibra CD com relação ao comprimento necessário para compensação total da dispersão.

A acumulação de ruído no sistema proposto impõe um limite inferior de potência de cerca de $P_{0\text{min}} = 1.5$ mW.

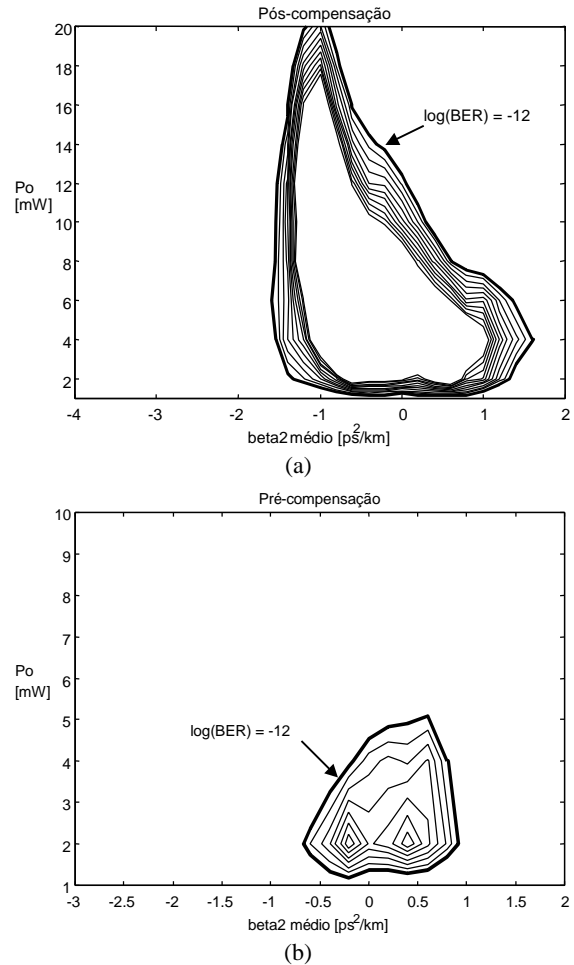


Figura 6. Diagrama de curvas de nível de $\log_{10}(\text{BER})$ para pós-compensação de dispersão em função de \bar{b}_2 e P_0 com incrementos de $\Delta\log_{10}(\text{BER}) = 1$ para $-22 \leq \log_{10}(\text{BER}) \leq -12$. A curva em negrito representa uma $\text{BER} = 10^{-12}$.

5. CONCLUSÕES

As grandes diferenças observadas nos resultados obtidos para pós e pré-compensação da dispersão podem ser explicadas pelo fato que, na pré-compensação, o trecho de fibra que vem depois de cada amplificador, onde o sinal tem maior intensidade, é de fibra CD. A fibra CD, como podemos ver na Tab. 1, possui características de altíssima dispersão ($\beta_2 = 108.34$ ps^2/km) e alta não linearidade ($\gamma = 3.10$ $/(\text{W}\cdot\text{km})$), se comparado ao resto do enlace entre amplificadores, que é de fibra DP ($\beta_2 = -21.63$ ps^2/km e $\gamma = 1.15$ $/(\text{W}\cdot\text{km})$). Dessa forma, a interação entre a não linearidade e a dispersão tende a ser muito maior na pré-compensação que na pós-compensação, devido aos maiores níveis de potência estarem justamente nos trechos de fibra de não linearidade mais significativa. Essa situação perturba ainda mais a compensação de dispersão, o que pode ser detectado na maior sensibilidade da degradação da BER ao aumento da potência quando se emprega a pré-compensação da dispersão (Fig. 6b).

Dessa forma, podemos dizer, com o respaldo dos resultados obtidos, que a pós-compensação oferece uma condição muito melhor para a compensação da dispersão em regime não linear, pois há pouca interação entre não linearidade e dispersão. Nesse caso, a situação de sub-compensação da dispersão ($\bar{b}_2 < 0$) apresenta as melhores características de propagação, sendo possível a transmissão em uma ampla faixa de potências (Fig. 6a), minimizando também o comprimento trechos de fibra CD ($L_{CDmin} = 10.88$ km).

Podemos eleger, para o sistema proposto, a operação em pós-compensação com dispersão média $\bar{b}_2 \cong -1$ ps²/km como ótima, pois oferece uma ampla faixa de potências de operação para BER $< 10^{-12}$ ($2 < P_0 < 20$ mW – Fig. 6) e uma redução acumulada de 16.4 km no comprimento de fibra CD quando comparado ao sistema com compensação total da dispersão ($L_{CD} \cong 11.27$ km; $\Delta L_{CDac} \cong 8 \times 2.05$ km = 16.4 km).

6. REFERÊNCIAS

- [1] G. P. Agrawal, “*Fiber-optic Communication Systems*,” 1st ed., New York: Wiley, 1992.
- [2] I. V. Kaminow, T. L. Koch, “*Optical Fiber Telecommunications*”, vol. IIIA, cap. 7, 1ª ed., San Diego: Academic, 1997.
- [3] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, 2nd ed., San Diego: Academic, 1995.
- [4] R. T. R. de Almeida, M. Freitas, M. R. N. Ribeiro, e L. C. Calmon, “Modulational Instability in Multi-amplified Optical Systems with Dispersion Compensation,” *IMOC'99 Proceedings*, CD ROM, Rio de Janeiro, 1999.
- [5] M. Freitas, R. T. R. de Almeida, M. R. N. Ribeiro, e L. C. Calmon, “Limits on Bit Rate Capacity Improvement Induced by SPM in Installed Standard Fiber Links at 1550 nm,” *ITS'98 Proceedings*, vol. 2, p. 606, São Paulo, 1998.
- [6] Telecommunication Standardization Sector of ITU, “*ITU-T Recommendation G.692*”, 1997.
- [7] Renato T. R. de Almeida, Marcio Freitas, Moisés R. N. Ribeiro e Luiz C. Calmon, “Instabilidade de Modulação em Sistemas Ópticos Multi-amplificados: Fundamentos e Projetos de Sistemas,” em *Revista de Telecomunicações do INATEL*, vol.2, no. 2, pp.17-22, Março de 1999.
- [8] Telecommunication Standardization Sector of ITU, “*ITU-T Recommendation G.652*”, 1997.
- [9] L. Grüner-Nielsen, B. Edvold, D. Magnussen, *et al*, “Large Volume Manufacturing of Dispersion-Compensating Fibers,” *1998 OSA Technical Digest Series - OFC'98*, vol. 2, p. 24, San Jose, California, 1998.
- [10] E. Desurvire, “*Erbium-Doped Fiber Amplifiers*,” 1st ed., New York: Wiley, 1994.