

Simulação Computacional em Sistemas Óticos (Parte 1: Influência do slope da dispersão sistemas DWDM)

Maria Regina Campos Caputo*, Maria Elizabeth de Gouvêa**

* Solittons Engenharia de Telecomunicações Ltda.

** Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG

Resumo - Nesse trabalho, a equação não linear de Schrödinger estendida (ENLSE) é resolvida numericamente pelo método do split-step Fourier para estudar a compensação da dispersão cromática em um enlace ponto a ponto. O enlace consiste de uma fibra padrão seguida por uma fibra de compensação da dispersão (FCD), em uma configuração de pós-compensação. Consideramos, separadamente, dois tipos diferentes de FCD: uma com a derivada da dispersão positiva e outra com derivada negativa. A análise da propagação do pulso, no domínio do tempo e da frequência, é feita para três comprimentos de onda (canais) diferentes: $\lambda_1=1535\text{nm}$, $\lambda_2=1550\text{nm}$ e $\lambda_3=1560\text{nm}$. O estudo é feito considerando-se uma larga faixa de potência de pico de entrada: $0.6\text{mW}=P_0=80\text{mW}$, para cada canal. O modelo matemático inclui perdas, dispersão de primeira e de segunda ordens e auto modulação de fase (AMF). Os efeitos de interação entre canais não foram incluídos.

O desempenho de cada um dos dois tipos de FCD foi comparado e os resultados mostraram que a escolha da FCD (isto é, do valor da derivada da dispersão) a ser usada em um determinado sistema de Multiplexação Densa por Divisão de Comprimento de Onda (DWDM - Dense Wavelength Division Multiplex) tem que levar em conta a largura total da faixa de comprimentos de onda de operação e a potência de pico de entrada, P_0 . Os resultados sugerem que o uso da FCD com derivada da dispersão negativa conduz a um melhor desempenho em uma larga faixa de comprimentos de onda.

I. COMPENSAÇÃO DA DISPERSÃO CROMÁTICA

É importante lembrar que hoje existe uma rede com mais de 70.000.000 de quilômetros de fibra padrão, instalada em todo o mundo. Essas fibras foram projetadas para trabalhar na segunda janela ótica ($\approx 1300\text{nm}$), onde sua dispersão cromática é baixa ($\approx 3.5\text{ps/nm.km}$). O “up-grade” dessa extensa rede tem sido feito através do uso de amplificadores óticos operando na terceira janela ótica, onde essas fibras padrão têm uma grande dispersão cromática ($\approx 17\text{ps/nm.km}$). Essa dispersão acumula-se com a distância de propagação e limita o desempenho do

enlace. Por essa razão, diversas alternativas para compensar a dispersão cromática têm sido investigadas, tais como rede de Bragg [1], pulsos com “pre-chirp” [2], fibras de compensação da dispersão (FCD) [2], etc. A idéia de equalização ótica remonta a 1980 [3] e dá origem a essa última técnica (FCD), que é considerada, atualmente, como a mais prática para compensar a dispersão cromática. O comportamento da fibra padrão combinada com a FCD em sistemas de um único canal e em sistemas com múltiplos canais vem sendo estudado em muitas simulações [4-7] e em experimentos de campo [8-12].

Sistemas DWDM ocupam uma banda ótica para acomodar vários canais de transmissão com diferentes comprimentos de onda. Sendo a derivada da dispersão cromática da fibra padrão não nula, o valor dessa dispersão em diferentes comprimentos de onda é diferente. Consequentemente a máxima distância de transmissão pode ter valores diferentes para cada canal. Portanto, a derivada da dispersão da FCD é muito importante em sistemas DWDM.

Considerando um típico enlace ponto a ponto consistindo de uma fibra padrão e uma FCD (veja figura 1) com comprimentos L^{st} e L^{fcd} , respectivamente, a condição para compensação da dispersão banda larga é dada por:

$$\beta_{10}^{fcd} \cdot L^{fcd} + \beta_{10}^{st} \cdot L^{st} = 0, \quad (1)$$

e

$$\beta_{20}^{fcd} \cdot L^{fcd} + \beta_{20}^{st} \cdot L^{st} = 0, \quad (2)$$

onde β_{10} e β_{20} são, respectivamente, a dispersão de velocidade de grupo, linear, de primeira e de segunda ordens.

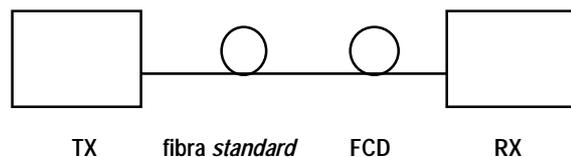


Figura 1. Diagrama de um enlace, onde a fibra padrão é seguida pela FCD, num esquema de compensação da dispersão.

As condições impostas pelas equações acima proporcionam compensação exata da dispersão na fibra padrão apenas se ela estiver operando no regime linear. Quando efeitos não lineares são importantes, não existe uma expressão analítica simples que leve em conta esses efeitos e que proporcione uma compensação da dispersão. Nesse caso, é necessário usar um tratamento numérico. Simulações numéricas baseadas na equação não linear de Schrödinger (ENLS) [2] podem incluir, simultaneamente ou separadamente, vários efeitos não lineares tais como: auto modulação de fase (AMF), modulação de fase cruzada (MFC), mistura de quatro ondas (MQO), espalhamento Brillouin (EB), espalhamento Raman (ER) e outros. Simulações têm sido largamente utilizadas devido à complexidade dos atuais sistemas óticos, e, também devido à dificuldade de alterar parâmetros físicos em laboratórios. O melhor desempenho do enlace pode ser encontrado conhecendo-se as características temporais e espectrais do pulso, quando ele se propaga na fibra.

Nesse trabalho, investigamos a influência da derivada da dispersão da FCD, quando essa é usada para compensar a dispersão cromática. O enlace considerado opera numa larga faixa de comprimentos de onda e são considerados vários valores para a potência de entrada do pulso, na fibra padrão. Consideramos pulsos de entrada com a forma de secante hiperbólica e com duração temporal $T_0 = 20 ps$ (T_0 é a meia largura em pontos onde a intensidade cai de $1/e$). O comprimento da fibra

padrão foi tomado constante, $L^{st} = 100km$. Analisamos os resultados obtidos considerando o uso, em separado, de dois tipos de FCD: um com derivada da dispersão positiva (FCD1) e outro derivada negativa (FCD2) num esquema de pós compensação da dispersão. Consideramos três comprimentos de onda $\lambda_1 = 1535nm$ (canal 1), $\lambda_2 = 1550nm$ (canal 2) e $\lambda_3 = 1560nm$ (canal3). De acordo com as regras da ITU-T 32, canais DWDM operando desde 1535.04 até 1559.78nm, com espaçamento de 100GHz, podem ser acomodados dentro da banda em consideração [13]. Portanto, os três canais aqui considerados, têm comprimentos de onda correspondendo aproximadamente aos canais 1, 20 e 32 da “grade” da ITU-T.

Note que consideramos a propagação de cada canal separadamente; efeitos não lineares de interação entre esses canais não foram incluídos no nosso modelo. As interações não consideradas aqui são devidas a efeitos como MFC, MQO, EB e ER. O efeito de MQO pode ser desprezado devido à alta dispersão local em ambas as fibras, padrão e FCD. Essa alta dispersão reduz o sincronismo entre as componentes espectrais decrescendo a eficiência desse efeito [14, 15, 16]. A duração temporal do pulso inicial, T_0 , é grande o suficiente para se desprezar o

ER [2]. Em sistemas DWDM reais, os efeitos da MFC e EB são importantes e terão que ser incluídos em um tratamento mais completo desses sistemas [2,4]. Entretanto, os efeitos da MFC crescem quando o espaçamento espectral entre canais diminui e será importante para canais vizinhos em sistemas DWDM: esses efeitos não são significantes para os canais aqui considerados. Nossa preocupação foi investigar no início, no meio e no final da banda ótica total de operação, as formas de onda, temporal e espectral, resultantes do uso de diferentes valores da derivada da dispersão da FCD, quando somente o efeito não linear da AMF está presente. A simulação de um efeito individual é atrativa devido à complexidade da interação entre os vários efeitos presentes em um sistema DWDM. As informações adquiridas a partir de simulações dedicadas à análise de um efeito individual são importantes contribuições para o entendimento dessas interações e na determinação dos parâmetros que serão relevantes para um ótimo desempenho do sistema.

II. MODELO MATEMÁTICO

Considerando os efeitos da atenuação, das dispersões cromáticas de primeira e segunda ordens e o efeito não linear da auto modulação de fase, a ENLSE é escrita como [2].

$$\left[i \frac{\partial}{\partial \xi} - \frac{1}{2} (\text{sinalde} \ddot{\beta}_{10}) \frac{\partial^2}{\partial \tau^2} + i (\text{sinalde} \ddot{\beta}_{10}) \delta \frac{\partial^3}{\partial \tau^3} + i \Gamma \right] U = -N^2 |U|^2 U \quad (3)$$

onde: $\tau = \frac{t - \dot{\beta}_{10}}{T_0}$, sendo T_0 a meia largura do pulso

na entrada da fibra; $\xi = \frac{z}{L_d}$ onde $L_d = \frac{T_0^2}{|\ddot{\beta}_{10}|}$ é o

comprimento de dispersão de 1ª ordem; $\delta = \frac{L_d}{6L_d}$

onde $L_d = \frac{T_0^3}{|\ddot{\beta}_{10}|}$ é o comprimento de dispersão de 2ª

ordem; $N^2 = \frac{L_d}{L_{nl}}$ onde $L_{nl} = \frac{1}{\gamma P_0}$ é o

comprimento não linear; P_0 é a potência de pico do campo incidente e γ é o coeficiente de não linearidade da fibra.;

$\Gamma = \frac{\alpha L_d}{2}$ (está relacionado ao coeficiente de perdas

da fibra α); $U(\tau, \xi) = \frac{\phi(z, t)}{(P_0)^{1/2}}$ (campo normalizado).

A Tabela I mostra os parâmetros estruturais das fibras usadas na simulação. Esses valores referem-se a $\lambda = 1560nm$. Os parâmetros da FCD1 foram baseados na ref. [11] e da FCD2 na ref. [17]. Os parâmetros da fibra padrão são típicos desse tipo de fibra.

Parâmetro	padrão	FCD1	FCD2
D(ps/nm.km)	18.04	-73.37	-105.49
$A_{eff}(\mu m^2)$	80.00	21.5	19.0
$S_0(ps/nm^2.km)$	0.092	0.093	-0.35
$n_2(m^2/w) \times 10^{-20}$	2.36	2.69	2.69
$\alpha(dB/km)$	0.20	0.55	0.50

Tabela I. Parâmetros das fibras padrão e de compensação (FCD1 e FCD2) para $\lambda = 1560nm$.

Os valores do parâmetro D foram calculados pela expressão

$$D(\lambda) = (S_0/4)[\lambda - \lambda_0^4/\lambda^3] \quad (5)$$

onde λ_0 é comprimento de onda de dispersão nula da fibra em consideração. Nos cálculos, o valor da derivada da dispersão, S_0 , foi tomado constante. Os valores dos parâmetros A_{eff} , n_2 e α foram considerados iguais para os três canais considerados.

A partir dos valores mostrados na Tabela I, podemos calcular os parâmetros normalizados definidos na equação (3), para os três comprimentos de onda considerados no trabalho: $\lambda_1 = 1535nm$, $\lambda_2 = 1550nm$ e $\lambda_3 = 1560nm$

Para obter a solução da equação ENLSE usamos o método do split step Fourier.

III. RESULTADOS

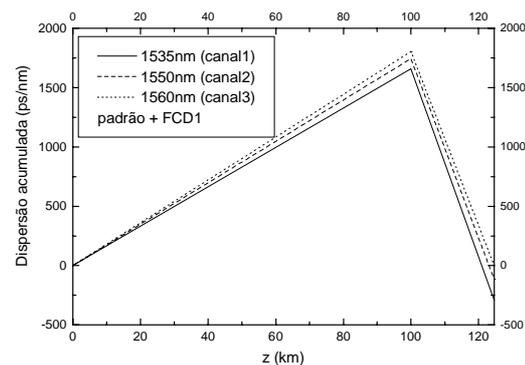
A figura (1) mostra uma representação esquemática do enlace considerado, consistindo de uma fibra padrão com comprimento, $L^{st} = 100km$, seguida por uma FCD com comprimento L^{fcd} . De acordo com a equação (1), e para o terceiro canal $\lambda_3 = 1560nm$, o comprimento da FCD1 é $L^{fcd1} = 24.50km$ e da FCD2 é $L^{fcd2} = 17.10km$. Esses valores foram usados em todas as simulações feitas, a menos que esteja indicado explicitamente no texto. Observa-se que a equação (1) depende somente dos comprimentos e do parâmetro de dispersão de primeira ordem, de ambas as fibras

padrão e FCD, não dependendo portanto da derivada da dispersão de nenhuma das fibras.

A figura (2) mostra o mapa da dispersão para os três canais, sendo a figura (2a) correspondente ao caso onde a FCD1 é utilizada e a figura (2b) relativa ao uso da FCD2. O efeito da derivada da dispersão da fibra padrão pode ser visto claramente através do espalhamento das três linhas em $z = 100km$. A dispersão acumulada ($AD(\lambda) = D^{st}(\lambda) \cdot 100km$) é maior para o terceiro canal, devido ao maior valor do parâmetro D . O parâmetro D cresce com o comprimento de onda devido ao valor positivo da derivada da dispersão da fibra padrão. Para $z > 100km$, o valor negativo da dispersão da fibra de compensação (FCD1 ou FCD2) força o valor da dispersão acumulada a tornar-se menor. Entretanto, a compensação exata somente ocorre para λ_3 , em

decorrência do cálculo feito para L^{fcd} . Comparando as figuras (2a) e (2b) observamos que, para o primeiro e segundo canais, a dispersão acumulada na saída do enlace

($AD(\lambda) = D^{st}(\lambda) \cdot 100km + D^{fcd} \cdot L^{fcd}$) é muito menor para a configuração padrão + FCD2. O valor de $AD(\lambda)$ para os canais 1 e 2 são, respectivamente, $AD(\lambda_1) = -294.45 ps/nm$ e $AD(\lambda_2) = -116.45 ps/nm$ para FCD1, e $AD(\lambda_1) = -82.27 ps/nm$ e $AD(\lambda_2) = -32.57 ps/nm$ para FCD2. A FCD2 tem desempenho melhor porque, além de resultar em uma menor dispersão acumulada, também apresenta um menor espalhamento, desse valor, entre os três canais.



(a)

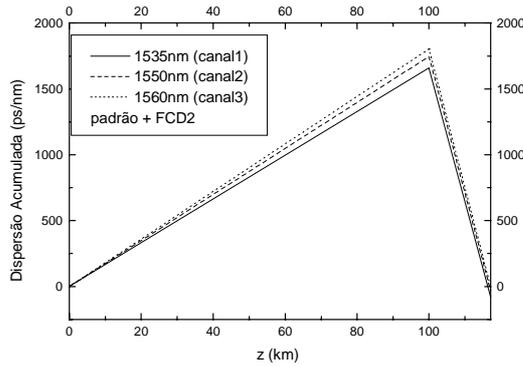


Figura 2. Mapa da dispersão para as configurações: (a) padrão + FCD1, (b) padrão + FCD2.

Investigamos agora, o comportamento do pulso, com forma inicial secante hiperbólica e com duração temporal $T_0 = 20ps$, propagando-se ao longo das configurações de enlace fibra padrão + FCD1 e fibra padrão + FCD2. O pulso de entrada considerado tem seu espectro limitado pela transformada de Fourier (Fourier-transform limited), isto é, ele não possui “chirp” causado pelo laser.

Com o objetivo de investigar esse comportamento para diferentes valores da potência de pico de entrada do pulso na fibra padrão, P_0 , consideramos a faixa $0.6mw < P_0 < 80mw$. Essa faixa de potências inclui a gama de interesse prático e tem sido considerada também por outros autores como Palai e Thyagarajan [6]. Naquele trabalho, Palai e Thyagarajan investigaram o comportamento de um pulso, com $\lambda = 1550nm$, para diferentes configurações de enlace: pre-compensação, pós-compensação e exata, sub e sobre compensação da dispersão. Em nosso trabalho consideramos a configuração de pós-compensação e a análise foi estendida para outros comprimentos de onda.

III.1. PROPAGAÇÃO AO LONGO DA FIBRA PADRÃO

As figuras (3) e (4) mostram, respectivamente, a evolução temporal e do espectro de frequências do pulso, na saída da fibra padrão, para diversos valores de P_0 . O parâmetro N^2 , que governa a importância relativa dos efeitos da AMF e da dispersão, para um valor do comprimento de onda λ específico, cresce linearmente com a potência de pico de entrada, P_0 . Dessa forma quando P_0 varia de $0.6mW$ a $80mW$, o parâmetro N^2 cresce por um fator de ≈ 133 .

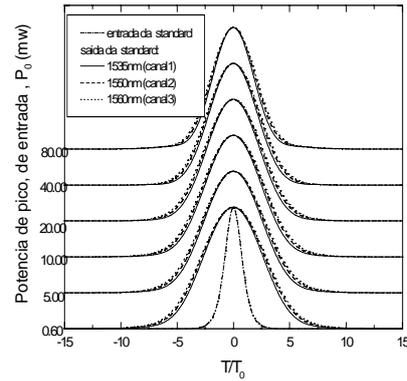


Figura 3. Evolução temporal do pulso de entrada, na saída da fibra padrão, para diferentes valores de P_0 . O pulso de entrada é mostrado, para comparação, pela linha traço-ponto-traço. Cada pulso mostrado está normalizado com relação seu valor máximo. O eixo vertical não está representado em escala

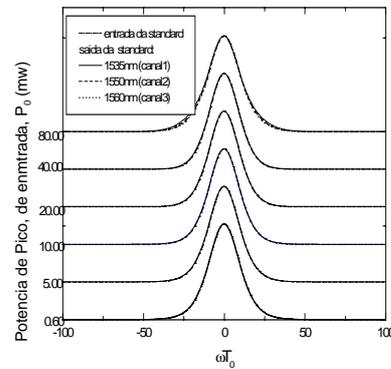


Figura 4. Evolução espectral do pulso de entrada, na saída da fibra padrão, para diferentes valores de P_0 . O pulso de entrada é mostrado, para comparação, pela linha traço-ponto-traço. Cada pulso mostrado está normalizado com relação ao seu valor máximo. O eixo vertical não está representado em escala.

Por exemplo, para o primeiro canal, $N^2 = 0.017$ quando $P_0 = 0.6mW$, e $N^2 = 2.26$ quando $P_0 = 80mW$. Então, a faixa de valores considerada para P_0 permite analisar a propagação do pulso em casos onde o efeito da dispersão do pulso, ao longo da fibra padrão, é dominante e, também, casos nos quais o efeito não linear da AMF torna-se mais importante. A competição entre esses dois efeitos é devida ao fato de que o “chirp” causado pela AMF é positivo, enquanto aquele causado pela dispersão é negativo, uma vez que a fibra padrão opera no regime anômalo para os três canais aqui considerados. A figura (3) mostra que para $N^2 \ll 1$, onde se espera que a dispersão domine, o pulso sofre o maior alargamento temporal. Quando N^2 cresce, o “chirp” devido à AMF leva a uma

redução no “chirp” de frequência total e, conseqüentemente, o alargamento temporal torna-se menor. A figura (4) mostra que o espectro de frequências não varia apreciavelmente para toda a faixa de valores de P_0 considerada aqui e que o comportamento é o mesmo para os três canais considerados. Esse comportamento é diferente daquele que é esperado quando somente o efeito não linear da AMF está presente, que leva a um alargamento espectral do pulso.

Um parâmetro útil para estudar quantitativamente os efeitos do “chirp” é o valor da largura temporal média quadrática (valor rms-root-mean-square) do pulso de saída, σ_t , normalizada em relação àquela do pulso de entrada, σ_{t0} . A figura (5) mostra a taxa de alargamento temporal, σ_t/σ_{t0} , para vários valores de P_0 . Nota-se que σ_t/σ_{t0} decresce com o aumento de P_0 , para os três canais. Esse comportamento é novamente explicado pela competição entre os efeitos da dispersão e da AMF: quando a potência de pico de entrada, P_0 , cresce a AMF torna-se mais eficiente em contrabalançar a dispersão.

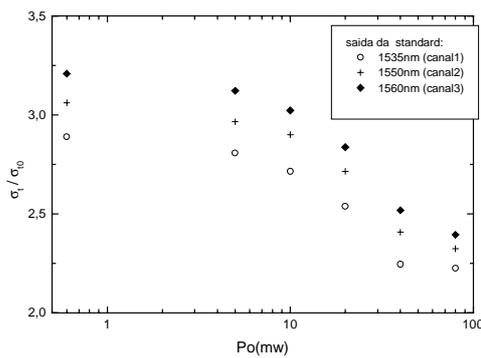


Figura 5. σ_t/σ_{t0} na saída da fibra padrão, para vários valores P_0 .

Pode também ser visto na figura (5) que, para um dado valor de P_0 , σ_t/σ_{t0} depende do comprimento de onda, sendo maior para $\lambda_3 = 1560nm$ (canal 3) e menor para $\lambda_1 = 1535nm$ (canal 1). Isso é devido à dependência do parâmetro D com λ : D cresce com λ em fibras padrão operando no regime anômalo.

Observamos em nossas simulações que para um dado valor de P_0 , a taxa com a qual a taxa de alargamento temporal, σ_t/σ_{t0} , cresce é uma função da distância de propagação z . A inclinação da curva $(\sigma_t/\sigma_{t0}) \times z$ cresce com z até um certo ponto z^* , onde o comportamento passa a ser linear, isto é, para $z > z^*$, a propagação do pulso na fibra entra no

regime linear. O valor de z^* depende de P_0 : para $P_0 \leq 5mW$, o regime linear se estabelece desde o início da fibra padrão, isto é, $z^* \rightarrow 0$. Quando P_0 cresce, a distância z^* também cresce. Note que, para toda a faixa de valores de P_0 aqui considerada, a propagação no regime linear é estabelecida antes de atingir o final da fibra padrão.

A figura (6) mostra a taxa de alargamento espectral, $\sigma_\omega/\sigma_{\omega0}$, como uma função de P_0 . Para $P_0 \leq 40mW$ não se observa praticamente nenhuma variação desse parâmetro, para os três canais. Isso está de acordo com o que é observado na figura (4). Para $P_0 \leq 40mW$ obtemos apenas um leve estreitamento espectral. Este comportamento é devido à interação entre os efeitos da AMF, da dispersão e da perda da fibra. Quando P_0 é maior que $40mW$, o “chirp” causado pela AMF aumenta e, então, tem-se, $\sigma_\omega/\sigma_{\omega0} > 1$ devido novas frequências geradas pelo “chirp”.

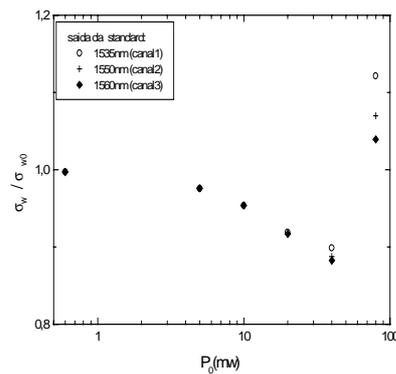


Figura 6. $\sigma_\omega/\sigma_{\omega0}$ na saída da fibra padrão, para vários valores P_0 .

Se a potência de pico de entrada tiver o valor necessário para fazer $N = 1$ e se as perdas e a dispersão de segunda ordem forem desprezadas, assegura-se um exato balanço entre a dispersão e AMF. Nesse caso, não ocorreria nem estreitamento nem alargamento (temporal ou espectral) do pulso e esse se propagaria na fibra livre de “chirp”, configurando o regime de propagação de um soliton [2,18,19,20].

III.2. PROPAGAÇÃO AO LONGO DA FCD

A evolução temporal do pulso, na saída da FCD1 e da FCD2, está mostrada nas figuras (7a) e (7b), respectivamente. Observa-se um comportamento qualitativamente diferente entre as duas fibras de compensação. O uso da FCD2 leva a um menor espalhamento temporal para os três canais. Com o uso

da FCD1, o canal 1 apresenta um grande espalhamento temporal quando comparado aos outros dois canais.

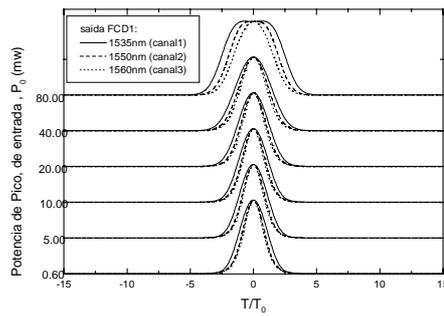


Figura 7 a. Evolução temporal do pulso de entrada, na saída da FCD1, para diferentes valores de P_0 . Cada pulso mostrado está normalizado com relação a seu valor máximo. O eixo vertical não está representado em escala. O eixo horizontal não está representado em escala.

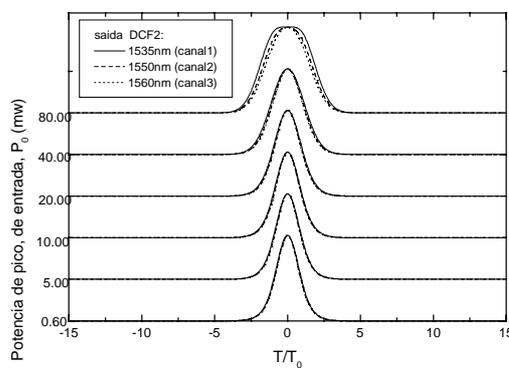


Figura 7 b. Evolução temporal do pulso de entrada, na saída da FCD2, para diferentes valores de P_0 . Cada pulso mostrado está normalizado com relação a seu valor máximo. O eixo vertical não está representado em escala. O eixo horizontal não está representado em escala.

A figura (8a) mostra o espectro de frequência do pulso, na saída da FCD1 e a figura (8b) na saída da FCD2. Essas figuras, se comparadas com a figura (4), mostram que a forma espectral do pulso não varia quando ele se propaga ao longo de qualquer uma das duas fibras de compensação: isso é uma consequência do regime linear de operação ao longo da fibra de compensação. A atenuação de 20dB imposta ao sinal pelas perdas na fibra padrão é responsável pelo fato de que o pulso, após se propagar 100km, tem sua potência de pico decrescida a um nível tal que, ao incidir na fibra de compensação, a excita para operação no regime linear (para $P_0 \leq 80mW$).

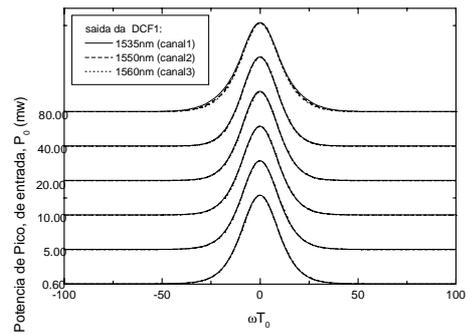


Figura 8 a. Evolução do espectro de frequência do pulso de entrada, na saída da FCD1, para diferentes valores de P_0 . Cada pulso mostrado está normalizado com relação a seu valor máximo. O eixo vertical não está representado em escala. O eixo horizontal não está representado em escala.

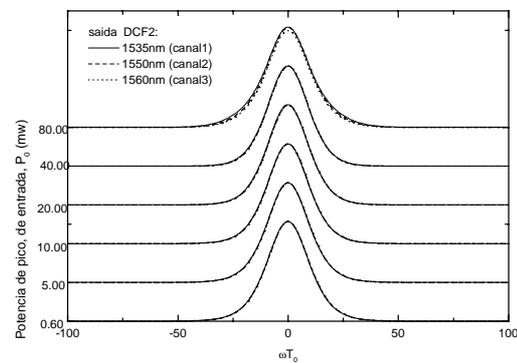


Figura 8 b. Evolução do espectro de frequência do pulso de entrada, na saída da FCD2, para diferentes valores de P_0 . Cada pulso mostrado está normalizado com relação a seu valor máximo. O eixo vertical não está representado em escala. O eixo horizontal não está representado em escala.

Para obter uma análise quantitativa das características da propagação do pulso na fibra de compensação (FCD1 ou FCD2), consideramos a taxa de alargamento temporal, σ_t/σ_{t0} , na saída da fibra de compensação, para vários valores de P_0 . As figuras (9a) e (9b) mostram σ_t/σ_{t0} para a FCD1 e para a FCD2, respectivamente. Ambas as fibras de compensação trabalham no regime normal de dispersão. Assim o “chirp” introduzido pela dispersão é positivo e portanto, contrário ao “chirp” devido à dispersão da fibra padrão. É importante lembrar que a equação (1) é válida no regime linear de operação ($N \ll 1$), e que, então, só podemos esperar obter compensação exata para λ_3 e para pequenos valores de P_0 . Esse comportamento pode ser observado nas figuras (9a) e (9b) para $P_0 \leq 5mW$. Observamos também nessas figuras que o pulso sofre um alargamento temporal à medida que P_0 cresce. Para valores maiores de P_0 , o efeito não linear de AMF na fibra padrão torna-se mais eficaz e compensa

parcialmente a dispersão. Consequentemente, o comprimento L^{fcd} calculado pela equação (1) leva a uma sobre compensação da dispersão e o pulso volta a sofrer alargamento.

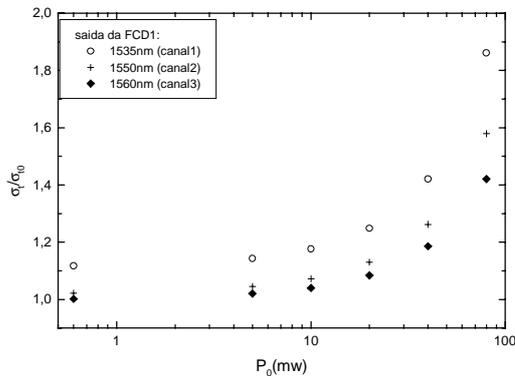


Figura 9 a . σ_t/σ_{t0} na saída da FCD1, para vários valores de P_0 .

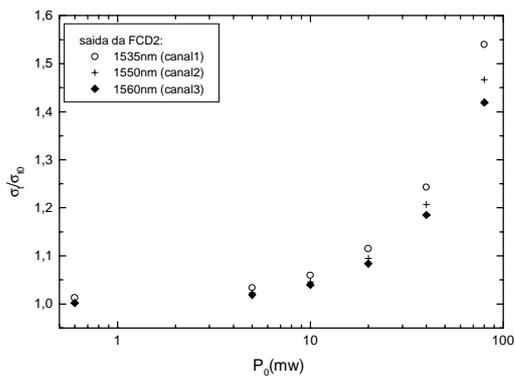


Figura 9 b. σ_t/σ_{t0} na saída da FCD2, para vários valores de P_0 .

Consideramos, aqui, que é necessário adotar um critério baseado na taxa de alargamento temporal, σ_t/σ_{t0} , para qualificar o bom desempenho do enlace. Entretanto, não encontramos na literatura especializada nenhuma definição precisa de tal critério, sendo geralmente aceito que σ_t/σ_{t0} deva permanecer limitado a valores ≤ 1.2 . Para compensar a falta de um critério comumente aceito, definimos que um bom desempenho é encontrado quando $\sigma_t/\sigma_{t0} \leq 1.15$. Com essa escolha, concluímos da figura (9b) que os três canais têm um bom desempenho quando $P_0 \leq 20mW$ e a FCD2 é usada. A figura (9a) mostra, entretanto, que quando se usa a FCD1 para $P_0 \leq 20mW$, somente os canais 2 e 3 obedecem ao critério acima (para λ_1 , $\sigma_t/\sigma_{t0} = 1.18$ quando $P_0 = 10mW$, e $\sigma_t/\sigma_{t0} = 1.25$ quando $P_0 = 20mW$).

Como discutido no início desse trabalho, ao se decidir aumentar a capacidade de um sistema DWDM expandindo-se a largura da banda ótica total, a derivada da dispersão da fibra de compensação desempenha um papel importante. De acordo com a discussão acima, comparando-se os desempenhos das FCD1 e FCD2, constata-se que a derivada da dispersão negativa da FCD2 assegura um bom desempenho em uma faixa de comprimentos de ondas mais larga.

Para evitar o re-alargamento temporal do pulso advindo da sobrecompensação (que ocorre a partir do efeito não linear da AMF), é necessário usar um comprimento menor da fibra de compensação. Na figura (10) comparamos a taxa de alargamento temporal para os três canais, para vários valores de P_0 , e para três diferentes escolhas para o comprimento L^{fcd} . A curva sólida mostra o caso onde $L^{fcd} = 17.10km$ (compensação exata). As curvas pontilhada e tracejada mostram, respectivamente, os resultados obtidos para $L^{fcd} = 15.20km$ (10% de redução) e $L^{fcd} = 13.80km$ (20% de redução). De acordo com o critério estabelecido, $\sigma_t/\sigma_{t0} \leq 1.15$, a escolha dos comprimentos $L^{fcd} = 17.10km$ ou $L^{fcd} = 15.20km$ são apropriadas se $P_0 \leq 20mW$, para todos três canais considerados e portanto para $\Delta\lambda = 25nm$. Para potências mais altas, como $P_0 = 40mW$, somente os comprimento $L^{fcd} = 15.20km$ $L^{fcd} = 13.80km$ seriam escolhas apropriadas. Note que a escolha $L^{fcd} = 13.80km$ não é apropriada para pequenos valores de P_0 , mas para $P_0 = 80mW$, este é o único comprimento que satisfaz o critério de bom desempenho

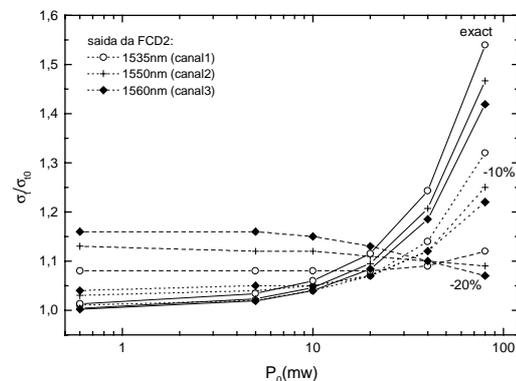


Figura 10. σ_t/σ_{t0} na saída da FCD2, para vários valores de P_0 , e para três diferentes escolhas do comprimento da FCD, L^{fcd} . A curva com linha sólida

corresponde a $L^{fcd} = 17.10km$; as linhas com ponto e com traço correspondem, respectivamente, aos resultados obtidos com $L^{fcd} = 15.20km$ (10% de redução) e $L^{fcd} = 13.80km$ (20% de redução).

V. CONCLUSÕES

Neste trabalho estudamos um enlace ponto a ponto, constituído de fibras do tipo padrão e de fibra de compensação da dispersão (FCD), em um esquema de pós-compensação da dispersão. Consideramos dois tipos de FCD que diferem entre si pelo sinal de suas derivadas da dispersão. Analisamos a propagação de pulsos ao longo de enlaces configurados de duas maneiras: fibra padrão + FCD1 ou fibra padrão + FCD2. Nossa análise se concentrou em canais situados na faixa de comprimentos de onda de $1535nm$ à $1560nm$ e em valores da potência de pico de entrada na faixa $0.6mW \leq P_0 \leq 80mW$. Nosso modelo incluiu efeitos devido a perdas, dispersão cromática de primeira e de segunda ordens e auto modulação de fase (AMF).

Com o objetivo de estabelecer um critério quantitativo para definir o bom desempenho do enlace, adotamos a largura media quadrática temporal do pulso de saída da FCD normalizada em relação à largura temporal do pulso de entrada na fibra padrão, σ_t/σ_{t0} , e, de acordo com o que tem sido feito na literatura, arbitramos $\sigma_t/\sigma_{t0} < 1.15$ como um indicador de bom desempenho do enlace. Concluímos então, que a escolha da FCD a ser usada, em um sistema específico, deve considerar a largura de banda ótica total de operação, e, também a faixa da potência de pico de entrada. Os resultados sugerem que uma fibra de compensação com derivada da dispersão negativa possibilita a operação do sistema com uma largura de banda ótica maior. De acordo com o critério adotado, ambas as fibras, FCD1 e FCD2 levam a um bom desempenho do enlace, na banda ótica $1550nm$ a $1560nm$, se $P_0 \leq 20mW$. Entretanto, se a banda ótica considerada vai de $1535nm$ à $1560nm$ e se considera $P_0 \leq 20mW$, somente a FCD2 atende ao critério estabelecido.

REFERÊNCIAS

- [1] J. A. R. Williams, M. I. R. Bennion, N. J. Doran, Optics Communications vol. 16.62, (1995);
- [2] G. P. Agrawal, Nonlinear Fiber Optics 2nd Edition, Academic Press, 1995;
- [3] C. Lin, H. Kogelnik and L. G. Cohen, Optics Letters vol. 5 (11) 476 (1980);
- [4] J.YU. Guan, Z. XU and B. Yang, Optics Communications vol 150, 85 (1998);

- [5] D. Breuer, K. Jurgensen, F. Kuppers, A. Matheus, I Gabitov, S K Turitysyn, Optics Communications vol 140, july, 15 (1997);
- [6] P. Palai, K. Thyagarajan, Optics Communications vol 143, 203 (1997);
- [7] M. R. C. Caputo and M.E. Gouvêa, Optics Communications vol 178, may, 323 (2000);
- [8] H. Izadpanah, C. Lin, J. L. Gimlett, A. J. Antos, D. W. Hall, D. K. Smith Electronics Letters vol 28 (15) 1469 (1992);
- [9] . Izadpanah, E. Goldstein, C. Lin, Electronics Letters vol 29 (4) 364 (1993);
- [10] N. Kikuchi, S. Sasaki and K. Sekine, Electronics Letters vol 31 (5) 375 (1995);
- [11] . J. Nuyts, Y K Park, P Gallion, IEEE Photonics Technology Letters vol 8 (10) 1406 (1996);
- [12]-K. Sekine, N. Kikuchi, S. Sasaki, Y. Uchida, Electronics Letters vol 31 (3) 1080 (1995);
- [13] R H Stolen, Proceeding of the IEEE, vol 68 (10) 1232 (1980);
- [14] M. J. Yadlowsk; E. M. Deliso; V. L. Silva; Proceedings of the IEEE, vol 85 (11) 1765 (1997);
- [15] A. R. Chraplyvy, Journal of Lightwave Technology, vol 8 (10) 1548 (1990);
- [16] D. Marcuse, A. R. Chraplyvy and R. W. Tkach, Journal Lightwave echnology, vol.12, may, 885 (1994);
- [17] L. F. Mollenauer, P. V. Mamishev and J. P. Gordon, Optics Letters, vol.24 (4) 220 (1999)
- [18] D. Marcuse, "Theory of Dielectric Optical Waveguide, 2nd Ed, Academia Press Inc.,
- [19] L. F. Mollenauer and R. H. Stolen, Fiberoptic Technology, april, 193 (1982);
- [20] M. R. C. Caputo and M. E. Gouvêa, Revista Telebrás vol (62), dez, 62 (1994);

Maria Regina Campos Caputo é engenheira pelo INATEL - Instituto Nacional de Telecomunicações (1975); Especialização em Engenharia Econômica-PUC-MG (1981); Mestre (1993) e Doutora (2000), pela UFMG-Universidade Federal de Minas Gerais. Trabalha na Solitons Engenharia de Telecomunicações Ltda, ; É professora da pós graduação da UFMG; Foi professora no INATEL (1976); Trabalhou com projeto/ implantação de sistemas de telecomunicações, via rádio, fibras óticas/optat: 1985-89 Engevix EngenhariaS/A - Belo Horizonte; 1983-85 Main Engenharia S/A- São Paulo; 1979-82 Italtel Societá Italiana Telecomunicazione, filial Belo Horizonte; 1977 ESCELSA Espirito Santo Centrais Elétricas S/A-Vitória-ES, 1978-1981. Nesses períodos executou serviços para: Eletronorte, Furnas, Escelsa, Itaipú Binacional, Chesf, Eletrosul e Cemig; Integrou Comissões da ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas e do GCOI- Eletrobrás, (1979-1981). Possui diversas publicações técnicas em revistas nacionais e internacionais; Prêmios recebidos: Prêmio Telexpo/Equitel 1995 (3^o lugar); Prêmio

Telexpo/Equitel 1996 (2^o lugar); Prêmio Telexpo/Equitel 1999 (4^o lugar).

Maria Elizabeth Gouvêa é doutora em física da matéria condensada, pela Universidade Federal de Minas Gerais (1986). Fez pós doutorado no Los Alamos National Laboratory (1987-1988), Los Alamos, NM, EUA e mantém intercâmbio constante com: Universitat of Bayreuth, Alemanha,; Kansas State University , Manhattan, KS, EUA e com Los Alamos National Laboratory, NM, EUA. É professora do departamento de Física da UFMG desde 1976, publicou uma tese de mestrado, uma de doutorado e 40 artigos em revistas internacionais com árbitros.É membro da Sociedade Brasileira de Física.