

Fatores que Influenciam a Capacidade e o Desempenho dos Sistemas com Amplificadores Óticos

(Os Atuais Sistemas Óticos de Alta Capacidade)

Maria Regina C. Caputo, Maria Elizabeth Gouvêa

Universidade Federal de Minas Gerais-UFMG

e-mail: rcaputo@fisica.ufmg.br

Resumo. A crescente demanda de aplicações *multimídia* (vídeo conferência, internet, tv a cabo, etc) em todo o mundo tem como consequência o aumento da quantidade de *informação* a ser transportada pelas *redes de telecomunicações*.

Isso tem impulsionado o desenvolvimento tecnológico dos sistemas óticos e o “up-grade” de uma rede de cerca de 70.000.000 de quilômetros de fibra ótica do tipo *Standard*, já implantada.

Nos últimos anos fabricantes desses sistemas, em todo o mundo, estão desenvolvendo/ aperfeiçoando *amplificadores óticos*, esquemas de *compensação da dispersão*, *novos tipos de fibras óticas*, dispositivos para tecnologia baseada em *multiplexação em comprimento de onda*, e muito mais (dispositivos de *comutação fotônica*, dispositivos para *redes totalmente óticas*, etc), tudo isso com o objetivo de aumentar a *capacidade* e o *desempenho* desses sistemas.

Nesse trabalho temos como objetivo abordar os fatores que influenciam a *capacidade de transmissão* ($C = \text{bit/s} \times \text{km}$) e o *desempenho* dos sistemas óticos atuais.

Sob esse aspecto a década de 90 retrata uma situação bastante diferente da década de 80 caracterizando-se pela tentativa dos pesquisadores/ projetistas de sistemas óticos em *compensar a atenuação* e a *dispersão* das fibras óticas, que são alguns dos fatores limitantes da capacidade de transmissão e do desempenho desses sistemas.

Esses parâmetros foram extremamente *minimizados* nas gerações anteriores de fibras óticas, onde valores de 0,2 dB/km para a atenuação e de 2,7 ps/nm.km para a dispersão cromática foram disponibilizados em fibras comerciais.

A compensação da atenuação por *amplificadores óticos a base de fibras dopadas com Érbio-AFDE's* (os quais possuem largura de banda suficiente para amplificar múltiplos canais simultaneamente) tornou os sistemas baseados na técnica de *multiplexação por comprimento de onda- WDM* (análogos dos sistemas FDM via Rádio) atraentes sob o ponto de vista de custo. Com a disponibilização dos AFDE's a compensação da atenuação em cada sub-sistema (portadora) não é mais feita por *regeneradores eletrônicos* (que normalmente operam com taxa de transmissão fixa e num comprimento de onda específico) acarretando isso uma enorme simplificação operacional e queda nos custos de implementação desses sistemas.

A técnica WDM traz a possibilidade de explorar a largura de banda de cerca de 1THz, associada com a portadora ótica.

Contudo a implementação de AFDE's nas rotas (seja em sistemas WDM ou em sistemas de um único laser, que designaremos nesse trabalho por sistemas *TDM- Time Division Multiplexing*) exige que se considere um compromisso entre vários parâmetros de desempenho que são conflitantes. Uma *engenharia de sistemas* correta (dimensionamento do enlace) deve levar à *otimização simultânea* desses parâmetros num projeto envolvendo vários AFDE's em cascata, caso contrário a *degradação* ou até a *inviabilização* da operação do sistema poderá ocorrer.

A utilização de uma cascata de AFDE's leva o sinal a permanecer em sua forma ótica por centenas de quilômetros, antes de passar por uma reformatação (regeneração eletrônica), originando algumas questões novas:

a)- os efeitos das dispersões (*cromática e de polarização*) que se acumulam com a distância podem alargar temporalmente o pulso a níveis que comprometem a *Taxa de Erro (BER- Bit Error Rate)* do sistema;

b)-o ruído de emissão espontânea, inerente a todo amplificador ótico, é sucessivamente amplificado em cada AFDE degradando a *relação sinal/ruído*;

c) - níveis elevados de potência na saída dos AFDE's são injetados na fibra ótica e podem levar a mesma a operar na *região não linear* com conseqüente geração de *novas componentes espectrais*, isto é, ocorre alargamento espectral do sinal. Isso agrava o problema da dispersão além do fato de que as novas componentes espectrais co-existem com as originais retirando potência das mesmas, o que pode comprometer o *balanço de potência do enlace*.

Com o objetivo de abordar essas questões esse trabalho está dividido da seguinte forma: na seção 1 são revistas brevemente as características das primeiras gerações de sistemas óticos; na seção 2 são abordados as vantagens e problemas sistêmicos decorrentes da introdução de *amplificadores óticos* nos enlaces; na seção 3 aborda-se alguns aspectos que certamente elevarão a capacidade final dos sistemas WDM além dos níveis atuais. Isso está diretamente relacionado, entre outros fatores, com a otimização do projeto dos AFDE's e de *novas fibras óticas*. Alguns *efeitos não lineares* mais eficazes em fibras óticas são abordados nas sub-seções 4.1 e 4.2, enquanto a sub-seção 4.3 enfoca algumas características das *novas fibras óticas (de dispersão não nula, de maior área eficaz, etc)* recentemente lançadas no mercado e mais adequadas para operação no regime não linear. Na seção 5 são abordados os principais parâmetros de projeto do esquema de *compensação da dispersão cromática, baseado em fibras de dispersão oposta*, o qual vem sendo implementado para fazer o “up-grade” das redes óticas que operam com fibras *Standard*, possibilitando taxas de transmissão superiores a 2,5 Gbit/s Finalmente na seção 6 são abordados alguns aspectos relacionados a futuros sistemas óticos baseados na transmissão de *solitons*.

I - Introdução

Por volta de 1910-1920 iniciaram-se os primeiros estudos teóricos e experimentais sobre a transmissão de luz através de *guias de onda* cilíndricos feitos de material *dielétrico* [1]. Inicialmente estudou-se guias de onda constituídos de um único cilindro (*núcleo*) com material de *índice de refração* superior ao do ar (que então desempenhava o papel de *casca*) confinando a luz por *Reflexão Total*, o mesmo fenômeno sobre o qual se baseia o projeto dos guias de onda dielétricos atuais, denominados *fibras óticas*.

Em 1960 foi inventada a fonte ótica do tipo *laser*. Naquela década os guias de onda dielétricos, usados em experimentos de laboratório apresentavam atenuação da ordem de 1000dB/km.

Em 1970 foram anunciadas fibras óticas com perdas de 20dB/km operando na região próxima a 1 μm [2]. A partir de

então o uso dessas fibras como meio de transmissão, em conjunto com lasers semicondutores, tornou-se uma realidade nos sistemas de telecomunicações.

A *capacidade de transmissão, C*, de um sistema é limitada e definida (para o caso de transmissão de sinais digitais) como:

$$C = \text{taxa de transmissão} \times \text{distância entre repetidores} \quad (1)$$

sendo medida em $(\text{bit} / \text{s} \times \text{km})$.

No caso de sistemas óticos a limitação é imposta ao sinal pelo meio *material* constituinte da fibra (sílica dopada) e pelo *projeto* da mesma (diâmetro do núcleo, perfil do índice de refração), bem como das características do transmissor e do receptor ótico.

A figura 1 mostra a evolução desse parâmetro com o tempo, indicando o fantástico crescimento de muitas ordens de grandeza, em cerca de 25 anos.

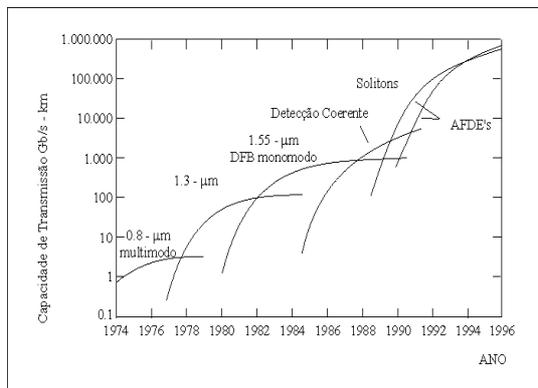


Figura 1. Evolução da Capacidade de Transmissão, C , dos sistemas óticos, [3].

Nas três primeiras gerações de sistemas óticos [3,4] o aumento da capacidade de transmissão, C , ocorreu principalmente devido ao aperfeiçoamento das técnicas de fabricação e da otimização dos parâmetros de projeto dos componentes constituintes dos sistemas: fibras *standard* e de *dispersão deslocada*, lasers *multimodo Fabri Perot* e *monomodo de realimentação distribuída- DFB*, fotodetectores do tipo *Pin* e *APD*. Além, é evidente, da grande evolução das técnicas de *cablagem* e *emendas* de fibras óticas. Nessas três primeiras gerações de sistemas óticos os únicos limitantes da Capacidade de Transmissão, C , eram a *atenuação* e a *dispersão* do sinal:

- a primeira geração comercial de sistemas óticos operava a $\approx 0.8\mu\text{m}$ com as fibras confinando muitos *Modos* (*fibras multimodo*); os *regeneradores eletrônicos* eram espaçados a aproximadamente cada 10 km e a taxa de transmissão atingia 45 Mbit/s (~ 1980).

- posteriormente, surgiam as primeiras fibras operando em regime *monomodo*, na janela de $1.3\mu\text{m}$. Na segunda geração comercial de sistemas óticos atingiu-se a taxa de transmissão de 1.7 Gbit/s com repetidores eletrônicos espaçados a aproximadamente 50 km. As fibras óticas, comercialmente denominadas *fibras standard*, apresentavam *perdas* da ordem de 0.5 dB/km e dispersão cromática de 1ª ordem de $\sim 3.5 \text{ ps/nm.km}$, na janela de $1.3\mu\text{m}$ (~ 1987);

- a terceira geração comercial de sistemas óticos (~ 1990) foi caracterizada por fibras óticas operando na janela de $1.55\mu\text{m}$ com perdas da ordem de 0.2 dB/km e dispersão cromática de 1ª ordem menor do que $3,0 \text{ ps/nm.km}$, (fibras de dispersão deslocada comercialmente designadas por *fibras DS-dispersion shift*). O uso dessas fibras com lasers *DFB* (*distributen feedback*) que operam com um único Modo longitudinal, e com esquemas de *modulação externo* possibilitaram a operação do sistemas com taxas de transmissão além de 2,5 Gbit/s sendo os regeneradores eletrônicos espaçados a cada 60-70 km. Contudo nessa terceira geração os regeneradores continuavam sendo os únicos dispositivos capazes de recuperar o sinal degradado pela dispersão e pela atenuação.

A década de 90 retrata uma situação radicalmente diferente da década de 80, pois uma vez minimizadas a atenuação e a dispersão das fibras óticas, intensa pesquisa vem sendo feita com o objetivo de compensar esses parâmetros. Assim, mais recentemente (~ 1995), o crescimento da capacidade dos sistemas óticos vem ocorrendo em função de novos componentes e novas técnicas introduzidas nos sistemas óticos: *amplificadores óticos*, *sistemas com multiplexação em comprimento de onda* e *técnicas de compensação/gerenciamento da dispersão cromática* caracterizam a quarta geração comercial de sistemas óticos.

Como já existem mais de 50.000.000 de quilômetros de fibra do tipo *Standard* implantadas em todo o mundo [3], razões econômicas impõem que a quarta geração de sistemas óticos considere também o “up- grade” dessa rede, para operação com taxa de transmissão igual ou acima de 2.5Gbit/s.

Nesse trabalho analisamos os principais aspectos que influenciam a capacidade de transmissão e o desempenho dos enlaces óticos atuais. Assim abordam-se, na seção 2, as vantagens e problemas decorrentes da introdução de amplificadores óticos nas rotas; na seção 3 abordam-se alguns aspectos relacionados aos sistemas WDM e a fatores que certamente elevarão a capacidade final desses sistemas além dos níveis atuais; esses fatores estão diretamente relacionados com a otimização do projeto de novas fibras.

Alguns dos efeitos não lineares mais eficazes em fibras óticas são estudados nas sub-seções 4.1 e 4.2, enquanto a sub-seção 4.3 analisa algumas das características das novas fibras óticas, mais apropriadas para operação com amplificadores óticos.

Na seção 5 são abordados conceitos relativos ao esquema de compensação da dispersão cromática, baseado em *fibras de dispersão oposta*, o qual vem sendo implementado também para fazer o “up-grade” das redes óticas que operam com fibras *Standard*, possibilitando taxas de transmissão igual ou superior a 2,5 Gbit/s.

Finalmente, na seção 6, são abordados alguns aspectos relacionados a futuros sistemas óticos baseados na transmissão de *solitons*.

II-Problemas sistêmicos decorrentes do uso de Amplificadores Óticos

III - Sistemas WDM

No início dos anos 90 tornaram-se disponíveis comercialmente os *amplificadores óticos à base de fibras dopadas com Érbio* [5]. Esses amplificadores são designados pela sigla AFDE- Amplificadores Óticos à Fíbrea Dopada com Érbio e apresentam ganho na faixa de 1530-1565nm.

Com o uso dos AFDE's soluciona-se a questão de *compensar a atenuação* e, a princípio, aumentar a capacidade de transmissão dos sistemas, através do maior alcance do enlace. Contudo a questão não é assim tão simples, como veremos a seguir.

O AFDE ao amplificar o sinal possibilita um maior alcance e assim aumenta a distância entre *Regeneradores Eletrônicos*. Através de uma cascata de amplificadores o sinal permanece viajando, em sua forma ótica, por até centenas de quilômetros. Isso origina duas questões novas:

1ª)- ao permanecer em sua forma ótica, por centenas de quilômetros, sem reformatação os efeitos das dispersões (cromática e de polarização) se acumulam com a distância, causando o alargamento temporal do pulso com a conseqüente sobreposição de pulsos adjacentes. Isso pode comprometer o desempenho do sistema através da degradação da Taxa de Erro, BER- Bit Error Rate.

2ª)- existe um nível de ruído associado a todo AFDE: ruído de emissão espontânea; o ruído gerado pelo primeiro amplificador será, juntamente com o sinal, amplificado pelo segundo AFDE da cascata e assim sucessivamente caracterizando o ASE- Amplified Spontaneous Emission [5]. Em conseqüência o desempenho do enlace poderá ficar comprometido com a diminuição da relação sinal/ ruído (S/R).

A 1ª questão vem sendo solucionada por uma das duas alternativas:

- como nas gerações anteriores, pelo uso de Regeneradores Eletrônicos que passam a ter um espaçamento médio ditado pela taxa de transmissão;
- ou pelos recentemente desenvolvidos *esquemas de compensação da dispersão* [6], ver seção 5, que possibilitam aumentar o espaçamento entre os Regeneradores Eletrônicos (ou até eliminá-los dependendo da distância total do enlace e da taxa de transmissão).

Esses esquemas vêm sendo implementados com sucesso também nos enlaces com fibras *Standard* que passaram a operar em 155µm (para viabilizar o uso de AFDE's), com a elevada dispersão de 17ps / nm.km.

A 2ª questão, isto é, a da degradação da relação S/R devido ao ruído de emissão espontânea inerente à cada amplificador ótico implantado é tanto mais crítica quanto mais elevado for esse ruído em cada AFDE e quanto mais elevado for o número de AFDE's necessários no enlace. Esse número pode ser reduzido às expensas de se aumentar o ganho de cada AFDE, embora isso possa gerar outro problema: dependendo do nível do sinal enviado para a fibra pelo AFDE, podem surgir efeitos que degradam a informação em conseqüência da *operação da fibra ótica na região não linear*, veja seção 4. A degradação do sinal decorrente desses efeitos não lineares depende não só da potência do sinal e do ruído ASE na saída do AFDE, como também da fibra utilizada: as fibras DS são mais susceptíveis a esses efeitos do que as fibras *Standard*. Com isso estão surgindo novas alternativas comerciais de fibras: de *dispersão não nula*, de *grande área eficaz*, etc (seção 4.3)

O aumento da *Capacidade de Transmissão C*, dos sistemas óticos pode ser obtido alternativamente por duas técnicas básicas:

1-aumentando-se a taxa de transmissão pela multiplexação dos sinais (voz, dados, imagem) no domínio do tempo com taxas cada vez maiores: 2,5Gbit / s, 10Gbit / s, 40Gbit / s, etc, através da técnica de *Multiplexação por Divisão no Tempo* (TDM- Time Division Multiplexing).

O uso dessa técnica encontra duas limitações práticas: uma de ordem econômica sendo muito elevado o custo das partes eletrônica e eletroóptica do sistema (transmissores, receptores, regeneradores) para operação com taxas de transmissão *acima de 2,5 Gbit/s*. A outra limitação é de ordem técnica, relacionada à degradação do sinal devido à dispersão e a efeitos não lineares. Essa limitação se torna crítica com o aumento das taxa de transmissão.

2- multiplexando-se os sinais no domínio da freqüência. É designada por "*Wavelength Division Multiplexing*" [7]. Tipicamente, os sistemas WDM atuais operam com diversos sinais TDM de 2,5Gbit / s sendo cada um deles multiplexados por portadoras espaçadas tipicamente por 2nm.

A alternativa 2 só foi realmente considerada em termos práticos após o advento dos Amplificadores Óticos (AFDE's), pois antes da disponibilização dos mesmos a necessidade de se implementar um regenerador eletrônico para cada subsistema tornava essa técnica pouco atraentes em termos de custo.

A disponibilização de AFDE's com características de *ganho uniforme* [5,8] na faixa de operação mudou radicalmente essa situação explicando a rápida implementação desses sistemas. Uma das grandes vantagens dessa técnica é que, embora a taxa total de transmissão seja de $N \times 2,5Gbit / s$ (sendo N o número total de fontes laser utilizadas na multiplexação), a limitação imposta pela fibra devido à dispersão é calculada com base na taxa de 2,5Gbit / s.

A capacidade final dos sistemas WDM (que depende do espaçamento entre canais) deverá crescer além dos níveis atuais devido ao aperfeiçoamento de fatores tais como:

- a redução da eficácia dos processos não lineares com o uso de novas fibras;
- a planicidade das curvas de ganho dos AFDE's para evitar distorção dos múltiplos canais;
- a estabilidade e sintonabilidade dos múltiplos lasers DFB integrados através da tecnologia OIEC- Optoelectronics Integrated Circuits;
- a técnica de Controle Automático de Ganho dos AFDE's;
- a sintonabilidade e as perdas dos filtros óticos que operam nos receptores;
- o potencial de operação bidirecional dos AFDE's;

IV-Fibras óticas operando na região não linear

O índice de refração da sílica (vidro) que constitui a fibra ótica, que para baixas intensidade de luz incidente na fibra, é definido como:

$$n = n_0(\lambda) \quad (2)$$

passa a ser definido, para o caso de altas intensidades de luz, como:

$$n = n_0(\lambda) + n_2 |E|^2 \quad (3)$$

onde λ é o comprimento de onda da luz, n_0 o índice de refração linear, n_2 o índice de refração não linear e $|E|^2$ está relacionado a distribuição da potência no núcleo da fibra ótica.

A expressão acima indica a dependência do índice de refração com a potência incidente para o caso não linear, em oposição ao caso linear. Esse efeito é denominado *efeito Kerr não linear* [9].

Quando a potência da luz incidente na fibra é alta, as diferentes componentes espectrais de um único laser (no caso de sistemas de canal único) ou as componentes espectrais dos vários lasers (no caso de sistemas WDM) **interagem** umas com as outras resultando na geração de novas frequências. Essas novas frequências viajam com velocidades diferentes na fibra, agravando os problemas decorrentes da dispersão, além de retirarem potência das componentes originais podendo comprometer o *balanço de potência*, do sistema. A seguir, abordamos alguns efeitos não lineares importantes em fibra óticas.

IV.1-Auto Modulação de Fase e Modulação de Fase Cruzada

A dependência do índice de refração com a potência do sinal incidente na fibra causa a modulação desse sinal, isto é, ocorre uma **Auto Modulação de Fase** (SPM-Self Phase Modulation) [3,9]. Isso ocorre devido a uma variação de fase adicional (em relação ao caso linear) sofrida pela luz ao se propagar na fibra. A consequência da SPM é o alargamento espectral efetivo do pulso (“chirp”), veja figura 2 [9]. No caso de sistemas WDM, a alta intensidade do sinal de um canal leva à modulação de fase de um canal adjacente, caracterizando uma **Modulação de Fase Cruzada** (XPM-Cross Phase Modulation) [3].

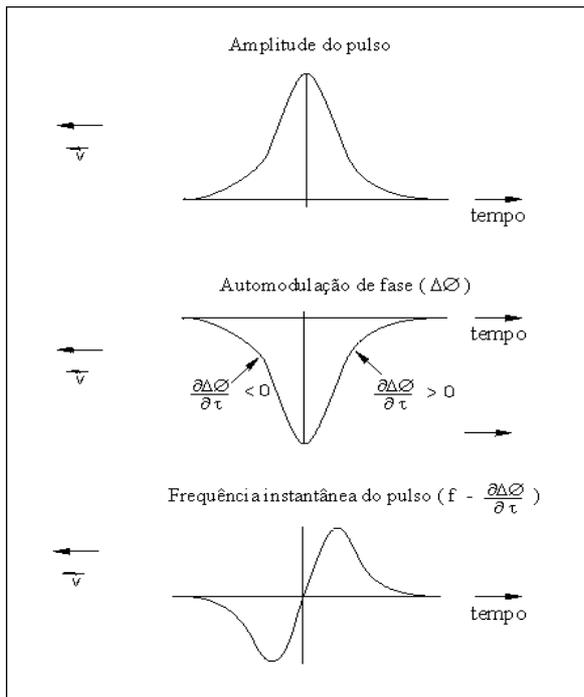


Figura 2 . “Chirp” de frequência devido ao efeito Kerr não linear, [9].

A eficácia desses processos não lineares depende da potência da luz incidente por área eficaz, o que está refletido no parâmetro *raio modal*, veja figura 3 [10]. Essa concentração depende fortemente do perfil do índice de refração no núcleo, sendo portanto diferente em fibras *Standard* e em fibras *DS*.

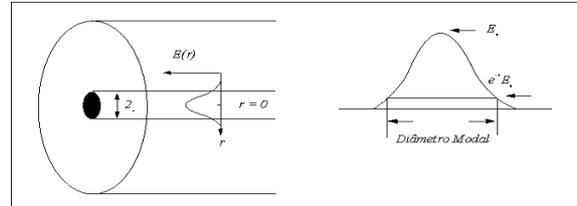


Figura 3. Um dos modelos que caracteriza o raio modal da fibra ótica define o mesmo como sendo a distância, a partir do eixo da fibra, para a qual a intensidade cai de $1/e^2$ [10]. Esse parâmetro é de importância fundamental nos sistemas óticos com AFDE's, nos quais a fibra opera no regime não linear. Ele governa também as perdas por curvatura da fibra.

IV.2-Mistura de Quatro Ondas

Esse processo também tem sua origem relacionada ao índice de refração não linear, n_2 . Novas componentes espectrais são geradas e co-propagam-se com as componentes espectrais originais. No caso em que o sistema esteja operando longe do comprimento de onda de dispersão de primeira ordem nula, $\lambda_{D=0}$ [9], a co-propagação ocorre com apreciável diferença de velocidade, entretanto se o sistema estiver operando muito próximo de $\lambda_{D=0}$ ocorrerá suficiente sincronismo entre as fases dessas diversas componentes e parte da energia dos sinais originais migrarão para as novas componentes; isso pode ocorrer também entre as componentes originais do sinal e o ruído de emissão espontânea dos AFDE's. Esse processo não linear denomina-se **Mistura de Quatro Ondas** (FWM- Four Wave Mixing) [4,7,9]. A energia retirada das componentes originais pode comprometer o *balanço de potência* do enlace ao mesmo tempo que as novas componentes espectrais reforçadas podem causar interferência entre canais (crosstalk em sistemas WDM) [11]. Na figura 4 [11] são mostradas as novas componente geradas por FWM, a partir de duas e três frequências incidentes.

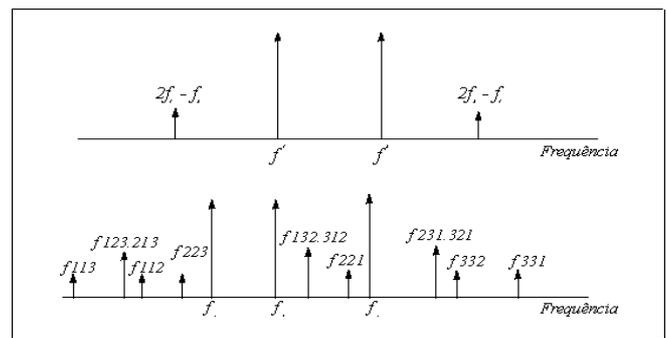


Figura 4. Mistura de Quatro Ondas : (a) com duas ondas injetadas nas frequências f_1 e f_2 ; (b) com três ondas injetadas nas frequências f_1, f_2 e f_3 . As frequências geradas são $f_{ijk} = f_i^+ f_j^- f_k^-$ [11].

O processo não linear de FWM é mais eficiente se o sistema opera com $\lambda = \lambda_{D=0}$, o que é conflitante com a necessidade de minimizar a dispersão para aumentar a capacidade de transmissão. Veremos na seção abaixo, que o projeto de novas fibras considera essa questão, bem como a minimização de outros efeitos não lineares.

IV.3- Fibras de Dispersão não Nula (NZDSF) e de Grande Área Eficaz

Do que foi exposto nas seções 4.1 e 4.2 é ideal que as fibras para operação na região não linear apresentem:

- grande área eficaz;
- valor da dispersão (na faixa útil dos AFDE's) não nula e com valor suficiente para minimizar a geração de FWM.

Analisando sob esses aspectos a fibra *Standard* é menos susceptível aos efeitos não lineares do que a fibra de dispersão deslocada (porque possui área eficaz de $\sim 80 \mu\text{m}^2$ contra $\sim 55 \mu\text{m}^2$, em $1.55 \mu\text{m}$); porém nesse comprimento de onda sua dispersão é de $\sim 17 \text{ ps/nm.km}$.

Em 1995-1996 surgiram no mercado as denominadas fibras NZDSF- Non Zero Dispersion Shift Fiber [12], que têm o comprimento de onda de dispersão nula, $\lambda_{D=0}$, fora da faixa de operação dos AFDE's, veja figura 5

Tipicamente elas apresentam dispersão dentro dessa faixa inferior a 3.5 ps/nm.km , assegurando então uma fraca eficácia do processo de FWM e, ao mesmo tempo, não degradando drasticamente o sinal por dispersão [13].

Além disso o projeto dessas fibras considera (mais recentemente) a otimização do perfil do índice de refração (que é segmentado) para possibilitar o confinamento do Modo fundamental com maior raio modal, e consequentemente maior espaçamento entre os AFDE's [13].

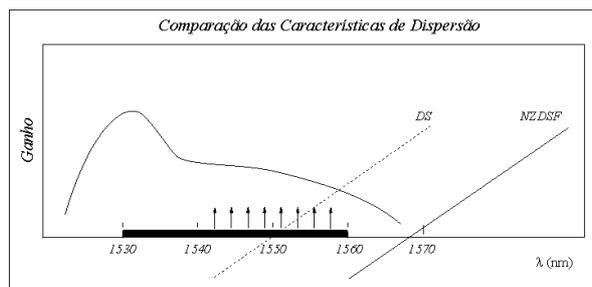


Figura 5. Características de dispersão das fibras NZDSF comparadas com as fibras DS- dispersion shift, relativas a banda de operação dos AFDE's [12].

V - Esquemas de Compensação/Gerenciamento da Dispersão

Com a implementação dos AFDE's nos sistemas óticos, a distância entre regeneradores passou a ser ditada não mais pela atenuação imposta ao sinal pela fibra mas pela dispersão. Como os amplificadores óticos podem levar o sistema a operar na região não linear e portanto causar efeitos que alargam espectralmente o sinal acentua-se o problema da dispersão.

Recentemente, 1995-1996, tornaram-se disponíveis comercialmente dispositivos baseados em técnicas para compensar a dispersão cromática e então aumentar o espaçamento entre regeneradores eletrônicos (ou até eliminá-los dependendo do comprimento total do enlace). Nessa seção abordaremos a utilização de Fibras de Dispersão Oposta (DCF- Dispersion Compensating Fiber) para compensação da dispersão cromática. Existem inúmeras outras técnicas de compensação [3], dentre elas as que se utilizam de *pré-chirp no laser*, *chirp induzido pela auto modulação de fase*, *grade de Bragg*, etc, contudo elas não serão abordadas aqui.

Consideraremos inicialmente que o esquema de compensação da dispersão baseado em fibras de dispersão oposta, DCF, esteja sendo implementado em um enlace onde os efeitos não lineares sejam desprezíveis. Nesse caso pode-se compensar totalmente o efeito do alargamento temporal do pulso pela dispersão cromática de primeira ordem, como veremos. Referindo-se a figura 6 [14]:

$$D_{tx}L_{tx} + D_cL_c = 0 \quad (4)$$

sendo D e L , respectivamente a dispersão de primeira ordem e o comprimento da fibra; os sub-índices tx e c referem-se respectivamente às fibras de transmissão e de compensação.

De (4) resulta:

$$D_c = \frac{L_{tx}}{L_c} D_{tx} \quad (5)$$

e portanto D_t e D_c têm sinais opostos.

A fibra de transmissão *Standard*, opera em 1550 nm no regime anômalo, portanto as DCF's são, nesse caso, projetadas para operarem no regime normal [3].

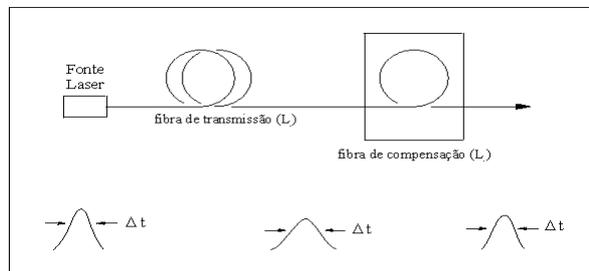


Figura 6. Utilização de equalização ótica para reduzir ou eliminar o alargamento temporal do pulso causado pela dispersão de primeira ordem [14]

É desejável que o valor de D_c seja alto para que o comprimento L_c seja reduzido e não se introduza, assim, muita atenuação adicional (α_c) ao enlace.

Tipicamente $D_c \approx -60$ à -100 ps/nm.km e $\alpha_c \approx 0.7$ à 1.0 db/km . Define-se uma *Figura de Mérito (M)* [15], avaliada em $\text{ps} / \text{nm.db}$ e que caracteriza o desempenho da fibra de compensação:

$$M = \frac{D_c}{\alpha_c} \quad (6)$$

Assim, nesse caso, sistemas operando no regime linear ficam limitados apenas pela dispersão de segunda ordem e superiores e pela *dispersão de modo de polarização* [4].

A figura 7, ilustra a variação do valor da dispersão ao longo de um enlace com compensação da dispersão [8].

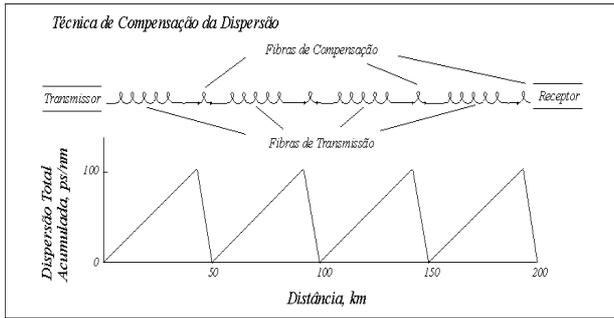


Figura 7. Dispersão total acumulada em função da distância ao longo de um enlace hipotético[8].

No caso de sistemas operando no regime não linear, não haverá compensação total da dispersão pela fibras de compensação oposta, como no caso de operação linear. Isso porque os efeitos da auto modulação de fase, da mistura de quatro ondas e da dispersão cromática degradam o sinal *de forma diferenciada nos diferentes trechos de fibras* (fibras de transmissão e de compensação). Essa diferenciação é consequência de fatores como:

- a marcante diferença do projeto das fibras de compensação em relação às fibras de transmissão;
 - a alteração do nível de potência sofrido pelo sinal ao longo do enlace, com a consequente alteração da eficácia dos efeitos não lineares e da interação desses com a dispersão;
- Em decorrência de tudo isso é necessário que se *gerencie* a não linearidade e a dispersão.

O gerenciamento da dispersão é eficiente não somente em enlaces com fibras Standard operando em 1550nm, como também em enlaces com fibras DS e fibras NZDSF. Esse é um campo de intensa pesquisa atualmente onde resultados experimentais em conjunto com resultados de simulação numérica das condições de propagação do sinal em trechos alternados de fibras de transmissão e fibras de compensação conduzem a um *esquema ótimo de compensação da dispersão*. A avaliação final não só define as características de parâmetros das fibras de compensação como também sua localização física no enlace.

A TABELA I mostra as características de alguns enlaces que operam com fibras Standard e com fibras de compensação da dispersão; código NRZ.- Non Return to Zero.

TABELA I -Enlaces baseados em fibras de compensação com dispersão oposta.

Enlace	Fonte Laser/Modulação	Fibra de Transmissão	Fibra DCF	AFDE's	Obs.	Ref.
2,5Gbit/s X 210 km	DFB-IM-DD ⁽¹⁾	Standard	47.0km	2		[16]
(2X2,5)Gbit/s X 60 km	DFB-IM-DD	Standard	21.8km	1	WDM ⁽²⁾	[17]
10Gbit/s X 150 km	DFB-IM-DD	Standard	39.0km	3		[18]
10Gbit/sX 2245 km	DFB-MEXT ⁽³⁾	Standard	405.km	25	Loop ⁽⁴⁾	[19]

(1)-modulação da potência do laser, diretamente na corrente; (3)-modulação externa da potência do laser; (2)- WDM

1300nm/1550nm; (4)-enlace simulado em laboratório com configuração de "loop" recirculante.

VI - Sistemas baseados em Solitons

Do que foi exposto nas seções anteriores verifica-se que a evolução dos sistemas óticos é norteada pela busca de uma maior capacidade de transmissão, isto é, de um projeto que explore totalmente a largura de banda das fibras óticas. Assim, paralelamente à pesquisa de fibras que minimizam a dispersão (DS) e de fibras que compensam a dispersão (DCF) seguem pesquisas relacionadas a um fenômeno denominado *Soliton Ótico* [3,4,20], no qual a dispersão cromática é *naturalmente compensada* pelo efeito não linear de auto modulação de fase, na fibra ótica.

Solitons Óticos só existem em meios óticos não lineares; embora o fenômeno de Soliton não seja limitado a meios óticos [21].

No caso dos Solitons Óticos ocorre que os efeitos de alargamento temporal do pulso, pela dispersão no regime anômalo, e do alargamento espectral, pela auto modulação de fase, cancelam-se mutuamente. Em consequência o Soliton Ótico é um pulso que não varia sua forma nem seu espectro ao se propagar. A figura 8 [20], ilustra esse fenômeno.

A previsão teórica de se transmitir Solitons Óticos em fibras óticas foi feita por Akira Hasegawa, em 1973 [22]. Posteriormente, em 1980, Lin Mollenauer confirmou experimentalmente essa previsão [23].

O entendimento do fenômeno de Solitons em fibras óticas, tanto do ponto de vista qualitativo quanto quantitativo, é vastamente explorado na literatura especializada sendo seu entendimento quantitativo baseado na equação de propagação do pulso na fibra: *equação não linear de Schrödinger estendida* [3,4,22,23,24]. Na referência [24] fizemos um pequeno resumo das características básicas da propagação de Solitons em fibras obtendo e solucionando, numericamente a equação de propagação com condições inicial e de contorno específicas, lá citadas.

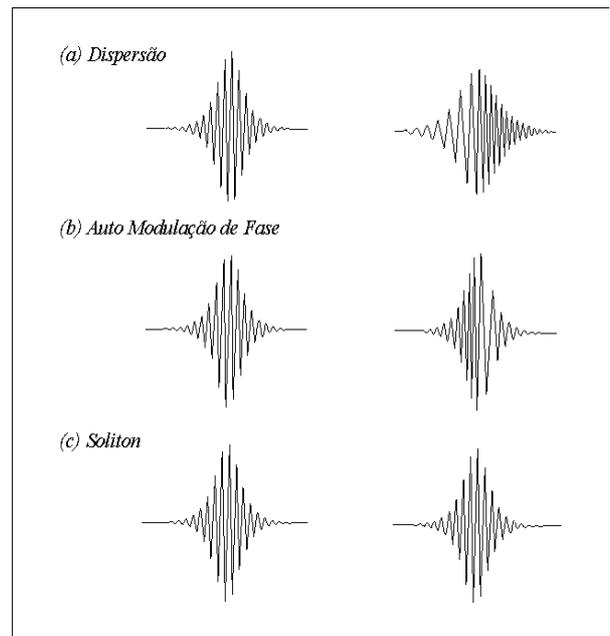


Figura 8. Se dispersão (a) e automodulação de fase (b) coexistem durante a propagação do pulso, o "envelope" do mesmo propaga-

se sem alteração da largura temporal e do espectro (c), uma vez que os deslocamentos de frequências instantâneos provocados pelos dois fenômenos são opostos [20]. Veja também a figura 2.

A viabilização prática dos sistemas óticos baseados em Solitons depende da solução de problemas relacionados a estabilidade do soliton na fibra [3,4].

Como foi dito acima Solitons somente existem em sistemas operando na região não linear (onde o sinal tem alto nível de intensidade). Ao se propagar numa fibra as perdas impostas pela mesma atenuam o nível do sinal e levam o sistema a operar na região linear; conseqüentemente a auto modulação de fase deixa de ocorrer. Nesse caso para manter o Soliton na fibra, é necessário que ocorra amplificação periódica do mesmo. Ao ser amplificado por AFDE's adiciona-se ruído (ASE) ao sinal o qual é uma das causas da desestabilização do Soliton na fibra. Esse efeito foi detectado inicialmente por J. P. Gordon e H. A. Haus [25].

Considerável progresso vem sendo obtido na década de 90 com relação ao entendimento e combate dos efeitos responsáveis pela degradação do Soliton na fibra advindos do ruído ASE, da interação entre solitons, etc. Assim laboratórios de pesquisa, em todo o mundo, buscam a viabilização prática e a disponibilização comercial dos enlaces ultra longos (milhares de quilômetros) sem regeneradores eletrônicos: enlaces nos quais Solitons Óticos desempenham o papel de "bits naturais" (citando L.Mollenauer).

Vários experimentos têm sido relatados sobre sistemas baseados em Solitons. Na ref. [26] L.Mollenauer e outros autores descrevem detalhes da implementação (em laboratório através de "loop" recirculante) de um enlace onde são transmitidos 10Gbit/s sobre 20.000km e (2x10Gbit/s) sobre 13.000km, ambos com BER de 10^{-9} (fibra DS).

A partir de 1995, experimentos de transmissão de Solitons em enlaces compostos com fibras Standard e fibras de compensação-DCF têm sido realizados com sucesso. Essa técnica vem sendo designada por dispersion -allocated soliton. Nesses enlaces a dispersão total permanece no regime anômalo. Na ref. [27] relata-se um experimento realizado em laboratório (loop recirculante) onde são transmitidos 10 Gbit/s sobre 10600 quilômetros de fibra Standard; o sistema opera em 1550nm.

Assim o "up grade" da enorme Rede de fibras Standard (cerca de 50.000.000 de quilômetros de fibras já instaladas, [3]), poderá vir a ser viabilizado também por essa técnica.

VII - Conclusão

O amadurecimento do projeto das novas fibras apropriadas para operação no regime não linear (fibras de grande área eficaz e de comprimento de onda de dispersão nula fora da faixa útil dos AFDE's); dos componentes para os sistemas WDM (filtros sintonizáveis, AFDE's com curvas de ganho mais planas para acomodar adequadamente maior numero de canais); de lasers DFB mais estáveis; dos esquemas de compensação da dispersão (inclusive para sistemas WDM) deverão caracterizar as próximas gerações de sistemas óticos, elevando a capacidade e o desempenho dos mesmos além dos níveis atuais.

A transmissão da informação através de Solitons continua sendo alvo de intensa pesquisa e constitui-se uma alternativa,

inclusive para ser empregada em fibras já instaladas (tipo Standard) em conjunto com fibras de compensação.

REFERÊNCIAS

- [1]- J R Carlson; Bell System Technical Journal, 1936;
- [2]- F P Kapron; Applied Physics Letters; v17, n10, (1970);
- [3]- G P Agrawal; Fiber Optics Communications Systems; 2nd Edition, Wiley Series in Microondas and Optical Engineering,1997;
- [4]- G P Agrawal; Non Linear Fiber Optics; 2nd Edition, Academic Press,1995;
- [5]- T Li; Proceedings of the IEEE; v8, n10, 1568, 1993;
- [6]- A J Santos; Journal of Lightwave Technology, v12, n10, 1739, 1994;
- [7]- M S Borella; Proceedings of the IEEE, v85, n8, 1274, 1997;
- [8]- A E. Willner, IEEE Spectrum, abril,32,1997;
- [9]- H. A. Haus; IEEE Spectrum, 48, 1993;
- [10]- D Marcuse; Journal of Optical Society America; v66, n3, 216, 1976;
- [11]- A R Chraplyvy; Journal of Lightwave Technology, v8, n10, 1548, 1990;
- [12]- K M Able; Lightwave Spacial Report; 1998;
- [13]- M J Yadlowsky; Proceedings of the IEEE, v85, n11, 1765, 1997;
- [14]- C.Lin; Optics Letters, v5, n11, 476, 1980;
- [15]- M. Onish, Electronics Letters, v30, n2, 161,1994;
- [16]- M. Onish; Sumitomo Electrical Tech Review; 39, 15, 1995;
- [17]- H. Izadpanah, Electronics Letters, v28, n15,1469, 1992;
- [18]-A. J. Antos, Journal Lightwave Technology, v30, n2, 161,1994;
- [19]- N. Kikuchi, Electronics Letters, v31, n5, 375, 1994;
- [20]- Trvaly E, Bell; IEEE Spectrum, august,56, 1990;
- [21]- A .C. Scott, Proceeding of the IEEE, v61,n10, 1443,1973;
- [22] A.Hasegawa,Applied Physics Letters, v23, n3,142,1973;
- [23]- L. Mollenauer, Physics Review Letters, v45, n13, 1095,1980;
- [24]- M R Caputo, M E Gouvêa; Revista Telebrás,18 (62), 1994 e Anais da Telexpo de 1995, São Paulo;
- [25]- L. Mollenauer, Optics & Photonics News, abril,15,1994;
- [26]- L. Mollenauer, Electronis Letters, v29, n10, 910, 1993;
- [27]-M. Yamada , Electronis Letters, v31, n3, 216, 1995;
- [28]-Y. Jianjun, Microwaves and Optical Technical Letters, v15, n2, 106, 1997;

Maria Regina Caputo é engenheira pelo INATEL- Instituto Nacional de Telecomunicações (1975). Fez Especialização em Engenharia Econômica-PUC-MG-(1981). Fez Mestrado na UFMG (1993) e está em fase de elaboração de Tese de Doutorado na UFMG (ambos com ênfase em Sistemas Óticos) . Foi professora do INATEL (1976). Trabalha há 20 anos com projeto e implantação de sistemas de telecomunicações junto à Concessionárias, Fabricantes e Empresas de Consultoria Técnica: Espirito Santo Centrais Elétricas S/A, Vitória- (1977); Italtel Società Italiana Telecomunicazione, filial brasileira, Belo Horizonte, (1979/82); Main Engenharia S/A, em São Paulo, (1983/ 85); Engevix Engenharia S/A, em Belo Horizonte, (1985/ 89). Foi membro da ABNT e do GCOI (Eletrobrás)- (1978/1981). Publicou alguns artigos técnicos em Revista e Periódicos Especializados.

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 intercambio 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.