

Projeto de Instrumentação para o Ensino – F809

Mariana Pinheiro Pasquetto – RA 002173

Henrique de Carvalho, M.Sc. Telecom (FEEC), DEQ/IFGW (orientador)

Objetivo

Este projeto tem como objetivo o desenvolvimento de um material didático de apoio ao ensino de óptica, no caso uma apostila. Mais especificamente, iremos abordar alguns princípios físicos relevantes em comunicações ópticas.

Em comunicações via fibras ópticas, certos fenômenos físicos têm influência limitante na transmissão de informações. Eles são divididos em efeitos lineares e não-lineares. Apenas os efeitos lineares serão estudados nesse projeto.

Resumo

O estudo do tema terá duas partes: a teórica e a experimental. Na primeira abordaremos os elementos teóricos referentes à dispersão cromática e sua influência em comunicações ópticas. Na segunda, usaremos o instrumento conhecido como OTDR (Optical Time Domain Reflectometer), ou Refletômetro Óptico no Domínio do Tempo, para fazer medidas de dispersão cromática, e atraso temporal do pulso em fibras monomodo. Serão mostrados os resultados das medidas e como esses parâmetros influenciam na capacidade de transmissão de informações das fibras ópticas.

História da fibra óptica

Em 1870, John Tyndall, usando um feixe de luz e um jato de água que fluía de um recipiente para outro, demonstrou que a luz propagava-se por dentro do jato a partir do princípio de reflexão interna total. Esse experimento simples marcou o início da pesquisa em transmissão guiada de luz.

Em 1880, Alexander Graham Bell desenvolveu um sistema óptico de transmissão de voz que ele chamou de fotofone (photophone). onde a luz provinha do Sol e usava o espaço livre para transmitir a voz humana numa distância de até duzentos metros. Bell acreditava que esse invento era superior ao telefone, pois não precisava de fios para conectar o transmissor ao receptor. Hoje, equipamentos com o mesmo princípio do fotofone são largamente usados em aplicações metropolitanas.

A tecnologia de fibras ópticas experimentou um fenomenal avanço na segunda metade do século XX. Os primeiros sucessos vieram com o desenvolvimento do fibroscópio, na década de 50. Esse aparelho de transmissão de imagens, que usava a primeira fibra feita apenas de vidro, foi concomitantemente construído por Brian O'Brien na American Optical Company e por Narinder Kapany (que cunhou o termo fibra óptica em 1956) e colegas no Imperial College of Science and Technology em Londres. Todas as primeiras fibras de vidro apresentavam excessiva perda óptica, que é a perda do sinal de luz conforme este viaja pela fibra, limitando as distâncias de transmissão.

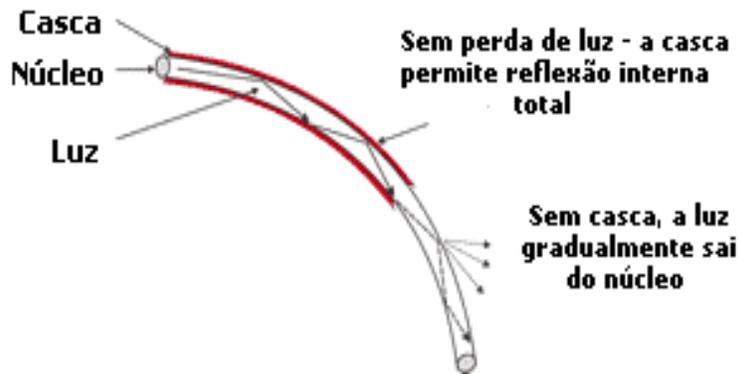


Fig 1 – Fibra óptica com casca

Isso motivou os cientistas a desenvolverem fibras de vidro com uma camada separada de revestimento de vidro. A camada mais interna da fibra, o núcleo, era usada para a transmissão da luz, enquanto a camada externa, ou casca, impedia a luz de escapar da fibra refletindo-a na fronteira do núcleo. Esse fenômeno é explicado pela Lei de Snell, que diz que o ângulo em que a luz é refletida depende do índice de refração dos dois materiais – nesse caso, o núcleo e a casca. O índice de refração da casca, menor que o do núcleo, faz com que a luz seja totalmente refletida de volta para o núcleo, como na figura 1.

O fibroscópio encontrou aplicação na inspeção de soldas em reatores e câmaras de combustão de motor de aviões, assim como no campo da medicina. Essa tecnologia evoluiu com o tempo e fez da cirurgia de laparoscopia um dos grandes avanços médicos do século.

O desenvolvimento da tecnologia de lasers foi o próximo passo no estabelecimento da indústria de fibras ópticas. Apenas o diodo laser (LD) ou o diodo emissor de luz (LED) tinham potência suficiente para gerar grandes quantidades de luz em um ponto suficientemente pequeno para ser útil às fibras ópticas. Lasers semicondutores foram conseguidos em 1962; esses lasers são os mais usados em fibras ópticas ainda hoje.

Devido à sua alta capacidade de modulação de frequência, os lasers não passaram despercebidos como meio de transmitir informações. Pensou-se na transmissão em espaço livre, contudo, as perdas envolvidas eram altas em função do comprimento de onda da época. As fibras ópticas foram então sugeridas como um possível meio de transmissão, desde que sua atenuação não passasse de 20 decibéis por quilômetro (dB/km). Na época (1966), as fibras ópticas apresentavam perdas de 1000 dB/km ou mais. Os cientistas concluíram, porém, que o problema era com as impurezas no vidro; fibras com atenuação de 20 dB/km poderiam ser construídas. Começou então a corrida para a obtenção de vidros com maior grau de pureza. Em 1970, cientistas obtiveram vidro com perdas de menos de 20 dB/km. Era o vidro mais puro já construído.

As fibras ópticas se desenvolveram ao longo dos anos numa série de gerações que podem ser intimamente ligadas ao comprimento de onda.

A figura 2 apresenta uma curva típica de atenuação espectral para fibras ópticas.

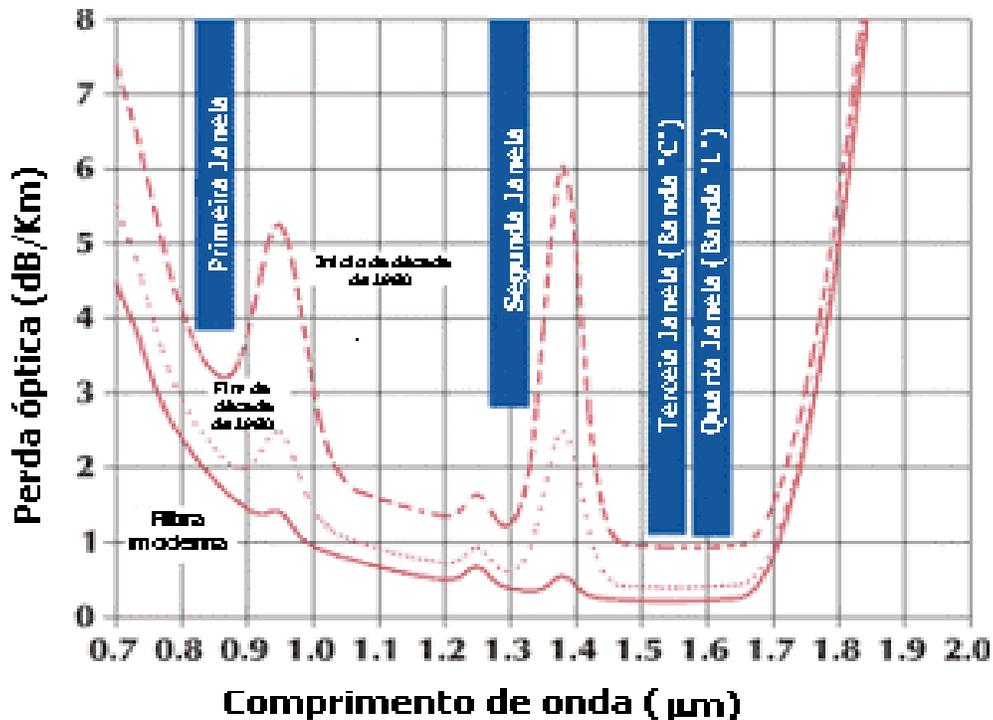


Fig 2 – Quatro janelas de transparência em fibras ópticas

A curva do alto corresponde à fibra do começo dos anos 80; a do meio, pontilhada, corresponde à fibra do fim dos anos 80; e a de baixo, sólida, corresponde às fibras ópticas modernas.

As primeiras fibras foram desenvolvidas num comprimento de onda de cerca de 850 nm, que corresponde à chamada **primeira janela**. Essa região oferece baixa perda óptica. Tal janela foi inicialmente atraente porque a tecnologia para emissores de luz já tinha sido desenvolvida nesse comprimento de onda (LEDs). Detectores de silício baratos também podiam ser usados. Com o avanço da tecnologia, essa região passou a ser menos interessante.

Muitas empresas desenvolveram novas fontes de luz para a **segunda janela**, ou seja, em 1310 nm, onde a atenuação é mais baixa (cerca de 0,5 dB/km). Em 1977, a Nippon Telegraph and Telephone (NTT) desenvolveu outras fontes para a **terceira janela**, em 1550 nm, que oferece a perda óptica teórica mínima para fibras de sílica (cerca de 0,2 dB/km).

Hoje todas as janelas são exploradas. Cada comprimento de onda tem sua vantagem. Comprimentos mais altos oferecem maior performance, mas são mais caros. Uma mais nova janela, por volta de 1625 nm, está sendo utilizada para canais de serviços em comunicações ópticas.

Apesar da janela em 1550 nm parecer ideal, onde a perda da fibra óptica é menor, outra limitação surgiu, e foi amplamente pesquisada. É o feito linear conhecido por dispersão cromática.

A dispersão era inicialmente um problema quando as primeiras fibras ópticas, de índice degrau, foram apresentadas, onde a dispersão intermodal representa um sério limitante na banda de transmissão. Fibras multimodo de índice gradual foram desenvolvidas no sentido de aumentar ainda mais a banda. Mas foram as fibras monomodo

que reduziram bastante a dispersão material na janela de 1310 nm e posteriormente na de 1550 nm.

Descreveremos agora os conceitos básicos de óptica aplicados nas fibras ópticas e em seguida os princípios da dispersão cromática.

Conceitos Básicos

A velocidade da luz em um meio com índice de refração n é igual a

$$v = \frac{c}{n}$$

em que c é a velocidade da luz no vácuo. A figura abaixo ilustra uma interface de dois meios com índices de refração diferentes.

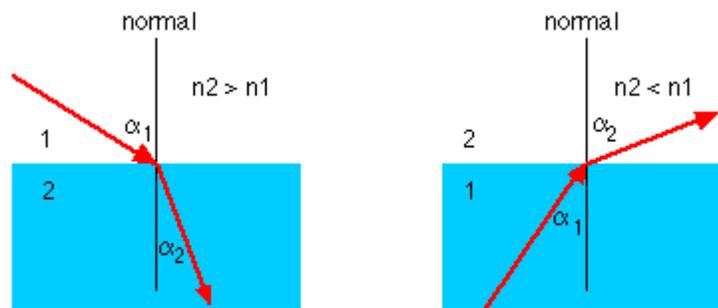


Fig. 3 - Lei da refração

Nesse caso, temos:

$$n_1 \cdot \text{sen } \alpha_1 = n_2 \cdot \text{sen } \alpha_2$$

Essa relação é chamada lei da refração ou lei de Snell (pois foi descoberta experimentalmente por Willebrord Snell em 1621). Seja então $n_1 > n_2$. Conforme aumentamos α_1 , chegaremos a um valor crítico $\alpha_1 = \alpha_c$ (ângulo crítico) para o qual

$$\alpha_2 = \frac{\pi}{2}.$$

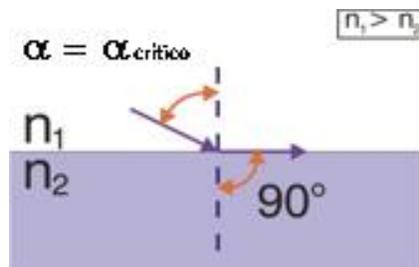


Fig 4 – Ângulo crítico

Da lei de Snell teremos então

$$n_1 \cdot \text{sen } \alpha_c = n_2$$

Para $\alpha_1 > \alpha_c$ o raio de luz é completamente refletido de volta para a região de índice n_1 . Este mecanismo é conhecido por reflexão interna total. É dessa forma que a luz é mantida confinada dentro da fibra óptica.

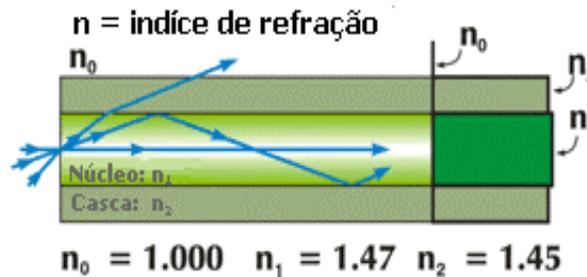


Fig. 5 – Reflexão interna total

Fibra óptica

Uma fibra óptica é um guia-de-onda dielétrico e cilíndrico, constituído de um meio de propagação chamado de núcleo (“core”), o qual está envolto pela (casca – “cladding”).

A propagação da luz se dá principalmente no núcleo. A casca, que possui um índice de refração menor que o do núcleo, tem a função de confinar a luz dentro dele. Uma fibra pode ser feita de qualquer material óptico transparente como vidro ou plástico. Suas propriedades de transmissão dependem das propriedades do núcleo e da casca.

As fibras ópticas podem ser divididas em fibras monomodo e multimodo, ou ainda em fibras de índice degrau e índice gradual. A primeira classificação se refere aos modos de propagação da luz na fibra. Cada modo é uma solução da equação de onda

$$\nabla^2 \vec{E} + n^2(\omega)k_0^2 \vec{E} = 0$$

em que \vec{E} é o campo elétrico, ω é a frequência e k_0 é o número de onda de espaço livre definido como $k_0 = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}$, e λ é o comprimento de onda no vácuo do campo óptico oscilando na frequência ω . As fibras monomodo permitem a propagação apenas do primeiro modo, conhecido como modo fundamental.



Fig 6 – Fibra monomodo

Já as fibras multimodo têm um núcleo grande o suficiente para a propagação de mais de um modo de luz.

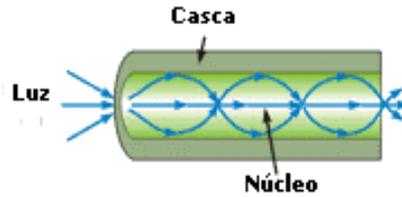


Fig 7 – Fibra multimodo

A dimensão do núcleo se situa tipicamente entre 5-15 μm para as chamadas fibras monomodos e entre 50-200 μm para as fibras multimodo. A casca tem uma espessura entre 100-400 μm .

Aplicando a lei de Snell na extremidade (interface vidro-ar) de uma fibra, temos

$$1 \cdot \text{sen } \gamma = n_1 \cdot \text{sen } \beta$$

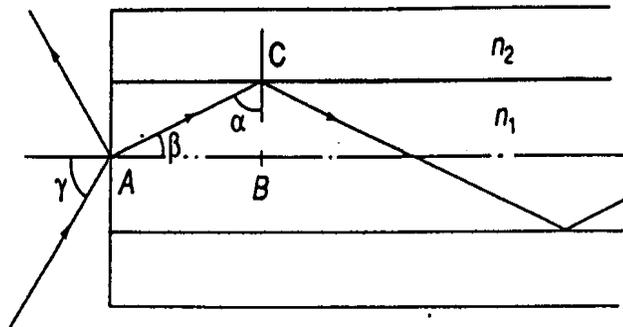


Fig. 8 - Raios meridionais em uma fibra de índice-degrau

O valor de γ para o qual $\alpha = \alpha_c$ é obtido da seguinte forma

$$\text{sen } \beta = \cos \alpha = \sqrt{1 - \text{sen}^2 \alpha}$$

$$\text{sen } \gamma_c = n_1 \cdot \sqrt{1 - \text{sen}^2 \alpha_c}$$

$$= \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = NA$$

em que NA é a abertura numérica da fibra, quantidade que representa a capacidade de recolher luz da fibra. Todos os raios com ângulos $\gamma < \gamma_c$ satisfazem a condição de reflexão interna total dentro da fibra. Para uma fibra guiar a luz, devemos ter $n_1 > n_2$.

É conveniente introduzir a quantidade

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2}$$

Na prática a diferença entre n_1 e n_2 é pequena, de maneira que

$$\Delta = \frac{(n_1 - n_2) \cdot (n_1 + n_2)}{2n_1^2} \approx \frac{(n_1 - n_2) \cdot (2n_1)}{2n_1^2} = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

Vemos que Δ é aproximadamente igual à diferença relativa dos índices. Daí

$$n_A = \text{sen } \gamma_c = n_1 \cdot \sqrt{2\Delta}$$

Para uma fibra com $n_1 = 1,5$ e $n_2 = 1,48$ temos $\Delta = 0,0132$, $n_A = 0,244$ e $\gamma_c = 14,1^\circ$.

Nas fibras de índice gradual, o índice do núcleo diminui gradativamente de seu valor máximo n_1 no centro do núcleo para seu valor mínimo n_2 na interface núcleo-casca.

A maioria das fibras de índice gradual é construída de forma que tenha um decaimento aproximadamente quadrático e são analisadas usando-se o perfil α , dado por

$$n(\rho) = \begin{cases} n_1 \left[1 - \Delta \cdot \left(\frac{\rho}{a} \right)^\alpha \right], & \rho < a \\ n_1(1 - \Delta) = n_2, & \rho \geq a \end{cases}$$

onde a é o raio do núcleo. O parâmetro α determina o perfil de índice. Uma fibra de índice parabólico corresponde a $\alpha = 2$. A figura a seguir mostra esquematicamente o caminho para dois diferentes raios dentro da fibra.

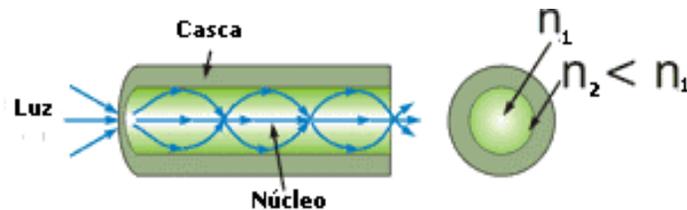


Fig. 9 - Trajetória de raios de luz em fibra de índice-gradual.

Assim como no caso de fibra de índice degrau, o caminho é mais longo para raios mais oblíquos. No entanto, a velocidade dos raios muda através do caminho devido às variações no índice de refração. O raio viajando ao longo do eixo da fibra atravessa o menor caminho, mas viaja mais lentamente, já que o índice de refração é maior nesse caminho. Raios oblíquos têm a maior parte de seus caminhos em um meio de menor índice de refração, onde eles se propagam com velocidade maior. Portanto, é possível que todos os raios cheguem juntos se escolhermos o perfil de índice adequado.

Dispersão cromática

Dispersão cromática é o fato de diferentes comprimentos de onda propagarem-se em diferentes velocidades, mesmo dentro de um mesmo modo. Dispersão cromática é a resultante da dispersão material e da dispersão de guia de onda. A dispersão material resulta

das diferentes velocidades de cada comprimento de onda devido à composição da fibra. A dispersão por guia de onda vem das diferentes velocidades da luz devido aos parâmetros geométricos cilíndricos da estrutura.

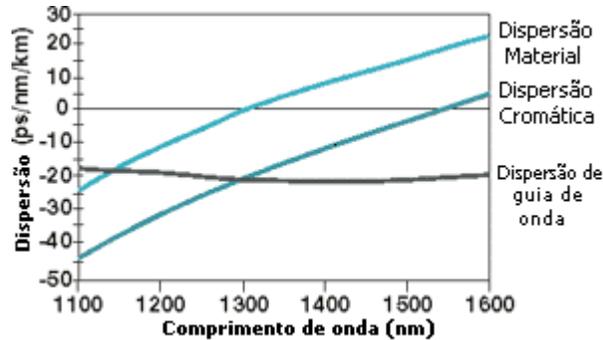


Fig 10 – Composição da dispersão cromática

A dispersão material pode ser levemente variada apenas com o uso de outros dopantes no material da fibra. Já a dispersão por guia de onda pode variar bastante dependendo do perfil do índice de refração.

A dispersão cromática (dada em ps/nm.km) limita a uma distância máxima a transmissão de um sinal óptico sem que este tenha que ser regenerado, isto é, convertido em sinal elétrico, reamplificado depois retemporizado e reformatado e convertido novamente em sinal óptico. O limite de dispersão estimado para um sinal óptico de largura de linha $\Delta\lambda$ é, então, dado por

$$L_D = 1 / (B D \Delta\lambda).$$

Para um sistema comercial diretamente modulado com taxa $B = 2,5$ Gb/s, dispersão cromática $D = 17$ ps/nm.km (fibra monomodo convencional) e largura espectral $\Delta\lambda = 0,5$ nm, o limite estimado é de 47 km.

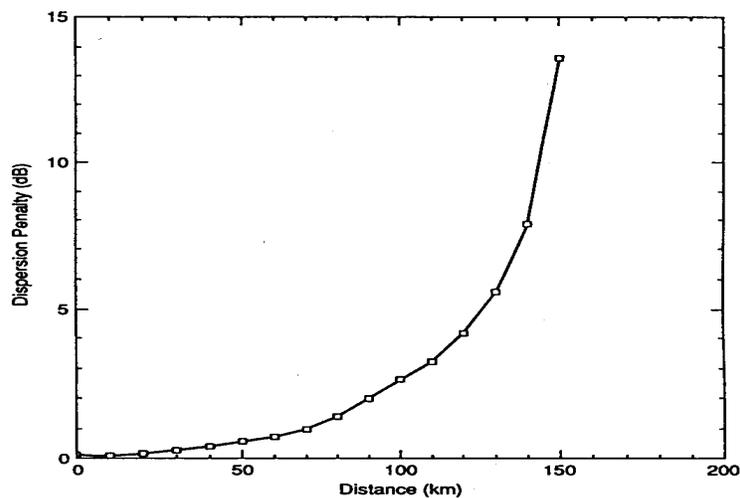


Fig. 11 - Gráfico da relação da dispersão em dB pela distância em km.

Índice de refração

Meios dispersivos são caracterizados por uma dependência com a frequência (e conseqüentemente com o comprimento de onda) do coeficiente de absorção, do índice de refração $n(\nu)$ e da velocidade da luz (velocidade de fase) $c(\nu) = c_0 / n(\nu)$.

A Fig. 12 mostra a dependência do índice de refração de alguns materiais com o comprimento de onda. A Fig. 13 ilustra a dependência do índice de refração da sílica, especificamente, com o comprimento de onda.

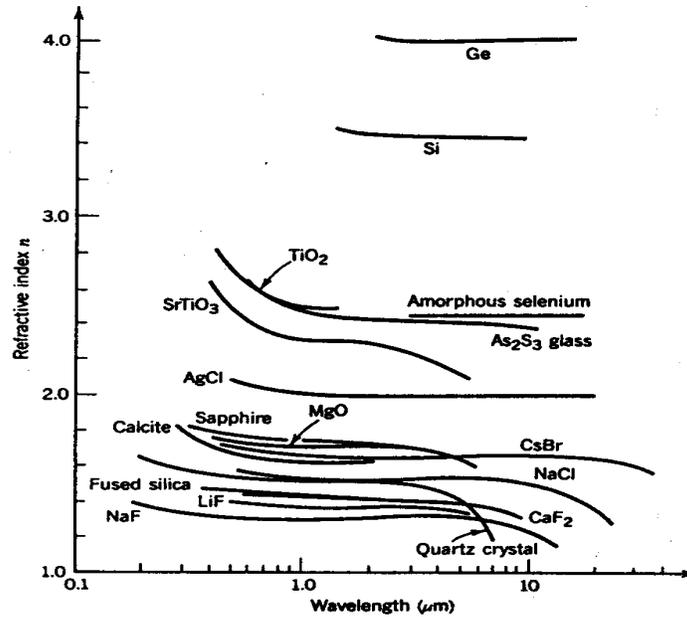


Fig. 12 - Relação do índice de refração com o comprimento de onda para materiais usados em fibras.

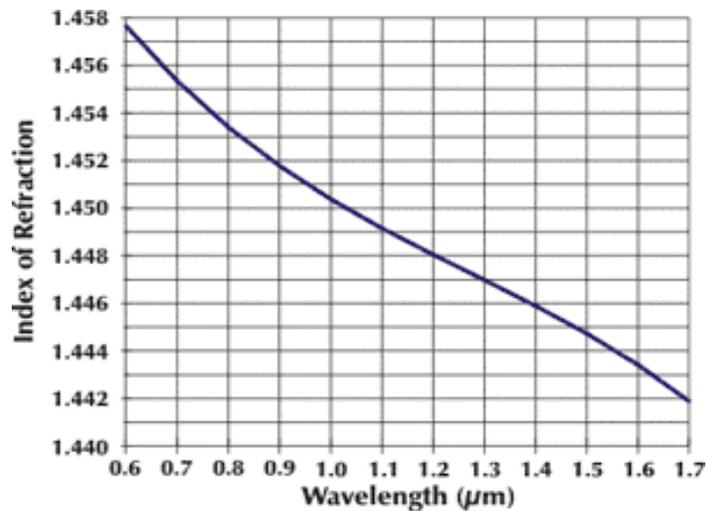


Fig 13 – Dependência do Índice de refração da sílica com o comprimento de onda

O índice de refração na fibra diminui conforme o comprimento de onda aumenta, ou seja, comprimentos de onda maiores são mais rápidos.

Largura espectral

Todo laser semiconductor tem uma faixa de comprimentos de onda ópticos (largura de linha espectral) de modo que cada componente viaje com uma velocidade diferente.

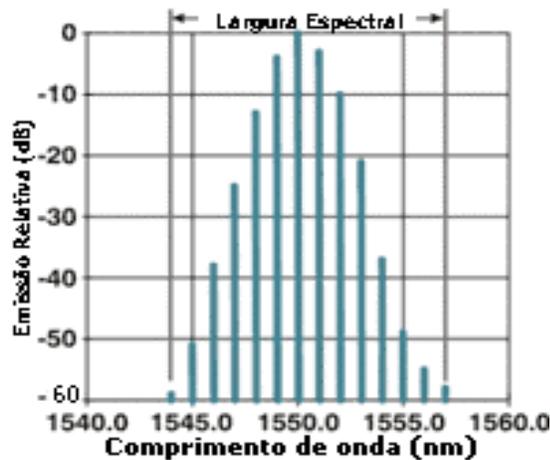
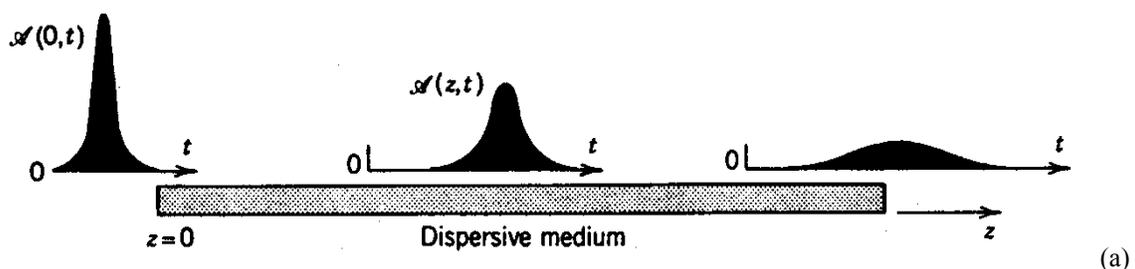


Fig 14 – Largura Espectral do Laser

Um laser semiconductor para comunicações ópticas é modulado digitalmente em amplitude (zeros e uns) e cada pulso é composto por vários comprimentos de onda, sendo que, cada um destes componentes espectrais viajarão com velocidade diferente produzindo um alargamento temporal do pulso à medida que ele se propaga ao longo da fibra. A consequência deste alargamento temporal é que quanto maior for ele tanto mais um pulso (bit) será sobreposto ao pulso (bit) seguinte, gerando desta forma o efeito chamado de Interferência Intersimbólica, cujo efeito é o de aumentar a quantidade de erros no receptor de um sistema óptico. Tais erros representam ao final uma degradação da qualidade de serviço.

A Fig. 15b mostra que os componentes da frequência alta (blue B) aparecem antes dos da frequência baixa (red R). Num meio com dispersão normal, o tempo do trajeto dos componentes de alta frequência é maior que o das componentes de baixa frequência. Numa determinada distância esses dois efeitos são balanceados levando o pulso a uma compressão mínima.



(a)

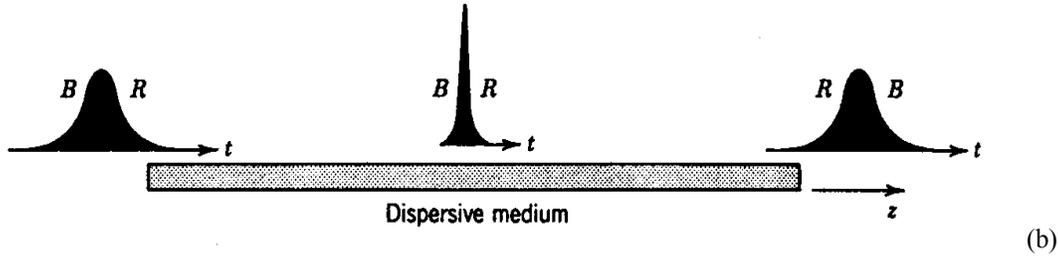


Fig. 15 - (a) Alargamento do pulso como resultado da propagação num meio dispersivo, (b) compressão e alargamento do pulso.

Assim vemos que o conhecimento e o controle da dispersão cromática em Comunicações Ópticas é de suma importância.

Outros conceitos envolvidos

Aqui consideraremos conceitos como velocidade de fase e de grupo, índice de refração de grupo e alargamento de pulso óptico e como eles se relacionam à dispersão cromática.

Consideremos uma fibra monomodo de comprimento L . Um determinado componente espectral numa frequência ω chega ao fim da fibra depois de um *atraso temporal*

$$T = \frac{L}{v_g},$$

onde v_g é a *velocidade de grupo*, definida como

$$v_g = \left(\frac{d\beta}{d\omega} \right)^{-1}$$

Usando $\beta = \bar{n}k_0 = \bar{n}\omega/c$ na equação anterior mostramos que

$$v_g = c/\bar{n}_g$$

onde \bar{n}_g é o *índice de grupo* dado por

$$\bar{n}_g = \bar{n} + \omega \left(\frac{d\bar{n}}{d\omega} \right).$$

A dependência com a frequência da velocidade de grupo leva ao alargamento do pulso simplesmente porque diferentes componentes espectrais do pulso dispersam durante a propagação e não chegam simultaneamente no fim da fibra. Se $\Delta\omega$ é a *largura espectral da fonte*, o tamanho do alargamento do pulso para uma fibra de tamanho L é dado por

$$\Delta T = L \beta_2 \Delta\omega.$$

O parâmetro $\beta_2 = d^2\beta/d\omega^2$ é conhecido como *parâmetro GVD*. Ele determina quanto um pulso óptico alarga numa propagação no interior da fibra.

Em alguns sistemas de comunicação óptica, a largura espectral da fonte $\Delta\omega$ é determinada pela variação dos comprimentos de onda λ emitidos pela fonte óptica. É costume usar $\Delta\lambda$ no lugar de $\Delta\omega$. Usando $\omega = 2\pi c/\lambda$ e $\Delta\omega = (-2\pi c/\lambda^2)\Delta\lambda$, temos que

$$\Delta T = D L \Delta\lambda \quad \text{onde} \quad D = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta^2$$

onde D é chamado *parâmetro de dispersão* e é expresso em unidades de ps/(km-nm). D pode ser escrito como a soma de dois termos

$$D = D_M + D_W$$

onde a *dispersão material* D_M e a *dispersão de guia de onda* D_W são dadas por

$$D_M = \frac{1}{c} \frac{dn_{2g}}{d\lambda}$$

$$D_W = -\frac{2\pi\Delta}{\lambda^2} \left[\frac{n_{2g}^2}{n_2\omega} \frac{Vd^2(Vb)}{dV^2} + \frac{dn_{2g}}{d\omega} \frac{d(Vb)}{dV} \right]$$

OTDR

O método comercial de maior sucesso na avaliação e manutenção das redes de fibras ópticas é o da Refletometria Óptica no Domínio do Tempo (Optical Time Domain Reflectometry, ou OTDR), o qual nos fornece resultados diretos e confiáveis de uma maneira simples. Através dessa técnica, podemos realizar medições in situ de vários parâmetros da fibra, tais como: atenuação óptica, comprimento, perdas por inserção em emendas, conectores ou por curvaturas excessivas, localização e tipo de falhas ocorridas durante a fabricação, homogeneidade das características da fibra, dispersão cromática e atraso temporal do pulso.

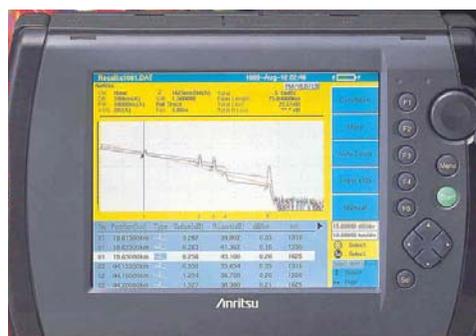


Fig 16 – Aparelho de OTDR

É essa técnica que utilizamos para estudar os conceitos de atenuação óptica e dispersão cromática (a parte de atenuação óptica foi tratada pelo aluno Lucas Monteiro Duarte) em fibras monomodo e entender como esses fenômenos influenciam a capacidade de transmissão de informação.

Princípio de operação

O aparelho de OTDR emite pulsos de luz de curta duração (entre 5 ns e 10 μ s) em uma fibra e então mede, como função do tempo após a emissão, o sinal óptico que volta ao instrumento. Conforme os pulsos ópticos se propagam ao longo da fibra, eles encontram locais de reflexão e espalhamento, resultando em uma fração do sinal sendo refletida de volta na direção oposta. Espalhamento Rayleigh e reflexão de Fresnel são as causas físicas desses comportamentos. Medindo o tempo de chegada da luz que retorna para o receptor do instrumento, pode-se determinar a localização e a magnitude das falhas e a fibra pode ser caracterizada.

O diagrama seguinte mostra o princípio das medições de dispersão cromática.

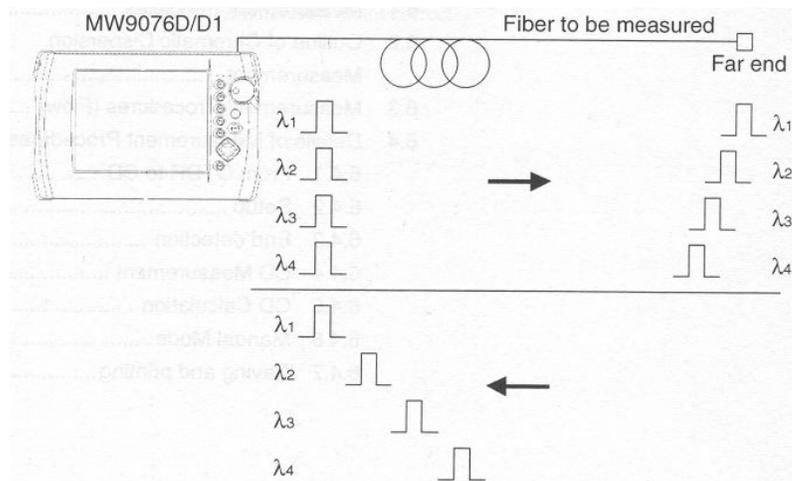


Fig. 17 – Diagrama do princípio de medida da dispersão cromática

Pulsos ópticos com diferentes comprimentos de onda são transmitidos ao longo da fibra óptica desde o OTDR até o fim da fibra e as diferenças nos tempos de chegada dos pulsos ópticos (reflexão de Fresnel) são medidas.

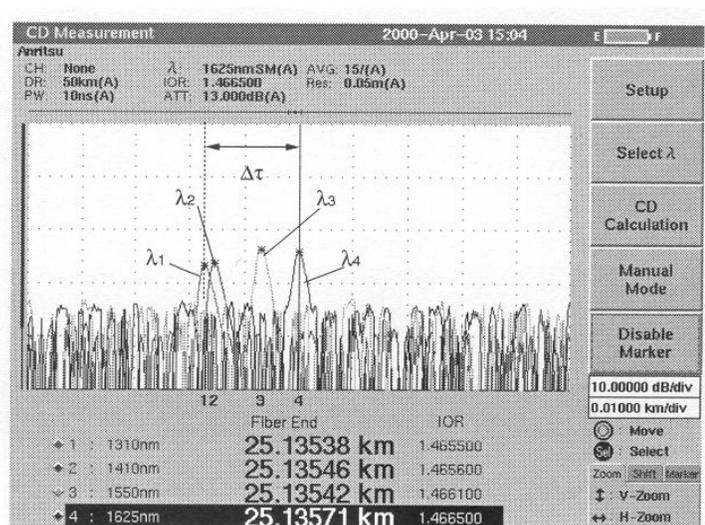


Fig. 18 – Valores medidos da reflexão de Fresnel no display do OTDR

É feito um ajuste dos valores medidos mostrados na figura 18 com as fórmulas mostradas abaixo:

Fórmulas de aproximação:

$a + b\lambda^2 + c\lambda^{-2}$...Fibra monomodo

$a\lambda^2 + b\lambda + c$...Fibra com dispersão deslocada

$a\lambda^4 + b\lambda^2 + c + d\lambda^{-2} + e\lambda^{-4}$... Qualquer fibra

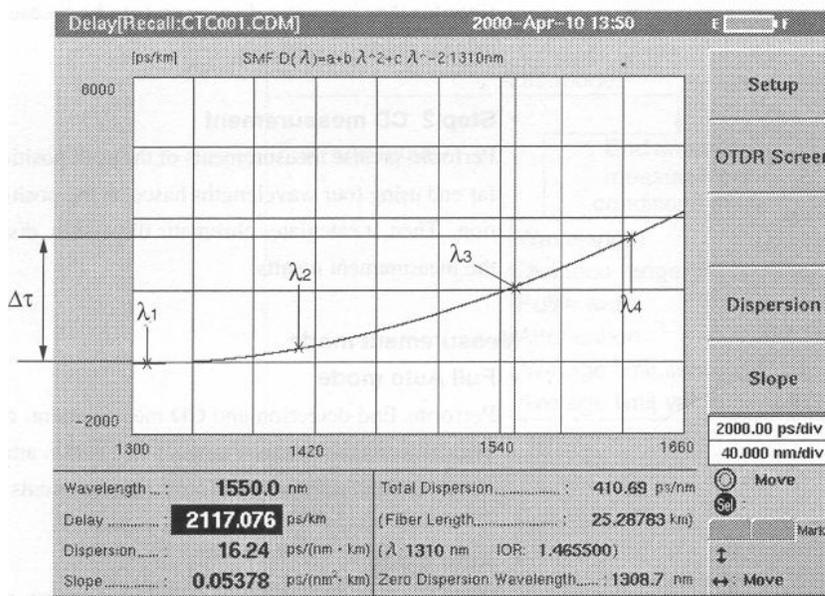


Fig. 19 – Curva ajustada no display do OTDR.

Diferenciando a curva mostrada na figura 19 pelo comprimento de onda obtêm-se, finalmente, a curva da dispersão cromática.

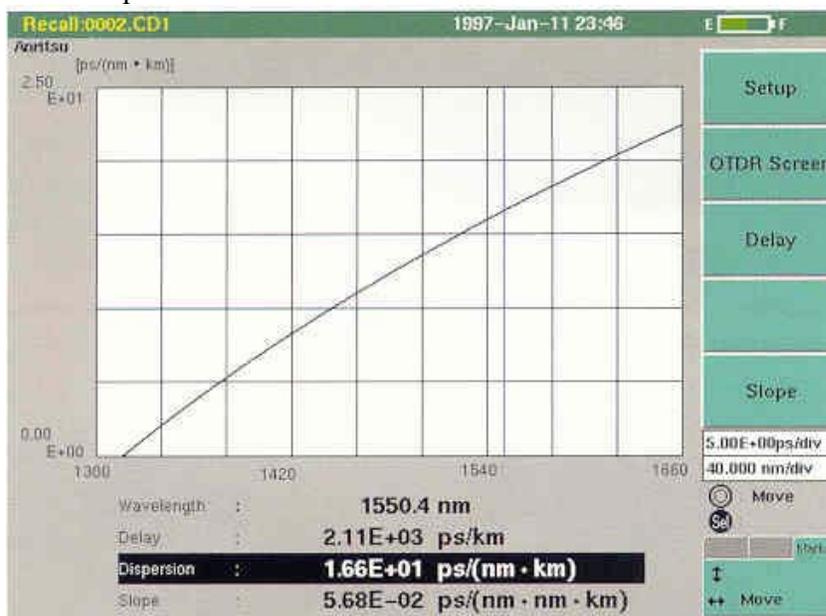


Fig 20 – Display do OTDR com a curva para uma medida de dispersão cromática

Na Fig.21 é mostrado um diagrama em bloco de um OTDR genérico:

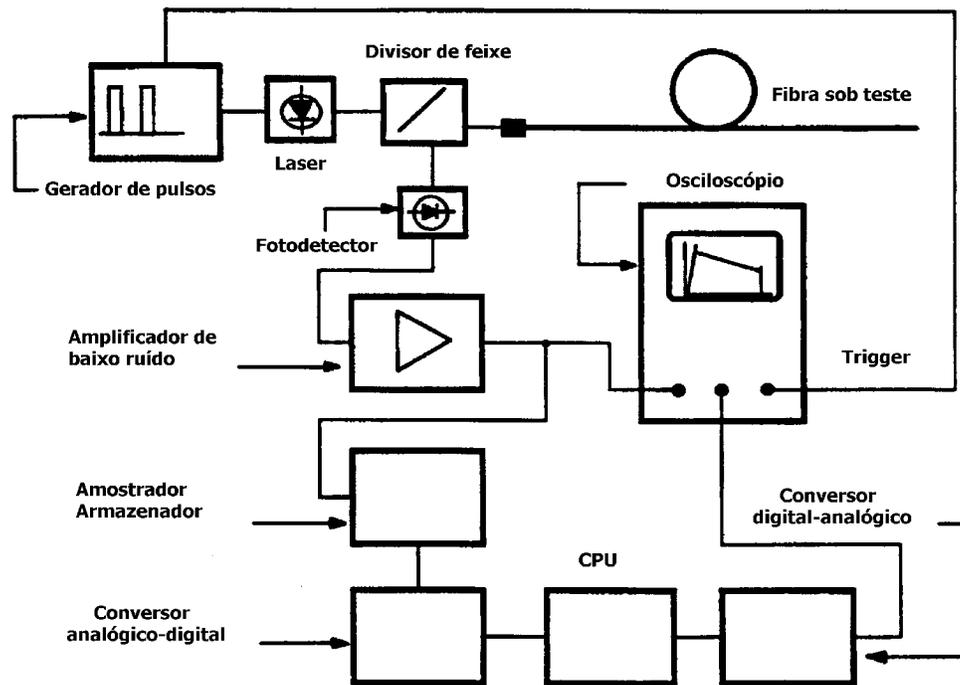


Fig. 21 - Diagrama em bloco de OTDR de pulso único

Bibliografia

1. www.fiber-optics.info;
2. AGRAWAL, Gowind, *Fiber Optic Communication System*;
3. EINARSSON, Goran, *Principles of Lightwave Communications*;
4. DERICKSON, Dennis, *Fiber Optic Test and Measurement*, 1989, HP;
5. SALEH. B. e TEICH, M., *Fundamentals of Photonics*, Ed. John Wiley;
6. KAMINOW e KOCH, *Optical Fiber Telecommunications*;
7. MAHLKE G. e GÖSSING P., *Fiber Optic Cables*, Siemens.