

Características das Fibras Ópticas

Aula 4

Prof.^a Cindy Stella Fernandes

cindy.fernandes@unifesspa.edu.br – cindy.fernandes@gmail.com

XX/XX/2022

Agenda

- Características de Transmissão das Fibras Ópticas
- Atenuação
- Espalhamento
- Perdas em curvaturas
- Atraso de grupo
- Dispersão modal, cromática e material em fibras ópticas

Atenuação

- A atenuação é o motivo pelo qual a fibra óptica ganhou a importância que tem nas telecomunicações;
- A atenuação do sinal (também designada por perda) pode ser definida como a diminuição da intensidade de energia de um sinal ao propagar-se através de um meio de transmissão;
- É um dos parâmetros mais importantes da fibra, pois determina, em grande medida, a distância máxima (alcance) que um sistema de transmissão óptico pode ter entre emissor e receptor;

Atenuação

- As perdas de transmissão de uma fibra óptica costuma ser definida em termos da relação de potência luminosa na entrada da fibra de comprimento L e a potência luminosa na sua saída

$$\alpha = 10 \log \left(\frac{P_s}{P_e} \right) \times \frac{1}{L}, [\text{dB/km}]$$

Onde: α é a atenuação sofrida na fibra (dB/km);

P_s é a potência óptica de saída (Watts);

P_e é a potência óptica de entrada (Watts);

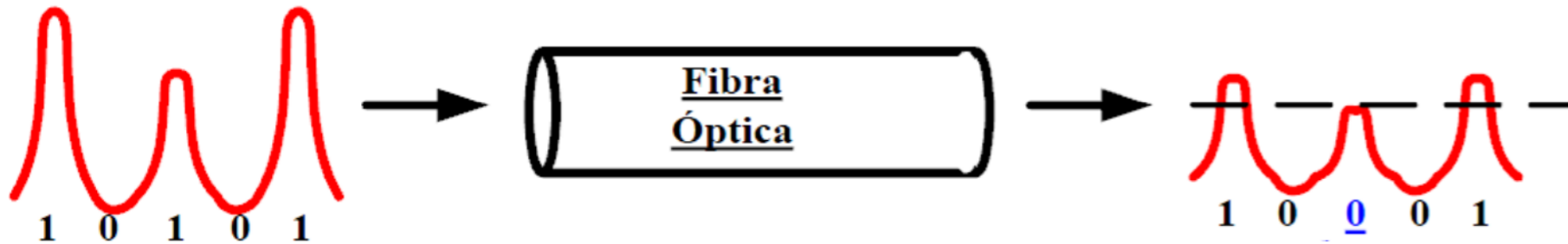
e L é o comprimento da fibra (km).

- Uma fórmula simples que relaciona a potência de entrada e a potência de saída da fibra óptica:

$$P_s = P_e 10^{-\alpha L/10}$$

Atenuação

Atenuação limita a distância



Atenuação

- Nas fibras ópticas, a atenuação varia de acordo com o comprimento de onda da luz utilizada. Essa atenuação é a soma de várias perdas ligadas ao material que é empregado na fabricação das fibras e à estrutura do guia de onda;
- Os mecanismos que provocam atenuação são:
 - Absorção
 - Espalhamento
 - Deformações mecânicas.

Atenuação

Absorção

- Como nenhum material é perfeitamente transparente, sempre ocorre uma absorção parcial de luz quando esta é forçada a atravessar um meio (absorção intrínseca - sílica absorve a luz);
- A sílica é o material mais comum utilizado na fabricação de fibras ópticas e, assim como todo material existente, não é totalmente transparente, fazendo com que ocorra uma absorção parcial da luz quando atravessa algum meio. Logo, ocorre uma perda de potência na luz transmitida.
- Como nenhum processo fabril é 100% puro, podem ocorrer absorções de impurezas durante a obtenção da fibra óptica. Além da absorção do material que compõe seu núcleo, pode haver variações de densidade, imperfeições na fabricação (absorção por defeitos estruturais) e esta absorção de impureza é chamada de absorção extrínseca (evitar pico de água e outras impurezas).

Atenuação

Absorção

- Os tipos básicos de absorção são
 - absorção material;
 - e absorção do ion OH^-

Atenuação

Absorção Material

- É o mecanismo de atenuação que exprime a dissipação de parte da energia transmitida numa fibra óptica em forma de calor. Ou seja, quando a energia transmitida pela fibra óptica, vibra em uma frequência, parecida com a frequência natural de vibração do material que compõem a fibra, com isso ocorre dissipação de parte da energia em forma de calor;
- Fatores intrínsecos e extrínsecos a fabricação da fibra;
- Como fatores intrínsecos, temos a absorção do ultravioleta, a qual cresce exponencialmente no sentido do ultravioleta, e a absorção do infravermelho, provocada pela sua vibração e rotação dos átomos em torno da sua posição de equilíbrio, a qual cresce exponencialmente no sentido do infravermelho.

Atenuação

Absorção do ion OH-

Diversas impurezas podem contaminar uma fibra. O principal motivo de atenuações em alguns tipos de fibra é a contaminação por íons metálicos, que pode gerar perdas superiores a 1 dB/km, mas que atualmente já é controlada através de tecnologias utilizadas na fabricação de semicondutores.

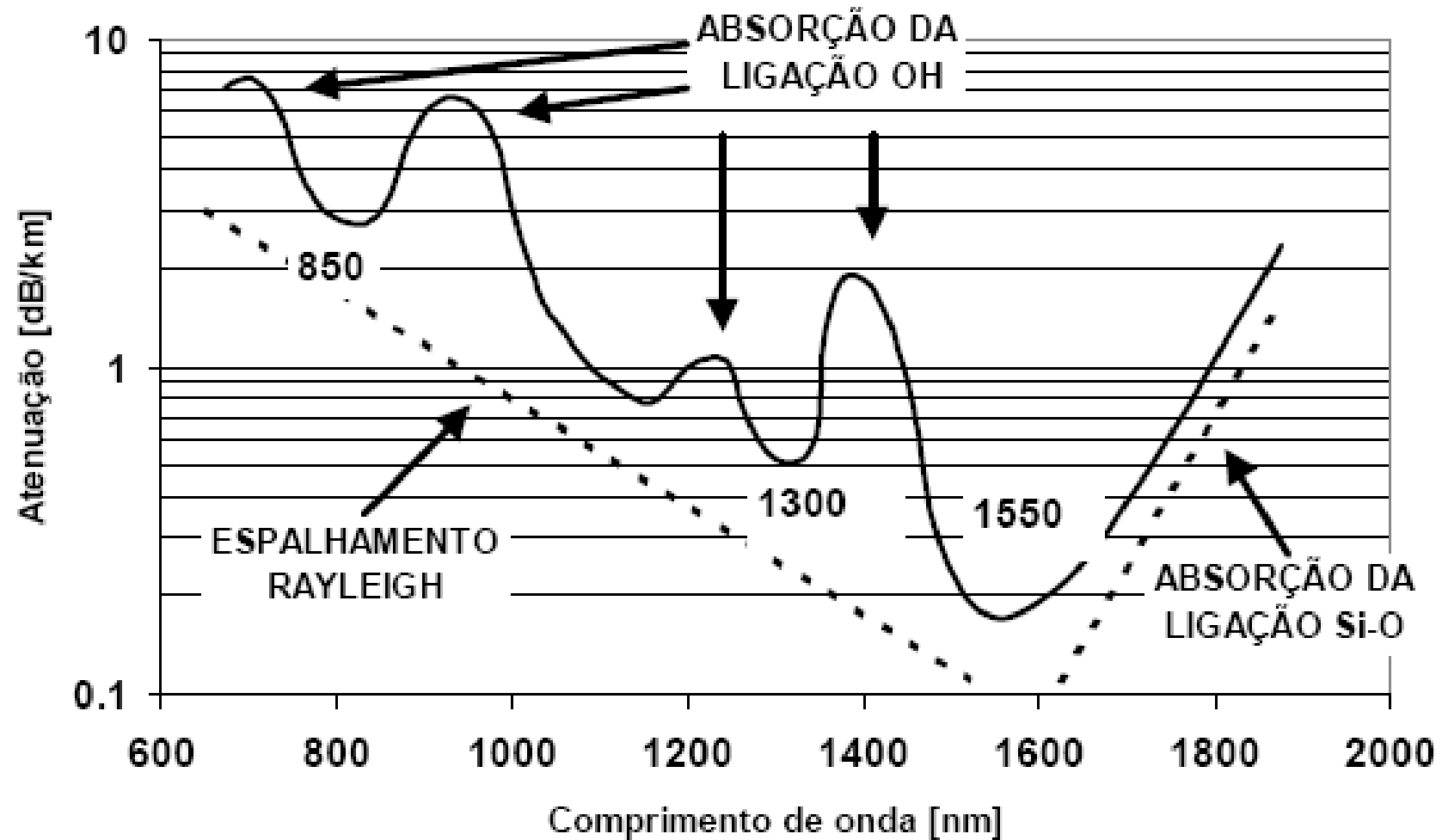
Os íons metálicos porventura presentes na fibra (Mn, Ni, Cr, U, Co, Fe e Cu), devido ao seu tamanho, provocam picos de absorção em determinados comprimentos de onda exigindo grande purificação dos materiais que compõem a estrutura da fibra óptica;

Pela contaminação por íons hidroxila (OH⁻), causada por água dissolvida no vidro (também chamada de atenuação por pico de água, Water Peak Attenuation, WPA). Esse íon é comumente chamado de água e é incorporado ao núcleo durante o processo de produção. É muito difícil de ser eliminado.

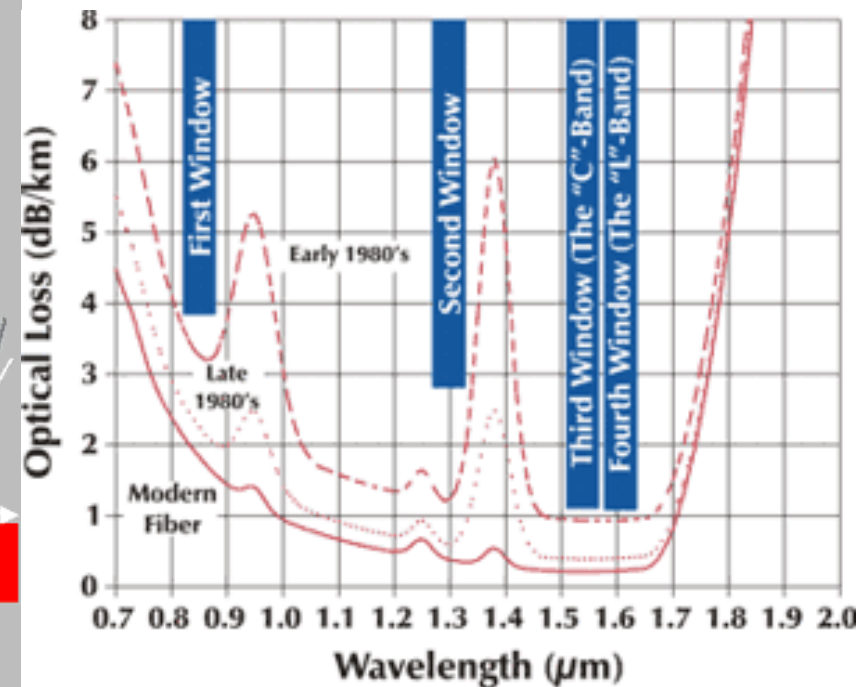
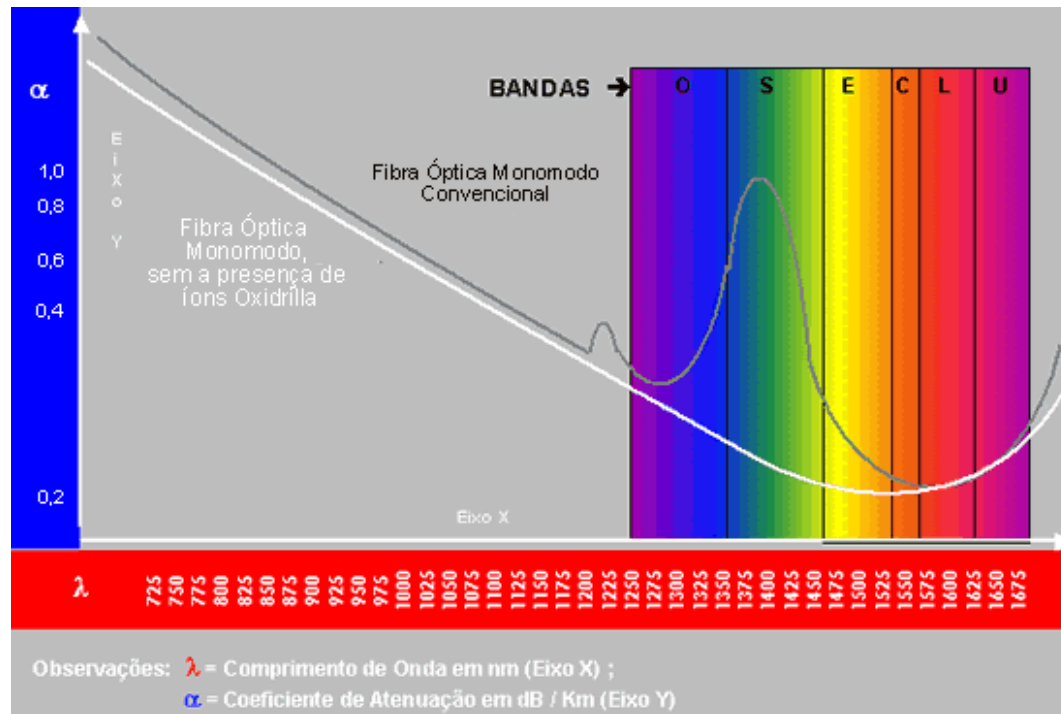
Relevante nas tecnologias pioneiras de fibra óptica, definiu-se intervalos de frequências onde essa atenuação era mínima, as chamadas janelas ópticas ou janelas de transmissão. As janelas ópticas são as regiões onde não há picos de atenuação devido ao íon OH⁻.

A absorção do OH⁻ (hidroxila) provoca atenuação fundamentalmente no comprimento de onda de 2700 nm e em sobre tons (harmônicos) em torno de 950 nm, 1240 nm e 1380 nm na faixa de baixa atenuação da fibra.

ATENUAÇÃO DA FIBRA ÓPTICA



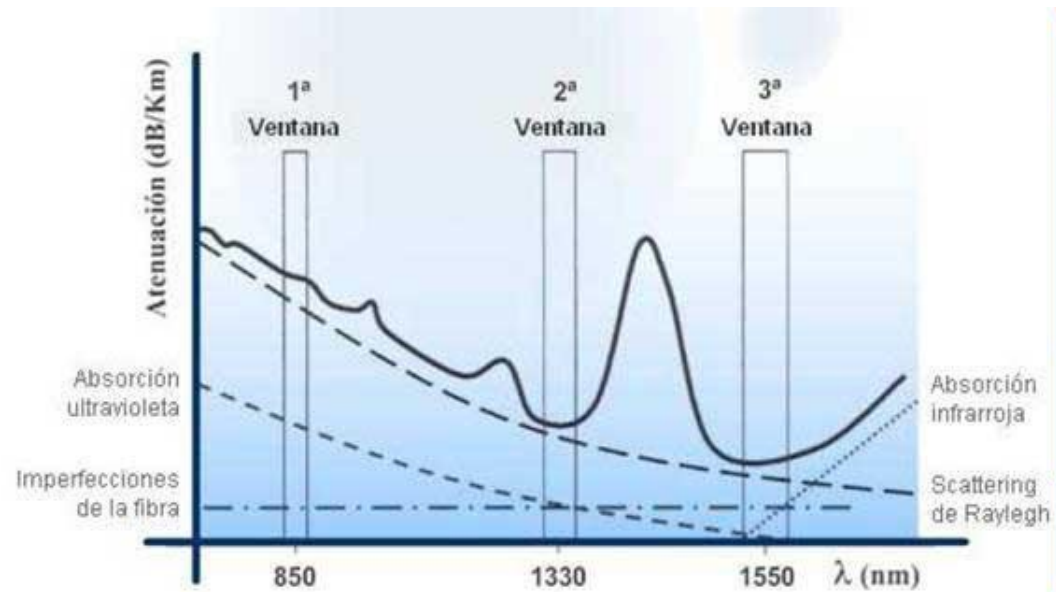
Atenuação



Atenuação

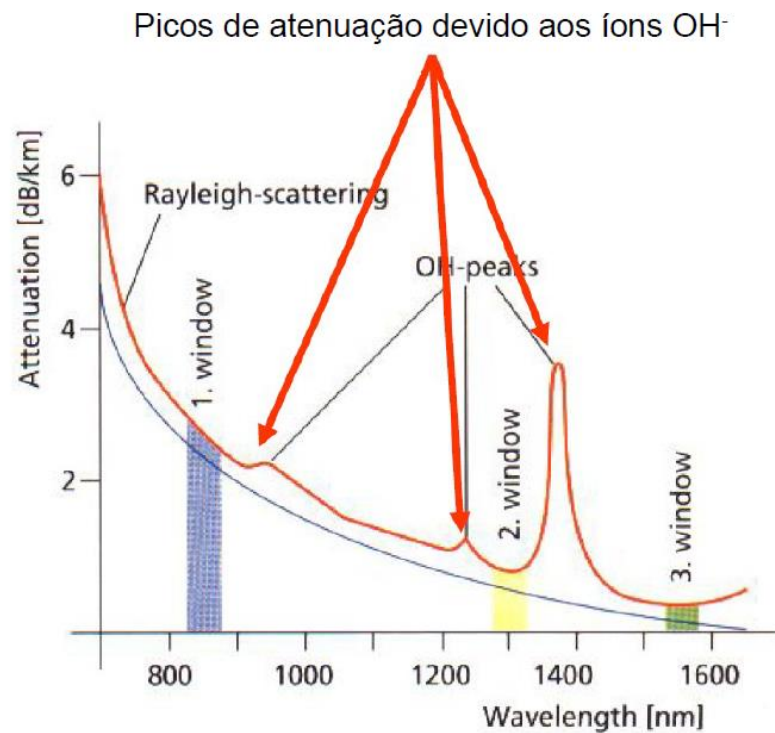
- Existem 3 janelas ópticas, ao redor de 850nm, 1300nm e 1550nm, sendo que a última foi subdividida em duas menores (Banda C e Banda L) visando o melhor aproveitamento dessa região de baixas atenuações.
- A primeira é utilizada para sistemas a curta distância, de baixo custo e utilizando fontes e detectores simples.
- A segunda, por sua vez, permite enormes capacidades de transmissão, sendo utilizada geralmente pelas fibras comerciais.
- Finalmente, a terceira é utilizada por fibras de sílica, por constituir uma região de atenuação mínima para esse material. Nessa janela já se fabricam fibras monomodo de atenuações da ordem de 0,2dB/km, o que já é praticamente o limite teórico para tal comprimento de onda.

Atenuação

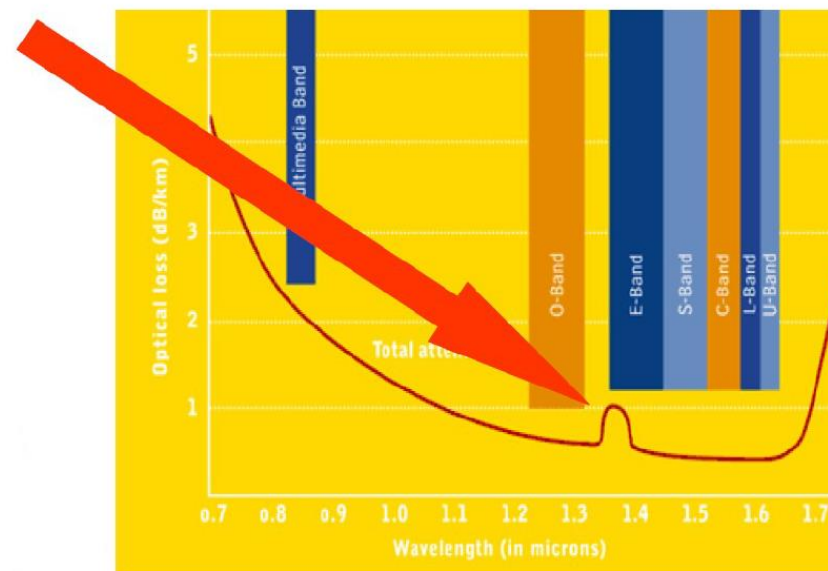


Longitud de onda	Tipo de Fibra (núcleo/revestimiento)	distancia máxima
850 nm	100/140 μm 85/125 μm 62.5/125 μm 50/125 μm	multimodo
1330 nm	50/125 μm	monomodo
	9/125 μm	
1550 nm	9/125 μm	monomodo

Atenuação



Com a evolução
na técnica de
fabricação os
picos diminuíram



Atenuação

Tabela 1 – Para o comprimento de onda 1310nm

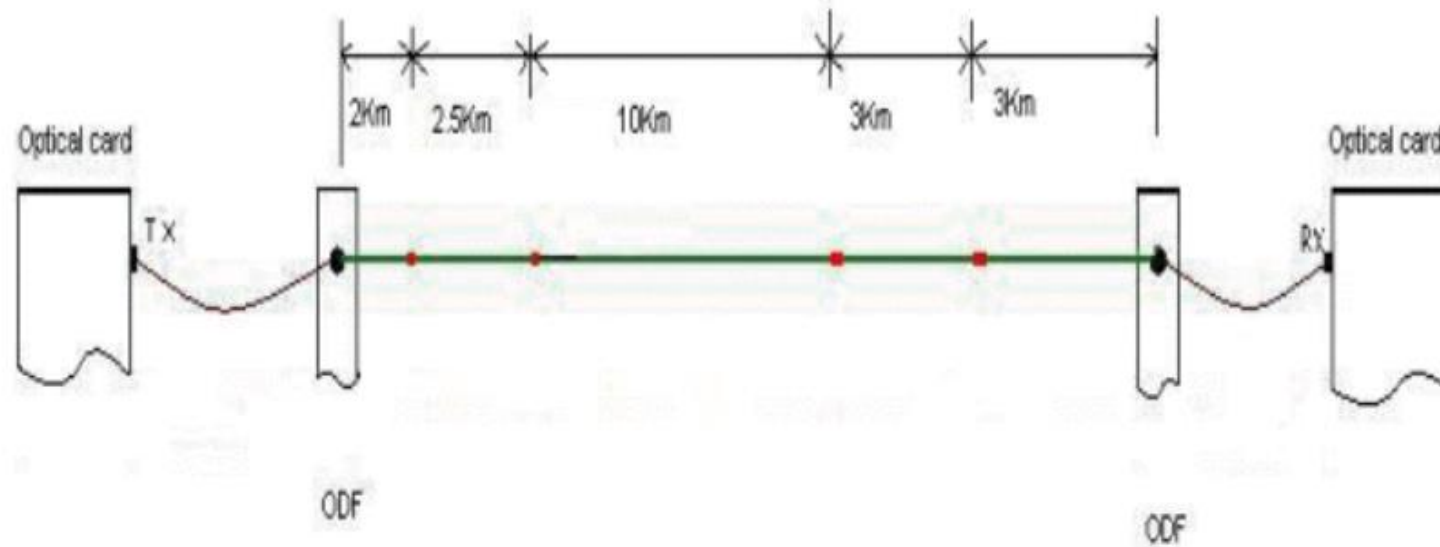
	Atenuação quilômetro (dB/km)	Atenuação/conector ótico (DB)	Atenuação/junção (DB)	
Min	0.3	0.4	0.02	As melhores circunstâncias
Média	0.38	0.6	0.1	Normal
Max	0.5	1	0.2	Pior situação

Tabela 2 – Para o comprimento de onda 1550nm

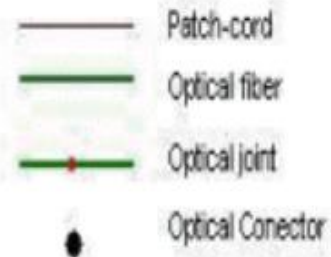
	Atenuação quilômetro (dB/km)	Atenuação/conector ótico (DB)	Atenuação/junção (DB)	
Min	0.17	0.2	0.01	As melhores circunstâncias
Média	0.22	0.35	0.05	Normal
Max	0.4	0.7	0.1	Pior situação

Atenuação

Está aqui um exemplo de uma situação típica no campo:



Calcule a atenuação no link ótico



Você pode agora calcular a atenuação para este link. Você pode chegar na atenuação total (TA) de uma seção de cabo elementar como

$$TA = n \times C + c \times J + L \times a + M$$

em que:

- n — número de conectores
- C — atenuação para um conector ótico (dB)
- c — número de talas na seção de cabo elementar
- J — atenuação para uma tala (dB)
- M — margem de sistema (os fios de correção, inclinação de cabo, eventos de atenuação ótica imprevisíveis, e assim por diante, devem ser considerados em torno de 3dB)
- a — atenuação para o cabo ótico (dB/km)
- L — comprimento total do cabo ótico

Quando você aplica esta fórmula ao exemplo, e supõe determinados valores para as placas ótica, você obtém estes resultados:

Para o comprimento de onda 1310nm: Normal

$$\text{TA} = n \times C + c \times J + L \times a + M = 2 \times 0.6\text{dB} + 4 \times 0.1\text{dB} + 20.5\text{Km} \times 0.38\text{dB/Km} + 3\text{dB} = 12.39\text{dB}$$

Para o comprimento de onda 1310nm: Pior situação

$$\text{C TA} = n \times C + c \times J + L \times a + M = 2 \times 1\text{dB} + 4 \times 0.2\text{dB} + 20.5\text{Km} \times 0.5\text{dB/Km} + 3\text{dB} = 16.05\text{dB}$$

Para o comprimento de onda 1550nm: Normal

$$\text{TA} = n \times C + c \times J + L \times a + M = 2 \times 0.35\text{dB} + 4 \times 0.05\text{dB} + 20.5\text{Km} \times 0.22\text{dB/Km} + 3\text{dB} = 8.41\text{dB}$$

Para o comprimento de onda 1550nm: Pior situação

$$\text{C TA} = n \times C + c \times J + L \times a + M = 2 \times 0.7\text{dB} + 4 \times 0.1\text{dB} + 20.5\text{Km} \times 0.4\text{dB/Km} + 3\text{dB} = 13\text{dB}$$

Supõe que a placa ótica tem estas especificações:

Tx = - 3 dB a 0dB a 1310nm

Rx = -20 dB to -27 dB a 1310 nm

Neste caso, o orçamento de potência está entre 27dB e 17dB.

Se você considera o cartão o mais ruim, que tem o orçamento de potência em 17dB em 1310nm, e a pior situação para que o link ótico seja 16.05dB em 1310nm, você pode calcular que seu link ótico trabalhará sem nenhum problema. Em ordem para ter certeza disto, você deve medir o link.

Espalhamento

- Espalhamento é o fenômeno de transferência de potência de um dos modos guiados pela guia para si mesmo ou para outros modos. Há diversos tipos de espalhamentos, lineares e não lineares.
- A luz escapa do núcleo e vai para casca
- As perdas por espalhamento incluem reduções na amplitude do campo guiado por mudanças na direção de propagação, causadas pelo próprio material e por imperfeições no núcleo da fibra. Ou seja, ocorre o desvio da luz em várias direções;
- O espalhamento linear refere-se a transferência de uma parcela da luz de um modo de propagação para outros modos, quando a quantidade de energia transferida for diretamente proporcional a potencia da luz guiada;

Espalhamento

- A figura abaixo representa este fenômeno, sendo que as linhas: azul, laranja, rosa e roxo representam os vários modos e direções de propagação da luz no interior das fibras



Espalhamento

Os espalhamentos mais conhecidos são:

Rayleigh: Causado por variações na densidade do material da fibra, provenientes do processo de fabricação. Outros espalhamentos são causados por imperfeições na estrutura cilíndrica da fibra.

Esse é o espalhamento da luz na casca da fibra (parte verde indicada na figura acima).

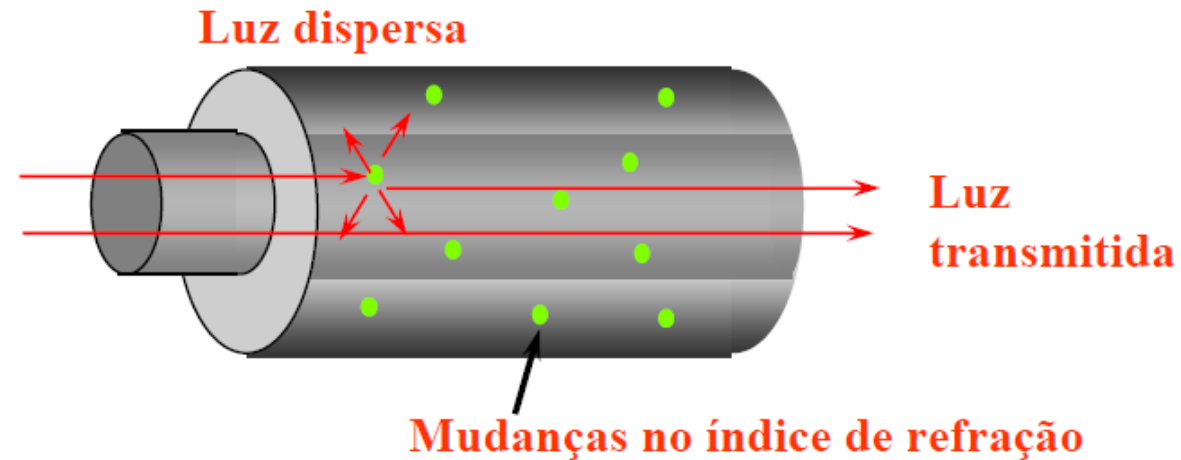
Raman: Ocorre quando a potência do sinal luminoso irradiado na fibra óptica excita os seus elementos constituintes, fazendo com que comecem a vibrar, alterando o modo de propagação da luz.

Mesmo motivo de o céu ser azul – pois a luz do sol excita as moléculas de nitrogênio da atmosfera, o que emite a cor azul.

Espalhamento

O espalhamento e causado por:

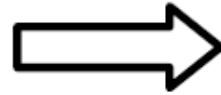
- Flutuações térmicas;
- Variações de pressão;
- Pequenas bolhas;
- Variação no perfil de índice de refração;



Espalhamento

➤ Espalhamento de *Rayleigh*

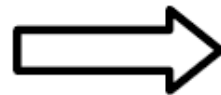
➤ Espalhamento de Mie



**Espalhamentos
lineares**

➤ Espalhamento estimulado
de *Brillouin*

➤ Espalhamento estimulado
de Raman

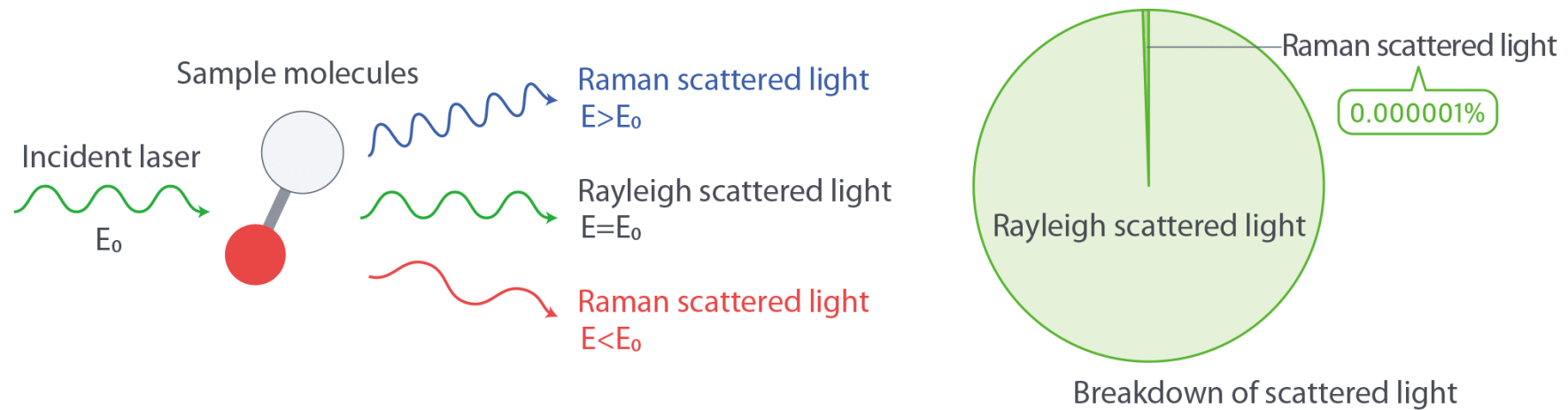


**Espalhamentos
não-lineares**

Espalhamento

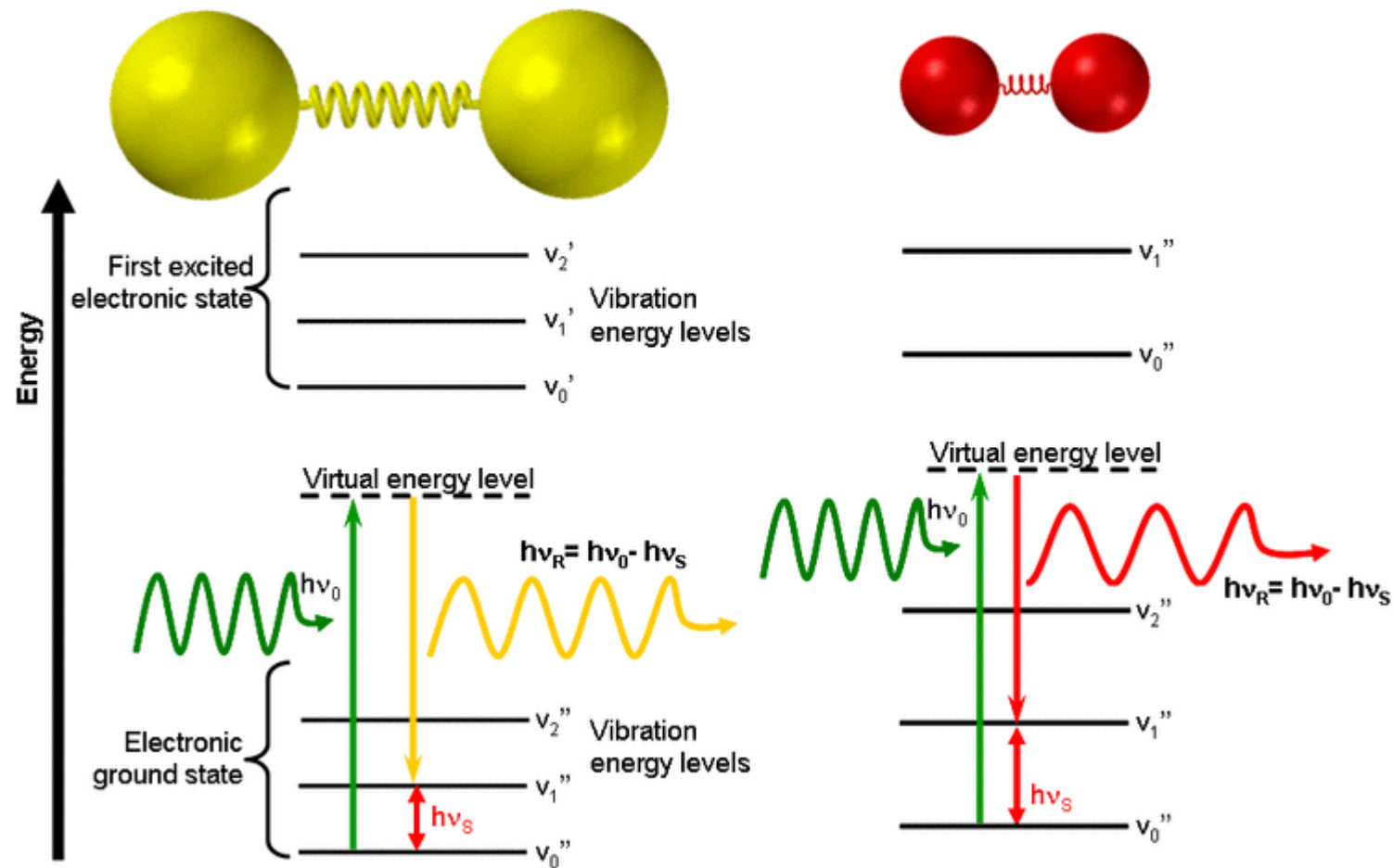
- O espalhamento de Mie pode ser observado quando as irregularidades da fibra tem dimensões comparáveis ao comprimento de onda da luz guiada. Ou seja, quando são superiores a 10% do comprimento de onda do feixe óptico;
- As irregularidades neste caso são: bolhas, minúsculos defeitos na interface do núcleo com a casca, variações no diâmetro da fibra, sinuosidades no eixo conhecidas como microcurvaturas.
- No espalhamento estimulado de Brillouin ocorre uma modulação da luz causada pelas vibrações. Sendo que o máximo de desvio da frequência ocorre no sentido oposto ao originalmente estabelecido na fibra. Portanto, este espalhamento é um fenômeno que excita uma onda retrograda no núcleo. É possível percebê-lo quando a potência guiada ultrapassa alguns miliwatts;

Espalhamento



Espalhamento

Raman scattering: simple molecules



Raman-shift $\nu_S = f$ (bonding force; molecular weight)

Perdas por Deformações Mecânicas (curvaturas) na Fibra

Perdas causadas por deformações mecânicas podem ser resultantes de dois tipos:

- Microcurvaturas
- Macrocurvaturas.

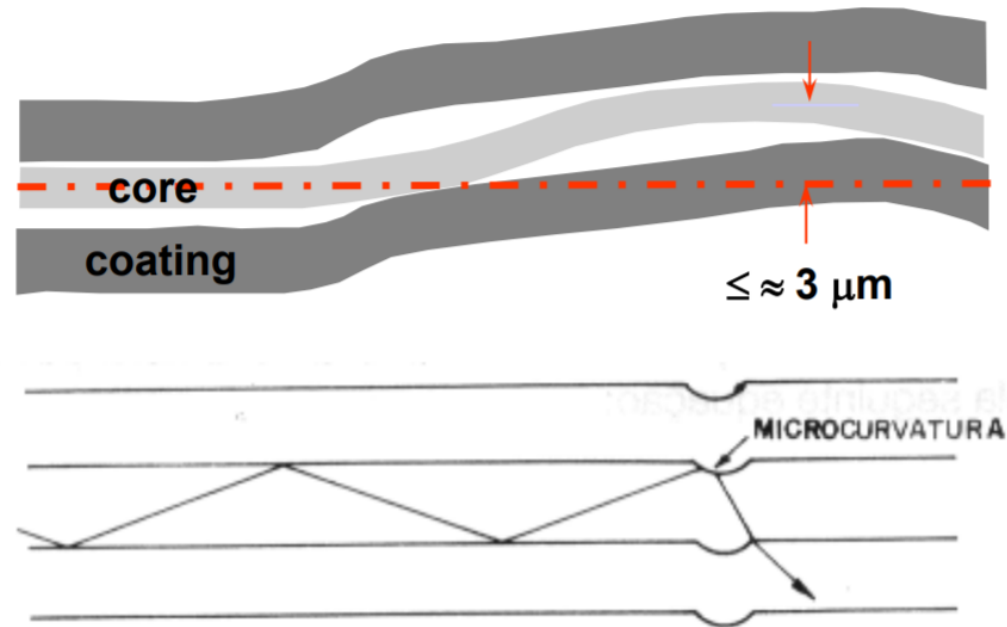
Perdas por Microcurvaturas

E uma pequena deformação na fronteira entre o núcleo e a casca e pode ser provocado por qualquer força transversalmente aplicada na superfície da fibra - extraem parte da energia devidos aos modos de alta ordem tornam-se não guiados

Exemplo

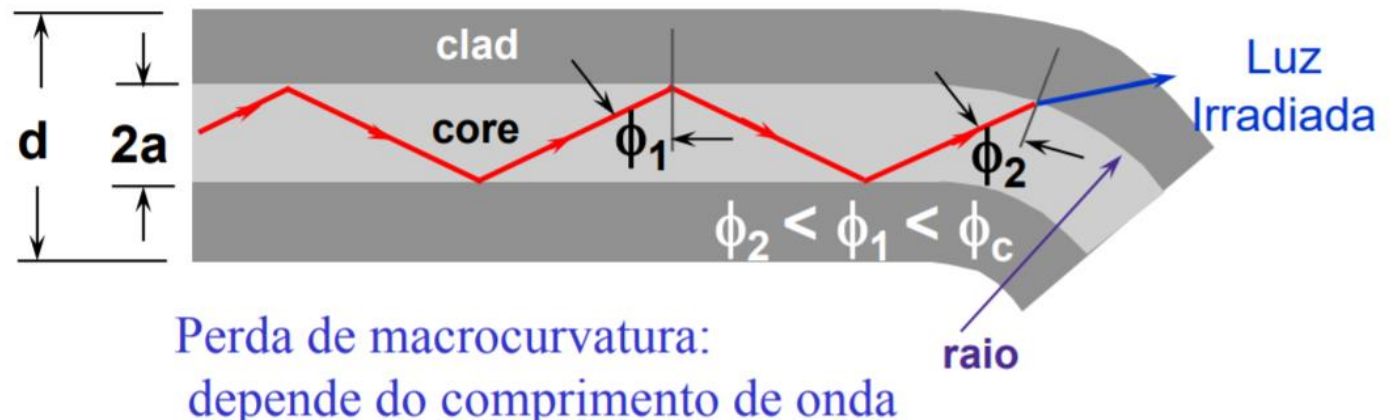
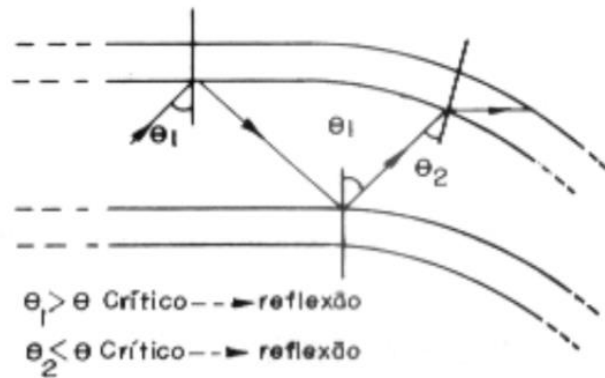


núcleo e
casca

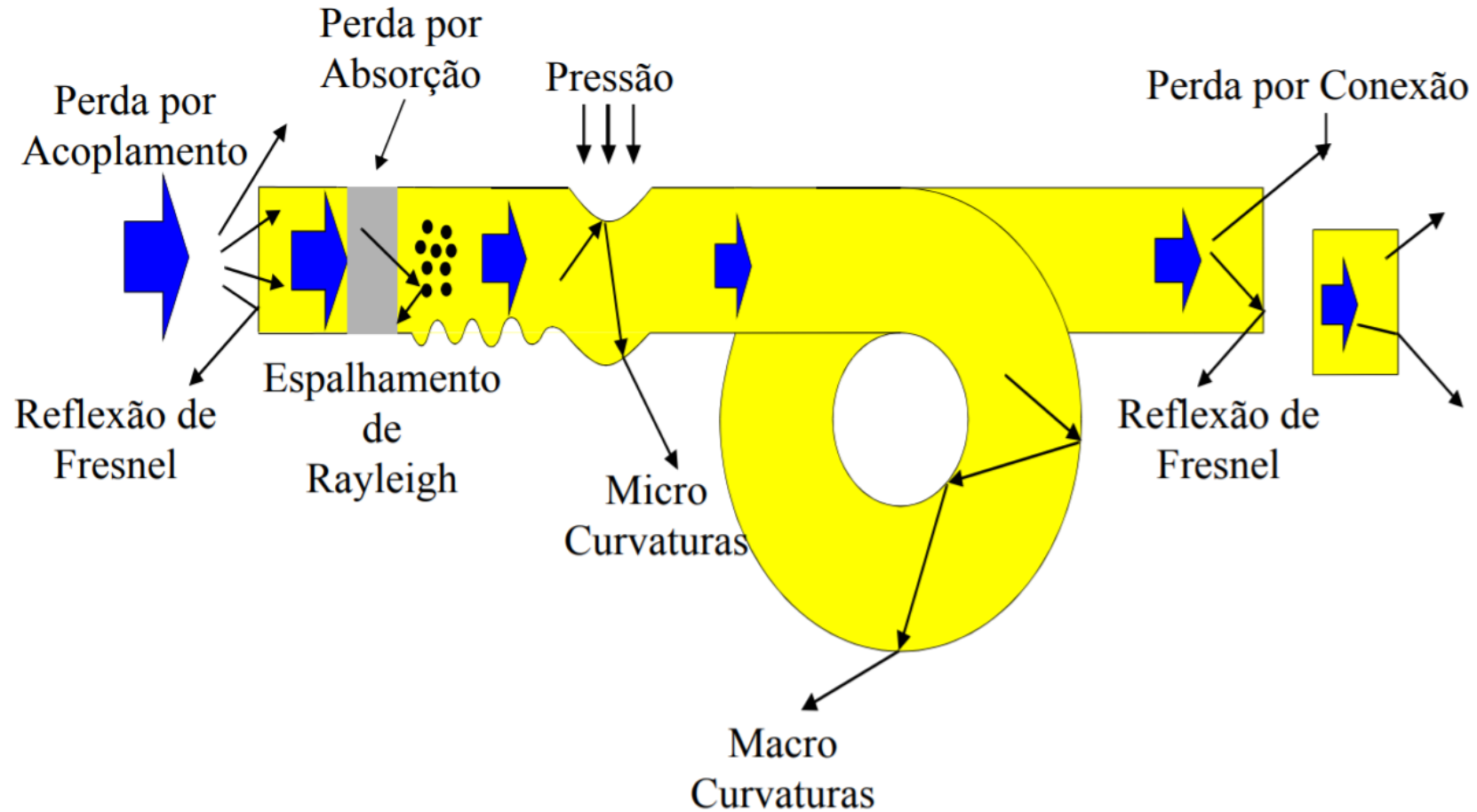


Perdas por Macrocurvaturas

A ocorrência da perda é dada quando os modos próximos ao ângulo crítico (alta ordem) ultrapassam esse valor, em função da curvatura, e deixam de ser refletidos internamente, passando a ser refratados.



Resumo dos tipos de atenuações mais frequentes de uma fibra



Dispersão

- A performance da fibra óptica é um dos principais fatores limitantes da capacidade das redes de comunicação por fibra óptica.
- A dispersão é um dos principais fenômenos que afeta a performance dessas redes.
 - Fenômeno associado com a transmissão da luz na fibra e em componentes ópticos.
 - Interação das propriedades da luz com as propriedades do material (IOR).
- Em comunicações digitais, a dispersão causa o espalhamento temporal do pulso óptico a medida que a onda se propaga na fibra.

Efeitos da Dispersão

O efeito é o alargamento do pulso luminoso que viaja ao longo da fibra óptica e esse alargamento limita a banda passante e consequentemente, a capacidade de transmissão de informação na fibra

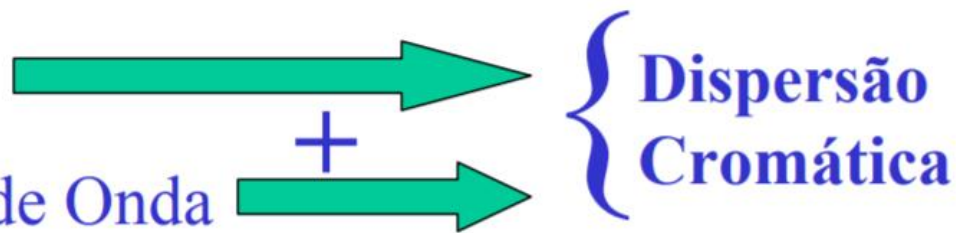
Existem quatro mecanismos básicos da dispersão em fibras ópticas que causam este alargamento, porém, com implicações distintas segundo o tipo de fibra.

➤ Dispersão Modal

➤ Dispersão Material

➤ Dispersão do Guia de Onda

➤ Dispersão por Modo de Polarização (PMD)



Tipos de Dispersão

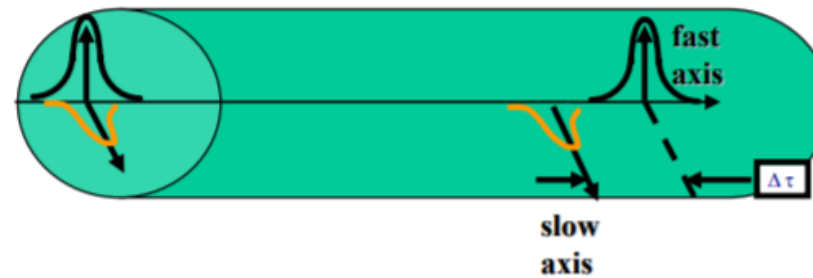
Modal



Cromática



Polarização

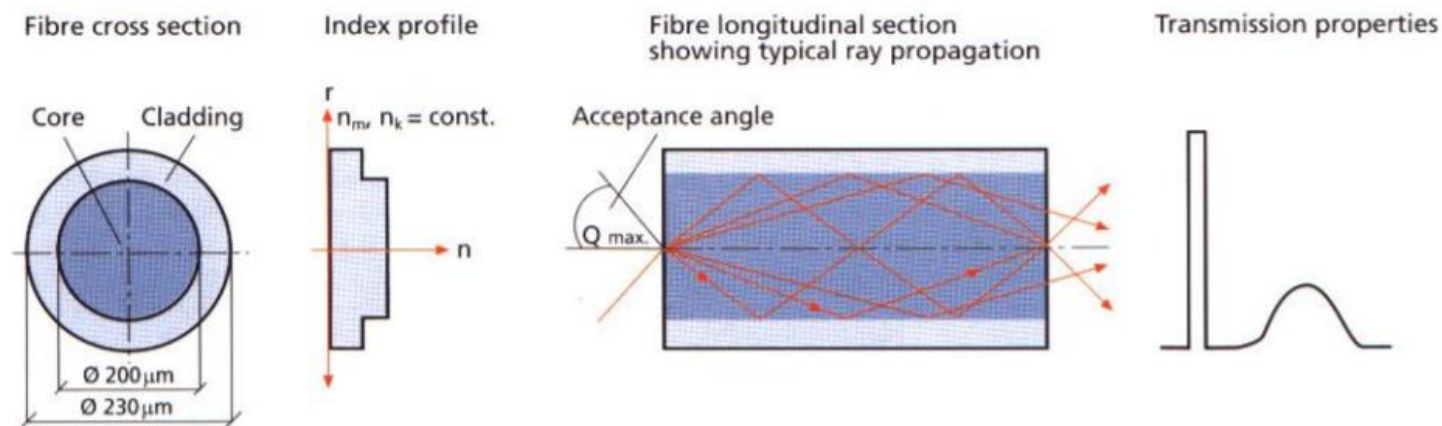


Dispersão Modal

Característico de Fibras Multimodo provocado pelos vários caminhos de propagação possíveis (modos de alta ordem demoram mais para sair da fibra)

Dispersão na Fibra Multimodo ID

Fig.(a)

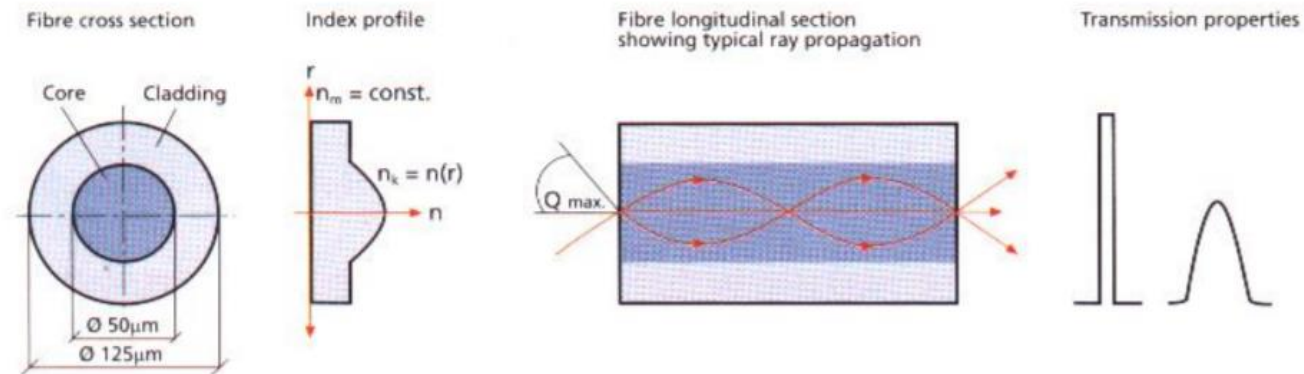


Dispersão Modal

A variação gradual do índice de refração do núcleo, nesse tipo de fibra, permite uma compensação da velocidade de propagação dos raios (modos) cujas as trajetórias são mais longas

Dispersão na Fibra Multimodo IG

Fig.(b)



Dispersão Cromática

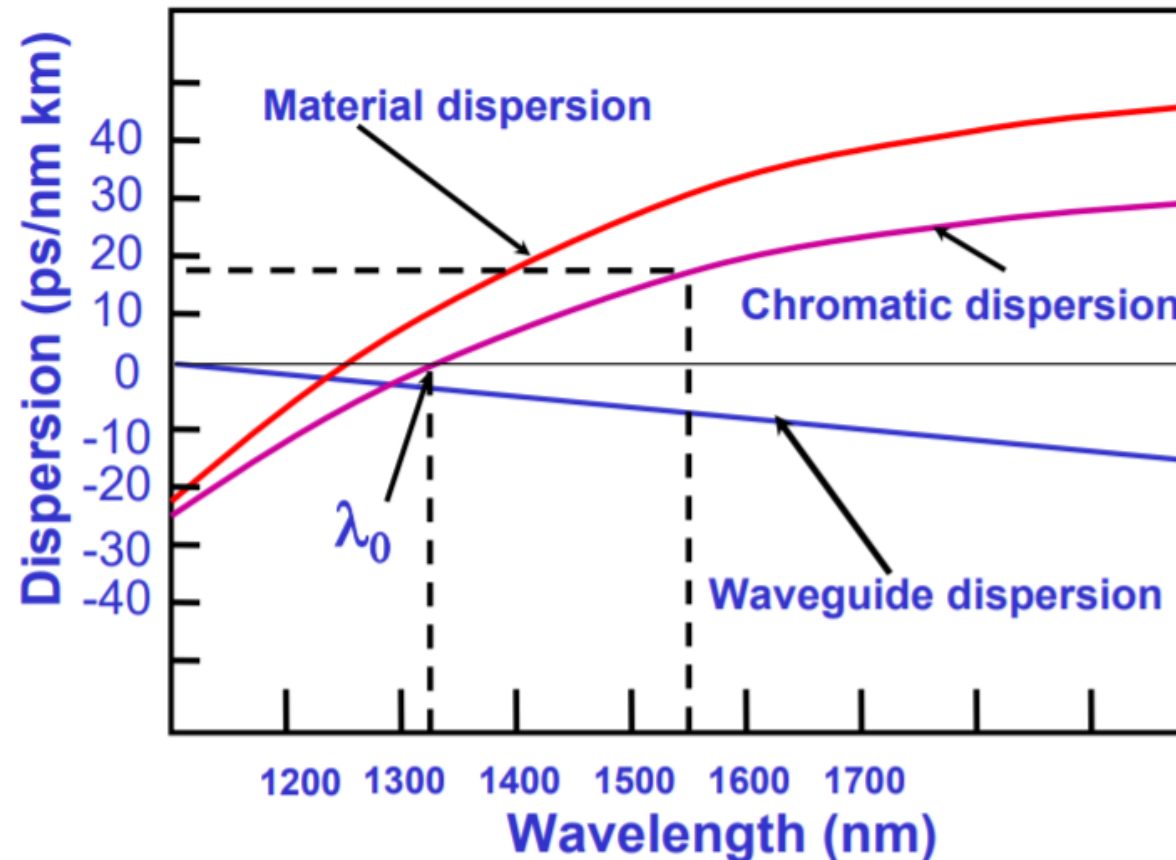
O que é Dispersão Cromática?

**Dispersão Cromática = Dispersão Material +
Dispersão Por Guia de Onda**

- Material: Espalhamento dos comprimentos de onda que constituem o sinal, devido a propagação em um meio dispersivo ($\text{IOR} = f(\lambda)$).
- Guia de Onda: Espalhamento do sinal devido as características do guia de onda, tais como, distribuição do IOR (perfil) e características geométricas.

Dispersão Cromática na Fibra SM

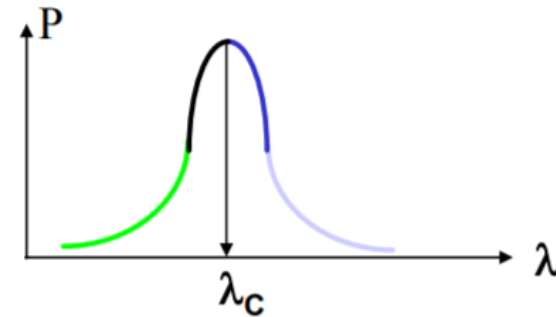
Standard Single Mode Fiber With λ_0 at 1310nm



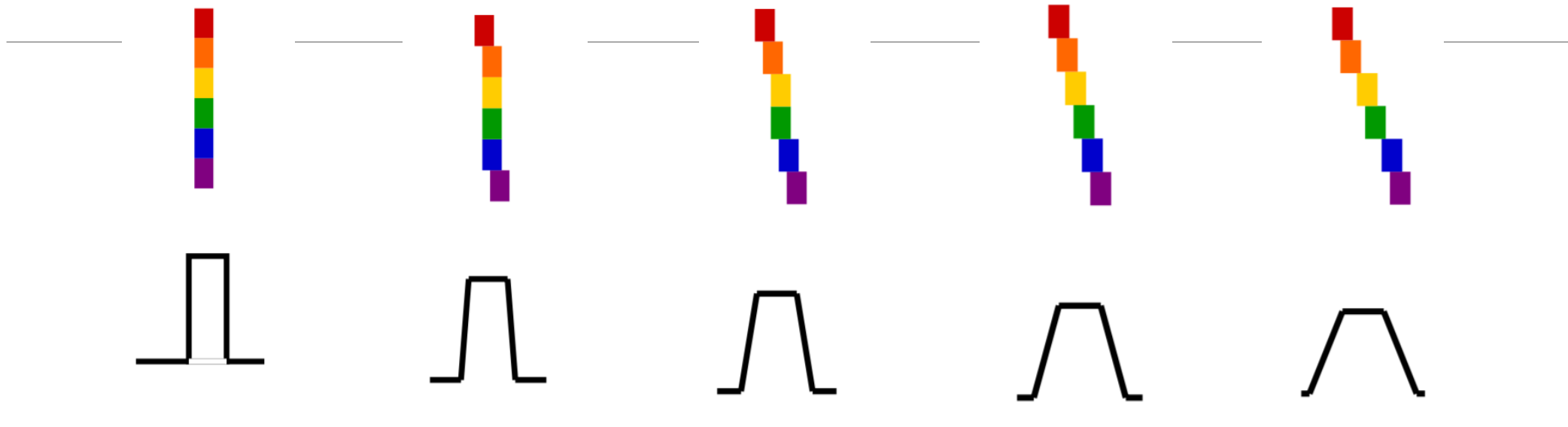
Dispersão Cromática = Dispersão Material + Dispersão Por Guia de Onda

Dispersão Cromática

- Fontes = distribuição espectral de potência finita
- Comprimento de onda das fontes = não se propagam com a mesma velocidade ($IOR=F(\lambda)$), chegando em instantes de tempo diferentes.
- Um pulso transmitido em tal meio sofrerá um espalhamento, limitando assim a banda passante de transmissão.



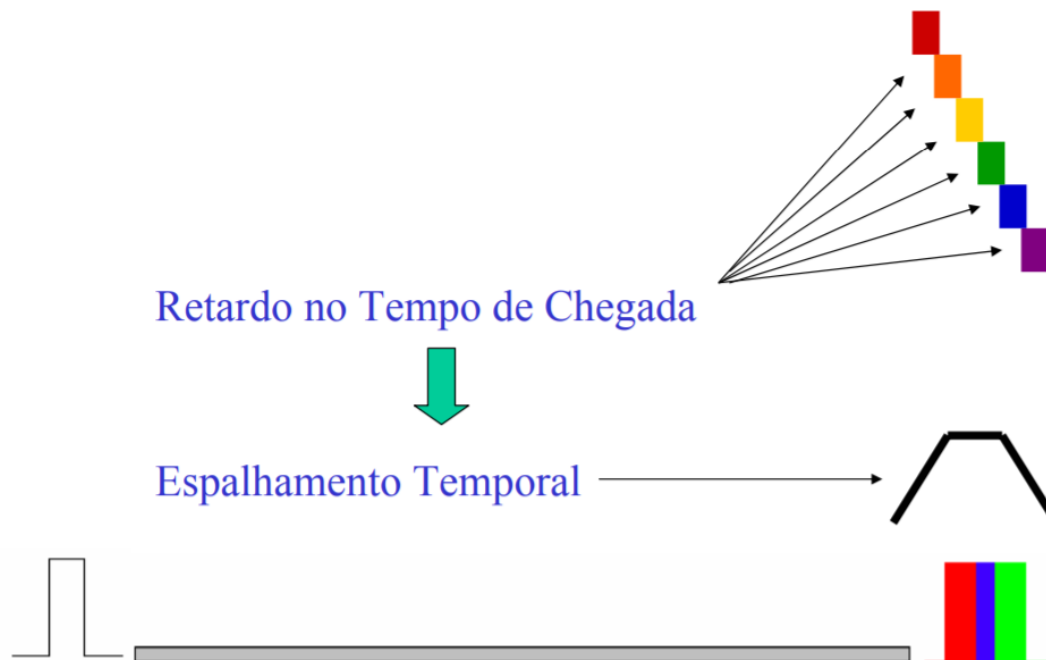
Dispersão Cromática



Retardo no Tempo de Chegada

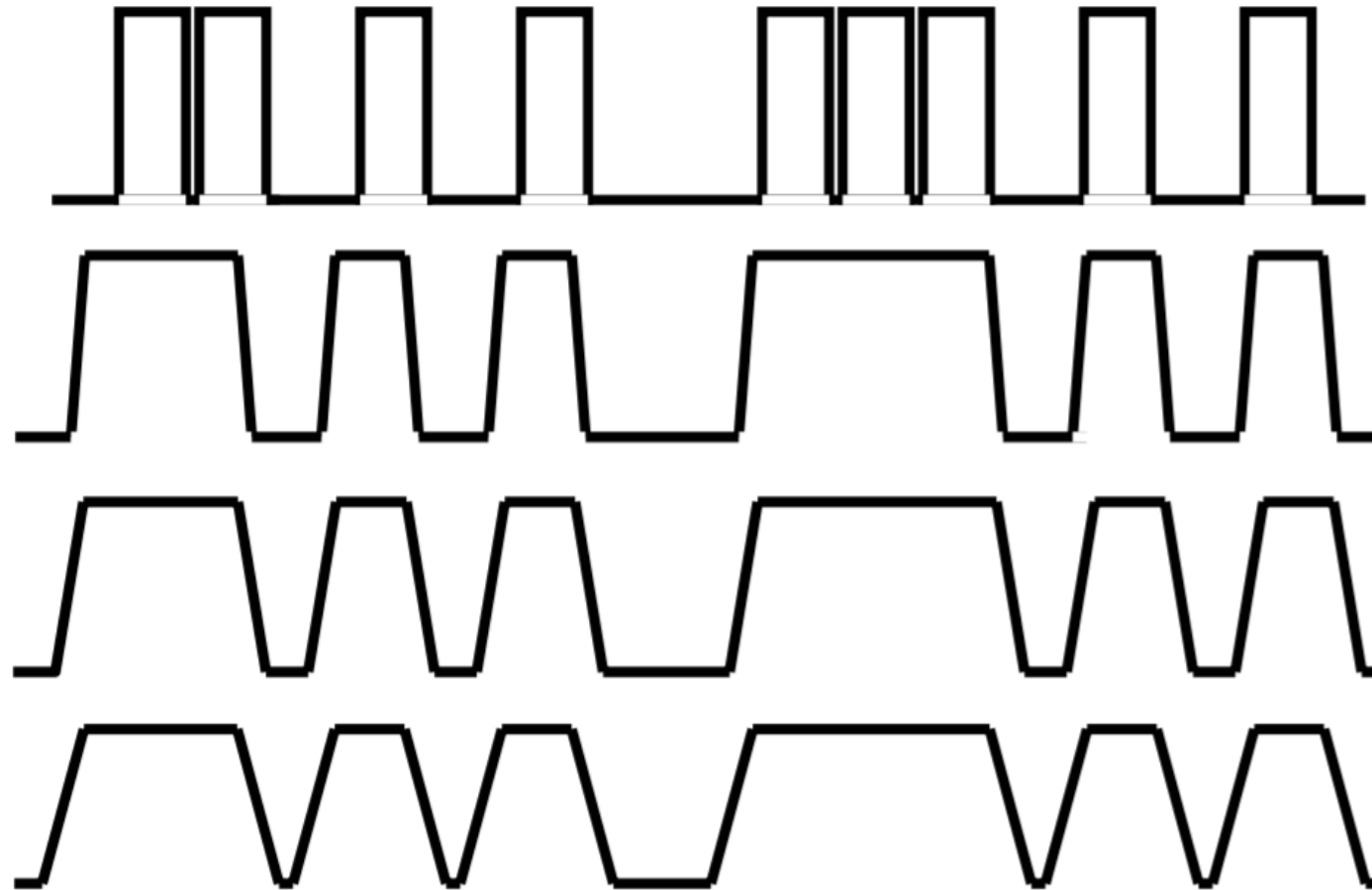


Espalhamento Temporal

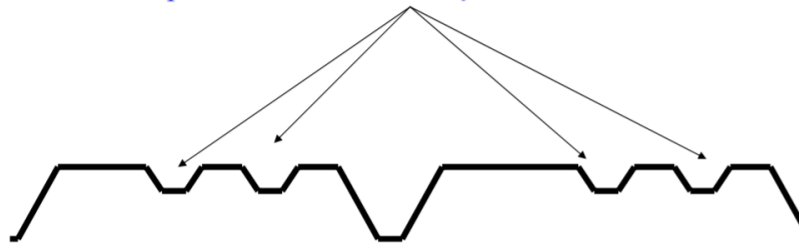


Dispersão Cromática

➤ Degradação do Sinal Digital (trem de pulsos)

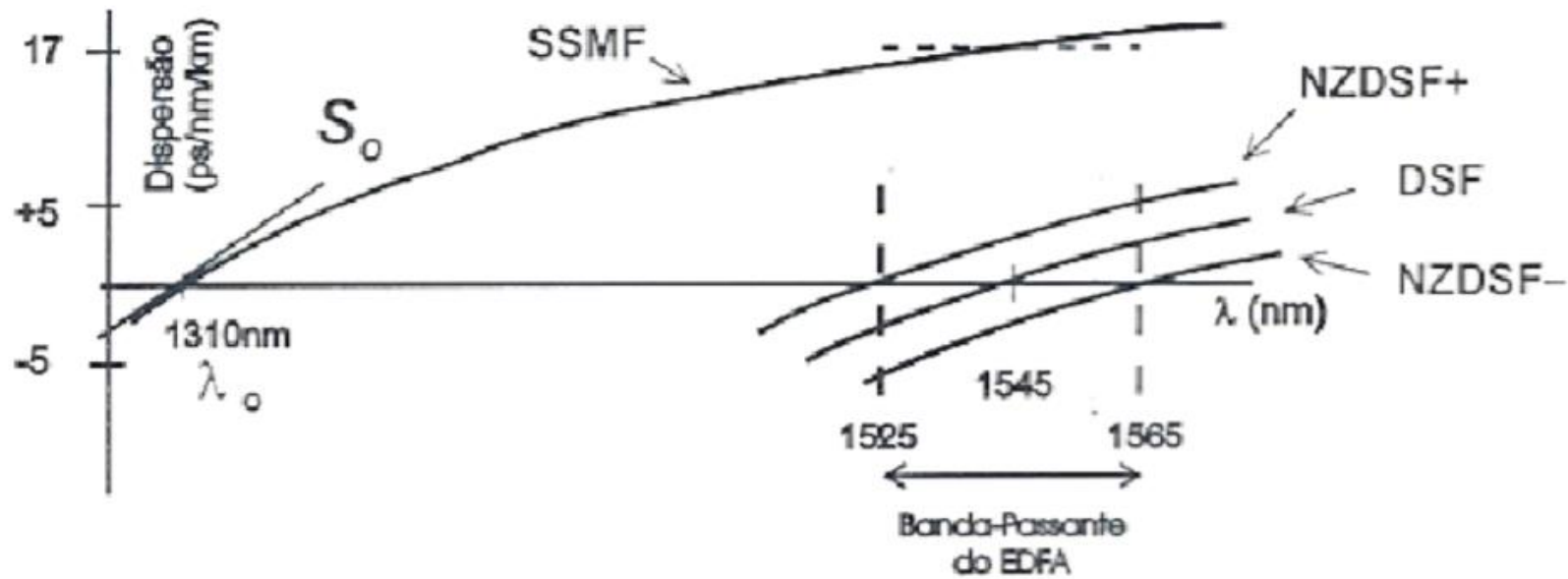


Impossibilidade de Detecção de “1” ou “0”



Dispersão Cromática

➤ As Diferentes Fibras e Suas Características de Dispersão



- SSMF: Standard Single Mode Fiber (Convencional), G.652 $\lambda_0 = 1310$ nm
- DSF: Dispersion Shifted, G. 653 $\lambda_0 \sim 1545$ nm
- NZDSF: Non-Zero D.S.F., G.655
 - NZDSF+: $\lambda_0 \sim 1520$ nm
 - NZDSF- : $\lambda_0 \sim 1570$ nm
- DCF: Dispersion Compesating Fiber (D1.55 μ m \sim -100ps/nm/Km)

Dispersão Cromática

➤ Valores Usuais de Dispersão

➤ Fibra Convencional:

$$D = \begin{cases} 0 & \text{ps/nm/km @ } 1.3 \mu\text{m} \\ 17 & \text{ps/nm/km @ } 1.5 \mu\text{m} \end{cases}$$

➤ Fibra Disp. Deslocada:

$$D = 0 \text{ ps/nm/km @ } \sim 1.55 \mu\text{m}$$

➤ Fibra NZDSF:

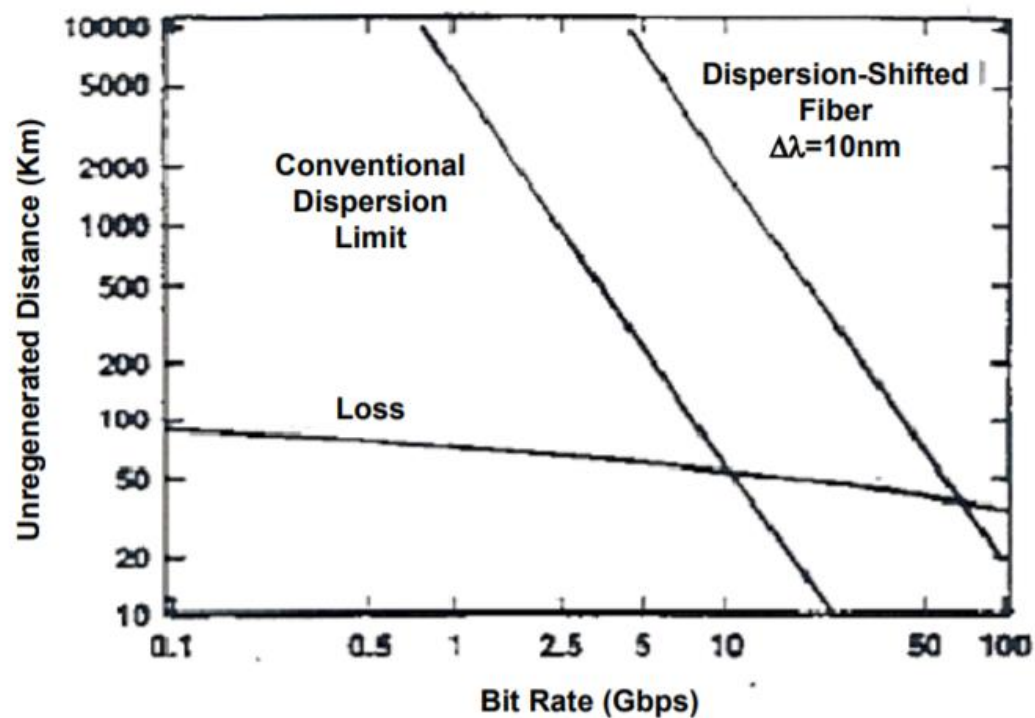
$$D = 1\text{-}6 \text{ ps/nm/km @ } 1.53\text{-}1.56 \mu\text{m}$$

➤ Fibra DCF:

$$D \approx -100 \text{ ps/nm/km @ } 1.55 \mu\text{m}$$

Dispersão Cromática

➤ Limites Impostos Pela Dispersão @ 1.55μm



Fibra Convencional:

2.5 Gbps → 980Km

10 Gbps → 60Km

40 Gbps → 4Km

Unidade de Dispersão Cromática

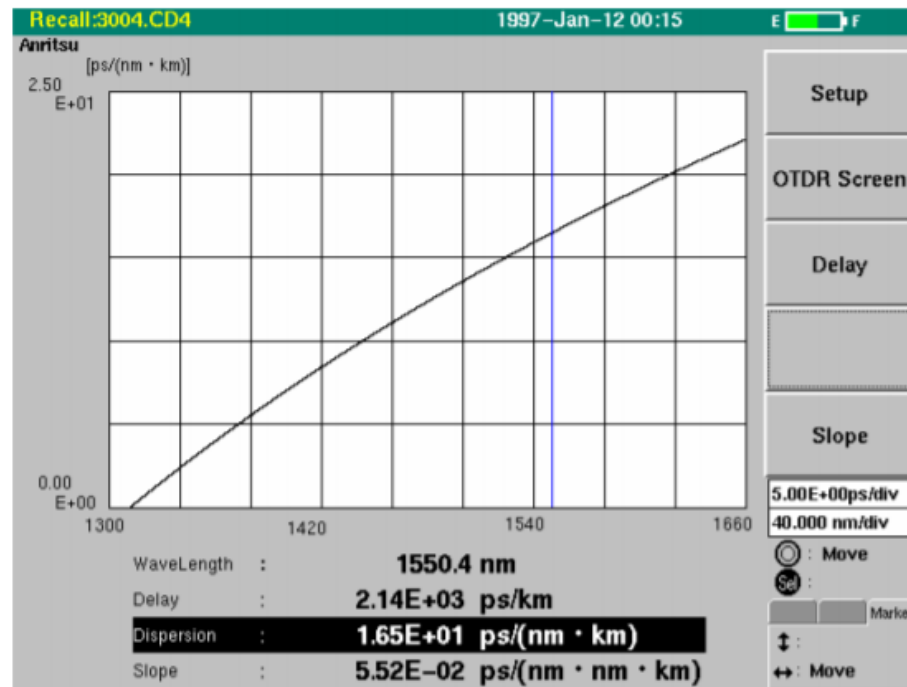
- Coeficiente de DC: ps/nm.km (significa que um pulso é alargado de 1 ps quando um sinal óptico de 1 nm de largura espectral percorre 1 Km de fibra)
- Ex.: Um sinal com largura de banda de 0.02nm (FWHM) é transmitido numa fibra SM de 1550 nm (17ps/nm.km) e percorre 100 km. Qual é a dispersão cromática?
- $DC = 17\text{ps/nm.km} \times 0.02\text{nm} \times 100\text{km} = 34 \text{ ps}$

Características de Dispersão Cromática

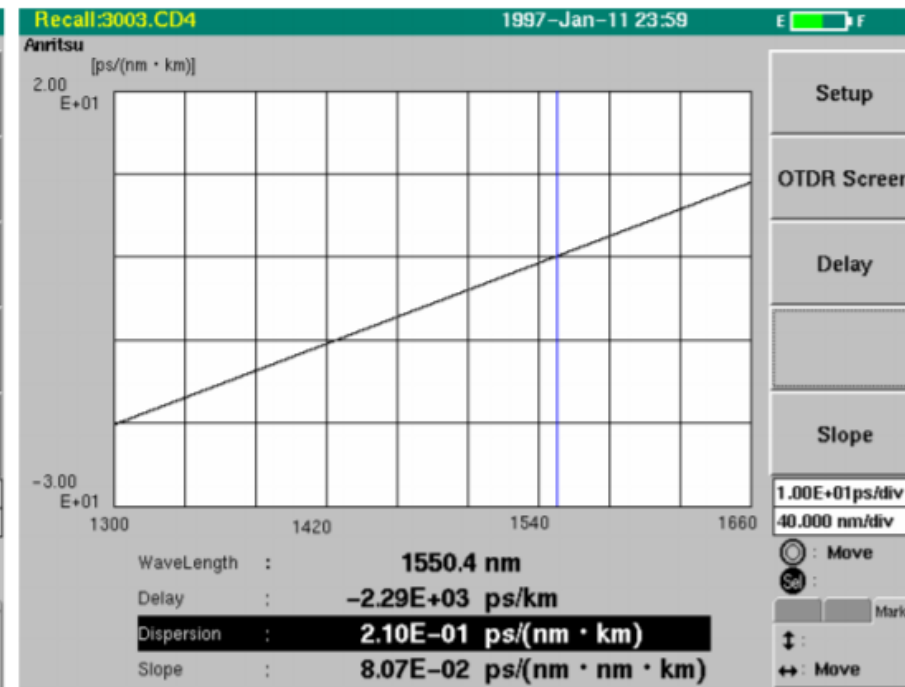
- Efeito determinístico.
- Aumenta com o comprimento do enlace.
- Sensível a taxas de bits mais elevadas.
- Influência direta em sistemas DWDM.

Características de Dispersão Cromática

Fibra SM



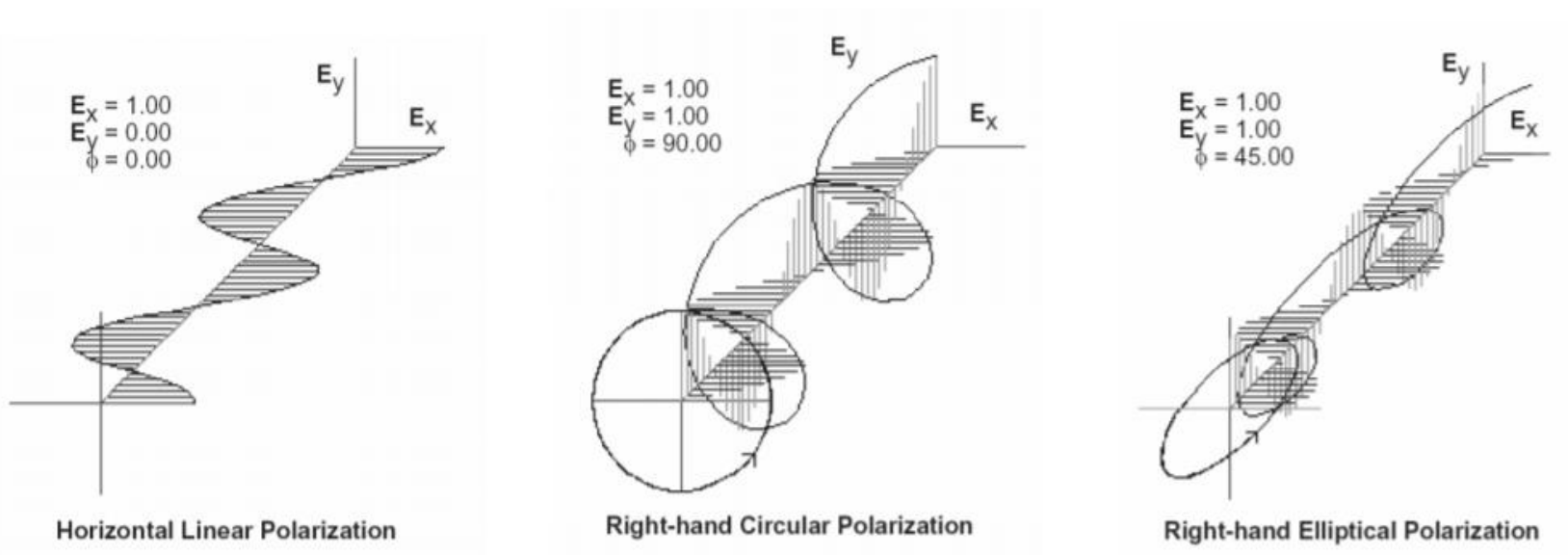
Fibra DS



(PMD) - Dispersão por Modo de Polarização

O que é Polarização?

É definida em termos do padrão (figura) desenhada no plano transversal à direção de propagação da onda eletromagnética pela variação do campo elétrico em função do tempo

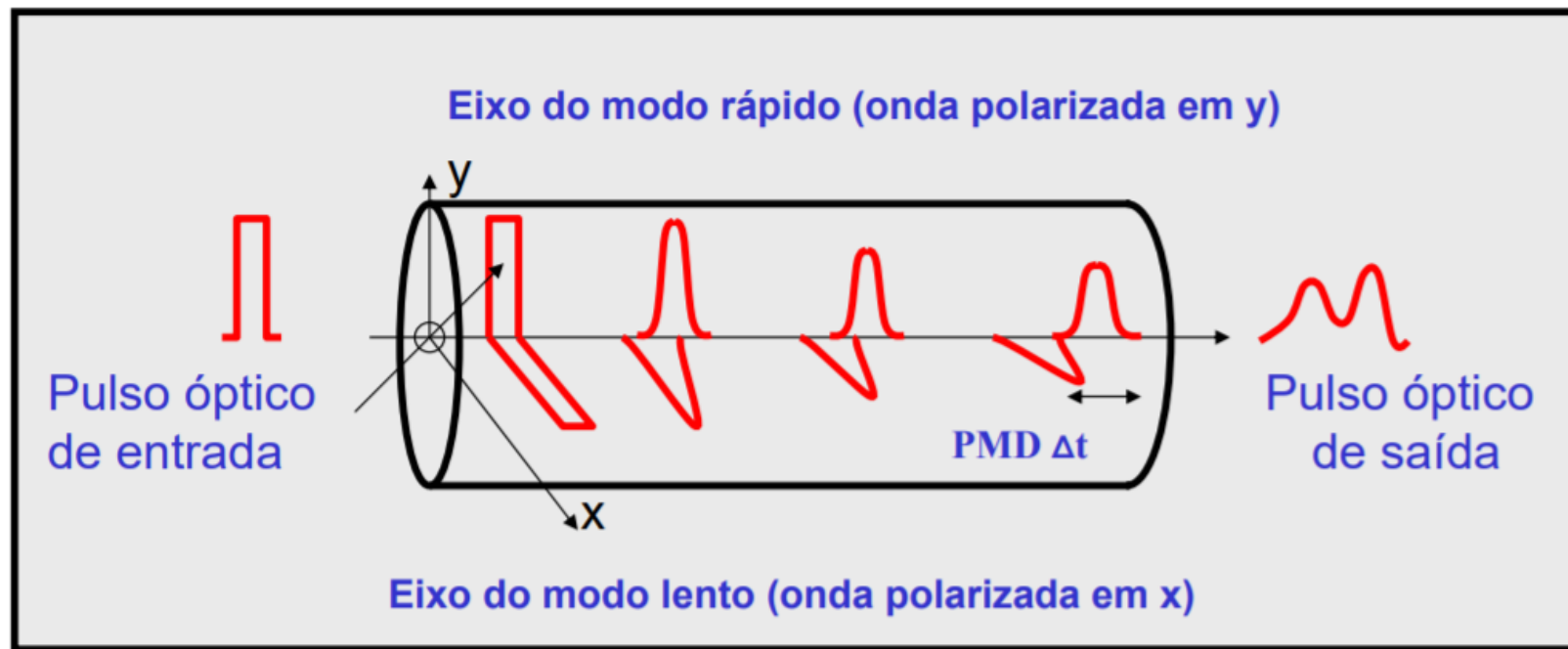


(PMD) - Dispersão por Modo de Polarização

O que é PMD?

Polarization Mode Dispersion (PMD) é uma fundamental propriedade dos meios ópticos (fibras e componentes) no qual a energia do sinal num dado comprimento de onda é distribuída em dois modos de polarização ortogonais que “viajam” com velocidades de propagação diferentes.

(PMD) - Dispersão por Modo de Polarização



A diferença de tempo de propagação entre os dois modos é chamada de Differential Group Delay (DGD).

Informações

Este material de slides foi escrito, para esta disciplina, por meio de colaboração dos professores: Prof. Dr. Valdez Aragão de Almeida Filho e profa. Dra. Cindy Stella Fernandes.

Bibliografia

Bibliografia Básica

- KEISER, G.: **Optical Fiber Communications**. Mac-Graw Hill, 2000.
- RIBEIRO, J. A. J.: **Comunicações Ópticas**. 4ª edição. São Paulo. Editora Érica, 2003.
- AGRAWAL, G. P.: **Fiber-Optic Communication Systems**. John Wiley & Sons, 2002.
- PINHEIRO, J. M. dos S.: **Cabeamento Óptico**. São Paulo. Editora Campus, 2004.
- SENIOR, J. M.: **Optical Fiber Communications: Principles and Practice**. Prentice-Hall, 2009.

Contato

Contato Aluno/professor

- **SIGAA (Oficial)**
- Dias de aulas
- E-mails para contato: cindy.fernandes@unifesspa.edu.br (Oficial Unifesspa)
cindy.fernandes@gmail.com (Não Oficial - pessoal)
- WhatsApp: (91) 98256 – 9649 (Não Oficial)