

Conceitos sobre Redes Ópticas

Version 1.0

Organização do Curso

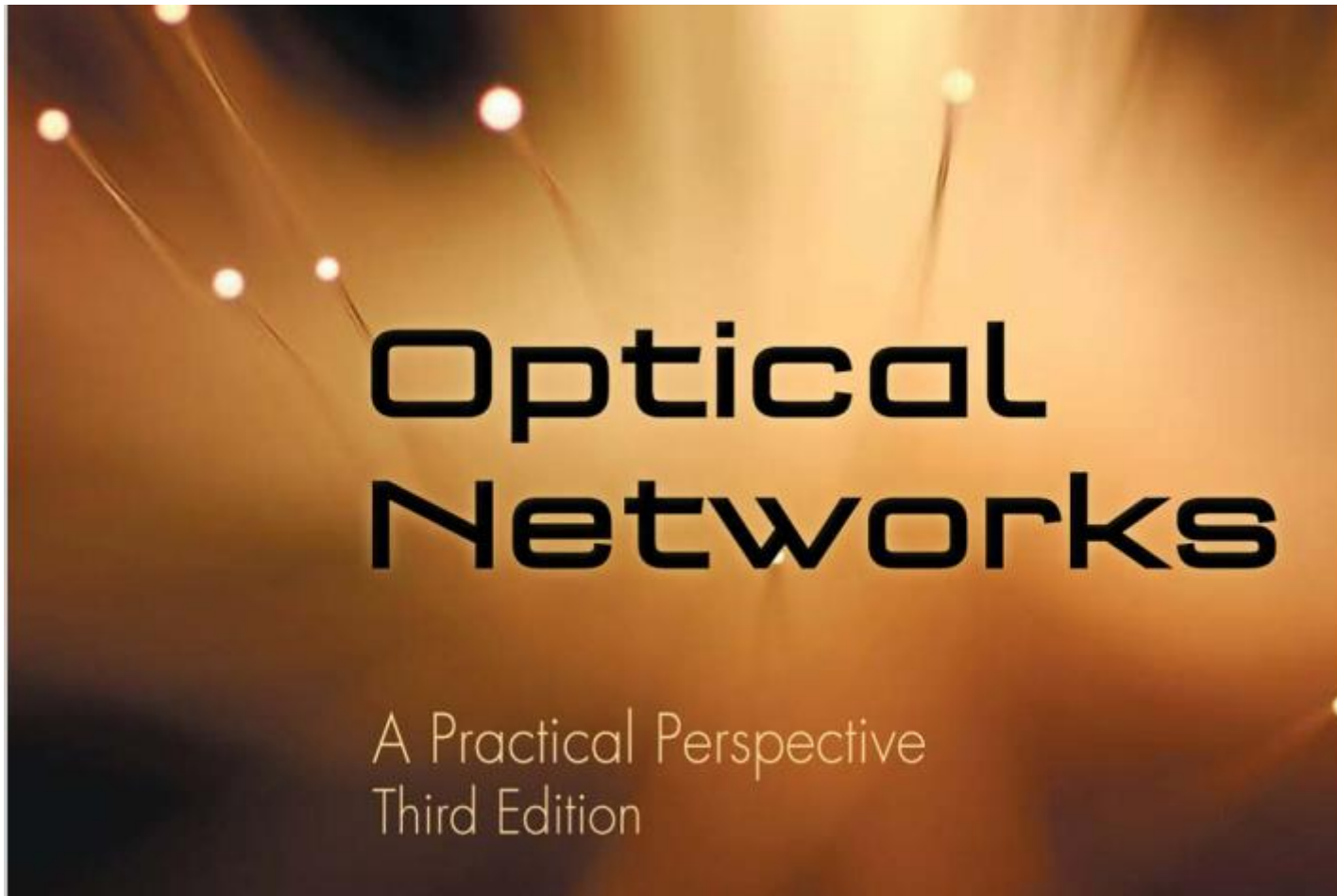
Datas e Horários de Aula

Material do Curso

Avaliação

Presença nas Aulas

Bibliografia

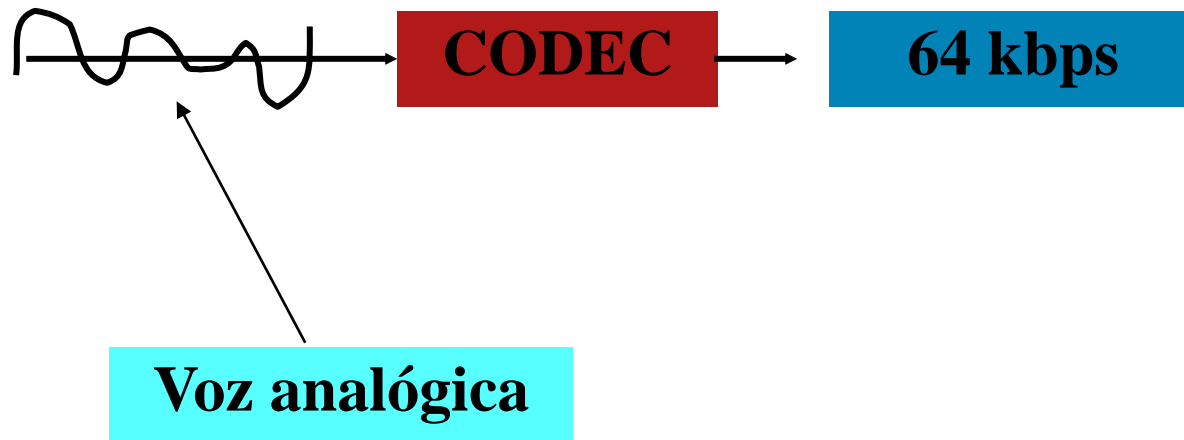


Introdução

TDM – Multiplexação por Divisão de Tempo

Utilizado, por exemplo, em telefonia para transporte de canais de voz.

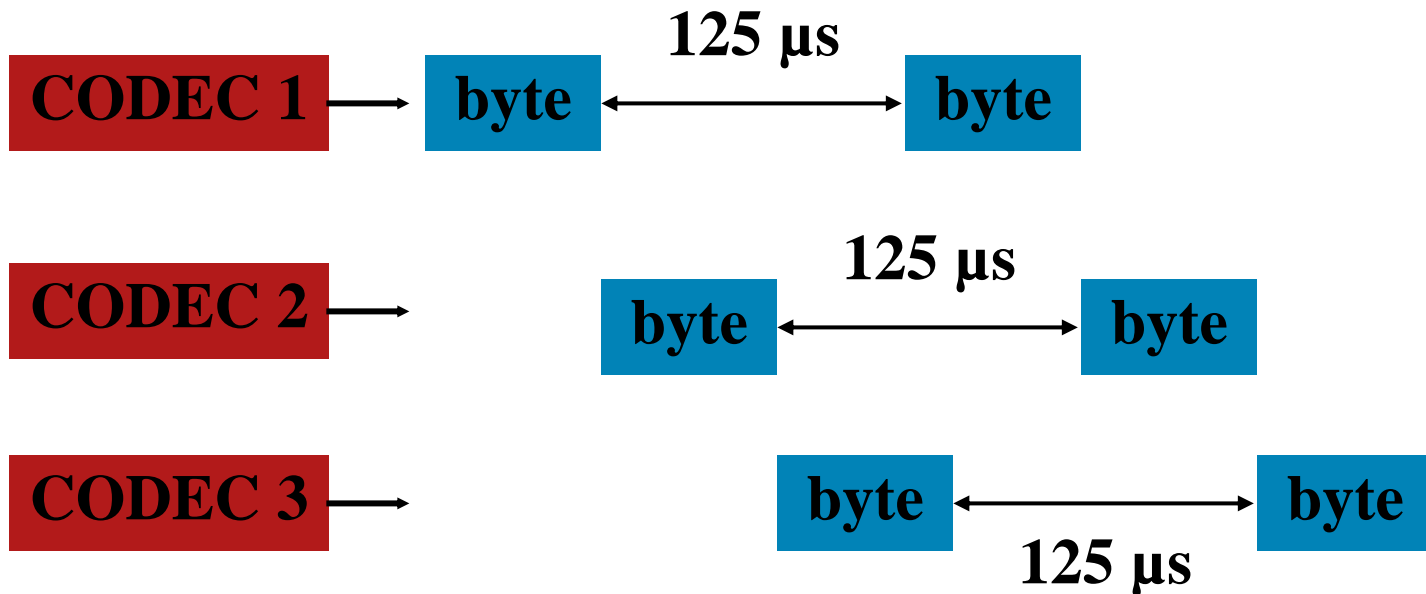
O canal de voz analógico pode ser codificado para digital utilizando técnicas de PAM/PCM



Estrutura Lógica TDM/PCM

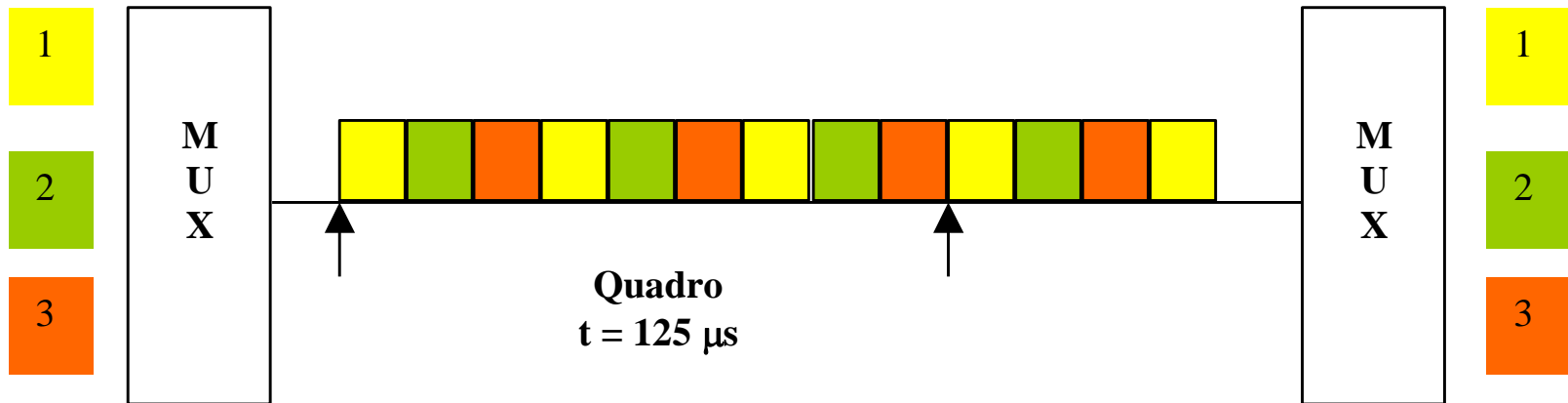
Um conjunto de 8 bits são enviados a cada 125 μ s.

Taxa = 8 bits / 125 μ s = 64 Kbps



Estrutura Lógica TDM/PCM

Intercalação de bits



$z = 3$ canais de 3 bits

Taxa global = $f_a \times b \times z$ bits/segundo

PDH: hierarquia digital plesiosíncrona

DS-1 (T1): 24 canais, 1,544Mbits/s

$24 \times 8 + 1$ bits/frame

DS-1E (E1): 32 canais, 2,048 Mbits/s

30 canais úteis

E2: 128 canais (4 x E1); E3: 512 canais (4 x E2) -> 34 MHz

Multiplexação Digital

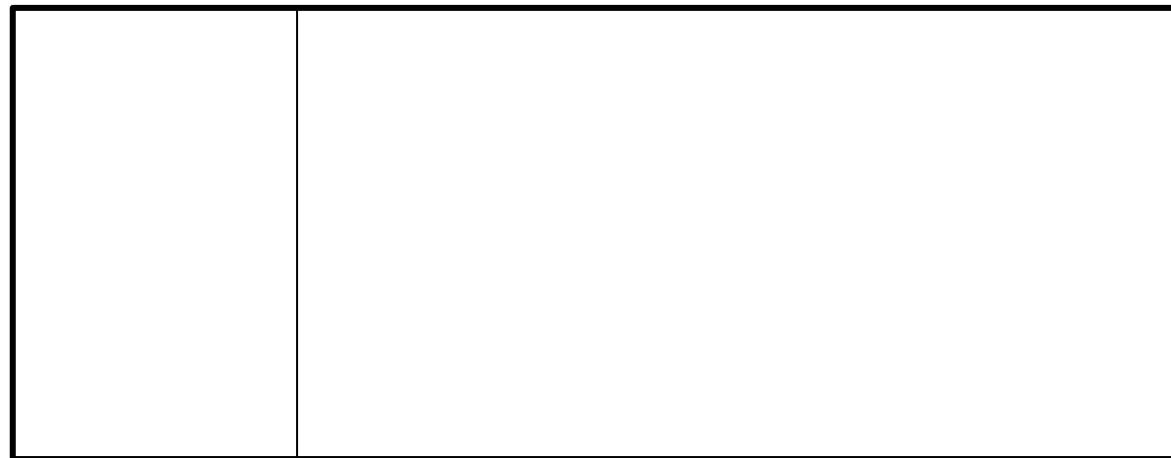
STM-4: 622 Mbits/s
STM-16: 2,5 Gbits/s
STM-64: 10 Gbits/s

SDH: Hierarquia Digital Síncrona

STM-1: aproximadamente 155 Mbits/s (útil: 149 Mbits/s)

270 colunas

9 linhas



cabeçalho

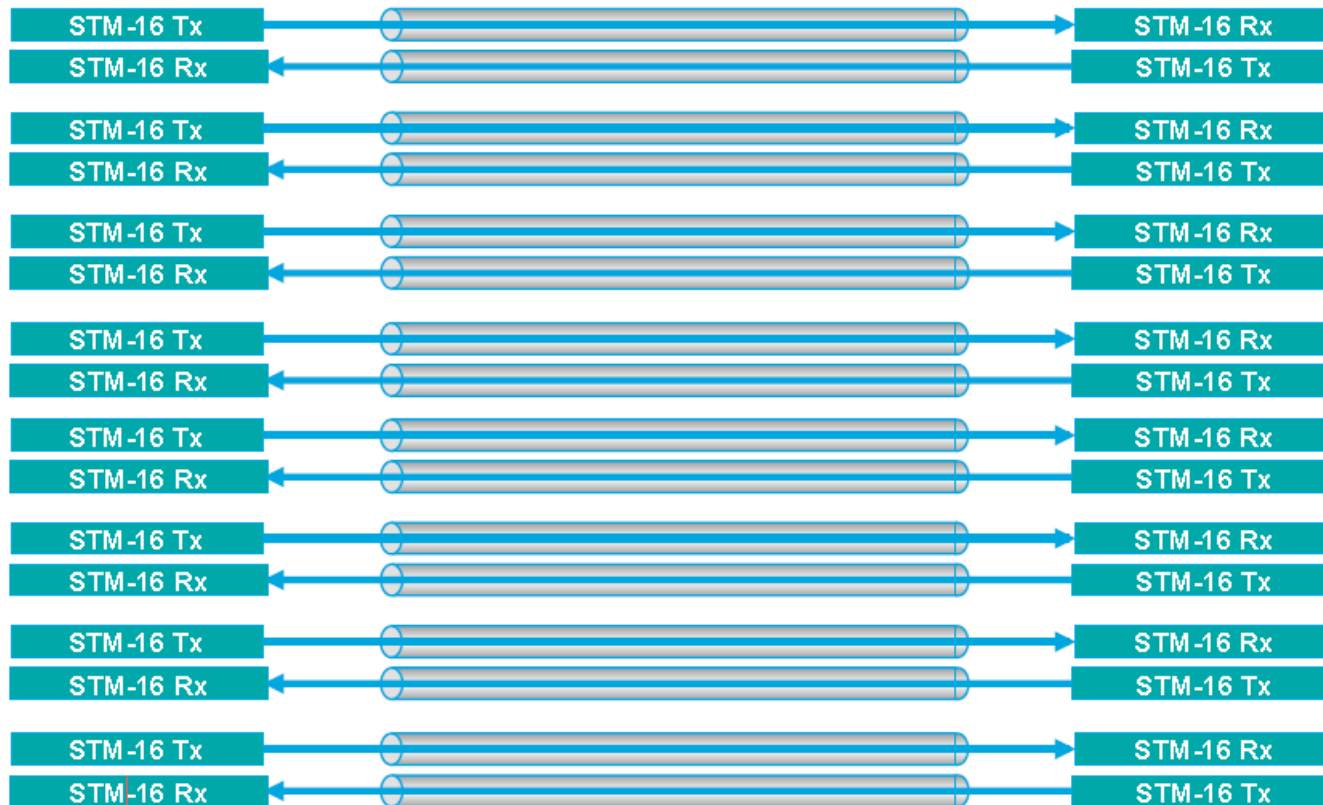
Área de dados

2349 canais de 64 Kbps

Exemplo de modelo TDM tradicional

Uma canalização por par de fibras

- **40 x 2.5 Gbps por canal => 80 fibras**





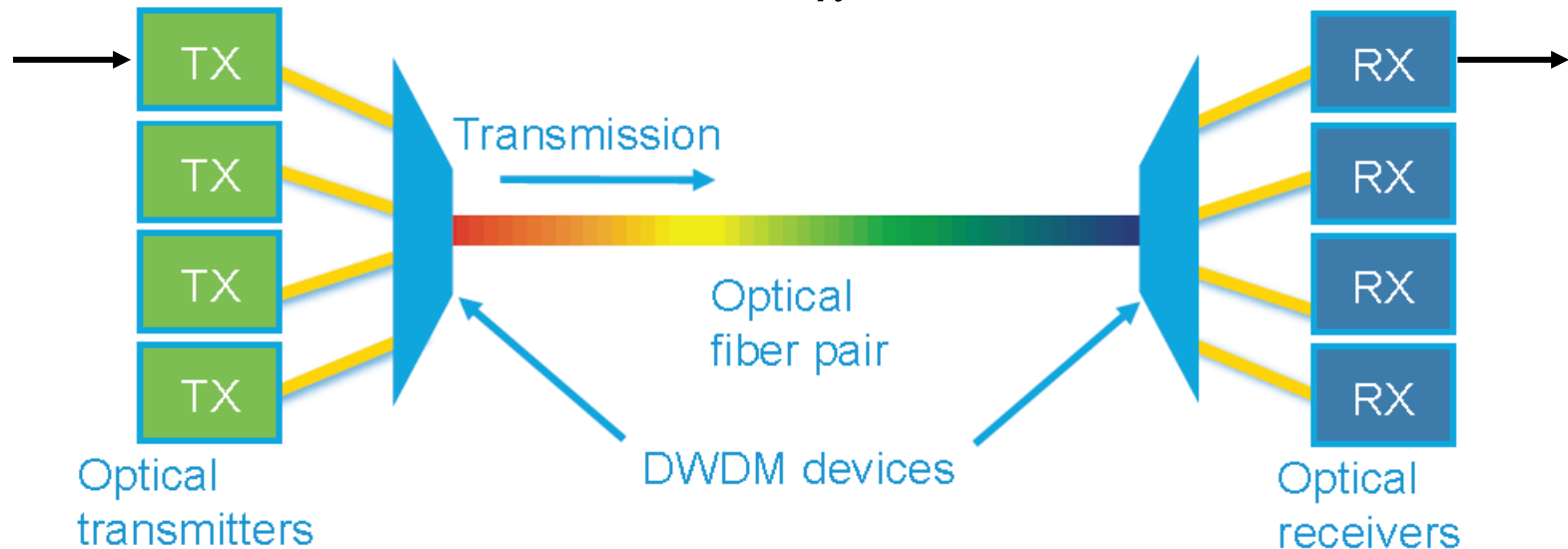
Fundamentos de DWDM

O que é DWDM

O que é DWDM

Sistemas DWDM usam dispositivos ópticos para combinar a saída de diversos transmissores ópticos (multiplexação de comprimento de onda)

$$f = \frac{c}{\lambda}$$



100 canais x 200Gbps = 20 Tb/s

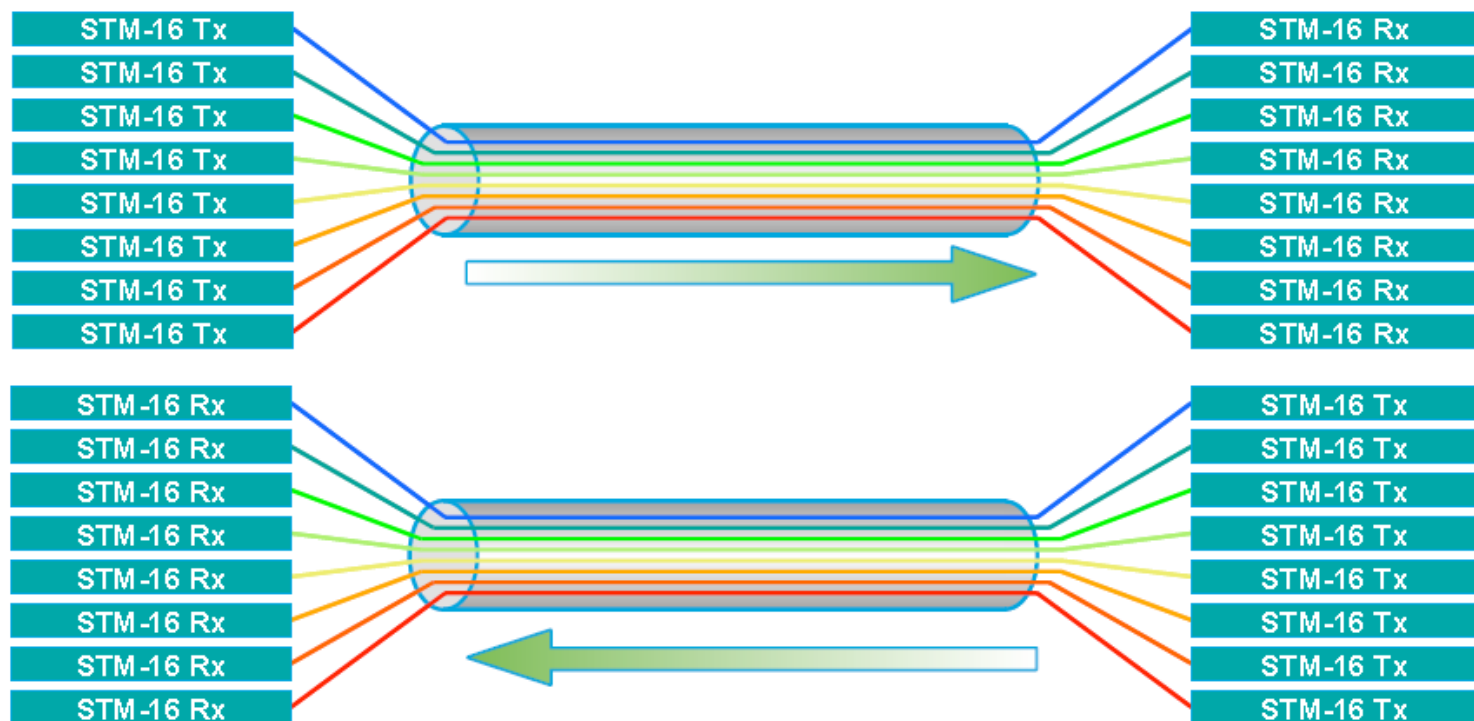
Mesmo exemplo anterior no caso DWDM

Multiplos canais em uma única fibra

- Cada canal transmite em um diferente comprimento de onda que pode ser separado no receptor

• 40 x 2.5 Gbps = 2 *fibras*

Canais disponíveis: 1,25G, 2.5G, 10G, 40G, 100G
200G



Multiplexação Óptica

This is the most important feature to be defined when planning a DWDM system.

According to the application one must define the type of DWDM system to be deployed, the spacing between channels, the number of channels and channel capacity.

Channel spacing is defined by ITU standards. It may range from 200 GHz to 12,5 GHz. Main standards are G.694.1 (DWDM) and G.694.2 (CWDM).

TDM x DWDM

TDM (SONET/SDH)

Sinal é convertido E/O e enviado na fibra

Colorless signal
Gray signal

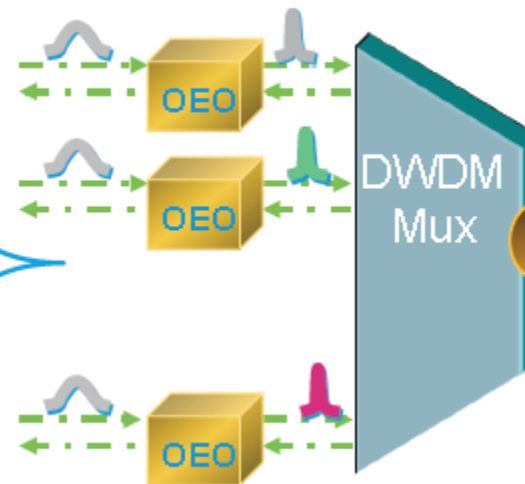
DS-1
DS-3
OC-1
OC-3
OC-12
OC-48



TDM (SONET/SDH)

Sinal é convertido O/E/O e enviado na fibra em diversos canais

OC-48
OC-192
OC-768
GE
ESCON/FC
ATM



Colorful signal



Fundamentos de DWDM

Canalização definida pelo ITU-T

G.964.1

Dense wavelength division multiplexing (DWDM), a wavelength division multiplexing (WDM) technology, is characterized by narrower channel spacing than coarse WDM (CWDM), as defined in [ITU-T G.671].

In general, the transmitters employed in DWDM applications require a control mechanism to enable them to meet the application's frequency stability requirements, in contrast to CWDM transmitters, which are generally uncontrolled in this respect.

The frequency grid defined by this Recommendation supports a variety of fixed channel spacings ranging from 12.5 GHz to 100 GHz and wider (integer multiples of 100 GHz) as well as a flexible grid.

Uneven channel spacings using the fixed grids are also allowed.

The current steps in channel spacing for the fixed grids have historically evolved by sub-dividing the initial 100 GHz grid by successive factors of two.

Fixed Grid Nominal Central Frequencies

For channel spacings of 12.5 GHz on a fibre, the allowed channel frequencies (in THz) are defined by:

$193.1 + n \times 0.0125$ where n is a positive or negative integer including 0

For channel spacings of 25 GHz on a fibre, the allowed channel frequencies (in THz) are defined by:

$193.1 + n \times 0.025$ where n is a positive or negative integer including 0

For channel spacings of 50 GHz on a fibre, the allowed channel frequencies (in THz) are defined by:

$193.1 + n \times 0.05$ where n is a positive or negative integer including 0

For channel spacings of 100 GHz or more on a fibre, the allowed channel frequencies (in THz) are defined by:

$193.1 + n \times 0.1$ where n is a positive or negative integer including 0

Tabela de Frequências (parcial)

Nominal central frequencies (THz) for spacings of:				Approximate nominal central wavelengths (nm) (Note)
12.5 GHz	25 GHz	50 GHz	100 GHz and above	
•	•	•	•	•
•	•	•	•	•
•	•	•	•	•
195.9375	–	–	–	1530.0413
195.9250	195.925	–	–	1530.1389
195.9125	–	–	–	1530.2365
195.9000	195.900	195.90	195.9	1530.3341

$$c = 2,99792458 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

Flexible DWDM Grid

For the flexible DWDM grid, the allowed frequency slots have a nominal central frequency (in THz) defined by:

$193.1 + n \times 0.00625$ where n is a positive or negative integer including 0 and 0.00625 is the nominal central frequency granularity in THz and a slot width defined by:

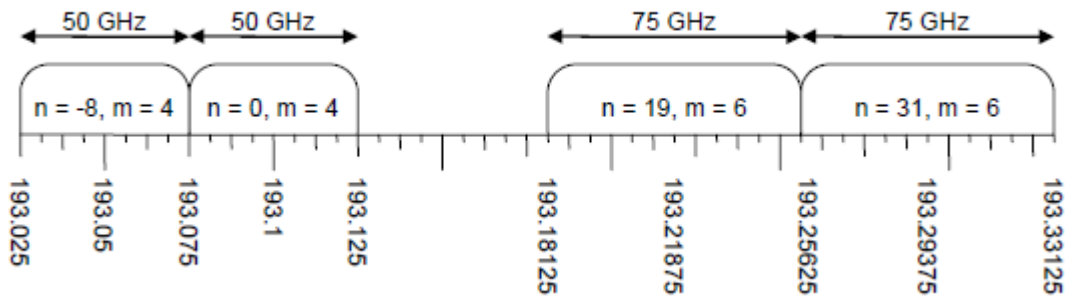
$12.5 \times m$ where m is a positive integer and 12.5 is the slot width granularity in GHz.

Any combination of frequency slots is allowed as long as no two frequency slots overlap.

Uso da Grade Flexível

- A grade flexível permite que diferentes canais tenham diferentes larguras de banda
- Isso permite combinar diferentes tipos de modulação e diferentes taxas de bits em um mesmo sistema.
- Isso cria dificuldades para interoperabilidade entre sistemas, por esse motivo a grade flexível não é usada em recomendações de interfaces óticas

Exemplo de grade flexível

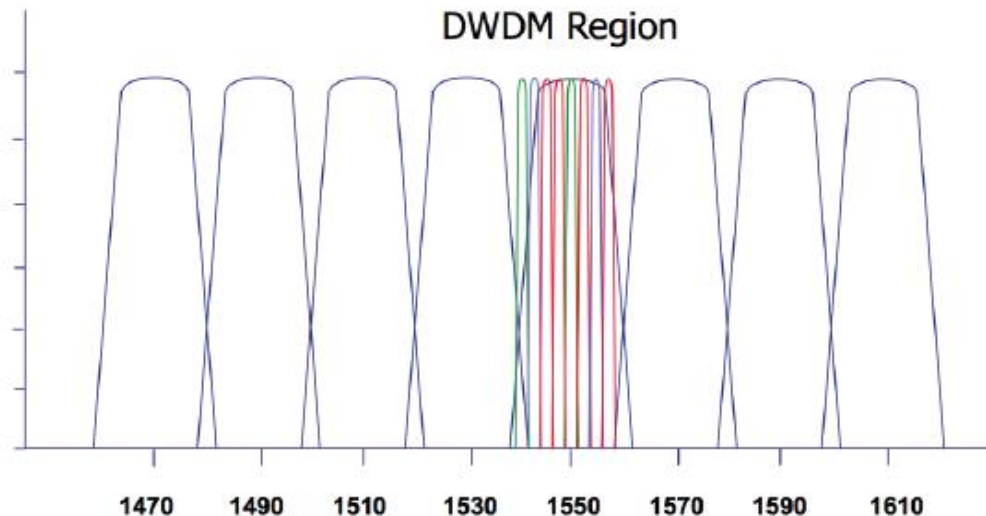


Qual devem ser os valores de n e m para encaixar um canal de 50 GHz no espaço disponível?

É possível descrever a grade fixa de 50GHz usando os parâmetros da grade flexível? Quais seriam os valores de n e m em cada canal?

CWDM x DWDM

	DWDM	CWDM
Application	Long Haul	Metro
Amplifiers	Typically EDFAs	Almost Never
# Channels	Up to 80	Up to 8
Channel Spacing	0.4 nm	20nm
Distance	Up to 3000km	Up to 80km
Spectrum	1530nm to 1560nm	1270nm to 1610nm
Filter Technology	Intelligent	Passive

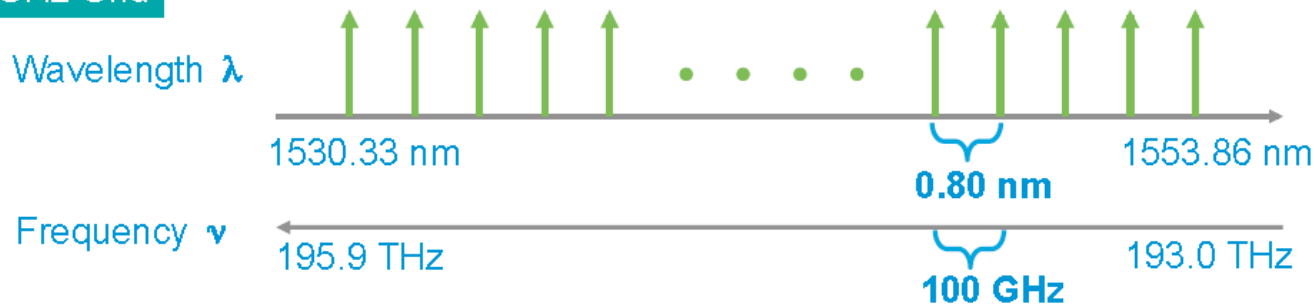


Canalização óptica

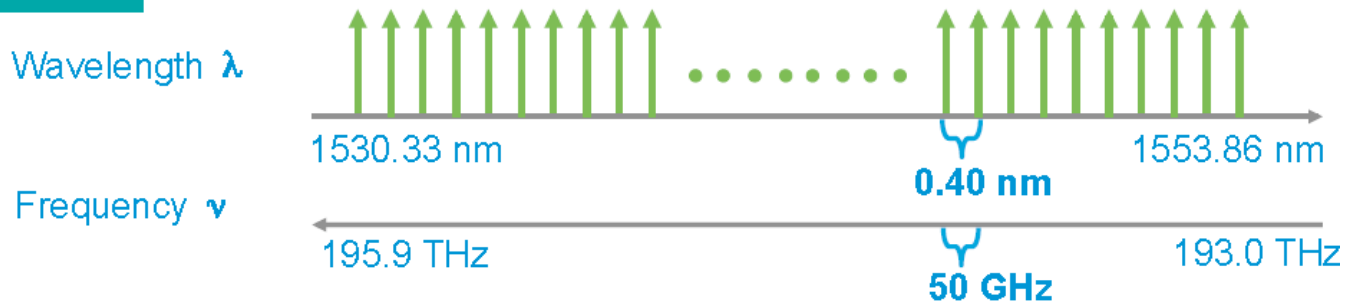
Conforme ITU-T – canalização da luz

São baseadas em 191,7THz ±100GHz ou ±50GHz

100GHz Grid



50GHz Grid



$$|\Delta \nu| \cong \frac{c}{\lambda_0^2} \Delta \lambda$$

Capacidade de Transmissão

Em um canal de banda W (hertz), quantos bits por segundo podem ser transmitidos

Critério de Nyquist

$$R = \frac{2W \log_2 n}{q + 1} \quad \text{bits/segundo}$$

n : número de símbolos no canal

q : fator de roll-off ($0 \leq q \leq 1$)

Critério de Shannon

$$C = W \log_2(1 + S/N) \quad \text{bits/segundo}$$

S/N : relação sinal ruído em relação $\left(\frac{S}{N}\right)_{relação} = 10^{\left(\frac{(S/N)_{dB}}{10}\right)}$



Fundamentos de DWDM

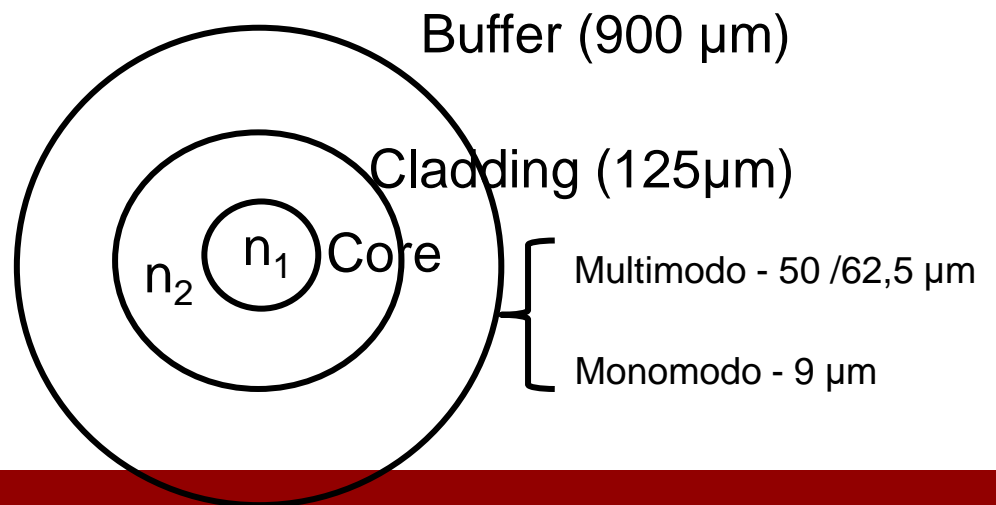
Dimensão e geometria da fibra



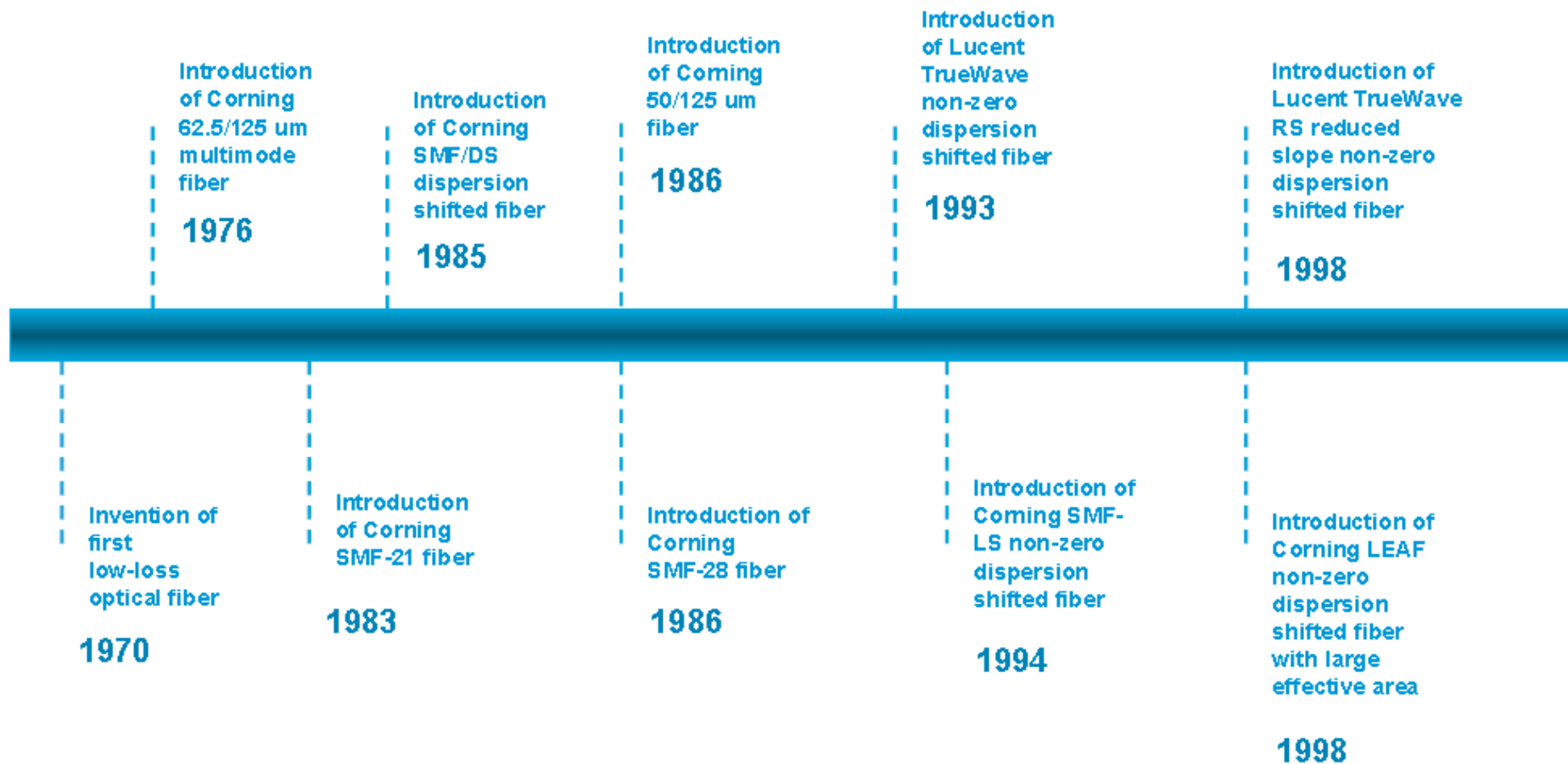
Fundamentos de DWDM

Optical Fibers

$$n_2 > n_1$$



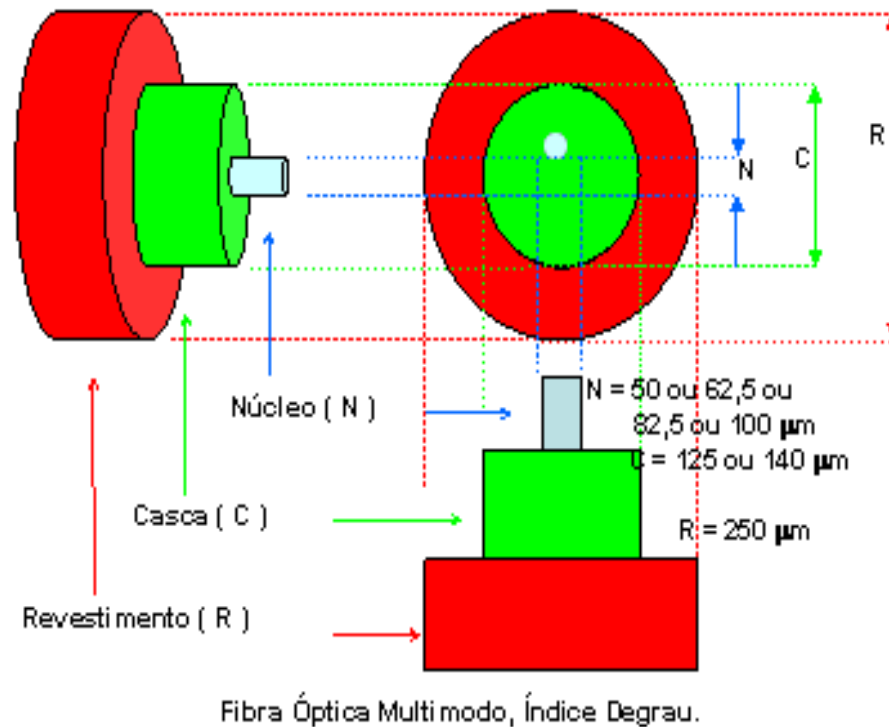
Desenvolvimento da fibra



Redes ópticas

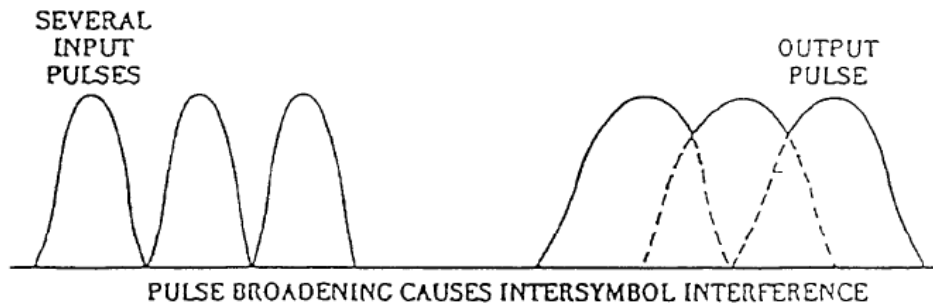
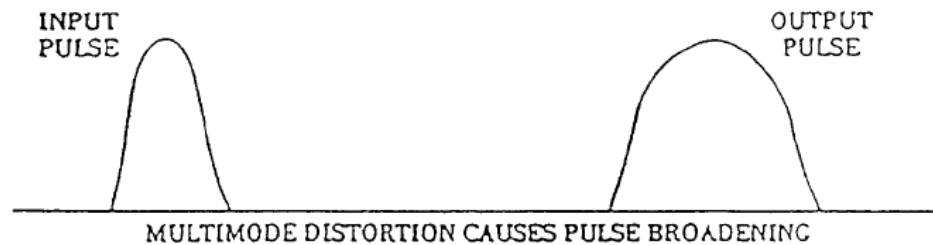
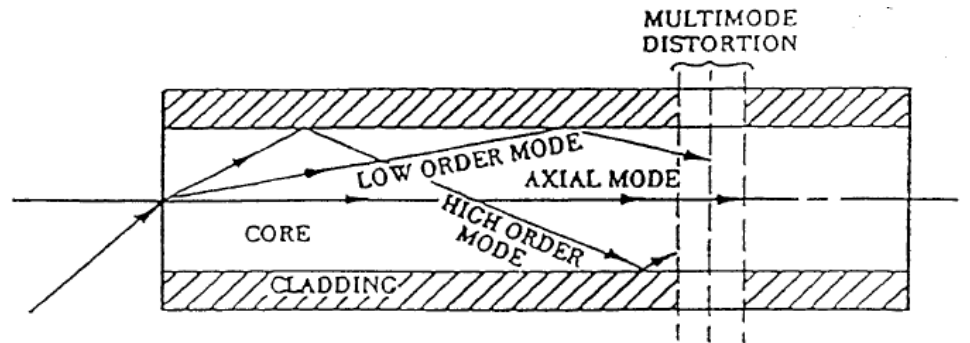
Estrutura

Fibra Óptica multimodo

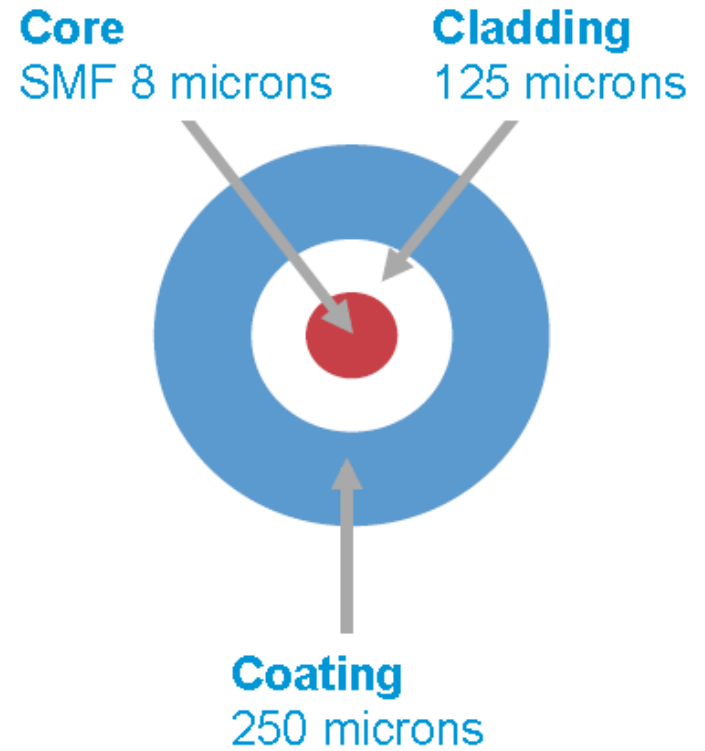
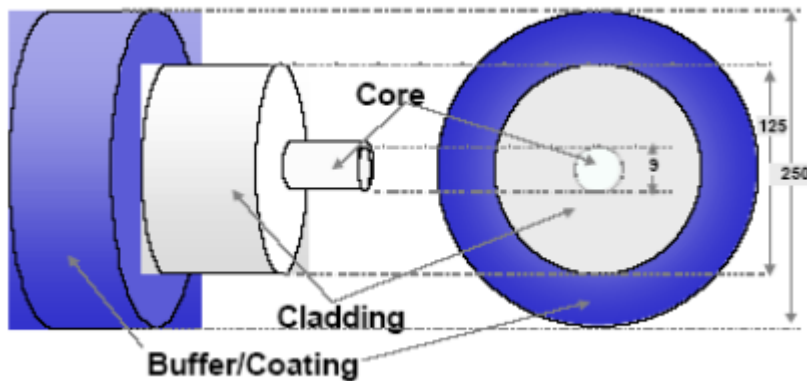


Constituição de uma Fibra Óptica Multimodo

Fibra Multimodo de Índice Degrau



Singlemode Fiber



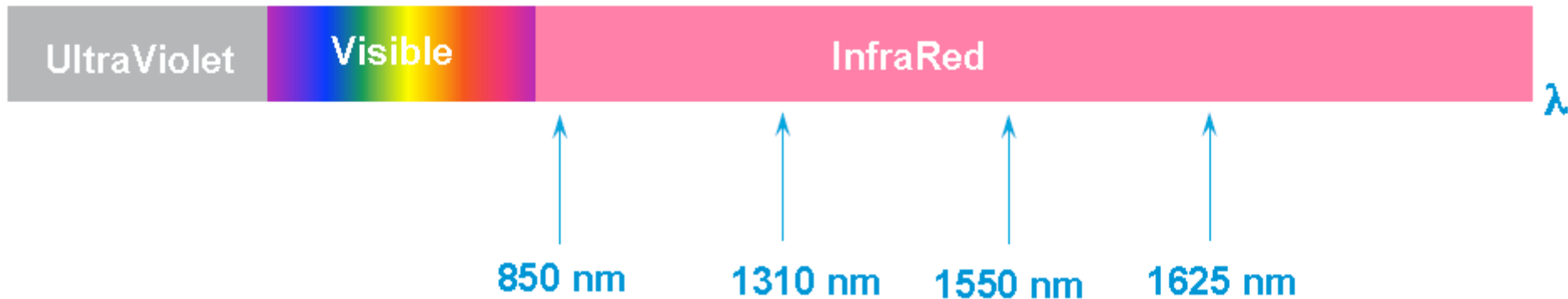
Singlemode Fiber Light Propagation



$$n_2 > n_1$$

The difference of refractive index acts like a lens concentrating light on the core

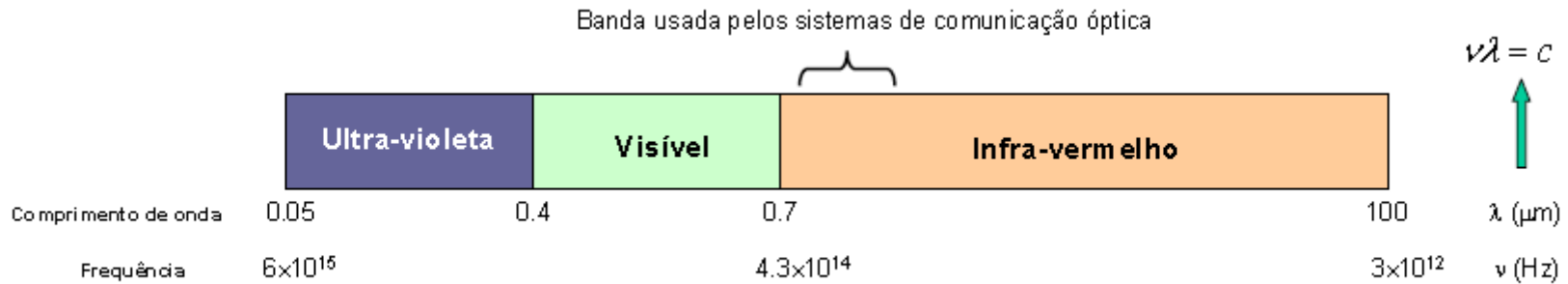
Electromagnetic Spectrum



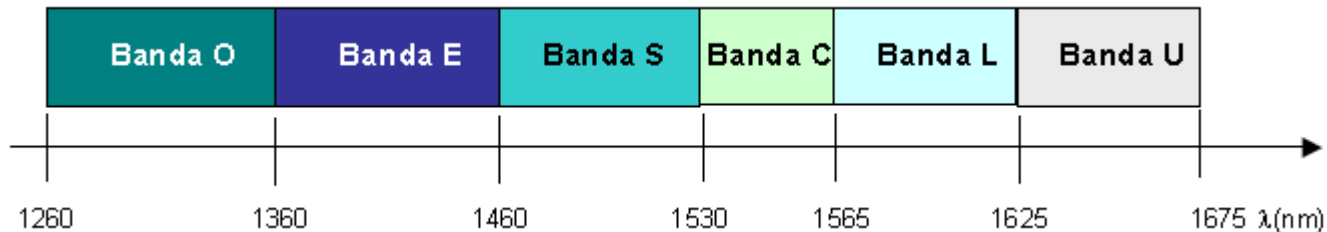
- **850 nm over multimode fiber**
- **1310 nm over singlemode fiber**
- **Banda-C: 1550nm over singlemode fiber**
- **Banda-L: 1625 nm over singlemode fiber**

Optical Bands

Optical communication systems operate on wavelengths between 800 and 1600 nm, this is called infra-red region (invisible to human eye).



The ITU (*International Telecommunications Union*) defines six possible bands to be used by fiber optics communication systems. The oftener used bands are O (single channel 1310 nm systems) and C (DWDM systems).



Princípios básicos

A relação entre um espaçamento no domínio da frequência (Δf) e um espaçamento no domínio do comprimento de onda ($\Delta \lambda$) é dada por

$$|\Delta \nu| \cong \frac{c}{\lambda_0^2} \Delta \lambda$$

onde λ_0 é o comprimento de onda central na banda considerada e c é a velocidade de propagação da luz no vácuo.

A largura de banda total de transmissão correspondente às bandas do ITU é calculada na tabela seguinte:

Banda	Designação	λ_0 (nm)	$\Delta \lambda$ (nm)	$\Delta \nu$ (THz)
O	<i>Original</i>	1310	100	17.48
E	<i>Extended</i>	1410	100	15.09
S	<i>Short</i>	1495	70	9.40
C	<i>Conventional</i>	1547.5	35	4.39
L	<i>Long</i>	1595	60	7.08
U	<i>Ultralong</i>	1650	50	5.51

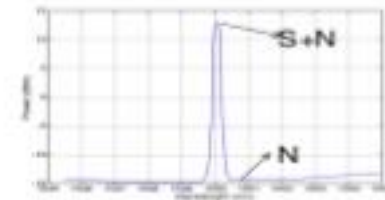
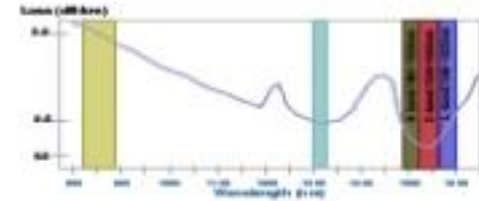
Total



59 THz

Transmission Impairments

- Attenuation
 - Loss of Signal Strength
- Chromatic Dispersion (CD)
 - Distortion of pulses
- Optical Signal to Noise Ratio (OSNR)
 - Effect of Noise in Transmission



Fibras em WDM

Single Mode (SM - G.652 ITU-T): it is the most common singlemode fiber. There are limitations to use this fiber in DWDM systems because it shows a high level of chromatic dispersion. It can be used with DCU devices with special optical segments. However the larger core area typical of these fibers allows a bigger number of wavelengths.

Fibras em WDM

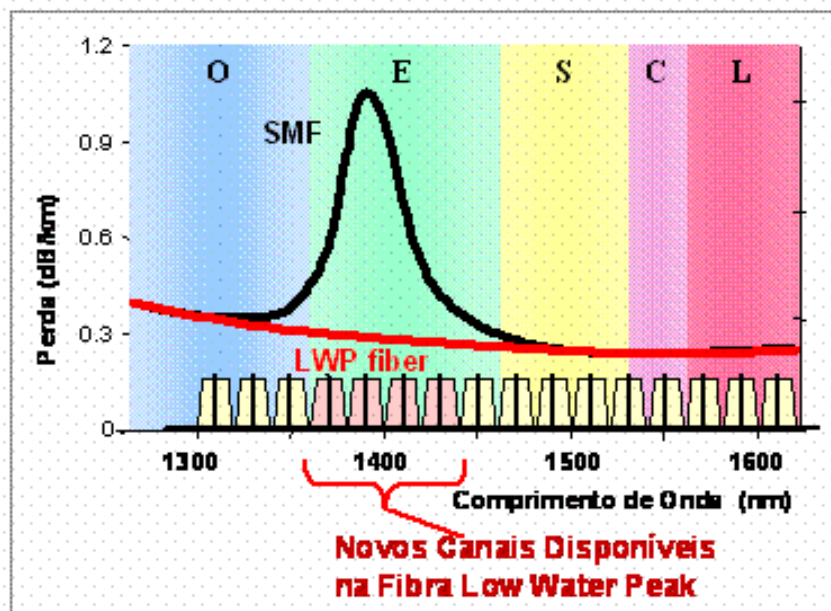
Dispersion Shifted (DS - G.653 ITU-T): The chromatic dispersion of this fiber is almost zero in C band. It was believed that this type of fiber would be ideal for DWDM systems. However nonlinear effects are stronger with these fibers, specially FWM.

Fibras em WDM

Non Zero Dispersion (NZD - G.655 ITU-T): this type of fiber was designed to correct DS fiber limitations. Its dispersion at 1550 nm is smaller than SM fiber (17 ps.nm/km) but not zero (8 ps.nm/km). To get this reduction the core was designed to a thinner diameter what is an impairment to a larger wavelength number.

Fibras em WDM

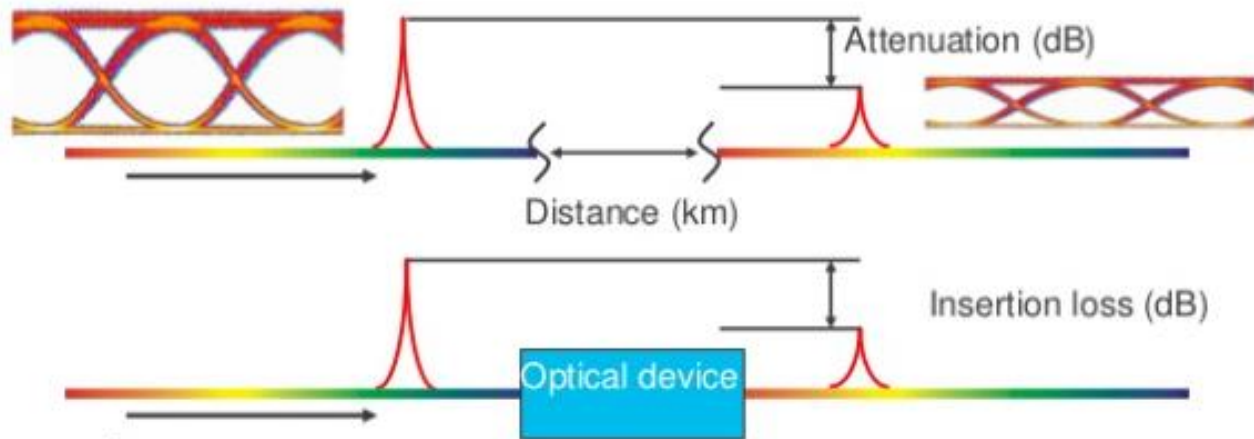
Low Water Peak (LWP - G.652D ITU-T): é tipo de fibra onde os processos industriais de produção permitem a diminuição ou eliminação do efeito "pico d'água", permitindo que a faixa de 1400 nm seja utilizada para tráfego de sistemas ópticos. Isso otimiza o uso de equipamentos CWDM, que atuam em toda a faixa, desde 1310nm até 1625nm, compreendendo as bandas O, E, C e L do espectro de luz.



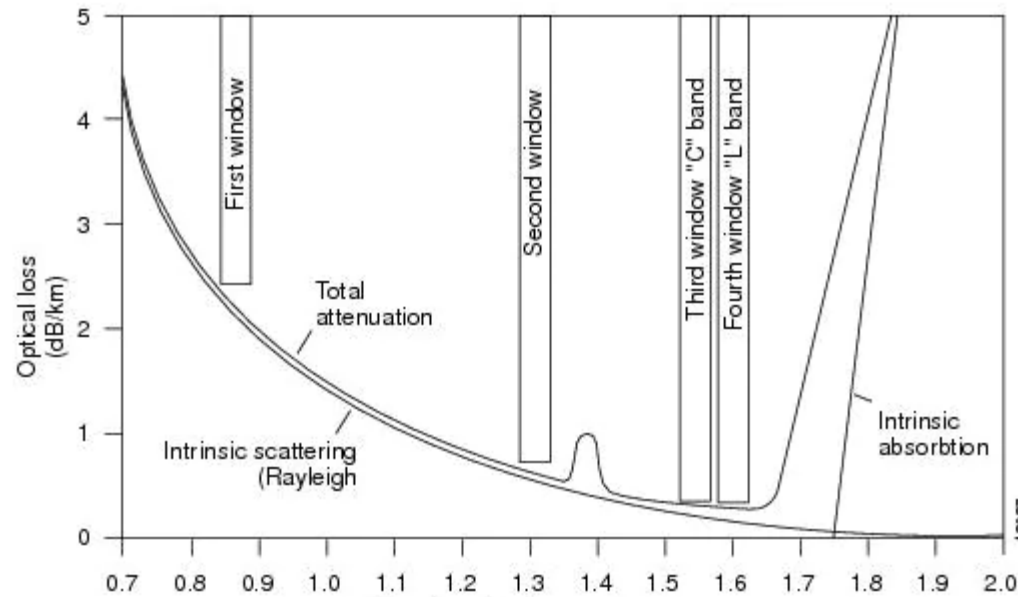
Attenuation

Attenuation

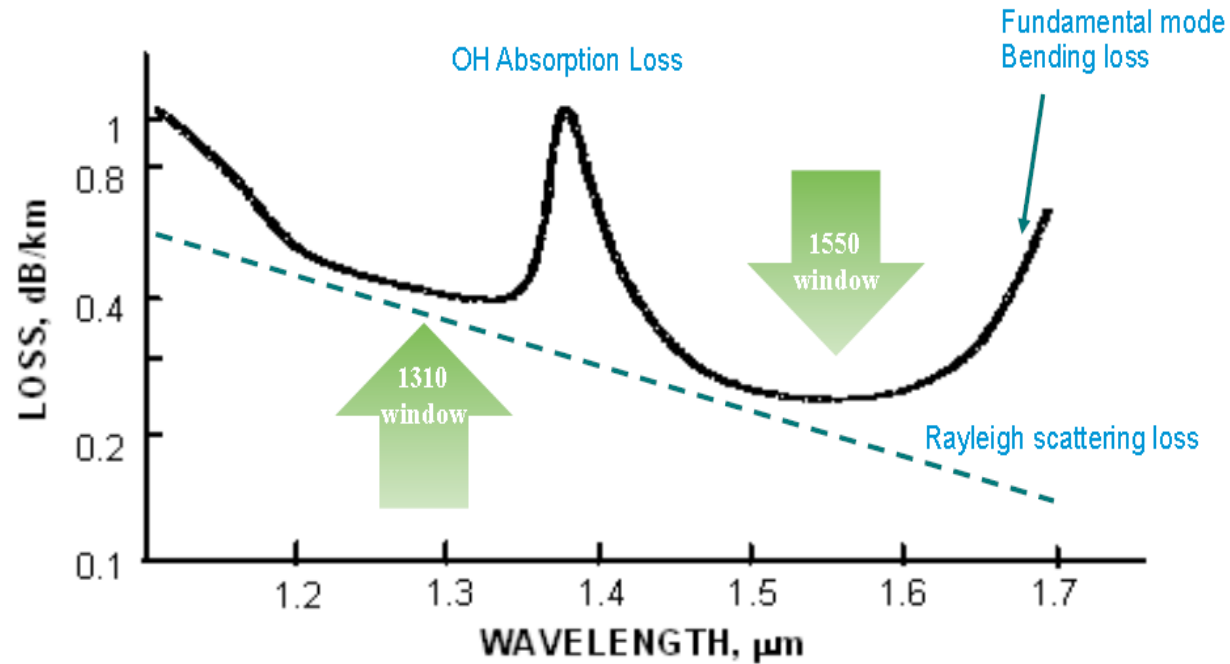
- With enough attenuation, a light pulse may not be detected by an optical receiver



Typical Attenuation of SingleMode Fibers



Attenuation x wavelength

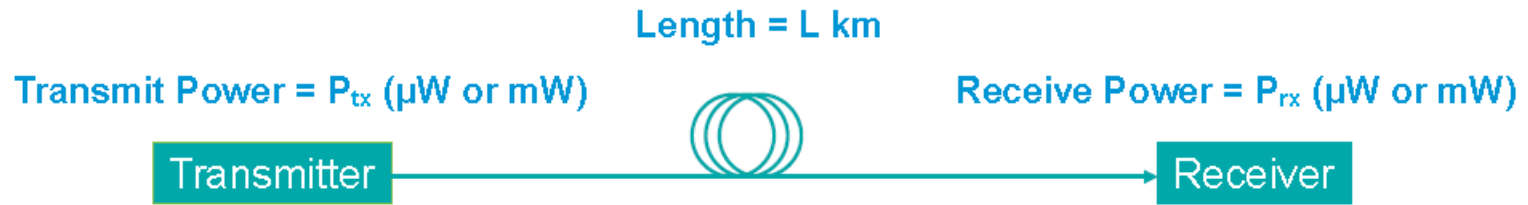


Attenuation is given in dB/km

0.40 dB/km @ 1310 nm, 0.25 dB/km @ 1550 nm

- Absorption loss is caused by impurities and water in 1400 nm - OH
- Rayleigh scattering loss (higher frequencies)

Attenuation



Fiber attenuation is given in dB/km calculated as:

$$[10 \log(P_{tx}/P_{rx})]/L$$

Example

A fiber with length equal to 10Km shows $P_{in} = 10\mu\text{W}$ and $P_{out} = 6\mu\text{W}$

In dB we have:

Fiber loss = $10 \log(10/6) = 2.2\text{dB}$

Expressing in db/km = 0.22dB/Km

dB/Km \neq nepers

Laser Output Power

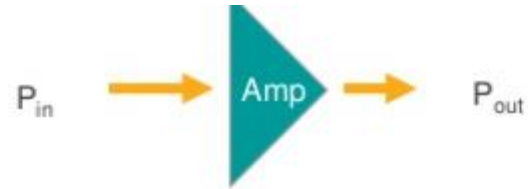
- Fiber loss expressed in dB but transmitter/receiver power is expressed in dBm
- This is why both the transmitter output power and the receiver sensitivity is expressed in dBm:

$\text{Power}_{\text{dBm}} = 10 \log(P_{\text{mW}}/1 \text{mW})$
dB and dBm are additive, hence the simplification

Example:

- $\text{Power}_{\text{dbm}} = 10 \log(2 \text{mW}/1 \text{mW}) = 3 \text{dBm}$
- $\text{Power}_{\text{dbm}} = 10 \log(1 \text{mW}/1 \text{mW}) = 0 \text{dBm}$

Gain in dB



- Gain expressed by ratio: P_{out}/P_{in}
- Gain measured conveniently in dB: $10 \log_{10} P_{out}/P_{in}$
- If the power is **doubled** by an amplifier, this is **+3 dB**

Optical Budget

Attenuation: Optical Budget

Basic Optical Budget = Tx Output Power – Rx Input Sensitivity



Optical Budget is affected by:

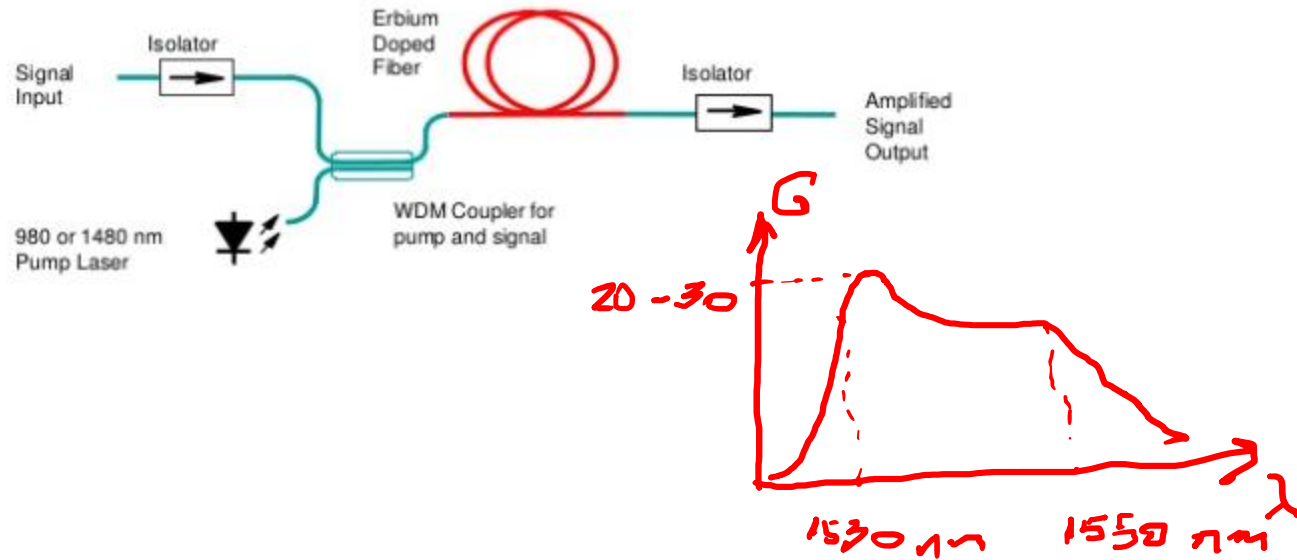
- Fiber attenuation
- Splices
- Patch Panels/Connectors
- Optical components (filters, amplifiers, etc.)
- Bends in fiber
- Contamination (dirt/oil on connectors)

...

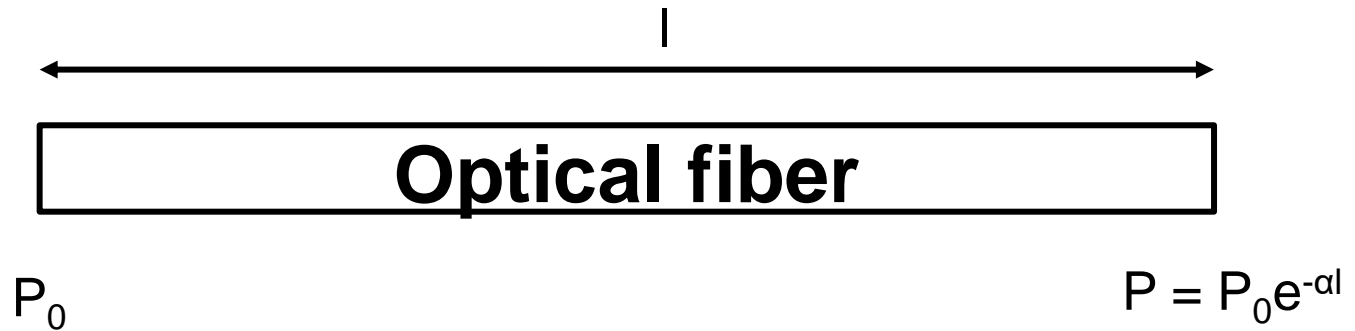
Amplification

Attenuation Solution: EDFA

- Erbium doped fiber amplifies optical signals through stimulated emission using 980nm and 1480nm pump lasers



Atenuação Óptica



$$\alpha_{dB/km} = 4,34 \cdot \alpha_{np/km}$$

Tipos de WDM

CWDM (Coarse Wave Division Multiplex): sistema cuja multiplexação óptica possui espaçamento de 200 GHz e pode variar a quantidade de canais de 4 a 16 dependendo da fibra óptica adotada. Sua taxa de transmissão pode variar de E3 (34 Mbit/s) a STM-16 (2,5 Gbit/s). Possui um melhor desempenho com o uso da fibra óptica tipo LWP.

DWDM (Dense Wave Division Multiplex): sistema cuja multiplexação óptica possui espaçamento que varia de 100 GHz a 25 GHz, e pode variar a quantidade de canais de 16 a 128. Sua taxa de transmissão pode variar de STM-1 (155 Mbits/s) a STM-64 (10 Gbits/s). Possui um melhor desempenho com o uso a fibra óptica tipo SM.

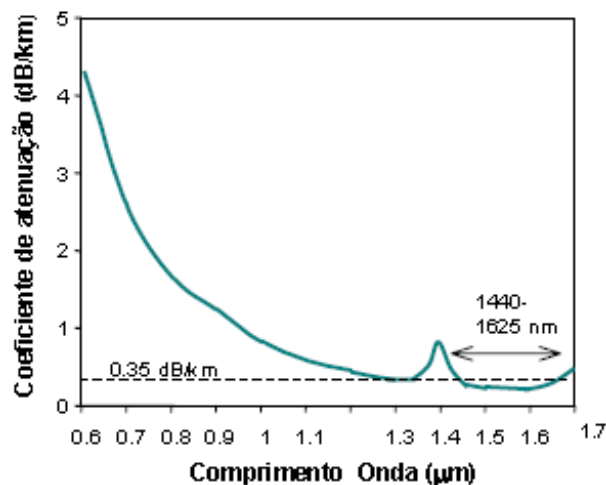
UDWDM (Ultra Dense Wave Division Multiplex): sistema cuja multiplexação óptica possui espaçamento menor que 25 GHz e possui uma quantidade de canais superior a 128. Este sistema atualmente ainda encontra-se em desenvolvimento.

Princípios básicos

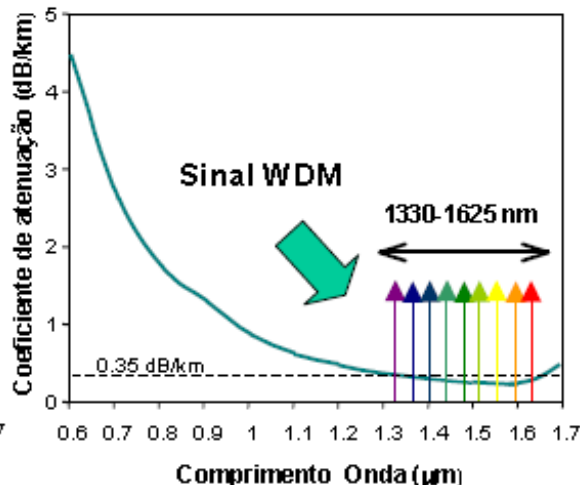
As fibras ópticas dividem-se em fibras monomodais e fibras multimodais. As redes WDM (Wavelength Division Multiplexing) só usam fibras monomodais.

Os principais fenômenos limitativos são a atenuação e a dispersão. O primeira é responsável por reduzir a amplitude dos pulsos e a segunda por alargá-los.

Fibra óptica monomodal normal



Fibra óptica monomodal "AllWave"



A fibra óptica monomodal normal apresenta um pico de atenuação devido à absorção OH em 1385 nm. A fibra "AllWave" elimina este pico.

Fibra Normal



A banda disponível para WDM (atenuação $\leq 0,35$ dB/km) situa-se entre os 1440 e 1625 nm, o que corresponde a 370 canais para um espaçamento de 0,5 nm.

Fibra "AllWave"



A banda disponível para WDM (atenuação $\leq 0,35$ dB/km) situa-se entre os 1330 e 1625 nm, o que corresponde a 590 canais para um espaçamento de 0,5 nm.

Potencia óptica e o dBm

- A potencia óptica é um sinal que pode ser medido em miliwatts (mW)
- dBm é a potencia óptica expressa em decibéis relativo a 1mW
- Potencia em dBm = $10 \log [\text{Potencia óptica (mW)}/1\text{mW}]$
- Exemplo

Optical Power mW	Optical Power dBm
0.1 mW	-10 dBm
1.0 mW	0 dBm
2.0 mW	+3 dBm
10 mW	+10 dBm
100 mW	+20 dBm

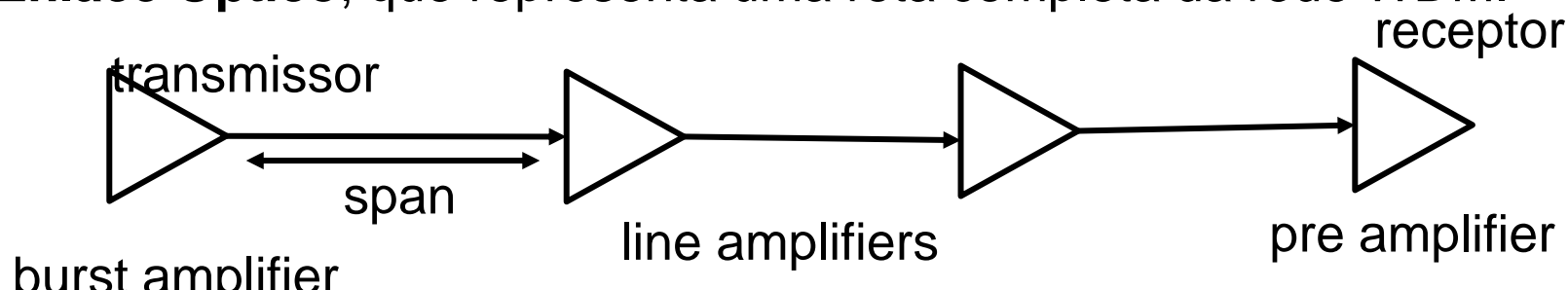
Potencia luminosa

A energia luminosa presente nos diversos segmentos da rede WDM deve ser criteriosamente projetada, para garantir tanto a qualidade de serviço como a vida útil especificada para o sistema. Desta forma, o cálculo do balanço de potência representa um fator importante para o projeto de redes WDM.

Para este cálculo torna-se importante ressaltar 2 conceitos definidos para a rede WDM:

"**Span**", que representa um trecho da rota física entre dois equipamentos WDM adjacentes na rede;

Enlace Óptico, que representa uma rota completa da rede WDM.



Princípios básicos

A atenuação (A_f) é uma medida da perda de potência do sinal óptico resultante da propagação ao longo da fibra óptica e exprime-se usualmente em decibel (dB), ou seja

$$A_f = 10 \log \frac{p_o(0)}{p_o(L)}$$

$p_o(0)$: potência na entrada em mW
 $p_o(L)$: potência na saída em mW

É usual nas comunicações em fibra óptica exprimir a potência óptica em dBm, definida como sendo o nível de potência, em escala logarítmica, medido relativamente a 1 mW, ou seja

$$P_o(\text{dBm}) = 10 \log \frac{P_o}{1 \text{ mW}}$$

0 dBm = 1 mW
30 dBm = 1W

Por sua vez

$$P_o(L)(\text{dBm}) = P_o(0)(\text{dBm}) - A_f(\text{dB})$$

A fibra óptica é caracterizada em termos do coeficiente de atenuação, definido como sendo a atenuação por unidade de comprimento, ou seja

$$\alpha(\text{dB/km}) = A_f(\text{dB}) / L(\text{km})$$

$$P_o(l) = P_o(0) \cdot e^{-\alpha l} \quad [\alpha] = \text{np/km}$$

O balanço de potência

é calculado levando-se em consideração os seguintes dados de projeto da rede WDM:

Capacidade de Transmissão do Enlace Óptico;

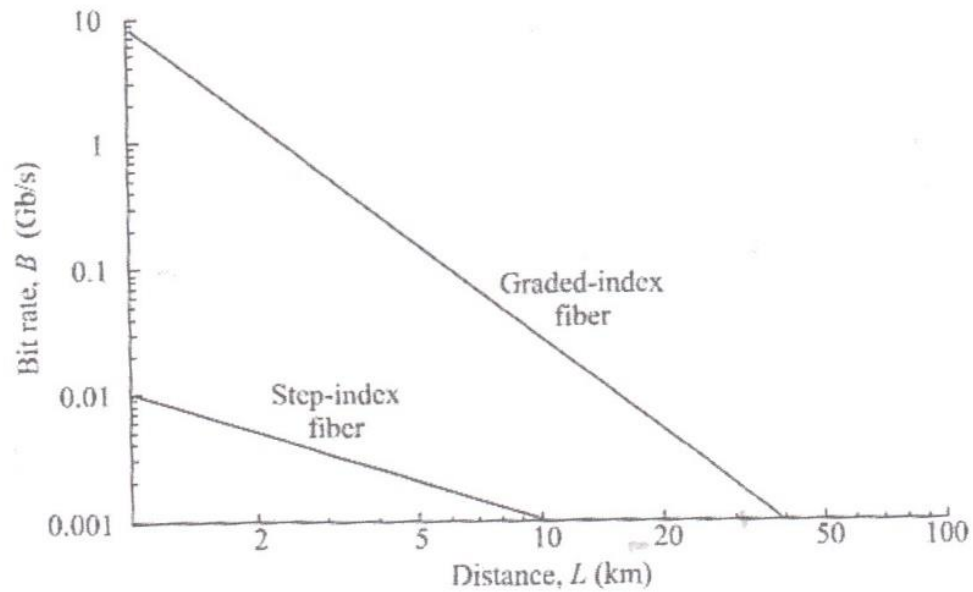
Número de comprimentos de onda (λ s), calculado em função da capacidade de transmissão;

Tipo de Fibra Óptica a ser utilizada, considerando suas características de atenuação e dispersão cromática;

Número de "span's" para cada Enlace Óptico;

Atenuação de cada "span".

Produto Banda Passante x Distância



Atenuação em fibras ópticas

As atenuações em fibras ópticas são causadas, basicamente, por 4 razões:

- **Absorção**

Como nenhum material é perfeitamente transparente, sempre ocorre uma absorção parcial de luz quando esta é forçada a atravessar um meio (absorção intrínseca). Numa fibra, além da absorção do material que compõe seu núcleo, pode haver variações de densidade, imperfeições na fabricação (absorção por defeitos estruturais), impurezas (absorção extrínseca) e outros fatores que aumentam ainda mais as perdas por absorção.

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.

Absorção

Absorção intrínseca:

Este tipo de absorção depende do material usado na composição da fibra e constitui-se no principal fator físico definindo a transparência de um material de numa região espectral especificada.

Absorção extrínseca:

A absorção extrínseca resulta da contaminação de impurezas que o material da fibra experimenta durante seu processo de fabricação.

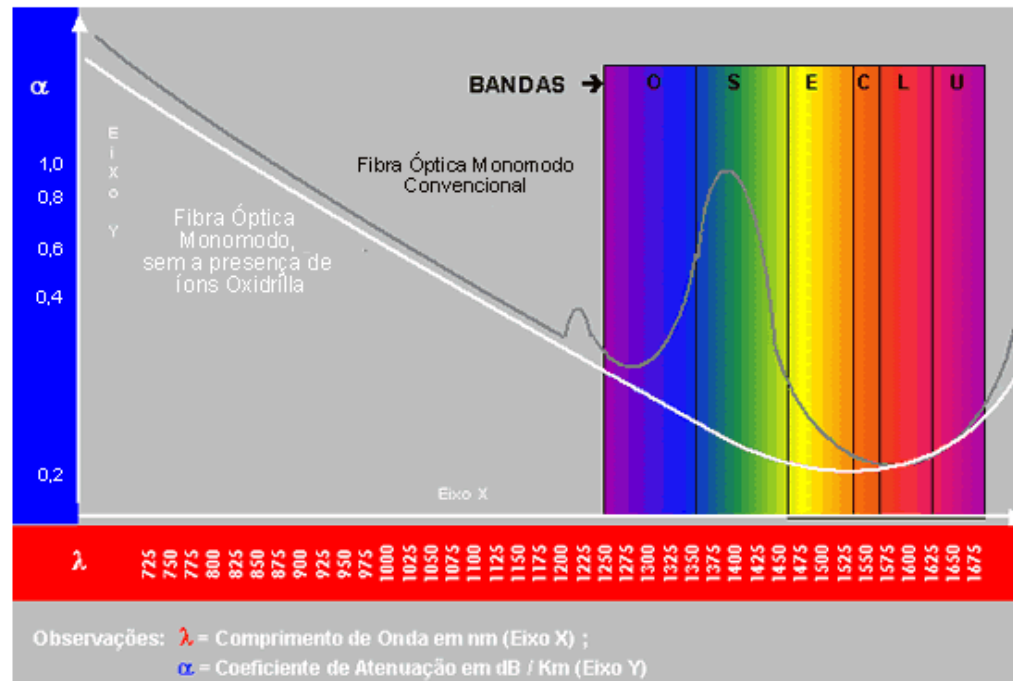
Absorção por efeitos estruturais:

A absorção por defeitos estruturais resulta do fato de a composição do material da fibra estar sujeita a imperfeições, tais como, por exemplo, a falta de moléculas ou a existência de defeitos do oxigênio na estrutura do vidro.

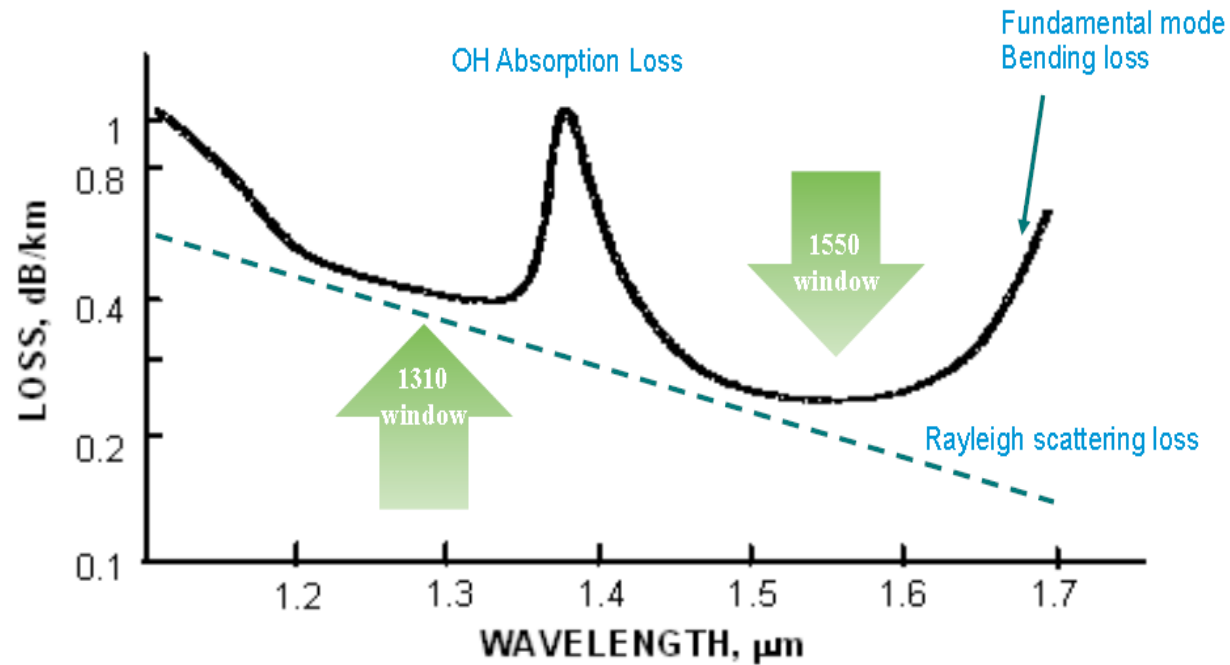
Atenuação em fibras ópticas

Pode ser devido a contaminação por íons hidroxila (OH^-), causada por água dissolvida no vidro (também chamada de atenuação por pico de água, *Water Peak Attenuation*, WPA), que, por sua relevância nas tecnologias pioneiras de fibra óptica, definiram 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^- .

As janelas ópticas continuam servindo como referência para os sistemas ópticos, sendo cada uma delas associada a um tipo de aplicação específico.



Curva de atenuação x comprimento de onda



Atenuação é especificada em dB/km

0.40 dB/km @ 1310 nm, 0.25 dB/km @ 1550 nm

- **Perda por absorção de impurezas em 1400 nm - OH (-água) ions**
- **Rayleigh scattering loss (limite fundamental das perdas na fibra)**

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. O principal é o espalhamento de Rayleigh, causado por variações aleatórias na densidade do material da fibra, advindas do processo de fabricação. Outros espalhamentos são causados por imperfeições na estrutura cilíndrica da fibra, vibrações moleculares térmicas e outros fatores, sempre causando perda na potência de luz transmitida.

Espalhamento

É o mecanismo de atenuação que exprime o desvio de parte da energia luminosa guiada pelos vários modos de propagação e várias direções. Existem alguns tipos de espalhamento:

Espalhamento Rayleigh:

Está sempre presente devido à existência de não homogeneidades microscópicas de dimensões menores do que o comprimento de onda, tais como flutuações de comprimento, flutuações térmicas, separação de fase, pressão e pequenas bolhas.

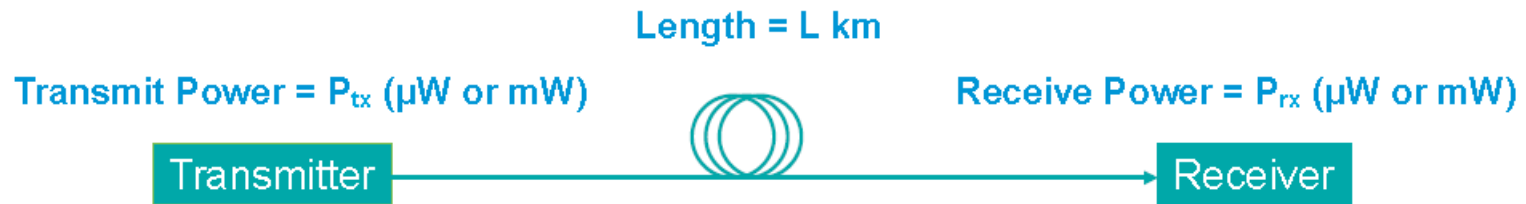
Espalhamento Mie:

Este espalhamento é verificado quando as imperfeições que causam o espalhamento citado anteriormente forem de dimensões comparáveis com o comprimento de onda guiado e principalmente quando houver sinuosamente do eixo da fibra.

Espalhamento Raman e Brillouin Estimulados:

Estes espalhamentos são efeitos não lineares, causados quando a intensidade de campo na fibra for muito alta.

Cálculo de atenuação



A atenuação na fibra é expressa em dB/km calculado por:

$$10 \log_{10} (P_{tx}/P_{rx})/L$$

Exemplo:

Uma fibra de comprimento de 10Km tem $P_{in} = 10\mu W$ e $P_{out} = 6\mu W$
Este valor expresso em dB é:

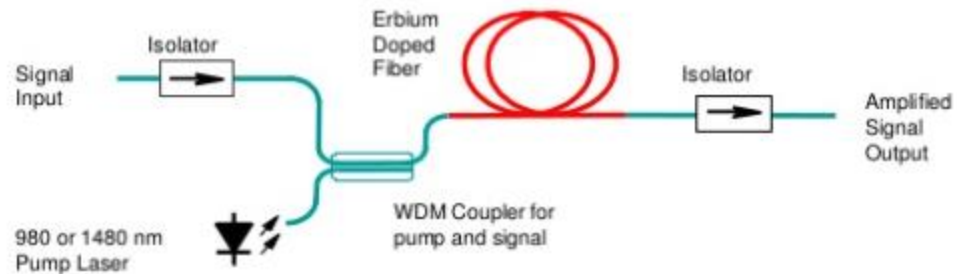
Perda na fibra = $10 \log (10/6) = 2.2dB$

Expressa em db/km = $0.22dB/Km$

Amplification

Attenuation Solution: EDFA

- Erbium doped fiber amplifies optical signals through stimulated emission using 980nm and 1480nm pump lasers



Curvaturas

Quando a luz na fibra óptica encontra curvas, sejam elas macroscópicas (curva de uma fibra numa quina, por exemplo) ou microscópicas (pequenas ondulações na interface entre a casca e o núcleo), alguns raios de luz podem formar um ângulo inferior ao ângulo crítico e saírem da fibra, causando perda de potência.

Curvatura

As fibras ópticas estão sujeitas a perdas de transmissão quando submetidas a curvaturas que podem ser classificadas em dois tipos:

Curvaturas cujos raios de curvatura são grandes comparados com o diâmetro da fibra (ocorrem por exemplo, quando um cabo óptico dobra um canto ou uma esquina).

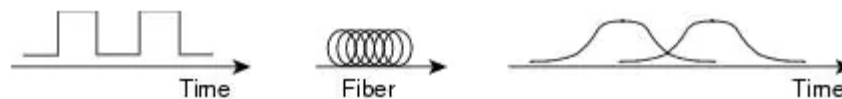
Curvaturas microscópicas aleatórias do eixo da fibra cujos raios de curvatura são próximos ao raio do núcleo da fibra (ocorrem quando as fibras são incorporadas em cabos ópticos).

$$R_c = \frac{3n_1^2 \lambda}{4\pi(n_1^2 - n_2^2)^{3/2}}$$

Fibra monomodo @ 1550 nm: $R_c \gg 15\text{mm}$

Dispersion

- Dispersion is the name given to any effect wherein different components of the transmitted signal travel at different velocities in the fiber, arriving at different times at the receiver.
- A signal pulse launched into a fiber arrives smeared at the other end as a consequence of this effect.
- This smearing causes intersymbol interference, which in turn leads to power penalties.
- Dispersion is a cumulative effect: the longer the link, the greater the amount of dispersion.
- Forms of dispersion: *intermodal dispersion, polarization-mode dispersion, and chromatic dispersion.*
- Polarization-mode dispersion (PMD) arises because the fiber core is not perfectly circular, particularly in older installations.



Dispersão

São diferentes atrasos de propagação dos modos que transportam a energia luminosa, tem por efeito a distorção dos sinais transmitidos Os tipos de dispersão que predominam nas fibras são:

Dispersão modal:

Este tipo de dispersão só existe em fibras do tipo multimodo (degrau e gradual) e é provocada basicamente pelos vários caminhos possíveis de propagação que a luz pode ter no núcleo.

Dispersão cromática:

Como o índice de refração depende do comprimento de onda e como as fontes luminosas existentes não são ideais, ou seja, possuem uma certa largura espectral finita, temos que cada comprimento de onda enxerga um valor diferente de índice de refração num determinado ponto.

Dispersão de guia de onda:

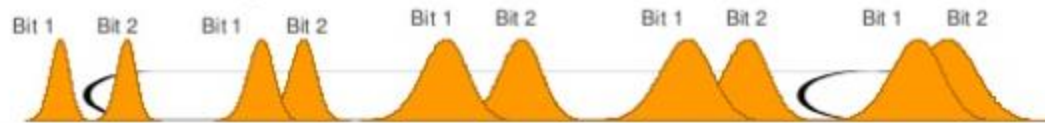
É provocado por variações nas dimensões do núcleo e variações no perfil de índice de refração ao longo da fibra óptica e depende também do comprimento de onda da luz.

Chromatic dispersion

- Arises because different frequency components of a pulse (and also signals at different wavelengths) travel with different group velocities in the fiber, and thus arrive at different times at the other end.
- Chromatic dispersion is a characteristic of the fiber, and different fibers have different chromatic dispersion profiles.
- As with other kinds of dispersion, the accumulated chromatic dispersion increases with the link length.
- The transmission limitations imposed by chromatic dispersion can be modeled by assuming that the pulse spreading due to chromatic dispersion should be less than a fraction ϵ of the bit period, for a given chromatic dispersion penalty.
- This fraction has been specified by both ITU (G.957) and Telcordia (GR-253).
- For a penalty of 1 dB, $\epsilon = 0.306$, and for a penalty of 2 dB, $\epsilon = 0.491$.

Chromatic Dispersion Effect

Chromatic Dispersion (CD)



The Optical Pulse tends to Spread as it propagates down the fiber generating Inter-Symbol-Interference (ISI)

- Total dispersion is a function of the length of fiber and its dispersion factor
- Limits transmission distance for 10G and above wavelengths
- Can be compensated by using negative dispersion fiber or electronically through modulation schemes

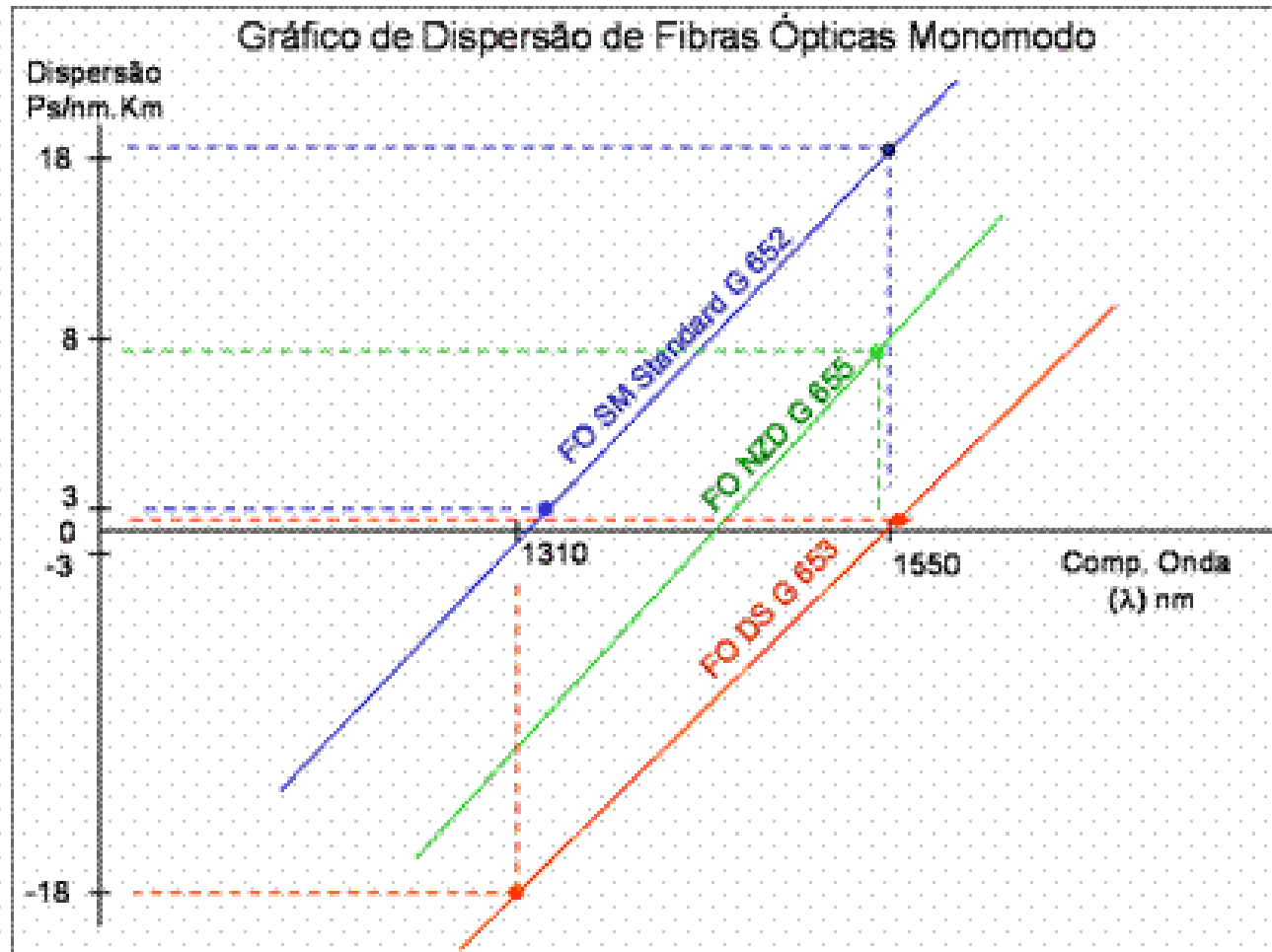
Relation between D and ϵ

- If D is the fiber chromatic dispersion at the operating wavelength, B the bit rate, $\Delta\lambda$ the spectral width of the transmitted signal, and L the length of the link, this limitation can be expressed as:

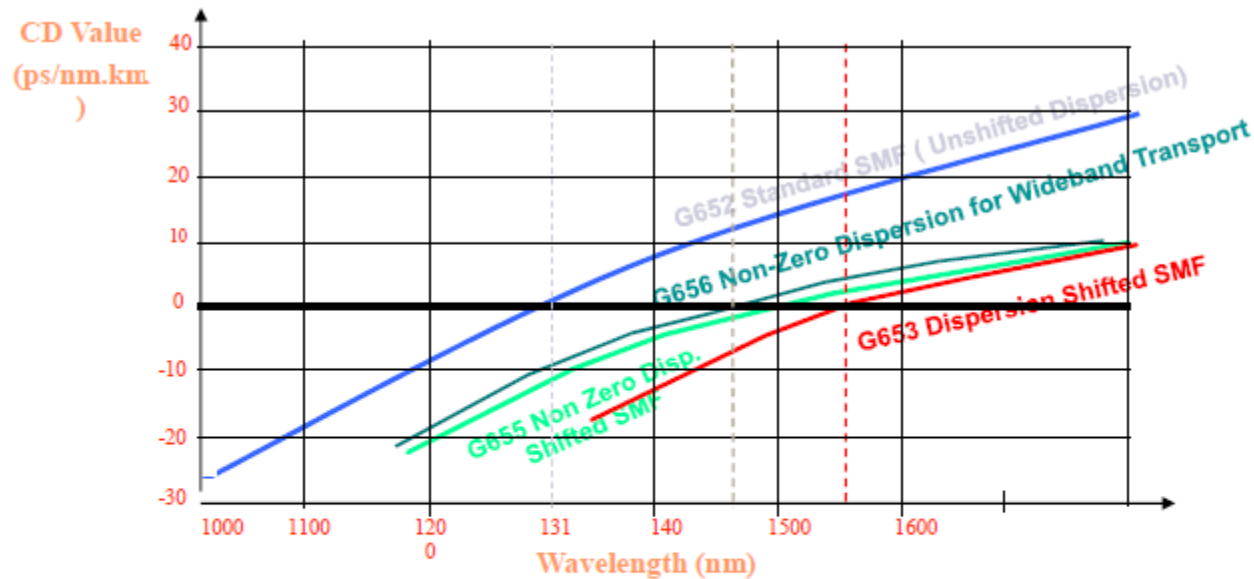
$$|D|LB(\Delta\lambda) < \epsilon.$$

- D is usually specified in units of ps/nm-km. Here, the ps refers to the time spread of the pulse, the nm is the spectral width of the pulse, and km corresponds to the link length.
- For standard single-mode fiber, the typical value of D in the C-band is 17 ps/nm-km. For this value of D, $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$, and $\epsilon = 0.491$ (2 dB penalty), yields the condition $BL < 29$ (Gb/s).km

Fibras em WDM



Commercial fibers and dispersion

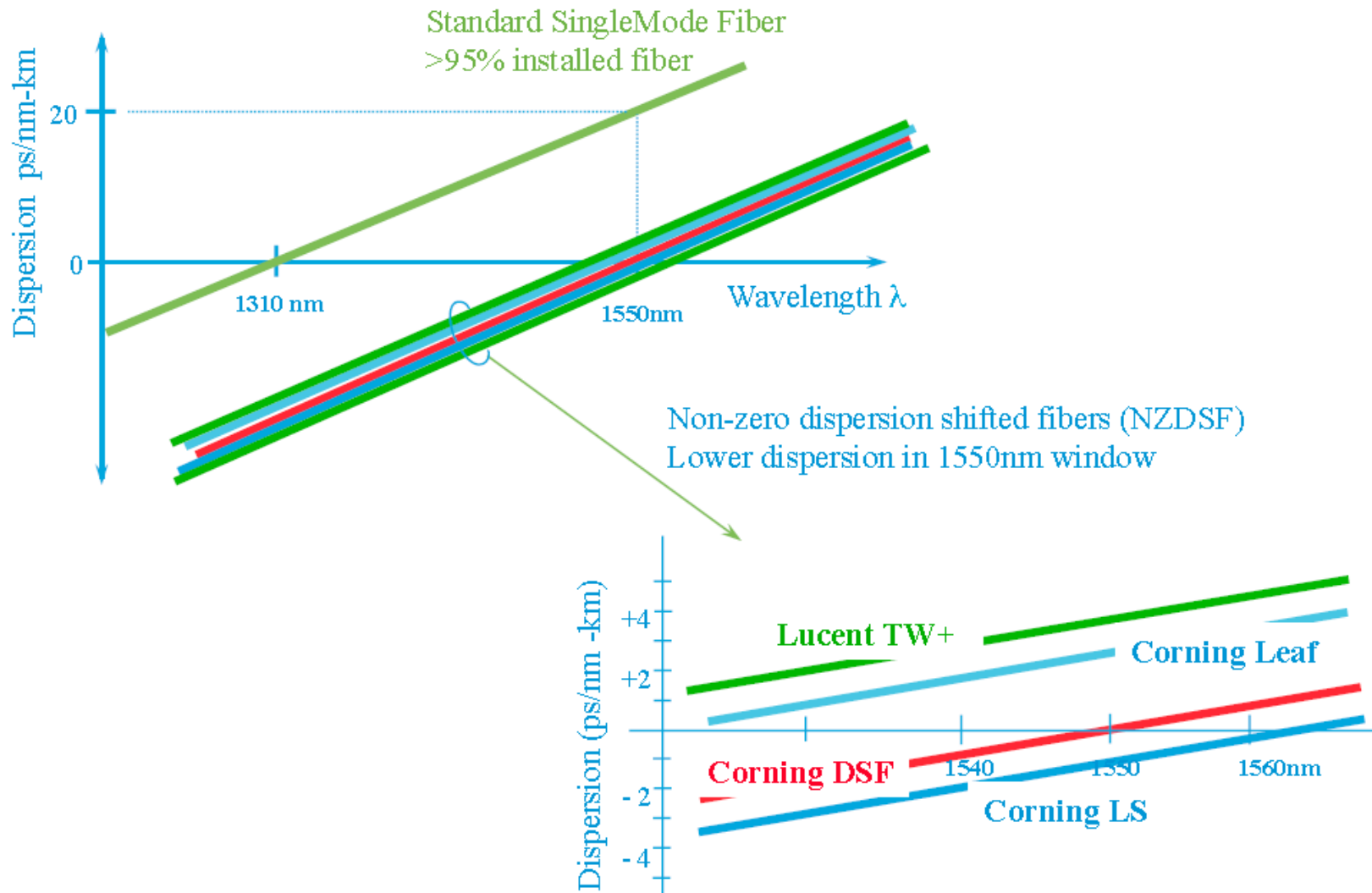


G.652 especificação fibra: ~ 17 ps/(nm.km) at 1550nm

G.653 especificação fibra: 0 ps/(nm.km) at 1550nm

G.655 especificação fibra: ~4 ps/(nm.km) at 1550 nm

Característica da dispersão na fibra



Limitações da dispersão

- Limitação de dispersão é definida pela tolerância de dispersão do transmissor e o receptor
- Dispersão total é calculado pelas características de dispersão da fibra e o comprimento da fibra para qualquer caminho de canal ou tráfego
- O efeito da dispersão na fibra deve ser considerado na potencia do transmissor
- Se algum canal chegou ao limite da dispersão, deve ser compensado ou o canal deve ser regenerado (O-E-S)
- Duplicação da taxa de bits resulta em um aumento de perda de dispersão de até quatro vezes

Minimizando a dispersão cromática

Dispersão geralmente não é um problema abaixo 10Gbps

- Fontes de laser de espectro estreito (modulação externa) e fontes de laser de baixo Chirp* reduzem a dispersão. Os componentes espectrais diferentes da fonte verão diferentes dispersões, ampliando assim o pulso
- Novos tipos de fibra (NZ-DSF) reduzem muito os efeitos
- Técnicas de compensação de dispersão
- Fibra de compensação de dispersão
- Filtros ópticos compensadores de dispersão
- Unidades de compensadores de dispersão (DCU) geralmente colocado em estágios intermediários e acesso do EDFA para atenuar a perda de inserção de DCU

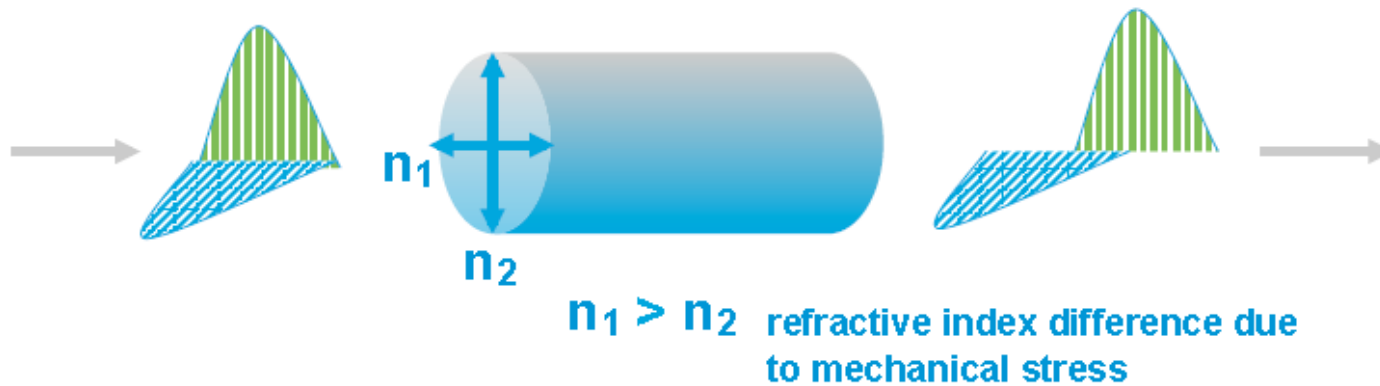
* Chirp: frequência de alterações de pulso lançado, com tempo

PMD- Dispersão de modo de polarização

PMD provoca uma ampliação do sinal óptico

- Em fibra óptica ideal, o núcleo tem uma seção perfeitamente circular. No presente caso, o modo fundamental de luz tem duas polarizações ortogonais (orientações do campo elétrico), que viajam na mesma velocidade através da fibra

- Birrefringência (variação de índice de refração entre dois eixos de polarização) surge devido a imperfeições aleatórias e assimetrias, provoca ampliação do pulso óptico devido os dois Estados de polarização ortogonal viajando em velocidades diferentes



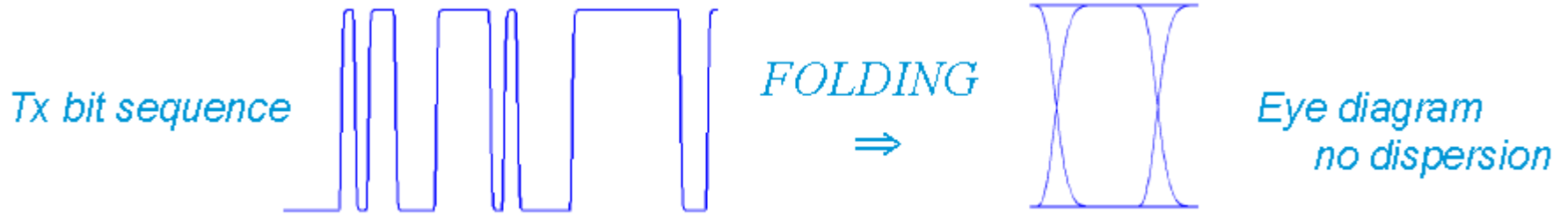
Limitações de distância na dispersão

$$\text{Distance (Km)} = \frac{\text{Dispersion Tolerance of Transponder (ps/nm)}}{\text{Coefficient of Dispersion of Fiber (ps/nm*km)}}$$

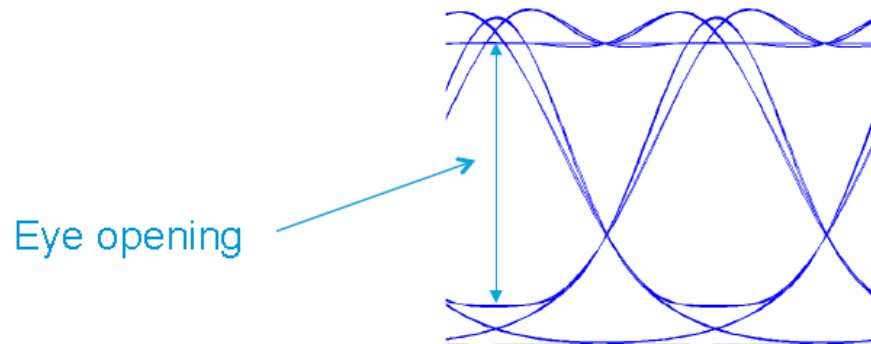
Dispersão limitada a distâncias de transmissão sobre fibra SMF (17 ps/nm/km):

Transmission Rate	Modulation format	Dispersion Tolerance	Distance
2.5 Gb/s	External Modulation	20,000 ps/nm/km	~ 1,100 km
2.5 Gb/s	Direct Modulation	2,400 ps/nm/km	140 km
10 Gb/s	External Modulation	1,200 ps/nm/km	70 km
40 Gb/s	External Modulation	200 ps/nm/km	12 km

Efeito da dispersão cromática

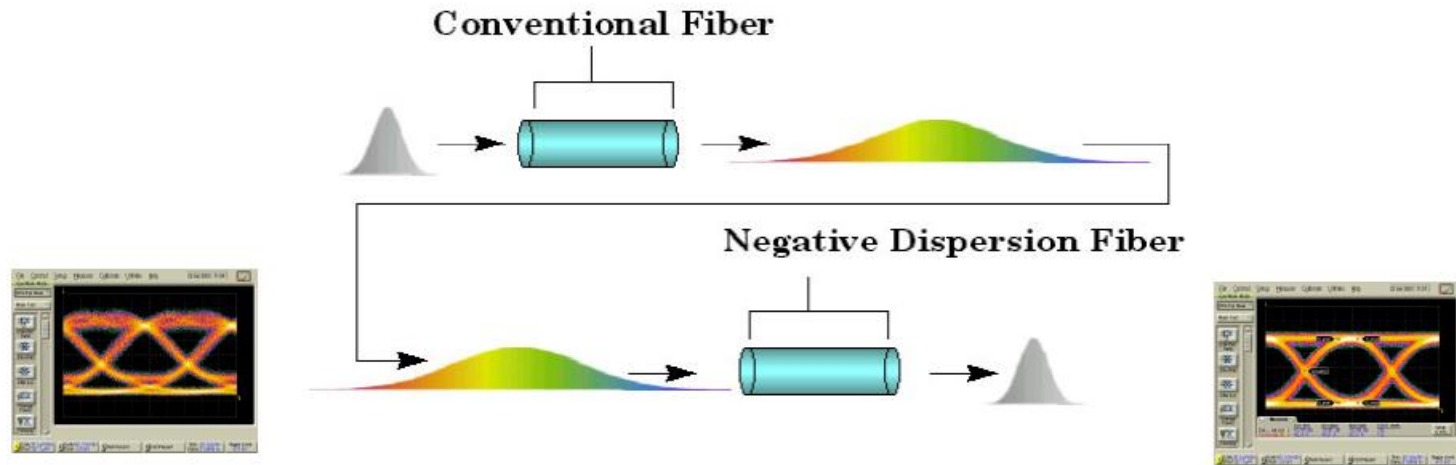


- Em fibra os componentes diferentes de frequência do sinal propagam-se em diferentes velocidades
- O efeito é a distorção do sinal e interferência intersimbólica, o resultado é o “fechamento do olho”
- Pode ser compensado com o uso da compensação de dispersão



Unidade de compensação de dispersão -DCU

Compensadores de fibra para combate a dispersão



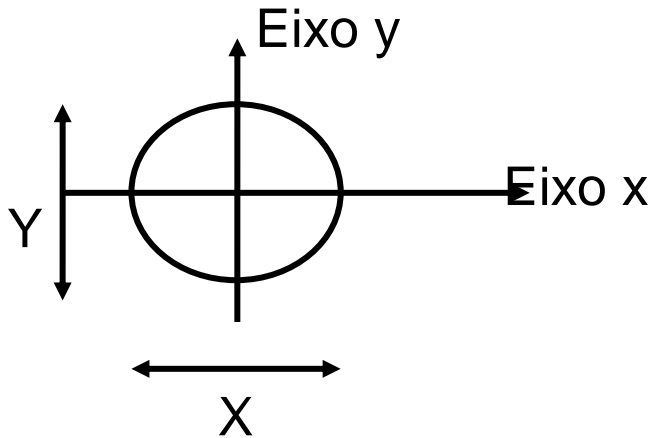
DCUs usam fibras com dispersão cromática de sinal oposta ou inclinação de comprimento adequado para trazer a dispersão média do link próximo de zero.

A fibra de compensação pode ser vários quilômetros de comprimento, DCU são normalmente inseridos após cada intervalo

Dispersão por Modo de Polarização (PMD)

$X/Y = 1 \Rightarrow$ perfeitamente circular

Caso contrário \Rightarrow excentricidade



PMD & Taxa de Bit de dependência

- O "coeficiente PMD", com unidades de ps/km^{1/2}, indica a taxa de no qual PMD acumula ao longo do comprimento da fibra
- Limites ópticos são atingidos em sistemas de transmissão de alta velocidade
- Tolerância PMD típico
 - 2.5 Gbps: normalmente 40 ps
 - 10 Gbps: normalmente 10 ps
 - 40 Gbps: normalmente 2,5 ps
- Problemas de energia devido ao PMD (1-2 dB)

$$T_p = P.L^{1/2}$$

Distâncias de transmissão limitada PMD

Enlace PMD :

- Fibras individuais têm valores superiores PMD quando concatenados em um link
- O valor de ligação PMD determinam o limite superior estatístico para sistema PMD

ELEAF: PMD spec ≤ 0.1 ps/km^{1/2}, PMD Link Value of ≤ 0.04 ps/km^{1/2}

Leads to PMD limited system length of:

Transmission Rate	Distance
2.5 Gb/s	1,000,000 km
10 Gb/s	62,500 km
40 Gb/s	3,906 km

Old SMF: PMD spec ≤ 0.5 ps/km^{1/2}, PMD link value of ≤ 0.2 ps/km^{1/2}

Leads to PMD limited system length of:

Transmission Rate	Distance
2.5 Gb/s	40,000 km
10 Gb/s	2,500 km
40 Gb/s	156 km

Combate ao PMD

- Não é um problema em 2,5 Gbps
- 2000 + Km em 10 Gbps em fibra típica
- Aumento da solidez do sistema frente ao FEC e formatos de modulação do transmissor otimizado
- Implantar fibras PMD-otimizado
- Uso compensação PMD (PMDC) (por exemplo, eletrônico pós-processamento em 40/100G com módulo óptico DSP)