

# Tecnologia DWDM

Version 1.0



# Fundamentos de DWDM

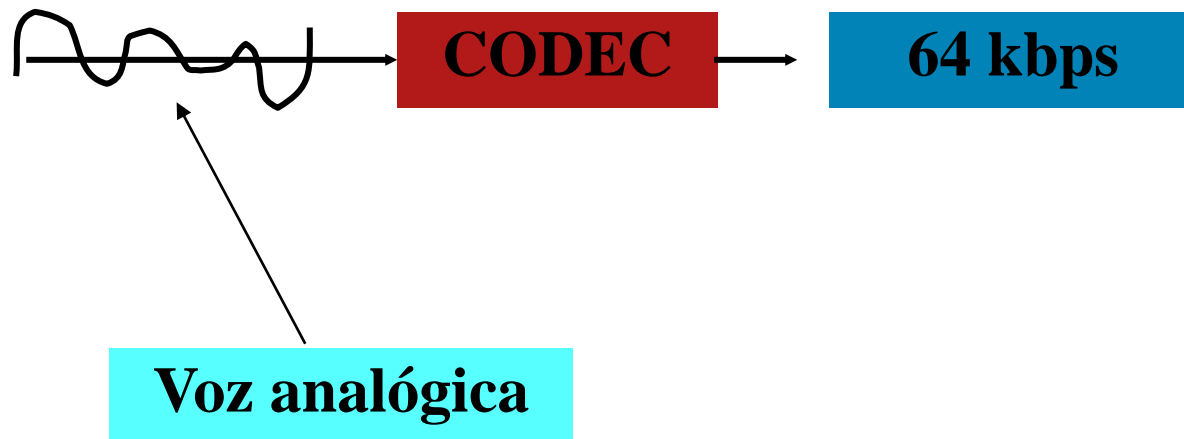
O que é TDM?

# Introdução

TDM – Multiplexação por Divisão de Tempo

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

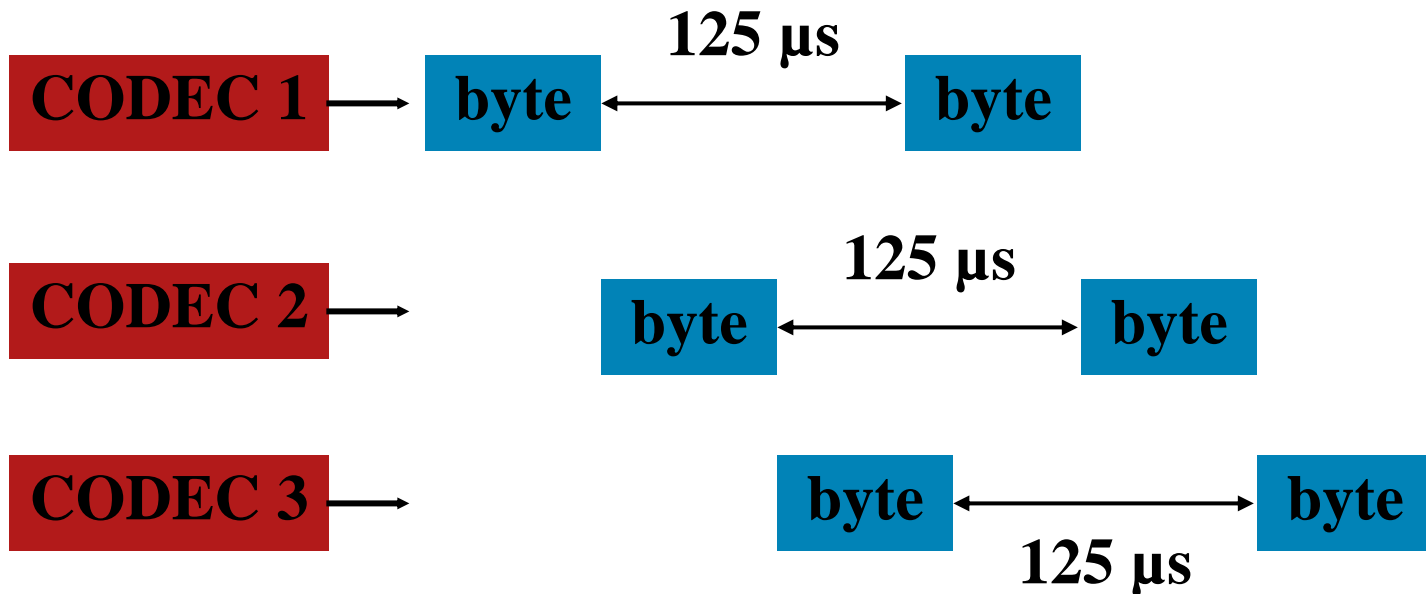
O canal de voz analógico pode ser codificado para digital utilizando técnicas de PAM/PCM



# Estrutura Lógica TDM/PCM

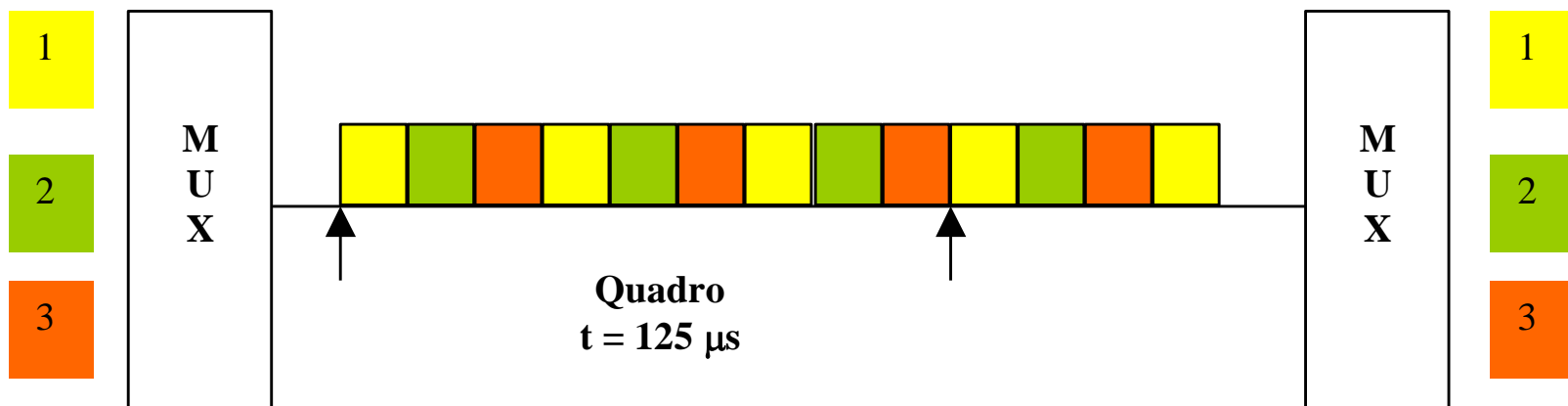
Um conjunto de 8 bits são enviados a cada 125  $\mu$ s.

Taxa = 8 bits / 125 $\mu$ 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

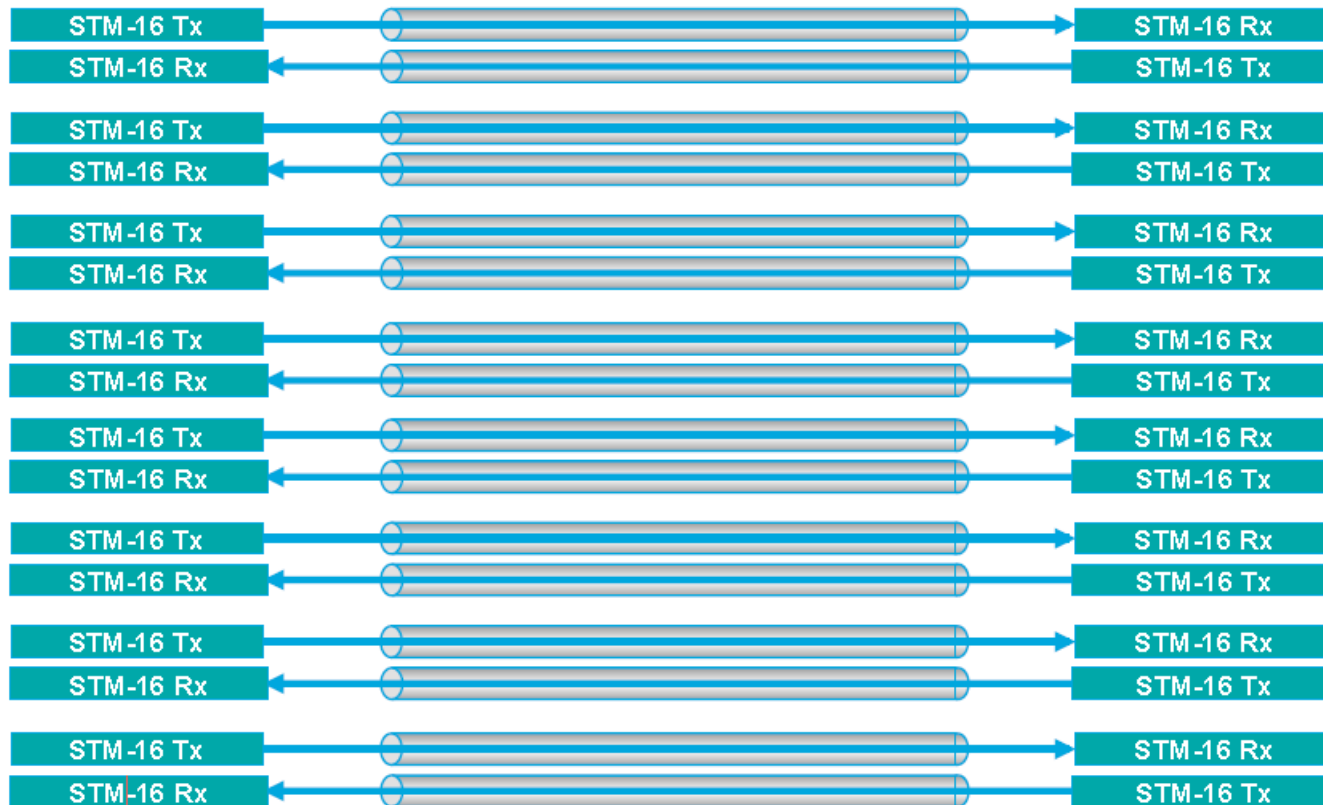
Área de dados

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

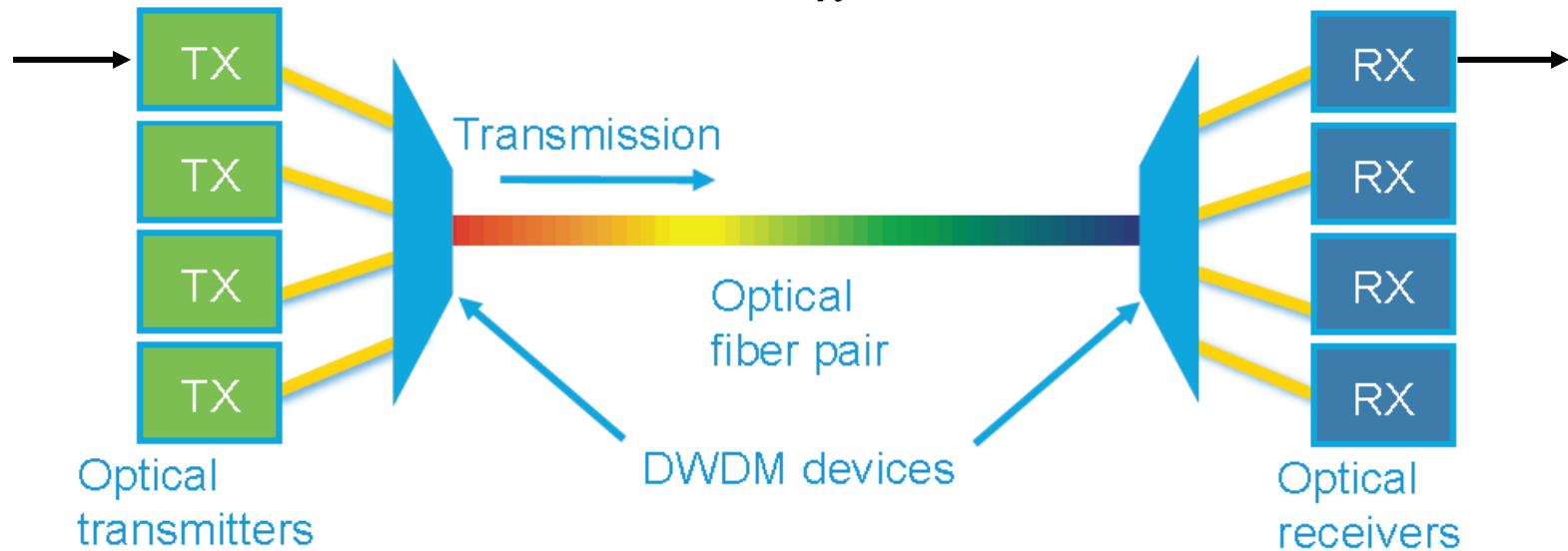
O que é DWDM



# 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

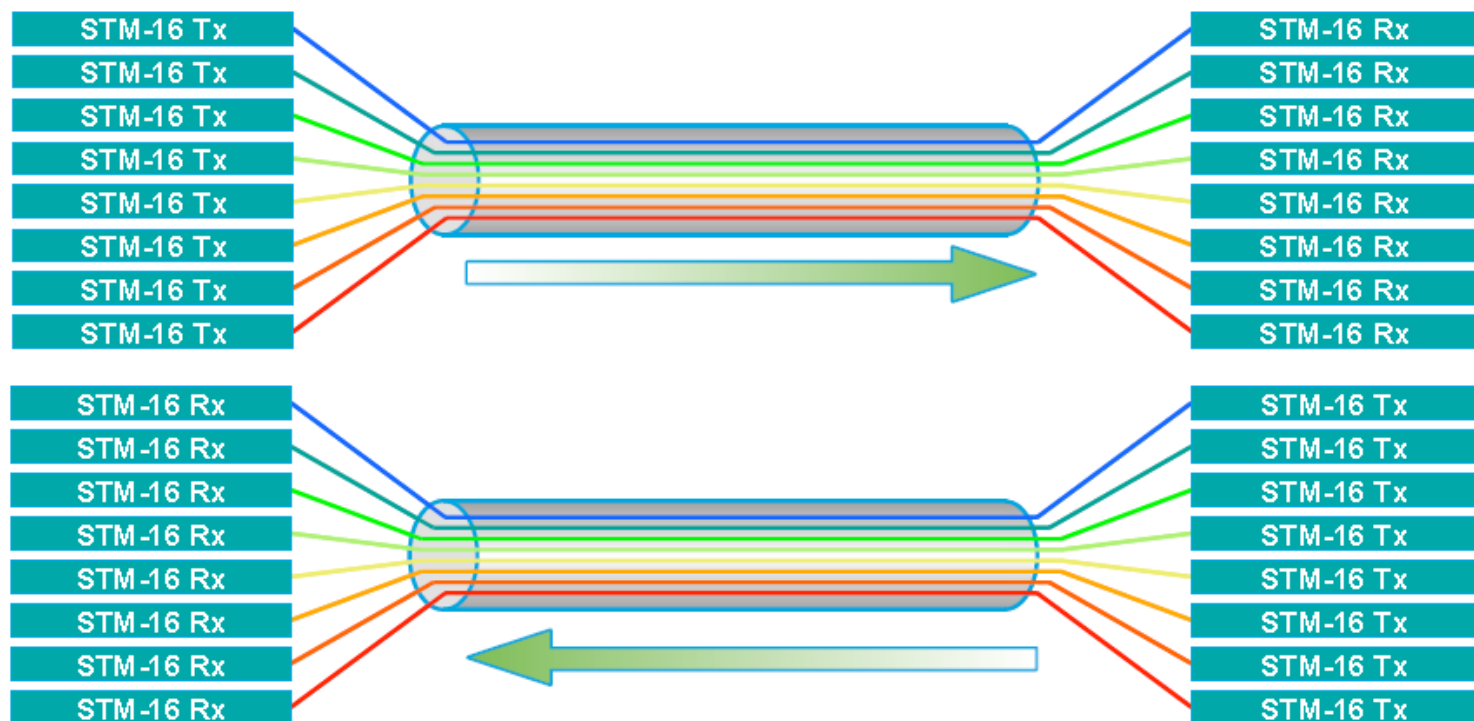
# Mesmo exemplo anterior no caso DWDM

## 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



# 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



Colorful signal

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



# Atenuação Óptica

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

# Multiplexação Óptica

É a característica mais importante a ser definida quando do planejamento de um sistema WDM. De acordo com as necessidades da aplicação, identifica-se o qual tipo de sistema WDM a ser implantado definindo-se o espaçamento entre os canais ópticos, limitando assim a sua capacidade. Este espaçamento, que pode variar de 200 GHz a 12,5 GHz, é padronizado pelas normas G.694.1 (DWDM) e G.694.2 (CWDM) do ITU-T.



# 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:

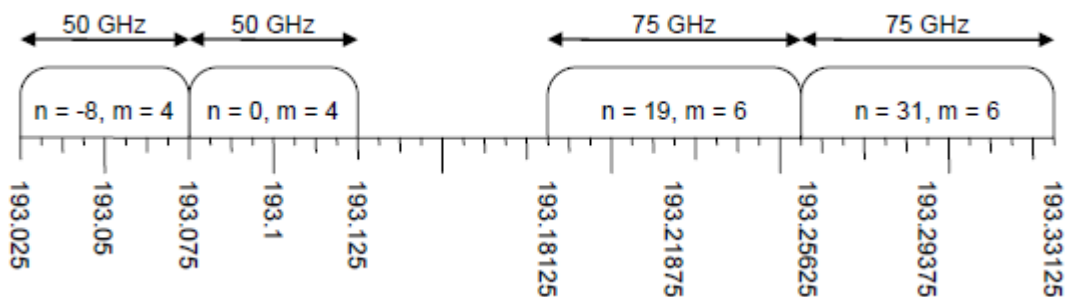
$12.5 \times m$  where  $m$  is a positive integer and 12.5 is the slot width granularity in GHz.

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

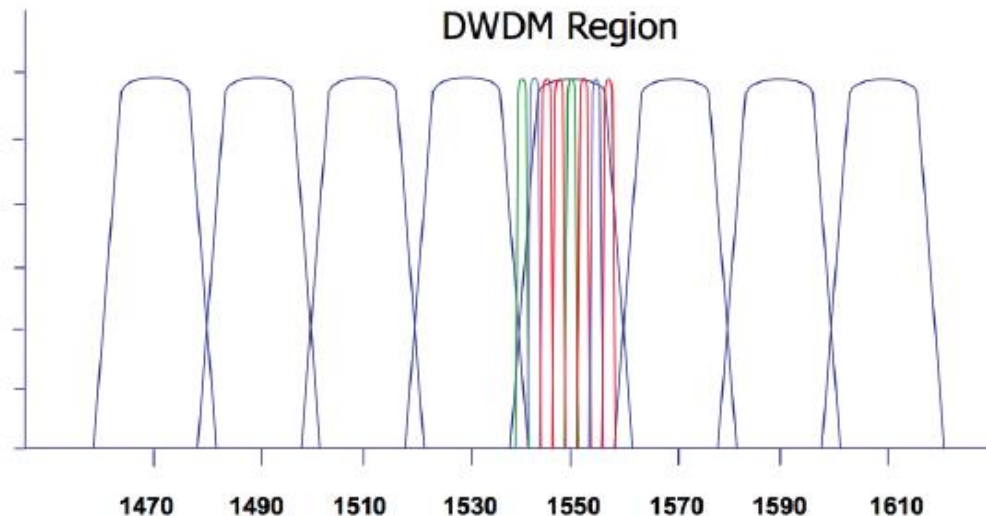


Qual devem ser os valores de  $n$  e  $m$  para encaixar um canal de 50 GHz no espaço disponível?

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

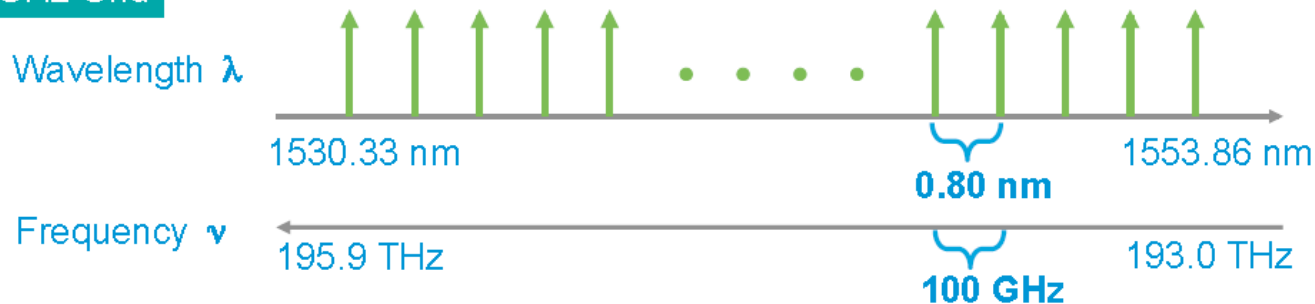


# Canalização óptica

Conforme ITU-T – canalização da luz

São baseadas em  $191,7\text{THz} \pm 100\text{GHz}$  ou  $\pm 50\text{GHz}$

## 100GHz Grid



## 50GHz Grid



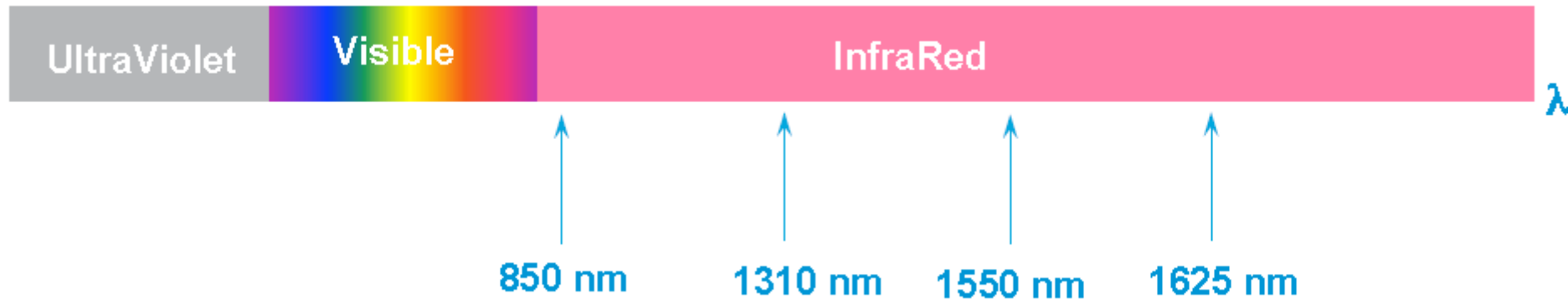
Qual a relação entre  $\Delta f$  e  $\Delta \lambda$ ?



# Fundamentos de DWDM

Fundamentos da tecnologia de transmissão óptica

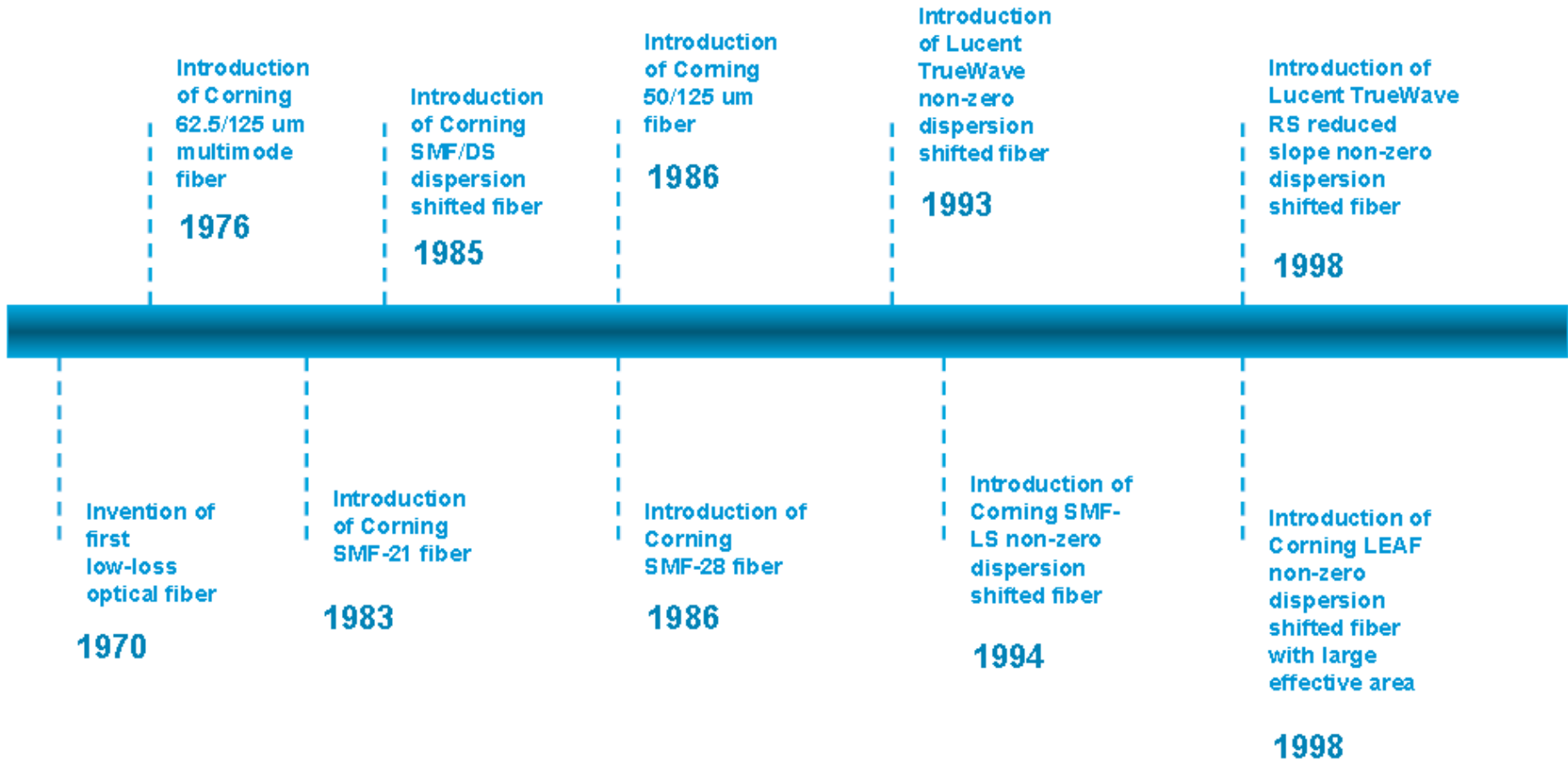
# Princípios básicos



- **850 nm sobre fibra multimodo**
- **1310 nm sobre fibra monomodo**
- **Banda-C: 1550nm sobre fibra monomodo**
- **Banda-L: 1625 nm sobre fibra monomodo**

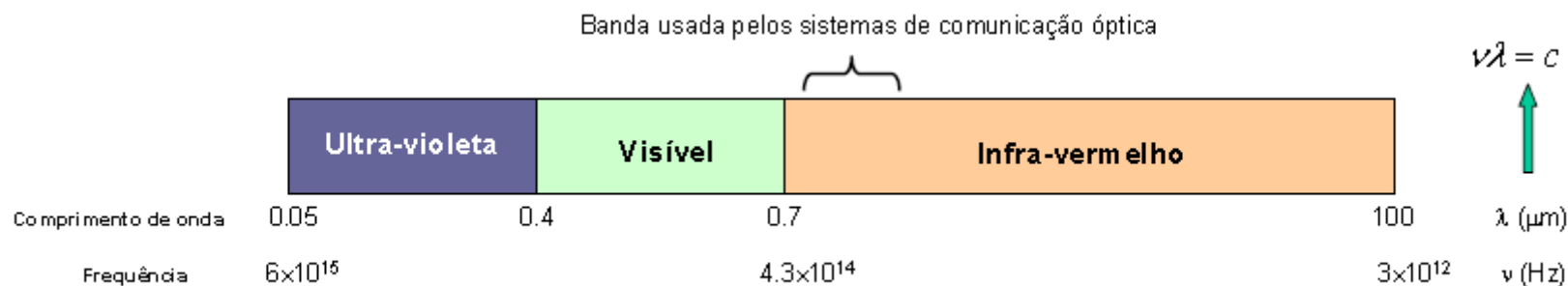


# Desenvolvimento da fibra

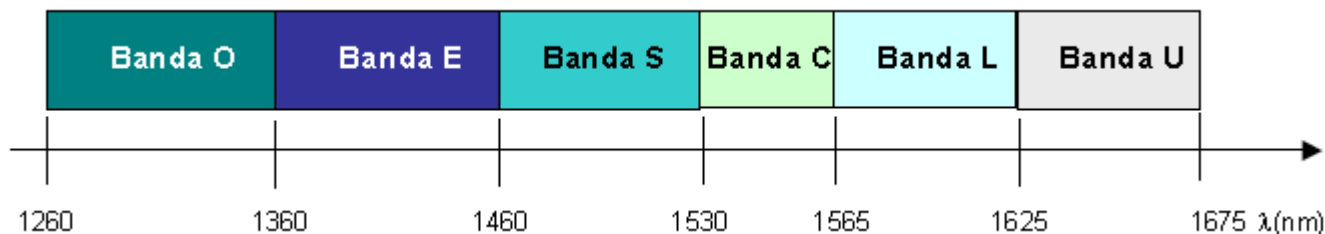


# Princípios básicos

Os sistemas de comunicação óptica operam na banda do espectro eletromagnético com comprimentos de onda entre os 800 e os 1600 nm, ou seja na região do infra-vermelho (não visível pelo olho humano).



O ITU (*International Telecommunications Union*) definiu seis bandas passíveis de serem usadas pelos sistemas de comunicação sobre fibra óptica. As bandas mais usadas pelos sistemas comerciais são as bandas O e C.



# 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

A relação entre um espaçamento no domínio da frequência ( $\Delta\nu$ ) 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  $\lambda_0$  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	$\lambda_0$ (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



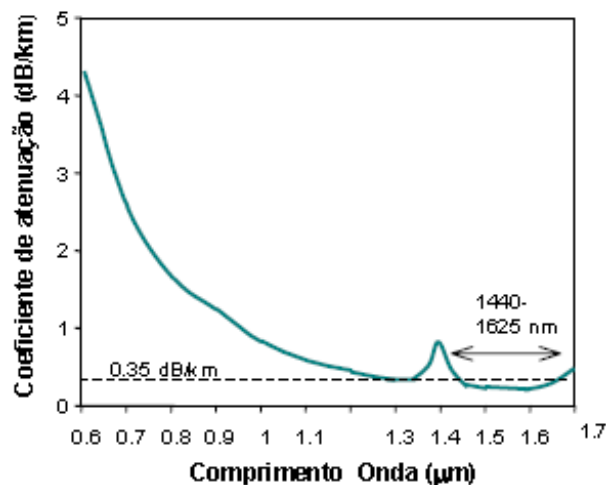
59 THz

# Princípios básicos

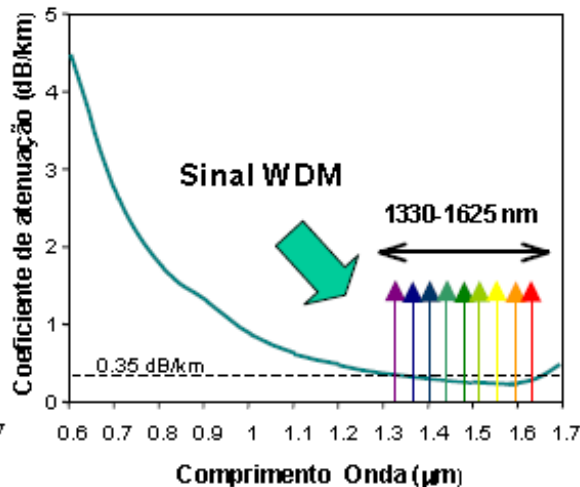
As fibras ópticas dividem-se em fibras monomodais e fibras multimodais. As redes WDM (Wavelength Division Multiplexing) só usam fibras monomodais.

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.

# Bandas de utilização

Janela	Designação	Banda (nm)	Tipo de fibra	Aplicações
Primeira	—	820-900	Multimodal	LAN, Ethernet Ex: 1000 Base-Sx
Segunda	O	1260-1360	Monomodal (G.652)	Mono- $\lambda$ PON, Ethernet
Terceira	C	1530-1565	Monomodal (G.655)	Mono- $\lambda$ e WDM
Quarta	L	1565-1625	Monomodal (G.653)	WDM
Quinta	E	1350-1450	Monomodal (All Wave)	WDM
Sexta	S	1460-1530	Monomodal (G.652)	WDM, LAN PON

# 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

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

# 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 ( $\lambda$ ), 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".



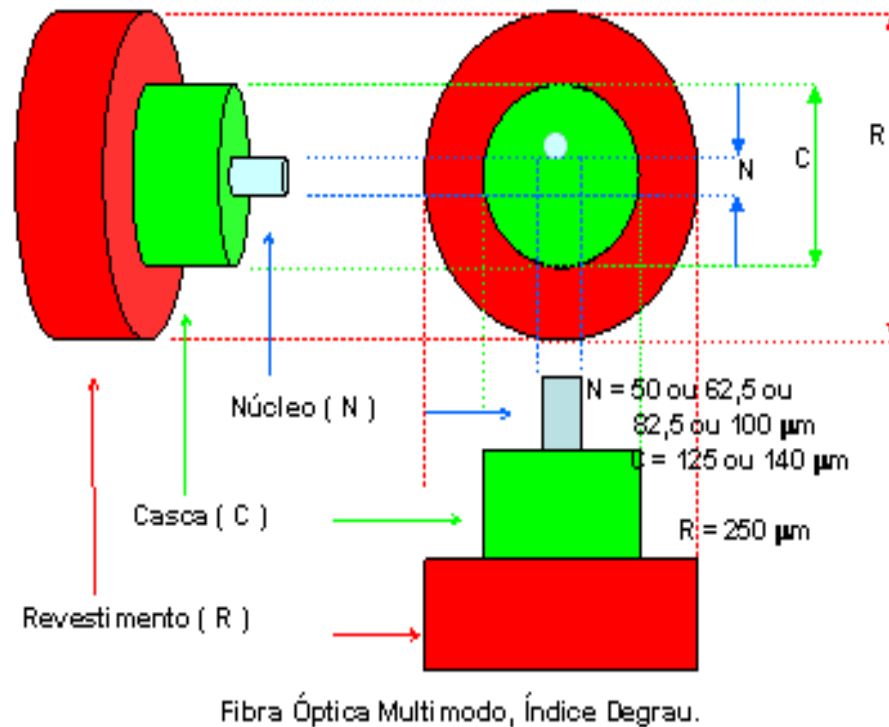
# Fundamentos de DWDM

Dimensão e geometria da fibra

# Redes ópticas

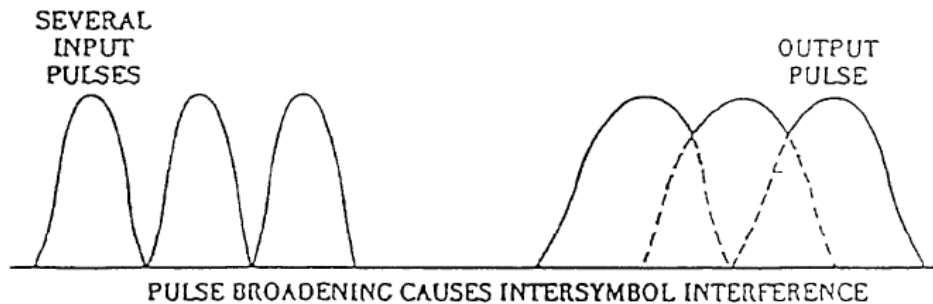
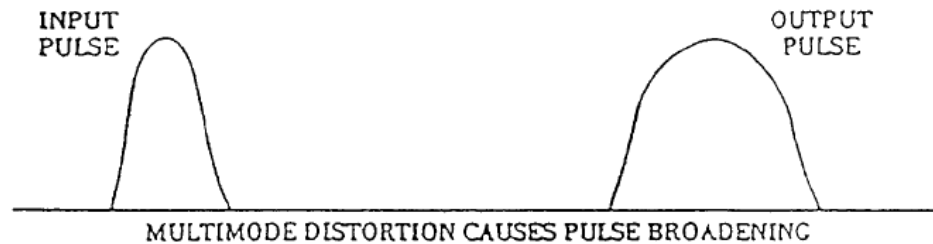
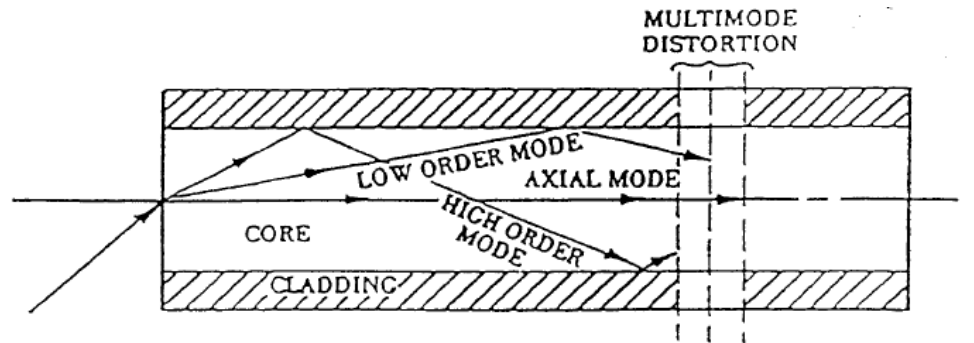
## Estrutura

### Fibra Óptica multimodo



Constituição de uma Fibra Óptica Multimodo

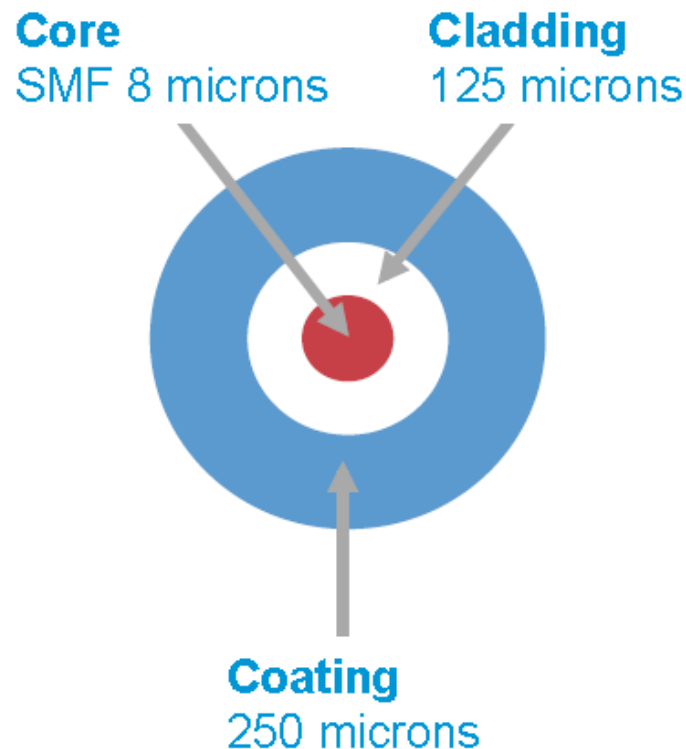
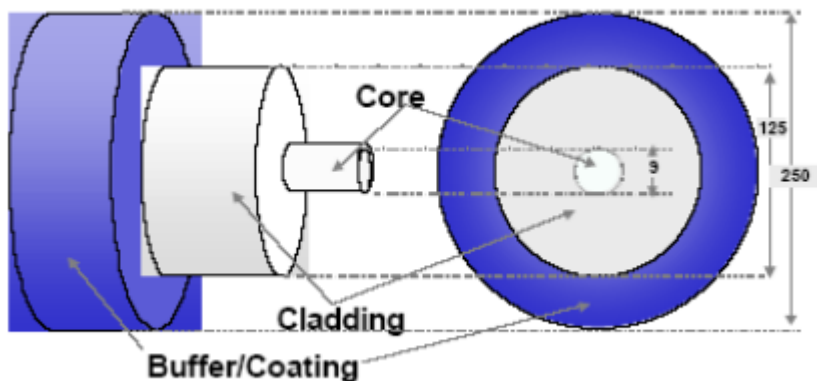
# Fibra Multimodo de Índice Degrau



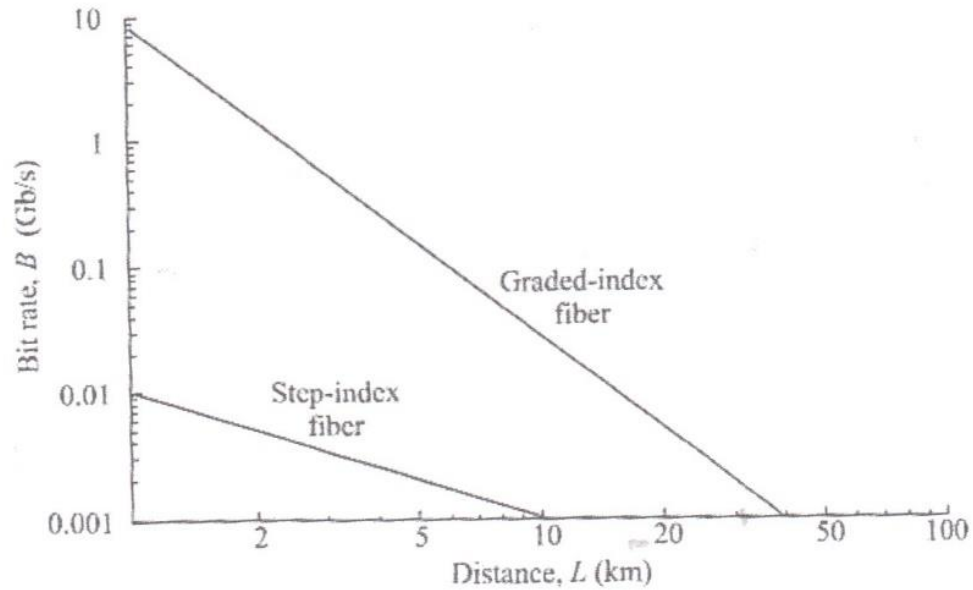
# Dimensão e geometria da fibra

A fibra óptica monomodo é composta por 3 partes:

- O núcleo (Core) que é responsável pela transmissão da luz
- O índice de refração entre o núcleo e casca (cladding) que mantém a luz no interior da fibra
- A capa externa (coating) para a proteção da fibra



# Produto Banda Passante x Distância



# Propagação na fibra monomodo



**A luz é transmitida na fibra ( núcleo) e também no cladding, uma vez que o índice de refração entre  $n_1$  e  $n_2$  permite múltiplas reflexões e minimiza a perda de luz pela casca (cladding)**



# Fibras em WDM

**Single Mode** (SM - G.652 ITU-T): é o tipo de fibra mais comum encontrada no mercado. Possui algumas limitações quando usada em sistemas WDM com maior concentração de comprimentos de ondas, pois possui elevado fator dispersão cromática. Para compensar essa limitação torna-se necessário o uso de segmentos de fibras especiais para correção da dispersão cromática (DCU). Entretanto, como essa fibra possui um núcleo com área maior do que os outros tipos de fibra óptica, seu uso se adapta bem a sistemas WDM com grande capacidade de comprimentos de onda.

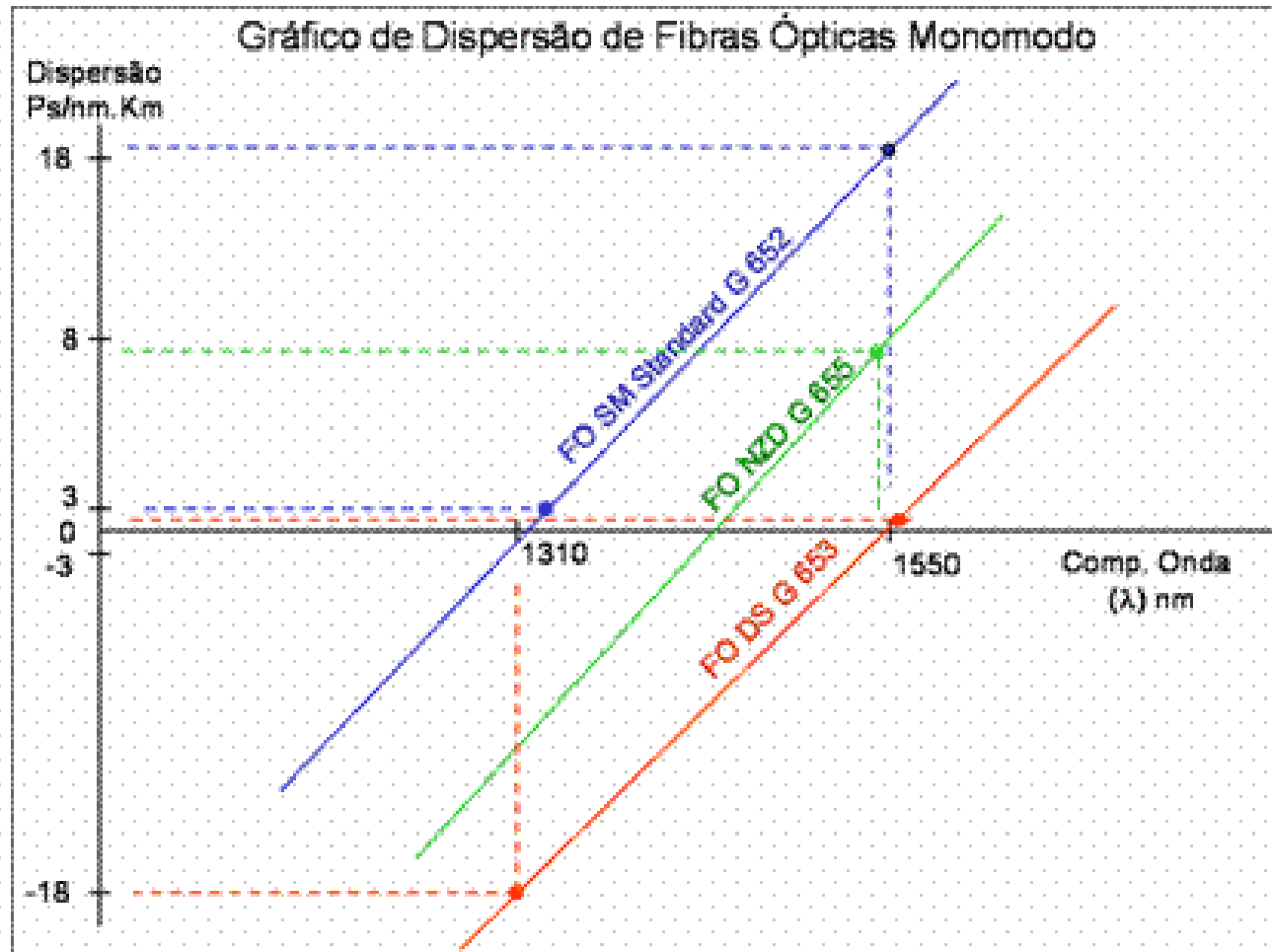
# Fibras em WDM

**Dispersion Shifted** (DS - G.653 ITU-T): é o tipo de fibra cuja dispersão é zero. Acreditava-se, em seu lançamento, que seria a fibra ideal para ser usada com sistemas WDM e SDH de alta capacidade. Porém, com a evolução desses sistemas e o conseqüente aumento da quantidade de comprimentos de onda ( $\lambda$ ), verificou-se que esta fibra possui limitações no tocante à dispersão cromática, o que diminuiu o seu uso.

# Fibras em WDM

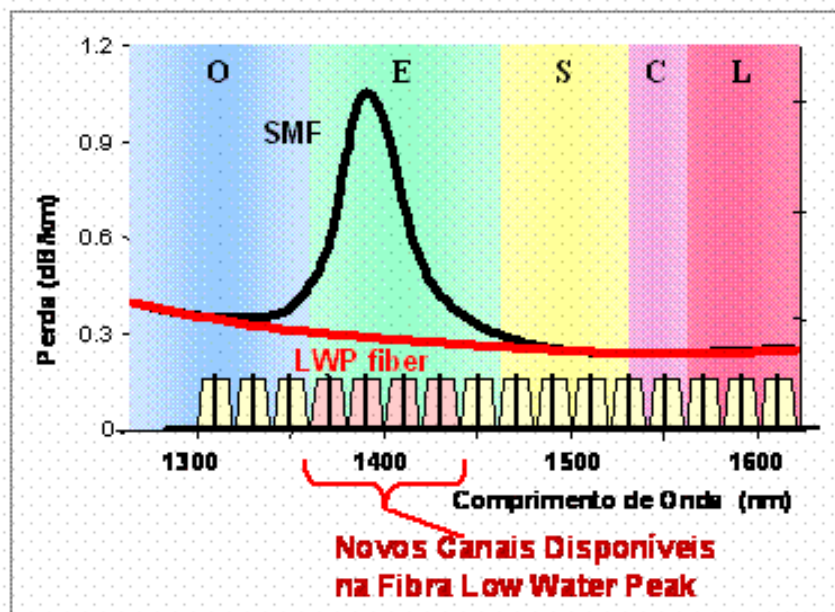
**Non Zero Dispersion (NZD - G.655 ITU-T):** é tipo de fibra que foi concebida para corrigir a limitação da fibra tipo DS, e cuja dispersão para a janela de 1550 nm é muito baixa em relação à fibra SM (18 ps.nm/km), porém não é zero (8 ps.nm/km). Para obter esta redução do fator de dispersão cromática, o núcleo da fibra foi alterado para ter menor diâmetro. Sempre se acreditou que estas fibras seriam ideais para sistemas WDM com grande número de comprimentos de onda, porém com o passar do tempo e utilização em sistemas reais, verificou-se que o fato de ter a área de seu núcleo reduzida, impede sua utilização em sistemas de grande quantidade de comprimentos de onda (Lambdas).

# Fibras em WDM



# 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.



# 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.

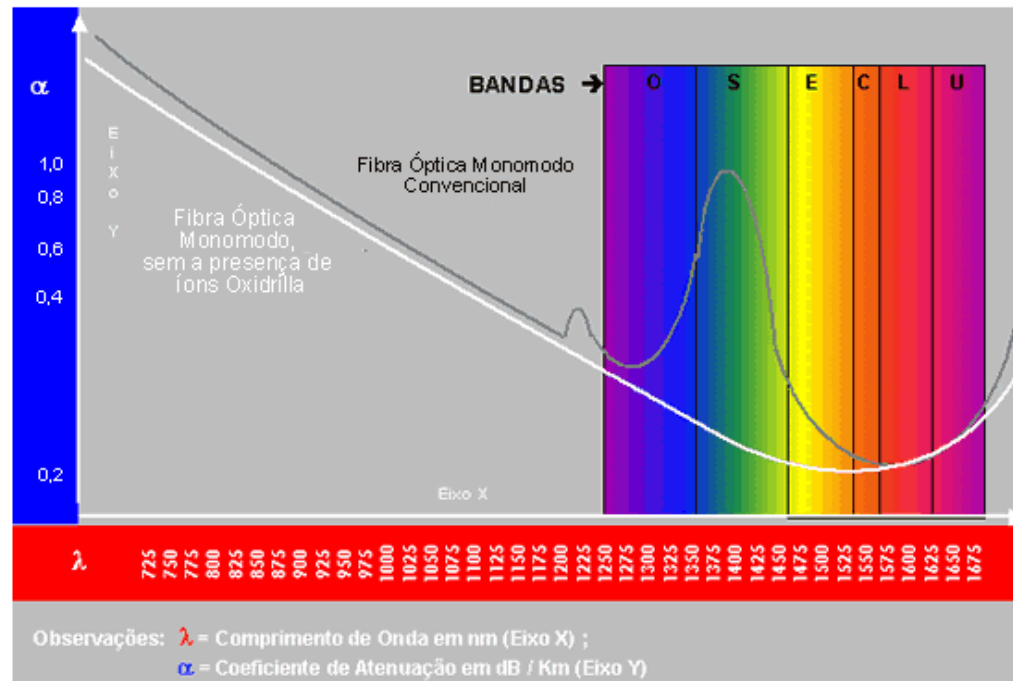
## **Absorção por efeitos estruturais:**

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

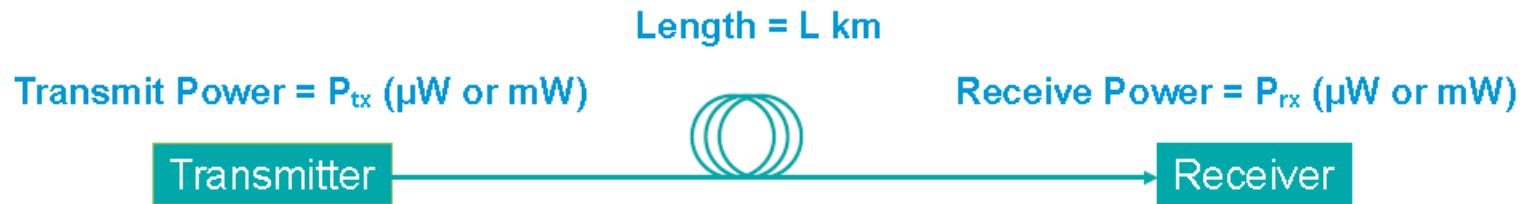
Pode ser devido a contaminação por íons hidroxila ( $\text{OH}^-$ ), causada por água dissolvida no vidro (também chamada de atenuação por pico de água, *Water Peak Attenuation*, WPA), que, por sua relevância nas tecnologias pioneiras de fibra óptica, definiram intervalos de frequências onde essa atenuação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

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





# Cálculo de atenuação



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

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

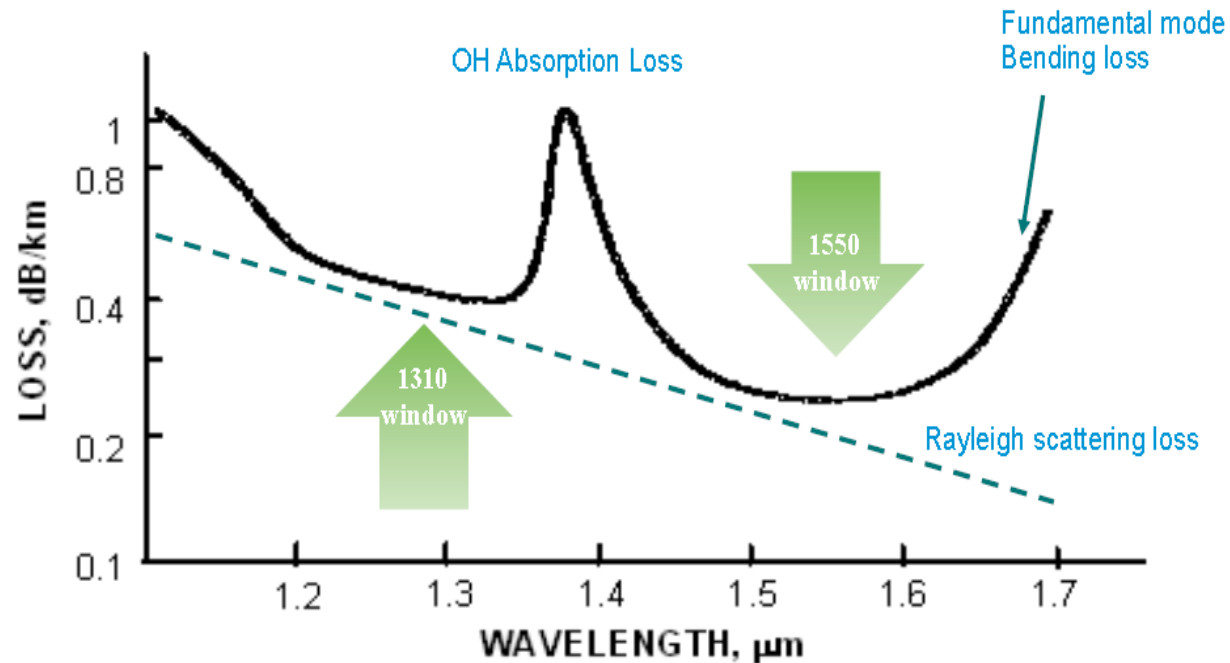
**Exemplo:**

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 =  $0.22dB/Km$**

# 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.

# 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:  $R_c \gg 15\text{mm}$**

# Características do guia de onda

Na prática, a potência numa fibra óptica não está totalmente presa ao núcleo. Parte da potência pode viajar pela casca da fibra óptica, de forma que passa a sofrer com as atenuações do material do qual a casca é composta (maiores que as do núcleo), o que pode diminuir a capacidade de transmissão da fibra.

# Guia de onda

A potência que se propaga numa fibra óptica não está totalmente confinado no núcleo. A parte de potência luminosa que se propaga na casca é atenuada pelas características de atenuação da casca da fibra óptica. É importante, no projeto de uma fibra óptica com baixas perdas, considerar as seguintes alternativas:

Garantir que a maior parte da potência luminosa seja confinada no núcleo da fibra.

Utilizar uma casca com espessura adequada e composta por um material com perdas comparáveis às do material do núcleo.



# 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.

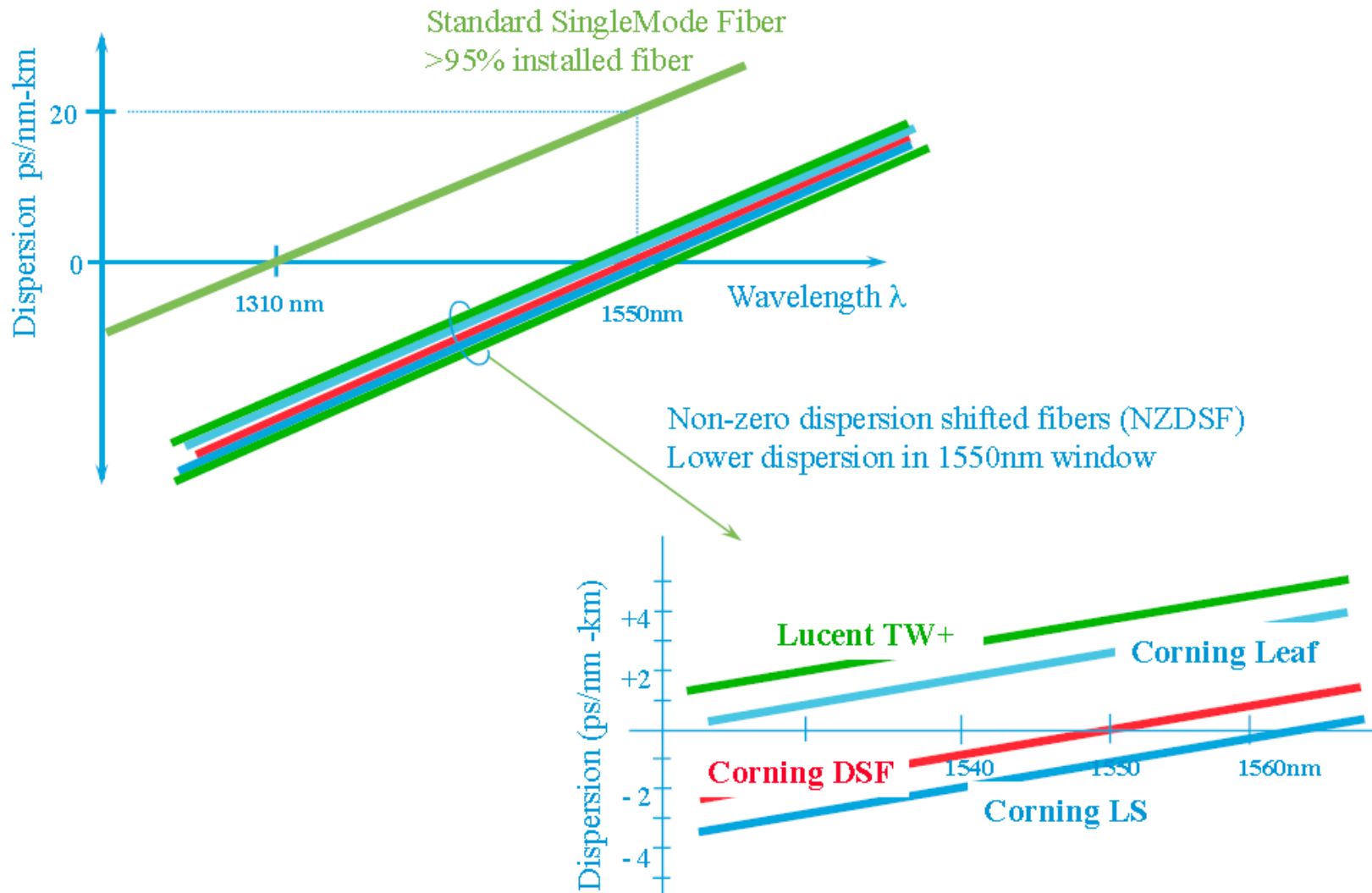
## **Dispersão material:**

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.

# 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

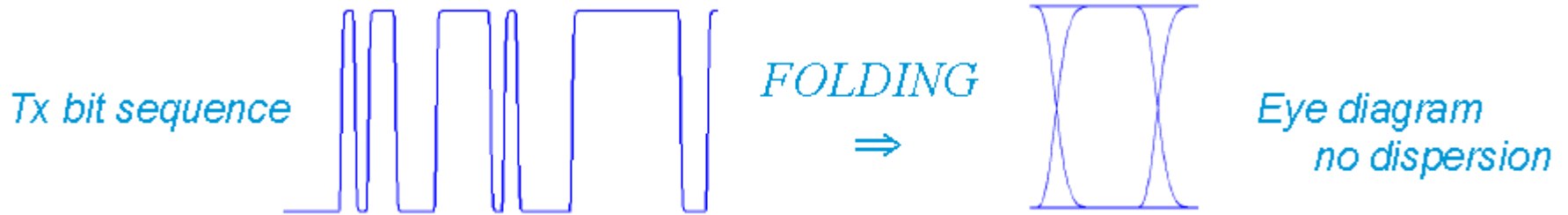
# Limitações de distância na dispersão

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

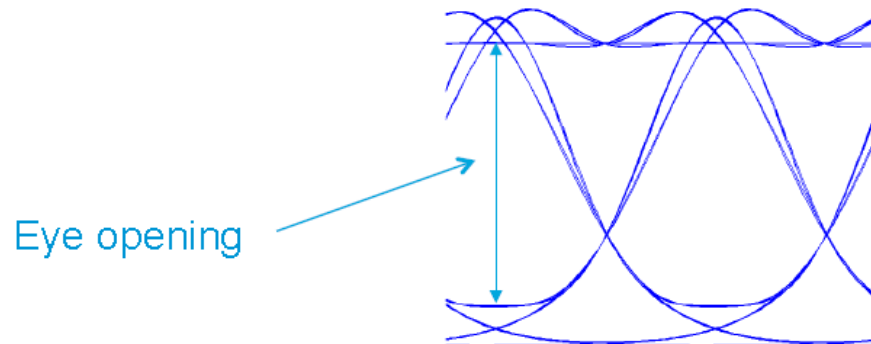
Dispersão limitada a distâncias de transmissão sobre fibra SMF (17 ps/nm/km):

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



# Minimizando a dispersão cromática

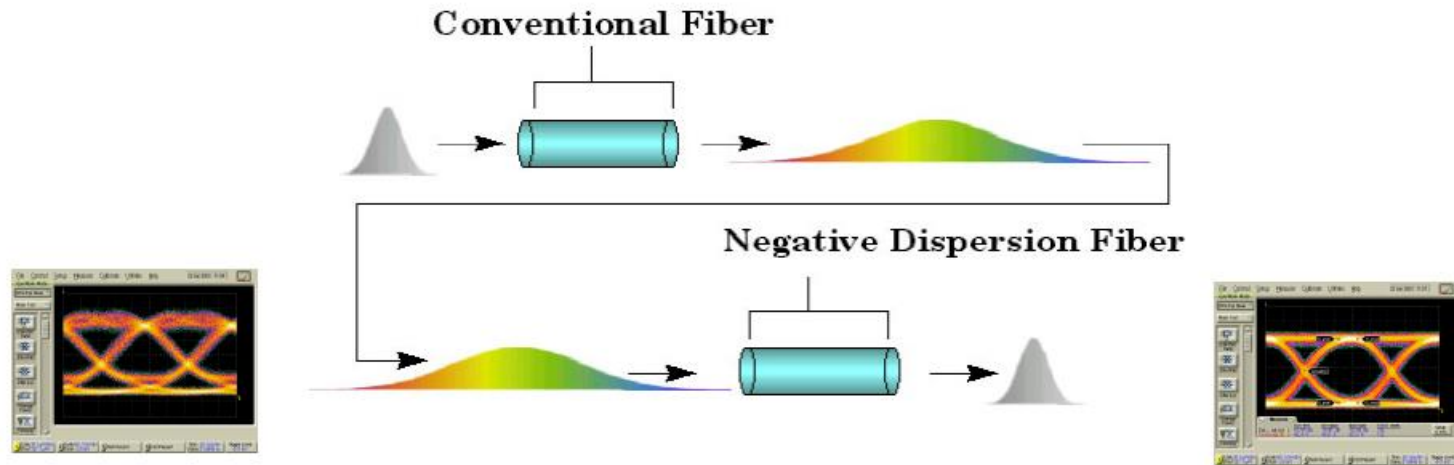
Dispersão geralmente não é um problema abaixo 10Gbps

- 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

# 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

# Aplicações

SMF (G.652)	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Good for TDM at 1310 nm</li><li>▪ OK for TDM at 1550</li><li>▪ OK for DWDM (With Dispersion Mgmt)</li></ul>
DSF (G.653)	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ OK for TDM at 1310 nm</li><li>▪ Good for TDM at 1550 nm</li><li>▪ Bad for DWDM (C-Band)</li></ul>
NZDSF (G.655)	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ OK for TDM at 1310 nm</li><li>▪ Good for TDM at 1550 nm</li><li>▪ Good for DWDM (C + L Bands)</li></ul>
Extended Band (G.652.C) (suppressed attenuation in the traditional water peak region)	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Good for TDM at 1310 nm</li><li>▪ OK for TDM at 1550 nm</li><li>▪ OK for DWDM (With Dispersion Mgmt)</li><li>▪ Good for CWDM (&gt;8 wavelengths)</li></ul>

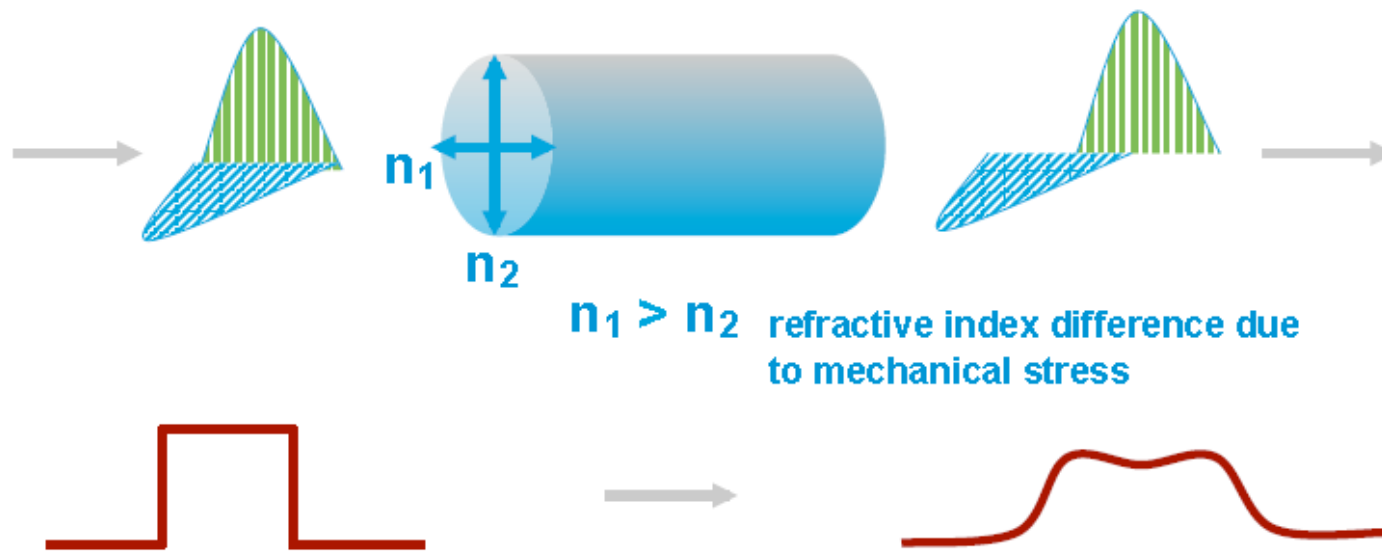
A principal diferença está nas características de dispersão cromática



# 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



# PMD & Taxa de Bit de dependência

- O "coeficiente PMD", com unidades de  $\text{ps}/\text{km}^{1/2}$ , 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)

# 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  $\leq 0.1$  ps/km<sup>1/2</sup>, PMD Link Value of  $\leq 0.04$  ps/km<sup>1/2</sup>

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  $\leq 0.5$  ps/km<sup>1/2</sup>, PMD link value of  $\leq 0.2$  ps/km<sup>1/2</sup>

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)