

Evolução dos sistemas de comunicação óptica

- 1960 - Realização do primeiro laser;
- 1966 - Proposta para usar as fibras ópticas em telecomunicações (Kao);
- 1970 - Fabrico da primeira fibra óptica de sílica dopada (20 dB/km);
- 1970 - Fabrico do primeiro laser a semicondutor (GaAs) operando entre 0.8 e 0.9 μm ;
- 1976 - Primeiro sistema de comunicações óptica (45 Mbit/s, $\lambda = 0.82 \mu\text{m}$);
- 1977 - Primeiros sistemas comerciais da 1ª geração ($\lambda = 0.85 \mu\text{m}$);
- 1980 - Primeiros sistemas comerciais da 2ª geração ($\lambda = 1.3 \mu\text{m}$);
- 1985 - Demonstração da amplificação óptica em fibras dopadas com érbio;
- 1988 - Primeiro cabo submarino digital com fibra (40000 circuitos, $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$);
- 1996 - Cabo submarino óptico TAT12/13 (122880 circuitos);
- 1996 - Primeiro sistema comercial WDM com 8 comprimentos de onda;
- 1999 - Cabo submarino óptico TAT14/15 (≈ 1 milhão de circuitos, 40 Gbit/s);
- 2000 - Sistema experimental DWDM com 175 canais a 40 Gbit/s (7 Tbit/s numa fibra).

Hierarquias digitais

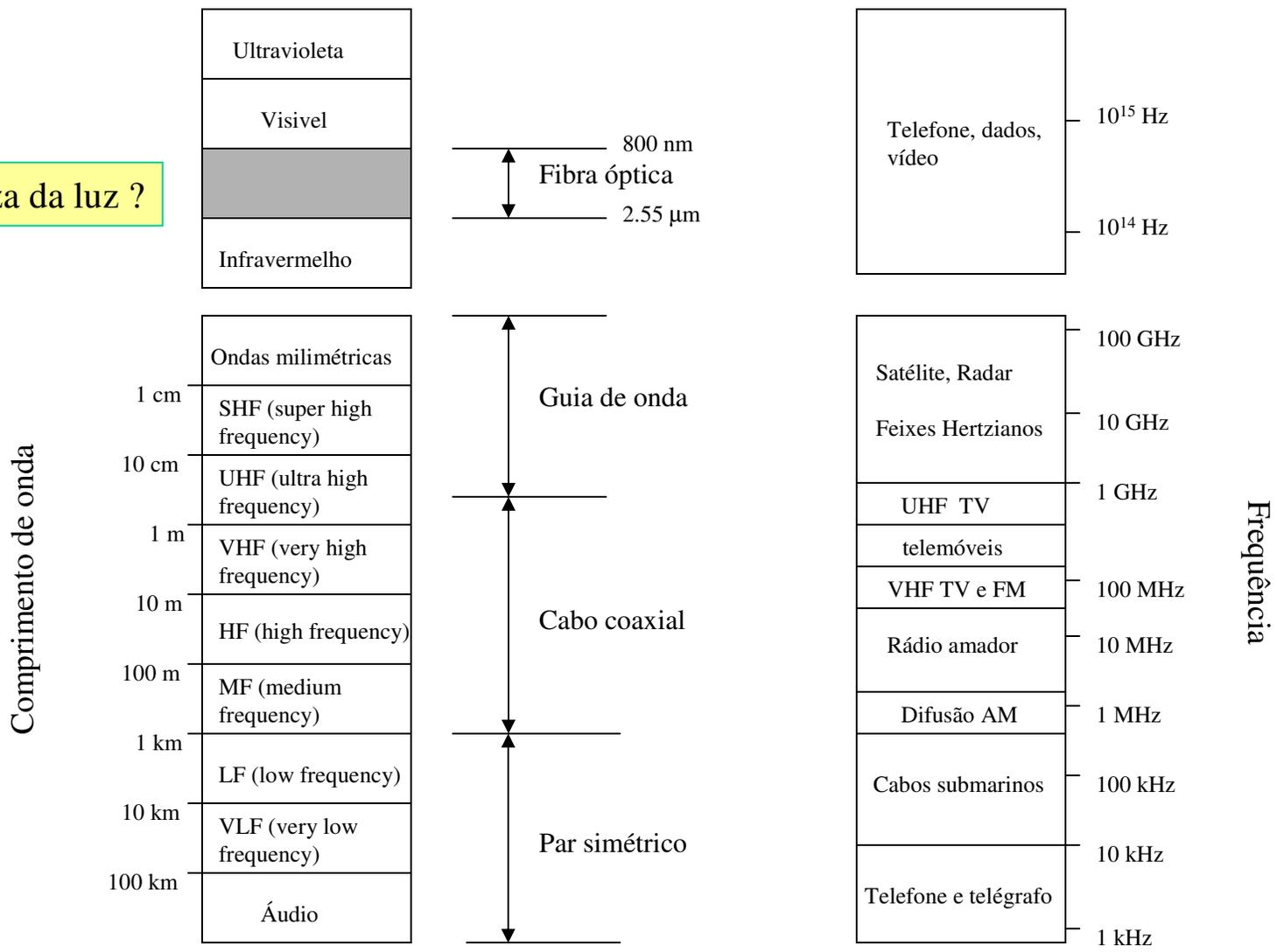
- Com o aparecimento da fibra óptica nos anos 80 os fornecedores de serviços estabeleceram uma nova hierarquia digital:
 - SONET (*Synchronous Optical Network*) nos EUA;
 - SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*) nas outras partes do mundo.
- Estes sistemas padrão (*standards*) definem uma estrutura de trama para envio de sinais digitais multiplexados no tempo (TDM) sobre a fibra óptica.

Hierarquia	Sinal SDH	Ritmo (Mbit/s)
1 ^a	STM-1	155,52
2 ^a	STM-4	622,08
3 ^a	STM-16	2488,32
4 ^a	STM-64	9953,28

(STM-x : *Synchronous Transport Module - Level x*)

O espectro electromagnético e a comunicação óptica

Natureza da luz ?



Conversão de largura de banda óptica em nm em largura de banda óptica em Hz

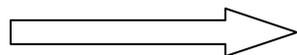
Relação entre frequência óptica e comprimento de onda:

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

- frequência óptica, ν
- comprimento de onda, λ
- velocidade da luz no vácuo, c

Exemplo:

$$\begin{aligned} \lambda = 1550 \text{ nm} &\Rightarrow \nu = 193.4 \times 10^{12} \text{ Hz} = 193.4 \text{ THz} \\ \lambda = 1300 \text{ nm} &\Rightarrow \nu = 230.6 \times 10^{12} \text{ Hz} = 230.6 \text{ THz} \end{aligned}$$



Para $\Delta\lambda \ll \lambda$:

$$\left| \frac{\Delta\nu}{\Delta\lambda} \right| \approx \left| \frac{d\nu}{d\lambda} \right| = \frac{c}{\lambda^2}$$

Largura de banda óptica, em λ : $\Delta\lambda$

Largura de banda óptica, em ν : $\Delta\nu$

$$\Delta\nu = \frac{c}{\lambda^2} \Delta\lambda$$

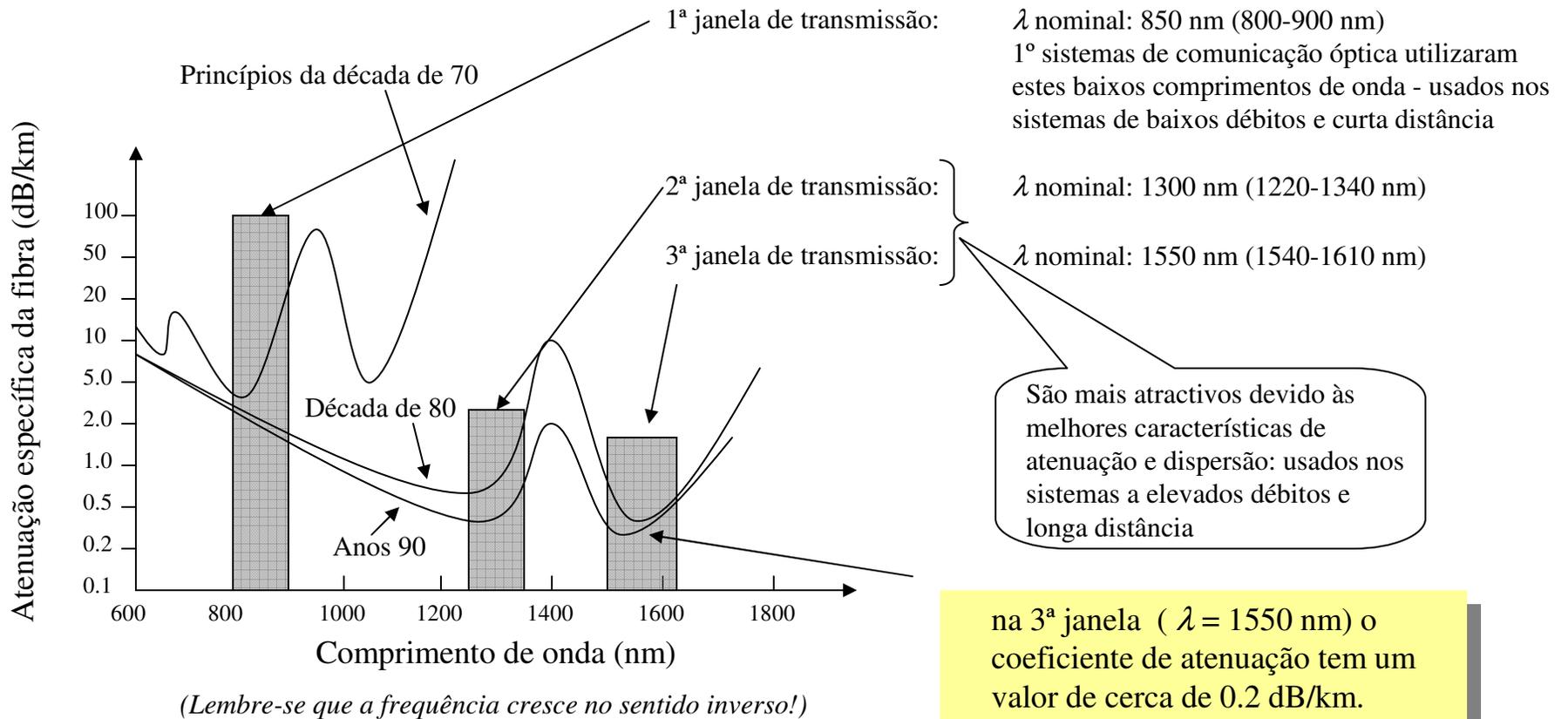
Exemplo:

$$\begin{aligned} \lambda = 1550 \text{ nm}; \Delta\lambda = 1 \text{ nm} &\Rightarrow \Delta\nu = 125 \text{ GHz} \\ \lambda = 1300 \text{ nm}; \Delta\lambda = 1 \text{ nm} &\Rightarrow \Delta\nu = 177 \text{ GHz} \end{aligned}$$

Lembre-se que

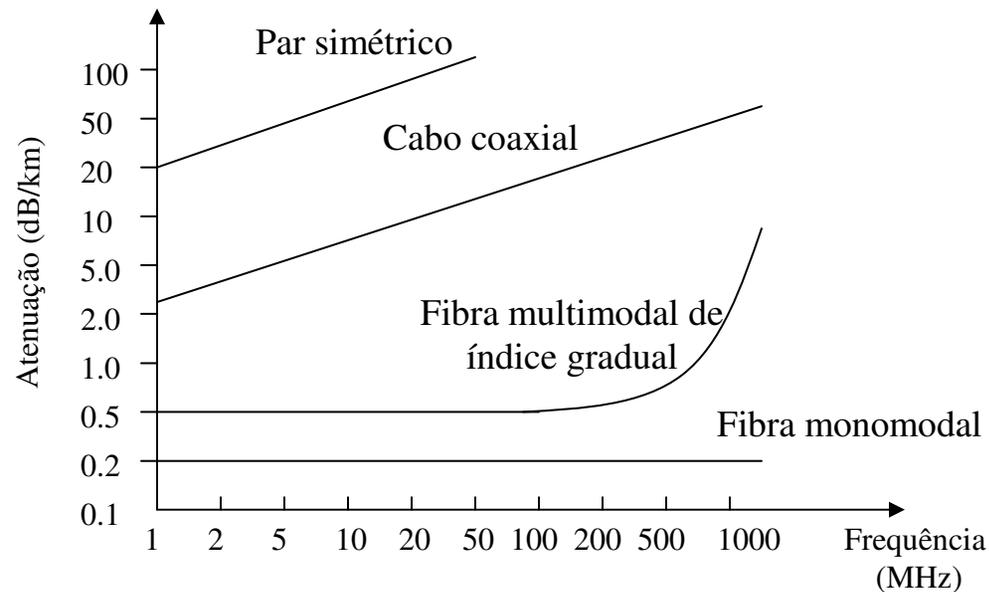
$$\left(\frac{1}{u} \right)' = -\frac{u'}{u^2}$$

Janelas de transmissão



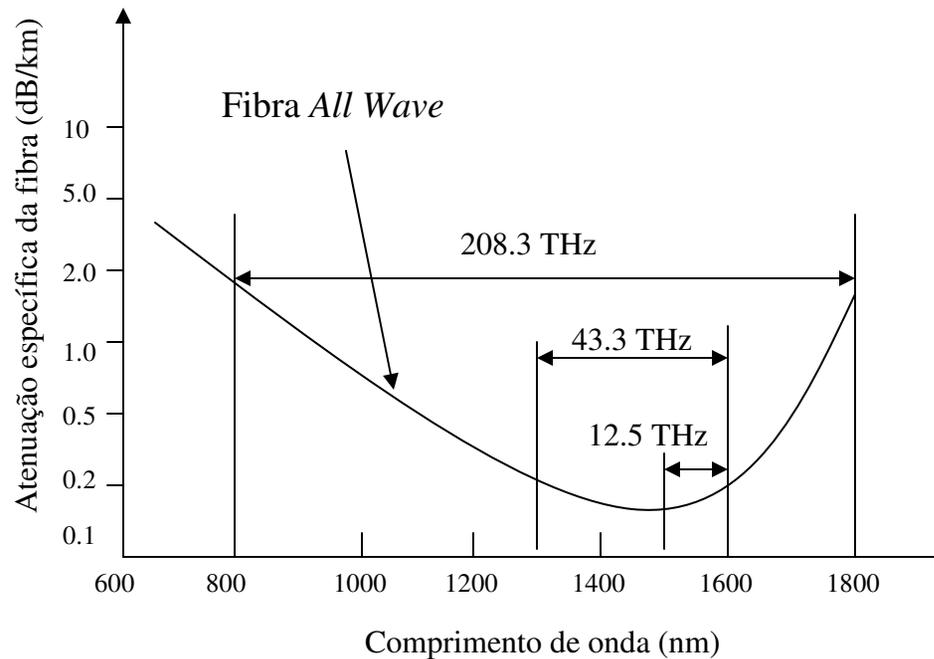
Vantagens das fibras ópticas

- Baixa atenuação:
 - as perdas de transmissão são muito reduzidas quando comparadas com os pares simétricos ou com os cabos coaxiais.



Vantagens das fibras ópticas (cont.)

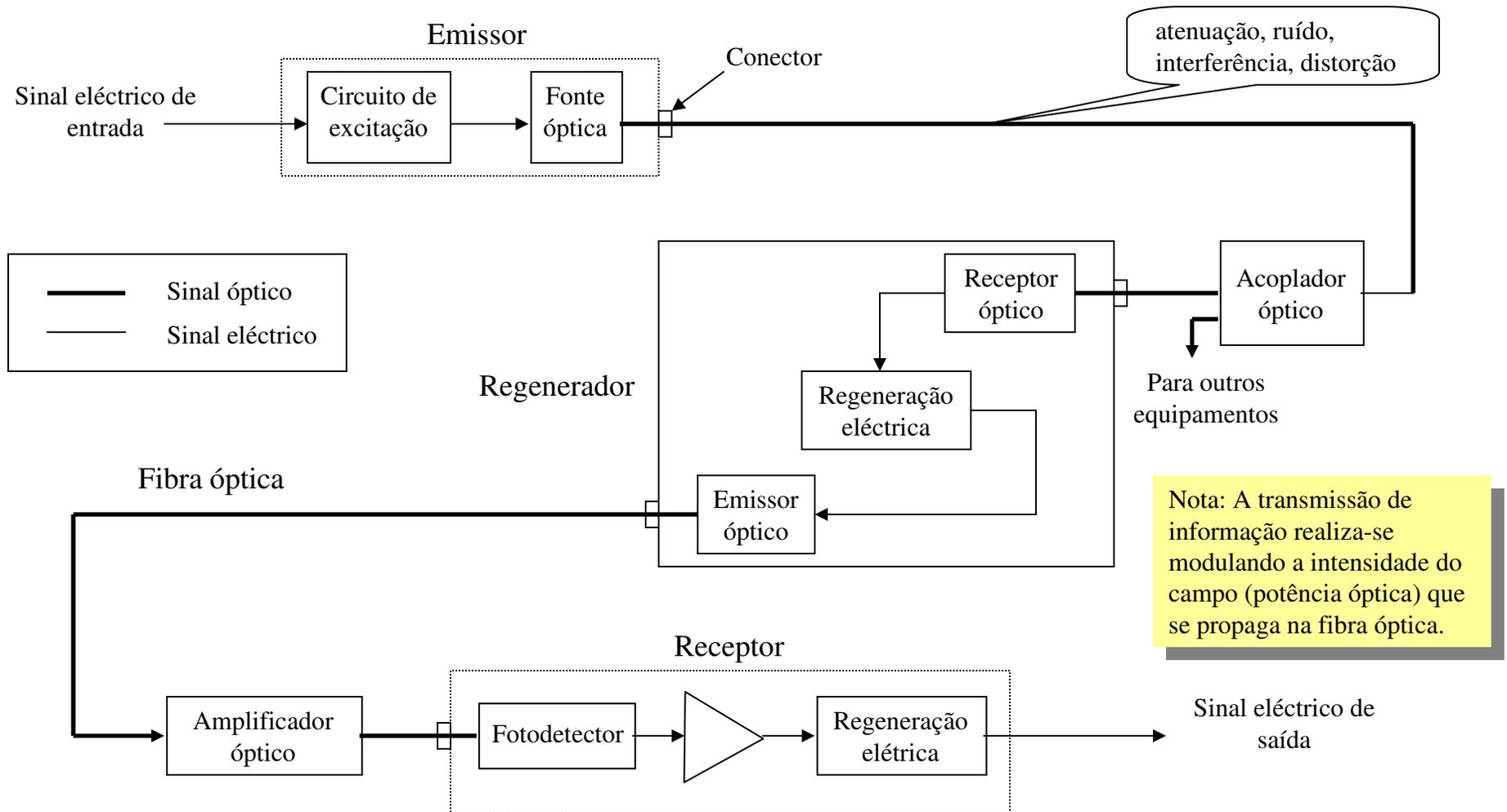
- Largura de banda elevada:
 - a largura de banda disponível na terceira janela é de cerca de 100 nm (12.5 THz). Considerando a 2ª e 3ª janela têm-se cerca de 43.3 THz.



Vantagens das fibras ópticas (cont.)

- Dimensões e pesos reduzidos:
 - um cabo de fibra óptica (com 18 fibras) ocupa uma secção que é 1/10 da secção ocupada por um cabo coaxial (com 18 pares coaxiais) e o seu peso é de cerca de 1/30.
- Imunidade à interferência electromagnética:
 - a sílica (SiO_2) - este material não conduz electricidade - não é sensível à interferência electromagnética induzidas por fontes exteriores, assim como é imune à diafonia originada pela presença de outra fibra.
- Custo reduzido:
 - as fibras ópticas são fabricadas com vidro purificado, cuja matéria prima é a sílica. Actualmente, as fibras ópticas já são mais baratas que os meios de cobre.

Elementos de uma ligação por fibra óptica



Estrutura da fibra óptica

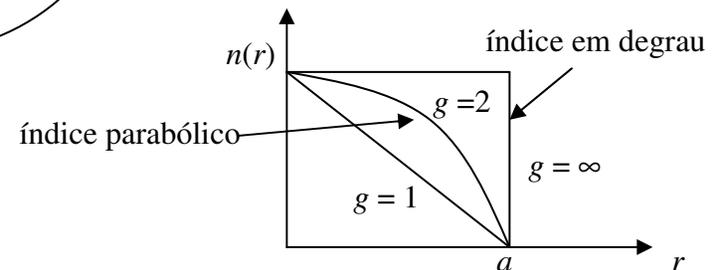
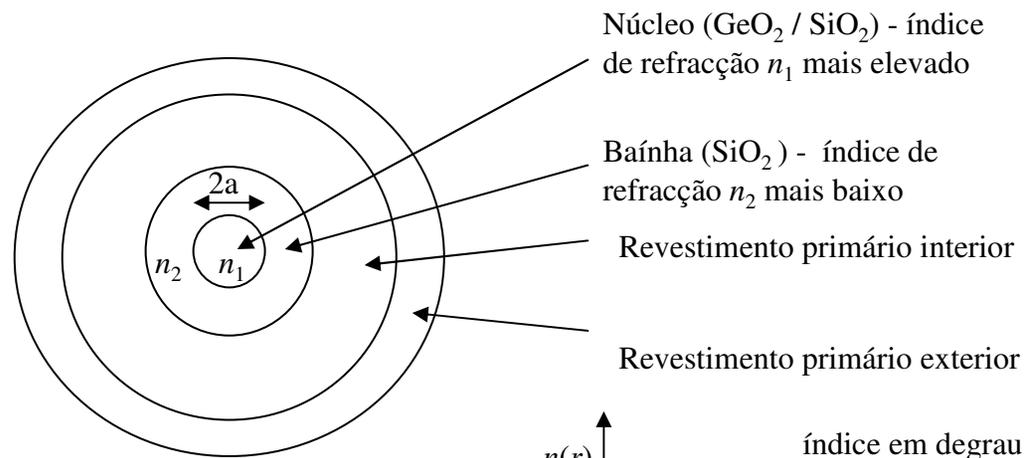
- A fibra óptica é um guia dielétrico cilíndrico constituído por dois materiais transparentes (vidro de elevada qualidade e/ou plástico) cada um com um índice de refração diferente:
 - Os dois materiais são dispostos de forma concêntrica de modo a formar um núcleo interior e uma bainha.

A variação do índice de refração é dada por:

$$n(r) = \begin{cases} n_1 \left[1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a} \right)^g \right]^{1/2} & r \leq a \\ n_2 = n_1 (1 - 2\Delta)^{1/2} & r > a \end{cases}$$

n_1 : valor máximo do índice de refração;
 a : raio do núcleo;
 g : parâmetro de perfil;
 Δ : diferença de índices normalizada.

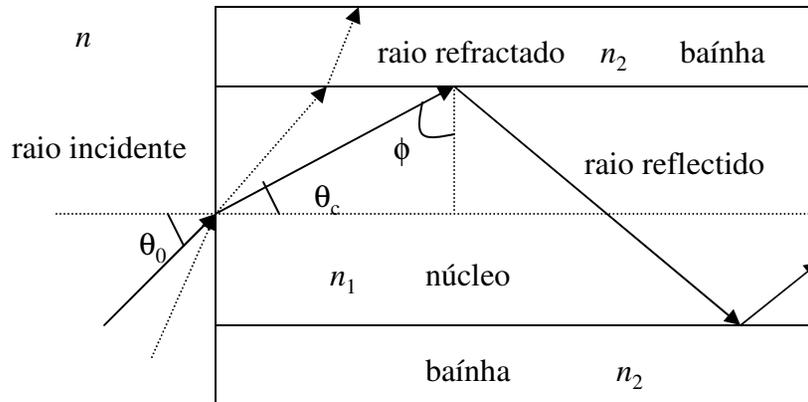
$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$



Propagação da luz na fibra óptica

- Teoria dos raios -

- Esta aproximação é válida quando o raio do núcleo é muito maior que o comprimento de onda (λ) \Rightarrow fibras multimodo.

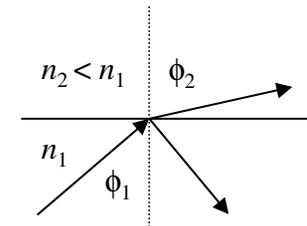


Alguns valores para n :

- ar: 1.00
- água: 1.33
- **vidro**: 1.5
- diamante: 2.42

- Lei de Snell:

$$n_1 \sin \phi_1 = n_2 \sin \phi_2$$



- O ângulo mínimo que suporta a reflexão total interna é dado por:

$$\sin \phi_{\min} = \frac{n_2}{n_1}$$

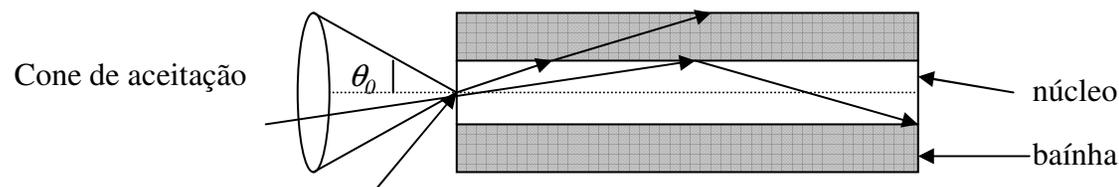
- O ângulo máximo de entrada é dado por:

$$n \sin \theta_{0,\max} = n_1 \sin \theta_c = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$$

Propagação da luz na fibra óptica

- Teoria dos raios (cont.) -

- Definição de abertura numérica:
- O cone de aceitação de uma fibra óptica define um ângulo segundo o qual toda a radiação incidente é transmitida pela fibra.



- A abertura numérica de uma fibra corresponde a metade da largura angular de aceitação. Para uma fibra com índice em degrau tem-se:

$$AN = n \sin \theta_{0,\max} = n_1 \sin \theta_c = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} = n_1 \sqrt{2\Delta}$$

- Exemplos:
 - fibra multimodal 62.5/125 $\Rightarrow AN = 0.275$
 - fibra multimodal 50/125 $\Rightarrow AN = 0.2$
 - fibra monomodal $\Rightarrow AN = 0.14$

Lembre - se que
$\Delta = \frac{(n_1^2 - n_2^2)}{2n_1^2}$

Propagação da luz na fibra óptica

- Modos de propagação -

- A propagação da luz através de um guia de ondas pode ser descrita em termos de um conjunto de ondas electromagnéticas guiadas - modos:
 - resolução das equações de Maxwell sujeitas às condições fronteira;
 - para guias metálicos só os modos TE e TM são encontrados;
 - para a fibra óptica (guia cilíndrico) as condições fronteira entre a bainha e o núcleo revelam um acoplamento entre E e H (modos híbridos HE);
- Condição para que um modo permaneça guiado: $n_2k < \beta < n_1k$
- Parâmetro V (determina quantos modos são suportados pela fibra): $V = \frac{2\pi}{\lambda} a n_1 \sqrt{2\Delta}$
 $\Leftrightarrow V = \frac{2\pi}{\lambda} a (AN)$
- Para fibras monomodo só o modo HE_{11} é suportado: $V \leq 2.405$.

Tipos de fibras

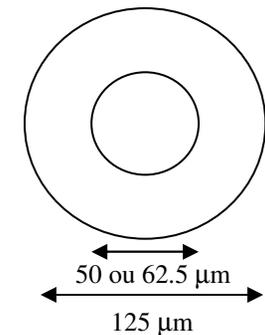
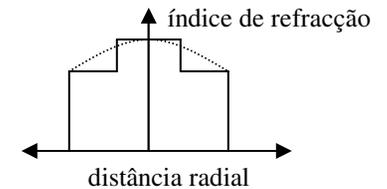
- **Fibra multimodal:**

- fibra com índice em degrau;

- núcleo com índice uniforme \Rightarrow velocidade de propagação no núcleo é constante \Rightarrow raios que viajam por caminhos mais longos chegam mais tarde que os raios que viajam por caminhos mais curtos \Rightarrow dispersão intermodal;

- fibra com índice de variação gradual (50 ou 62.5 μm).

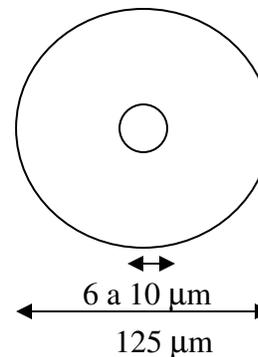
- índice de refração decrescente com a distância ao centro do núcleo e variação parabólica \Rightarrow raios que viajam por caminhos mais longos têm maior velocidade (devido ao decréscimo do índice de refração) que os raios que viajam por caminhos mais curtos \Rightarrow dispersão intermodal reduzida logo são possíveis maiores larguras de banda.



- **Fibra monomodal:**

- e.g. fibra padrão ou G.652.

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a n_2 \sqrt{2\Delta} \leq 2.405$$



Tipos de fibras (cont.)

	Fibras Monomodo Padrão	Fibras Multimodo
Diâmetro do núcleo	6-10 um (ITU-T rec. G652)	50 um (ITU-T rec. G651)
Diâmetro da bainha	125 um	125 um
Atenuação	0.3-1 dB/Km @ 1300 nm 0.15-0.5 dB/Km @ 1550 nm	0.3-1 dB/Km @ 1300 nm 0.15-0.5 dB/Km @ 1550 nm
Características	Só o modo axial se propaga	Vários modos de propagação são possíveis
Dispersão	Intramodal	Intermodal e intramodal

Desvantagens das fibras monomodo :

- Abertura numérica menor \Rightarrow menor ângulo de aceitação e maiores perdas de acoplamento fonte óptica - fibra;

Vantagens das fibras monomodo :

- Só existe dispersão intramodal (nula para 1310 ± 10 nm e cerca de 20 ps/(nm.km) a 1550 nm.

Parâmetros característicos da fibra - Atenuação -

- O coeficiente de atenuação é definido como a razão entre a potência óptica de entrada $P_o(0)$ e a potência óptica de saída $P_o(L)$, de uma fibra óptica com comprimento L . O coeficiente de atenuação em dB/km é:

$$\alpha = \frac{10}{L} \log_{10} \left(\frac{P_o(0)}{P_o(L)} \right)$$

- Exemplos:

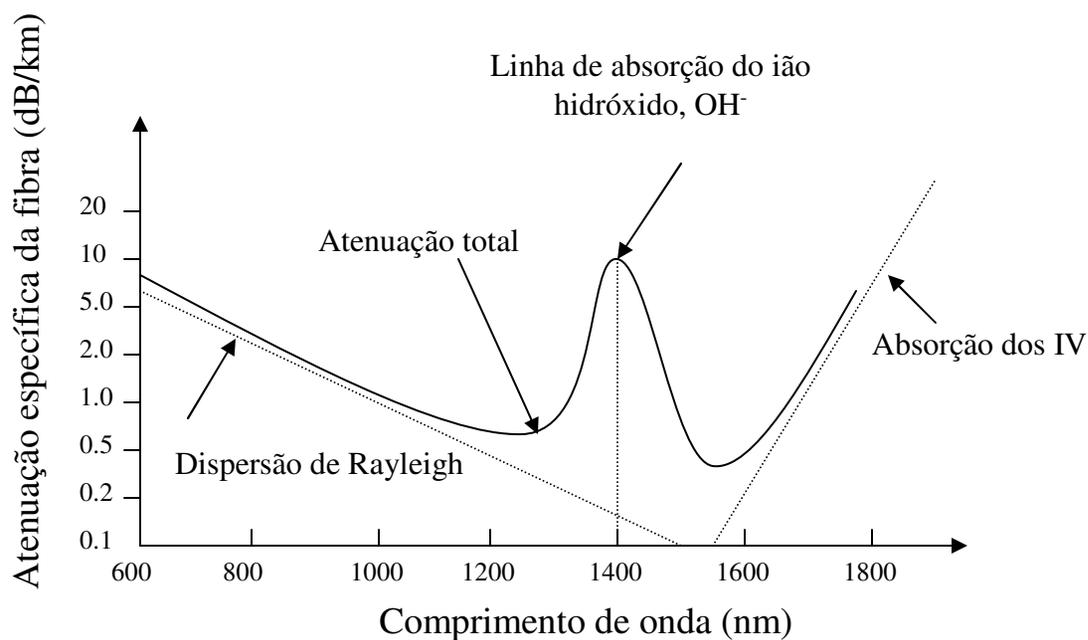
- fibra óptica monomodal Corning SMF-28
- fibra óptica multimodal Corning 50/125

nm	dB/km
850	1,81
1300	0,35
1310	0,34
1383	0,5
1550	0,19
1625	0,21

nm	dB/km
850	2,42
1300	0,65
1380	1,1
1550	0,57

Parâmetros característicos da fibra

- Origem da atenuação na fibra óptica -

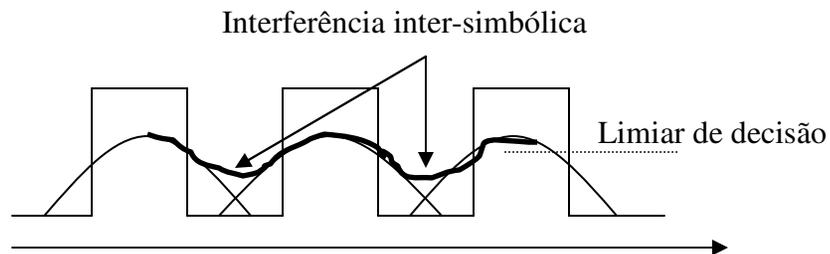


- **Absorção:**
 - intrínseca: devido aos próprios átomos do material da fibra (absorção na região dos infravermelhos e ultravioletas).
 - extrínseca: devido a impurezas no vidro (e.g. íons OH⁻);
- **Dispersão de Rayleigh:**
 - devido a irregularidades a nível microscópico na densidade do material ⇒ variações no índice de refração.
- **Perdas radioactivas:**
 - devido a deformações e micro-curvas.

Parâmetros característicos da fibra

- Dispersão -

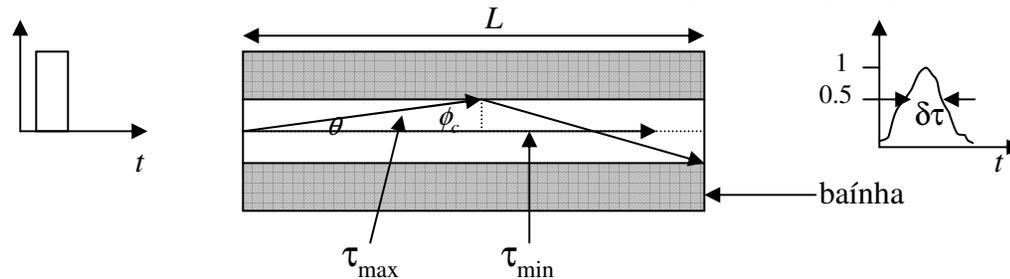
- A propagação da luz através da fibra óptica sofre o efeito da dispersão, i.e., distorção e alargamento dos impulsos transmitidos;
- Causas:
 - existência de vários modos de propagação na fibra óptica \Rightarrow Dispersão intermodal;
 - variação do índice de refração com o comprimento de onda, $\lambda \Rightarrow$ Dispersão intramodal.
- Consequência:
 - aparecimento da interferência inter-simbólica (IIS) que vai determinar o ritmo binário máximo que a fibra suporta.



Conclusão:
Ritmo binário maior \Rightarrow maior IIS \Rightarrow mais erros

Parâmetros característicos da fibra - Dispersão intermodal -

- A dispersão intermodal só ocorre nas fibras ópticas multimodais e resulta do facto de diferentes modos terem diferentes tempos de propagação.



- O alargamento do impulso, definido a meia potência é aproximado por

Com índice em degrau: $\delta\tau = \tau_{\max} - \tau_{\min} \approx \frac{L}{c} n_1 \Delta$ Com índice parabólico: $\delta\tau = \tau_{\max} - \tau_{\min} \approx \frac{L}{10c} n_1 \Delta^2$

- O desvio padrão do alargamento devido à dispersão intermodal é definido por

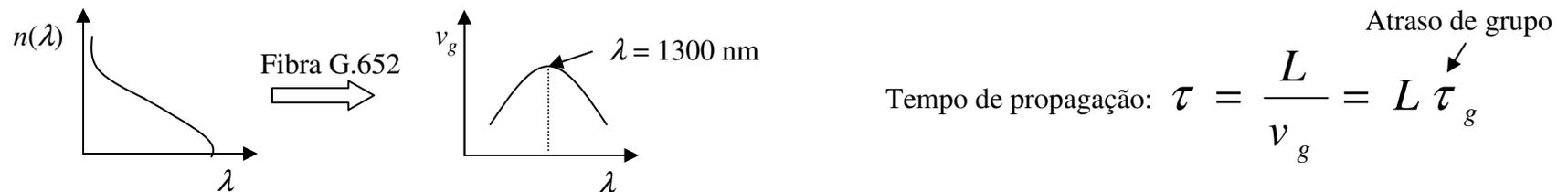
Para impulsos rectangulares: $\sigma_{\text{inter}} = \frac{\delta\tau}{2\sqrt{3}}$ Para impulsos gaussianos: $\sigma_{\text{inter}} = \frac{\delta\tau}{2\sqrt{2 \ln 2}}$

- Parâmetro da dispersão intermodal D_{inter} :

$$\sigma_{\text{inter}} = D_{\text{inter}} L \quad \xrightarrow{\text{Para o caso de impulsos rectangulares e um índice em degrau}} \quad D_{\text{inter}} = \frac{\sigma_{\text{inter}}}{L} = \frac{1}{2\sqrt{3}} \frac{n_1 \Delta}{c}$$

Parâmetros característicos da fibra - Dispersão intramodal -

- A dispersão intramodal resulta do facto de diferentes comprimentos de onda de um modo de propagação apresentarem diferentes velocidades de propagação na fibra.

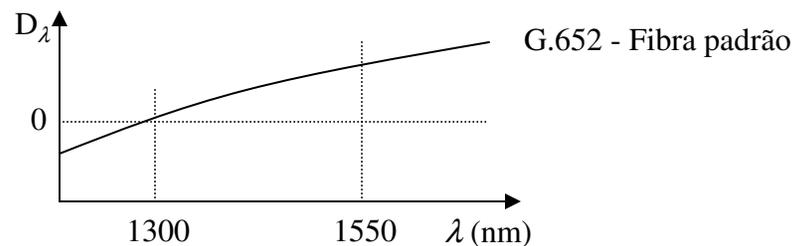


- Um sinal com uma largura espectral $\Delta\lambda$ apresenta um alargamento temporal a meia potência $\Delta\tau$ (ou σ_{intra} quando expresso em desvio padrão):

$$\Delta\tau = \left| \frac{d\tau_g}{d\lambda} \right| L \Delta\lambda = |D_\lambda| L \Delta\lambda$$

$$\sigma_{\text{intra}} = |D_\lambda| L \sigma_\lambda$$

D_λ [ps/(nm·km)]: parâmetro de dispersão intramodal



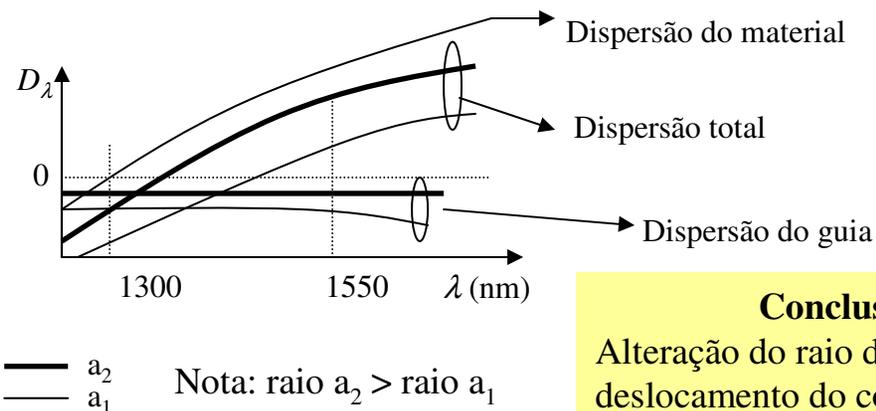
Parâmetros característicos da fibra

- Dispersão intramodal (cont.) -

- O valor do parâmetro de dispersão resulta da contribuição da dispersão do material e da dispersão do guia: $D_\lambda = D_{mat} + D_{guia}$
 - A dispersão do material só depende do material constituinte da fibra. Ocorre devido à variação do índice de refração com o comprimento de onda;
 - A dispersão do guia ocorre porque numa fibra monomodo apenas 80% da potência óptica está confinada no núcleo. Os restantes 20% propagam-se na bainha, originando o alargamento do impulso. Este factor depende: da diferença de índices normalizada, do perfil do índice de refração e do raio do núcleo da fibra.



Escolhem-se estes parâmetros de modo a deslocar o comprimento de onda onde a dispersão se anula - **fibra de dispersão deslocada** - ou mesmo fazer com que a dispersão numa determinada zona seja muito baixa - **fibra de dispersão aplanada**.



Conclusão:
Alteração do raio da fibra \Rightarrow
deslocamento do comprimento de
onda onde a dispersão se anula

Produto largura de banda x comprimento

- Fibras multimodo -

- Índice em degrau
(impulsos rectangulares)

$$D_{\text{inter}} = \frac{\sigma_{\text{inter}}}{L} = \frac{1}{2\sqrt{3}} \frac{n_1 \Delta}{c}$$

Dispersão total:

$$\sigma_t \approx \sqrt{\sigma_{\text{inter}}^2 + \sigma_{\text{intra}}^2}$$

↓

Dispersão intermodal dominante

$$\sigma_t \approx \sigma_{\text{inter}}$$

- Índice parabólico
(impulsos rectangulares)

$$D_{\text{inter}} = \frac{\sigma_{\text{inter}}}{L} = \frac{1}{20\sqrt{3}} \frac{n_1 \Delta^2}{c}$$

- Uma boa aproximação para a função de transferência da fibra é:

$$H(f) = H(0) \exp(-2\pi^2 f^2 \sigma_t^2) \Rightarrow \text{Largura de banda óptica, } B_0 = \frac{0.187}{\sigma_t}$$

- Para $n_1 = 1.5$ e $\Delta = 0.01$:

$$B_0 L \approx 0.2 \frac{2\sqrt{3}c}{n_1 \Delta} = 13.8 \text{ MHz} \times \text{km}$$

$$B_0 L \approx 0.2 \frac{20\sqrt{3}c}{n_1 \Delta^2} = 13.8 \text{ GHz} \times \text{km}$$

Conclusão: A fibra com índice gradual apresenta uma melhoria da relação $B \times L$ em cerca de 3 ordens de grandeza.

Produto largura de banda x comprimento - Fibras monomodo -

Só existe dispersão intramodal

$$\sigma_t \approx \sigma_{\text{intra}} \implies \sigma_t = |D_\lambda| \sigma_\lambda L \implies B_o L \approx 0.2 \frac{1}{|D_\lambda| \sigma_\lambda}$$

Lembre-se que $B_o \approx \frac{0.2}{\sigma_t}$

Com $\lambda = 1550$ nm e $\sigma_\lambda = 0.1$ nm tem-se:

- Fibra padrão (SMF - *Standard monomode fiber* G.652):

$$D_\lambda = 17 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$$

$$B_o L \approx 117.7 \text{ GHz}\times\text{km}$$

- Fibra de dispersão deslocada (DSF - *Dispersion-shifted fiber* G.653):

$$D_\lambda = 1 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$$

$$B_o L \approx 2000 \text{ GHz}\times\text{km}$$

Conclusão: A fibra com dispersão deslocada apresenta uma melhoria significativa da relação $B \times L$.

Produto ritmo binário x comprimento

- O ritmo binário de um sistema de transmissão digital óptico é limitado pela dispersão devida à fibra óptica. Para impedir que a interferência intersimbólica seja elevada é necessário garantir que o alargamento do impulso seja inferior ao período de bit ($T_b = 1 / r_b$), sendo usada normalmente a seguinte regra:

$$R_b \leq \frac{1}{4\sigma_t}$$

- Para o caso das fontes com largura espectral elevada (e.g. LED):

$$R_b \times L \leq \frac{1}{4D_\lambda \sigma_\lambda} \quad (\lambda = 1.55 \mu\text{m}, D_\lambda = 17 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km}), \sigma_\lambda = 0.1 \text{ nm}) \Rightarrow R_b \times L \leq 147 \text{ Gbps}\times\text{km}$$

- Para um ritmo de 10 Gbit/s tem-se um comprimento máximo de cerca de **14.7 km** \Rightarrow necessidade de usar fontes com largura espectral reduzida
Exemplo: para um laser DFB com $\lambda = 1550 \text{ nm}$ e $D_\lambda = 17 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ tem-se um comprimento máximo de **66.6 km**.