

REDES DE TELECOMUNICAÇÕES

Meios de transmissão

Eng^a de Sistemas e Informática

UALG/FCT/ADEEC 2004/2005

Princípios básicos de transmissão **1**

Sumário

- *Princípios básicos de transmissão*
 - *Pares de fios*
 - *Cabo coaxial*
 - *Fibra óptica*
-

Características gerais

Pares simétricos - dois fios metálicos isolados e entrelaçados: usados na rede telefônica local, em LANs; largura de banda \approx MHz (sem pupinização, i.e. carga); sujeitos a diafonia.

Cabo coaxial - dois condutores concêntricos: usado nas redes híbridas e de dados; largura de banda até centenas de MHz.

Fibra óptica: usada na rede de transmissão do núcleo e usada em “backbones” e alguns acessos locais (e.g. FTTH, FTTC); largura de banda muito elevada \approx 50 THz; muito baixa atenuação, 0.2 dB/Km em 1550 nm.

Características gerais

- **Dissipação de potência internamente** que reduz a amplitude do sinal à saída \Rightarrow atenuação do sinal
 - atenuação = P_{in} / P_{out} ;
 - para linhas de transmissão a potência à saída decresce exponencialmente com a distância, $P_{out} = 10^{-(\alpha l/10)} P_{in}$ em que l é comprimento da linha e α o coeficiente de atenuação por unidade de comprimento.
 - **Armazenamento de energia** que altera a forma do sinal à saída \Rightarrow distorção do sinal;
-
- Introdução (geralmente, adição) de sinais indesejáveis sobrepostos ao sinal que se pretende transmitir \Rightarrow **ruído** (e.g. ruído térmico).

Transmissão sem distorção

- **Análise no domínio do tempo:**

- dado um sinal na entrada $x(t)$ diz-se que a saída $y(t)$ não está distorcida se ela diferir da entrada sómente através da multiplicação de uma constante e de um tempo de atraso finito, t_d :

$$y(t) = Kx(t - t_d) \quad ; k \text{ e } t_d \text{ são constantes}$$

- **Análise no domínio da frequência:**

- a função de transferência é dada por: $H(f) = K \exp(-j2\pi f t_d)$

Conclusão:

- Um sistema para não introduzir distorção deve apresentar: $|H(f)| = |K|$ e a fase deve ter uma variação linear em função da frequência

$$\arg[H(f)] = -2\pi f t_d \pm m\pi \quad (m \text{ é um } n^\circ \text{ inteiro})$$

Transmissão sem distorção

Distorção linear

- **Distorção de amplitude:**

- ocorre quando o módulo da função de transferência varia com a frequência, i.e. $|H(f)| \neq |K|$;
- o tipo mais habitual de distorção de amplitude é a atenuação elevada ou ganho elevado nas frequências elevadas ou baixas do espectro do sinal.

- **Distorção de fase ou de atraso:**

- ocorre quando a fase da função de transferência não varia linearmente com a frequência, i.e. $\arg[H(f)] \neq -2\pi f t_d \pm m\pi$;
- quando a fase da função de transferência não varia linearmente com a frequência define-se a dependência do atraso com a frequência como

$$\text{atraso de grupo } \tau_g(f) = -\frac{1}{2\pi} \frac{d \arg[H(f)]}{df}$$

Transmissão sem distorção

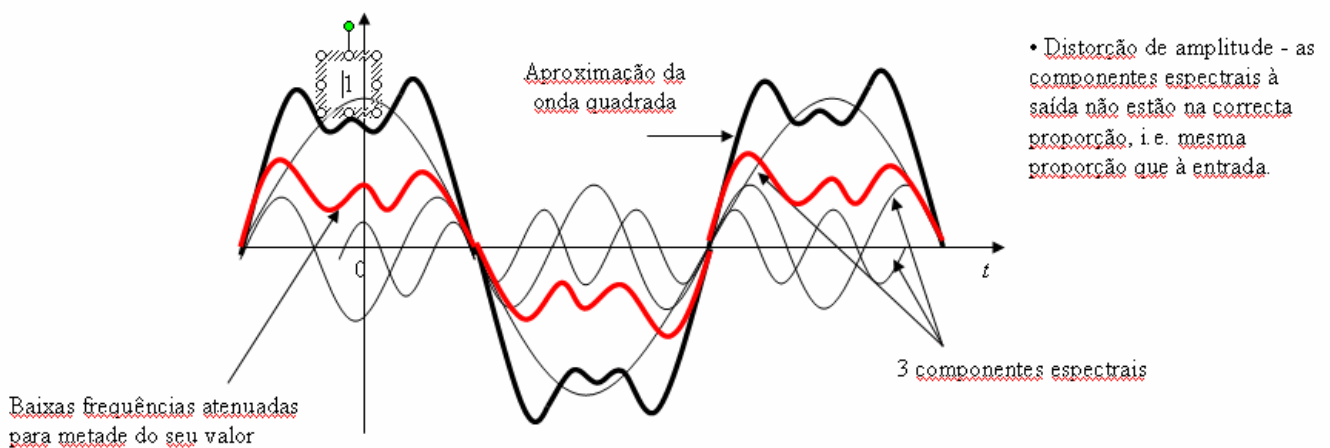
Distorção não-linear:

- ocorre quando o sistema inclui elementos não-lineares (e.g. bobinas);
- geração de componentes espectrais noutras frequências designadas por produtos de intermodulação

Transmissão sem distorção

Distorção de amplitude

- Sinal original - aproximação da onda quadrada que inclui os termos até à 5^a harmónica, i.e. $x(t) = \cos(2\pi f_0 t) - 1/3 \cos(6\pi f_0 t) + 1/5 \cos(10\pi f_0 t)$



Par de fios

Princípios básicos de transmissão 9

Par de fios

Princípios básicos de transmissão 10

Par de fios

Princípios básicos de transmissão 11

Par de fios

Princípios básicos de transmissão 12

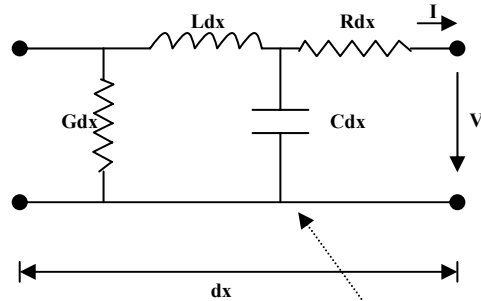
Par de fios

- **Par simétrico de fios: linha de transmissão constituída por dois condutores isolados**

- condutor: cobre;
- isolador: polietileno.

- **Parâmetros primários:**

- **R [Ω/Km]**: traduz a resistência dos condutores mais o efeito pelicular;
- **L [H/Km]**: traduz a energia magnética armazenada no dielétrico e nos condutores;
- **C [F/Km]**: traduz a energia eléctrica armazenada no dielétrico entre os condutores;
- **G [S/Km]**: traduz a resistência (conductância) transversal do dielétrico.



Modelo de um trecho elementar de linha de transmissão

Par de fios

Parâmetros primários de um par simétrico de fios

- **Parâmetros de um cabo com isolamento de polietileno de calibre 0.51 mm (24 AWG - American Wire Gauge):**

f (KHz)	R(Ohm/Km)	L(mH/Km)	G(uS/Km)	C(uF/Km)
1	172	0,613	0,071	0,052
5	172	0,611	0,29	0,052
10	173	0,61	0,53	0,052
50	178	0,595	2,145	0,052
100	192	0,581	3,927	0,052
500	337	0,533	15,928	0,052

Notas:

- Capacidade independente da frequência;
- Inductância tem um decrescimento lento com a frequência;
- Resistência e conductância crescem com a frequência.

Características de transmissão do par simétrico de fios

Parâmetros secundários:

— Impedância característica

$$Z_0(\omega) = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}$$

— Constante de propagação

$$\gamma(\omega) = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)}$$

$$\gamma(\omega) = \alpha(\omega) + j\beta(\omega)$$

Coefficiente de atenuação [Neper/Km]

Coefficiente de fase [rad/Km]

Evolução da tensão e corrente ao longo da linha:

$$V(f, x) = Ae^{-\gamma x} + Be^{+\gamma x}$$

$$I(f, x) = \frac{1}{Z_0}(Ae^{-\gamma x} - Be^{+\gamma x})$$

$$f = \omega/2\pi$$

Linha adaptada:

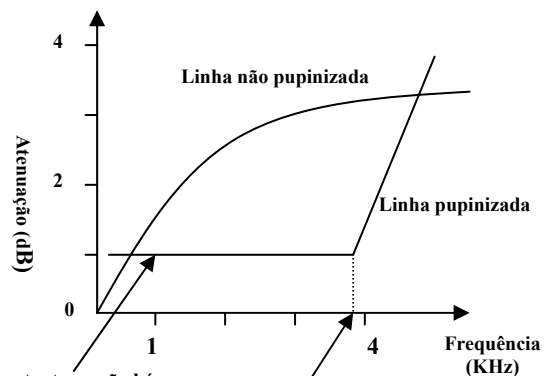
$$Z_c(\omega) = Z_0(\omega)$$

$$H_l(f, l) = \frac{V(f, l)}{V(f, 0)} = e^{-\alpha(f)l} e^{-j\beta(f)l}$$

Função de transferência de uma linha de comprimento *l*

Para combater a distorção de amplitude introduzem-se bobinas de carga (10-100mH) em pontos intermédios da linha (1000- 2000 metros de distância).

A resposta na banda de voz (analógica) é fortemente melhorada mas a atenuação aumenta acentuadamente nas altas frequências.



$$f_c = \frac{1}{\sqrt{CL_p d_p}} \quad L_p = \text{inductância das bobinas} \quad d_p = \text{distância entre as bobinas}$$

Já viu uma bobine de carga ?

Princípios básicos de transmissão 17

He's building
customer
satisfaction
into the line!

**Cook Load Coils provide
the high fidelity transmission
your subscribers expect.**

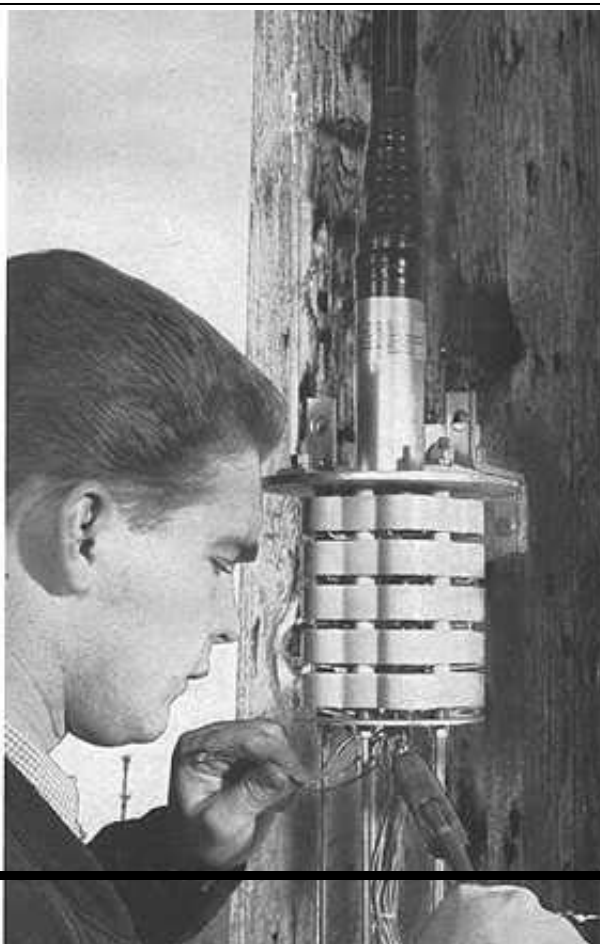
BETTER RECEPTION—Cook Load Coils produce clear, pleasant reception by reducing transmission losses.

ECONOMICAL—Full application of Cook Load Coils cuts outside plant costs by allowing use of smaller gauge conductors.

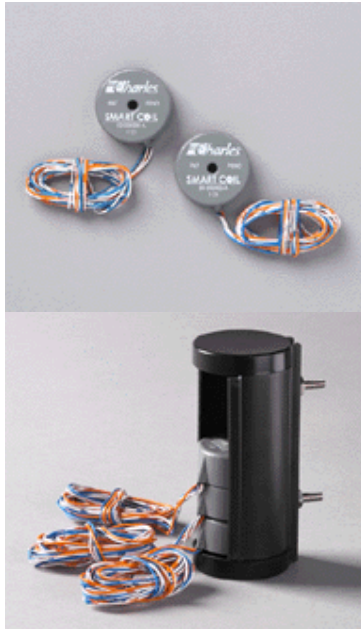
DEPENDABLE—Cook Coils are precision wound and completely encapsulated in high strength epoxy resin. Heavy duty cases are sealed under pressure to provide long trouble-free service.

VARIETY AVAILABLE—To serve your system needs, Cook Load Coils are

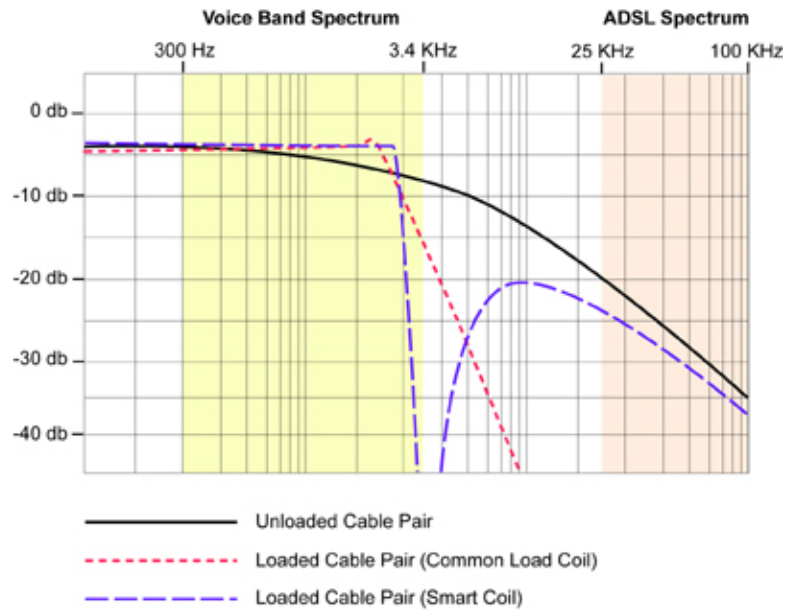
sleeve for aerial use . . . steel cases for aerial, manhole and buried applications . . . encapsulated units for pedestal and



Par de fios simétricos



Typical Cable Frequency Response



http://www.charlesindustries.com/main/te_smart_coil.html

Princípios básicos de transmissão 19

Par de fios simétricos

- **Diafonia:** A proximidade dos pares no cabo vai originar interferências mútuas entre os diferentes pares;
- Este fenómeno tem origem no acoplamento capacitivo entre condutores e no acoplamento indutivo;
- **Dois tipos de diafonia:**
 - **NEXT** - Near End X (cross) - Talk (Paradiafonia)
 - **FEXT** - Far End X (cross) - Talk (Telediafonia)

Cálculo da densidade espectral do sinal de paradiafonia (NEXT):

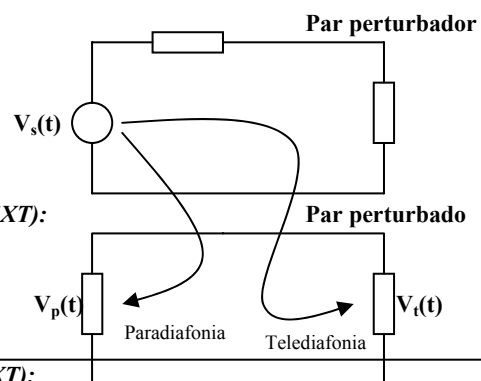
$$S_p(f) = S(f) |X_p(f)|^2 \cong S(f) \chi_p f^{3/2}$$

$$24 \text{ AWG} : \chi_p = 1.7 \times 10^{-9} \text{ KHz}^{-3/2}$$

Cálculo da densidade espectral do sinal de telediafonia (FEXT):

$$S_t(f) = S(f) |X_t(f)|^2 \cong S(f) \chi_t f^2 e^{-\alpha(f)l}$$

$$24 \text{ AWG} : \chi_t = 10^{-10} \text{ KHz}^{-1/2}$$

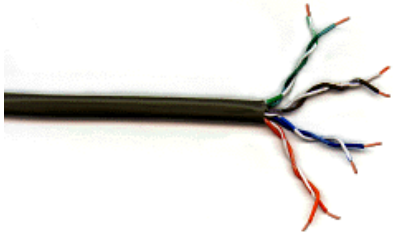


A acção deste fenómeno cresce com a frequência:

- Para os lacetes de assinante analógico o seu efeito é desprezável (Banda de transmissão entre os 300 e 3400 Hz);
- Para os lacetes digitais (podem usar bandas superiores a 100 KHz) o efeito da diafonia é problemático.

Princípios básicos de transmissão 20

Par de fios simétricos



Pares simétricos entrelaçados sem blindagem



Pares simétricos entrelaçados com blindagem

Categorias de pares simétricos entrelaçados sem blindagem

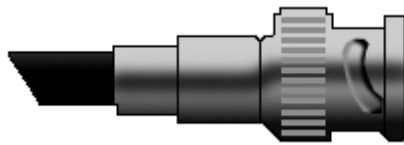
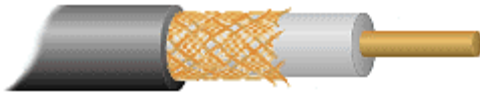
Tipo	Uso
Categoria 1	Voz (linha telefónica)
Categoria 2	Dados até 4 Mbps (LocalTalk)
Categoria 3	Dados até 10 Mbps (Ethernet)
Categoria 4	Dados até 16 Mbps (Token Ring)
Categoria 5	Dados até 100 Mbps (Fast Ethernet)

A diferença das categorias está no número de volta por cm.

Par de fios simétricos

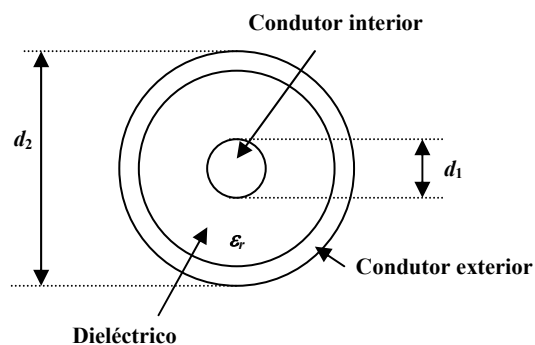
- Transmissão analógica:
 - lacete do assinante na rede telefónica.
 - Transmissão digital:
 - lacete do assinante na RDIS (suporta 2 canais B e um canal D - 144 Kbps);
 - lacete do assinante baseado na tecnologia ADSL - 8 Mbps (download) e 1 Mbps (upload);
 - redes locais (LANs) para ritmos até 100 Mbps (e.g. Ethernet, Token Ring). Categorias importantes em redes de computadores **são**:
 - categoria 3 (10 MHz);
 - categoria 5 (100 MHz): o entrelaçamento é mais apertado e possui melhor isolamento que o par de categoria 3. Utilização em LANs de alta velocidade;
-
- categorias 6 (250 MHz) e 7 (600 MHz);
 - ambas estas categorias são referidas como UTP (Unshielded Twisted Pair), em contraste com o STP (introduzido pela IBM em 1980).

Cabo coaxial



Princípios básicos de transmissão 23

Cabo coaxial



Aproximação para altas frequências:

$$\omega L \gg R$$

- Impedância característica:

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right) \quad \text{Valor típico } 75 \Omega$$

- Coeficiente de atenuação:

$$\alpha(f) = a + b\sqrt{f} + cf \quad \text{dB/Km}$$

- Coeficiente de fase:

$$\beta(\omega) = \frac{\sqrt{\epsilon_r}}{c} \omega \quad \rightarrow f > 100 \text{ KHz}$$

1.2/4.4 mm, f [MHz]
 $a = 0.07, b = 5.15, c = 0.005$

α_0 é coeficiente de atenuação à frequência f_0

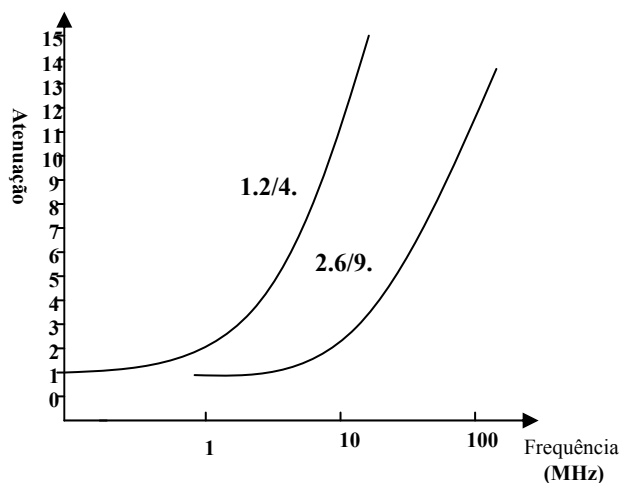
$$\alpha(f) \approx \alpha_0 \sqrt{f/f_0}$$

$$v_g = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \Rightarrow \tau_g = l \frac{\sqrt{\epsilon_r}}{c}$$

Não há distorção de fase

Princípios básicos de transmissão 24

Cabo coaxial



A sua utilização deve evitar-se para frequências inferiores a 60 KHz devido a:

- distorção de atraso;
- degradação das propriedades diafónicas.

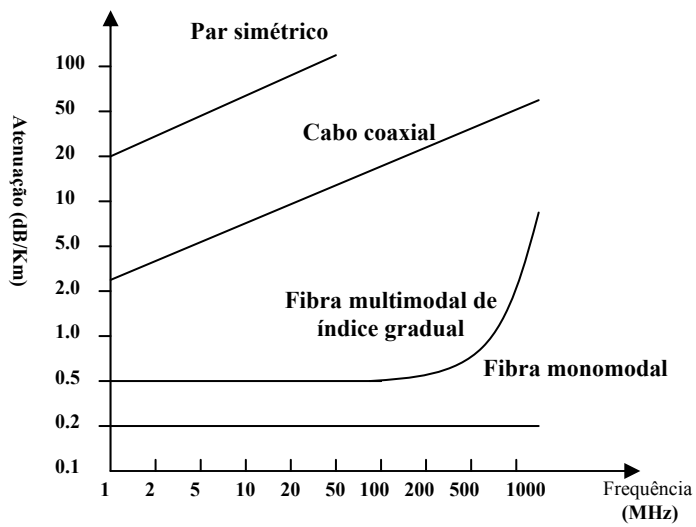
Aplicações / normalização

- Passado
- **Redes telefónicas:**
 - meio de transmissão dos sistemas de transmissão analógica de grande distância (e.g. sistemas FDM de grande capacidade - até 10800 canais telefónicos com uma frequência máxima de 60 MHz - rec. G333 do ITU-T);
- Presente
- **Redes locais (LANs):**
 - redes de computadores;
 - **Redes híbridas (fibra/coaxial):**
 - redes de distribuição de televisão por cabo;

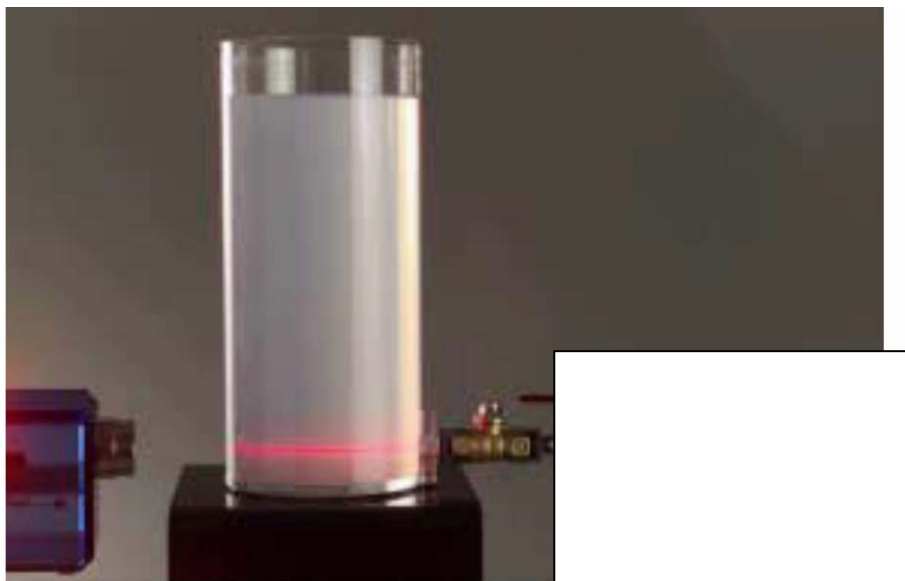
Cabos coaxiais normalizados pelo ITU-T:

Tipo	2.6/9.5	1.2/4.4	0.7/2.9
Rec. ITU-T	G 623	G 622	G 621
d1	2.6 mm	1.2 mm	0.7 mm
d2	9.5 mm	4.4 mm	2.9 mm
d2/d1	3,65	3,67	4,14
Impedância característica	75	75	75

→ $d_2/d_1 = 3.6 \Rightarrow$ atenuação mínima

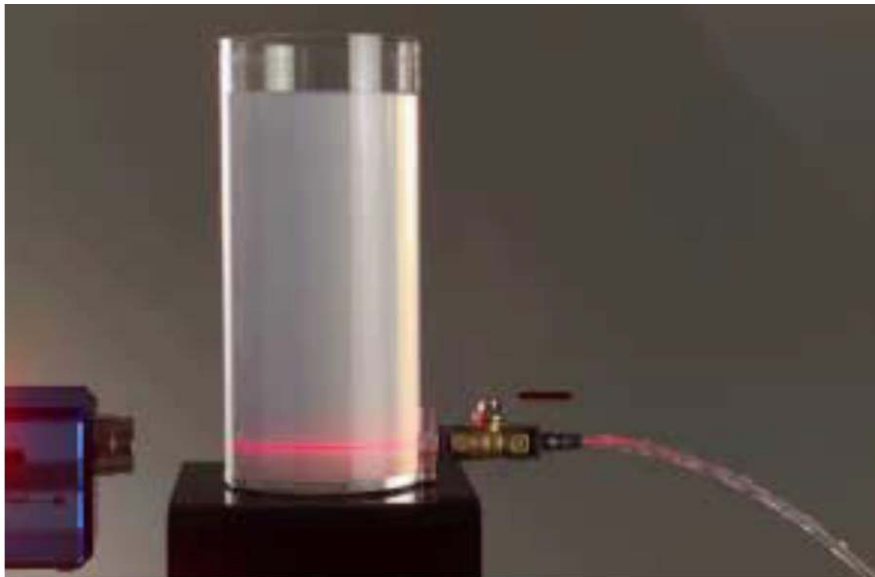


Fibra óptica



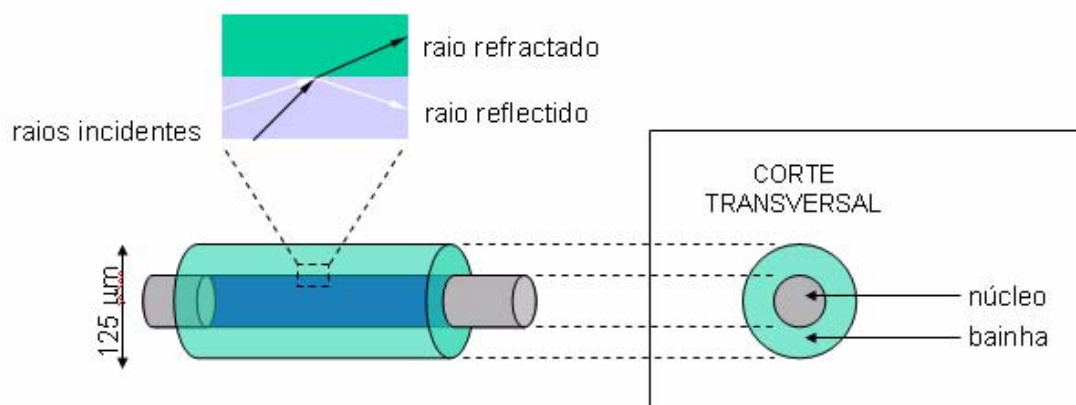
Experiência de John Tyndal (1820-1893)

Fibra óptica



Princípios básicos de transmissão 29

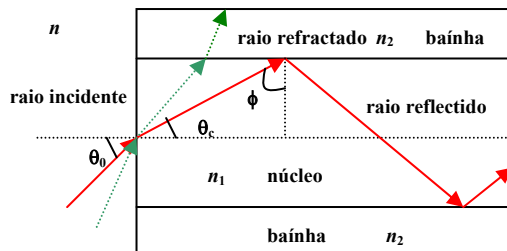
Fibra óptica



Princípios básicos de transmissão 30

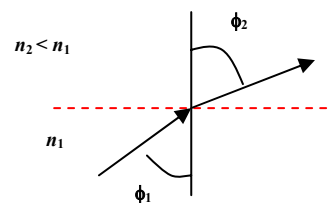
Propagação da luz na fibra óptica

- Esta aproximação é válida quando o raio da fibra 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**

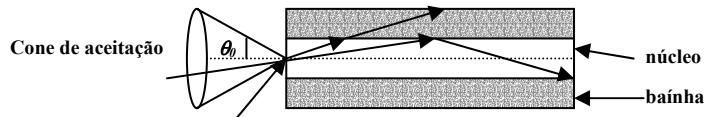
$$\text{por;} \quad \sin \phi_{\min} = \frac{n_2}{n_1}$$

- **O ângulo máximo de entrada é dado por:**

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

Fibra óptica

- **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 (capacidade de captar luz):

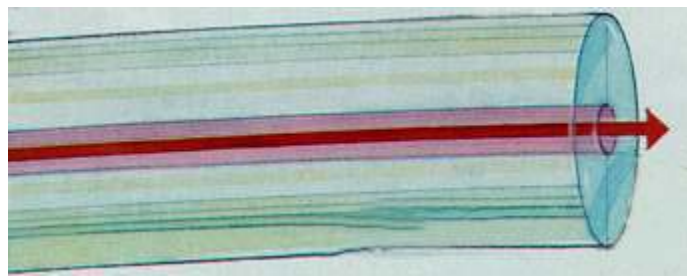
$$AN = n \sin \theta_{0,\max} = n_1 \sin \theta_c = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \approx n_1 \sqrt{2\Delta}$$

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

Princípios básicos de transmissão 33

Fibra óptica

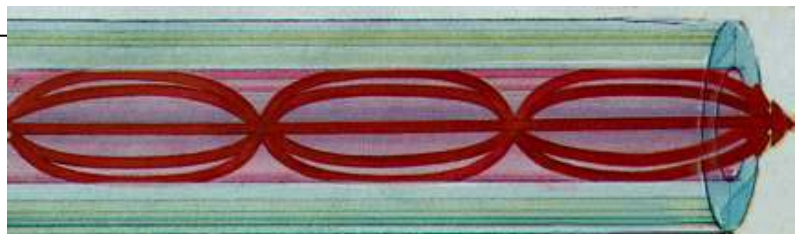
Fibra monomodo



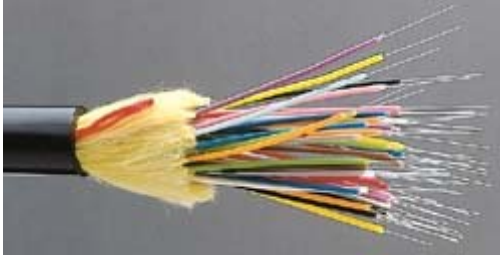
Fibra multimodo



Fibra multimodo de índice gradual

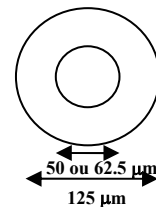
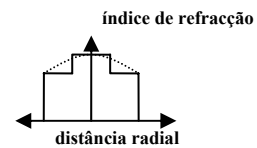


Princípios básicos de transmissão 34



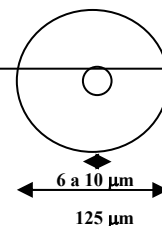
- **Fibra multimodal:**

- 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.



Fibra óptica

	Fibras Monomodo Padrão	Fibras Multimodo
Diâmetro do núcleo	6-10 μm (ITU-T rec. G652)	50 μm (ITU-T rec. G651)
Diâmetro da bainha	125 μm	125 μm
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	Int ramodal	Intermodal e intramodal

Desvantagens das fibras monomodo:

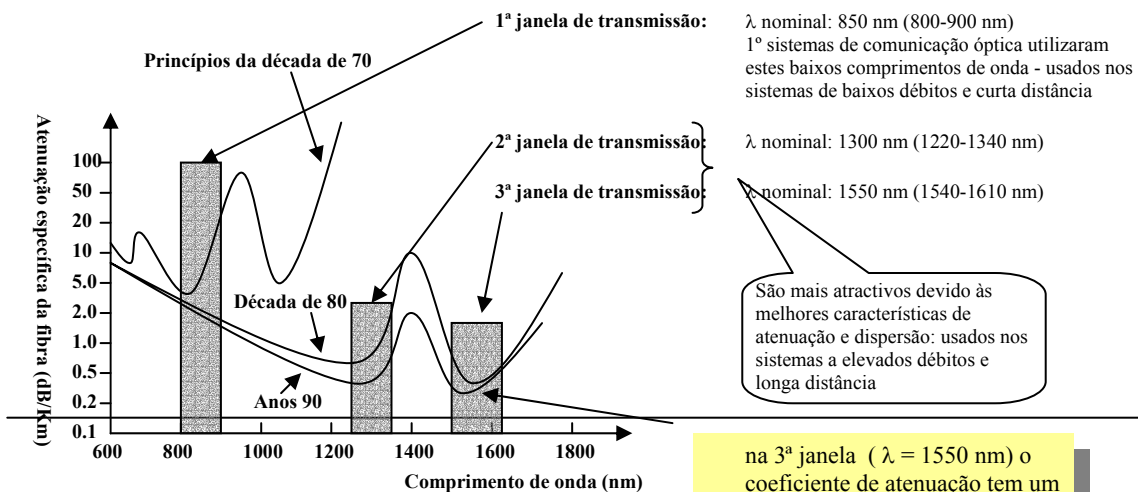
- Abertura numérica menor \Rightarrow menor ângulo de aceitação e maiores perdas de acoplamento fonte óptica - fibra;

Vantagens:

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

Princípios básicos de transmissão 37

Janelas de transmissão

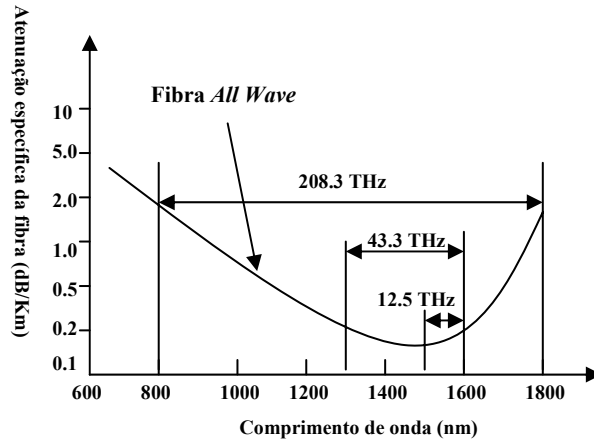


Princípios básicos de transmissão 38

Largura de banda disponível

- **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.



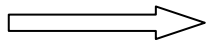
Princípios básicos de transmissão 39

Largura de banda disponível

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

Relação entre frequência óptica e comprimento de onda:

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



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

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

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

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

Largura de banda óptica, em v : Δv

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

Exemplo:

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

Exemplo:

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

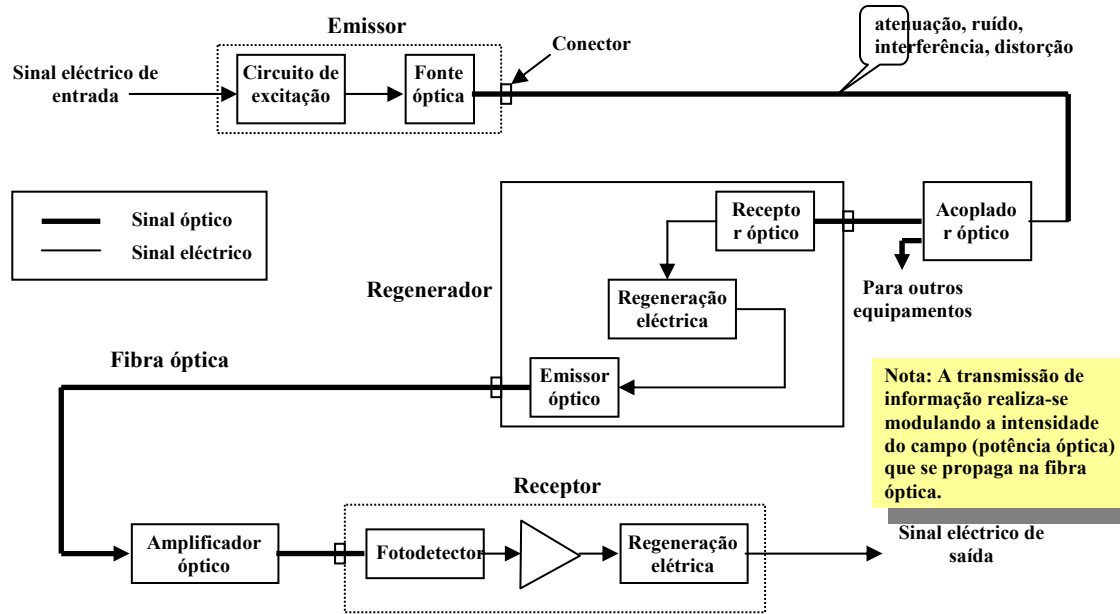
Princípios básicos de transmissão 40

Vantagens das fibras ópticas

- **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 transmissão de cobre.

Elementos de uma ligação por fibra óptica

Elementos de uma ligação por fibra óptica



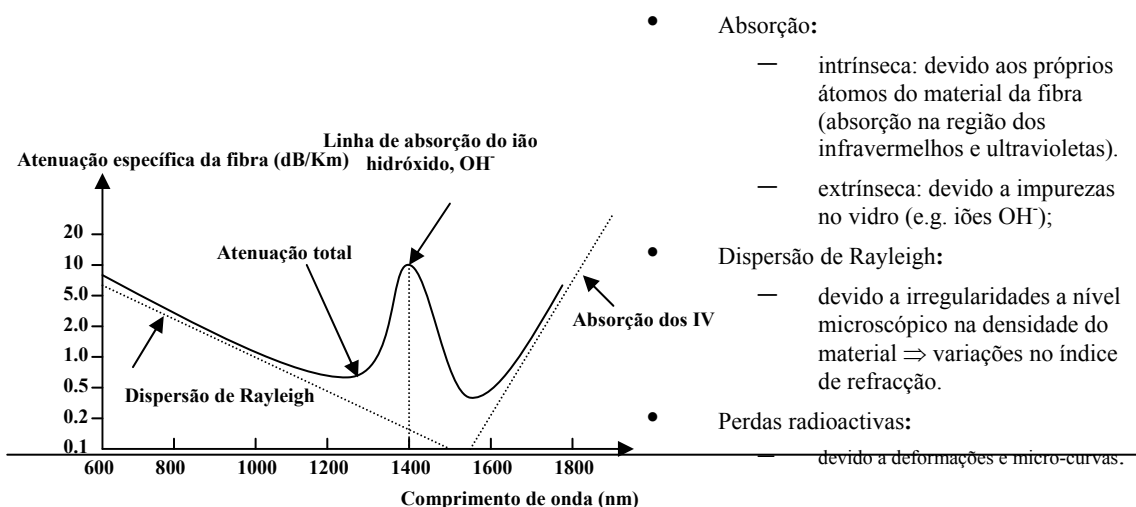
Parâmetros característicos da fibra

- 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 semiconductor (GaAs) operando entre 0.8 e 0.9 μm ;
- 1976 - Primeiro sistema de comunicações óptica (45 Mbps, $\lambda = 0.82 \mu\text{m}$);
- 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 Gbps);
- 2000 - Sistema comercial DWDM com 175 canais a 40 Gbps (7 Tbps numa

Princípios básicos de transmissão 45

Parâmetros característicos da fibra

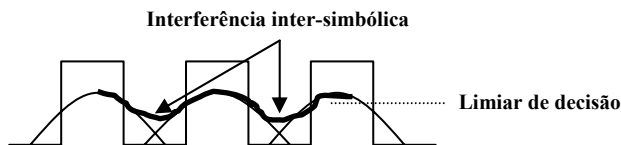
- Origem da atenuação na fibra óptica -



Princípios básicos de transmissão 46

- Dispersão -

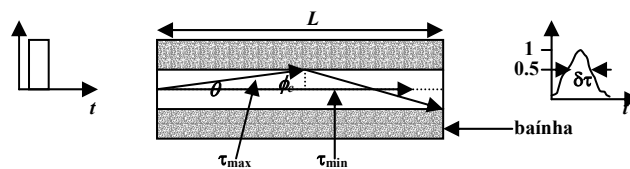
- A propagação da luz através da fibra óptica sofre o efeito da dispersão - distorção e alargamento dos pulsos transmitidos;
- Causas:
 - existência de vários modos de propagação na fibra óptica \Rightarrow Dispersão intermodal;
 - variação do índice de refração com o comprimento de onda, $\lambda \Rightarrow$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



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

- 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 pulso, definido a meia potência é aproximado por

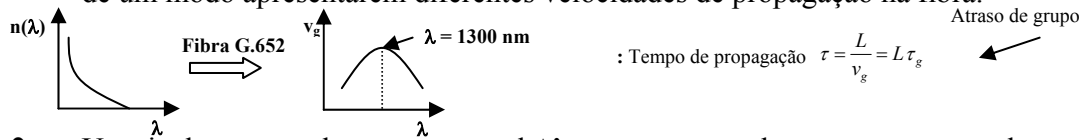
$$\delta\tau = \tau_{\max} - \tau_{\min} \approx \frac{L}{c} n_1 \Delta$$

: índice em degrau

Parâmetros característicos da fibra

- Dispersão intramodal -

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

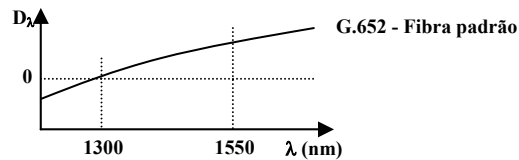


- Um sinal com uma largura espectral $\Delta\lambda$ apresenta um alargamento temporal a meia potência $\Delta\tau$ (ou σ_{intra} quando expresso em desvio padrão):

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

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

D_λ [ps/(nm.Km)]: parâmetro de dispersão intramodal



Parâmetros característicos da fibra