REDES DE TELECOMUNICAÇÕES

Meios de transmissão

Engª de Sistemas e Informática

UALG/FCT/DEEI 2006/2007

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 telefónica local, em LANs; largura de banda ≈ 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 ≈ 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 ⇒ atenuação do sinal
  - atenuação = *Pin* / *Pout*;
  - 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 ⇒ distorção do sinal;
- Introdução (geralmente, adição) de sinais indesejáveis sobrepostos ao sinal que se pretende transmitir ⇒ ***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 somente através da multiplicação de uma constante e de um tempo de atraso finito, *td*:

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

- ***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 de variar linearmente em função da frequência

$\arg[H(f)] = -2\pi f t_d \pm m\pi$ (*m* é um nº 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 ***atraso de grupo*** $\tau_g(f) = \frac{1}{2\pi}\frac{d\arg[H(f)]}{df}$

Transmissão sem distorção

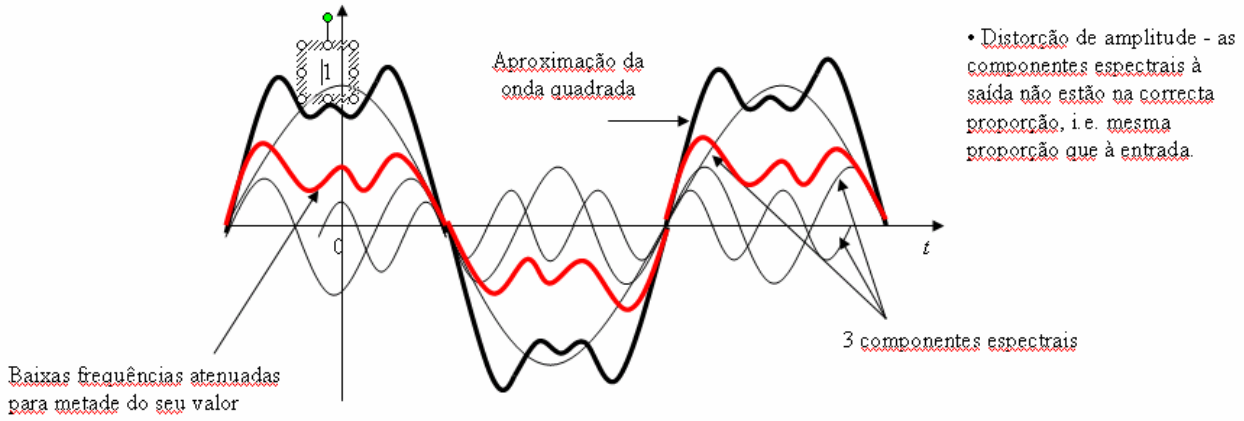
Distorção não-linear:

- 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

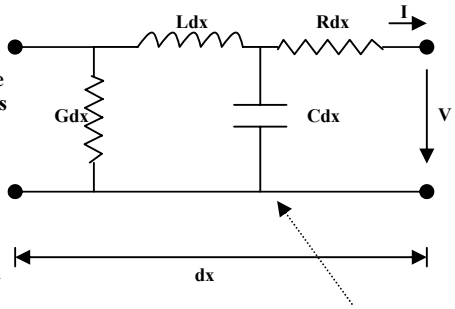
- Sinal original - aproximação da onda quadrada que inclui os termos até à 5ª harmónica, i.e. $x(t) = \cos(2\pi f_0 t) - 1/3\cos(6\pi f_0 t) + 1/5\cos(10\pi f_0 t)$



Par de fios

- **Par simétrico de fios: linha de transmissão constituída por dois condutores isolados**
  - **condutor: cobre;**
  - **isolador: polietileno.**

- **Parâmetros primários:**
  - **R [Ω/km] (Ohm): resistência por unidade de comprimento. Traduz a resistência dos condutores mais o efeito pelicular;**
  - **L [H/km] (Henry) : indutância por unidade de comprimento. Devida ao campo magnético entre os condutores;**
  - **C [F/km] (Farad) : capacidade por unidade de comprimento. Traduz a energia eléctrica armazenada no dieléctrico entre os condutores;**
  - **G [S/km] (Siemens):condutância por unidade de comprimento. Traduz a conductância transversal do dieléctrico.**



Modelo de um troço elementar de linha de transmissão

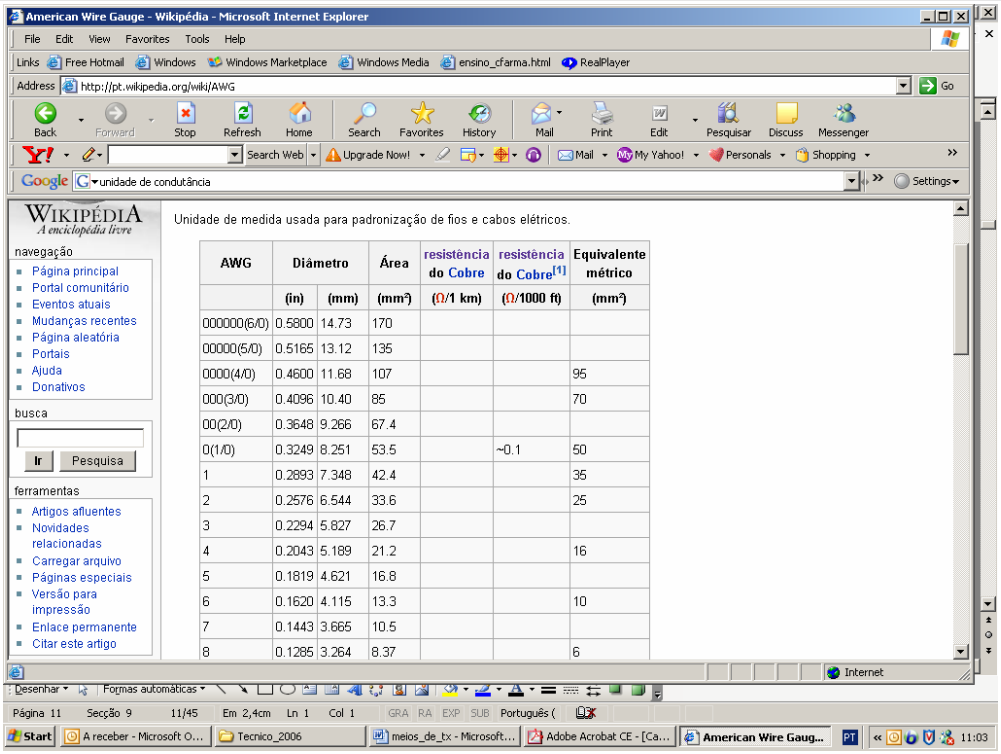
Par de fios

Tabela 3.1 Parâmetros primários característicos de um cabo do tipo 24 AWG(70 ºF)

f(kHz)	R(Ω/km)	L(mH/km)	G(μS/km)	C(μF/km)
1	172	0.613	0.071	0.052
5	172	0.611	0.290	0.052
10	173	0.610	0.530	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

Todos esses parâmetros variam em função da frequência e das características dos cabos, como seja o diâmetro dos condutores, o tipo de dieléctrico usado, etc. Na tabela 3.1 apresenta-se a variação desses parâmetros em função da frequência, para um cabo com isolamento de polietileno de calibre 0.5 mm, designado segundo a terminologia da *American Wire Gauge* por 24 AWG. Como se pode ver, a capacidade é independente da frequência na banda de frequências consideradas, a indutância tem um decrescimento lento com a frequência, enquanto a resistência e a condutância crescem ambas com a frequência. A resistência para as altas frequências é proporcional à raiz quadrada da frequência, devido ao efeito pelicular (tendência para a corrente se concentrar na superfície do condutor quando a frequência aumenta).

Par de fios



Unidade de medida usada para padronização de fios e cabos elétricos.

AWG	Diâmetro		Área	resistência do Cobre	resistência do Cobre[1]	Equivalente métrico
	(in)	(mm)	(mm²)	(Ω/1 km)	(Ω/1000 ft)	(mm²)
000000(6/0)	0.5800	14.73	170			
00000(5/0)	0.5165	13.12	135			
0000(4/0)	0.4600	11.68	107			95
000(3/0)	0.4096	10.40	85			70
00(2/0)	0.3648	9.266	67.4			
0(1/0)	0.3249	8.251	53.5		~0.1	50
1	0.2893	7.348	42.4			35
2	0.2576	6.544	33.6			25
3	0.2294	5.827	26.7			
4	0.2043	5.189	21.2			16
5	0.1819	4.621	16.8			
6	0.1620	4.115	13.3			10
7	0.1443	3.665	10.5			
8	0.1285	3.264	8.37			6

Par de fios simétricos

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**

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

- **Evolução da tensão e corrente ao longo da linha:**

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

$$I(f,x)=\frac{1}{Z_0}\left(Ae^{-\gamma x}-Be^{+\gamma x}\right) \qquad f=\omega/2\pi$$

Linha adaptada:

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

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

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

Coeficiente de atenuação [Neper/km]

Coeficiente de fase [rad/km]

Função de transferência de uma linha de comprimento *l*
Adaptada em ambos os lados

Aproximação para os parâmetros da linha

$$\omega L << R \quad \text{e} \quad G << \omega C$$

Nesta banda de frequências tem-se que:

$$Z_0 \cong \sqrt{\frac{R}{j\omega C}} = \sqrt{\frac{R}{\omega C}}\, e^{-j\frac{\pi}{4}}$$

$$\gamma = \alpha + j\beta \cong \sqrt{\frac{\omega RC}{2}} + j\sqrt{\frac{\omega RC}{2}}$$

$$\omega L >> R \quad \text{e} \quad \omega C >> G$$

Nesta banda de frequências tem-se que:

$$Z_0 \cong \sqrt{\frac{L}{C}}$$

$$\alpha \cong \frac{R}{2}\sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{G}{2}\sqrt{\frac{L}{C}}$$

$$\beta \cong \omega\sqrt{LC}$$

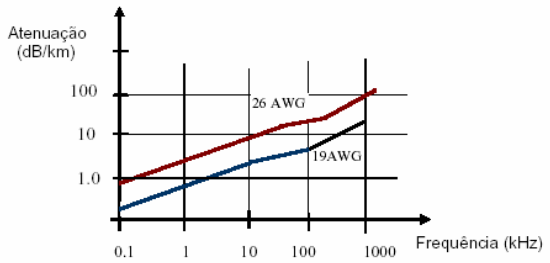


Figura 3.2 Variação da atenuação em função da frequência.

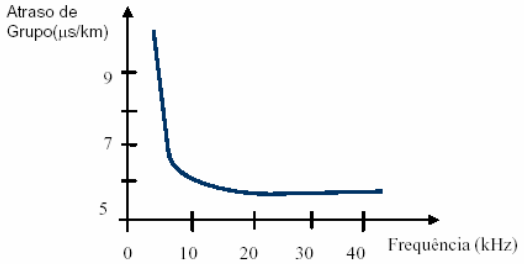


Figura 3.3 Variação do atraso de grupo em função da frequência para um cabo 24 AWG.

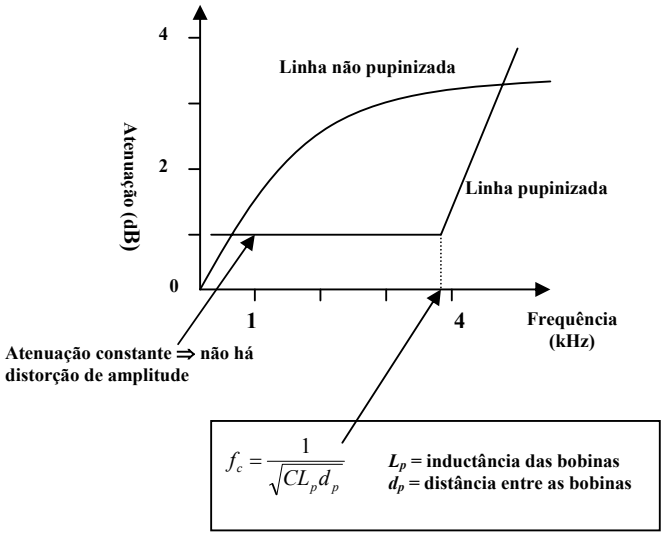
Escolhendo, convenientemente, o valor da indutância das bobinas de carga e do espaçamento entre estas, é possível garantir que na banda necessária para a transmissão de voz analógica a atenuação dos pares simétricos seja aproximadamente constante. Esta solução é particularmente interessante quando os utilizadores estão muitos afastados da central local, como acontece nas zonas rurais. No entanto, será importante realçar, que os pares carregados não podem ser usados para a transmissão da voz digitalizada e, por conseguinte, não podem servir de infra-estrutura de transmissão nos lacetes digitais de assinante.

Será de notar que os pares simétricos também são muito usados nas redes de dados, particularmente nas LANs. Para estas aplicações estão disponíveis os pares não blindados ou UPT (*unshielded twisted pair*) e os pares blindados. Os primeiros são os mais usados particularmente para débitos até 10 Mbit/s. Quando os débitos em jogo e o número de pares num cabo são elevados é mais aconselhável usar os segundos, pois a blindagem permite reduzir as interferências electromagnéticas entre pares e, assim, reduzir os efeitos perniciosos da diafonia, os quais se vão estudar na subsecção seguinte.

Par de fios simétricos

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.



$$f_c = \frac{1}{\sqrt{CL_p d_p}}$$

L_p = inductância das bobinas
d_p = distância entre as bobinas

Par de fios simétricos

Já viu uma bobine de carga ?

He's building customer satisfaction into the line!

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

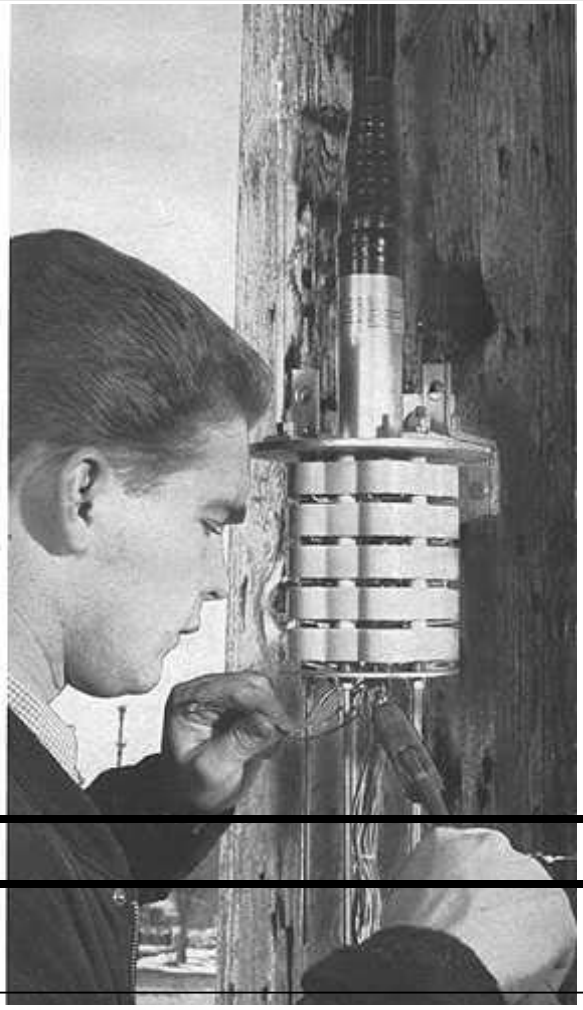
BETTER RECEPTION—Cook Load Coils produce clear, pleasant reception by reducing transmission losses.

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

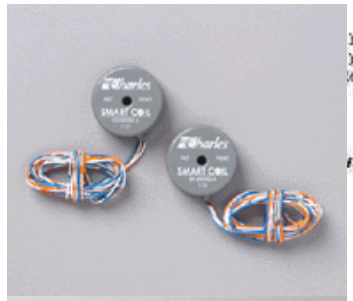
DEPENDABLE—Cook Coils are precision wound and completely encapsulated in high strength epoxy resin. Heavy duty cases are sealed under pressure to provide long trouble-free service.

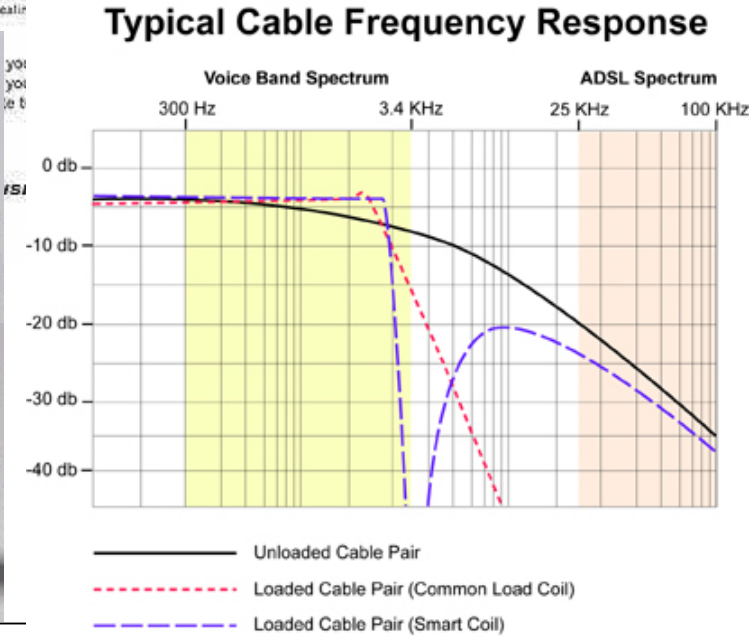
VARIETY AVAILABLE—To serve your system needs, Cook Load Coils are available in a variety of types: lead sleeve for aerial use . . . steel cases for aerial, manhole and buried applications . . . encapsulated units for pedestal and other ready access enclosures . . . and expandable cases that allow you to defer [illegible] (an important advantage in areas where growth is difficult to forecast).

Illustration shows the addition of a cluster of coils to an expandable case prior to resealing



Par de fios simétricos

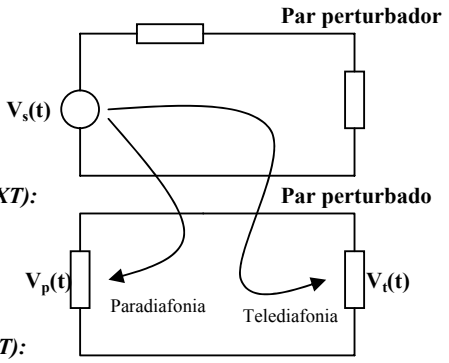




http://www.charlesindustries.com/main/te_smart_coil.html

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):

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

$$24\ \text{AWG}: \chi_p = 1.7\times10^{-9}\ \text{KHz}^{-3/2}$$

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

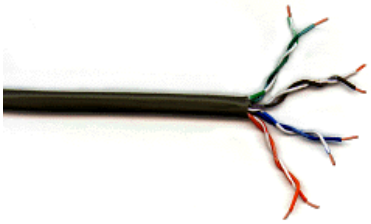
$$S_t(f) = S(f)\left|X_t(f)\right|^2 \cong S(f)\chi_t f^2 l e^{-\alpha(f)l}$$

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

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.

Par de fios simétricos



Pares simétricos entrelaçados sem blindagem

Pares simétricos entrelaçados com blindagem

Categorias de pares simétricos entrelaçados sem blindagem

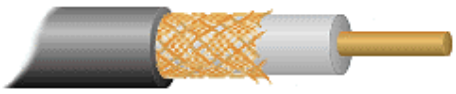
Tipo	Uso
Categoria 1	Voz (linha telefónica)
Categoria 2	Dados até 4 Mbps (LocalTalk)
Categoria 3	Dados até 10 Mbps (Ethernet)
Categoria 4	Dados até 16 Mbps (Token Ring)
Categoria 5	Dados até 100 Mbps (Fast Ethernet)

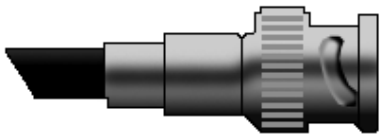
A diferença das categorias está no número de volta por cm.

Par de fios simétricos

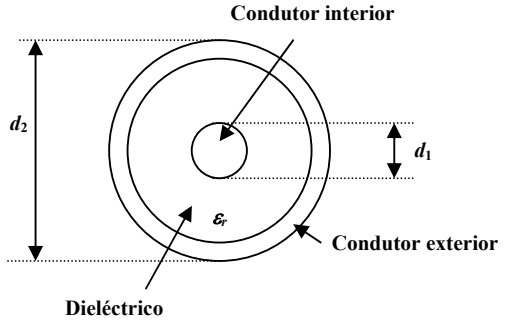
- Transmissão analógica:
  - lacete do assinante na rede telefónica.
- Transmissão digital:
  - lacete do assinante na RDIS (suporta 2 canais B e um canal D - 144 Kbps);
  - lacete do assinante baseado na tecnologia ADSL - 8 Mbps (download) e 1 Mbps (upload);
  - redes locais (LANs) para ritmos até 100 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





Cabo coaxial



Aproximação para altas frequências:

$\omega L >> R$

- **Impedância característica:**

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_r}} \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right)$$

Valor típico 75 Ω

- **Coeficiente de atenuação:**

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

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

- **Coeficiente de fase:**

$$\beta(\omega) = \frac{\sqrt{\varepsilon_r}}{c}\omega \longrightarrow f > 100 \text{ kHz}$$

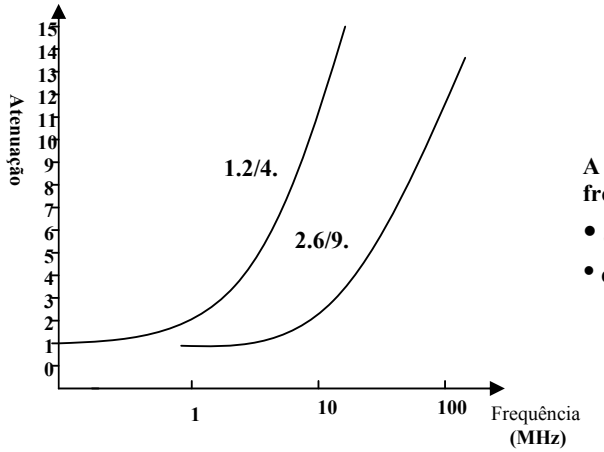
α_0 é coeficiente de atenuação à frequência f_0

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

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

Não há distorção de fase

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

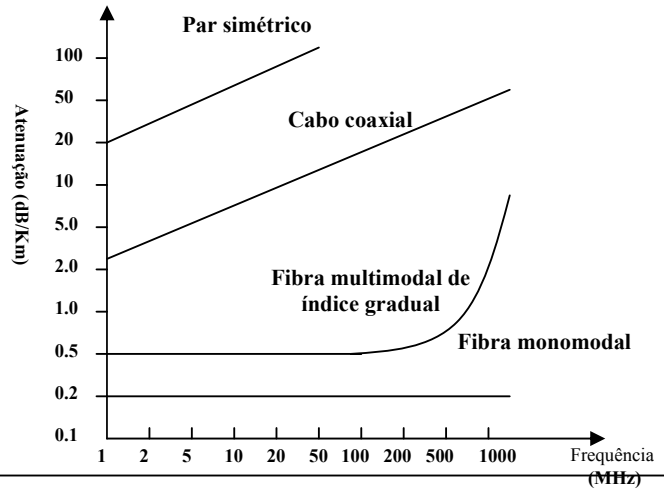
- **Redes locais (LANs):**
  - redes de computadores;
- **Redes híbridas (fibra/coaxial):**
  - redes de distribuição de televisão por cabo;

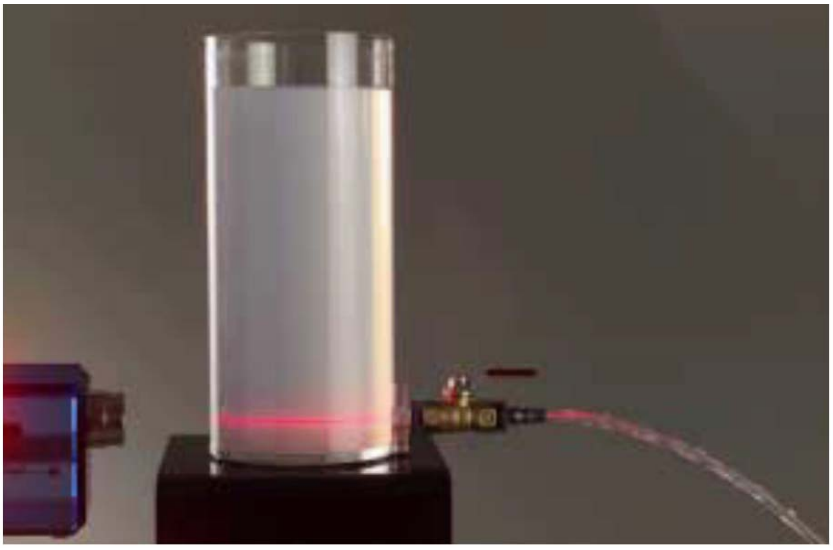
Cabos coaxiais normalizados pelo ITU-T:

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

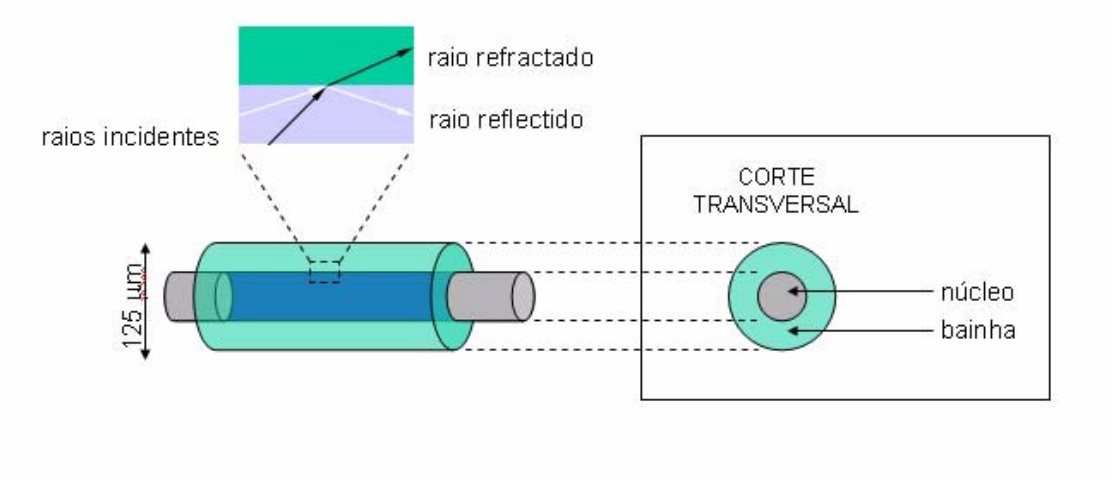
→ **$d_2/d_1 = 3.6 \Rightarrow$ atenuação mínima**

Aplicações / normalização



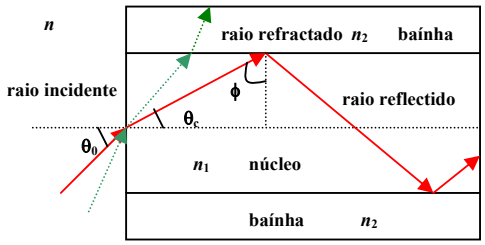


Experiência de John Tyndal (1820-1893)



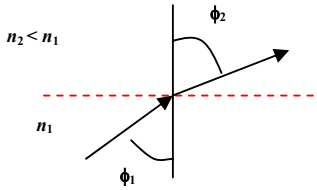
Propagação da luz na fibra óptica

- **Esta aproximação é válida quando o raio da fibra é muito maior que o comprimento de onda (λ) ⇒ fibras multimodo.**



Alguns valores para *n*:

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



- **Lei de Snell:**

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

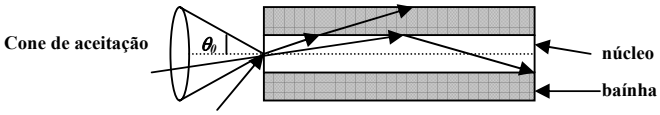
- **O ângulo mínimo que suporta a reflexão total interna é dado por:**

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

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

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

- **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.**



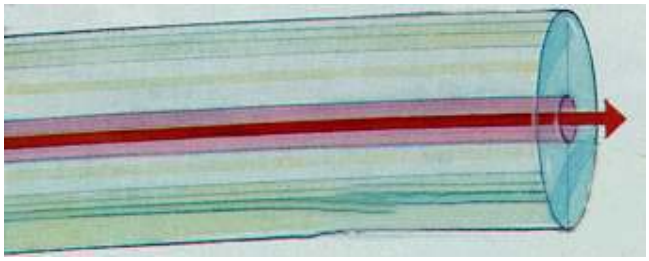
A abertura numérica (capacidade de captar luz):

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

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

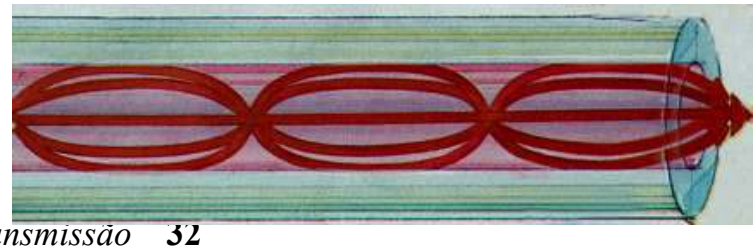
Fibra óptica

Fibra monomodo

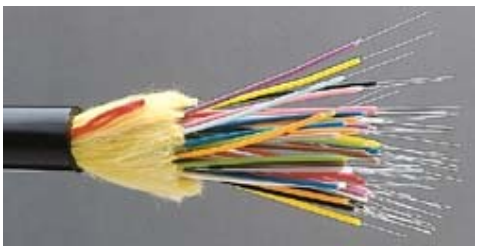


Fibra multimodo

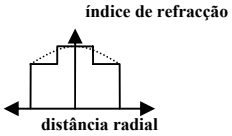
Fibra multimodo
de índice gradual

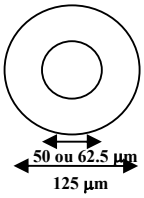


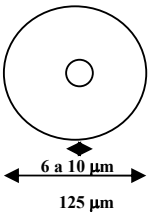
Fibra óptica



- **Fibra multimodal:**
  - fibra com índice em degrau;
    - núcleo com índice uniforme ⇒ velocidade de propagação no núcleo é constante ⇒ raios que viajam por caminhos mais longos chegam mais tarde que os raios que viajam por caminhos mais curtos ⇒ dispersão intermodal;
  - fibra com índice de variação gradual (50 ou 62.5 μm).
    - índice de refracção decrescente com a distância ao centro do núcleo e variação parabólica ⇒ raios que viajam por caminhos mais longos têm maior velocidade (devido ao decréscimo do índice de refracção) que os raios que viajam por caminhos mais curtos ⇒ dispersão intermodal reduzida logo são possíveis maiores larguras de banda.
- **Fibra monomodal:**
  - **e.g. fibra padrão ou G.652.**







	Fibras Monomodo Padrão	Fibras Multimodo
Diâmetro do núcleo	6-10 um (ITU-T rec. G652)	50 um (ITU-T rec. G651)
Diâmetro da baínha	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 posíveis
Dispersão	Int ramodal	Intermodal e intramodal

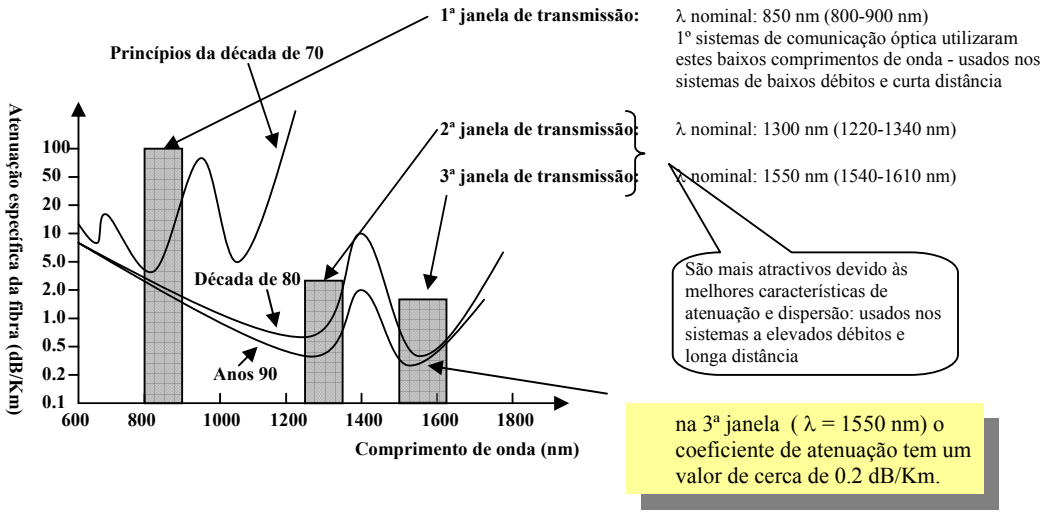
Desvantagens das fibras monomodo:

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

Vantagens:

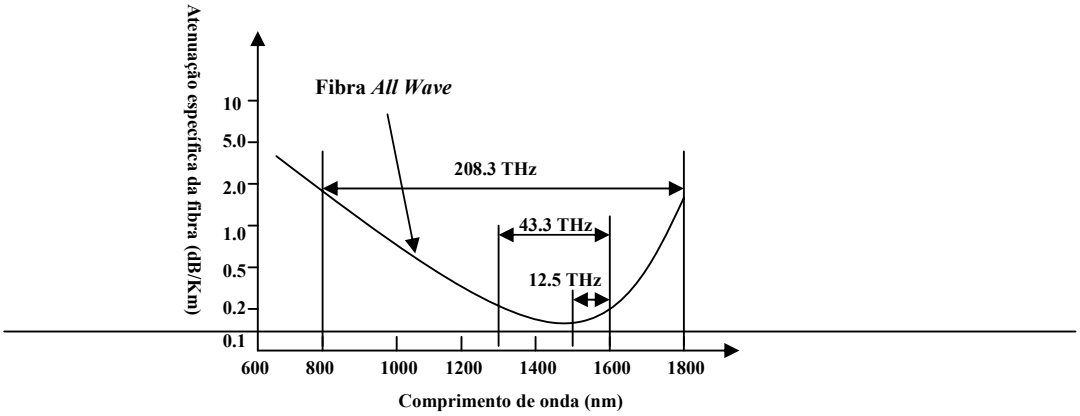
- Só existe dispersão intramodal (nula para 1310 ± 10 nm e cerca de 20 ps/(nm.Km) a 1550 nm.

Janelas de transmissão



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.**



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 vazio, c**

Exemplo:

λ = 1550 nm $\Rightarrow$ ν = 193.4 x 10^{12} Hz = 193.4 THz
λ = 1300 nm $\Rightarrow$ ν = 230.6 x 10^{12} Hz = 230.6 THz

Para $\Delta\lambda << \lambda$:

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

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

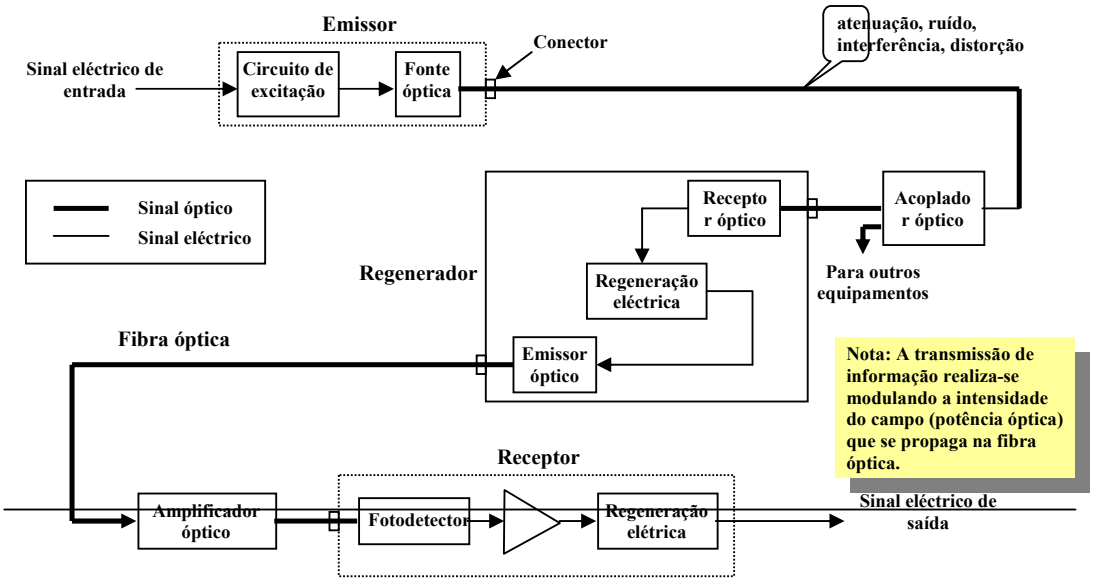
$$\Delta\nu = \frac{c}{\lambda^2}\Delta\lambda$$

Exemplo:

λ = 1550 nm: $\Delta\lambda$ = 1nm $\Rightarrow$ $\Delta\nu$ = 125 GHz
λ = 1300 nm: $\Delta\lambda$ = 1nm $\Rightarrow$ $\Delta\nu$ = 177 GHz

- **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

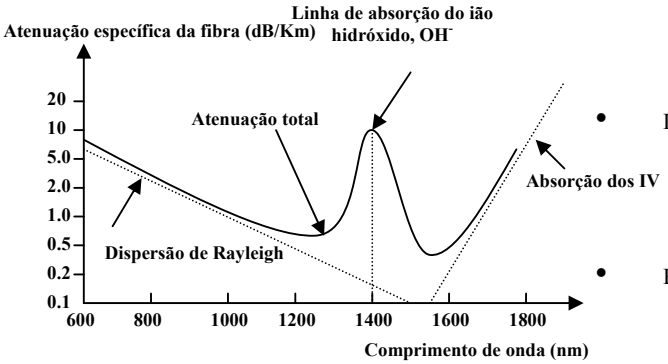


Evolução dos sistemas de comunicação óptica

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 semicondutor (GaAs) operando entre 0.8 e 0.9 μm;**
- **1976 - Primeiro sistema de comunicações óptica (45 Mbps, λ = 0.82 μm);**
- **1977 - Primeiros sistemas comerciais da 1ª geração (λ = 0.85 μm);**
- **1980 - Primeiros sistemas comerciais da 2ª geração (λ = 1.3 μm);**
- **1985 - Demonstração da amplificação óptica em fibras dopadas com érbio;**
- **1988 - Primeiro cabo submarino digital com fibra (40000 circuitos, λ = 1.3 μm);**
- **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**

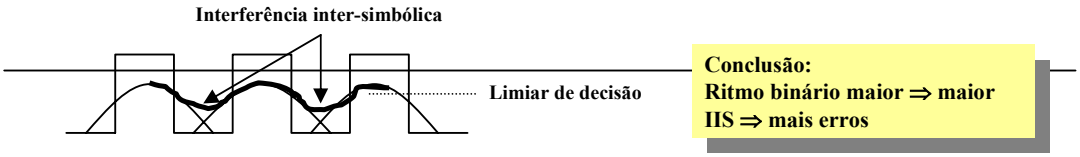
- Origem da atenuação na fibra óptica -



- 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. iões OH^-);
- Dispersão de Rayleigh:
  - devido a irregularidades a nível microscópico na densidade do material ⇒ variações no índice de refracção.
- Perdas radioactivas:
  - devido a deformações e micro-curvas.

- Dispersão -

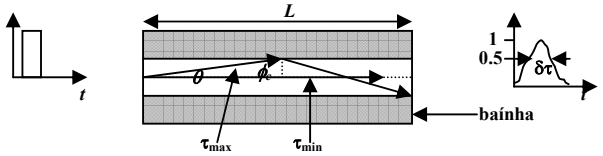
- **A propagação da luz através da fibra óptica sofre o efeito da dispersão - distorção e alargamento dos pulsos transmitidos;**
- **Causas:**
  - **existência de vários modos de propagação na fibra óptica ⇒ <u>Dispersão intermodal</u>;**
  - **variação do índice de refracção com o comprimento de onda, λ ⇒ <u>Dispersão intramodal</u>.**
- **Consequência:**
  - **aparecimento da interferência inter-simbólica (IIS) que vai determinar o**



Conclusão:
Ritmo binário maior ⇒ maior IIS ⇒ 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.

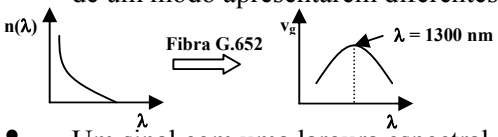


- O alargamento do pulso, definido a meia potência é aproximado por

$$\delta\tau = \tau_{\max} - \tau_{\min} \approx \frac{L}{c} n_1 \Delta \text{ : índice em degrau}$$

- Dispersão intramodal -

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

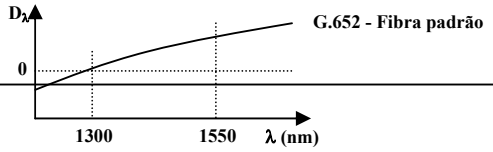


: Tempo de propagação $\tau = \frac{L}{v_g} = L\tau_g$

Atraso de grupo

- 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):

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

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

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