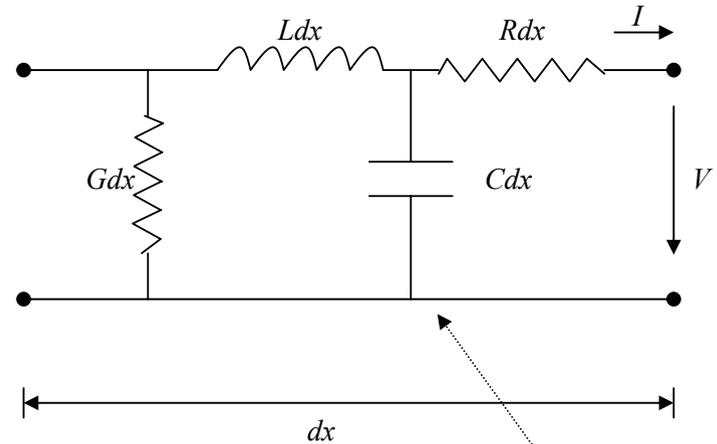


Par simétrico de fios (ou linha bifilar)

- 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 dieléctrico e nos condutores;
 - C [F / km]: traduz a energia eléctrica armazenada no dieléctrico entre os condutores;
 - G [S / km]: traduz a resistência (conductância) transversal do dieléctrico.



Modelo de um troço elementar da linha de transmissão

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 (Ω /km)	L (mH/km)	G (μ S/km)	C (μ F/km)
1	172	0,613	0,071	0,052
5	172	0,611	0,29	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

Notas:

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

Para frequências elevadas $R \propto \sqrt{f}$

$G \ll \omega C$

- Parâmetros primários dependem:
 - da frequência;
 - das características do cabo (e.g. diâmetro dos condutores, tipo de dielétrico e condutor).

Características de transmissão do par simétrico de fios

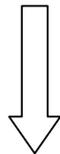
- Parâmetros secundários:

- Impedância característica

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

- Constante de propagação

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



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

Coeficiente de atenuação [Neper / km]

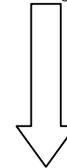
Coeficiente de fase [rad / km]

- Evolução da tensão e corrente ao longo da linha:

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

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

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



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

Atenuação e atraso do par simétrico de fios

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

Resposta de amplitude (ganho):

$$|H_l(f, l)|$$



Atenuação (dB):

$$A_{dB}(f, l) = -20 \log_{10} |H_l(f, l)|$$

Usando

$$\begin{cases} \ln(e^{-\alpha l}) = \frac{\log_{10}(e^{-\alpha l})}{\log_{10}(e)} \\ 20 \log_{10}(e) \cong 8.686 \text{ dB/Np} \end{cases}$$



$$A_{[dB]} \cong 8.686 l \alpha(f)$$

Crescente com a distância e a frequência

Resposta de fase:

$$\arg[H_l(f, l)]$$



Atraso de grupo (s):

$$\tau_g(f) = \frac{l}{v_g(f)} = -\frac{1}{2\pi} \frac{d \arg\{H_l(f, l)\}}{df} = -\frac{1}{2\pi} \frac{d\beta(f)}{df} l$$



Atraso de grupo específico (s / km):

$$\frac{\tau_g(f)}{l} = \frac{1}{v_g(f)} = \frac{1}{2\pi} \frac{d\beta(f)}{df}$$

Aproximações para os parâmetros da linha

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

Aproximação para baixas frequências:

$$G \ll \omega C, \quad \omega L \ll R$$

- Impedância característica:

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

- Coeficiente de atenuação:

$$\alpha(\omega) \cong \sqrt{\frac{\omega RC}{2}}$$

- Coeficiente de fase:

$$\beta(\omega) \cong \sqrt{\frac{\omega RC}{2}}$$

Há distorção de amplitude e fase

Porém, devido ao efeito pelicular:

$$\alpha(f) \propto R \propto \sqrt{f}$$

Aproximação para altas frequências:

$$G \ll \omega C, \quad \omega L \gg R$$

- Impedância característica:

$$Z_0(\omega) \cong \sqrt{\frac{L}{C}}$$

- Coeficiente de atenuação:

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

- Coeficiente de fase:

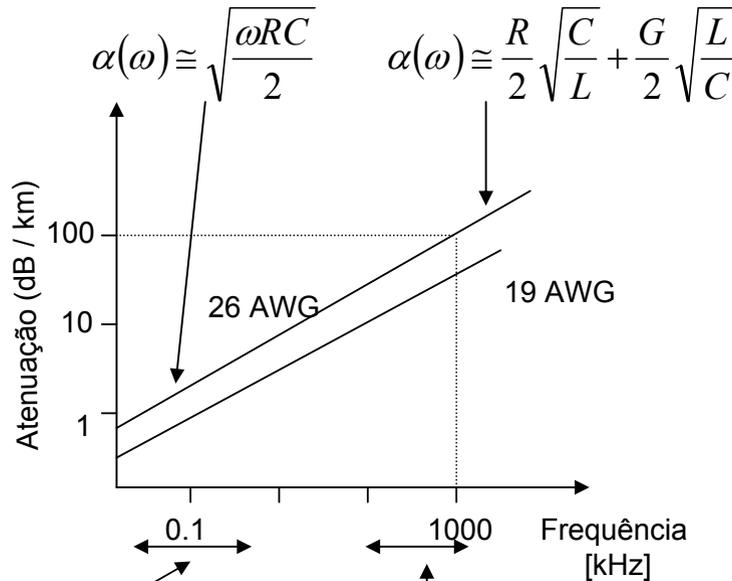
$$\beta(\omega) \cong \omega \sqrt{LC}$$

→ Não há distorção de fase (variação linear da fase).

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

→ α_0 é coeficiente de atenuação à frequência f_0

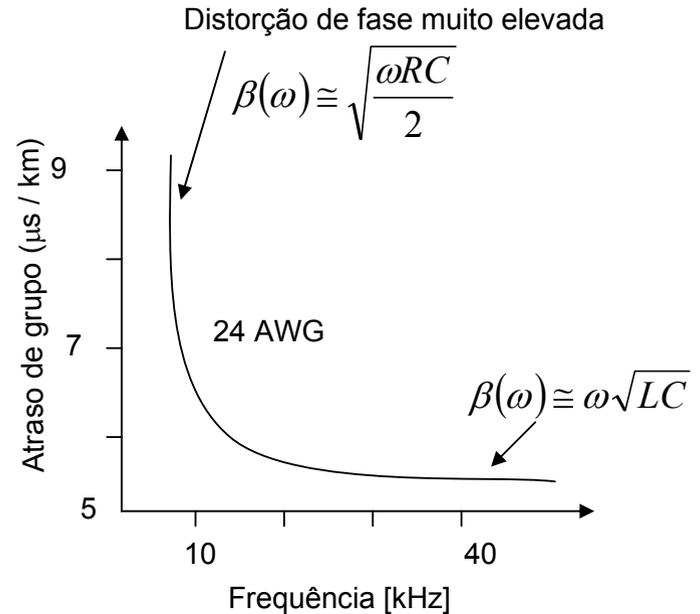
Atenuação e atraso em função da frequência



Baixas frequências,
 $Z_c = 600 \Omega$

Altas frequências,
 $Z_c = 150 \Omega$

26 AWG: diâmetro dos condutores = 0.40 mm
19 AWG: diâmetro dos condutores = 0.91 mm

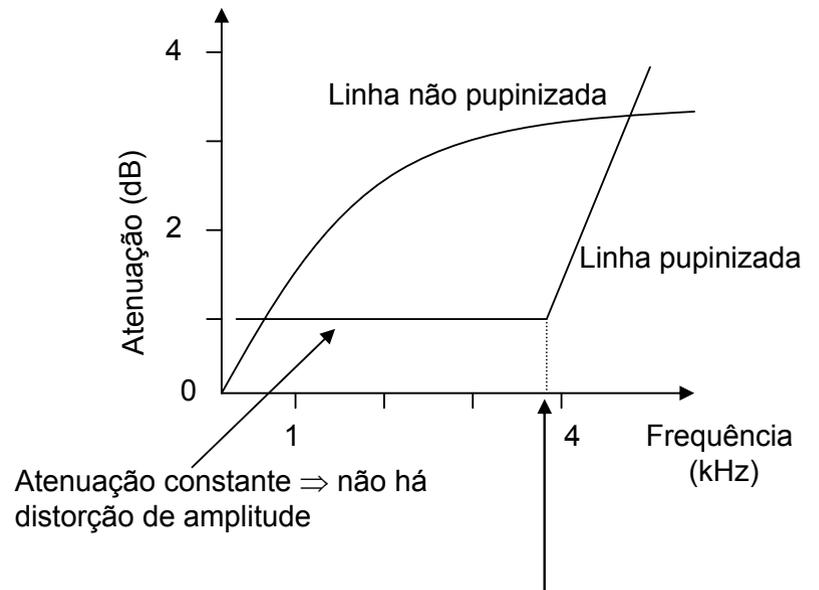


Conclusão:

- O coeficiente de atenuação apresenta uma variação com \sqrt{f} tanto nas altas como nas baixas frequências;
- O atraso de grupo decresce com a frequência atingindo um valor constante para as altas frequências.

Carga (Pupinização) do par simétrico de fios

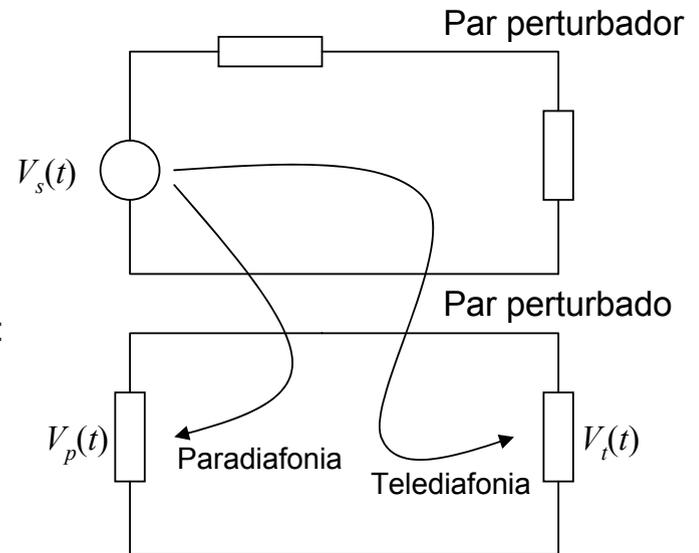
- Quando a reactância indutiva é maior que a resistência e o efeito pelicular é desprezável não há distorção do sinal (amplitude e fase) - altas frequências.
- **Ideia:** criar as mesmas condições nas baixas frequências.
- Para combater a distorção de amplitude introduzem-se bobinas de carga (10-100 mH) em pontos intermédios da linha (1000-2000 metros de distância);
- A resposta na banda de voz (analógica) é fortemente melhorada mas o efeito nas frequências elevadas é devastador !



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

Diafonia

- 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):

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

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

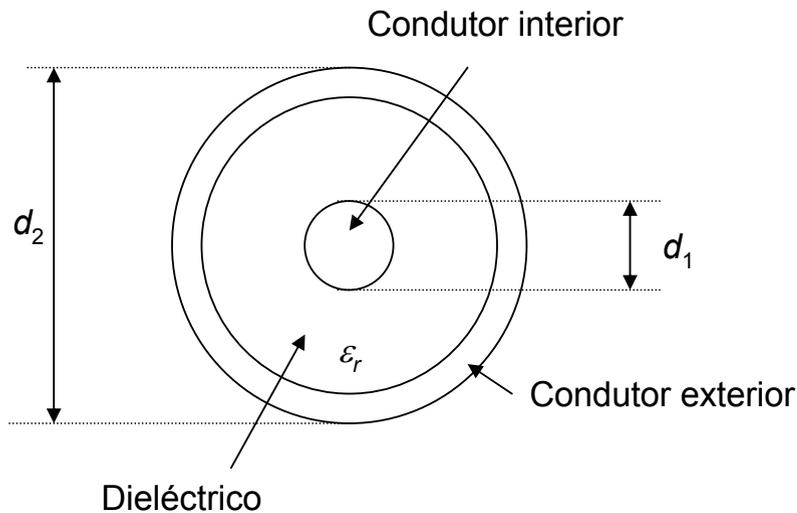
A acção deste fenómeno cresce com a frequência:

- 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.

Aplicações dos pares simétricos de fios

- Transmissão analógica:
 - lacete do assinante na rede telefónica.
- Transmissão digital:
 - lacete do assinante na RDIS (suporta 2 canais B e um canal D - 144 Kbit/s);
 - lacete do assinante baseado na tecnologia ADSL - 8 Mbit/s (download) e 1 Mbps (upload);
 - redes locais (LANs) para ritmos até 100 Mbit/s (e.g. Ethernet, Token Ring). Categorias importantes em redes de computadores são:
 - categoria 3 (16 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).

Cabos Coaxiais



Aproximação para altas frequências:

$$\omega L \gg R$$

- Impedância característica:

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

- Coeficiente de atenuação:

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

- Coeficiente de fase:

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

Para 1.2/4.4 mm com f em MHz
 $a = 0.07$, $b = 5.15$, $c = 0.005$

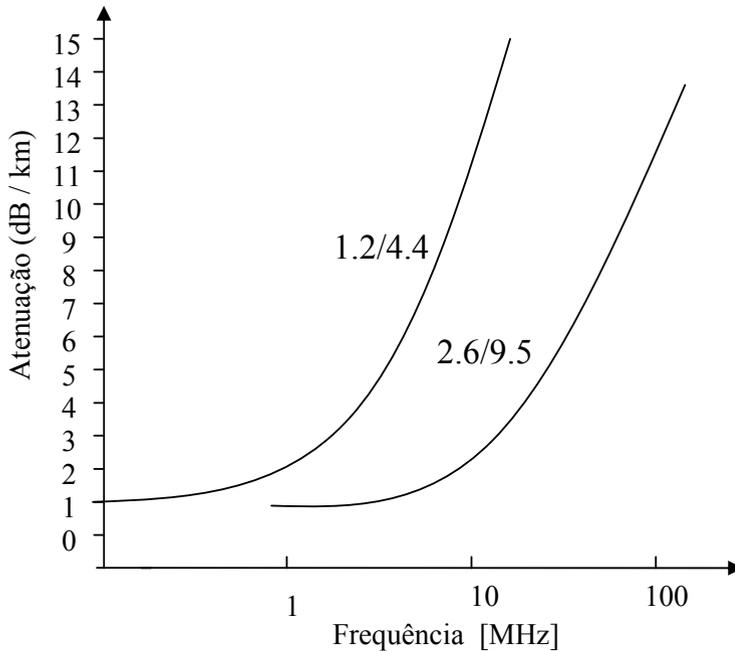
α_0 é coeficiente de atenuação à frequência f_0

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

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

Não há distorção de fase

Atenuação dos cabos coaxiais



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

- distorção de atraso;
- degradação das propriedades diafónicas.

Aplicação / normalização dos cabos coaxiais

- 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 Metropolitanas (MANs);
 - 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

$$d_2/d_1 = 3.6 \Rightarrow \text{atenuação mínima}$$