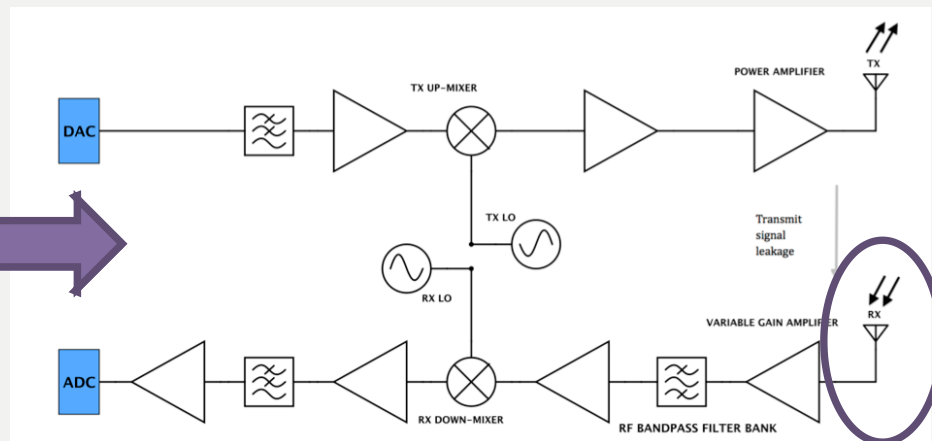
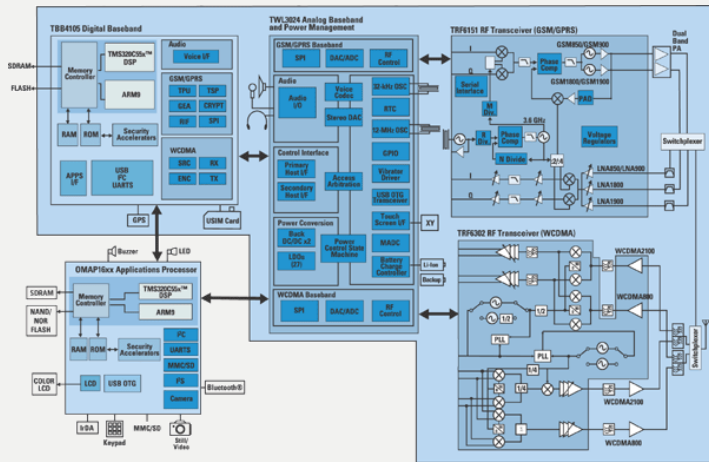


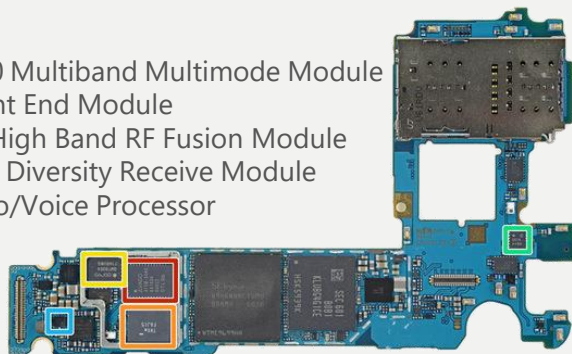
# PSI3482 – ANTENAS, MICROONDAS E ÓPTICA MODERNA

Profa. Ariana Serrano [aserrano@usp.br](mailto:aserrano@usp.br) sala C2-62  
Prof. Gustavo Rehder [gprehder@usp.br](mailto:gprehder@usp.br) sala C2-66  
2019

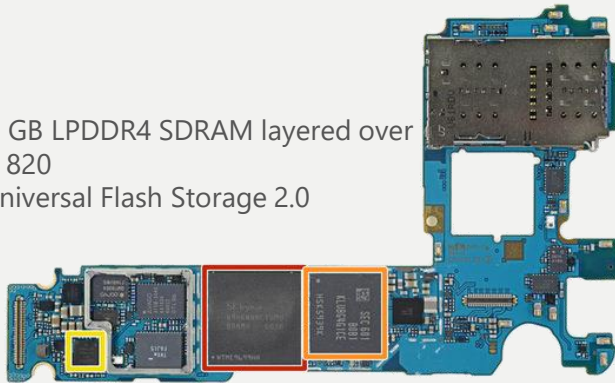




- Avago AFEM-9040 Multiband Multimode Module
- Murata FAJ15 Front End Module
- Qorvo [QM78064](#) High Band RF Fusion Module
- Qorvo [QM63001A](#) Diversity Receive Module
- DSP [DBMD4](#) Audio/Voice Processor



- SK Hynix [H9KNNNCTUMU-BRNMH](#) 4 GB LPDDR4 SDRAM layered over the Qualcomm [MSM8996](#) Snapdragon 820
- Samsung [KLUBG4G1CE](#) 32 GB MLC Universal Flash Storage 2.0
- Qualcomm WCD9335 Audio Codec

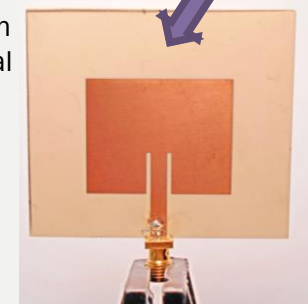


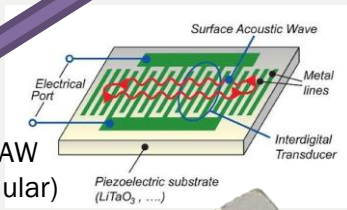
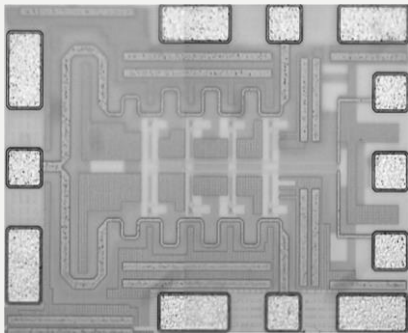
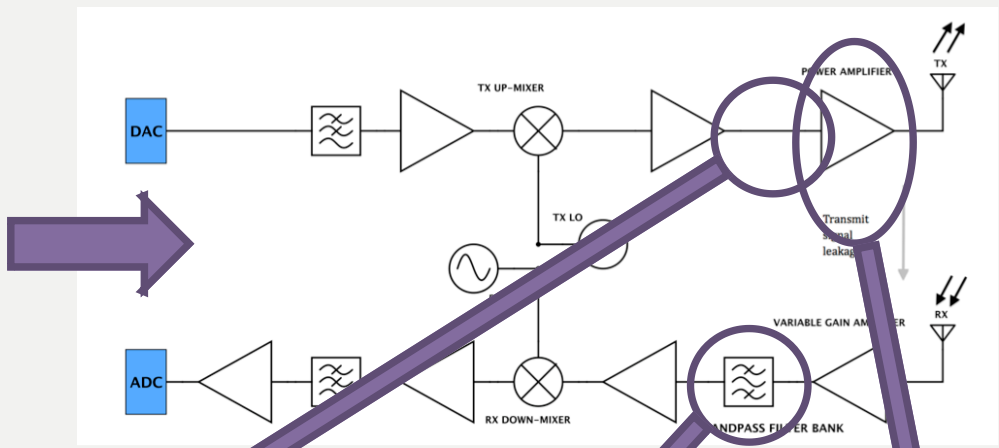
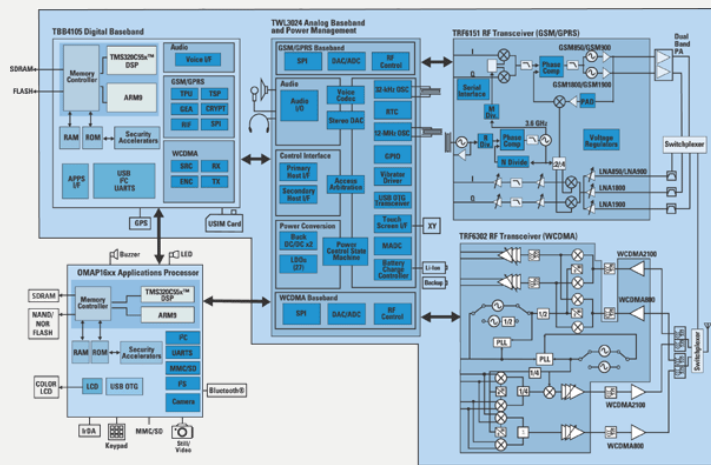
Antena Galaxy S7



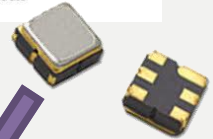
Pequeno “( )”

Antena Patch Convencional (PSI3482)

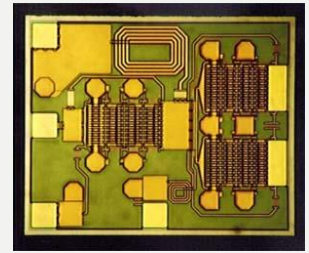




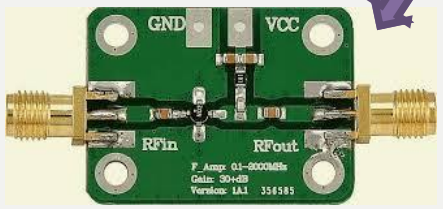
Filtro SAW (no cellular)



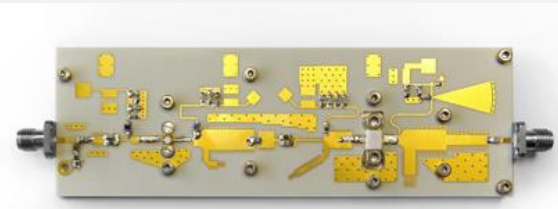
Filtro de Microfitas acopladas (PSI3482)



GaAs metal semiconductor FET

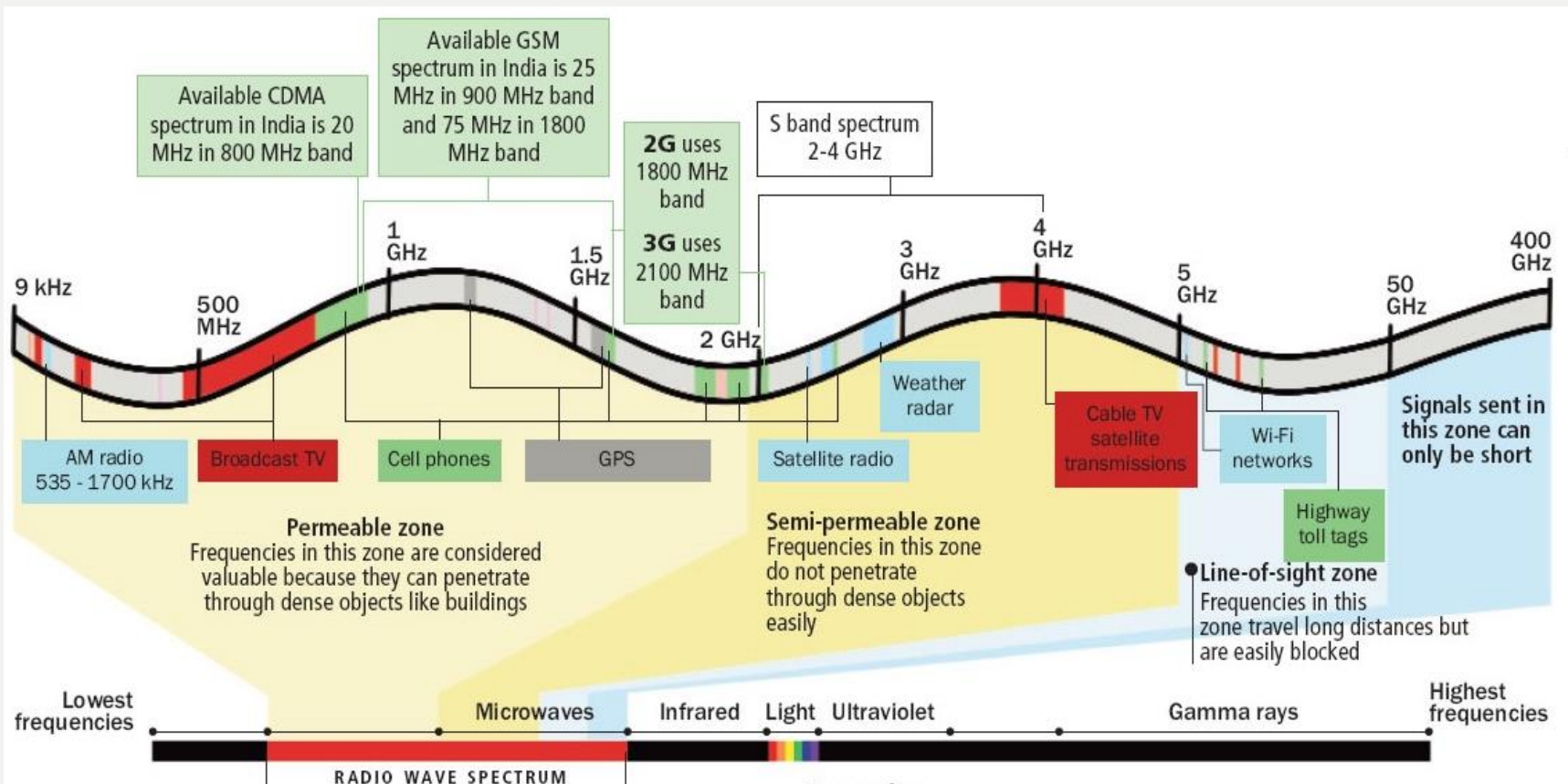
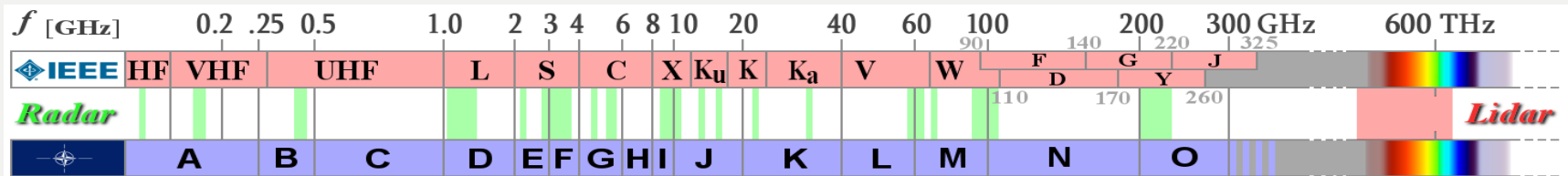


Linhas de transmissão em PCB (PSI3482)



Amplificador MIC (PSI3482)

# Bandas de frequências e aplicações



# Análise de Circuitos: Concentrado vs. Distribuído

- Modelo Concentrado: Tensão e Corrente **não variam** no comprimento de elementos ou trilhas.
- Modelo Distribuído: Tensão e Corrente **variavam** no comprimento de elementos ou trilhas.

**Qual usar?**  
Depende da  
Frequência e das  
dimensões

No Ar:  $c = \lambda \cdot f$

No Meio:  $v_p = \frac{c}{\sqrt{\mu_{ref} \cdot \epsilon_{ref}}} \rightarrow \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{ref}}} = \lambda_g \cdot f$   
Normalmente = 1

Se  $\lambda_g \gg$  comprimento  $\rightarrow$  modelo concentrado

Se  $\lambda_g \ll$  comprimento  $\rightarrow$  modelo distribuído

$c$  = velocidade da Luz

$\lambda$  = comprimento de onda

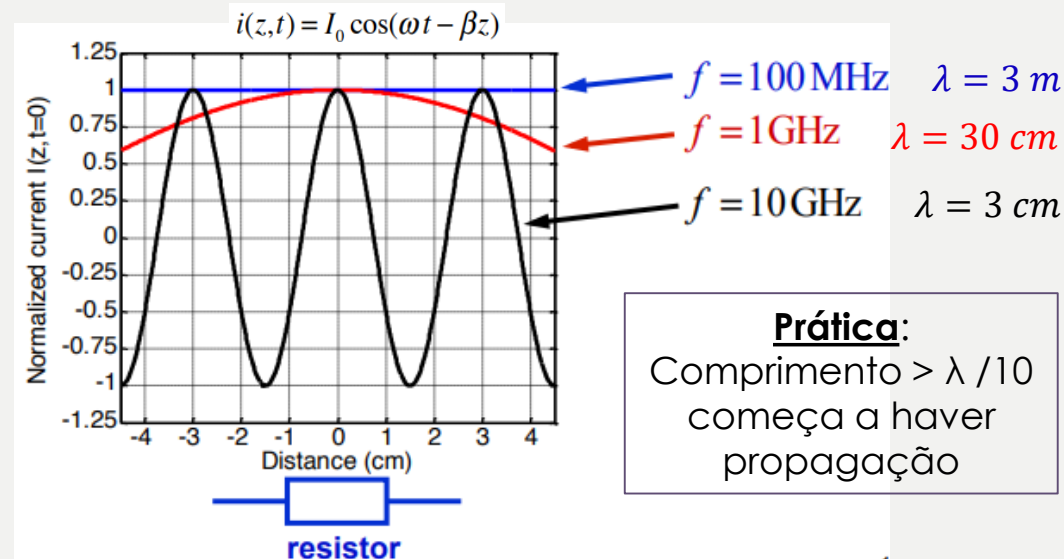
$\lambda_g$  = comprimento de onda guiado

$f$  = frequência

$\epsilon_{ref}$  = permissividade relativa efetiva

$\mu_{ref}$  = permeabilidade relativa efetiva

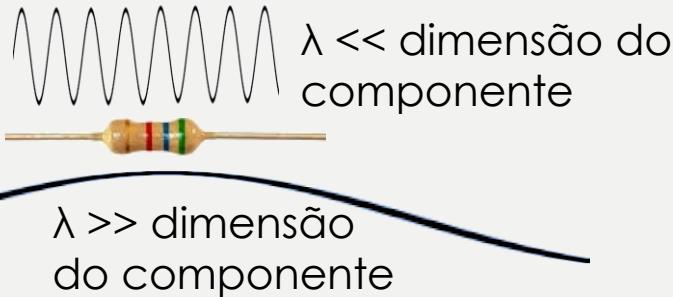
$v_p$  = velocidade de propagação



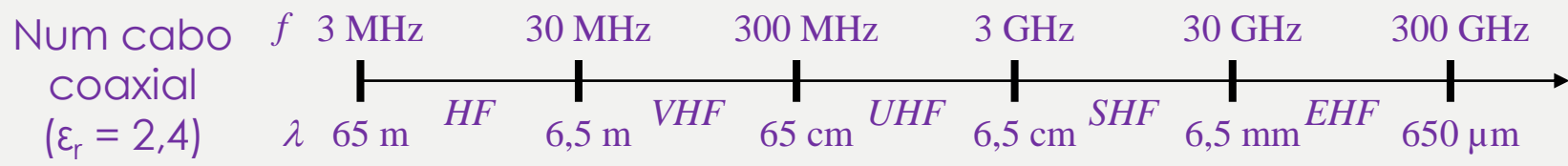
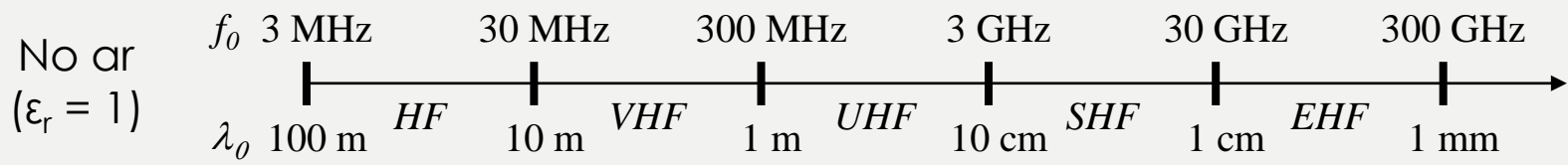
**Prática:**  
Comprimento  $> \lambda / 10$   
começa a haver  
propagação



# Fenômeno de propagação



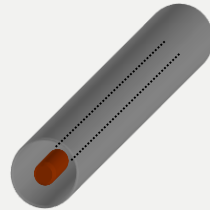
**Prática:**  
Componente  $> \lambda / 10$   
começa a haver  
propagação



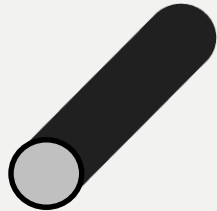
# Linhas de transmissão



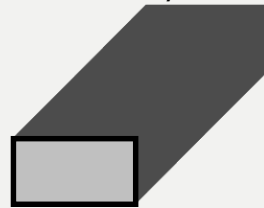
Linha Bifilar (< MHz)



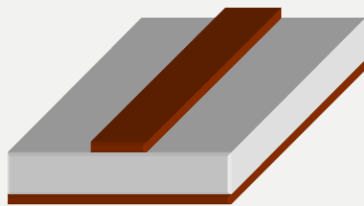
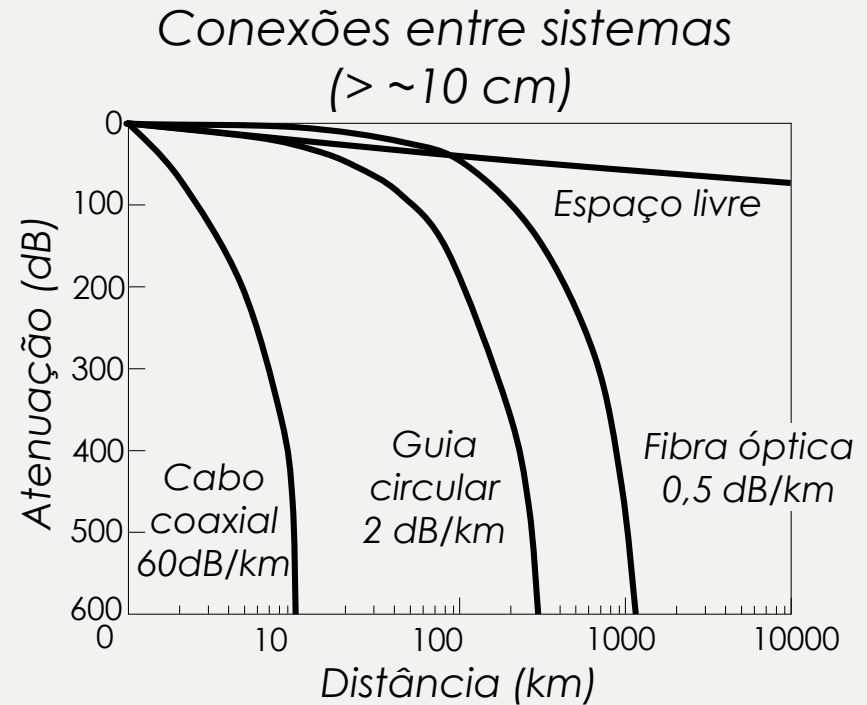
Cabo coaxial (<145 GHz)



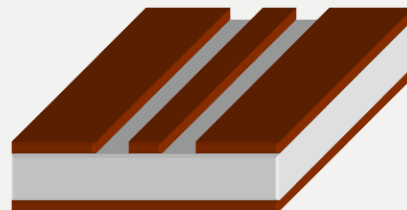
Guia Cilíndrico (até THz)



Guia retangular (até THz)



Linha de microfita



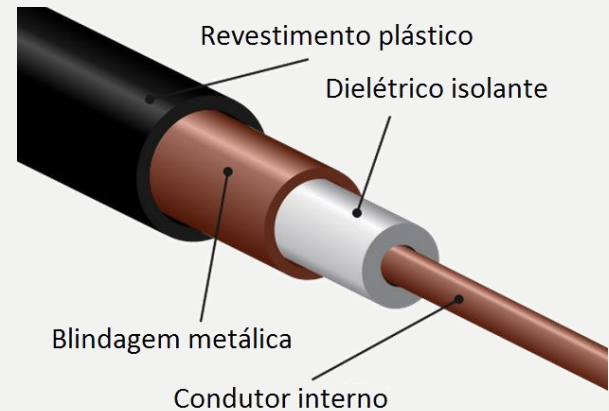
Guia de onda coplanar (CPW)

Inter sistemas



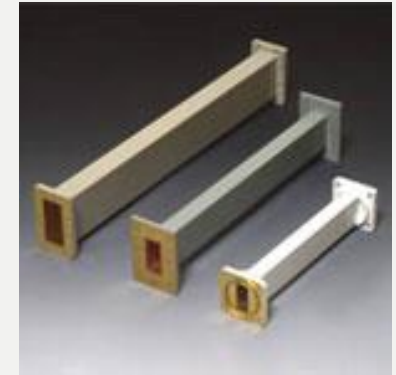
# Cabo coaxial

- Condutor interno
- Condutor externo (blindagem)
- Dielétrico entre os condutores
- Características:
  - Baixas perdas;
  - Blindado (pouca interferência);
  - Pequenas dimensões;
  - Leve;
  - Média potência;
  - Difícil fazer circuitos mais complexos;



# Guia de onda

- Condutores ocios
- Preenchidos com dielétrico
- Seção transversal regular
  - Retangular, Cilíndrica, Elíptica
- Características:
  - Baixíssimas perdas;
  - Alta complexidade mecânica;
  - Alta potência;
  - Pesado;
    - Grandes dimensões;
    - Pouca interferência;
    - Robusto
    - Alto custo



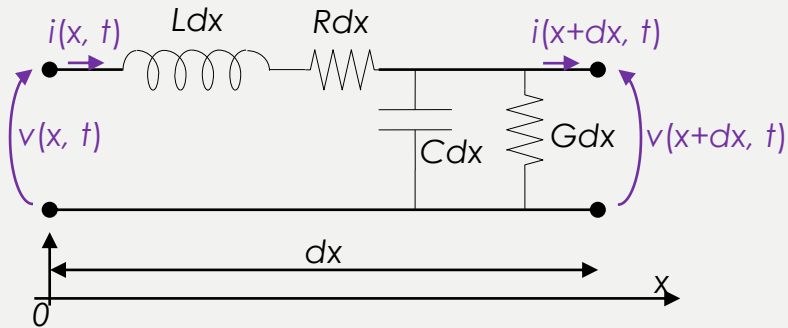
# Comparação das Linhas de Transmissão

<b>Characteristic</b>	<b>Coax</b>	<b>Waveguide</b>	<b>Stripline</b>	<b>Microstrip</b>
<i>Preferred Mode</i>	TEM	TE <sub>10</sub>	TEM	Quasi-TEM
<i>Other Modes</i>	TM, TE	TM, TE	TM, TE	TM, TE
<i>Dispersion</i>	None	Medium	None	Low
<i>Bandwidth</i>	High	Low	High	High
<i>Loss</i>	Medium	Low	High	High
<i>Power Capacity</i>	Medium	High	Low	Low
<i>Physical Size</i>	Large	Real Large	Medium	Small
<i>Fabrication Ease</i>	Medium	Medium	Easy	Real Easy
<i>Component Integration</i>	Hard	Hard	Fair	Easy

# Análise por teoria de circuitos

- Os fenômenos de propagação também são estudados através das leis de Kirchhoff. Para isso precisamos de:
  - Modelo de linha de transmissão;
  - Equações diferenciais que regem a propagação de uma onda de tensão ou de corrente ao longo da linha;
  - Solução das equações diferenciais em regime harmônico:
    - Ondas incidente e refletida; Velocidade de fase; Comprimento de onda;
  - Características das ondas:
    - Impedância característica; constante de propagação; coeficiente de reflexão;
- Ferramentas de análise:
  - Carta de Smith; Parâmetros S
- Ferramentas computacionais:
  - ADS

# Modelo da linha de transmissão/ equações



- **R** : resistência linear série ( $\Omega/m$ )
- **C** : capacitância linear paralela (F/m)
- **L** : indutância linear série (H/m)
- **G** : condutância linear paralela (S/m)

Onda se propagando:  
 na direção +x:  $e^{-\gamma t}$   
 na direção -x:  $e^{\gamma t}$

$$V(x) = V_0^+ e^{-\gamma x} + V_0^- e^{\gamma x}$$

$$I(x) = I_0^+ e^{-\gamma x} + I_0^- e^{\gamma x}$$

Solução: ondas de propagação

Pelas leis de Kirchhoff:

$$v(x, t) - R dx i(x, t) - L dx \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} - v(x + dx, t) = 0$$

$$i(x, t) - G dx v(x, t) - C dx \frac{\partial v(x, t)}{\partial t} - i(x + dx, t) = 0$$

Equações do telegrafista:

$$\frac{\partial v(x, t)}{\partial x} = -R i(x, t) - L \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} \quad \text{e} \quad \frac{\partial i(x, t)}{\partial x} = -G v(x, t) - C \frac{\partial v(x, t)}{\partial t}$$

Em regime permanente senoidal:

$$\frac{dV(x)}{dx} = -(R + j\omega L)I(x) \quad \text{e} \quad \frac{dI(x)}{dx} = -(G + j\omega C)V(x)$$

Equações de Onda:

$$\frac{d^2 V(x)}{dx^2} - \gamma^2 V(x) = 0 \quad \text{e} \quad \frac{d^2 I(x)}{dx^2} - \gamma^2 I(x) = 0$$

# Características da linha de transmissão

- Impedância característica ( $\Omega$ ):  $Z_0(\omega) = \sqrt{\frac{R+j\omega L}{G+j\omega C}}$

Perdas nos condutores e dielétricos

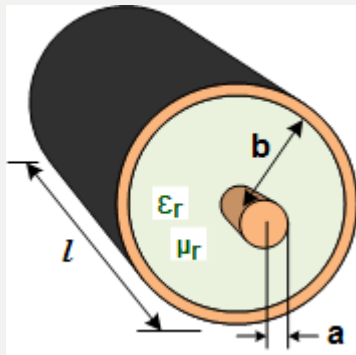
Atenuação (Np/m):  $\alpha = \frac{1}{2} \frac{R}{Z_0} + \frac{1}{2} G Z_0$

$\alpha_c$        $\alpha_d$

$Z_0 = \frac{V_0^+}{I_0^+} = -\frac{V_0^-}{I_0^-}$
  - Constante de propagação:  $\gamma = \sqrt{(G+j\omega C) * (R+j\omega L)} = \alpha + j\beta$

Número de onda (rad/m):  $\beta = \frac{\omega}{v_\phi} = \frac{2\pi}{\lambda}$
  - Índice de mérito:  $Q = \frac{1}{2} \frac{\beta}{\alpha}$
  - Velocidade de fase (de propagação da onda) (m/s):  $v_\phi = \frac{1}{\sqrt{LC}}$
- Linhas de baixas perdas:  $R \ll j\omega L$  e  $G \ll j\omega C \Rightarrow Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$        $\gamma = j\beta$

# Exemplo – Cabo Coaxial



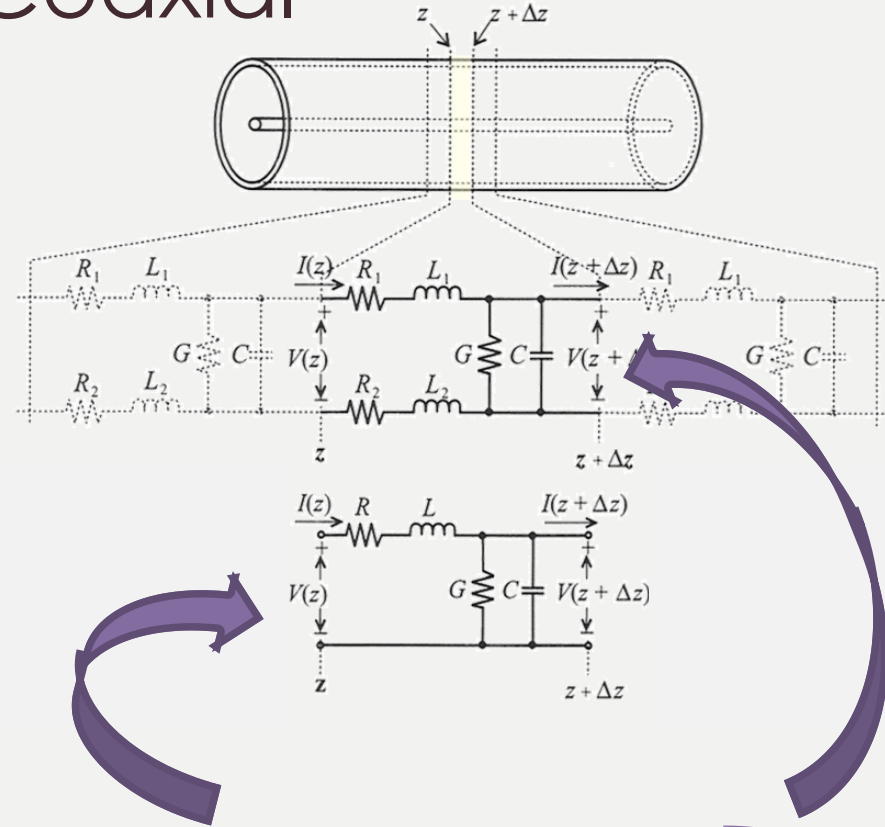
Para  
 $a = 2.42 \text{ mm}$   
 $b = 5 \text{ mm}$   
 $\epsilon_r = 2.1$   
 $Z_0 = 30 \Omega$   
 $l = 20 \text{ cm}$

→ LineCalc (ADS)

Teoria

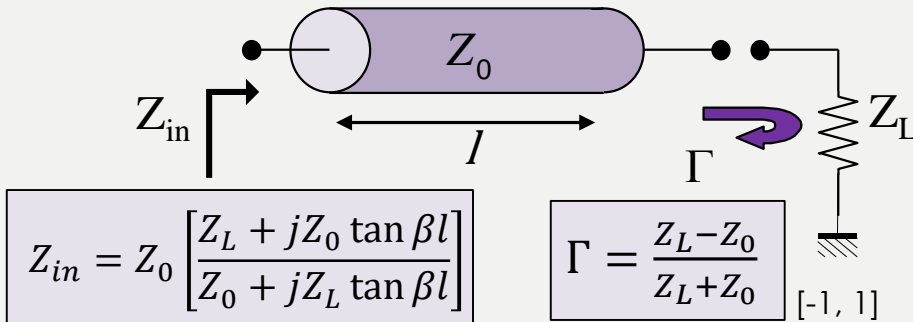
$$L = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot l}{2 \cdot \pi} \cdot \ln\left(\frac{b}{a}\right) \quad [m, H] \rightarrow L_{eq} = 0.145 \frac{\mu H}{m} \rightarrow L_{tot} = 29 \text{ nH}$$

$$C = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} \quad [F/length] \rightarrow C_{eq} = 0.0161 \frac{nF}{m} \rightarrow C_{tot} = 32.2 \text{ pF}$$





# Linhas carregadas



■ Casos especiais da linha de transmissão:

- $Z_L = Z_0$  (carga casada)  $\Rightarrow Z_{in} = Z_0$
- $l = \frac{\lambda}{4} \Rightarrow Z_{in} = \frac{Z_0^2}{Z_L} \rightarrow$  Transformador de impedâncias
- $l = \frac{\lambda}{2} \Rightarrow Z_{in} = Z_L$  sem importar qual  $Z_0$  ou  $\beta l$ !
- $l \ll \lambda \Rightarrow Z_{in} = Z_L$  a linha é “transparente”!

Eficiência do casamento:

Voltage Standing Wave Ratio ou Taxa de Onda Estacionária (TOE)

$$VSWR = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} [1, \infty]$$

■ Casos Especiais de  $\Gamma$ :

- Curto circuito:  $Z_L = 0 \Rightarrow \Gamma = -1$
- Circuito aberto:  $Z_L = \infty \Rightarrow \Gamma = 1$
- Carga casada:  $Z_L = Z_0 \Rightarrow \Gamma = 0$

**Prática**

Potência refletida máxima: 10% ou  
Potência transmitida mínima: 50%

$Pot_{refl} = 10\%$   $VSWR_{m\acute{a}x} \cong 2$   $\Gamma = 0,316$

Potência refletida (%) =  $100 * |\Gamma|^2$  [0, 100%]