

**Capítulo 8:**

# **Amplificação em RF**

**Prof. Alan Petrônio Pinheiro**

Universidade Federal de Uberlândia

Faculdade de Engenharia Elétrica

alanpetronio@ufu.br



# Pré-introdução: casamento de impedância

## Cir. Eletrônica Aplica.

- Introdução ao casamento de impedância
  - Introdução
  - Ideia do casamento
  - Método 1: algébrica de 2 componentes
    - Exemplo 1
    - Exemplo 2
    - Exemplo 3
  - Método 2: carta de Smith
    - Uso da carta
    - Casamento de impedância usando Smith

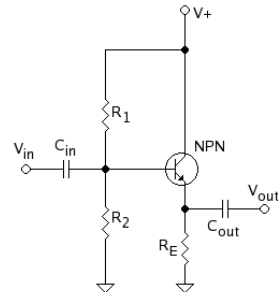
### • Aplicação:

- Prover a máxima transferência possível de potência entre fonte e carga
  - Teorema em DC: “máxima potência será transferida da fonte para sua carga se suas resistências são iguais”
  - Teorema em AC: “máxima potência será transferida da fonte para sua carga quando a impedância da carga  $Z_L$  é igual a **complexo conjugado** da impedância da fonte”
- Evitar reflexões de sinais
  - “Reflexões são mínimas (ou nulas) quando há o casamento de impedância”

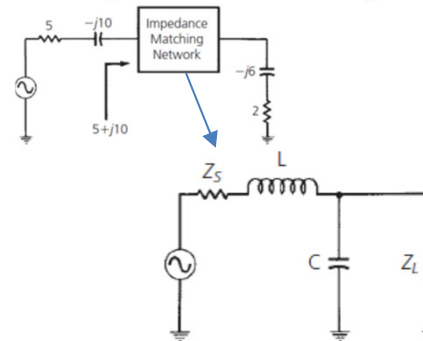


### • Tipos e métodos:

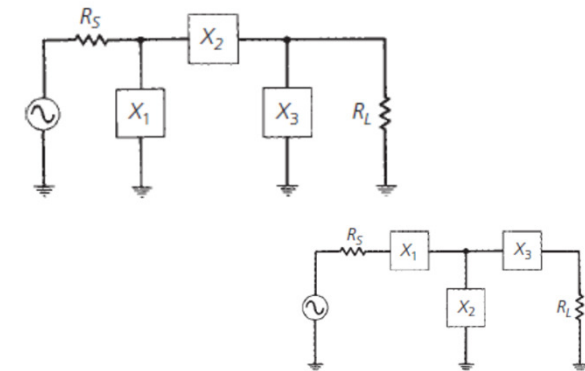
#### Transistorizada:



#### Passiva (2 elementos ou “L”):



#### Passiva (3 elementos ou “π”):



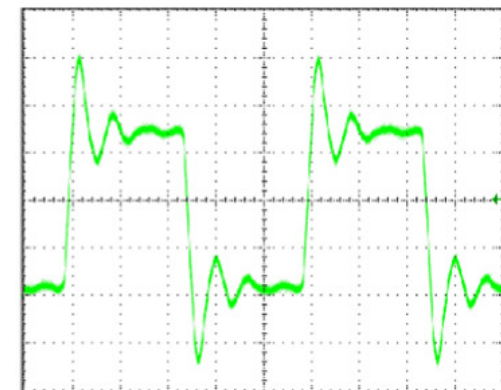
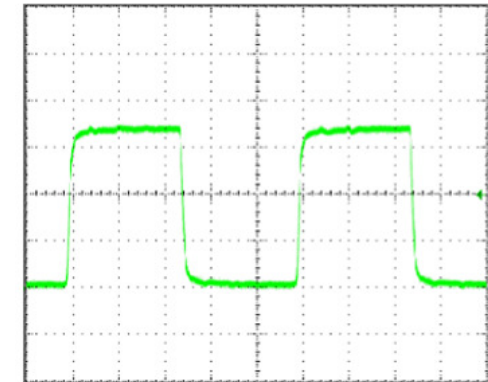
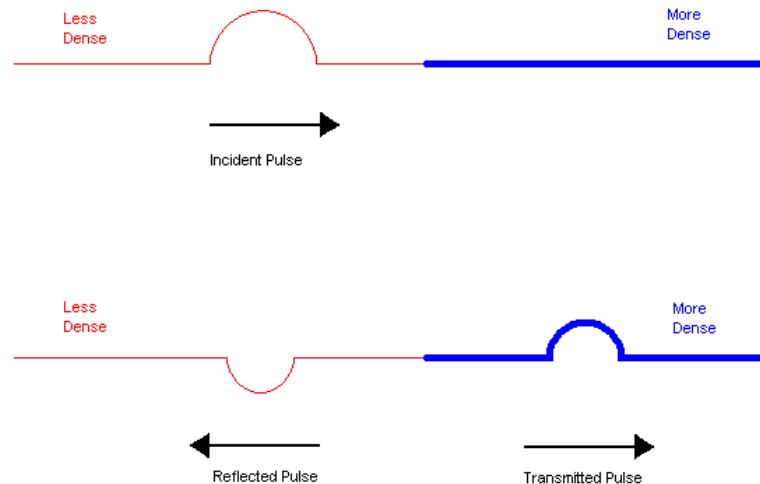
### • Tipos de projeto:

- Algébrica
- Carta de Smith



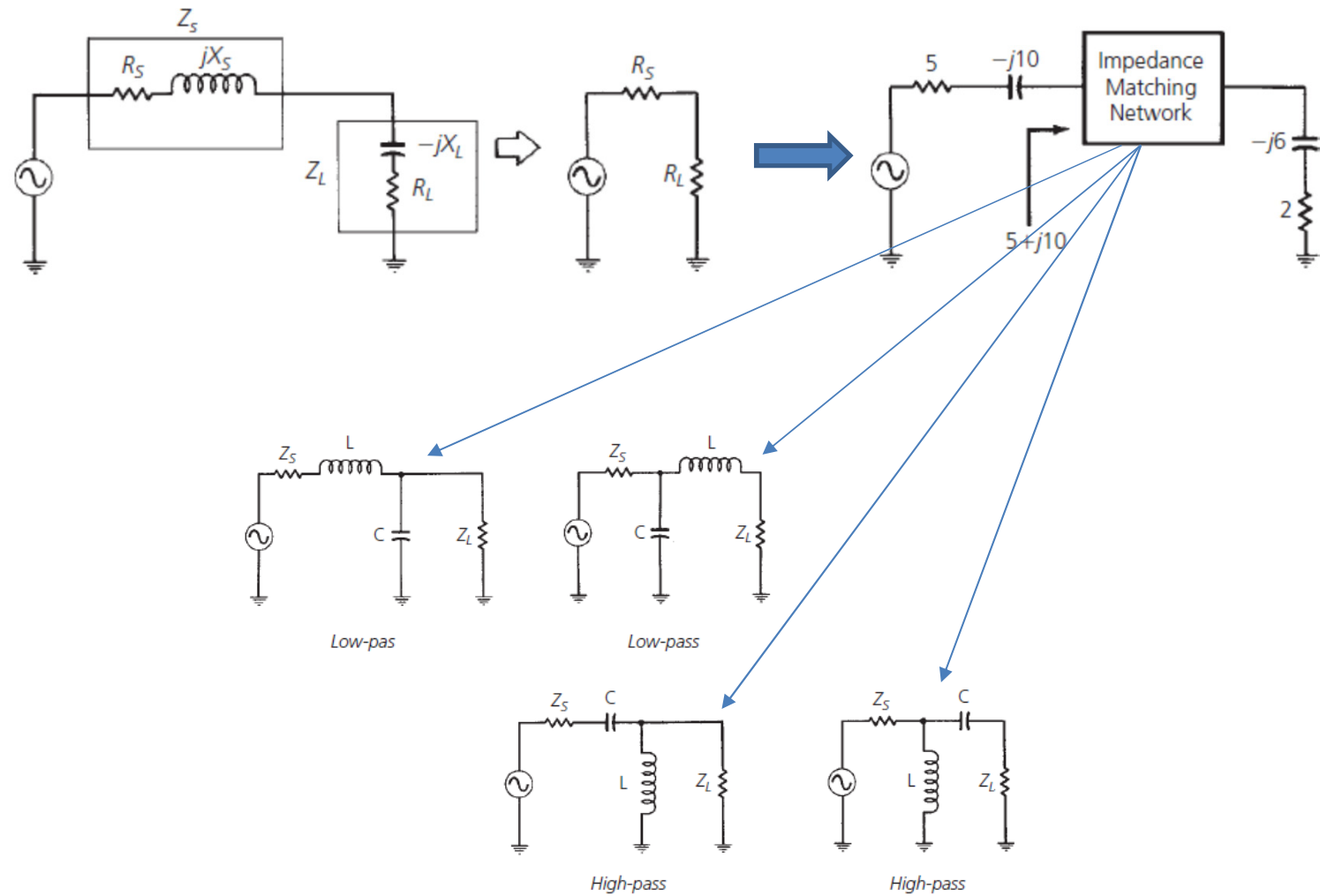
## • Reflexão de sinais:

- Similar ao comportamento de ondas que passam por meios de diferentes densidades.
- Ocorre quando sinais transmitidos voltam à origem devido as diferenças de impedância ao longo da linha





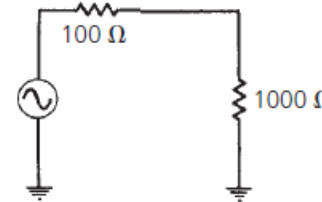
- Ideia do casamento:



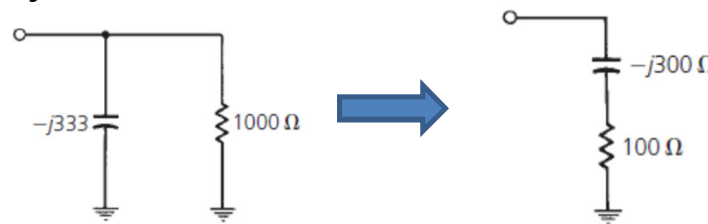


# Método 1: Algébrica usando 2 componentes

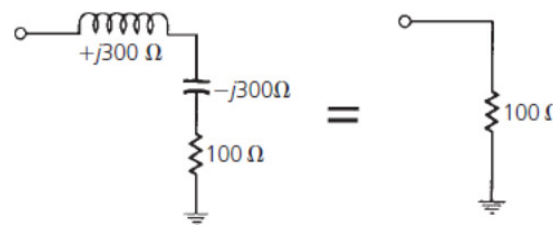
- Exemplo 1: cargas puramente resistivas em uma dada frequência



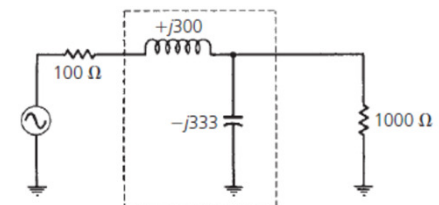
**Passo 1:** Vamos inserir, por acaso, um capacitor de  $-j 333 \Omega$  em paralelo com a carga. Este capacitor em paralelo com a carga de  $1k\Omega$  gera uma resistência equivalente de  $100 -j300 \Omega$



**Passo 2:** para se opor ao capacitor de reatância  $-j300 \Omega$ , vamos inserir em série um indutor de  $+j300 \Omega$  conforme figura:



**Resultado final:**





• De forma matemática:

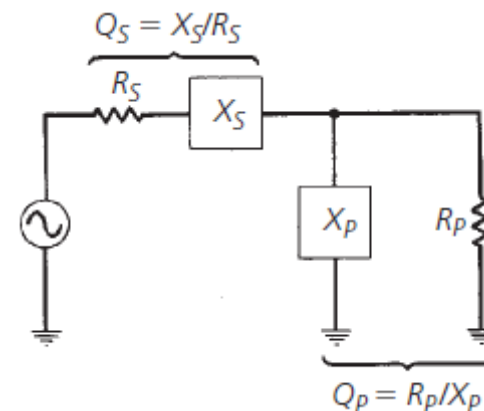
– Equações:

$Q_s$  = the  $Q$  of the series leg,  
 $Q_p$  = the  $Q$  of the shunt leg,  
 $R_p$  = the shunt resistance,  
 $X_p$  = the shunt reactance,  
 $R_s$  = the series resistance,  
 $X_s$  = the series reactance.

$$Q_s = Q_p = \sqrt{\frac{R_p}{R_s} - 1}$$

$$Q_s = \frac{X_s}{R_s}$$

$$Q_p = \frac{R_p}{X_p}$$



Exemplo: Usando as equações resolver exemplo anterior a 100MHz:

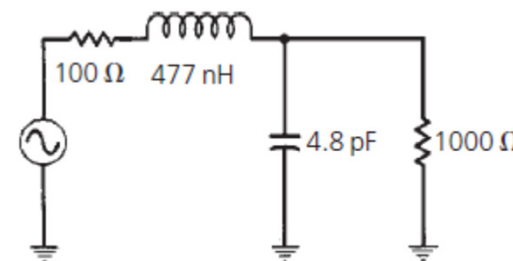
$$Q_s = Q_p = \sqrt{\frac{1000}{100} - 1}$$

$$= \sqrt{9}$$

$$= 3$$

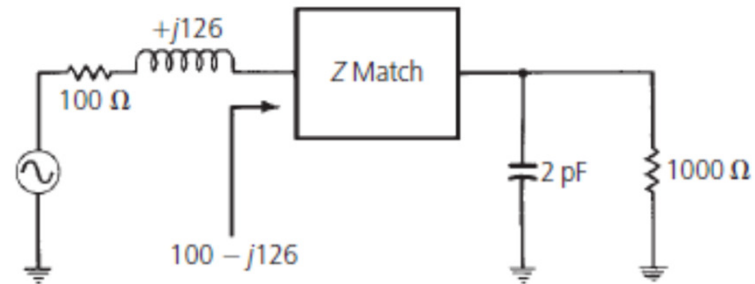
$$X_s = Q_s R_s = (3)(100) = 300 \text{ ohms (inductive)}$$

$$X_p = \frac{R_p}{Q_p} = \frac{1000}{3} = 333 \text{ ohms (capacitive)}$$

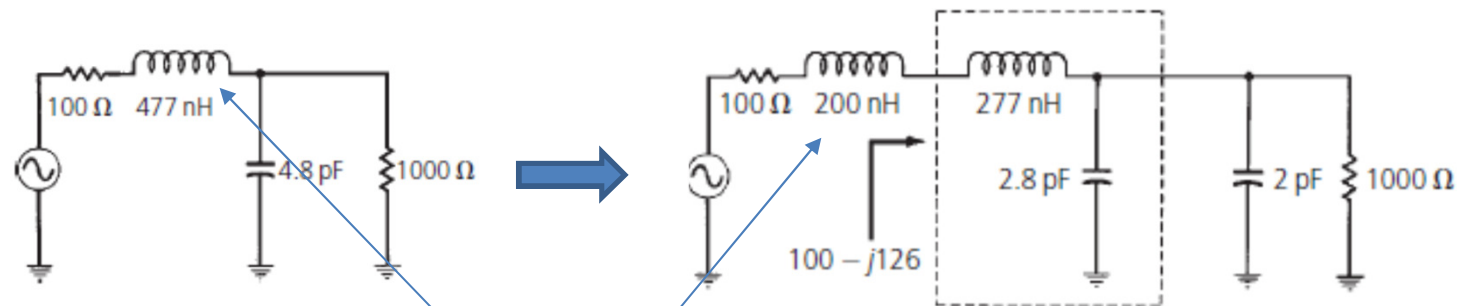




- Exemplo 2: cargas 'complexas' (a 100 MHz, por exemplo)



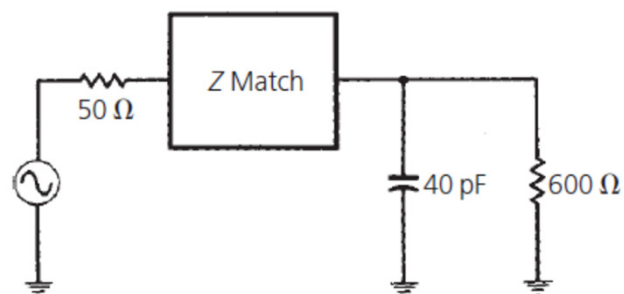
**Solução:** ignore os elementos reativos e preocupe-se apenas com resistivos. O resultado é o mesmo do exemplo anterior. Porém, vou ter que escolher um dos 4 modelos para me atender. O resultado é visto à direita



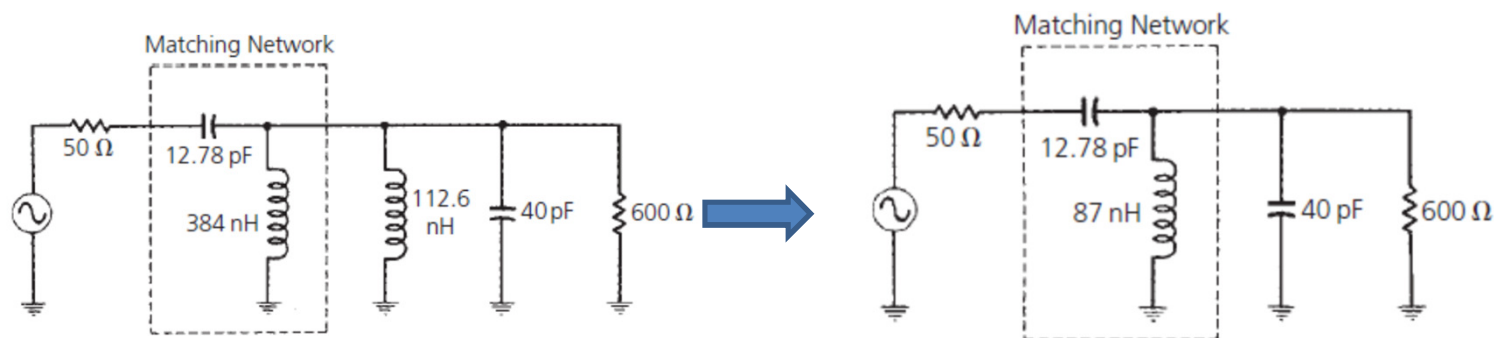
Lembre que, neste caso, 126 ohm = 200nH



- Exemplo 3: projeto uma rede casada baseada no circuito abaixo que deve bloquear sinal DC da fonte e deve operar na frequência de ressonância de 75MHz



Solução:





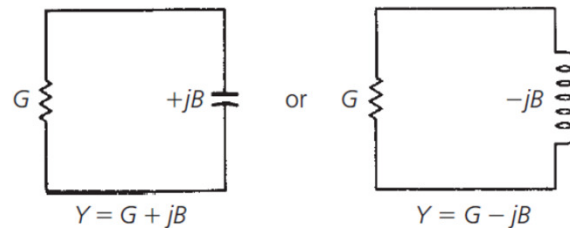




• (...) uso da carta:

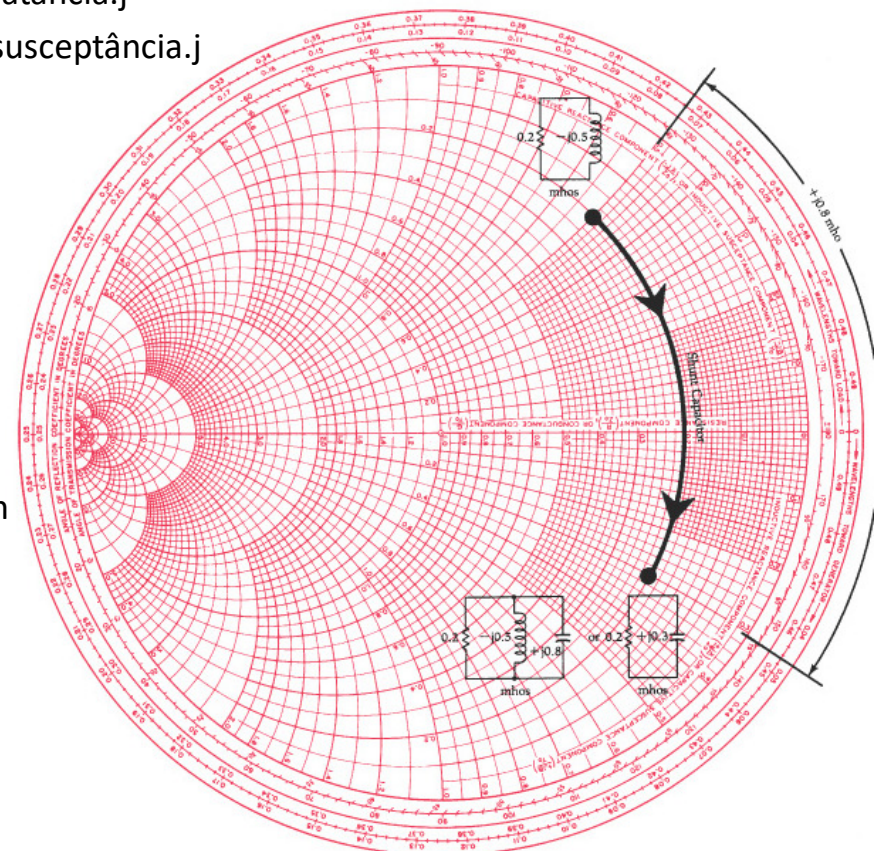
– Conversão de impedância para admitância ( $Z = R \pm jX$ )-> ( $Y = G \pm jB$ )

- Matematicamente:  $Y = \frac{1}{Z}$
- Nomeclatura:
  - » Impedância = resistência  $\pm$  reatância.j
  - » Admitância = condutância  $\pm$  susceptância.j
- Sinais de  $X_c$  e  $X_L$  alteram



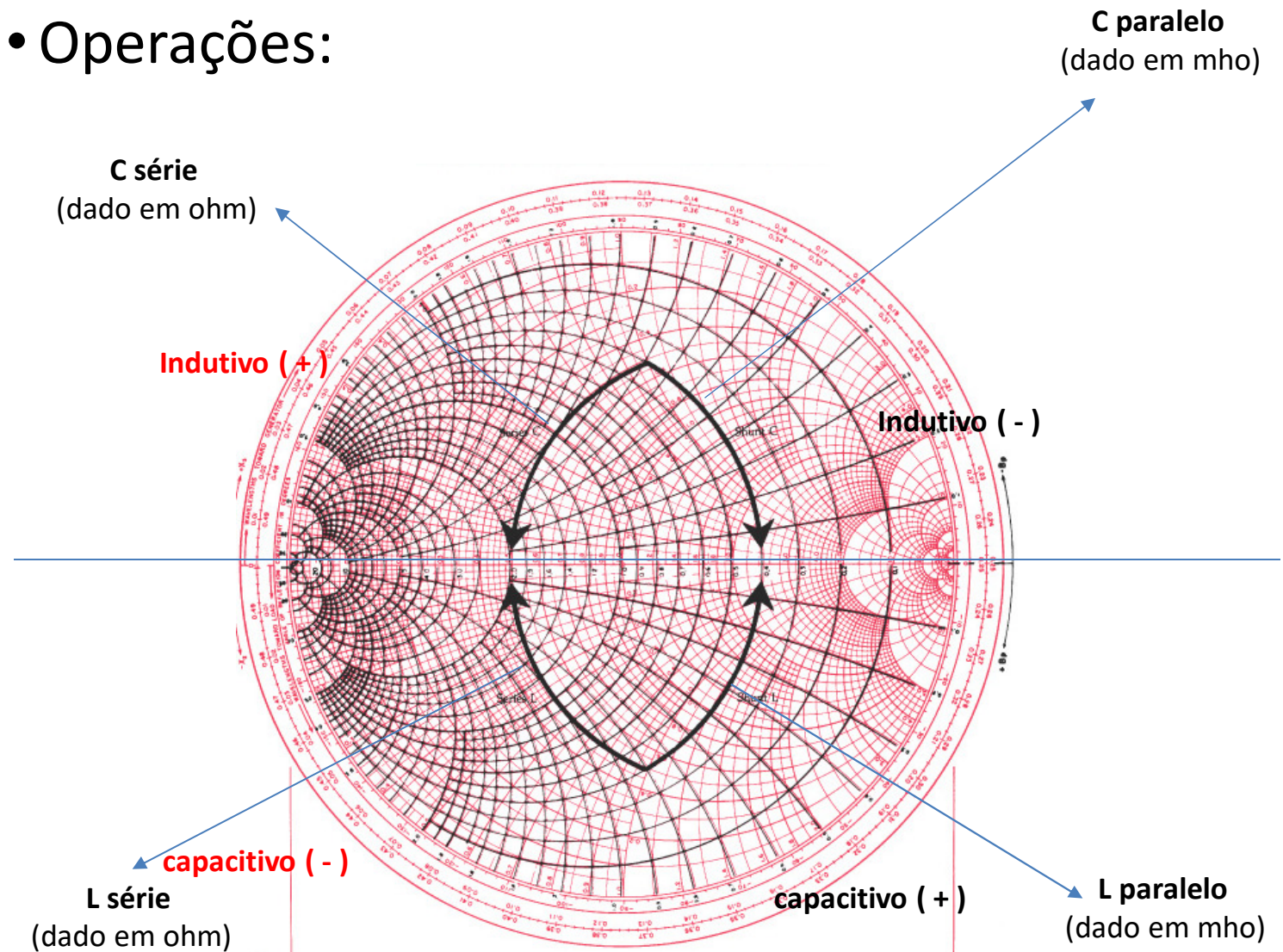
– Manipulação de admitâncias

- Suceptâncias paralelas se somam
- Exemplo:
  - »  $Y = 0.2 - j0.5 + j0.8$
  - »  $Y = 0.2 + j0.3 \text{ mho}$





## • Operações:





## • Casamento de impedância usando carta de Smith

– Equações:

• C série:

$$L = \frac{XN}{\omega}$$

• L série:

$$C = \frac{1}{\omega XN}$$

• C paralelo:

$$C = \frac{B}{\omega N}$$

• L paralelo:

$$L = \frac{N}{\omega B}$$

Elementos em série : reatâncias!

Elementos em paralelo : admitâncias!

$$\omega = 2\pi f,$$

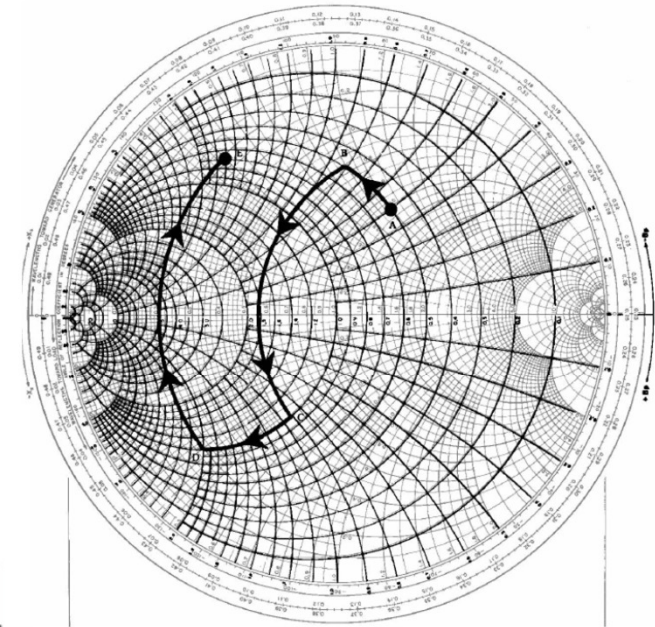
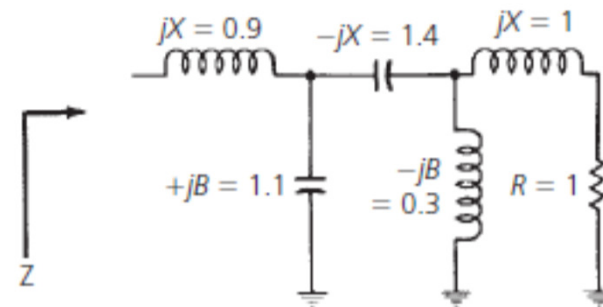
$X$  = the reactance as read from the chart,

$B$  = the susceptance as read from the chart,

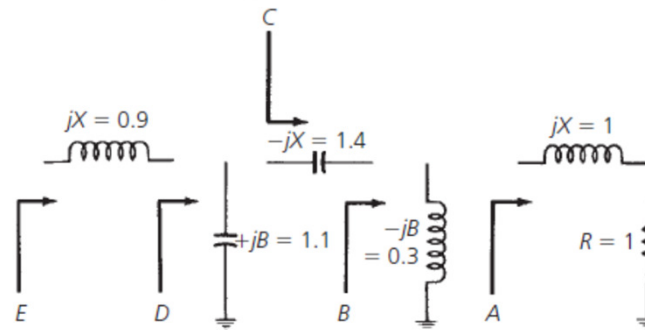
$N$  = the number used to normalize the original impedances that are to be matched.



- Exemplo 1 (*treino no uso do mapa e operações*): qual é a impedância equivalente do circuito? Observe que os elementos em paralelo foram colocados no formato de admitância e os série em i



**Solução:** quebrar em pedaços:



Definir operações:

Arc AB = shunt L =  $-jB = 0.3$  mho

Arc BC = series C =  $-jX = 1.4$  ohms

Arc CD = shunt C =  $+jB = 1.1$  mhos

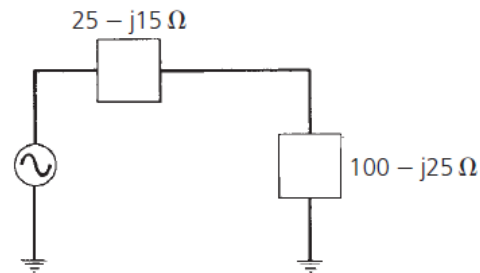
Arc DE = series L =  $+jX = 0.9$  ohm



$Z = 0.2 + j0.5$  ohm.



- Exemplo 2: projete o casamento de impedância do sistema abaixo em 60MHz. Deseja-se um casamento baseado em 'passa-baixa'.



**Solução:** fazer a carga ter a aparência de  $25 + 15j\Omega$ . Para isto, normalizar considerando  $N=50$ . Teremos:

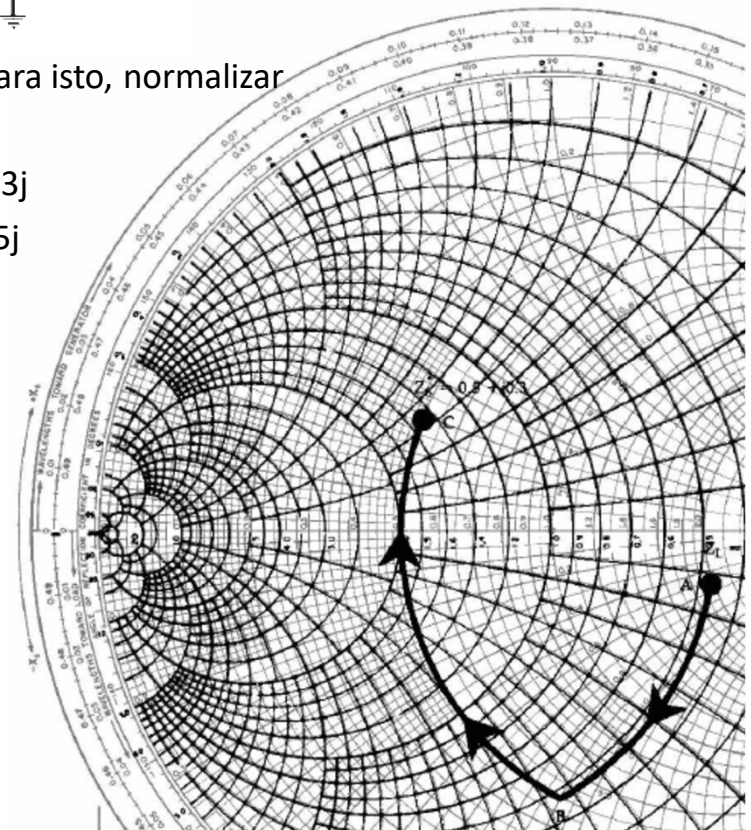
- $Z_s = 25 - 15j \Rightarrow 0.5 - 0.3j$
- $Z_L = 100 - 25j \Rightarrow 2 - 0.5j$

Os valores normalizados são plotados na carta como  $Z_L$  e  $Z_s^*$  (observe que  $Z_s$  é complexo conjugado. Pq?)

Os requisitos nos forçam a usar um L em série e um C em paralelo. Assim, encaixamos estes

Requerimentos como caminho gerando:

- Arco AB: capacitor paralelo de 0,73 mho
- Arco BC: indutor em série de 1.2 ohms





Cir. Eletrônica Aplica.

Aplicando os cálculos:

$$X_o = \frac{1}{+jB} = \frac{1}{j0.73 \text{ mho}} = -j1.37 \text{ ohms}$$

'Desnormalizando' (N=50):

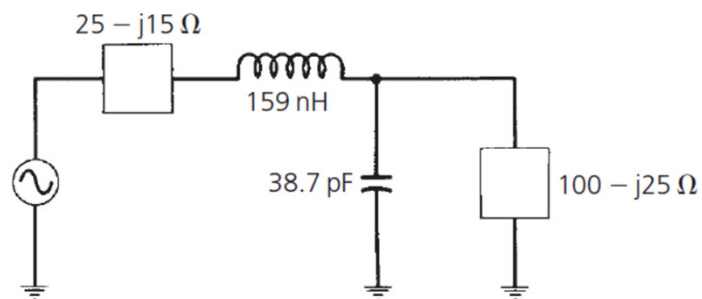
$$X_L = 60 \text{ ohms}$$

$$X_C = 68.5 \text{ ohms}$$

$$\begin{aligned} L &= \frac{X_L}{\omega} \\ &= \frac{60}{2\pi(60 \times 10^6)} \\ &= 159 \text{ nH} \end{aligned}$$

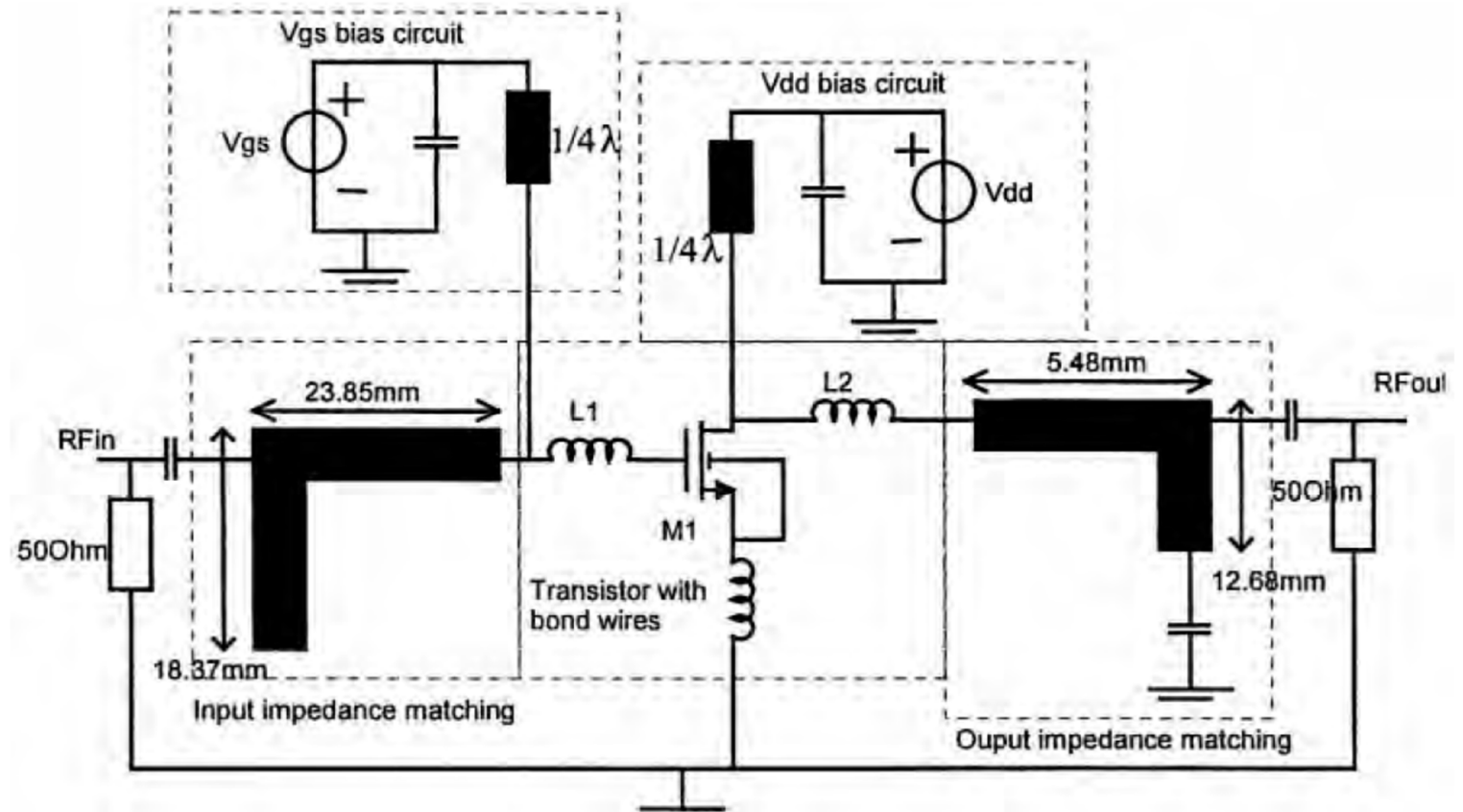
$$\begin{aligned} C &= \frac{1}{\omega X_C} \\ &= \frac{1}{2\pi(60 \times 10^6)(68.5)} \\ &= 38.7 \text{ pF} \end{aligned}$$

Resultado final:





- Outros modos: micro strip







## Cir. Eletrônica Aplica.

*Capítulo:*

### **Transistor e amplificação em RF**

- **Transistor em RF**
  - Revisão do transistor
  - Polarização TBJ e FET
  - Amplificação
  - Amplificação de potência
  - Linearidade
  
- **Amplificação em RF**
  - Modelo em RF
  - Modelo parâmetros Y
    - Projeto usando parâm. Y
    - Exemplo de projeto
  - Modelo parâmetros S
    - Projeto usando parâm. S
    - Exemplo de projeto
  
- **Amplificadores sintonizados**
  - Introdução
  - Análise
  - Duplamente sintonizado
  - Amplificador classe C sintonizado
  
- **Amplificadores baixo ruído**

# Transistor em RF



# Revisão do transistor

## Cir. Eletrônica Aplica.

Capítulo:

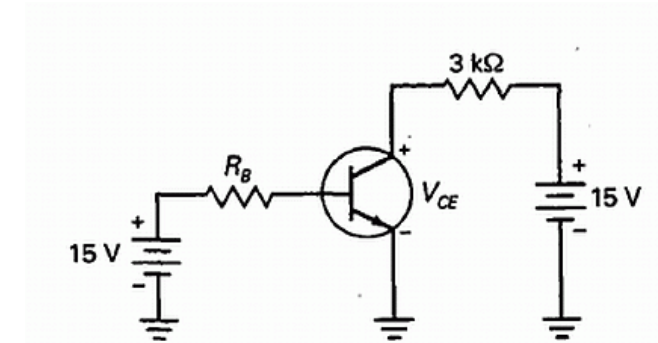
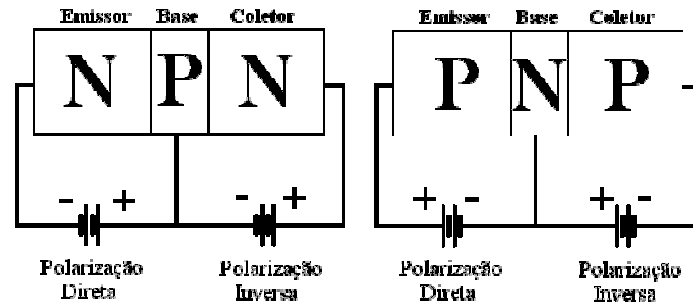
### Transistor e amplificação em RF

- Transistor em RF
  - Revisão do transistor
  - Polarização TBJ e FET
  - Amplificação
  - Amplificação de potência
  - Linearidade
- Amplificação em RF
  - Modelo em RF
  - Modelo parâmetros Y
    - Projeto usando parâm. Y
    - Exemplo de projeto
  - Modelo parâmetros S
    - Projeto usando parâm. S
    - Exemplo de projeto

- Amplificadores sintonizados
  - Introdução
  - Análise
  - Duplamente sintonizado
  - Amplificador classe C sintonizado

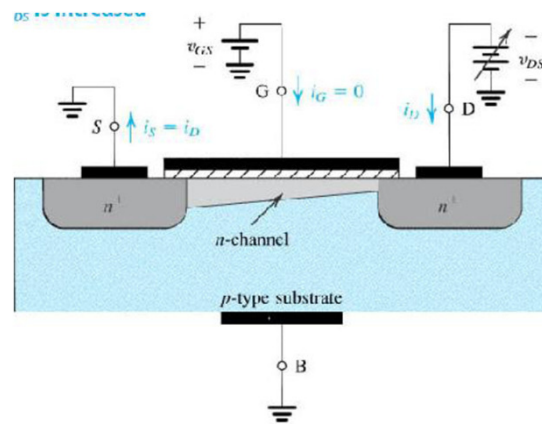
- Amplificadores baixo ruído

## • Transistor bipolar



## • Transistor efeito campo

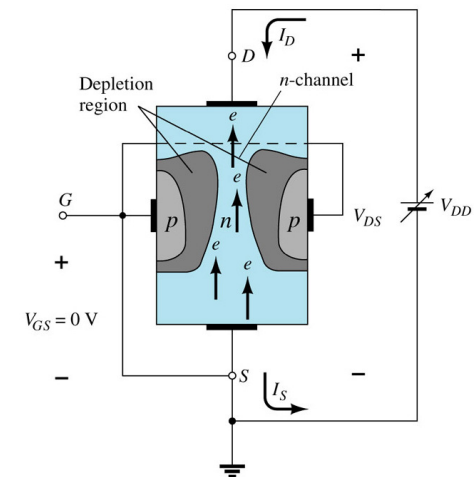
### MOS-FET



$$I_D = I_{DSS} \left( 1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right)^2$$

$$V_{GS} = V_P \left( 1 - \sqrt{\frac{I_D}{I_{DSS}}} \right)$$

### J-FET





# Polarização

## Cir. Eletrônica Aplica.

Capítulo:

### Transistor e amplificação em RF

#### • Transistor em RF

- Revisão do transistor
- Polarização TBJ e FET
- Amplificação
- Amplificação de potência
- Linearidade

#### • Amplificação em RF

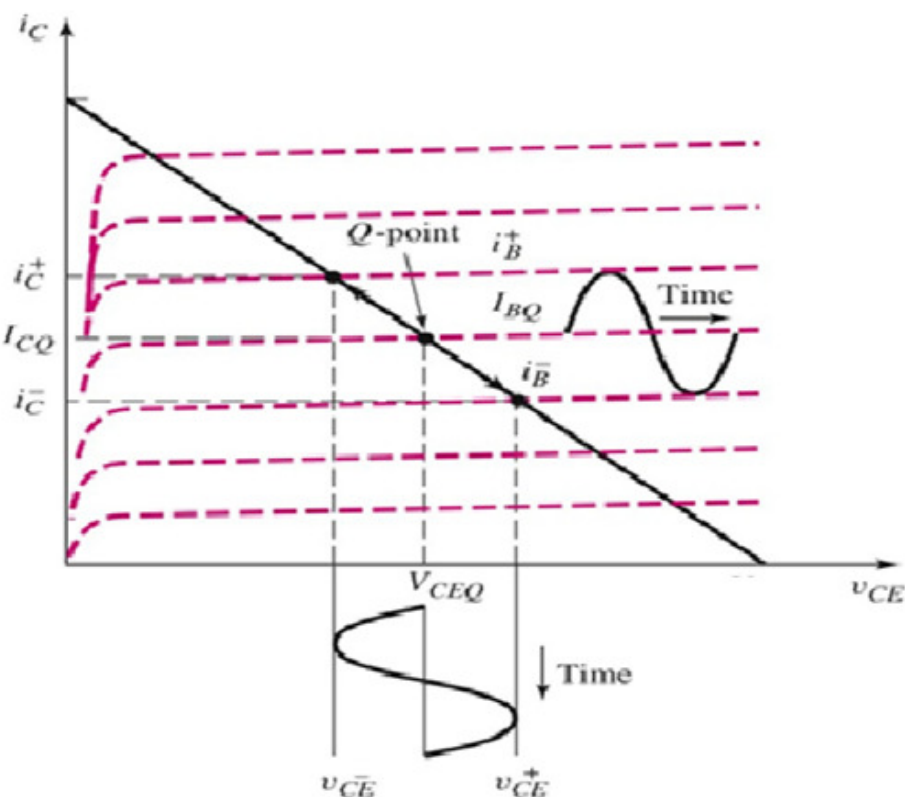
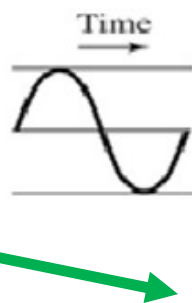
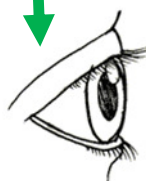
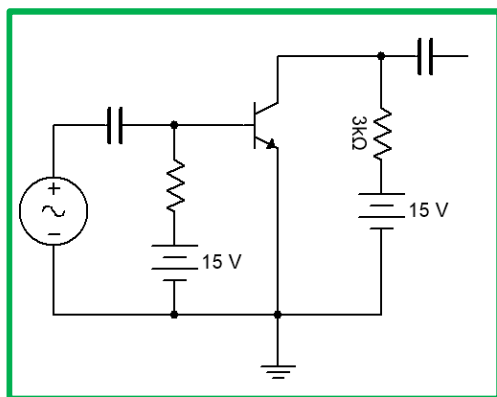
- Modelo em RF
- Modelo parâmetros Y
  - Projeto usando parâm. Y
  - Exemplo de projeto
- Modelo parâmetros S
  - Projeto usando parâm. S
  - Exemplo de projeto

#### • Amplificadores sintonizados

- Introdução
- Análise
- Duplamente sintonizado
- Amplificador classe C sintonizado

#### • Amplificadores baixo ruído

## • Por que polarizar?





# Amplificação

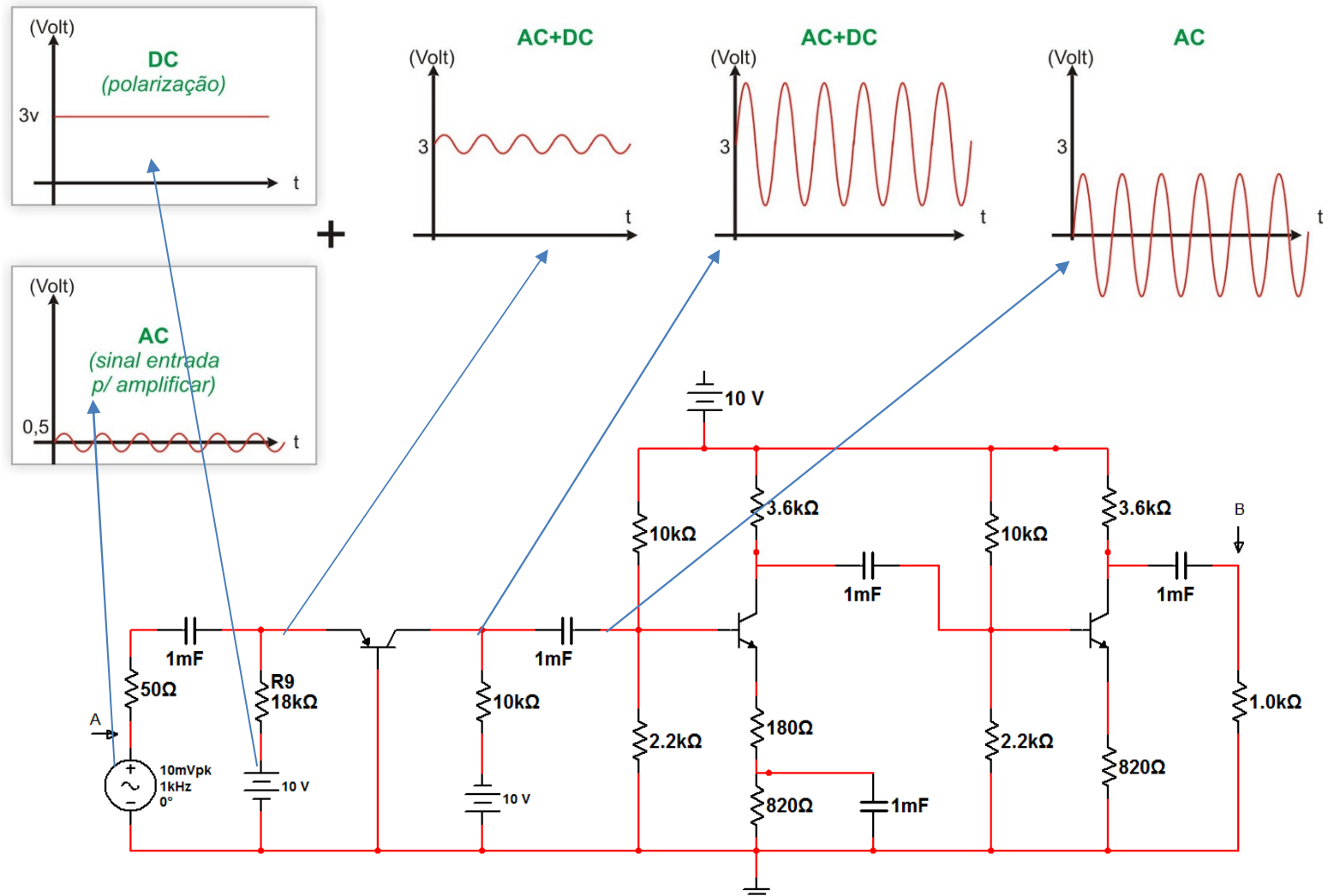
## Cir. Eletrônica Aplica.

Capítulo:

### Transistor e amplificação em RF

- **Transistor em RF**
  - Revisão do transistor
  - Polarização TBJ e FET
  - Amplificação
  - Amplificação de potência
  - Linearidade
- **Amplificação em RF**
  - Modelo em RF
  - Modelo parâmetros Y
    - Projeto usando parâm. Y
    - Exemplo de projeto
  - Modelo parâmetros S
    - Projeto usando parâm. S
    - Exemplo de projeto
- **Amplificadores sintonizados**
  - Introdução
  - Análise
  - Duplamente sintonizado
  - Amplificador classe C sintonizado
- **Amplificadores baixo ruído**

## • O processo:





## Cir. Eletrônica Aplica.

Capítulo:

### Transistor e amplificação em RF

#### • Transistor em RF

- Revisão do transistor
- Polarização TBJ e FET
- Amplificação
- Amplificação de potência
- Linearidade

#### • Amplificação em RF

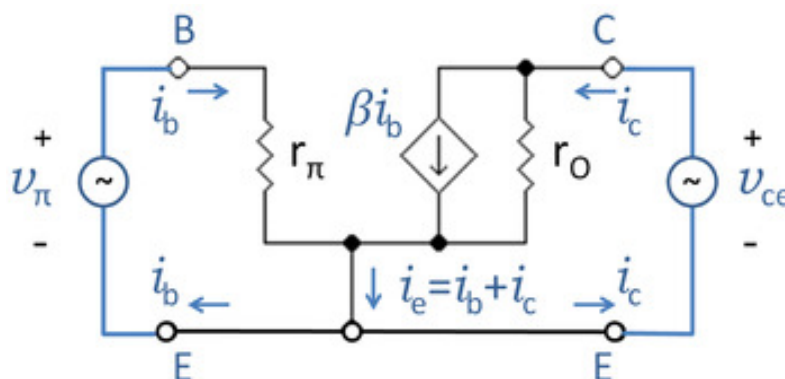
- Modelo em RF
- Modelo parâmetros Y
  - Projeto usando parâm. Y
  - Exemplo de projeto
- Modelo parâmetros S
  - Projeto usando parâm. S
  - Exemplo de projeto

#### • Amplificadores sintonizados

- Introdução
- Análise
- Duplamente sintonizado
- Amplificador classe C sintonizado

#### • Amplificadores baixo ruído

## • Modelo “pi” do transistor



## • Problemas:

- Não leva em consideração efeitos frequência
- Perdas “térmicas” excessivas na polarização
- Casamento de impedância (só resistiva)



# Amplificação de potência

## Cir. Eletrônica Aplica.

Capítulo:

### Transistor e amplificação em RF

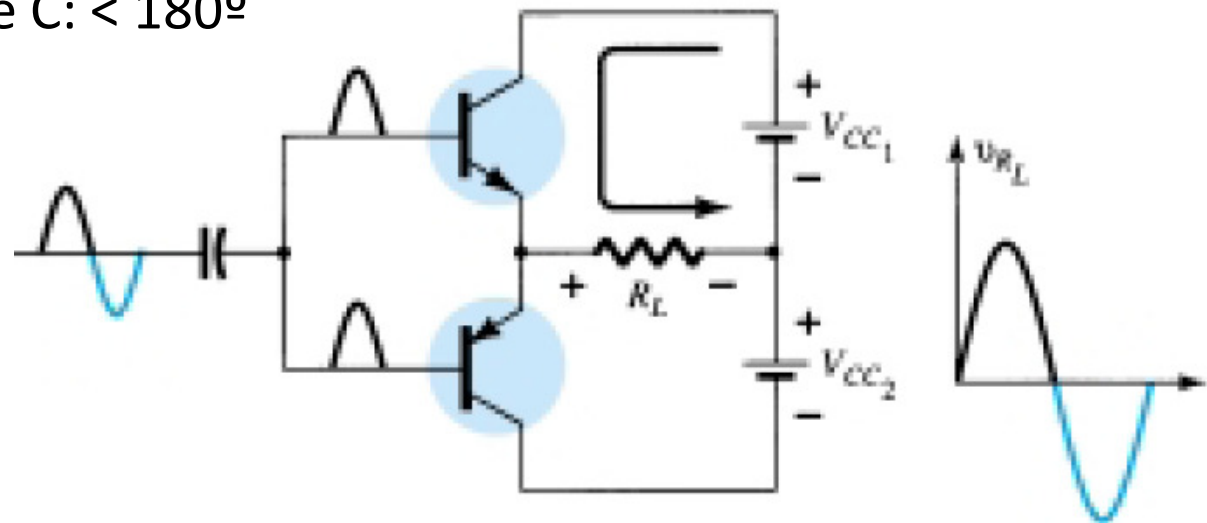
- Transistor em RF
  - Revisão do transistor
  - Polarização TBJ e FET
  - Amplificação
  - Amplificação de potência
  - Linearidade
- Amplificação em RF
  - Modelo em RF
  - Modelo parâmetros Y
    - Projeto usando parâm. Y
    - Exemplo de projeto
  - Modelo parâmetros S
    - Projeto usando parâm. S
    - Exemplo de projeto
- Amplificadores sintonizados
  - Introdução
  - Análise
  - Duplamente sintonizado
  - Amplificador classe C sintonizado
- Amplificadores baixo ruído

## • Amplificação

- Pequeno sinal: linearidade e ganho tensão
- Grandes sinais: ganho de potência
  - Eficácia de potência, casamento de impedância

## • Classificação

- Classe A:  $360^\circ$  (sem saturação)
- Classe B:  $180^\circ$  (polarização cc em 0v)
- Classe C:  $< 180^\circ$





## Cir. Eletrônica Aplica.

Capítulo:

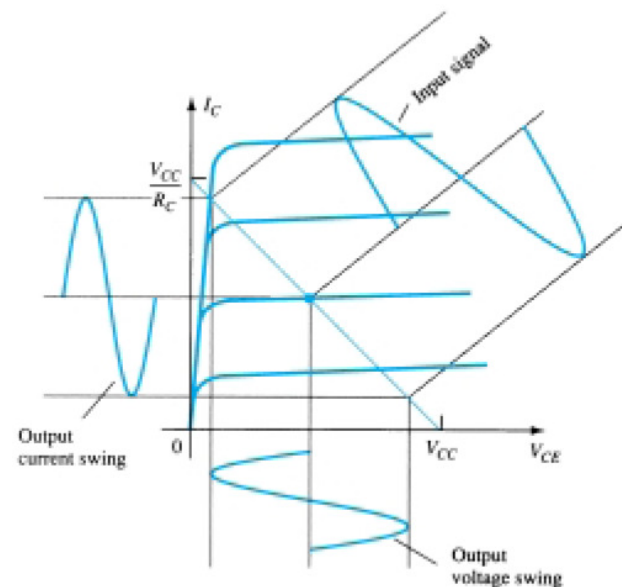
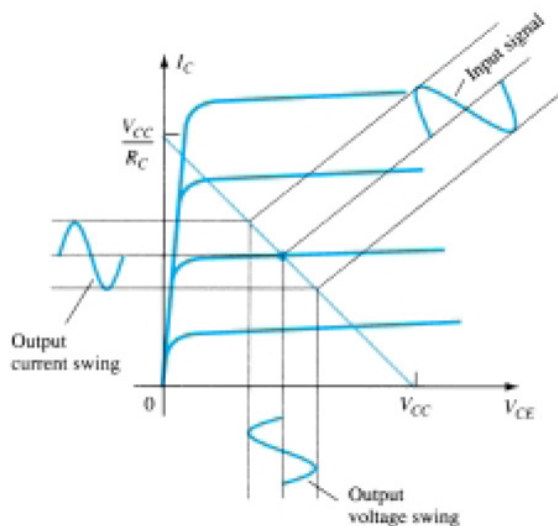
### Transistor e amplificação em RF

- Transistor em RF
  - Revisão do transistor
  - Polarização TBJ e FET
  - Amplificação
  - Amplificação de potência
  - Linearidade
- Amplificação em RF
  - Modelo em RF
  - Modelo parâmetros Y
    - Projeto usando parâm. Y
    - Exemplo de projeto
  - Modelo parâmetros S
    - Projeto usando parâm. S
    - Exemplo de projeto
- Amplificadores sintonizados
  - Introdução
  - Análise
  - Duplamente sintonizado
  - Amplificador classe C sintonizado
- Amplificadores baixo ruído

	A	AB	B	C*
Operating cycle	360°	180° to 360°	180°	Less than 180°
Power efficiency	25% to 50%	Between 25% (50%) and 78.5%	78.5%	

## • Eficiência do amplificador

- A: muita potência na polarização
- B: sem potência de polarização na ausência de sinal





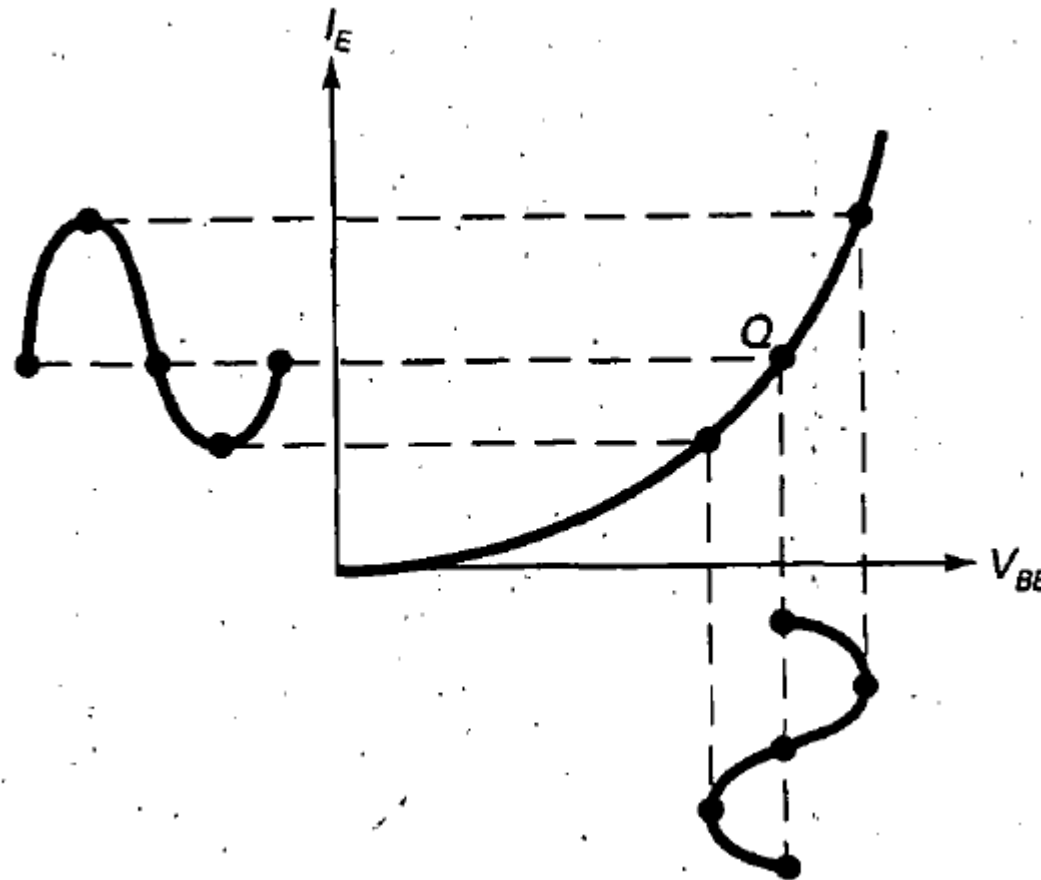
## Cir. Eletrônica Aplica.

Capítulo:

### Transistor e amplificação em RF

- **Transistor em RF**
  - Revisão do transistor
  - Polarização TBJ e FET
  - Amplificação
  - Amplificação de potência
  - Linearidade
- **Amplificação em RF**
  - Modelo em RF
  - Modelo parâmetros Y
    - Projeto usando parâm. Y
    - Exemplo de projeto
  - Modelo parâmetros S
    - Projeto usando parâm. S
    - Exemplo de projeto
- **Amplificadores sintonizados**
  - Introdução
  - Análise
  - Duplamente sintonizado
  - Amplificador classe C sintonizado
- **Amplificadores baixo ruído**

## • Distorção e linearidade







# Polarização

## Cir. Eletrônica Aplica.

Capítulo:

### Transistor e amplificação em RF

#### • Transistor em RF

- Revisão do transistor
- Polarização TBJ e FET
- Amplificação
- Amplificação de potência
- Linearidade

#### • Amplificação em RF

- Modelo em RF
- Modelo parâmetros Y
  - Projeto usando parâm. Y
  - Exemplo de projeto
- Modelo parâmetros S
  - Projeto usando parâm. S
  - Exemplo de projeto

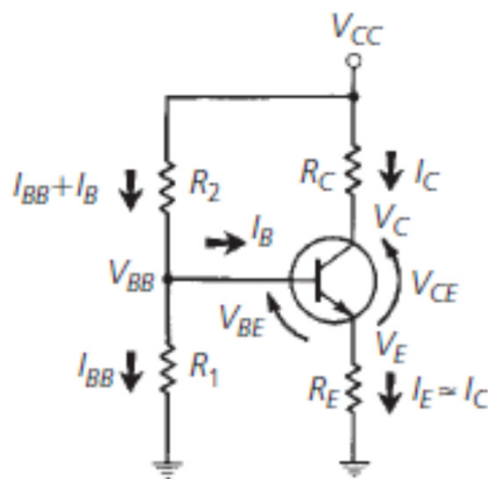
#### • Amplificadores sintonizados

- Introdução
- Análise
- Duplamente sintonizado
- Amplificador classe C sintonizado

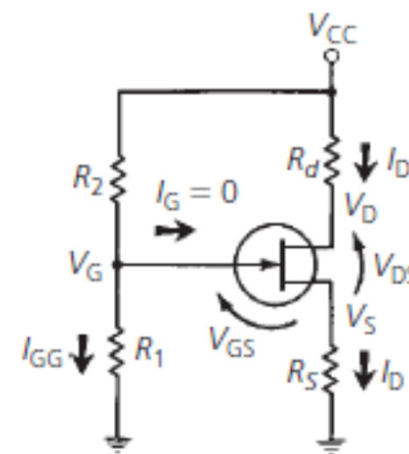
#### • Amplificadores baixo ruído

- Exemplo: polarize os dois transistores abaixo considerando  $V_{CC}=V_{DD}=20V$  além destes transcritos abaixo:

- $I_{CQ}=10mA$
- $B=50$



- $V_p=-6V$
- $I_{DSS}=5mA$





## Cir. Eletrônica Aplica.

*Capítulo:*

### **Transistor e amplificação em RF**

- **Transistor em RF**
  - Revisão do transistor
  - Polarização TBJ e FET
  - Amplificação
  - Amplificação de potência
  - Linearidade
  
- **Amplificação em RF**
  - Modelo em RF
  - Modelo parâmetros Y
    - Projeto usando parâm. Y
    - Exemplo de projeto
  - Modelo parâmetros S
    - Projeto usando parâm. S
    - Exemplo de projeto
  
- **Amplificadores sintonizados**
  - Introdução
  - Análise
  - Duplamente sintonizado
  - Amplificador classe C sintonizado
  
- **Amplificadores baixo ruído**

# Amplificação em RF



# Modelo em RF

## Cir. Eletrônica Aplica.

Capítulo:

### Transistor e amplificação em RF

#### • Transistor em RF

- Revisão do transistor
- Polarização TBJ e FET
- Amplificação
- Amplificação de potência
- Linearidade

#### • Amplificação em RF

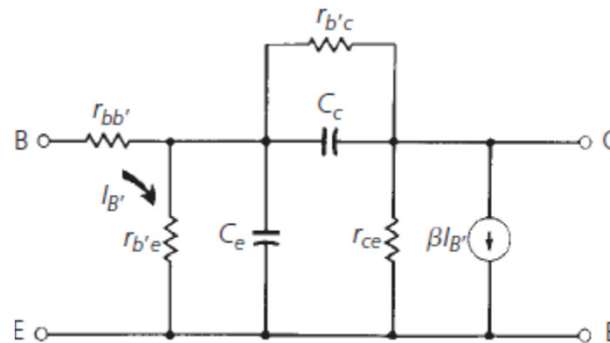
- Modelo em RF
- Modelo parâmetros Y
  - Projeto usando parâm. Y
  - Exemplo de projeto
- Modelo parâmetros S
  - Projeto usando parâm. S
  - Exemplo de projeto

#### • Amplificadores sintonizados

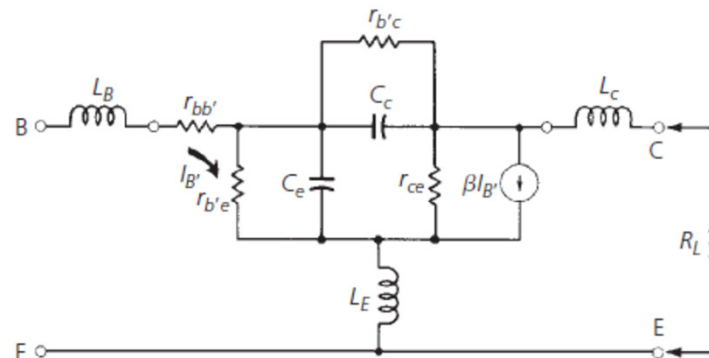
- Introdução
- Análise
- Duplamente sintonizado
- Amplificador classe C sintonizado

#### • Amplificadores baixo ruído

### • Modelo TBJ em RF:



### • Maiores detalhamentos (pouco usual):



Principais parâmetros:

- $f_T$  = frequência de transição ou “produto do ganho por largura de banda”.
- Frequência na qual o transistor (em emissor comum) tem ganho de 0dB
- NF = “figura de ruído” indicando quanto de ruído o transistor insere no sinal
- $h_{fe}$  = ganho do transistor em baixas frequências (<1kHz)



# Modelo parâmetros Y

## Cir. Eletrônica Aplica.

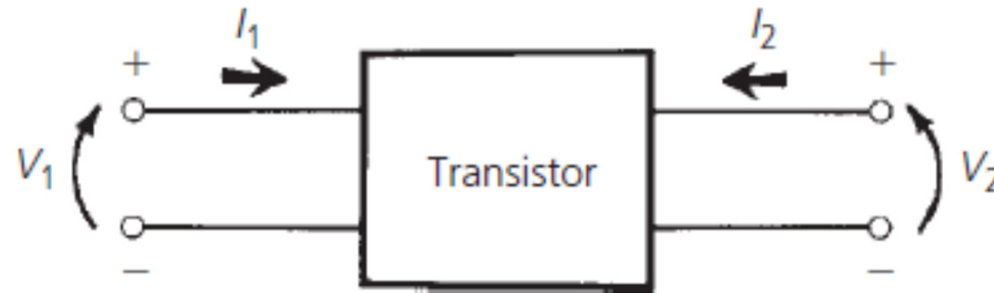
Capítulo:

### Transistor e amplificação em RF

- Transistor em RF
  - Revisão do transistor
  - Polarização TBJ e FET
  - Amplificação
  - Amplificação de potência
  - Linearidade
- Amplificação em RF
  - Modelo em RF
  - Modelo parâmetros Y
    - Projeto usando parâm. Y
    - Exemplo de projeto
  - Modelo parâmetros S
    - Projeto usando parâm. S
    - Exemplo de projeto
- Amplificadores sintonizados
  - Introdução
  - Análise
  - Duplamente sintonizado
  - Amplificador classe C sintonizado

### Amplificadores baixo ruído

## Modelo de parâmetros Y:



$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix}$$

$$I_1 = y_i V_1 + y_r V_2$$

$$I_2 = y_f V_1 + y_o V_2$$

$$y_i = \frac{I_1}{V_1} \Big|_{V_2 = 0}$$

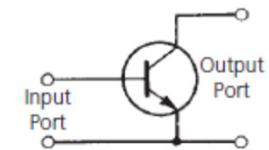
$$y_r = \frac{I_1}{V_2} \Big|_{V_1 = 0}$$

$$y_f = \frac{I_2}{V_1} \Big|_{V_2 = 0}$$

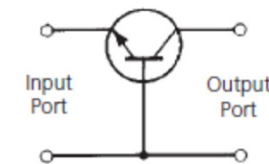
$$y_o = \frac{I_2}{V_2} \Big|_{V_1 = 0}$$

Cálculo de  $y_i$ :

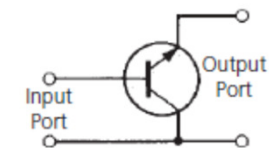
- 1) Inserir um capacitor de curto grande para Aquele terminal
- 2) Inserir um sinal  $V_1$  conhecido
- 3) Medir  $I_1$



(A) Common emitter



(B) Common base



(C) Common collector



## Cir. Eletrônica Aplica.

Capítulo:

### Transistor e amplificação em RF

#### • Transistor em RF

- Revisão do transistor
- Polarização TBJ e FET
- Amplificação
- Amplificação de potência
- Linearidade

#### • Amplificação em RF

- Modelo em RF
- Modelo parâmetros Y
  - Projeto usando parâm. Y
  - Exemplo de projeto
- Modelo parâmetros S
  - Projeto usando parâm. S
  - Exemplo de projeto

#### • Amplificadores sintonizados

- Introdução
- Análise
- Duplamente sintonizado
- Amplificador classe C sintonizado

#### • Amplificadores baixo ruído

## • Projeto usando parâmetros Y:

### 1) Cálculo do fator de estabilidade ( $C < 1$ )

$$C = \frac{|y_r y_f|}{2g_i g_o - \text{Re}(y_r y_f)}$$

$y_r$  = the reverse-transfer admittance,  
 $y_f$  = the forward-transfer admittance,  
 $g_i$  = the input conductance,  
 $g_o$  = the output conductance,  
 Re = the real part of the product in parentheses.  
 $y_x = g_x + b_x j$

### 2) Estimativa do ganho máximo:

$$\text{MAG} = \frac{|y_f|^2}{4g_i g_o}$$

### 3) Estimar casamento de impedância da carga e fonte

$$G_S = \frac{\sqrt{[2g_i g_o - \text{Re}(y_f y_r)]^2 - |y_f y_r|^2}}{2g_o}$$

$$B_S = -j b_i + \frac{\text{Im}(y_f y_r)}{2g_o}$$

$$G_L = \frac{G_S g_o}{g_i}$$

$$B_L = -j b_o + \frac{\text{Im}(y_f y_r)}{2g_i}$$

$G_S$  = the source conductance,  
 $B_S$  = the source susceptance,  
 $G_L$  = the load conductance,  
 $B_L$  = the load susceptance,  
 Im = the imaginary part of the product in parentheses



## Cir. Eletrônica Aplica.

Capítulo:

### Transistor e amplificação em RF

#### • Transistor em RF

- Revisão do transistor
- Polarização TBJ e FET
- Amplificação
- Amplificação de potência
- Linearidade

#### • Amplificação em RF

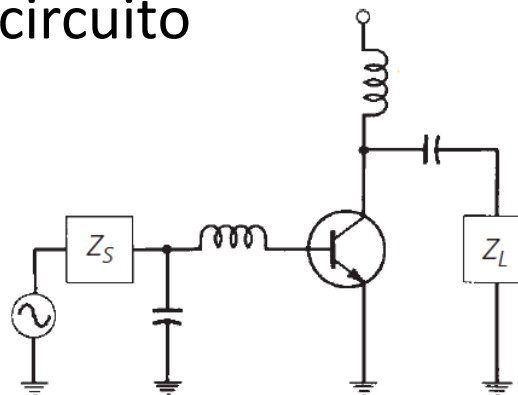
- Modelo em RF
- Modelo parâmetros Y
  - Projeto usando parâm. Y
  - Exemplo de projeto
- Modelo parâmetros S
  - Projeto usando parâm. S
  - Exemplo de projeto

#### • Amplificadores sintonizados

- Introdução
- Análise
- Duplamente sintonizado
- Amplificador classe C sintonizado

#### • Amplificadores baixo ruído

## 4) Desenhar o circuito



## 5) Usando Smith, descobrir L e C para casamento de impedância

## 6) Estimar valores de L e C do passo anterior

## 7) Aplicar a polarização



## Cir. Eletrônica Aplica.

Capítulo:

### Transistor e amplificação em RF

- Transistor em RF
  - Revisão do transistor
  - Polarização TBJ e FET
  - Amplificação
  - Amplificação de potência
  - Linearidade
- Amplificação em RF
  - Modelo em RF
  - Modelo parâmetros Y
    - Projeto usando parâm. Y
    - Exemplo de projeto
  - Modelo parâmetros S
    - Projeto usando parâm. S
    - Exemplo de projeto
- Amplificadores sintonizados
  - Introdução
  - Análise
  - Duplamente sintonizado
  - Amplificador classe C sintonizado
- Amplificadores baixo ruído

## • Exemplo de projeto:

Considere os parâmetros Y abaixo para um transistor. Estes parâmetros foram amostrados para um  $V_C=10V$ ,  $I_C=5mA$ ,  $\beta=50$  e uma frequência de 100MHz. Projeto um amplificador de RF para trabalhar nesta frequência considerando  $R_S=R_L= 50$  ohms

$$Y_i = 8 + 5.7j \text{ m mhos} \quad Y_o = 0.4 + 1.5j \text{ m mhos}$$

$$Y_f = 52 - 20j \text{ m mhos} \quad Y_r = 0.01 - 0.1j \text{ m mhos}$$

## Solução:

Passo 1): ~~Estimar a estabilidade. No caso,  $C = 0.71$  (é estável)~~

Passo 2): ~~Estimar máximo ganho~~

$$MAG = \frac{|y_f|^2}{4g_i g_o} = \frac{|52 - j20|^2}{4(8)(0.4)} = 242.5 = 23.8 \text{ dB}$$

Passo 3) Estimar o complexo conjugado das admitâncias da cargas e fonte

$$G_S = 6.95 \text{ m mhos} \quad B_S = -j12.41 \text{ m mhos} \quad G_L = 0.347 \text{ m mho} \quad B_L = -j1.84 \text{ m mhos}$$



## Cir. Eletrônica Aplica.

Capítulo:

### Transistor e amplificação em RF

#### • Transistor em RF

- Revisão do transistor
- Polarização TBJ e FET
- Amplificação
- Amplificação de potência
- Linearidade

#### • Amplificação em RF

- Modelo em RF
- Modelo parâmetros Y
  - Projeto usando parâm. Y
  - Exemplo de projeto
- Modelo parâmetros S
  - Projeto usando parâm. S
  - Exemplo de projeto

#### • Amplificadores sintonizados

- Introdução
- Análise
- Duplamente sintonizado
- Amplificador classe C sintonizado

#### • Amplificadores baixo ruído

## Passo 3) ... Continuação

$$G_S = \frac{\sqrt{[2g_i g_o - \text{Re}(y_f y_r)]^2 - |y_f y_r|^2}}{2g_o} = \frac{\sqrt{[6.4 + 1.47]^2 - (5.57)^2}}{2(.4)} = 6.95 \text{ m mhos}$$

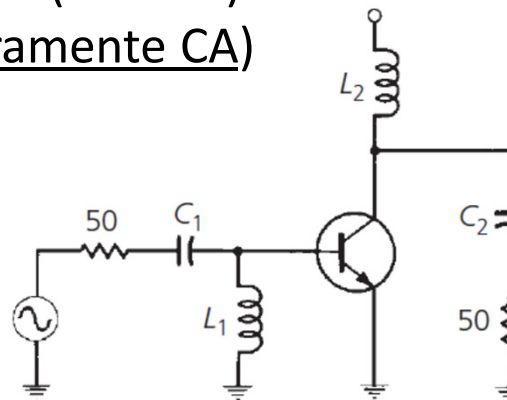
$$B_S = -jb_i + \frac{\text{Im}(y_f y_r)}{2g_o} = -j5.7 + j\frac{-5.37}{2(.4)} = -j12.41 \text{ m mhos}$$

$$G_L = \frac{G_S g_o}{g_i} = \frac{(6.95)(0.4)}{8} = 0.347 \text{ m mho}$$

$$B_L = -jb_o + \frac{\text{Im}(y_f y_r)}{2g_i} = -j1.5 + j\frac{-5.37}{2(8)} = -j1.84 \text{ m mhos}$$

Logo, o transistor têm que ver uma resistência de fonte de  $6.95 + 12.41j$  m mhos e uma admitância de saída de  $0.347 + 1.84j$  m mhos

Passo 4) Esboçar a rede (circuito) de casamento de impedância do transistor (análise puramente CA)







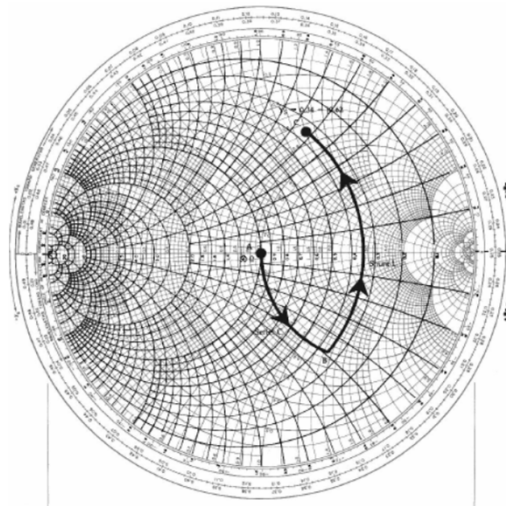
## Cir. Eletrônica Aplica.

Capítulo:

### Transistor e amplificação em RF

- **Transistor em RF**
  - Revisão do transistor
  - Polarização TBJ e FET
  - Amplificação
  - Amplificação de potência
  - Linearidade
- **Amplificação em RF**
  - Modelo em RF
  - Modelo parâmetros Y
    - Projeto usando parâm. Y
    - Exemplo de projeto
  - Modelo parâmetros S
    - Projeto usando parâm. S
    - Exemplo de projeto
- **Amplificadores sintonizados**
  - Introdução
  - Análise
  - Duplamente sintonizado
  - Amplificador classe C sintonizado
- **Amplificadores baixo ruído**

Passo 5) Usar carta de Smith para encontrar valores de C e L.  
5.1: Encontrando o casamento da entrada (esq) e saída (dir):

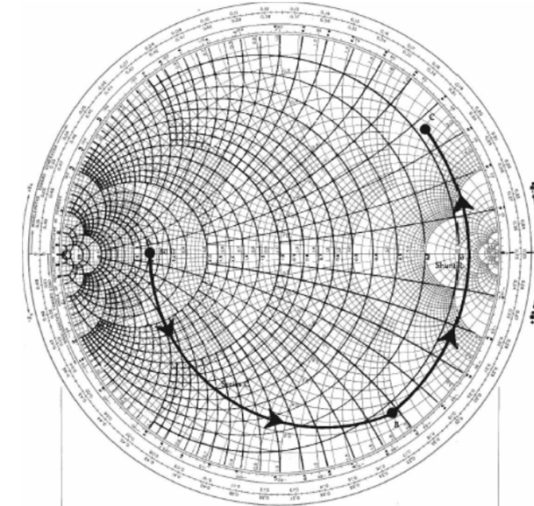


Normalizando (admitâncias) por 50:

$$\begin{aligned} Y_S &= 50(6.95 - j12.41) \text{ mmhos} \\ &= 0.34 - j0.62 \text{ mho} \\ &= 0.69 + j1.2 \text{ ohms} \end{aligned}$$

Arcos de conexão na carta:

$$\begin{aligned} C &= -j1.3 \text{ ohms} \\ L &= -j1.1 \text{ mhos} \end{aligned}$$



Normalizando (admitâncias) por 200:

$$\begin{aligned} Y_L &= 200(0.347 - j1.84) \text{ mmhos} \\ &= 0.069 - j0.368 \text{ mho} \\ &= 0.495 + j2.62 \text{ ohms} \end{aligned}$$

Arcos de conexão na carta:

$$\begin{aligned} C &= -j1.9 \text{ ohms} \\ L &= -j0.89 \text{ mho} \end{aligned}$$



## Cir. Eletrônica Aplica.

Capítulo:

### Transistor e amplificação em RF

- **Transistor em RF**

- Revisão do transistor
- Polarização TBJ e FET
- Amplificação
- Amplificação de potência
- Linearidade

- **Amplificação em RF**

- Modelo em RF
- Modelo parâmetros Y
  - Projeto usando parâm. Y
  - Exemplo de projeto
- Modelo parâmetros S
  - Projeto usando parâm. S
  - Exemplo de projeto

- **Amplificadores sintonizados**

- Introdução
- Análise
- Duplamente sintonizado
- Amplificador classe C sintonizado

- **Amplificadores baixo ruído**

Passo 6) estimar valores de L e C a partir das impedâncias e admitâncias calculadas anteriormente

$$C_1 = \frac{1}{\omega X_N} = \frac{1}{2\pi(100 \times 10^6)(1.3)(50)} = 24.5 \text{ pF}$$

$$L_1 = \frac{N}{\omega B} = \frac{50}{2\pi(100 \times 10^6)(1.1)} = 72 \text{ nH}$$

$$C_2 = \frac{1}{2\pi(100 \times 10^6)(1.9)(200)} = 4.18 \text{ pF}$$

$$L_2 = \frac{200}{2\pi(100 \times 10^6)(0.89)} = 358 \text{ nH}$$

Passo 7) inserir os componentes de polarização DC junto com os de casamento de impedância (análise CA + CC)

Passo 8) simular fazendo ajustes necessários



## Cir. Eletrônica Aplica.

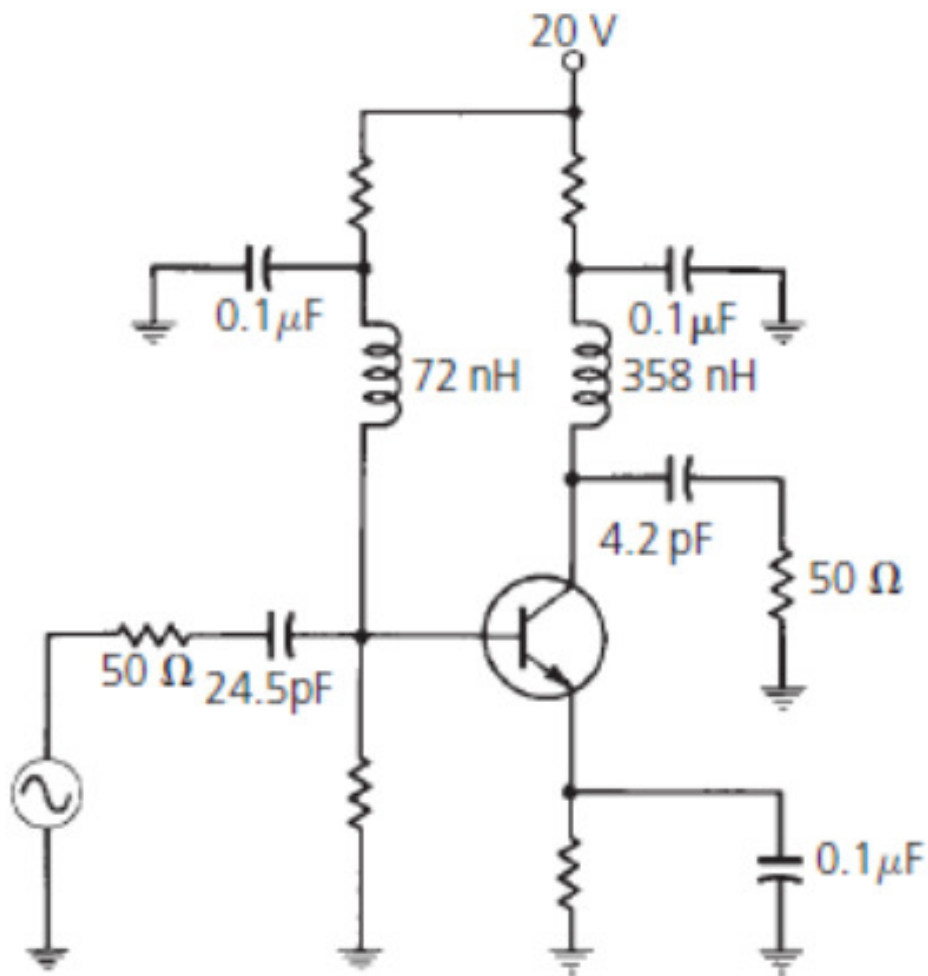
Capítulo:

### Transistor e amplificação em RF

- Transistor em RF
  - Revisão do transistor
  - Polarização TBJ e FET
  - Amplificação
  - Amplificação de potência
  - Linearidade
- Amplificação em RF
  - Modelo em RF
  - Modelo parâmetros Y
    - Projeto usando parâm. Y
    - Exemplo de projeto
  - Modelo parâmetros S
    - Projeto usando parâm. S
    - Exemplo de projeto
- Amplificadores sintonizados
  - Introdução
  - Análise
  - Duplamente sintonizado
  - Amplificador classe C sintonizado
- Amplificadores baixo ruído

## Resultado final:

- observe os capacitores de polarização





# Modelo parâmetros S

## Cir. Eletrônica Aplica.

Capítulo:

Transistor e  
amplificação em RF

- Transistor em RF
  - Revisão do transistor
  - Polarização TBJ e FET
  - Amplificação
  - Amplificação de potência
  - Linearidade
- Amplificação em RF
  - Modelo em RF
  - Modelo parâmetros Y
    - Projeto usando parâm. Y
    - Exemplo de projeto
  - Modelo parâmetros S
    - Projeto usando parâm. S
    - Exemplo de projeto
- Amplificadores sintonizados
  - Introdução
  - Análise
  - Duplamente sintonizado
  - Amplificador classe C sintonizado

- Amplificadores baixo ruído

- Lembrando um pouco linhas de transmissão:
  - Termos: ondas incidentes, refletidas, transmitidas, descasamento impedância.

$\Gamma$  = reflection coefficient

$$= \frac{V_{\text{reflected}}}{V_{\text{incident}}}$$

$$= \rho \angle \theta$$

$$S_{11} = \left. \frac{b_1}{a_1} \right| a_2 = 0$$

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_o}{Z_L + Z_o}$$

$$\Gamma = \frac{\frac{Z_L}{Z_o} - 1}{\frac{Z_L}{Z_o} + 1}$$

$$= \frac{Z_n - 1}{Z_n + 1}$$

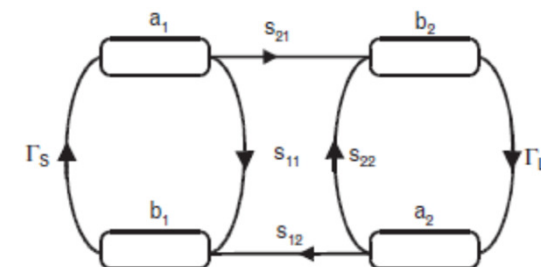
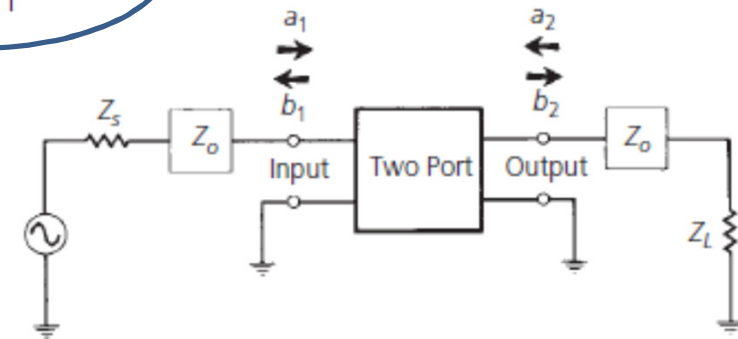
## • Modelo

- Termos: ondas

$$b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2$$

$$b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2$$

$S_{11}$  = the input reflection coefficient,  
 $S_{12}$  = the reverse transmission coefficient,  
 $S_{21}$  = the forward transmission coefficient,  
 $S_{22}$  = the output reflection coefficient.





Cir. Eletrônica Aplica.

Capítulo:

Transistor e  
amplificação em RF

- Transistor em RF
  - Revisão do transistor
  - Polarização TBJ e FET
  - Amplificação
  - Amplificação de potência
  - Linearidade
- Amplificação em RF
  - Modelo em RF
  - Modelo parâmetros Y
    - Projeto usando parâm. Y
    - Exemplo de projeto
  - Modelo parâmetros S
    - Projeto usando parâm. S
    - Exemplo de projeto
- Amplificadores sintonizados
  - Introdução
  - Análise
  - Duplamente sintonizado
  - Amplificador classe C sintonizado
- Amplificadores baixo ruído

• Existe a possibilidade de conversão entre os modelos (só por curiosidade):

$$S_{11} = \frac{(1 - y_i)(1 + y_o) + y_r y_f}{(1 - y_i)(1 + y_o) - y_r y_f}$$

$$S_{12} = \frac{-2y_r}{(1 + y_i)(1 + y_o) - y_r y_f}$$

$$S_{21} = \frac{-2y_f}{(1 + y_i)(1 + y_o) - y_r y_f}$$

$$S_{22} = \frac{(1 + y_i)(1 - y_o) + y_f y_r}{(1 + y_i)(1 + y_o) - y_r y_f}$$

$$y_i = \frac{(1 + S_{22})(1 - S_{11}) + S_{12} S_{21}}{(1 + S_{11})(1 + S_{22}) - S_{12} S_{21}} \times \frac{1}{Z_o}$$

$$y_r = \frac{-2S_{12}}{(1 + S_{11})(1 + S_{22}) - S_{12} S_{21}} \times \frac{1}{Z_o}$$

$$y_f = \frac{-2S_{21}}{(1 + S_{11})(1 + S_{22}) - S_{12} S_{21}} \times \frac{1}{Z_o}$$

$$y_o = \frac{(1 + S_{11})(1 - S_{22}) + S_{12} S_{21}}{(1 + S_{22})(1 + S_{11}) - S_{12} S_{21}} \times \frac{1}{Z_o}$$

FIGURE 11—  $S_{11}$ , INPUT REFLECTION COEFFICIENT

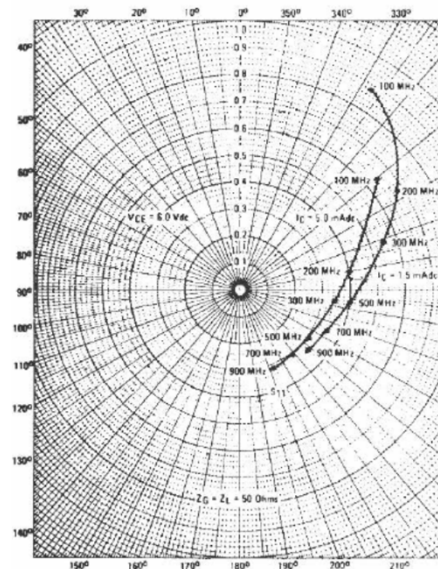
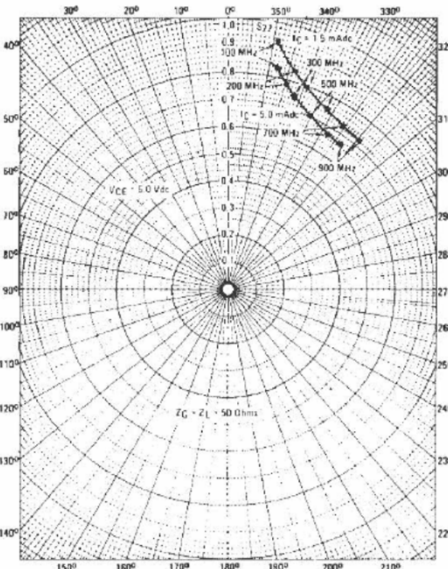


FIGURE 12—  $S_{22}$ , OUTPUT REFLECTION COEFFICIENT





### Cir. Eletrônica Aplica.

Capítulo:

#### Transistor e amplificação em RF

• Transistor em RF

- Revisão do transistor
- Polarização TBJ e FET
- Amplificação
- Amplificação de potência
- Linearidade

• Amplificação em RF

- Modelo em RF
- Modelo parâmetros Y
  - Projeto usando parâm. Y
  - Exemplo de projeto
- Modelo parâmetros S
  - Projeto usando parâm. S
  - Exemplo de projeto

• Amplificadores sintonizados

- Introdução
- Análise
- Duplamente sintonizado
- Amplificador classe C sintonizado

• Amplificadores baixo ruído

## • Projeto usando parâmetro S:

### 1) Estime a estabilidade ( $k > 1$ )

$$K = \frac{1 + |D_S|^2 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2}{2 \cdot |S_{21}| \cdot |S_{12}|}$$

$$D_S = S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}$$

### 2) Estime o MAG (maximum available gain):

$$\text{MAG} = 10 \log \frac{|S_{21}|}{|S_{12}|} + 10 \log |K \oplus \sqrt{K^2 - 1}|$$

Se  $B_1$  é negativo, use o +

$$B_1 = 1 + |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 - |D_S|^2$$

### 3) Estime o conjugado da carga e fonte:

$$|\Gamma_L| = \frac{B_2 \oplus \sqrt{B_2^2 - 4|C_2|^2}}{2|C_2|}$$

$$B_2 = 1 + |S_{22}|^2 - |S_{11}|^2 - |D_S|^2$$

$$C_2 = S_{22} - (D_S S_{11}^*)$$

O sinal é o oposto de  $B_2$

Fase de  $\Gamma_r$  tira daqui!



## Cir. Eletrônica Aplica.

Capítulo:

### Transistor e amplificação em RF

- **Transistor em RF**
  - Revisão do transistor
  - Polarização TBJ e FET
  - Amplificação
  - Amplificação de potência
  - Linearidade
- **Amplificação em RF**
  - Modelo em RF
  - Modelo parâmetros Y
    - Projeto usando parâm. Y
    - Exemplo de projeto
  - Modelo parâmetros S
    - Projeto usando parâm. S
    - Exemplo de projeto
- **Amplificadores sintonizados**
  - Introdução
  - Análise
  - Duplamente sintonizado
  - Amplificador classe C sintonizado
- **Amplificadores baixo ruído**

### 3) ... (continuação)

$$\Gamma_S = \left[ S_{11} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_L}{1 - (\Gamma_L \cdot S_{22})} \right]^*$$

conjugado

### 4) Encontrados $\Gamma_S$ e $\Gamma_L$ , plotar eles em Smith para encontrar as respectivas impedâncias

### 5) Polarizar transistor

- Exemplo de projeto: empregando o transistor de parâmetros S abaixo, faça o projeto de um amplificador para operar em 50MHz com uma carga de 50Ω. Estes parâmetros S foram medidos considerando uma polarização  $V_{CE}=10V$  e  $I_C=10mA$

$$S_{11} = 0.4 \angle 162^\circ$$

$$S_{22} = 0.35 \angle -39^\circ$$

$$S_{12} = 0.04 \angle 60^\circ$$

$$S_{21} = 5.2 \angle 63^\circ$$



## Cir. Eletrônica Aplica.

Capítulo:

### Transistor e amplificação em RF

#### • Transistor em RF

- Revisão do transistor
- Polarização TBJ e FET
- Amplificação
- Amplificação de potência
- Linearidade

#### • Amplificação em RF

- Modelo em RF
- Modelo parâmetros Y
  - Projeto usando parâm. Y
  - Exemplo de projeto
- Modelo parâmetros S
  - Projeto usando parâm. S
  - Exemplo de projeto

#### • Amplificadores sintonizados

- Introdução
- Análise
- Duplamente sintonizado
- Amplificador classe C sintonizado

#### • Amplificadores baixo ruído

### 1) Estimativa fator estabilidade:

$$K = \frac{1 + (0.068)^2 - (0.4)^2 - (0.35)^2}{2(5.2)(0.04)} = 1.74$$

### 2) Estimativa MAG:

$$\text{MAG} = 10 \log \frac{5.2}{0.04} + 10 \log |1.74 - \sqrt{(1.74)^2 - 1}| = 21.14 + (-5) = 16.1 \text{ dB}$$

### 3) Índice reflexão:

#### a) Carga :

$$C_2 = 0.35 \angle -39^\circ - [(0.068 \angle -57^\circ)(0.4 \angle -162^\circ)] = 0.377 \angle -39^\circ$$

$$|\Gamma_L| = \frac{0.958 - \sqrt{(0.958)^2 - 4(0.377)^2}}{2(0.377)} = 0.487$$

$$\Gamma_L = 0.487 \angle 39^\circ$$

#### b) Fonte:

$$\Gamma_S = \left[ 0.4 \angle 162^\circ + \frac{(0.04 \angle 60^\circ)(5.2 \angle 63^\circ)(0.487 \angle 39^\circ)}{1 - (0.487 \angle 39^\circ)(0.35 \angle -39^\circ)} \right]^* = [0.522 \angle -162^\circ]$$





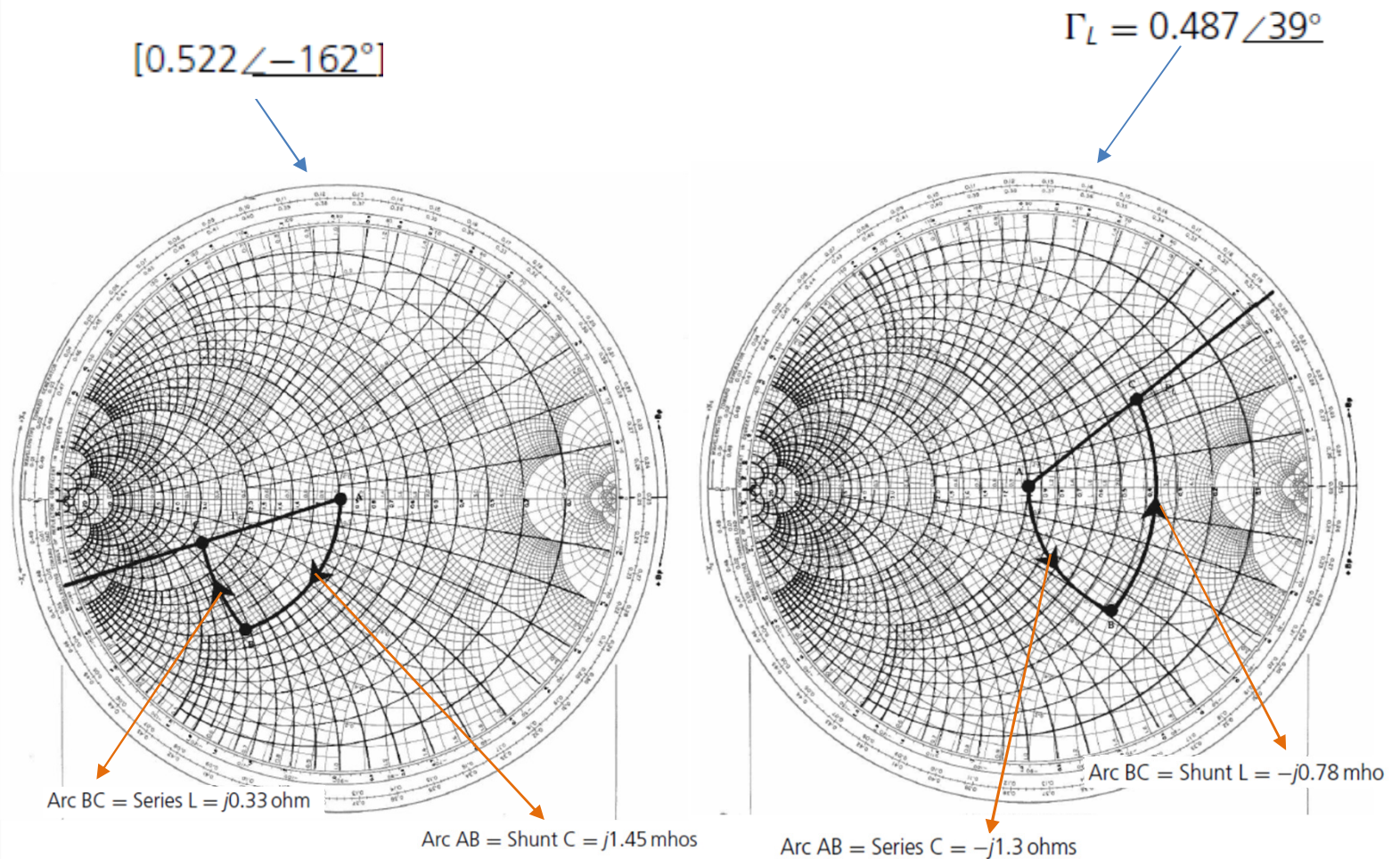
## Cir. Eletrônica Aplica.

Capítulo:

### Transistor e amplificação em RF

- Transistor em RF
  - Revisão do transistor
  - Polarização TBJ e FET
  - Amplificação
  - Amplificação de potência
  - Linearidade
- Amplificação em RF
  - Modelo em RF
  - Modelo parâmetros Y
    - Projeto usando parâm. Y
    - Exemplo de projeto
  - Modelo parâmetros S
    - Projeto usando parâm. S
    - Exemplo de projeto
- Amplificadores sintonizados
  - Introdução
  - Análise
  - Duplamente sintonizado
  - Amplificador classe C sintonizado
- Amplificadores baixo ruído

4) Agora devemos encontrar L e C que proveem impedância  $\Gamma_S$  e  $\Gamma_L$  para casar com o transistor. Normalizando em  $N=50$  e lembrando dos passos anteriores:





## Cir. Eletrônica Aplica.

Capítulo:

### Transistor e amplificação em RF

#### • Transistor em RF

- Revisão do transistor
- Polarização TBJ e FET
- Amplificação
- Amplificação de potência
- Linearidade

#### • Amplificação em RF

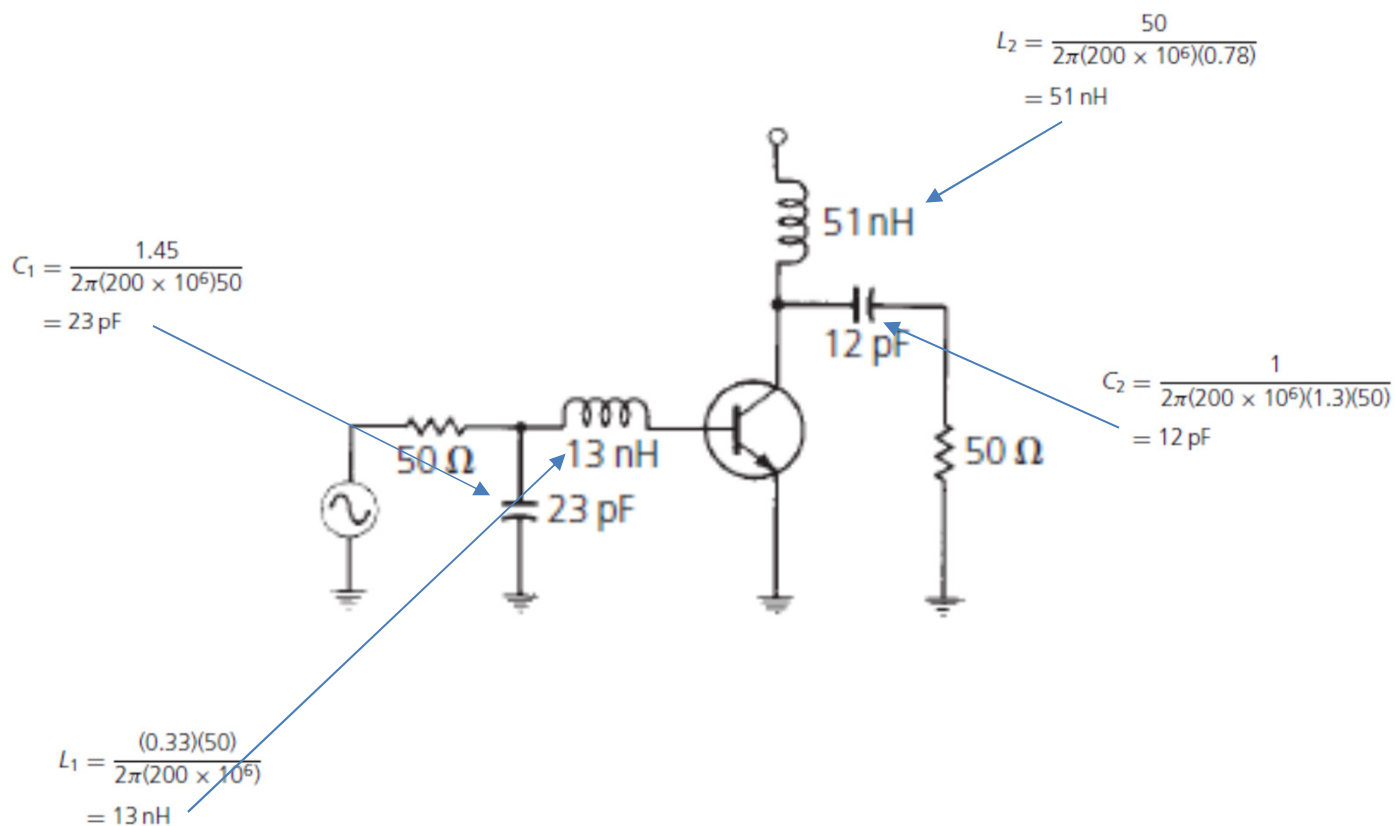
- Modelo em RF
- Modelo parâmetros Y
  - Projeto usando parâm. Y
  - Exemplo de projeto
- Modelo parâmetros S
  - Projeto usando parâm. S
  - Exemplo de projeto

#### • Amplificadores sintonizados

- Introdução
- Análise
- Duplamente sintonizado
- Amplificador classe C sintonizado

#### • Amplificadores baixo ruído

## 4) Circuito (sem polarização):





## Cir. Eletrônica Aplica.

*Capítulo:*

### **Transistor e amplificação em RF**

- **Transistor em RF**
  - Revisão do transistor
  - Polarização TBJ e FET
  - Amplificação
  - Amplificação de potência
  - Linearidade
- **Amplificação em RF**
  - Modelo em RF
  - Modelo parâmetros Y
    - Projeto usando parâm. Y
    - Exemplo de projeto
  - Modelo parâmetros S
    - Projeto usando parâm. S
    - Exemplo de projeto
- **Amplificadores sintonizados**
  - Introdução
  - Análise
  - Duplamente sintonizado
  - Amplificador classe C sintonizado
- **Amplificadores baixo ruído**

# Amplificadores sintonizados

## Cir. Eletrônica Aplica.

Capítulo:

### Transistor e amplificação em RF

#### • Transistor em RF

- Revisão do transistor
- Polarização TBJ e FET
- Amplificação
- Amplificação de potência
- Linearidade

#### • Amplificação em RF

- Modelo em RF
- Modelo parâmetros Y
  - Projeto usando parâm. Y
  - Exemplo de projeto
- Modelo parâmetros S
  - Projeto usando parâm. S
  - Exemplo de projeto

#### • Amplificadores sintonizados

- Introdução
- Análise
- Duplamente sintonizado
- Amplificador classe C sintonizado

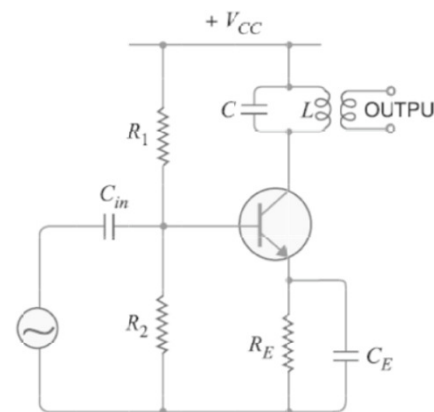
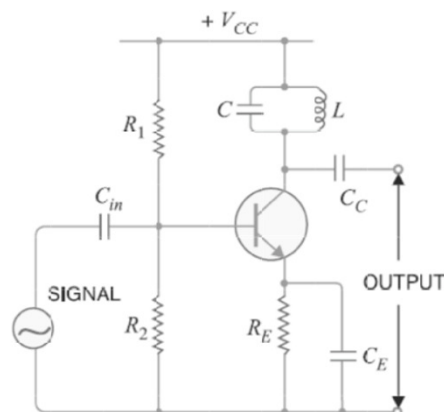
#### • Amplificadores baixo ruído

## • Necessidade:

- amplificador que já sintonize
  - somente faixas de freq. Desejadas
  - Rejeitar frequências fora do desejado
- Menor perca energética possível (alto ganho)
- Modelos mais simples de projeto de amplificadores

## • Circuito básico:

- Impedância muito alta na freq. ressonante e pequena em outras
  - ‘Alto’ ganho!
- Baixas frequências: altos L e C





# Análise

## Cir. Eletrônica Aplica.

Capítulo:

### Transistor e amplificação em RF

#### • Transistor em RF

- Revisão do transistor
- Polarização TBJ e FET
- Amplificação
- Amplificação de potência
- Linearidade

#### • Amplificação em RF

- Modelo em RF
- Modelo parâmetros Y
  - Projeto usando parâm. Y
  - Exemplo de projeto
- Modelo parâmetros S
  - Projeto usando parâm. S
  - Exemplo de projeto

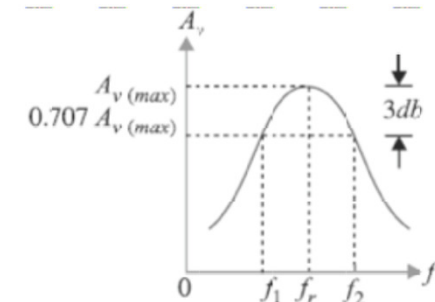
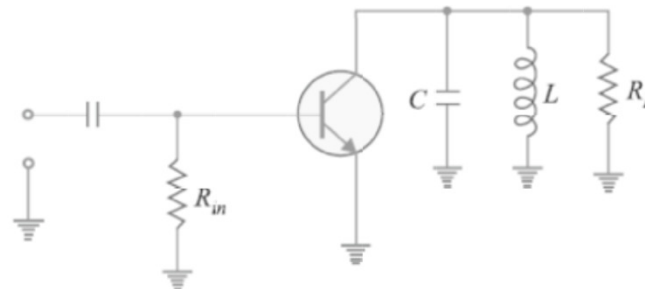
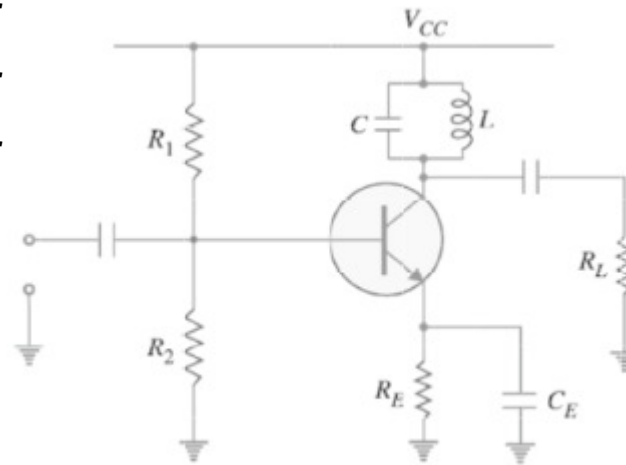
#### • Amplificadores sintonizados

- Introdução
- Análise
- Duplamente sintonizado
- Amplificador classe C sintonizado

#### • Amplificadores baixo ruído

## • Análise frequência:

- $f_{in} = f_r$
- $f_{in} < f_r$
- $f_{in} > f_r$





**Cir. Eletrônica Aplica.**

Capítulo:

**Transistor e amplificação em RF**

• **Transistor em RF**

- Revisão do transistor
- Polarização TBJ e FET
- Amplificação
- Amplificação de potência
- Linearidade

• **Amplificação em RF**

- Modelo em RF
- Modelo parâmetros Y
  - Projeto usando parâm. Y
  - Exemplo de projeto
- Modelo parâmetros S
  - Projeto usando parâm. S
  - Exemplo de projeto

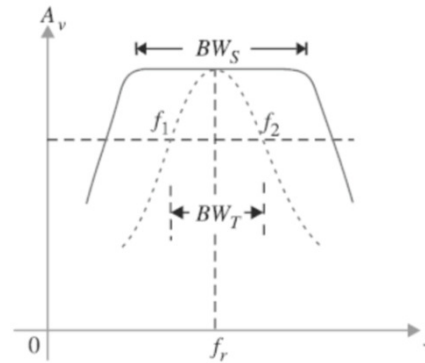
• **Amplificadores sintonizados**

- Introdução
- Análise
- Duplamente sintonizado
- Amplificador classe C sintonizado

• **Amplificadores baixo ruído**

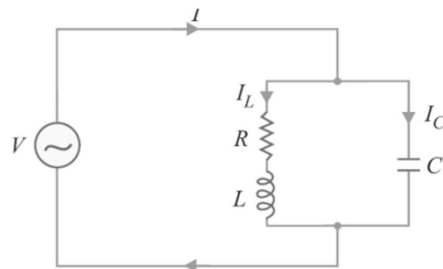
• **Distinção com outros amplificadores**

- Melhor largura de banda  $\rightarrow Q = \frac{f_r}{BW}$  (onde BW = largura de banda)



• **Análise circuito ressonante**

- Possibilidade do indutor apresentar resistência de corpo



- $f_r = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{L^2}}$
- $Q = \frac{X_L}{R}$
- $Z_r = \frac{L}{CR}$  (impedância do circuito na ressonância)



## Cir. Eletrônica Aplica.

Capítulo:

### Transistor e amplificação em RF

#### • Transistor em RF

- Revisão do transistor
- Polarização TBJ e FET
- Amplificação
- Amplificação de potência
- Linearidade

#### • Amplificação em RF

- Modelo em RF
- Modelo parâmetros Y
  - Projeto usando parâm. Y
  - Exemplo de projeto
- Modelo parâmetros S
  - Projeto usando parâm. S
  - Exemplo de projeto

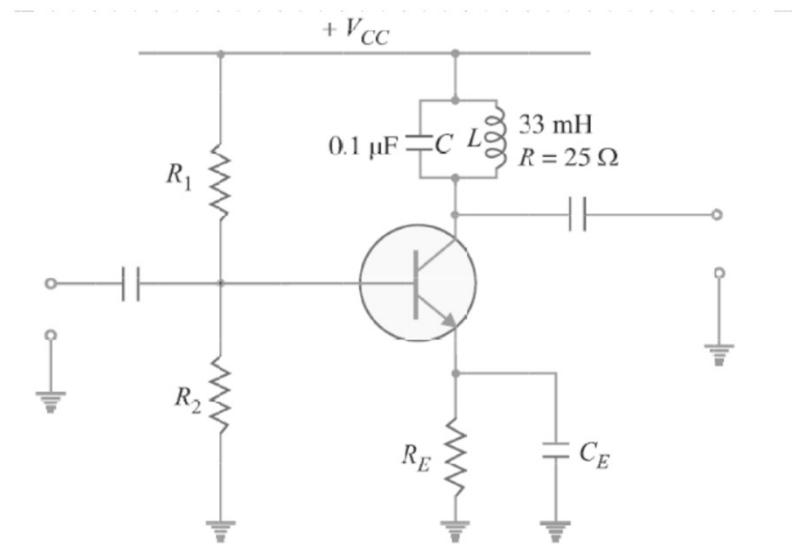
#### • Amplificadores sintonizados

- Introdução
- Análise
- Duplamente sintonizado
- Amplificador classe C sintonizado

#### • Amplificadores baixo ruído

- Exemplo: para o circuito da figura abaixo, determine

- (i) a frequência de ressonância
- (ii) o fator de seletividade  $Q$  do circuito
- (iii) largura de banda do amplificador





# Duplamente sintonizado

## Cir. Eletrônica Aplica.

Capítulo:

### Transistor e amplificação em RF

#### • Transistor em RF

- Revisão do transistor
- Polarização TBJ e FET
- Amplificação
- Amplificação de potência
- Linearidade

#### • Amplificação em RF

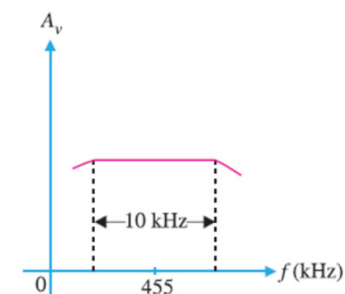
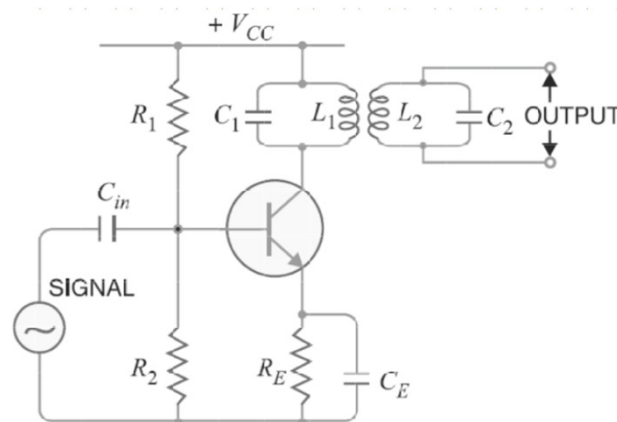
- Modelo em RF
- Modelo parâmetros Y
  - Projeto usando parâm. Y
  - Exemplo de projeto
- Modelo parâmetros S
  - Projeto usando parâm. S
  - Exemplo de projeto

#### • Amplificadores sintonizados

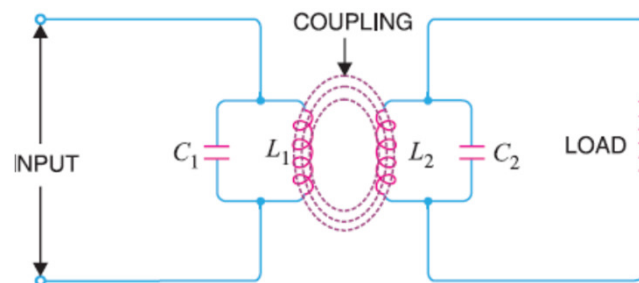
- Introdução
- Análise
- Duplamente sintonizado
- Amplificador classe C sintonizado

#### • Amplificadores baixo ruído

- Saída é transferida por indução mútua
  - Largura banda incrementada
  - Seletividade (transição) incrementada



#### • Acoplamento magnético







# Amplificador classe C sintonizado

## Cir. Eletrônica Aplica.

Capítulo:

### Transistor e amplificação em RF

#### • Transistor em RF

- Revisão do transistor
- Polarização TBJ e FET
- Amplificação
- Amplificação de potência
- Linearidade

#### • Amplificação em RF

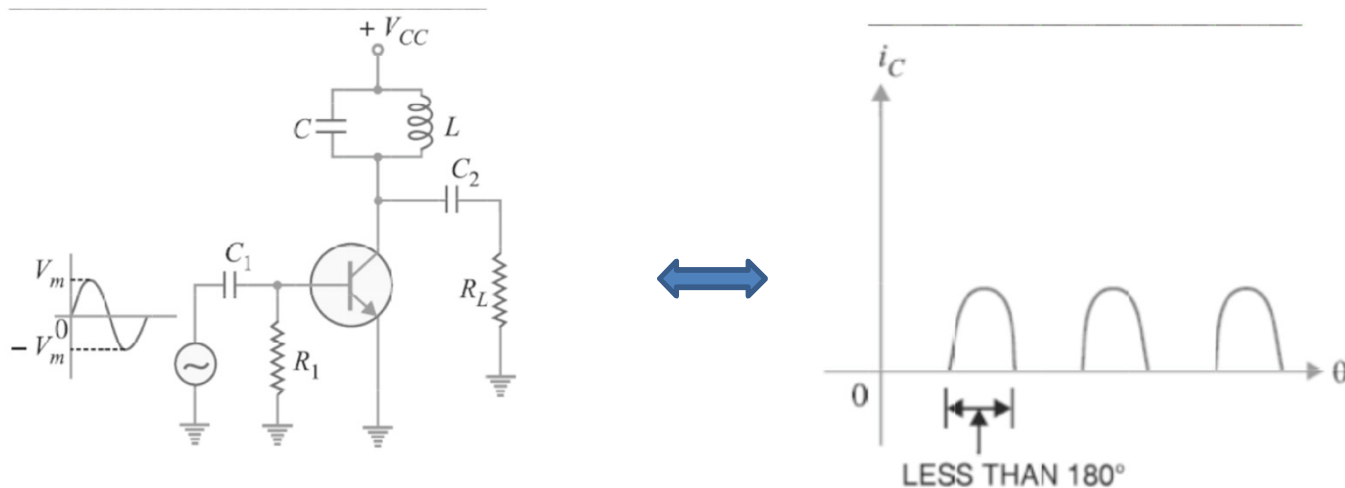
- Modelo em RF
- Modelo parâmetros Y
  - Projeto usando parâm. Y
  - Exemplo de projeto
- Modelo parâmetros S
  - Projeto usando parâm. S
  - Exemplo de projeto

#### • Amplificadores sintonizados

- Introdução
- Análise
- Duplamente sintonizado
- Amplificador classe C sintonizado

#### • Amplificadores baixo ruído

- Operação: sem polarização da base



- Aplicações: telecomunicações
  - “Altíssima” eficiência energética
    - Não tem perdas por polarização
    - L e C não perdem energia
  - Transistores de 1W a 100W



## Cir. Eletrônica Aplica.

Capítulo:

### Transistor e amplificação em RF

#### • Transistor em RF

- Revisão do transistor
- Polarização TBJ e FET
- Amplificação
- Amplificação de potência
- Linearidade

#### • Amplificação em RF

- Modelo em RF
- Modelo parâmetros Y
  - Projeto usando parâm. Y
  - Exemplo de projeto
- Modelo parâmetros S
  - Projeto usando parâm. S
  - Exemplo de projeto

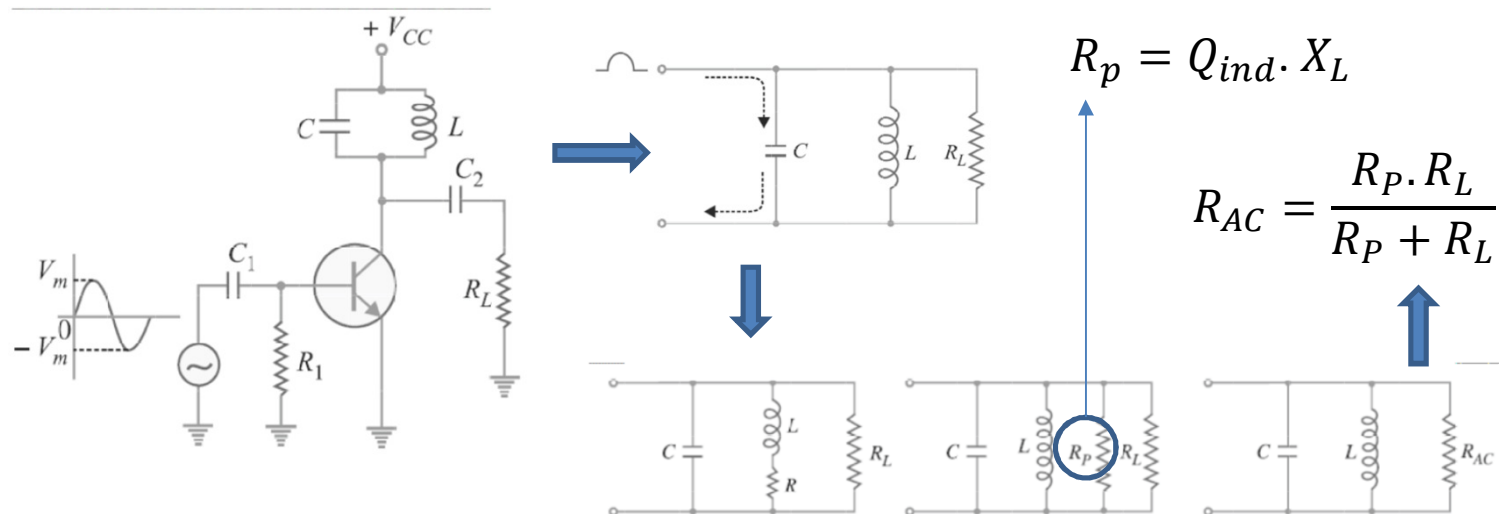
#### • Amplificadores sintonizados

- Introdução
- Análise
- Duplamente sintonizado
- Amplificador classe C sintonizado

#### • Amplificadores baixo ruído

## • Funcionamento:

- (i) Quando nenhum sinal AC é aplicado, nenhuma corrente flui (sem polarização base)
- (ii) Quando um sinal AC é aplicado, ele é ‘grampeado’ passando apenas sinais  $> 0.7V$ .
- (iii) A saída ceifada (‘fina’) alimenta o circuito LC. O indutor terá uma impedância alta e o capacitor uma reatância baixa. Esta corrente carregará o capacitor que quando descarregar irá alimentar a carga com o resto do sinal que não passou





# Amplificadores de baixo ruído (LNA)

## Cir. Eletrônica Aplica.

### Capítulo:

#### Transistor e amplificação em RF

- **Transistor em RF**
  - Revisão do transistor
  - Polarização TBJ e FET
  - Amplificação
  - Amplificação de potência
  - Linearidade
- **Amplificação em RF**
  - Modelo em RF
  - Modelo parâmetros Y
    - Projeto usando parâm. Y
    - Exemplo de projeto
  - Modelo parâmetros S
    - Projeto usando parâm. S
    - Exemplo de projeto
- **Amplificadores sintonizados**
  - Introdução
  - Análise
  - Duplamente sintonizado
  - Amplificador classe C sintonizado
- **Amplificadores baixo ruído**

- Diferenciais desejáveis para um LNA:
  - Mínimo ruído
  - Linearidade
  - Bom ganho
  - Bom casamento impedância
  - Estabilidade em cargas que variam
  - Ampla largura de banda
  - Cascadeamento
  - Performance de parâmetros
- Aplicações
  - Baixo ruído: entrada do receptor (minimizar ruído) e terminação (antena) pode variar do valor nominal
  - Máximo ganho de pequenos sinais na saída
    - As vezes linearidade e/ou eficiência podem ser mais desejáveis (sistemas wireless)

Cir. Eletrônica Aplica.

Capítulo:

Transistor e  
amplificação em RF

• Transistor em RF

- Revisão do transistor
- Polarização TBJ e FET
- Amplificação
- Amplificação de potência
- Linearidade

• Amplificação em RF

- Modelo em RF
- Modelo parâmetros Y
  - Projeto usando parâm. Y
  - Exemplo de projeto
- Modelo parâmetros S
  - Projeto usando parâm. S
  - Exemplo de projeto

• Amplificadores sintonizados

- Introdução
- Análise
- Duplamente sintonizado
- Amplificador classe C sintonizado

• Amplificadores baixo ruído

• Como melhorar ganho e linearidade?

- Casamento de impedância
- Neutralização (feedback ou  $S_{12}$ )
  - Capacitores e/ou indutores indesejados decrementam ganho
    - Efeitos de sintonia
    - Oscilações
    - Feedback interno (reduz  $S_{12}$  e incrementa  $S_{21}$ )

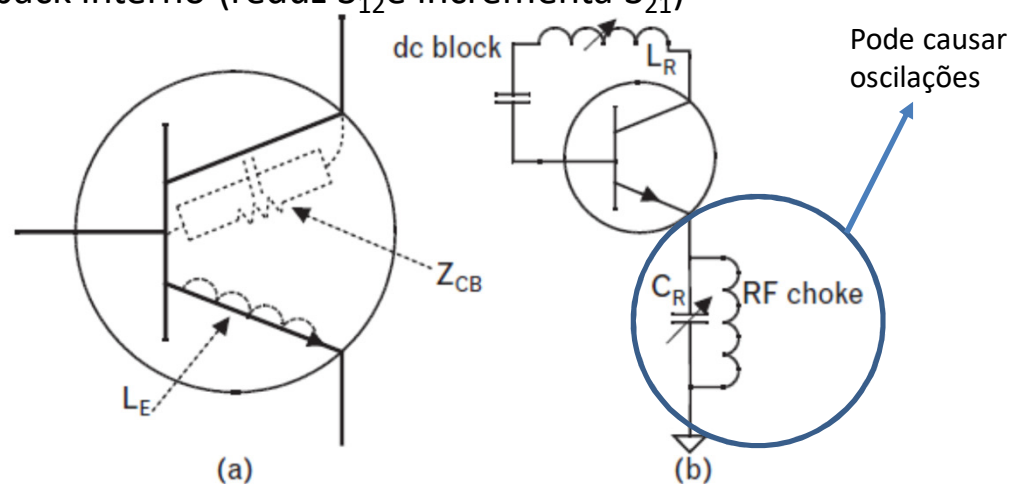


FIGURE 1.4 (A) Two important feedback components of a bipolar transistor: lossy collector-base capacitance,  $Z_{CB}$ , and lossy emitter inductance,  $L_E$ . (B) Dual neutralization by adding parallel and series feedback sections,  $L_R$  and  $C_R$ . Since the series feedback must be bypassed for the dc current, it is not a very practical solution.



## Cir. Eletrônica Aplica.

Capítulo:

### Transistor e amplificação em RF

#### • Transistor em RF

- Revisão do transistor
- Polarização TBJ e FET
- Amplificação
- Amplificação de potência
- Linearidade

#### • Amplificação em RF

- Modelo em RF
- Modelo parâmetros Y
  - Projeto usando parâm. Y
  - Exemplo de projeto
- Modelo parâmetros S
  - Projeto usando parâm. S
  - Exemplo de projeto

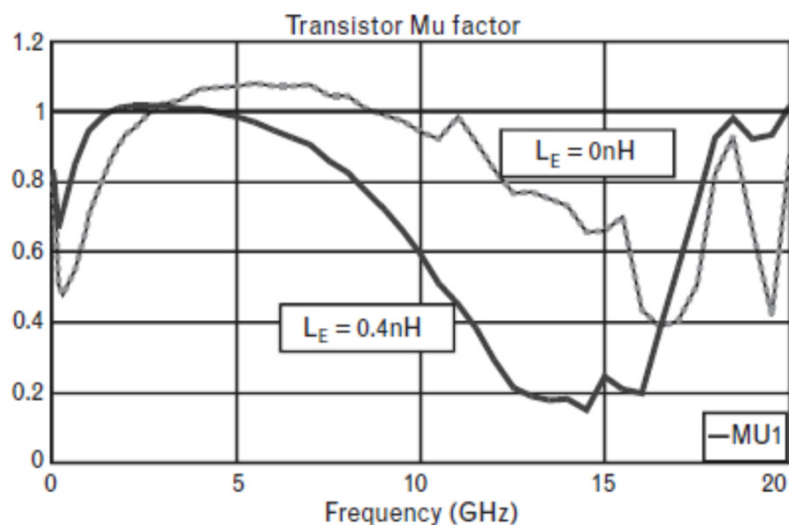
#### • Amplificadores sintonizados

- Introdução
- Análise
- Duplamente sintonizado
- Amplificador classe C sintonizado

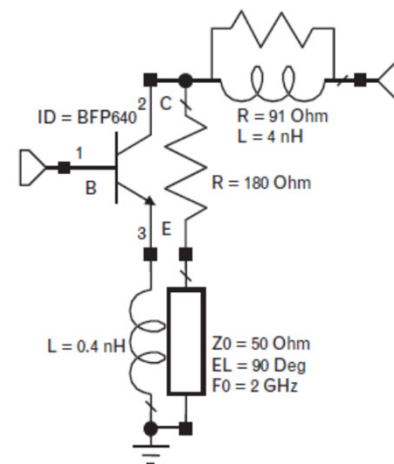
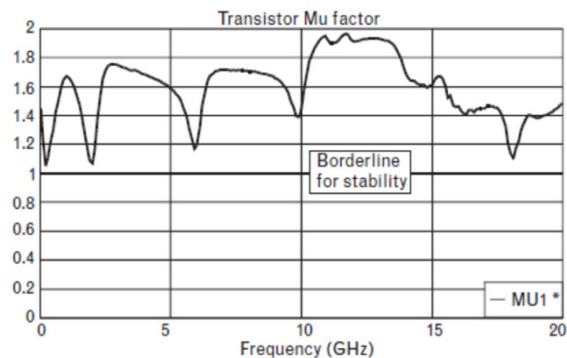
#### • Amplificadores baixo ruído

## • Quão crítico é?

– Exemplo do transistor BFP640



## • Circuito de “estabilização:





Cir. Eletrônica Aplica.

Capítulo:

Transistor e  
amplificação em RF

- Transistor em RF
  - Revisão do transistor
  - Polarização TBJ e FET
  - Amplificação
  - Amplificação de potência
  - Linearidade
- Amplificação em RF
  - Modelo em RF
  - Modelo parâmetros Y
    - Projeto usando parâm. Y
    - Exemplo de projeto
  - Modelo parâmetros S
    - Projeto usando parâm. S
    - Exemplo de projeto
- Amplificadores sintonizados
  - Introdução
  - Análise
  - Duplamente sintonizado
  - Amplificador classe C sintonizado
- Amplificadores baixo ruído

• Como conseguir o máximo ganho?

- 1) Inserir estabilização do transistor (se necessário)
- 2) Calcule o máximo ganho  $G_T$

$$G_T = \frac{\text{Power delivered to the load}}{\text{Power available from matched source}} = \frac{P_L}{P_{AVS}}$$

$$= \frac{(1 - |\Gamma_S|^2) |s_{21}|^2 (1 - |\Gamma_L|^2)}{|(1 - s_{11} \Gamma_S)(1 - s_{22} \Gamma_L) - s_{12} s_{21} \Gamma_S \Gamma_L|^2}$$

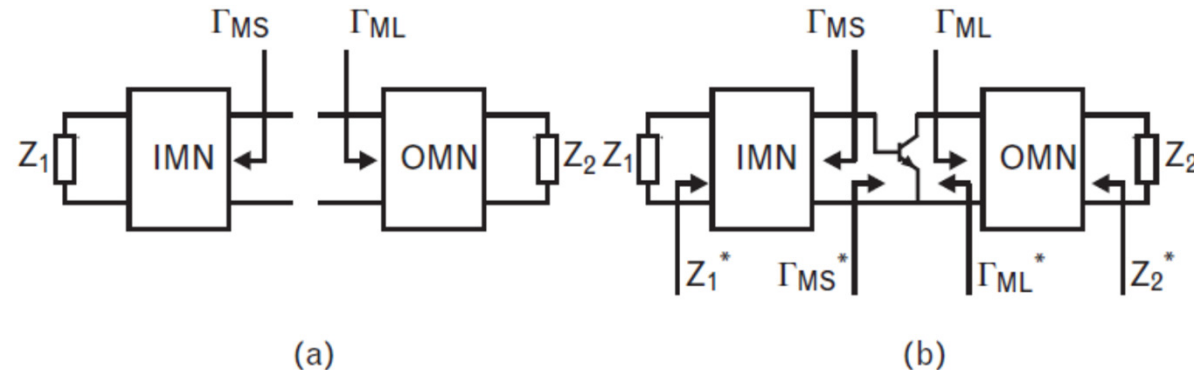


FIGURE 2.2 (a) In maximum gain amplifiers the actual source and load terminations  $Z_1$  and  $Z_2$ , are transformed to  $\Gamma_{MS}$  and  $\Gamma_{ML}$ . (b) Placing the unconditionally stable two-port between  $\Gamma_{MS}$  and  $\Gamma_{ML}$  matches the amplifier to  $Z_1$  and  $Z_2$ .



## Cir. Eletrônica Aplica.

Capítulo:

### Transistor e amplificação em RF

#### • Transistor em RF

- Revisão do transistor
- Polarização TBJ e FET
- Amplificação
- Amplificação de potência
- Linearidade

#### • Amplificação em RF

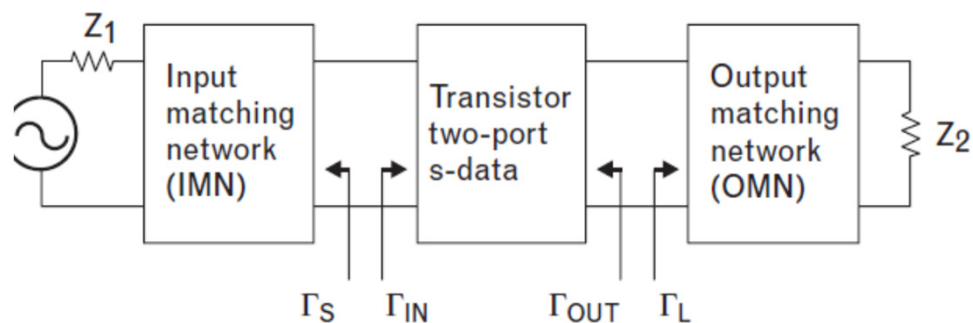
- Modelo em RF
- Modelo parâmetros Y
  - Projeto usando parâm. Y
  - Exemplo de projeto
- Modelo parâmetros S
  - Projeto usando parâm. S
  - Exemplo de projeto

#### • Amplificadores sintonizados

- Introdução
- Análise
- Duplamente sintonizado
- Amplificador classe C sintonizado

#### • Amplificadores baixo ruído

## 3) (...) Casamento de impedância



$$\Gamma_S = \Gamma_{MS} = \Gamma_{IN}^*$$

$$\Gamma_L = \Gamma_{ML} = \Gamma_{OUT}^*$$

$$\Gamma_{MS} = \frac{B_1 - \sqrt{B_1^2 - 4|C_1|^2}}{2C_1}$$

$$\Gamma_{ML} = \frac{B_2 - \sqrt{B_2^2 - 4|C_2|^2}}{2C_2}$$

onde

$$\begin{aligned} B_1 &= 1 + |s_{11}|^2 - |s_{22}|^2 - |\Delta|^2 & C_1 &= s_{11} - s_{22}^* \Delta & |\Delta| &= |s_{11}s_{22} - s_{12}s_{21}| \\ B_2 &= 1 + |s_{22}|^2 - |s_{11}|^2 - |\Delta|^2 & C_2 &= s_{22} - s_{11}^* \Delta \end{aligned}$$



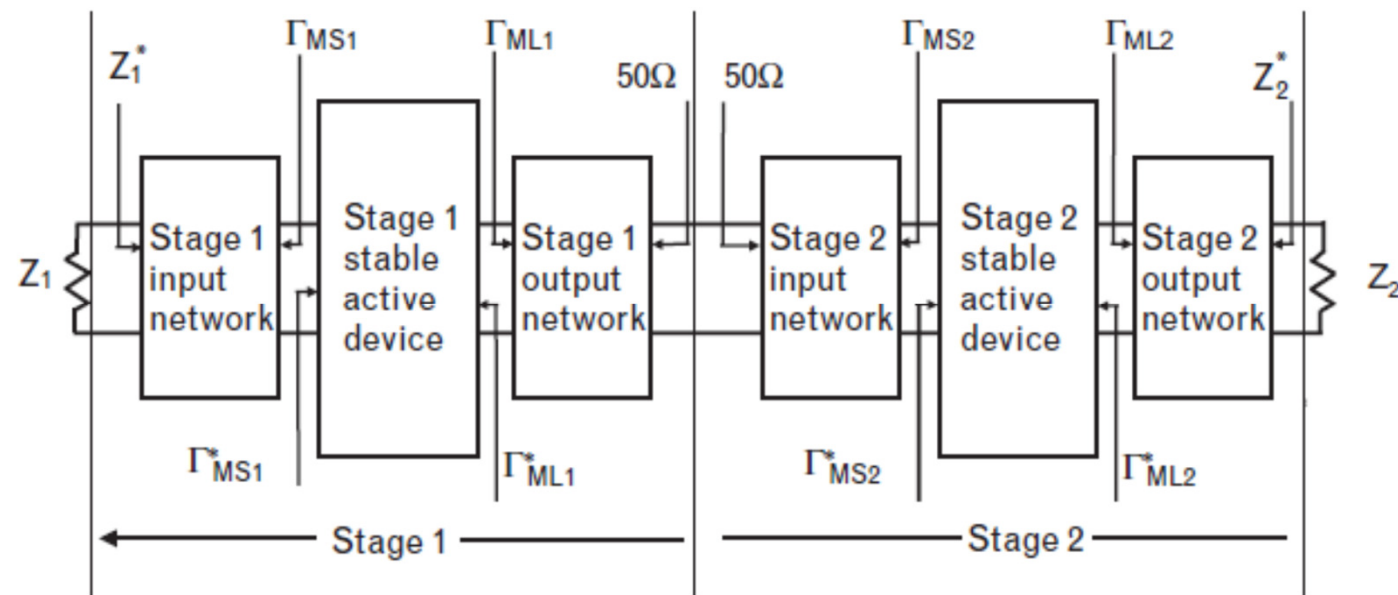
## Cir. Eletrônica Aplica.

Capítulo:

### Transistor e amplificação em RF

- Transistor em RF
  - Revisão do transistor
  - Polarização TBJ e FET
  - Amplificação
  - Amplificação de potência
  - Linearidade
- Amplificação em RF
  - Modelo em RF
  - Modelo parâmetros Y
    - Projeto usando parâm. Y
    - Exemplo de projeto
  - Modelo parâmetros S
    - Projeto usando parâm. S
    - Exemplo de projeto
- Amplificadores sintonizados
  - Introdução
  - Análise
  - Duplamente sintonizado
  - Amplificador classe C sintonizado
- Amplificadores baixo ruído

- Como melhorar a linearidade?
  - Semicondutores específicos (materiais elétricos)
  - Menor ganho por estágio







Cir. Eletrônica Aplica.

Capítulo:

Transistor e  
amplificação em RF

• Transistor em RF

- Revisão do transistor
- Polarização TBJ e FET
- Amplificação
- Amplificação de potência
- Linearidade

• Amplificação em RF

- Modelo em RF
- Modelo parâmetros Y
  - Projeto usando parâm. Y
  - Exemplo de projeto
- Modelo parâmetros S
  - Projeto usando parâm. S
  - Exemplo de projeto

• Amplificadores sintonizados

- Introdução
- Análise
- Duplamente sintonizado
- Amplificador classe C sintonizado

• Amplificadores baixo ruído

• Fontes de ruídos internos de um semiconductor:

- Térmico (Johnson): agitação térmica livre dos elétrons condutores
- Shottky: flutuações randômicas do fluxo de corrente em um condutor
- Flicker: flutuação na condutividade do meio

• “Noise fator”

$$F = \frac{\text{Actual noise power at the output of the two-port}}{\text{Expected noise power at the output of the ideal (noiseless) two-port}}$$

$$= \frac{\text{Signal-to-noise ratio at the input}}{\text{Signal-to-noise ratio at the output}}$$

– Figura de ruído

$$NF = 10 \log(F)$$

– Efeitos ligação do LNA:

