

Amplificadores de Micro-ondas

PSI3581 – Circuitos de Micro-ondas

Profa. Dra. Fatima Salete Correra



Amplificadores de micro-ondas

SUMÁRIO

- ▶ Introdução
- ▶ Definições gerais de ganho de potência de redes de dois acessos
- ▶ Discussão de estabilidade de redes
 - Critérios de estabilidade
 - Círculos de estabilidade
- ▶ Projeto de amplificadores visando máximo ganho
- ▶ Projeto de amplificadores de ganho com valor especificado
- ▶ Projeto de amplificadores de baixo ruído

- ▶ Bibliografia – *Microwave Engineering*, de David M. Pozar

Amplificadores de micro-ondas

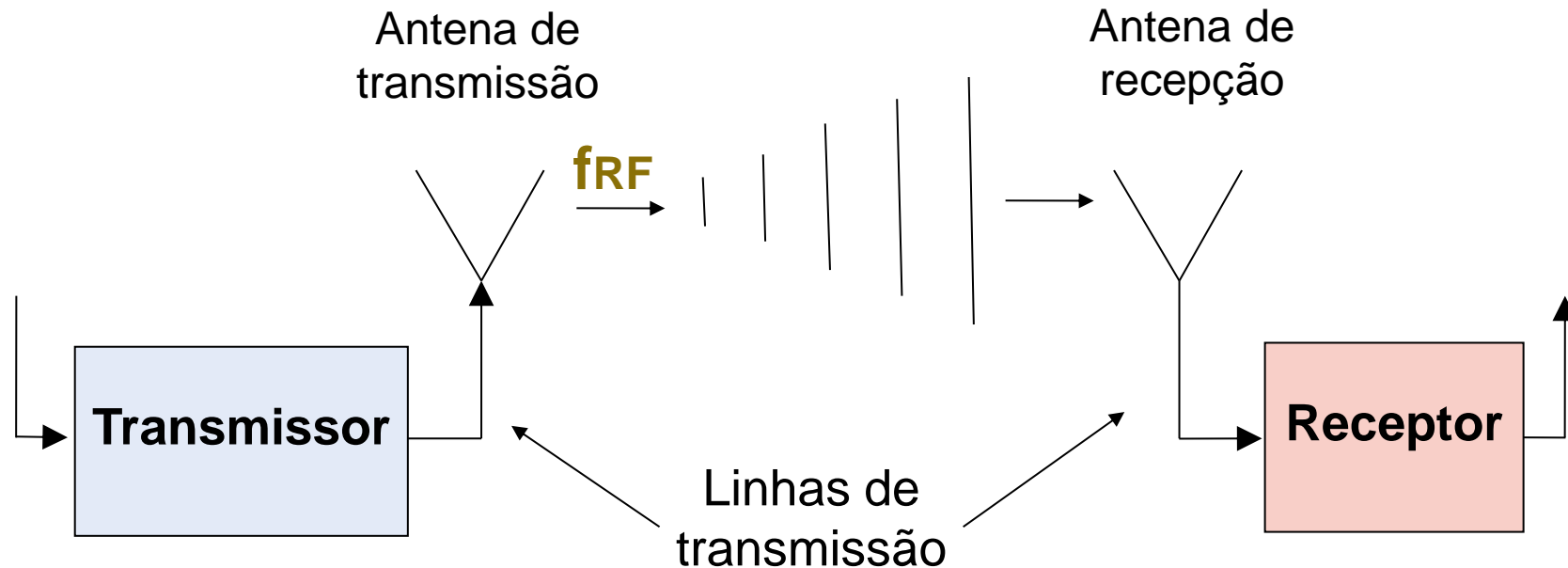
INTRODUÇÃO

- ▶ Aplicação de amplificadores em sistemas de micro-ondas
 - Transmissores
 - Receptores
- ▶ Tipos de amplificadores
- ▶ Diagrama de blocos do amplificador
- ▶ Condições de projeto de amplificadores

Amplificadores de micro-ondas

Aplicação de amplificadores em sistemas de micro-ondas

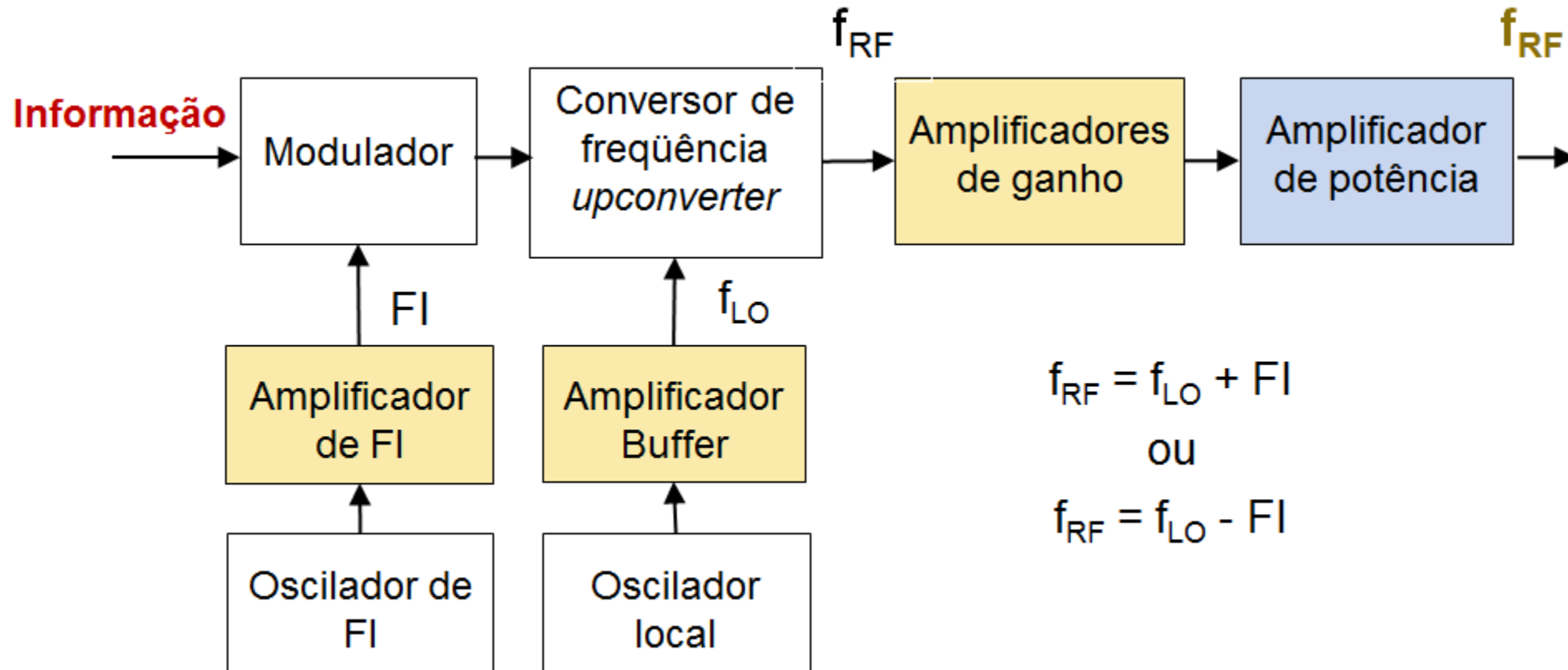
- ▶ Diagrama básico de sistema de comunicação sem fio



Amplificadores de micro-ondas

Aplicação de amplificadores em sistemas de micro-ondas

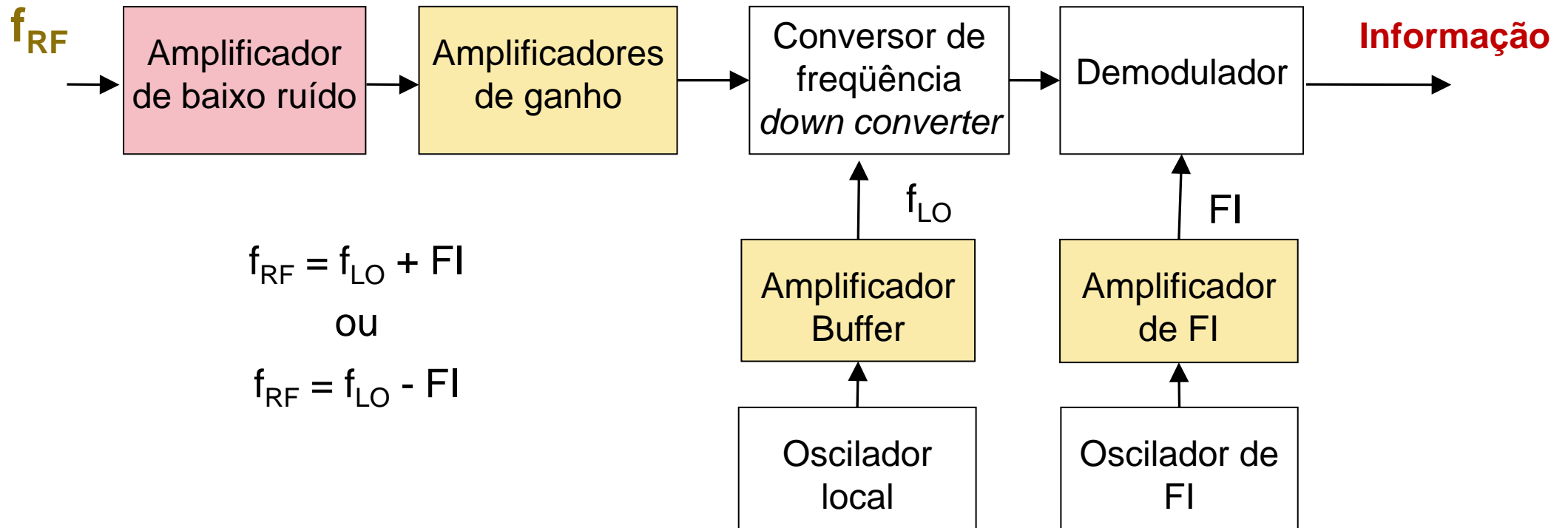
- ▶ Diagrama do transmissor



Amplificadores de micro-ondas

Aplicação de amplificadores em sistemas de micro-ondas

- ▶ Diagrama do receptor



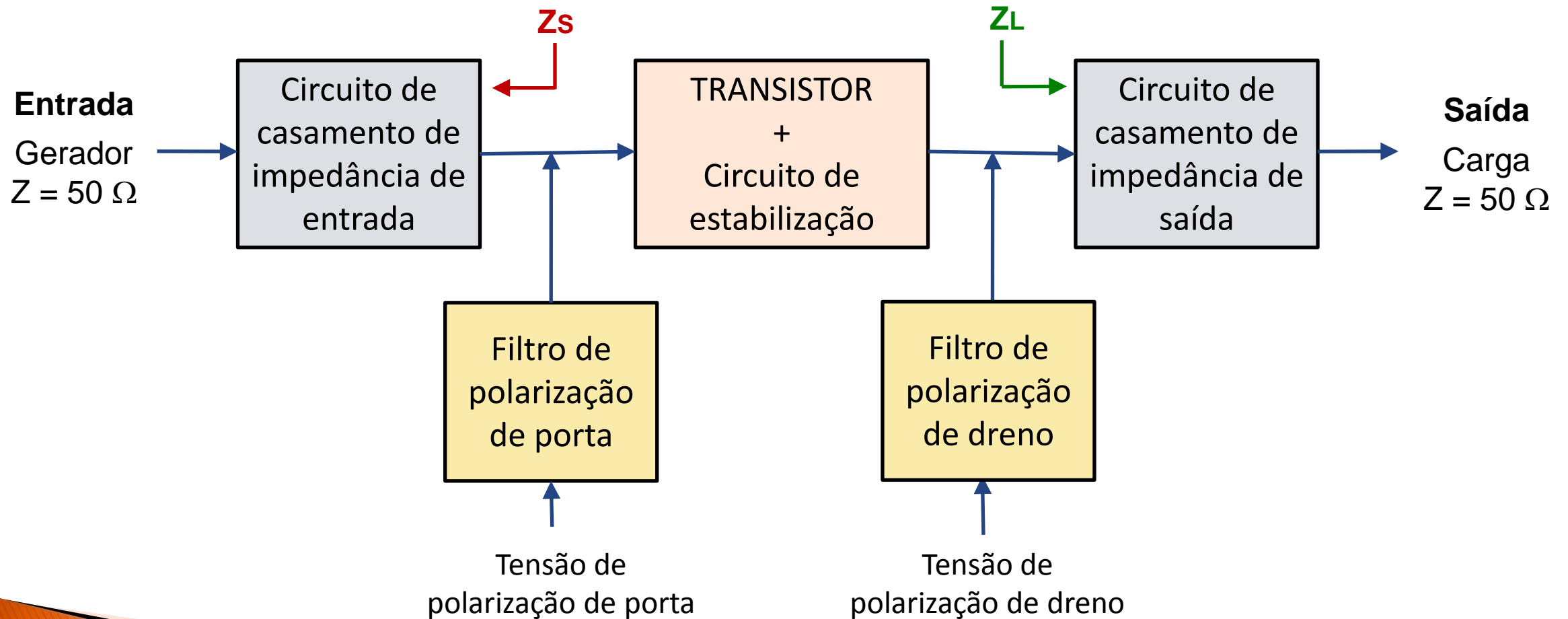
Amplificadores de micro-ondas

Tipos de amplificadores

	GANHO	FIGURA DE RUÍDO	POTÊNCIA DE SAÍDA
Amplificador de ganho	MÁXIMO	MÉDIO	MÉDIO
Amplificador de baixo ruído	MÉDIO	MÍNIMA	MÉDIO
Amplificador de potência	MÉDIO	MÉDIO	MÁXIMA

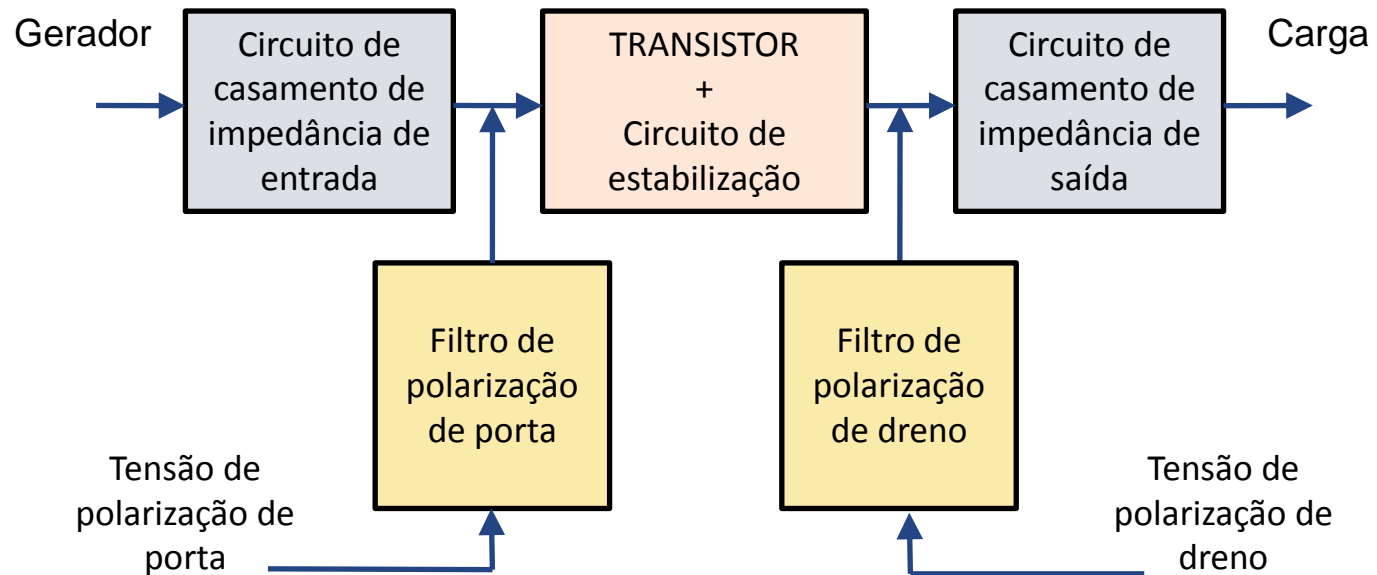
Amplificadores de micro-ondas

Diagrama de blocos do amplificador



Amplificadores de micro-ondas

Diagrama de blocos do amplificador



Circuito de estabilização

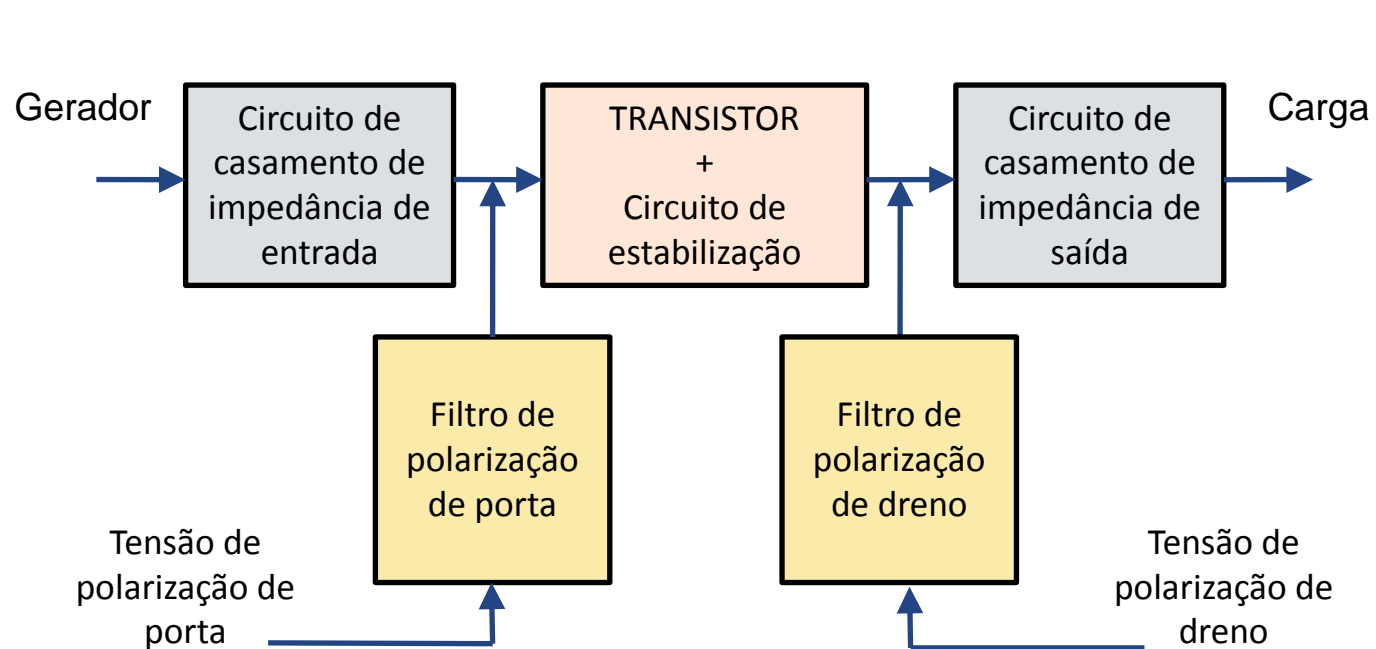
- Usado com transistores condicionalmente estáveis
- Evitam oscilações indesejadas

Filtros de polarização

- Filtros passa-baixa
- Evitam vazamento do sinal de micro-ondas para os circuitos de polarização DC

Amplificadores de micro-ondas

Diagrama de blocos do amplificador



Circuito de casamento de impedância de entrada

- Transforma a impedância do gerador Z_G
- Na impedância desejada na entrada do transistor

Circuito de casamento de impedância de saída

- Transforma a impedância de carga Z_L
- Na impedância desejada na saída do transistor

Amplificadores de micro-ondas

Etapas de projeto

- ▶ Escolha do transistor
 - ▶ Depende das especificações do amplificador
 - Frequência de operação – Ganho
 - Figura de ruído – Potência de saída
- ▶ Análise de estabilidade do transistor
 - ▶ Estabilização do transistor para evitar oscilação, quando necessário
- ▶ Projeto das redes de casamento de entrada e saída
- ▶ Projeto de filtros de polarização
- ▶ Simulação e otimização do amplificador

Amplificadores de micro-ondas

Condições de projeto dos circuitos de casamento de impedância

- ▶ Dependem do tipo de amplificador

	CASAMENTO DE IMPEDÂNCIA	
	Entrada	Saída
Amplificador de ganho	Conjugado com a impedância do gerador	Conjugado com a impedância da carga
Amplificador de baixo ruído	Impedância de Mínimo Ruído	Conjugado com a impedância da carga
Amplificador de potência	Conjugado com a impedância do gerador	Impedância de Máxima Potência

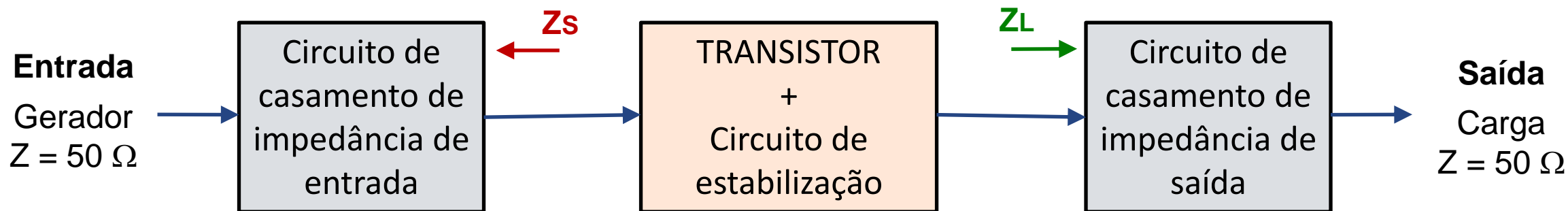
Amplificadores de micro-ondas

Definições gerais de ganho de potência de redes de dois acessos

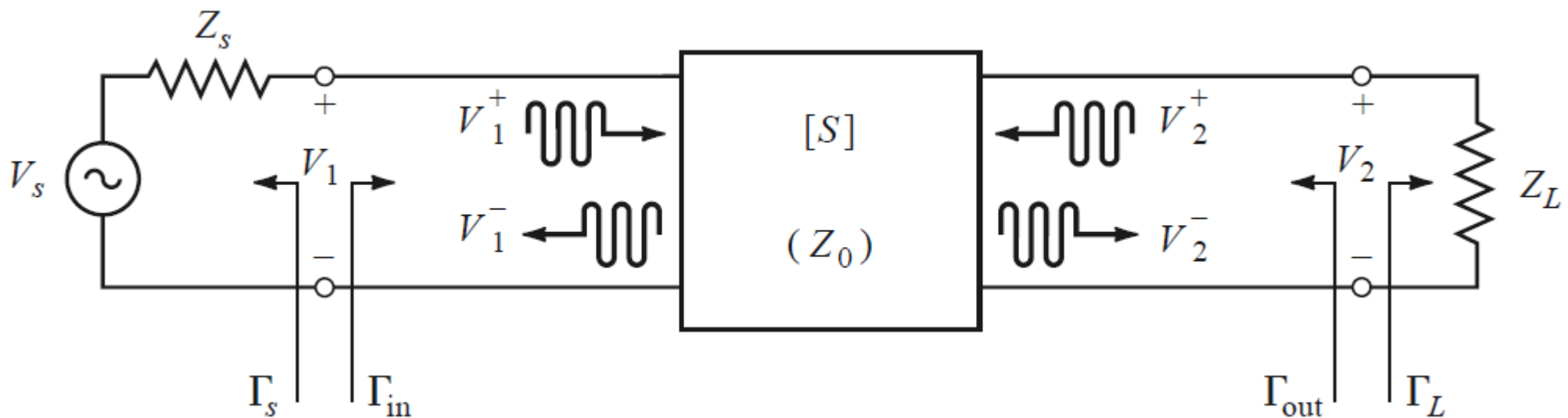
- ▶ Ganho de potência
- ▶ Ganho de potência disponível
- ▶ Ganho de transdução

Ganho de potência de redes de dois acessos

- ▶ Diagrama de blocos do amplificador

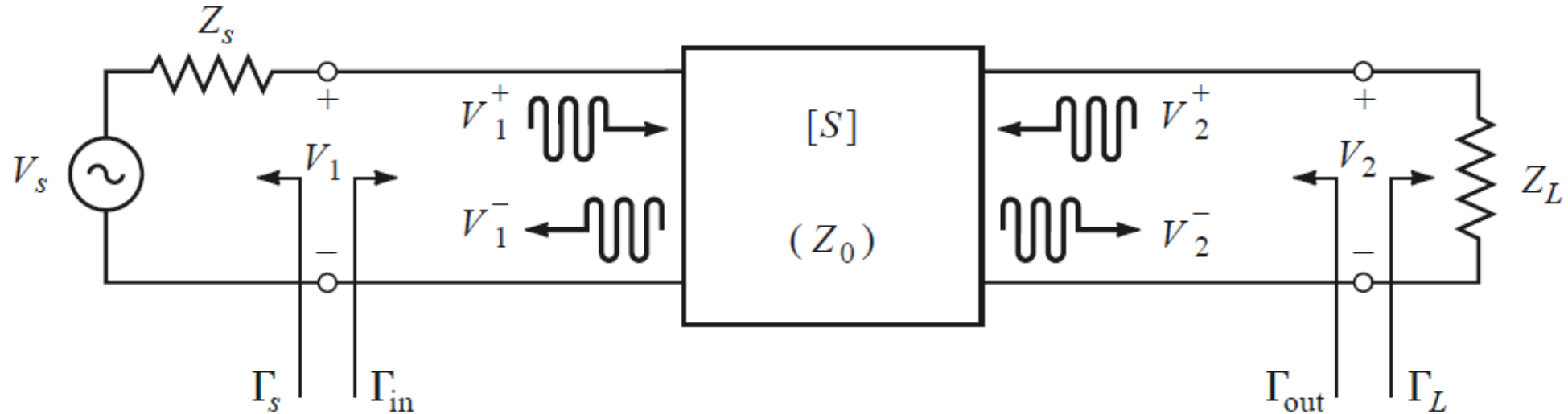


- ▶ Rede de duas portas com impedâncias de fonte e carga arbitrárias



Ganho de potência de redes de dois acessos

- ▶ Rede de duas portas com impedâncias de fonte e carga arbitrárias



Fonte (gerador)

- Impedância Z_S

$$\Gamma_S = \frac{Z_S - Z_0}{Z_S + Z_0}$$

Representação da Rede (transistor)

- Matriz $S \rightarrow Z_0$

$$\begin{bmatrix} S_{11} & S_{21} \\ S_{12} & S_{22} \end{bmatrix}$$

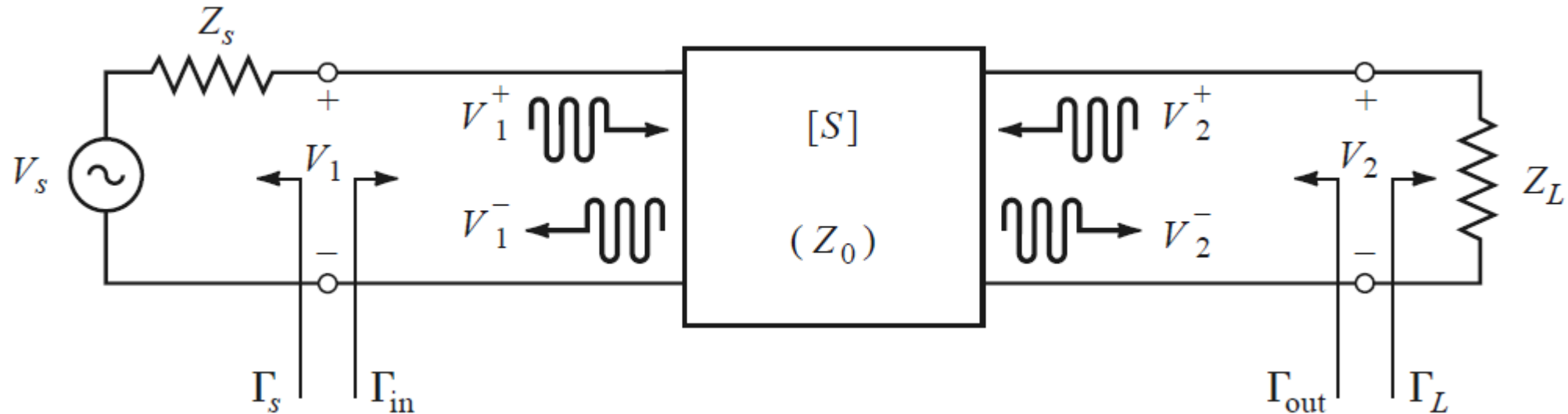
Carga

- Impedância Z_L

$$\Gamma_L = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$$

Ganho de potência de redes de dois acessos

- ▶ Rede de duas portas com impedâncias de fonte e carga arbitrárias



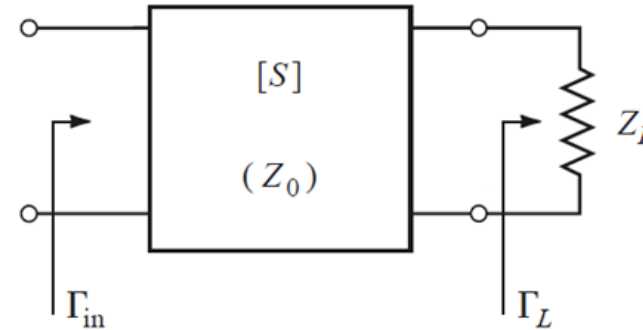
Impedâncias e coeficientes de reflexão dos acessos da rede

$$\text{Entrada} \rightarrow Z_{in} \rightarrow \Gamma_{in} = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0}$$

$$\text{Saída} \rightarrow Z_{out} \rightarrow \Gamma_{out} = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0}$$

Ganho de potência de redes de dois acessos

Z_{in} – Impedância de entrada da rede, com saída terminada pela impedância Z_L genérica

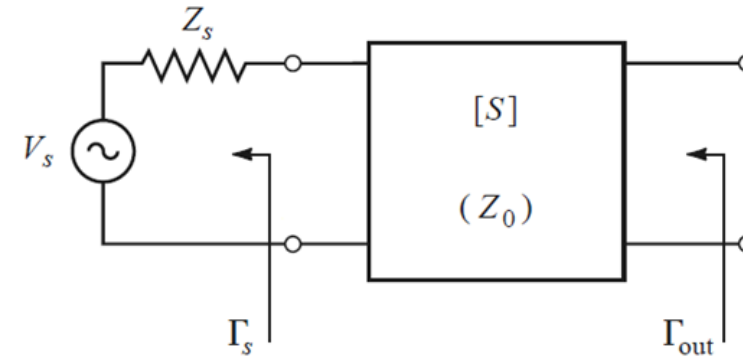


$$\Gamma_{in} = S_{11} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_L}{1 - S_{11}\Gamma_L} = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0}$$

- ▶ Z_{in} é função: Matriz S da rede $\rightarrow S_{11}, S_{21}, S_{12}, S_{22}$ (para $Z_s = Z_L = Z_0$)
Impedância de carga $Z_L \rightarrow$ coeficiente de reflexão Γ_L
- ▶ Quando $Z_L = Z_0 \rightarrow \Gamma_L = 0 \rightarrow \Gamma_{in} = S_{11}$

Ganho de potência de redes de dois acessos

Z_{out} – Impedância de saída da rede, com saída terminada pela impedância Z_s genérica



$$\Gamma_{out} = S_{22} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_s}{1 - S_{22}\Gamma_s} = \frac{Z_{out} - Z_0}{Z_{out} + Z_0}$$

- ▶ Z_{out} é função: Matriz S da rede $\rightarrow S_{11}, S_{21}, S_{12}, S_{22}$ (para $Z_s = Z_L = Z_0$)
Impedância de carga $Z_s \rightarrow$ coeficiente de reflexão Γ_s
- ▶ Quando $Z_s = Z_0 \rightarrow \Gamma_s = 0 \rightarrow \Gamma_{out} = S_{22}$

Definições de ganho de potência

Ganho de Potência

$$G = \frac{P_L}{P_{in}}$$

Ganho de Potência

Disponível

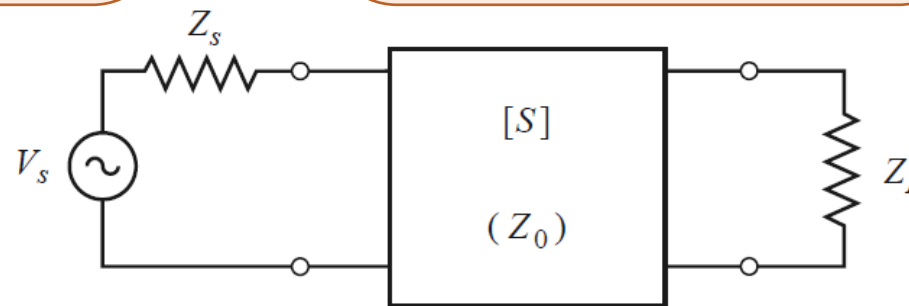
$$G_A = \frac{P_{avn}}{P_{avs}}$$

Ganho de Potência

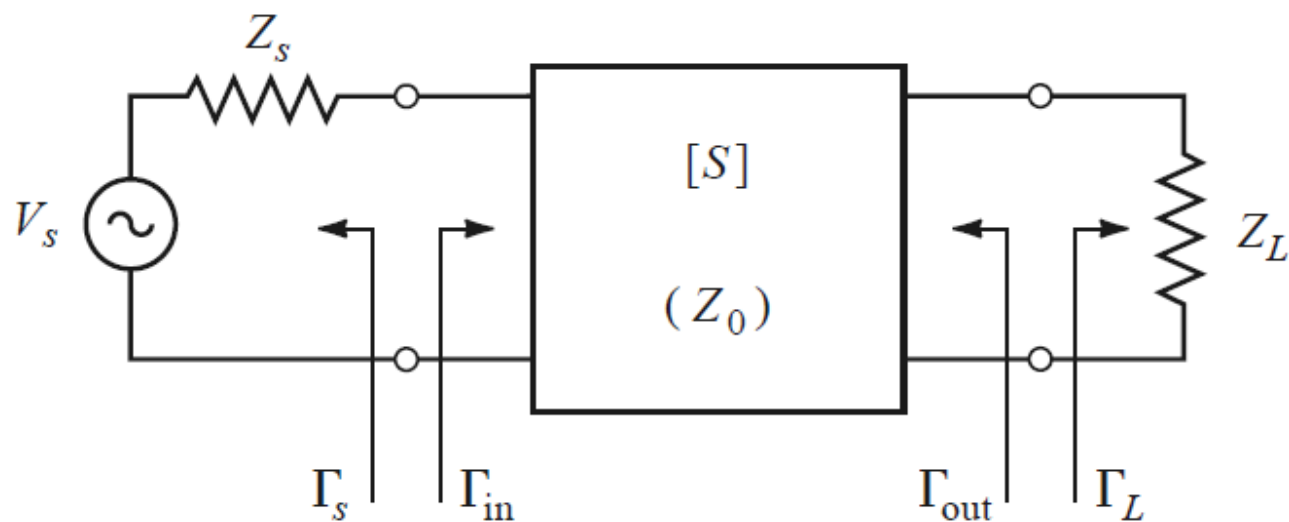
de Transdução

$$G_T = \frac{P_L}{P_{avs}}$$

- P_L potência entre a carga Z_L
- P_{in} potência entregue na entrada do quadripolo
- P_{avs} potência disponível na fonte, para uma carga conjugadamente casada
- P_{avn} potência disponível na saída da rede para uma carga conjugadamente casada



Definições de ganho de potência



Ganho de Potência

$$G = \frac{P_L}{P_{in}} = \frac{|S_{21}|^2(1 - |\Gamma_L|^2)}{(1 - |\Gamma_{in}|^2)|1 - S_{22}\Gamma_L|^2}$$

Ganho de Potência Disponível

$$G_A = \frac{P_{avn}}{P_{avs}} = \frac{|S_{21}|^2(1 - |\Gamma_S|^2)}{|1 - S_{11}\Gamma_S|^2(1 - |\Gamma_{out}|^2)}$$

Ganho de Potência de Transdução

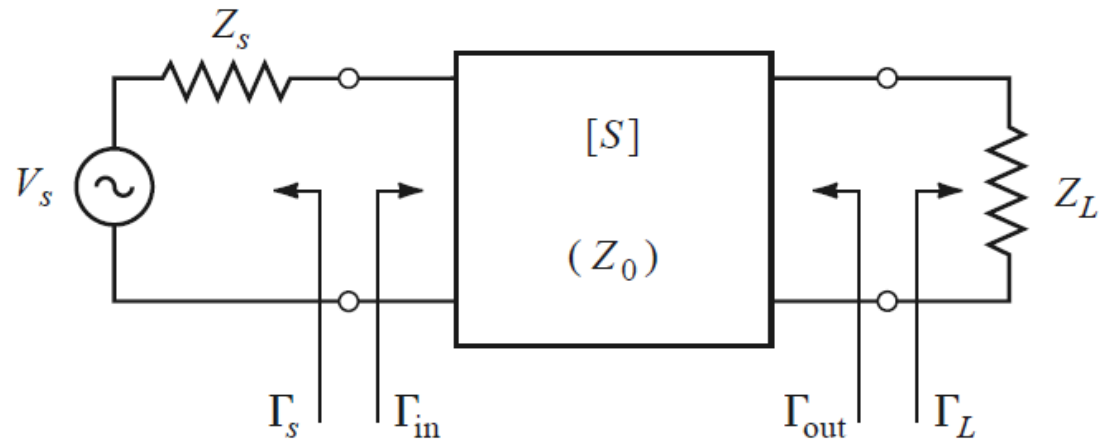
$$G_T = \frac{P_L}{P_{avs}} = \frac{|S_{21}|^2(1 - |\Gamma_S|^2)(1 - |\Gamma_L|^2)}{|1 - \Gamma_S\Gamma_{in}|^2|1 - S_{22}\Gamma_L|^2}$$

Ganho de Potência de Transdução

- ▶ Ganho de potência mais usual $\rightarrow G_T$
 - ▶ Ganho de Potência de Transdução
 - ▶ Relaciona parâmetros práticos de interesse
 - ▶ Potência recebida pela carga conectada à saída do amplificador
 - ▶ Potência que o gerador entregaria a uma carga casada
 - ▶ Potência nominal apresentada no painel do gerador
 - ▶ Valor medido por um medidor de potência de micro-ondas

$$G_T = \frac{P_L}{P_{avs}} = \frac{|S_{21}|^2 (1 - |\Gamma_S|^2) (1 - |\Gamma_L|^2)}{|1 - \Gamma_S \Gamma_{in}|^2 |1 - S_{22} \Gamma_L|^2}$$

Ganho de Potência de Transdução



$$G_T = \frac{|S_{21}|^2 (1 - |\Gamma_S|^2) (1 - |\Gamma_L|^2)}{|1 - \Gamma_S \Gamma_{in}|^2 |1 - S_{22} \Gamma_L|^2}$$

Quando ambas as portas estão terminadas em Z_0

$$Z_S = Z_0 \rightarrow \Gamma_S = \frac{Z_S - Z_0}{Z_S + Z_0} = 0$$

$$Z_L = Z_0 \rightarrow \Gamma_L = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} = 0$$

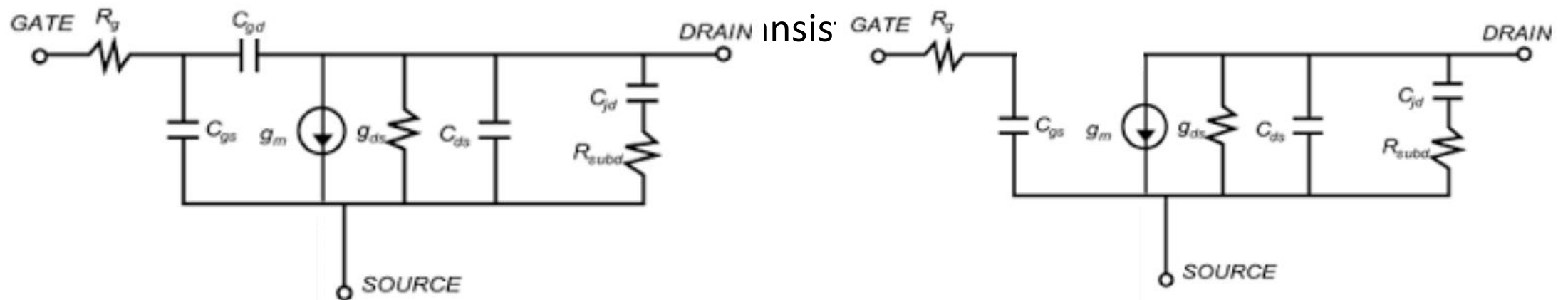


$$G_T = |S_{21}|^2$$

Ganho de Potência de Transdução Unilateral - G_{TU}

Ganho de potência de transdução unilateral

- ▶ Definido quando $S_{12} = 0$ ou suficiente pequeno para ser desprezado
- ▶ Usado quando o transistor é modelado como unilateral
 - ▶ Despreza-se efeitos de realimentação internos ao transistor
 - ▶ Impedância conectada á entrada do transistor na afeta sua impedância de saída



Modelo BILATERAL de transistor FET

Modelo UNILATERAL de transistor FET

Ganho de Potência de Transdução Unilateral - G_{TU}

Ganho de potência de transdução unilateral

- ▶ Ganho de potência de transdução – G_T

$$G_T = \frac{|S_{21}|^2(1 - |\Gamma_S|^2)(1 - |\Gamma_L|^2)}{|1 - \Gamma_S\Gamma_{in}|^2|1 - S_{22}\Gamma_L|^2}$$

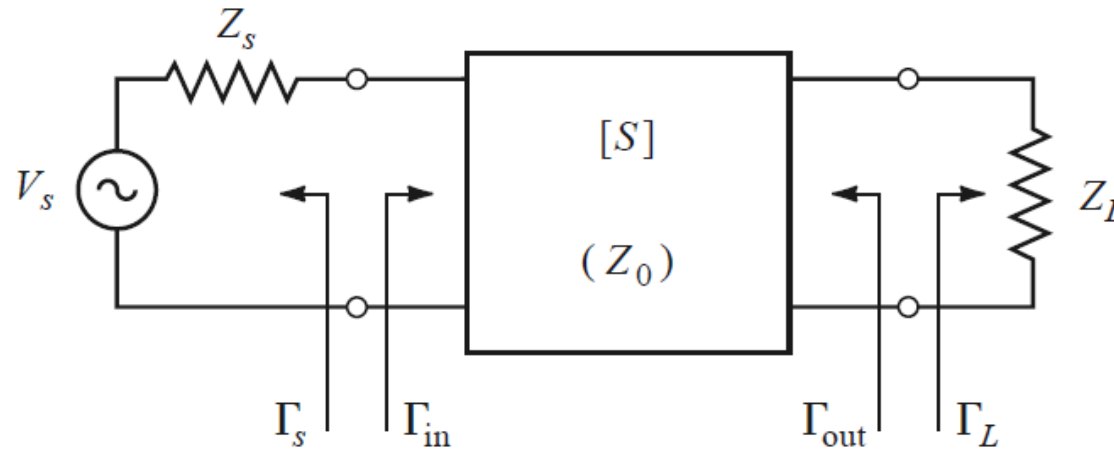
- ▶ Ganho de potência de transdução unilateral – G_{TU}

- ▶ $S_{12} = 0 \rightarrow \Gamma_{in} = S_{11}$



$$G_{TU} = \frac{|S_{21}|^2(1 - |\Gamma_S|^2)(1 - |\Gamma_L|^2)}{|1 - S_{11}\Gamma_S|^2|1 - S_{22}\Gamma_L|^2}$$

Ganho de potência máximo



Ganho máximo

- ▶ Condição de casamento conjugado de impedância simultâneo

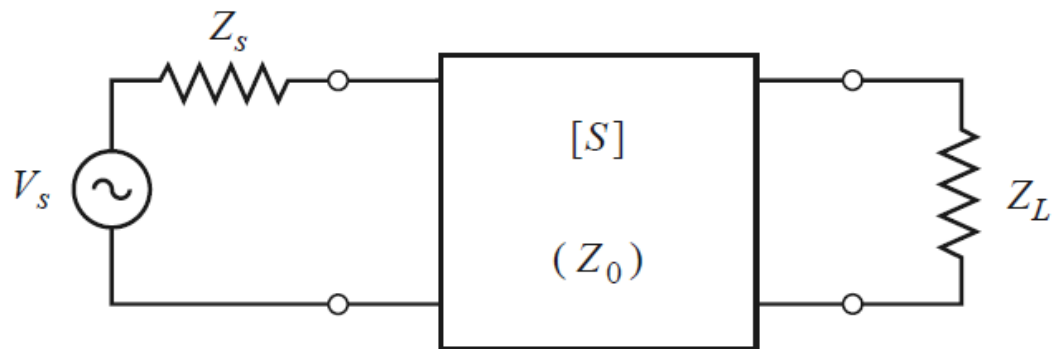
$$\Gamma_S = \Gamma_{in}^* \quad \text{e} \quad \Gamma_L = \Gamma_{out}^* \quad \Rightarrow \quad G = G_A = G_T = G_{MAX}$$

- ▶ Só é definido para frequências em que o transistor é incondicionalmente estável (caso contrário essa condição pode levar a oscilação)

Definições de ganho de potência

Exemplo - Pozar

Parâmetros S de um transistor bipolar, em 1 GHz, impedância de referência $Z_0 = 50 \Omega$



$$S_{11} = 0.38 \angle -158^\circ$$

$$S_{12} = 0.11 \angle 54^\circ$$

$$S_{21} = 3.50 \angle 80^\circ$$

$$S_{22} = 0.40 \angle -43^\circ$$

Impedâncias de fonte e carga

$$Z_s = 25 \Omega \quad \text{e} \quad Z_L = 40 \Omega$$



$$\Gamma_S = \frac{Z_s - Z_0}{Z_s + Z_0} = \frac{25 - 50}{25 + 50} = -0.333,$$

$$\Gamma_L = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} = \frac{40 - 50}{40 + 50} = -0.111.$$

Definições de ganho de potência

Coeficientes de reflexão de entrada e saída da rede

$$\left\{ \begin{array}{l} \Gamma_{\text{in}} = S_{11} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_L}{1 - S_{22}\Gamma_L} = 0.365 \angle -152^\circ, \\ \Gamma_{\text{out}} = S_{22} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_S}{1 - S_{11}\Gamma_S} = 0.545 \angle -43^\circ. \end{array} \right.$$

Ganho de Potência

$$\Rightarrow G = \frac{|S_{21}|^2 (1 - |\Gamma_L|^2)}{(1 - |\Gamma_{\text{in}}|^2) |1 - S_{22}\Gamma_L|^2} = 13.1$$

Ganho de Potência Disponível

$$\Rightarrow G_A = \frac{|S_{21}|^2 (1 - |\Gamma_S|^2)}{|1 - S_{11}\Gamma_S|^2 (1 - |\Gamma_{\text{out}}|^2)} = 19.8$$

Ganho de Potência de Transdução

$$\Rightarrow G_T = \frac{|S_{21}|^2 (1 - |\Gamma_S|^2)(1 - |\Gamma_L|^2)}{|1 - \Gamma_S\Gamma_{\text{in}}|^2 |1 - S_{22}\Gamma_L|^2} = 12.6$$

Estabilidade do transistor

Estabilidade de uma rede de duas portas

- Rede de dois acessos



- A rede é instável e pode oscilar se $\text{Re}(Z_{in}) < 0 \rightarrow |\Gamma_{in}| > 1$ ou $\text{Re}(Z_{out}) < 0 \rightarrow |\Gamma_{out}| > 1$

Z_{in} depende de: **Matriz S** e de Z_L $|\Gamma_{in}| = \left| S_{11} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_L}{1 - S_{22}\Gamma_L} \right|$

Z_{out} depende de: **Matriz S** e de Z_S $|\Gamma_{out}| = \left| S_{22} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_S}{1 - S_{11}\Gamma_S} \right|$

Estabilidade do transistor

Estabilidade de uma rede de duas portas

Incondicionalmente estável

- A rede é incondicionalmente estável se

$$|\Gamma_{IN}| < 1 \text{ e } |\Gamma_{OUT}| < 1$$

para qualquer valor de $\text{Re}(Z_{IN}) > 0$ e $\text{Re}(Z_{OUT}) > 0$

Condicionalmente estável

- A rede é condicionalmente estável

$$|\Gamma_{IN}| > 1 \text{ e } |\Gamma_{OUT}| > 1$$

para uma faixa de valores de $\text{Re}(Z_{IN}) < 0$ e $\text{Re}(Z_{OUT}) < 0$

Estabilidade do transistor

Critérios para verificação da estabilidade da rede

Teste K e B1

- Duas condições devem ser obedecidas simultaneamente para que o transistor seja estável em uma dada frequência

- K - Fator de Estabilidade de Rollett e
$$K = \frac{1 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 + |\Delta|^2}{2|S_{12}S_{21}|} > 1$$

- B1 – Medida de estabilidade
$$B_1 = 1 + |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 - |\Delta|^2 > 0$$

sendo $\Delta = S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}$.

Estabilidade requer **K > 1** e **B1 > 0**

Estabilidade do transistor

Critérios para verificação da estabilidade da rede

Teste μ

- Distância do centro da carta de Smith até o ponto mais próximo do círculo de estabilidade de saída

$$\mu = \frac{1 - |S_{11}|^2}{|S_{22} - \Delta S_{11}^*| + |S_{12}S_{21}|} > 1$$

Teste μ_{prime}

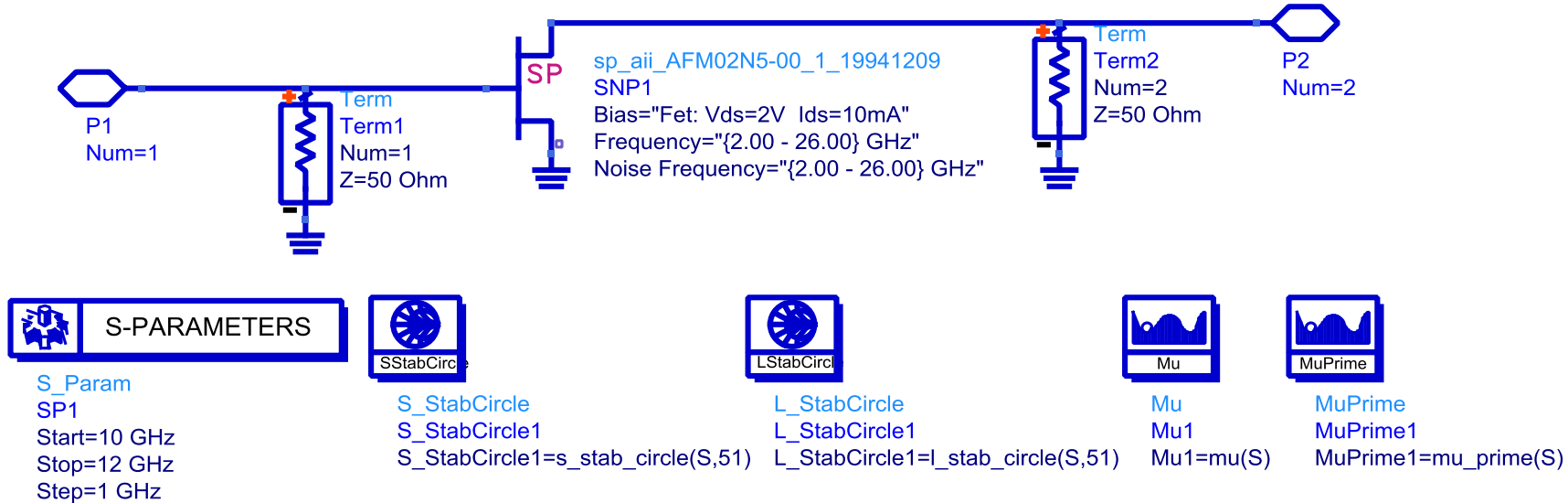
- Distância do centro da carta de Smith até o ponto mais próximo do círculo de estabilidade de entrada

$$\mu_{\text{prime}} = \frac{1 - |S_{22}|^2}{|S_{11} - \Delta S_{22}^*| + |S_{12}S_{21}|} > 1$$

sendo $\Delta = S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}$.

Estabilidade requer $\mu > 1$ ou $\mu_{\text{prime}} > 1$

Atividade com o ADS

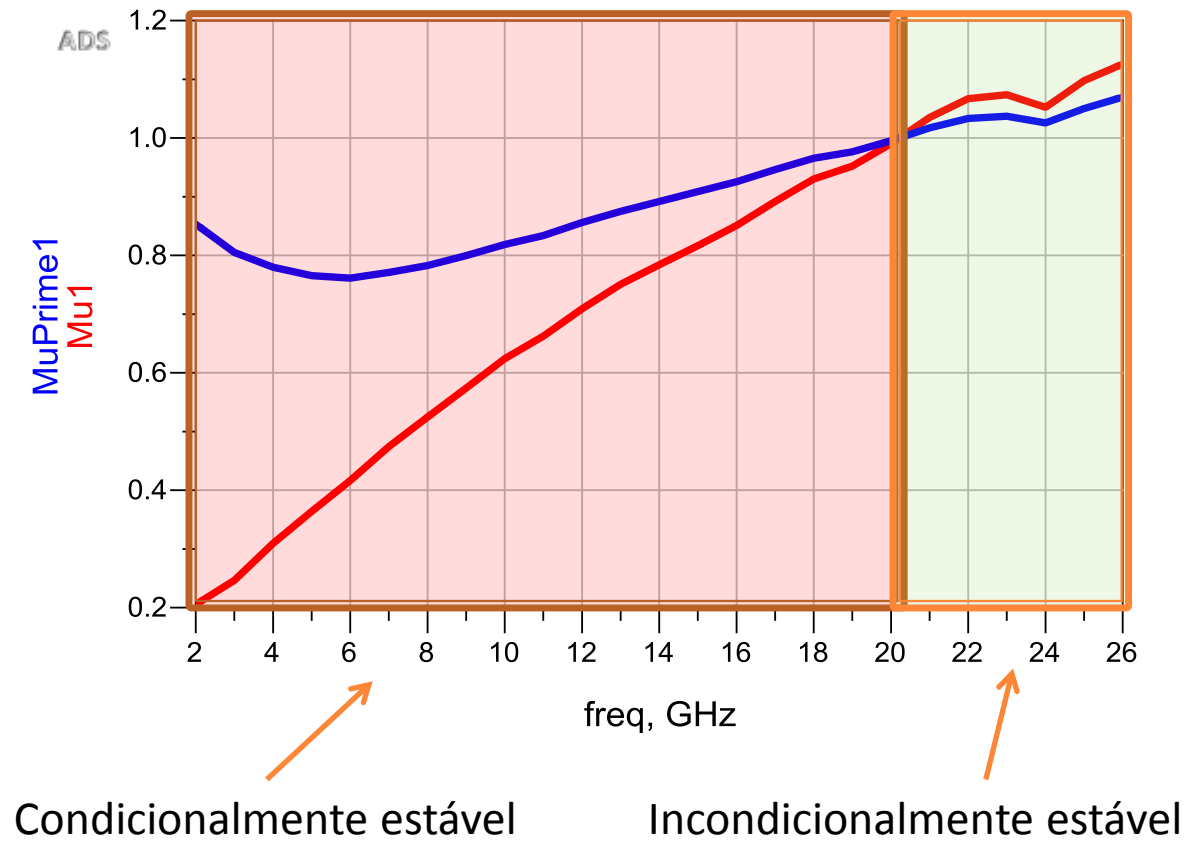


- Simular um transistor de 2 a 26 GHz
- Traçar os parâmetros de estabilidade K , Δ , μ e μ_{prime}
- Analisar a estabilidade do transistor através dos testes:

$$K > 1 \text{ e } B1 > 0 \quad \text{ou} \quad \mu > 1 \quad \text{ou} \quad \mu_{prime} > 1$$

Atividade com o ADS

$$\mu > 1 \text{ ou } \mu_{\text{prime}} > 1$$



Estabilidade do transistor

Critérios para verificação da estabilidade da rede

Círculos de estabilidade

- Mapeiam círculos sobre a carta de Smith
- Dividem a carta de Smith em regiões de cargas que podem ou não causar instabilidade

Círculos de estabilidade de entrada

- Valores de Z_S que causam

$$|\Gamma_{OUT}| \leq 1 \text{ e } |\Gamma_{OUT}| > 1$$

Círculos de estabilidade de saída

- Valores de Z_L que causam

$$|\Gamma_{IN}| \leq 1 \text{ e } |\Gamma_{IN}| > 1$$

Estabilidade do transistor

Círculos de Estabilidade

- Cálculo do círculo de estabilidade de entrada
- Impondo-se

- Obtém-se o centro C_S e o raio R_S do círculo de estabilidade das impedâncias de gerador que causam $\Gamma_{out} = 1$

$$C_S = \frac{(S_{11} - \Delta S_{22}^*)^*}{|S_{11}|^2 - |\Delta|^2}$$

$$R_S = \left| \frac{S_{12}S_{21}}{|S_{11}|^2 - |\Delta|^2} \right|$$

$$\Delta = S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}$$

Estabilidade do transistor

Círculos de Estabilidade de Saída

- Cálculo do círculo de estabilidade de saída
- Impondo-se

$$|\Gamma_{in}| = \left| S_{11} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_L}{1 - S_{22}\Gamma_L} \right| = 1$$

- Obtém-se o centro C_L e o raio R_L do círculo de estabilidade das cargas que causam $\Gamma_{in} = 1$

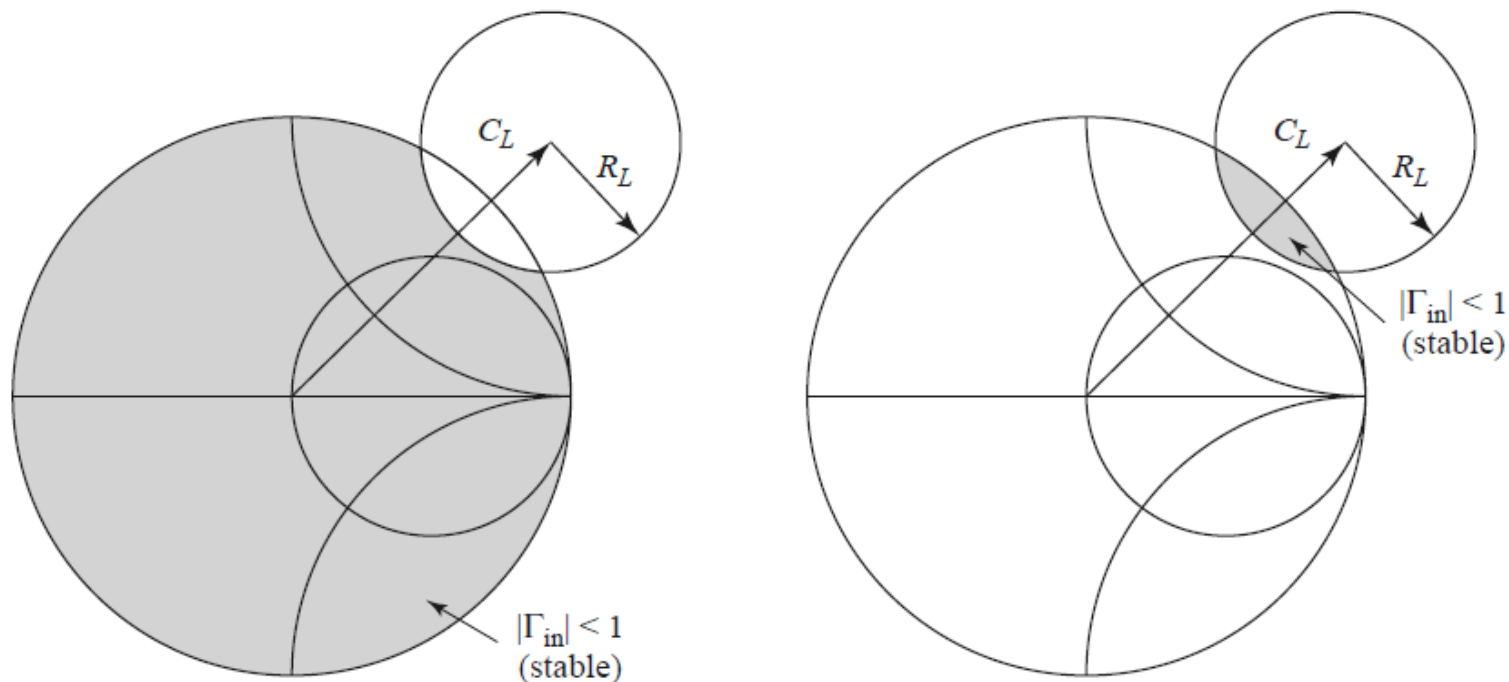
$$C_L = \frac{(S_{22} - \Delta S_{11}^*)^*}{|S_{22}|^2 - |\Delta|^2}$$

$$R_L = \left| \frac{S_{12}S_{21}}{|S_{22}|^2 - |\Delta|^2} \right|$$

$$\Delta = S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}$$

Estabilidade do transistor

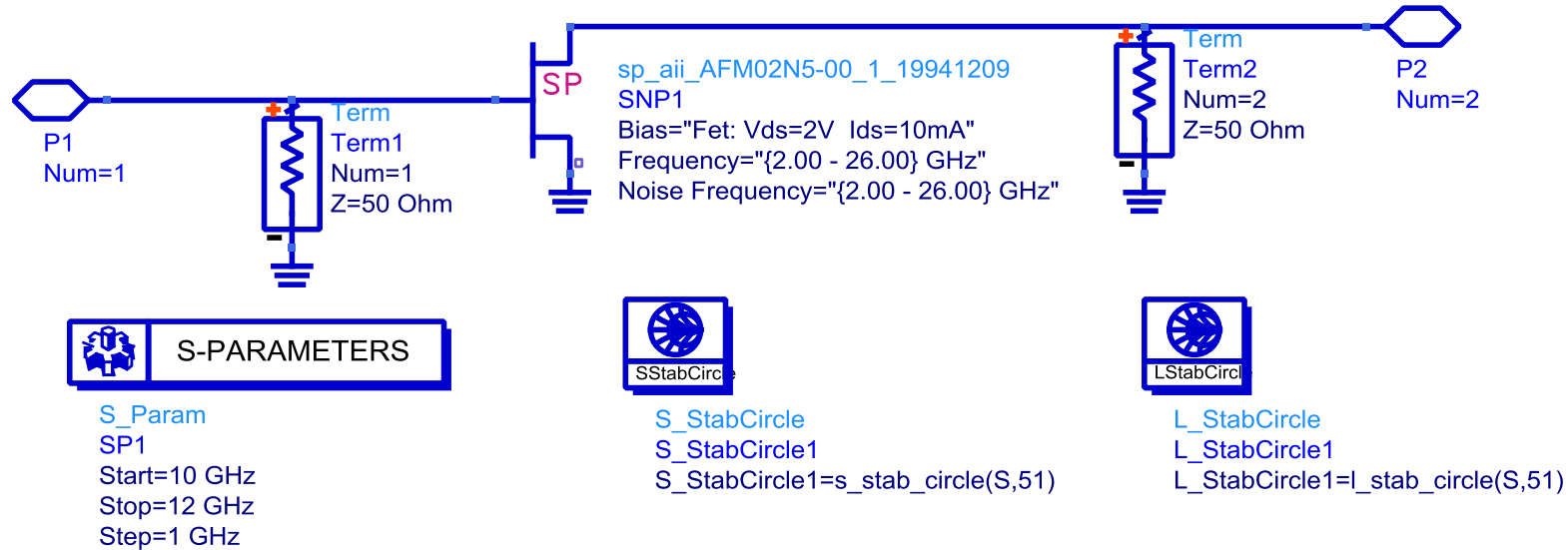
Exemplos de Círculos de Estabilidade de Saída



- É necessário testar se as impedâncias que causam instabilidade estão fora ou dentro do círculo
- Verifica-se se $Z_L = 50 \Omega \rightarrow \Gamma_{in} < 1$ ou $\Gamma_{in} > 1$

Atividade com o ADS

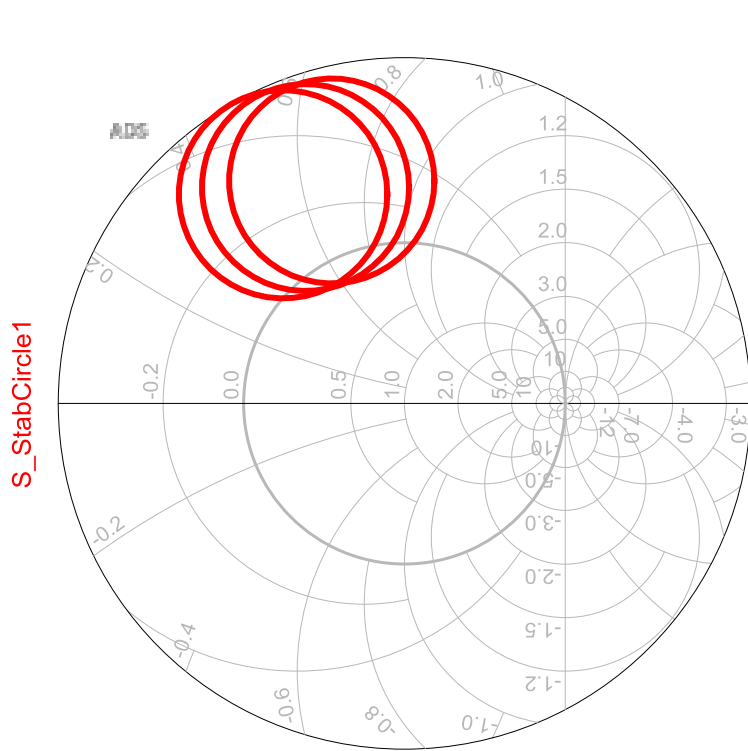
Círculos de estabilidade



- Traçar de estabilidade de entrada e de saída entre 10 e 12 GHz
- Analisar quais impedâncias podem causar instabilidade
- O transistor é incondicionalmente estável?
- Repita para frequências entre 2 e 26 GHz

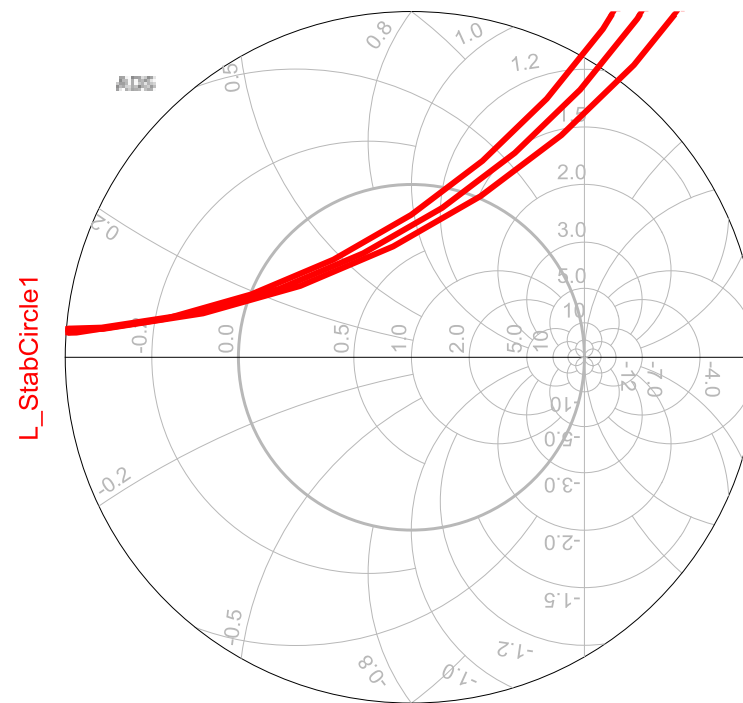
Atividade com o ADS

Círculos de estabilidade



indep(S_StabCircle1) (0.000 to 51.000)

Círculos de estabilidade de entrada
(Efeito de Z_S, impedância da fonte)



indep(L_StabCircle1) (0.000 to 51.000)

Círculos de estabilidade de saída
(Efeito de Z_L, impedância da carga)

Estabilização do Transistor

- No projeto do amplificador, deve-se analisar a estabilidade do transistor
 - Na banda de frequência do amplificador
 - Em toda a banda de operação do transistor
 - Objetivo → evitar oscilações “in band” e “out band”
- Se o transistor for incondicionalmente estável
 - Projeto das redes de casamento de impedância
- Se o transistor é condicionalmente estável
 - Estabilização do transistor
 - Projeto das redes de casamento de impedância

Estabilização do Transistor

Circuitos de estabilização do transistor

- Auxiliam na estabilidade, mas afetam parâmetros do transistor
 - Ganho
 - Figura de Ruído
 - Potência de saída
 - Linearidade
- Solução de compromisso
 - Estabilidade x desempenho do amplificador
- Podem estabilizar o transistor
 - Em banda larga de frequência
 - Em frequências abaixo da banda do amplificador

Estabilização do Transistor

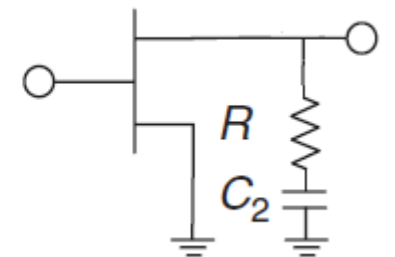
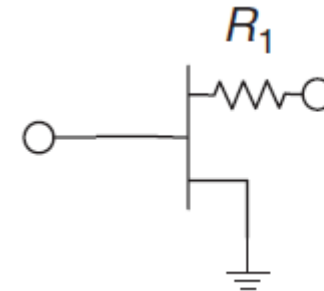
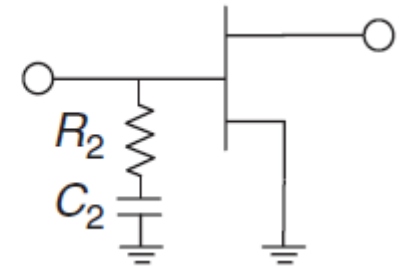
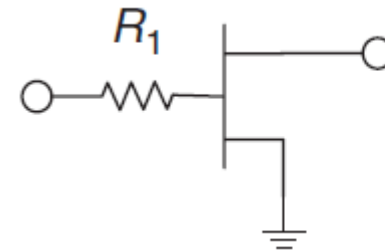
Exemplos de circuitos de estabilização

- Resistores conectados aos acessos do transistor
 - Atuam em banda larga de frequência
- Resistores com capacitores de *bypass* em paralelo
 - Estabilização do transistor em frequências abaixo da banda do amplificador
- Resistores associados a filtros de polarização
 - Estabilização do transistor em frequências abaixo da banda do amplificador

Estabilização do Transistor

Exemplos de circuitos de estabilização

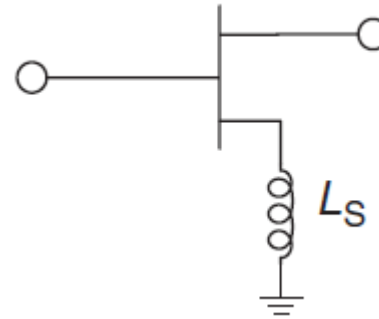
- Resistor em série ou paralelo com a **entrada do transistor**
 - Desvantagem: aumenta a Figura de Ruído
 - Aplicações: amplificadores de ganho e de potência
- Resistor em série ou paralelo com a **saída do transistor**
 - Desvantagem: reduz a potência de saída
 - Aplicações: amplificadores de ganho e de baixo ruído



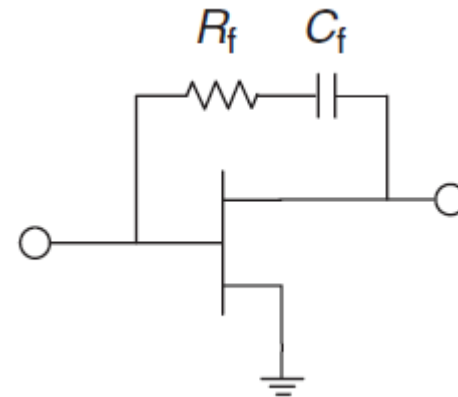
Estabilização do Transistor

Exemplos de circuitos de estabilização

- Realimentação série



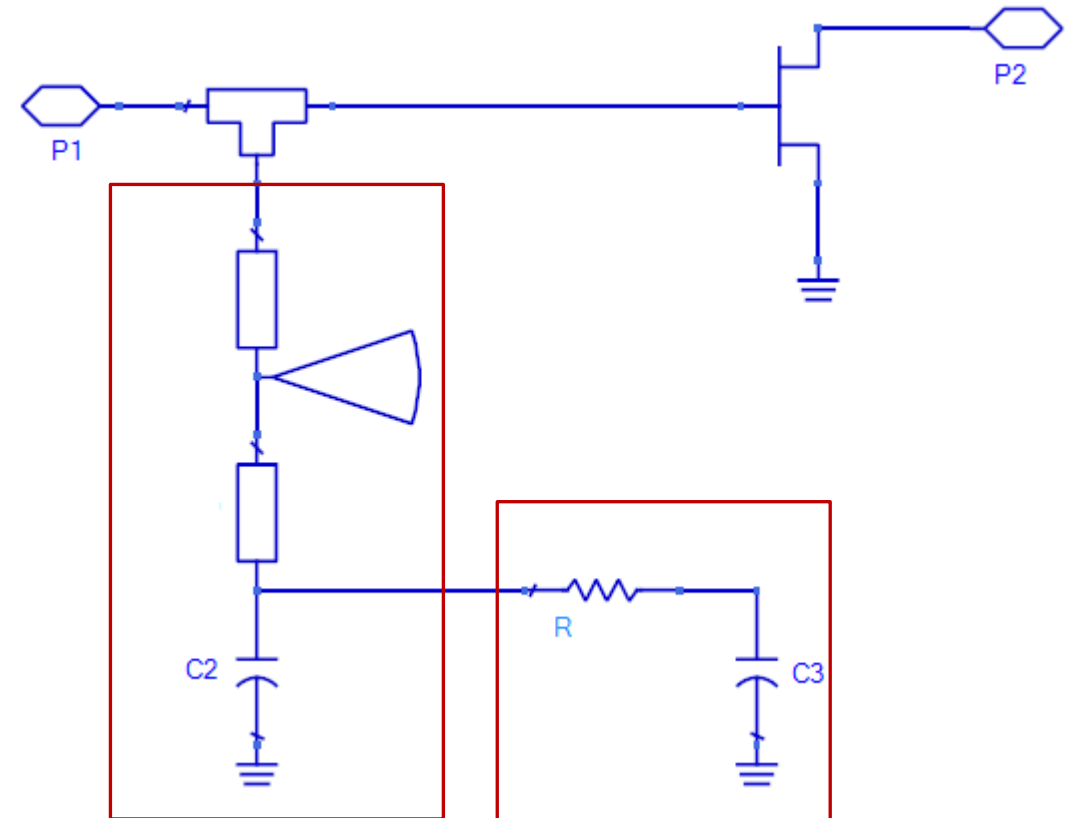
- Realimentação paralela



Estabilização do Transistor

Exemplos de circuitos de estabilização

- Estabilização do transistor via o filtro de polarização
- Usado para estabilizar o transistor em baixas frequências
- Circuito de estabilização
 - Conectado ao filtro de polarização, em paralelo com C1 que tem baixa reatância na banda de operação desejada
 - Resistor R, geralmente de $50\ \Omega$
 - Capacitor C3 com baixa reatância na faixa de frequência a ser estabilizada



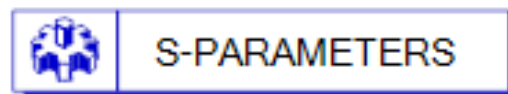
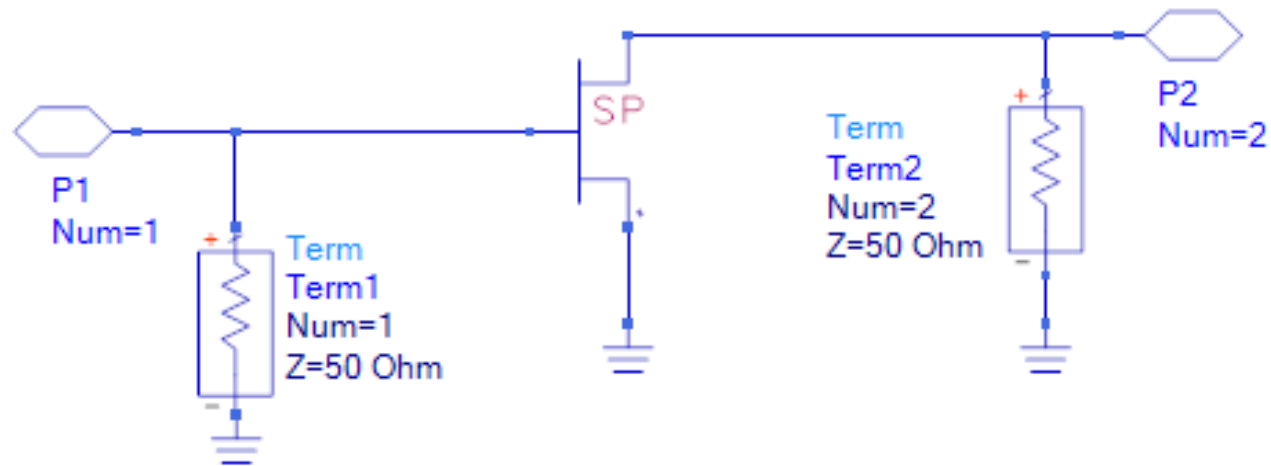
Filtro de polarização

Circuito de estabilização

Atividade com o ADS

Transistor FSX52WF da Fujitsu

- Trace os círculos de estabilidade de entrada e saída em 2 GHz



S_Param
SP1
Start=
Stop=
Step=



L_StabCircle
L_StabCircle1
L_StabCircle1=l_stab_circle(S,51)

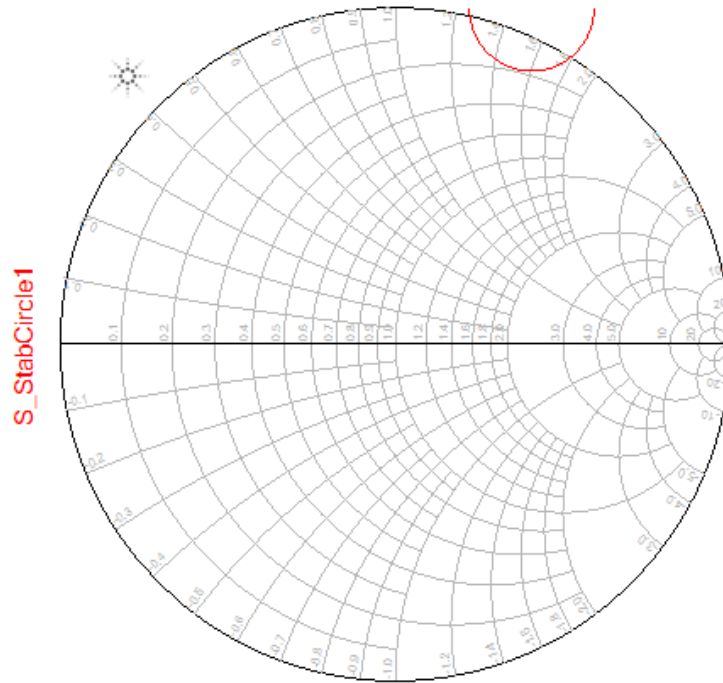


S_StabCircle
S_StabCircle1
S_StabCircle1=s_stab_circle(S,51)

Atividade com o ADS

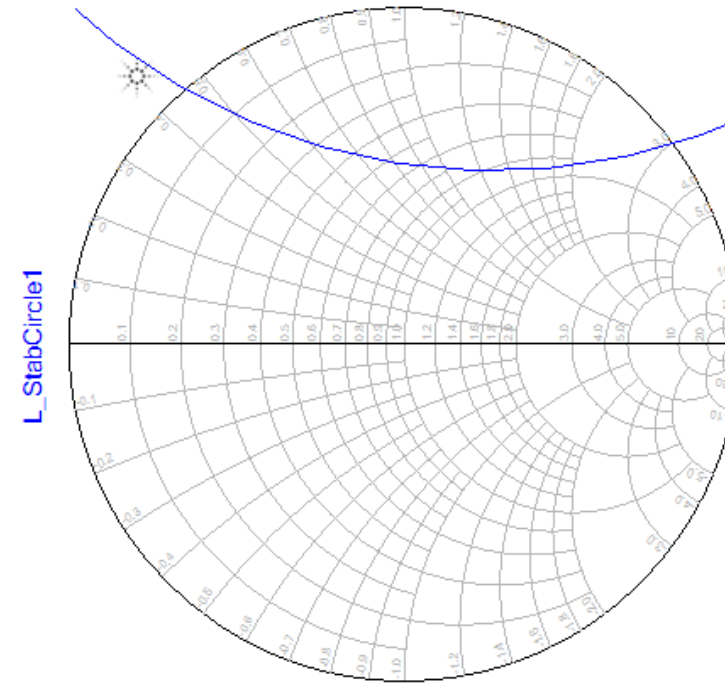
Transistor FSX52WF da Fujitsu

- Círculos de Estabilidade @2 GHz



S_StabCircle1

indep(S_StabCircle1) (0.000 to 51.000)



L_StabCircle1

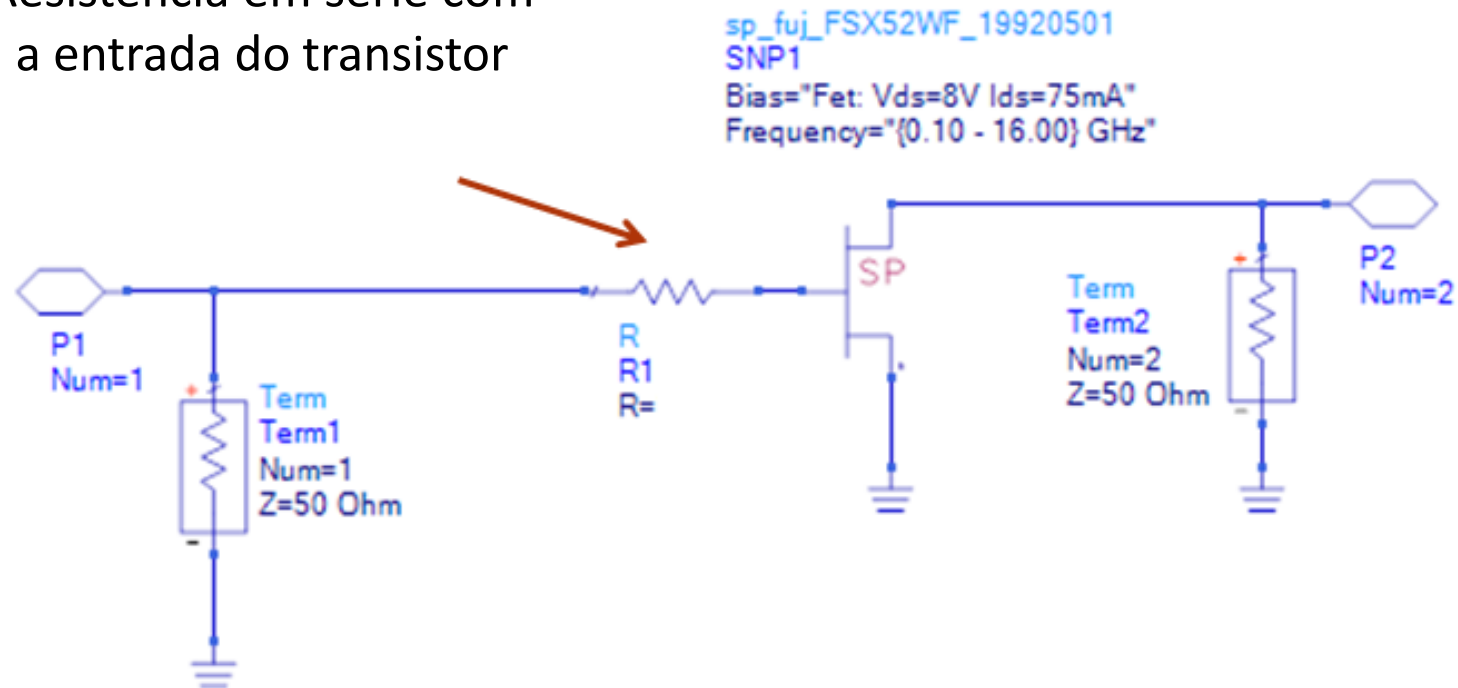
indep(L_StabCircle1) (0.000 to 51.000)

Atividade com o ADS

Transistor FSX52WF da Fujitsu

- 1) Ajuste o resistor R1 para o mínimo valor que estabilize o transistor em 2 GHz
- 2) Verifique os círculos de estabilidade de 0,5 a 16 GHz

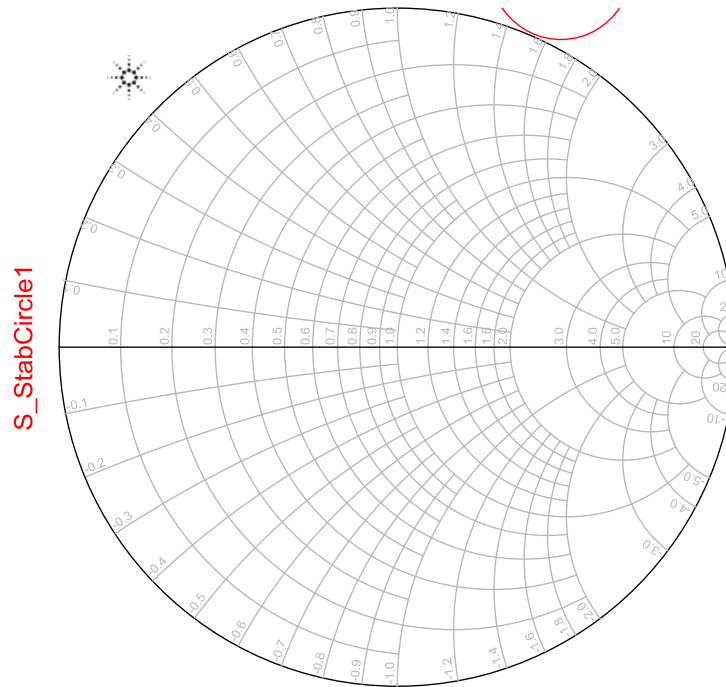
Resistência em série com a entrada do transistor



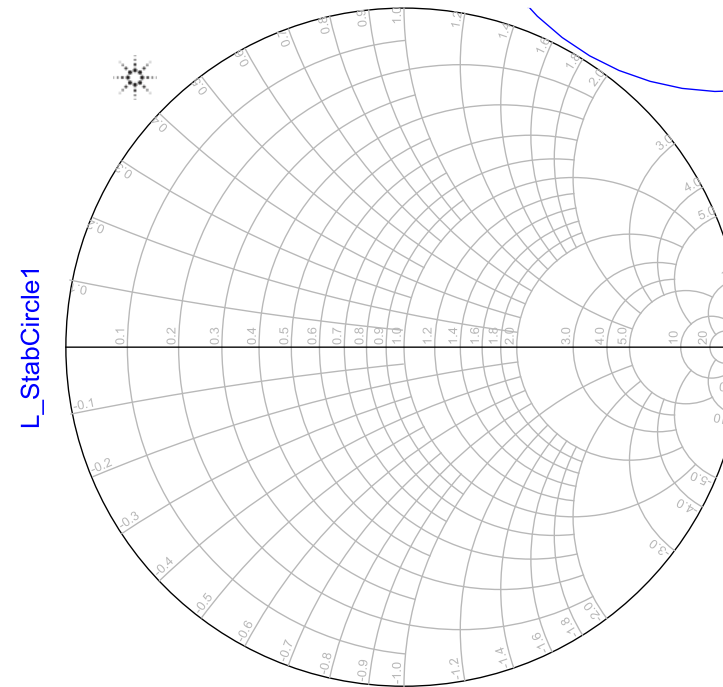
Atividade com o ADS

Transistor FSX52WF da Fujitsu

- Círculos de Estabilidade @ 2 GHz
- Resistência de $10\ \Omega$ em série com a porta do transistor



indep(S_StabCircle1) (0.000 to 51.000)

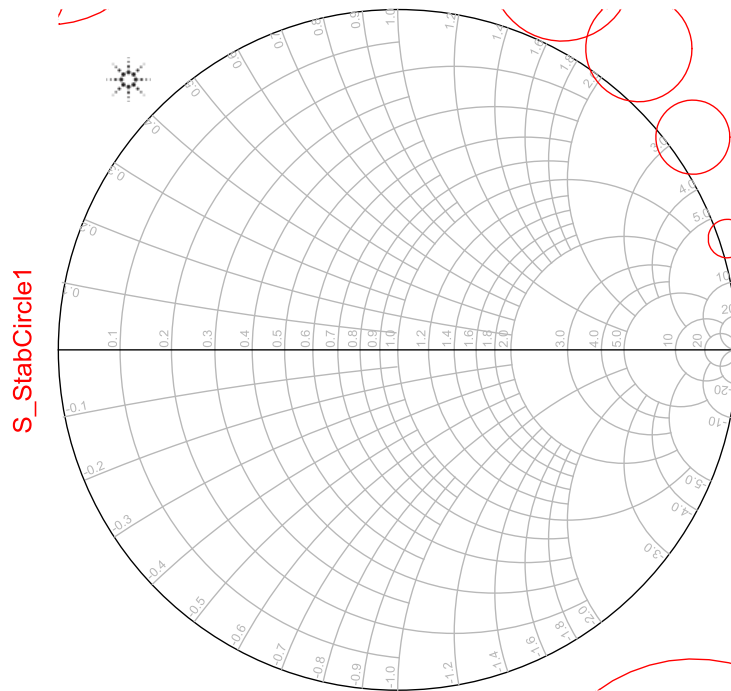


indep(L_StabCircle1) (0.000 to 51.000)

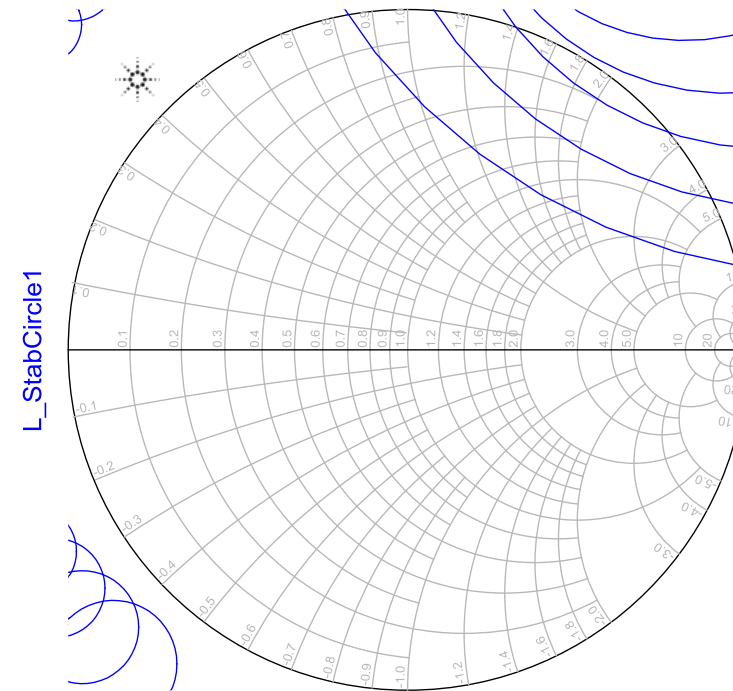
Atividade com o ADS

Transistor FSX52WF da Fujitsu

- Círculos de Estabilidade – 0,5 a 16 GHz
- Resistência em série com a porta do transistor se $10\ \Omega$



indep(S_StabCircle1) (0.000 to 51.000)



indep(L_StabCircle1) (0.000 to 51.000)

Atividade com o ADS

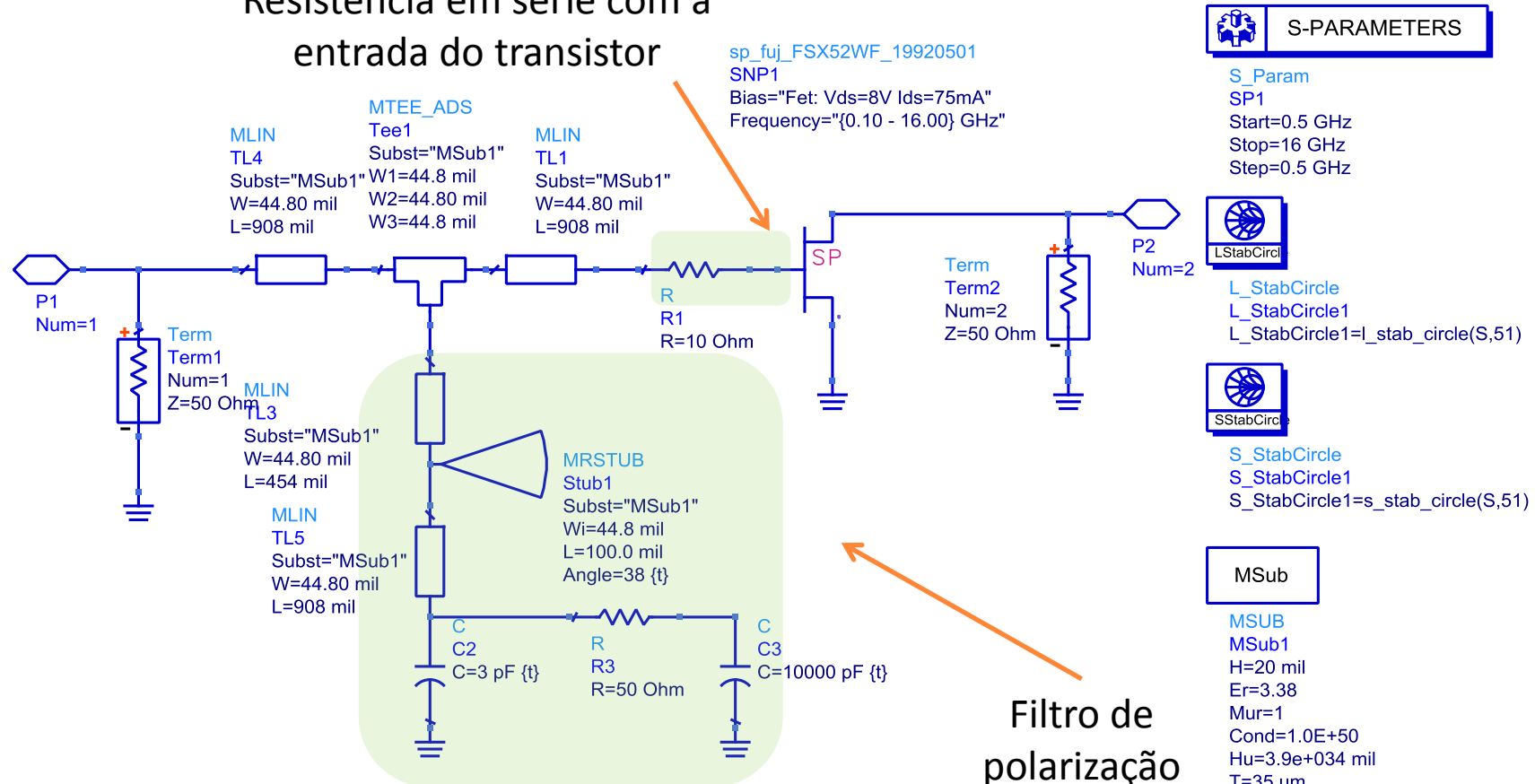
Transistor FSX52WF da Fujitsu

- Em quais frequência o transistor é condicionalmente estável usando $R1 = 10 \Omega$?
- Verifique qual o valor de $R1$ é necessário para estabilizar o transistor em banda larga.
- Verifique qual o impacto do valor de $R1$ no ganho máximo disponível do transistor
- Mantenha $R1$ em 10Ω e estabilize o transistor em baixa frequência usando o filtro de alimentação de porta
- Verifique o máximo ganho disponível do transistor nessa última condição

Atividade com o ADS

Transistor FSX52WF da Fujitsu

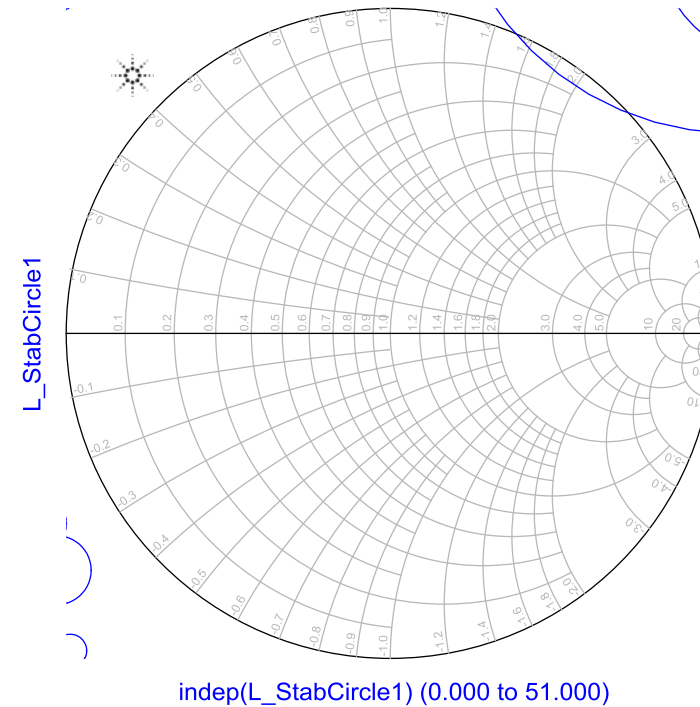
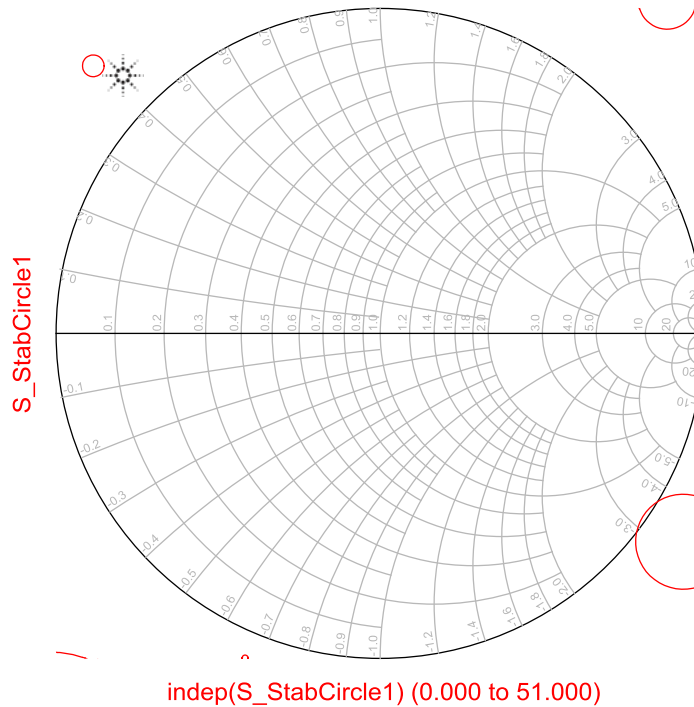
Resistância em série com a entrada do transistor



Atividade com o ADS

Transistor FSX52WF da Fujitsu

- Círculos de Estabilidade – 0,5 a 16 GHz
- Resistência em série com a portado transistor + filtro de polarização



Projeto de Amplificador de Ganho

- Características gerais do amplificador de ganho
 - Ganho máximo
 - Figura de ruído mediana
 - Potência de saída mediana
- Objetivo do projeto
 - Projetar o amplificador de modo a obter o máximo ganho do o transistor na faixa de frequência de projeto
- Amplificadores de banda estreita ($BW \approx 10\%$)
 - Muito usuais em sistemas de comunicação
 - Projeto na frequência central gera bons resultados
 - Exemplo: amplificador par abanda ISM de 2,45 GHz:
 - Faixa de operação 2,40 a 2,48 GHz → frequência de projeto: 2,44 GHz

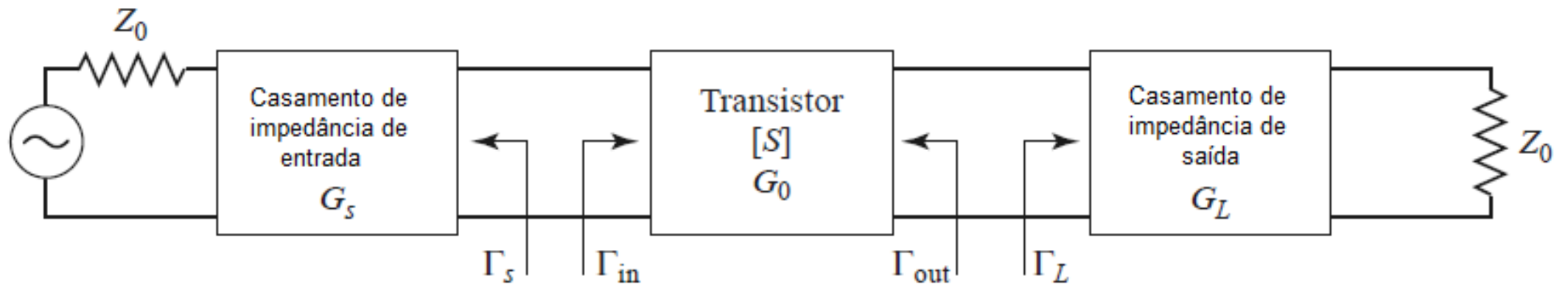
Projeto de Amplificador de Ganho

- Hipóteses de projeto
 - Transistor operando em pequenos sinais (de forma linear)
- Ponto quiescente de polarização do transistor
 - I_{DSQ} e V_{DSQ} no qual o transistor apresenta máximo ganho
- Representação do transistor em pequenos sinais
 - Parâmetros S (no ponto de polarização escolhido)
 - Modelo de circuito equivalente de pequenos sinais
- Condição de projeto para máximo ganho
 - Casamento de impedância conjugado simultâneo
 - entrada do transistor casada com a impedância do gerador
 - saída do transistor casada com a impedância de carga

Projeto de Amplificador de Ganho

Casamento conjugado de impedância

- **Objetivo**
 - Maximizar a transferência de potência do gerador para o transistor
 - Maximizar a transferência de potência do transistor para a carga



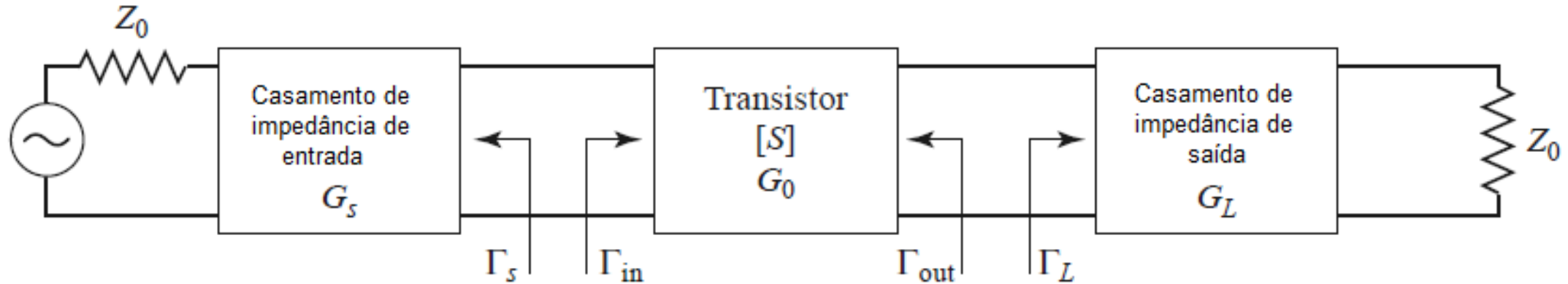
- Casamento de impedância conjugado simultâneo

$$\Gamma_S = \Gamma_{in}^* \quad \text{e} \quad \Gamma_L = \Gamma_{out}^*$$

$$Z_S = Z_{in}^* \quad \text{e} \quad Z_L = Z_{out}^*$$

Projeto de Amplificador de Ganho

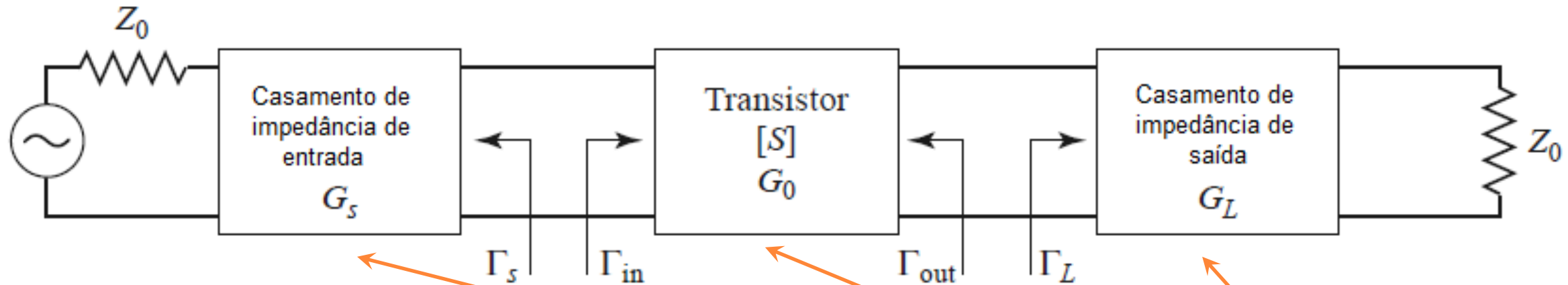
Diagrama de blocos do amplificador



- Ganho do amplificador \rightarrow depende de Z_S e Z_L
- Circuito de casamento de impedância de entrada
 - Transforma a impedância do gerador $Z_0 \rightarrow Z_S$
- Circuito de casamento de impedância de saída
 - Transforma a impedância da carga $Z_0 \rightarrow Z_L$

Projeto de Amplificador de Ganho

Diagrama de blocos do amplificador

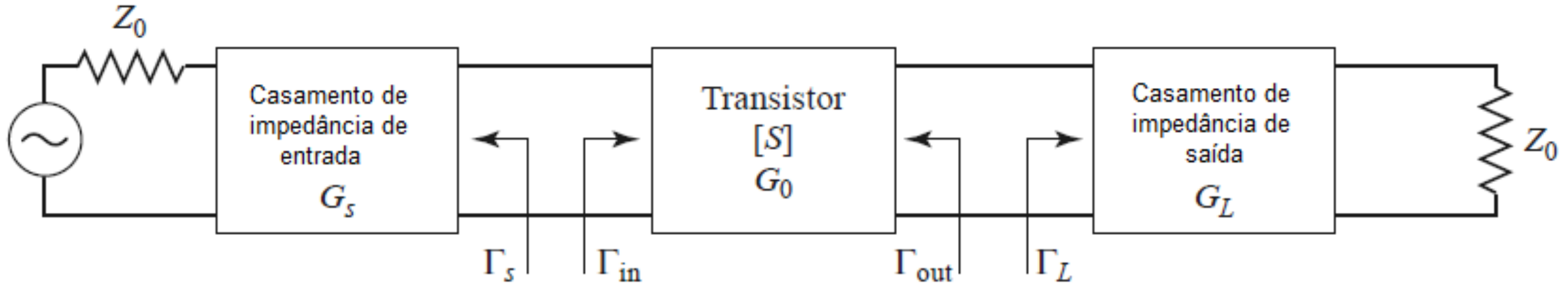


Ganho de potência de transdução

$$G_T = \frac{|S_{21}|^2 (1 - |\Gamma_S|^2) (1 - |\Gamma_L|^2)}{|1 - \Gamma_S \Gamma_{in}|^2 |1 - S_{22} \Gamma_L|^2} \Rightarrow G_T = \frac{(1 - |\Gamma_S|^2)}{|1 - \Gamma_S \Gamma_{in}|^2} \cdot |S_{21}|^2 \cdot \frac{(1 - |\Gamma_L|^2)}{|1 - S_{22} \Gamma_L|^2}$$
$$G_T = G_S \cdot G_0 \cdot G_L$$

Projeto de Amplificador de Ganho

Diagrama de blocos do amplificador



Ganho de potência de transdução

$$G_T = G_S \cdot G_0 \cdot G_L$$

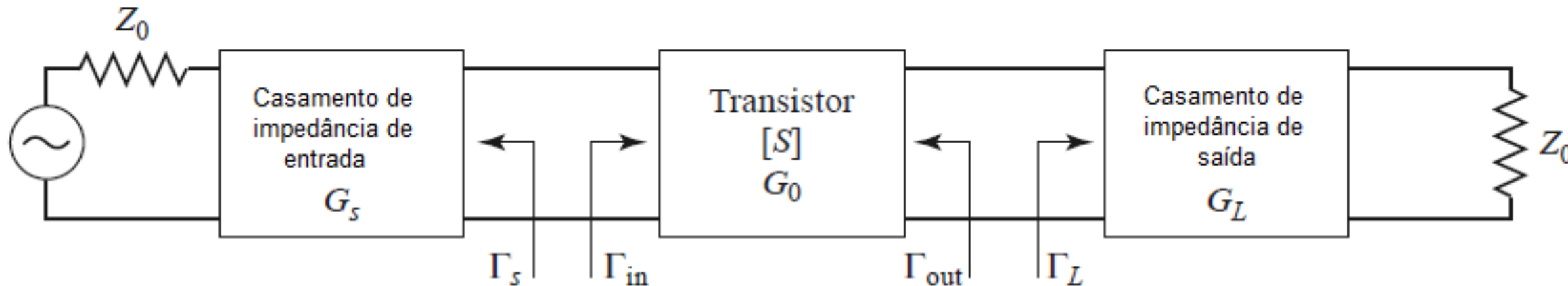
$$G_S = \frac{(1 - |\Gamma_S|^2)}{|1 - \Gamma_S \Gamma_{in}|^2}$$

$$G_0 = |S_{21}|^2$$

$$G_L = \frac{(1 - |\Gamma_L|^2)}{|1 - S_{22} \Gamma_L|^2}$$

Projeto de Amplificador de Ganho

- Amplificador de Ganho
- Projeto visa obter o máximo ganho do transistor
- Potência de saída e figura de ruído moderadas



Para $G = G_{MAX}$, **transistor incondicionalmente estável**

- Casamento de impedância conjugado simultâneo na entrada e saída do transistor

$$\Gamma_{in} = \Gamma_S^* \quad \text{e} \quad \Gamma_{out} = \Gamma_L^*$$

Projeto de amplificador de um estágio

- Para $G = G_{MAX} \rightarrow$ resolução do sistema de equações

$$\Gamma_{in} = S_{11} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_L}{1 - S_{11}\Gamma_L}$$

$$\Gamma_{out} = S_{22} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_S}{1 - S_{22}\Gamma_S}$$

$$\Gamma_{in} = \Gamma_S^*$$

$$\Gamma_{out} = \Gamma_L^*$$

Projeto de amplificador de um estágio

- Para $G = G_{\text{MAX}} \rightarrow$ resolução do sistema de equações

$$\Gamma_S = \frac{B_1 \pm \sqrt{B_1^2 - 4|C_1|^2}}{2C_1}$$

sendo

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

$$B_1 = 1 + |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 - |\Delta|^2,$$

$$B_2 = 1 + |S_{22}|^2 - |S_{11}|^2 - |\Delta|^2,$$

$$C_1 = S_{11} - \Delta S_{22}^*,$$

$$C_2 = S_{22} - \Delta S_{11}^*.$$

- Ganho de potência de transdução máximo

$$G_{T_{\text{max}}} = \frac{1}{1 - |\Gamma_S|^2} |S_{21}|^2 \frac{1 - |\Gamma_L|^2}{|1 - S_{22}\Gamma_L|^2}$$

Projeto de amplificador de um estágio

Ganho de potência de transdução máximo

- Só é definido para **transistor incondicionalmente estável** $\rightarrow K > 1$

$$G_{T_{\max}} = \frac{1}{1 - |\Gamma_S|^2} |S_{21}|^2 \frac{1 - |\Gamma_L|^2}{|1 - S_{22}\Gamma_L|^2} \rightarrow G_{T_{\max}} = \frac{|S_{21}|}{|S_{12}|} (K - \sqrt{K^2 - 1})$$

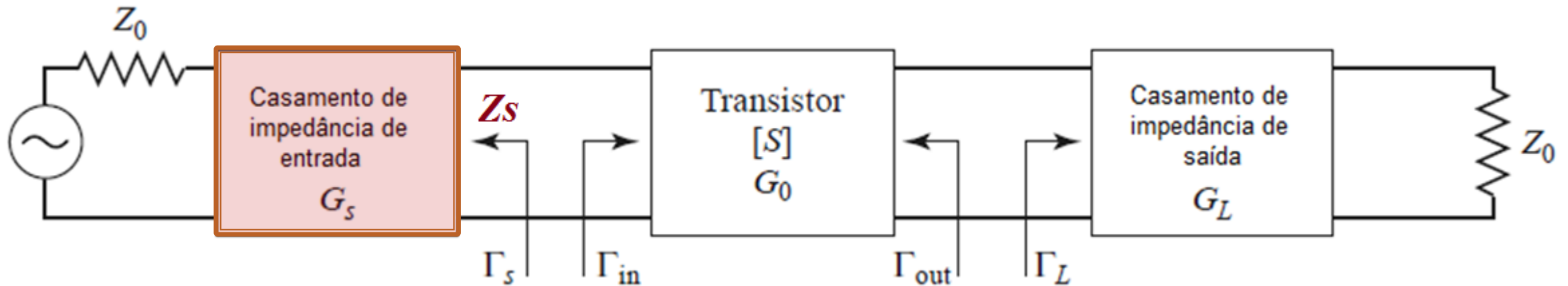
- Se o **transistor é condicionalmente estável** $\rightarrow K < 1$,
 - A equação de ganho máximo não se aplica
 - Define-se “Máximo Ganho Estável” – G_{msg}
 - Para $K = 1$
 - Útil para comparar transistores
 - Na prática $G < G_{msg}$

$$G_{msg} = \frac{|S_{21}|}{|S_{12}|}$$

Projeto de amplificador de um estágio

Uma vez conhecidos $\Gamma_S = \Gamma_{in}^*$ para $\mathbf{G} = \mathbf{G}_{TMAX}$, é necessário projetar

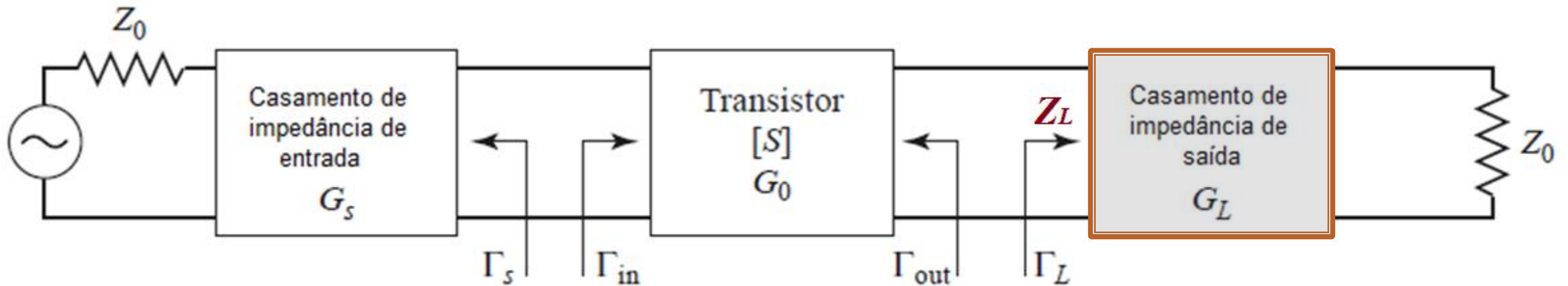
- Rede de casamento de impedância de entrada
 - Transforma a impedância interna do gerador Z_0 em Z_S
 - Sendo Z_S tal que $\Gamma_S = \frac{Z_S - Z_0}{Z_S + Z_0}$



Projeto de amplificador de um estágio

Uma vez conhecidos $\Gamma_L = \Gamma_{out}^*$ para $\mathbf{G} = \mathbf{G}_{TMAX}$, é necessário projetar

- Rede de casamento de impedância de saída
 - Transforma a impedância de carga \mathbf{Z}_0 em \mathbf{Z}_L
 - Sendo \mathbf{Z}_L tal que
$$\Gamma_L = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$$



Projeto de amplificador de um estágio

Exemplo - Pozar

- Projetar um amplificador de um estágio, em 4 GHz
- Dados do transistor
 - MESFET de GaAs
 - Parâmetros S para impedância de referência $Z_0 = 50 \Omega$

$f(\text{GHz})$	S_{11}	S_{12}	S_{21}	S_{22}
3.0	$0.80 \angle -89^\circ$	$0.03 \angle 56^\circ$	$2.86 \angle 99^\circ$	$0.76 \angle -41^\circ$
4.0	$0.72 \angle -116^\circ$	$0.03 \angle 57^\circ$	$2.60 \angle 76^\circ$	$0.73 \angle -54^\circ$
5.0	$0.66 \angle -142^\circ$	$0.03 \angle 62^\circ$	$2.39 \angle 54^\circ$	$0.72 \angle -68^\circ$

Projeto de amplificador de um estágio

- Análise da estabilidade do transistor
- Cálculo de k e Δ

$f(\text{GHz})$	K	Δ	Teste de estabilidade do transistor
3.0	0.77	0.592	$k < 1$ e $ \Delta < 1 \rightarrow$ Condicionalmente estável
4.0	1.19	0.487	$k > 1$ e $ \Delta < 1 \rightarrow$ Incondicionalmente estável
5.0	1.53	0.418	

- Opção do projeto empregada
 - Não usar circuito de estabilização
 - Teste posterior da estabilidade em 3 GHz

Projeto de amplificador de um estágio

- Cálculo de $\Gamma_S = \Gamma_L$

$$\Gamma_S = \frac{B_1 \pm \sqrt{B_1^2 - 4|C_1|^2}}{2C_1} = 0.872 \angle 123^\circ \quad \Gamma_L = \frac{B_2 \pm \sqrt{B_2^2 - 4|C_2|^2}}{2C_2} = 0.876 \angle 61^\circ$$

$$B_1 = 1 + |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 - |\Delta|^2,$$

$$B_2 = 1 + |S_{22}|^2 - |S_{11}|^2 - |\Delta|^2,$$

$$C_1 = S_{11} - \Delta S_{22}^*,$$

$$C_2 = S_{22} - \Delta S_{11}^*.$$

Projeto de amplificador de um estágio

- Cálculo do ganho - G_{TMAX}

$$\left. \begin{aligned} G_{TMAX} &= G_S \cdot G_0 \cdot G_L \\ G_{TMAX}(dB) &= 10 \cdot \log(G_{TMAX}) \end{aligned} \right\} G_{TMAX}(dB) = G_S(dB) + G_0(dB) + G_L(dB)$$

$$G_S = \frac{1}{1 - |\Gamma_S|^2} = 4.17 = 6.20 \text{ dB}$$

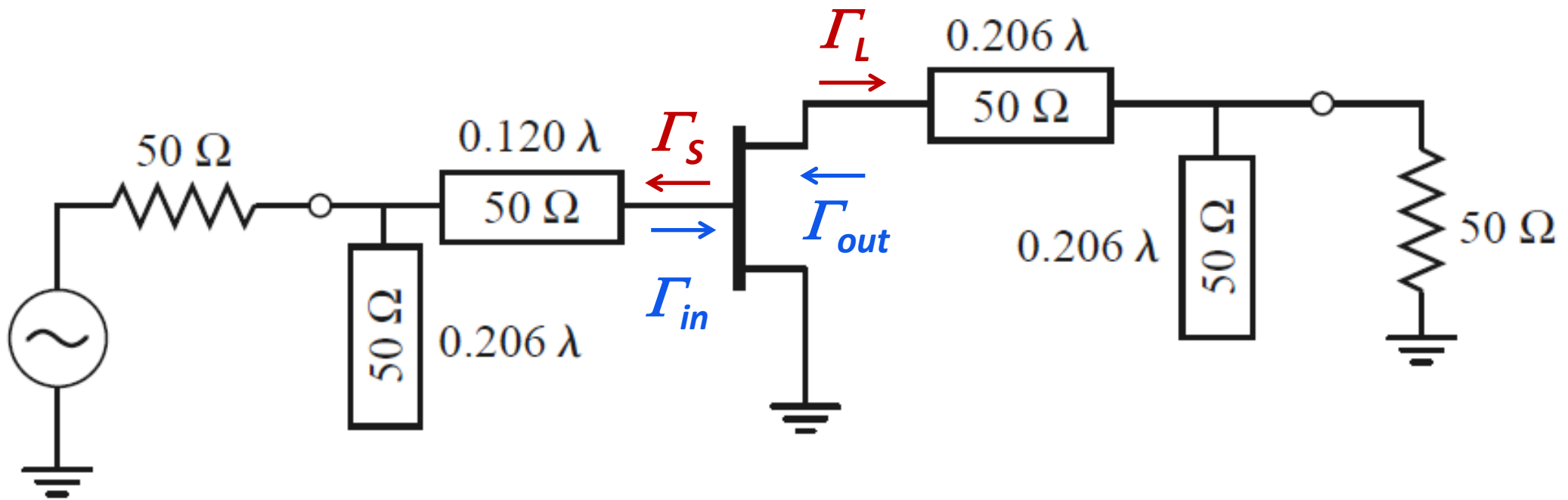
$$G_0 = |S_{21}|^2 = 6.76 = 8.30 \text{ dB}$$

$$G_L = \frac{1 - |\Gamma_L|^2}{|1 - S_{22}\Gamma_L|^2} = 1.67 = 2.22 \text{ dB}$$

$$G_{T_{max}} = 6.20 + 8.30 + 2.22 = 16.7 \text{ dB}$$

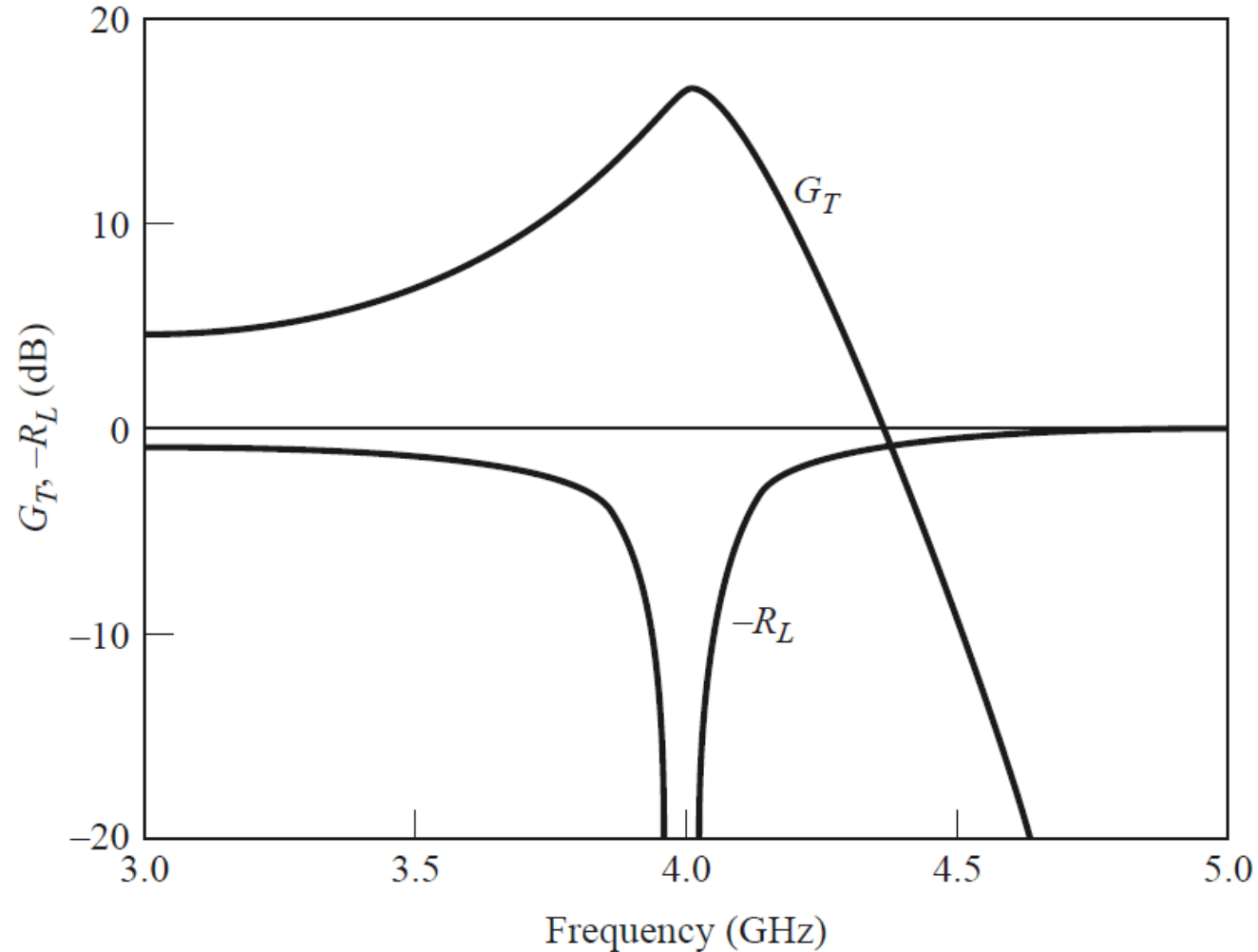
Projeto de amplificador de um estágio

- Projeto das redes de casamento de impedância
- Linhas de transmissão e carta de Smith



Projeto de amplificador de um estágio

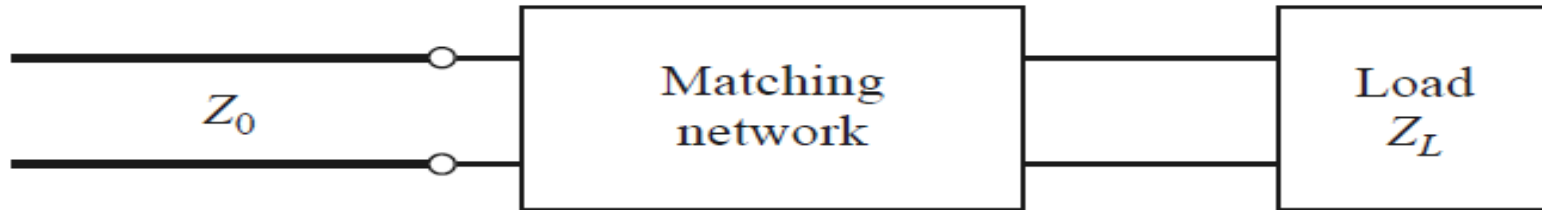
- Resposta em frequência do amplificador simulada



Redes de casamento de impedância

Casamento de Impedâncias

A ideia básica:

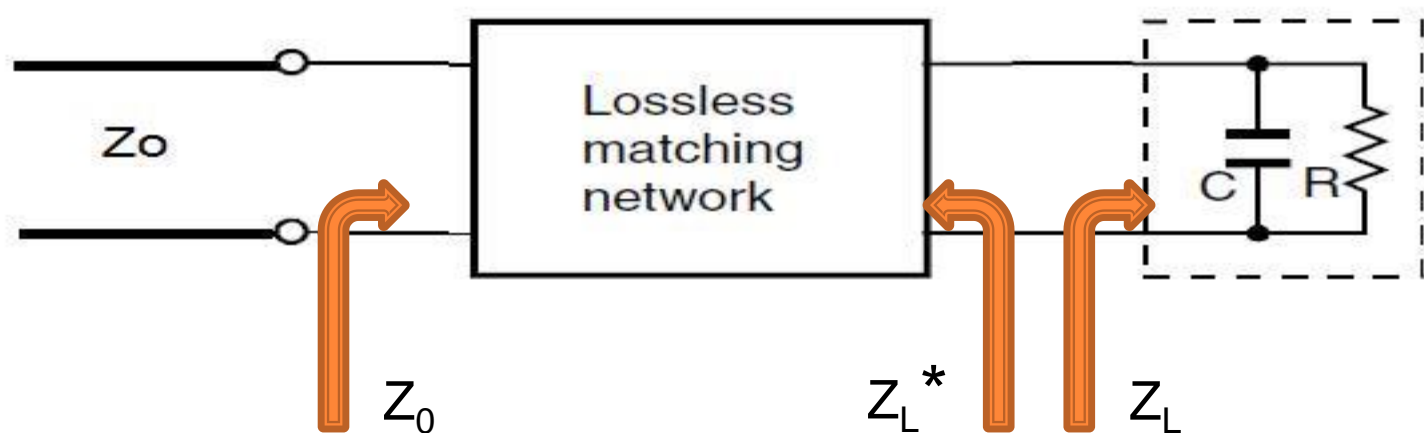


Rede de casamento entre uma carga e uma linha de transmissão

- Projeto e construção de uma rede de casamento de impedâncias usada para otimizar a transferência de potência de uma fonte para uma carga.
- A rede de casamento também é conhecida como transformador de impedâncias.

Casamento de Impedâncias

A máxima transferência de potência de uma fonte para uma carga é obtida através do “casamento conjugado”



Casamento de Impedâncias

Outras aplicações das redes de casamentos:

- Minimizar a figura de ruído de transistores de baixo ruído.
- Maximizar potência de estágios amplificadores de potência.
- Amplificadores de potência podem queimar quando a potência refletida na carga retorna ao amplificador.
- Evitar reflexões que causem distorção de sinais em linhas de transmissão.
- Reduzir os erros nas amplitudes e fases de sinais que alimentam uma rede de antenas.
- Ajuste da frequência de oscilação em osciladores através da impedância de carga.

Casamento de Impedâncias

Fatores importantes na escolha de uma rede de casamento:

- **Complexidade:** uma rede mais simples é menor, mais barata e tem menos perda.
- **Largura de Banda:** adequada a aplicação do circuito (estreita, larga ou ultra-larga).
- **Implementação:** elementos concentrados, linhas de transmissão ou guias de onda.
- **Facilidade de ajuste:** permite a correção de desvios durante o processo de fabricação.

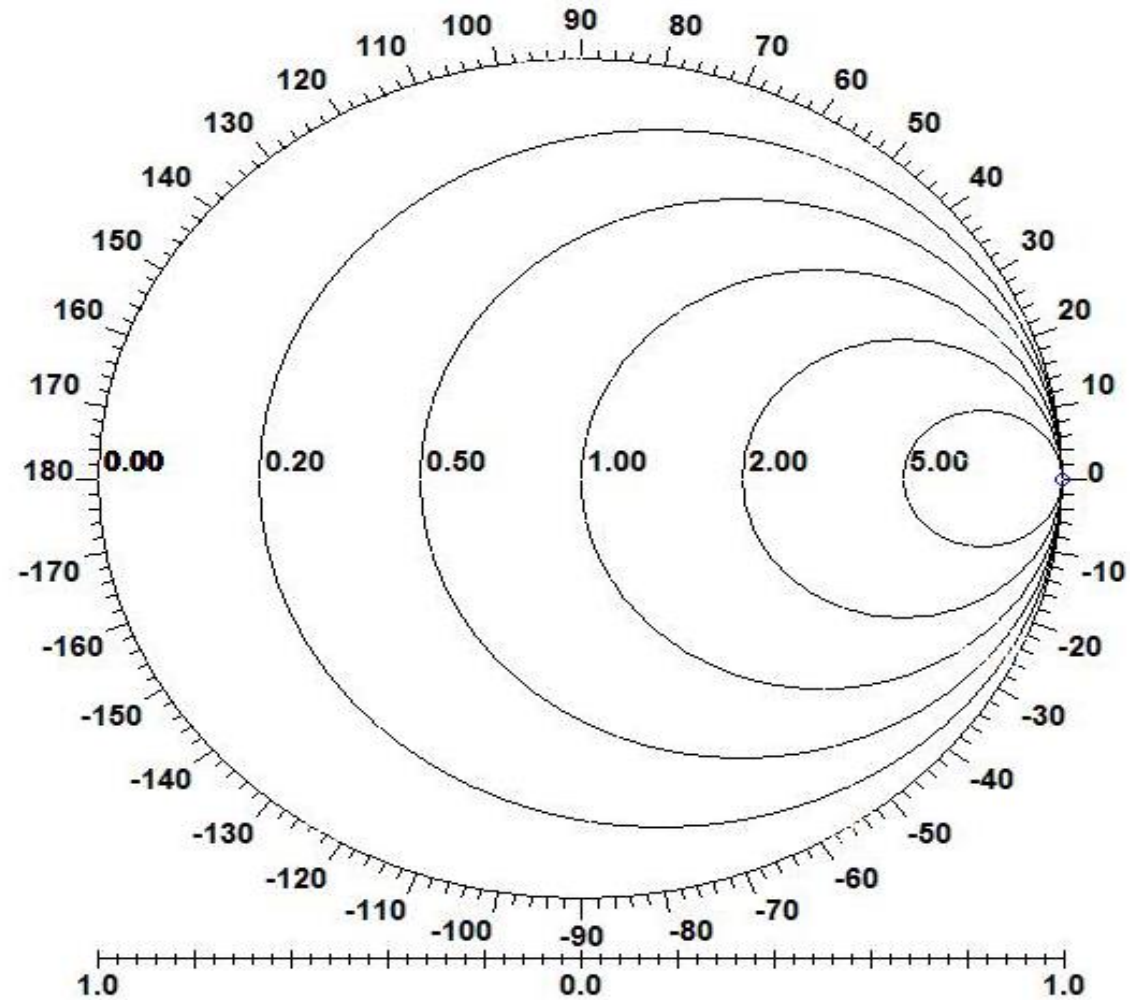
Tipos de redes de casamentos

Alguns tipos de redes de casamentos:

- Redes em “L”.
- Redes com toco simples (toco em paralelo).
- Transformador de quarto de onda.
- Com toco duplo (tocos em paralelo).
- Casamento em banda larga.
- Linhas cônicas.

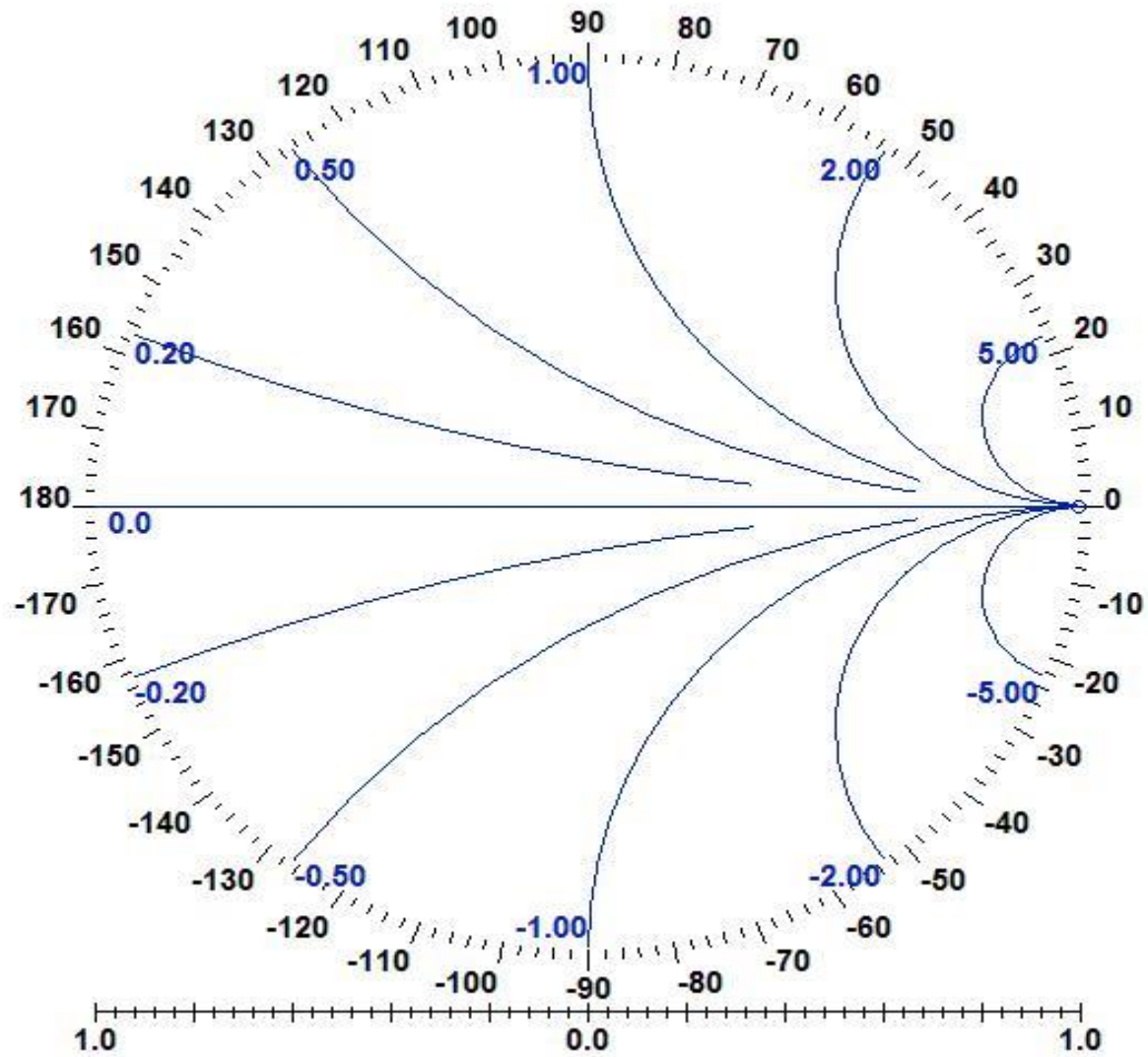
Carta de Smith

Linhas de Resistências Constantes



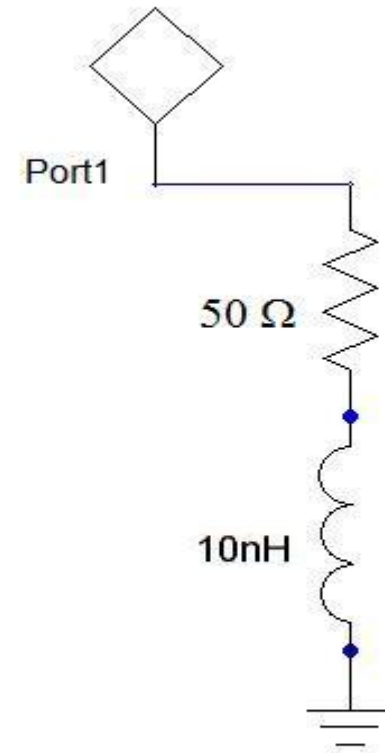
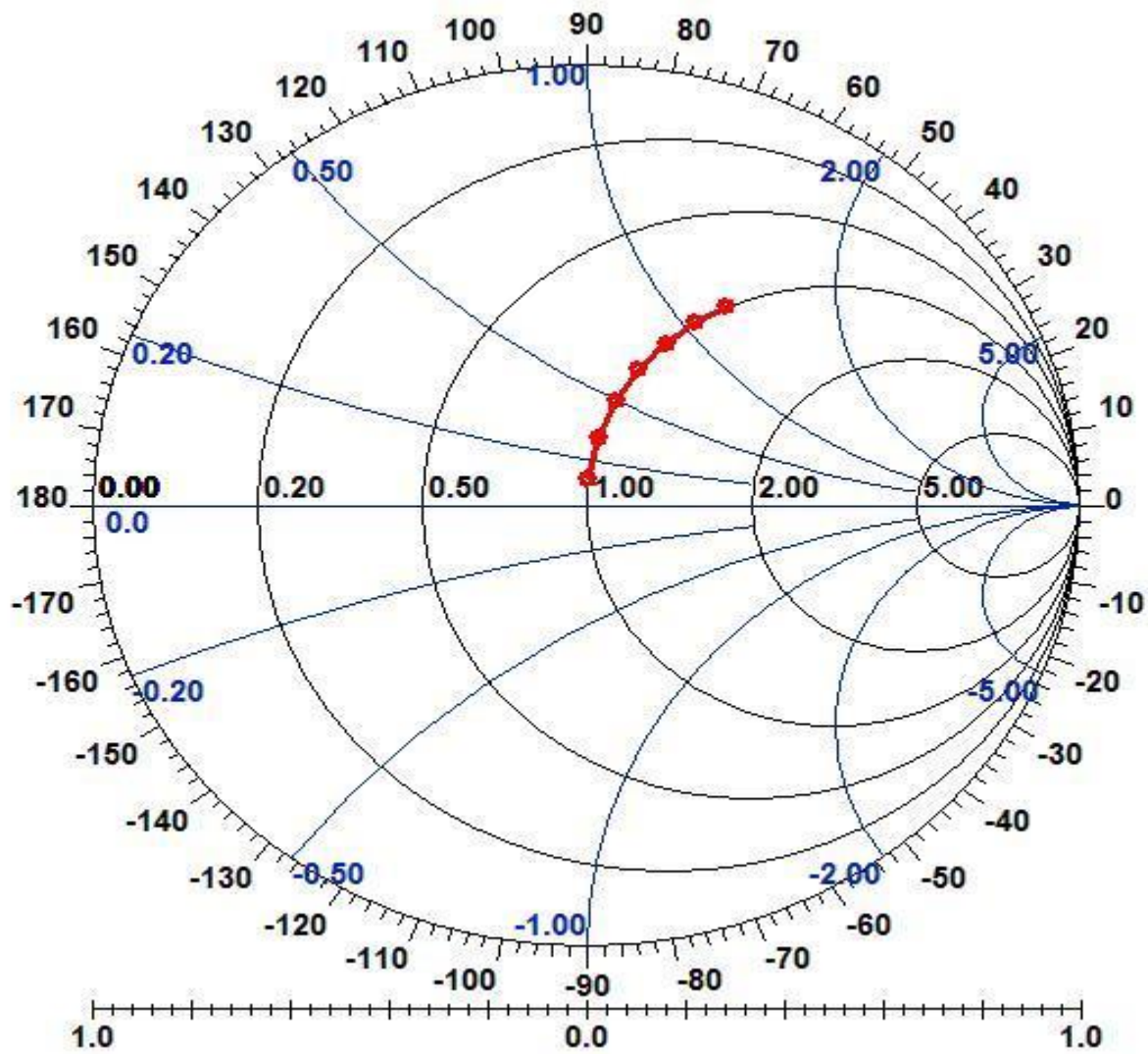
Carta de Smith

Linhas de Reatâncias Constantes



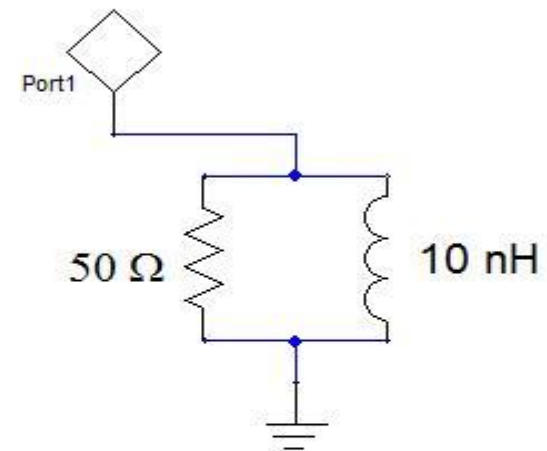
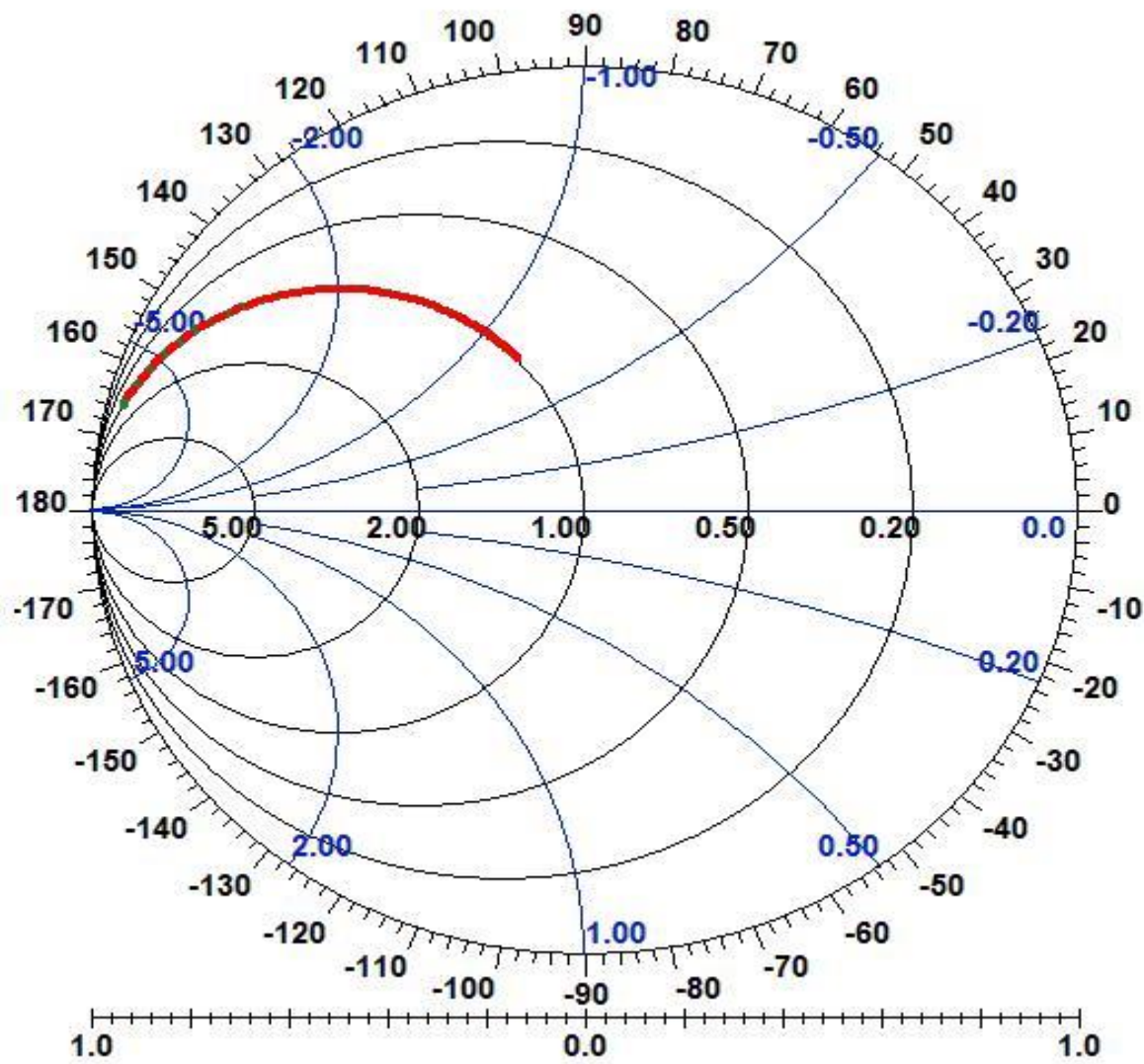
Carta de Smith de Impedâncias

(Linhas de Resistências e Reatâncias Constantes)



Carta de Smith de Admitâncias

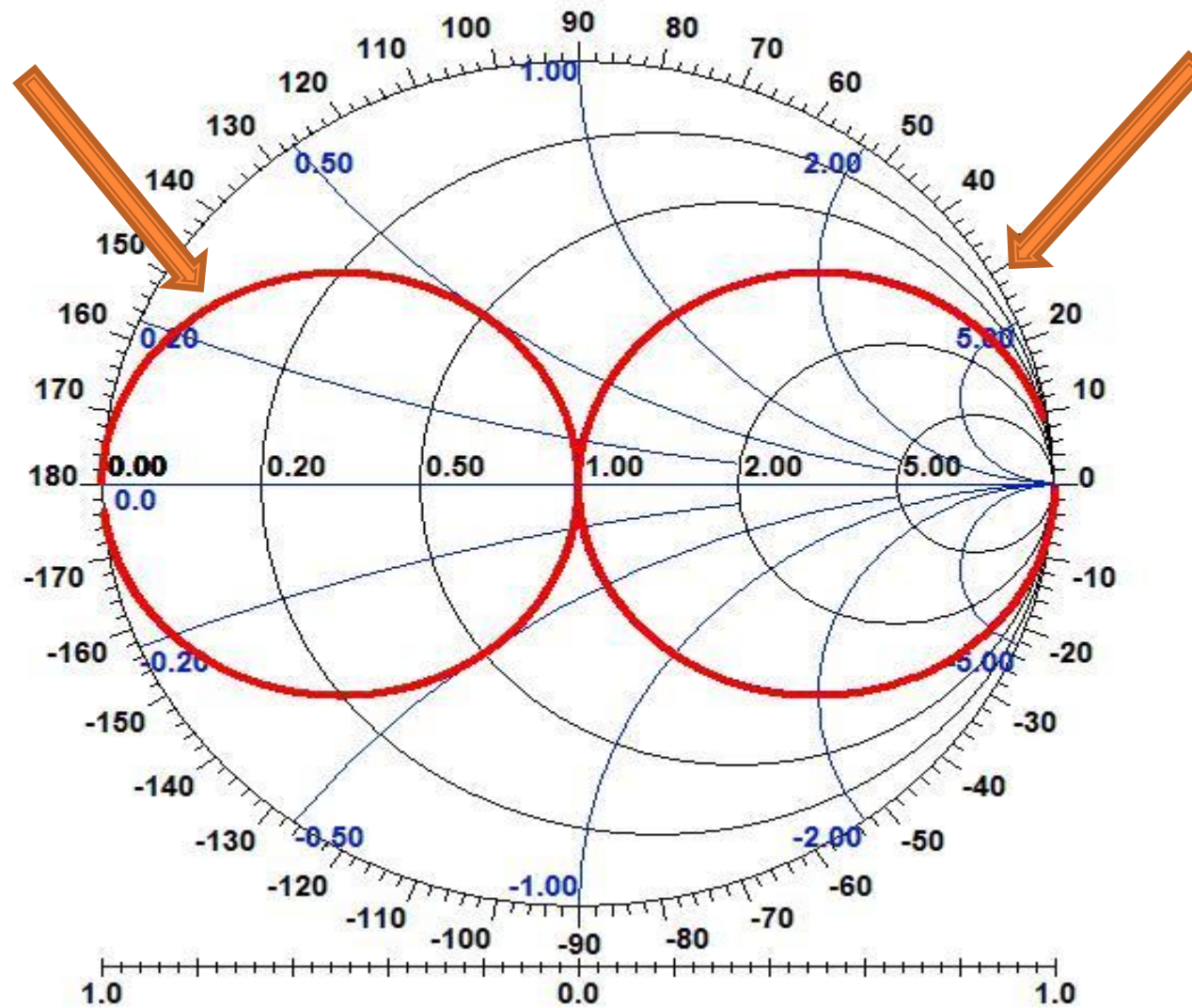
(Linhas de Condutâncias e Susceptâncias Constantes)



Carta de Smith (Círculos Importantes)

Condutância de
 $0,02 \text{ S}$

Resistência de
 50Ω

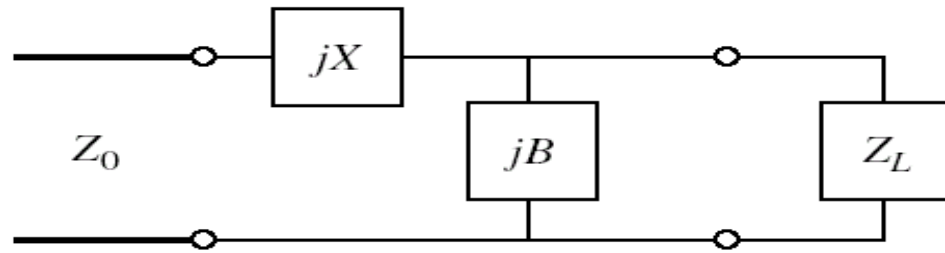


Tipos de redes de casamentos

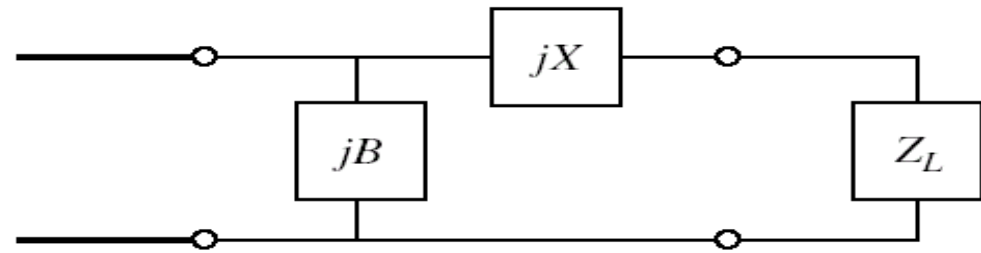
Alguns tipos de redes de casamentos:

- Redes em “L”.
- Redes com toco simples (toco em paralelo).
- Transformador de quarto de onda.
- Com toco duplo (tocos em paralelo).
- Casamento em banda larga.
- Linhas cônicas.

Redes de casamento em “L”



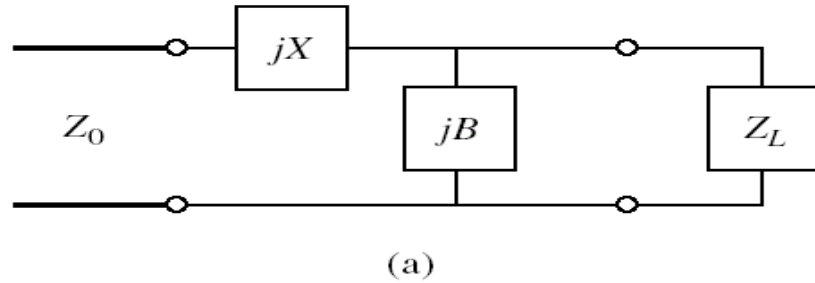
(a)



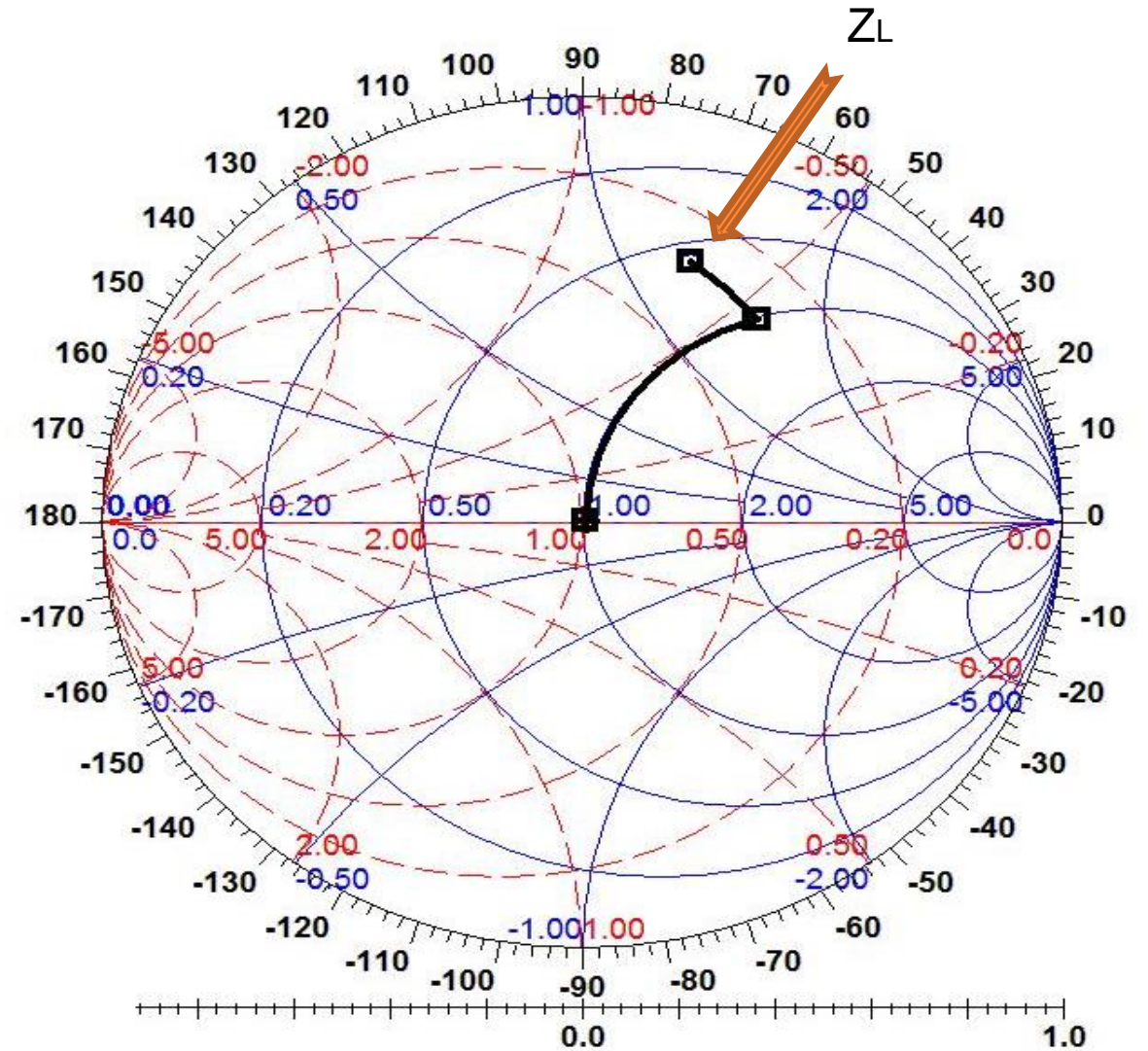
(b)

- Elementos reativos sem perdas (ideais)
- Elementos reativos com perdas (reais)
- Linhas de transmissão
- Combinação de elementos concentrados e distribuídos

Qual é o procedimento?

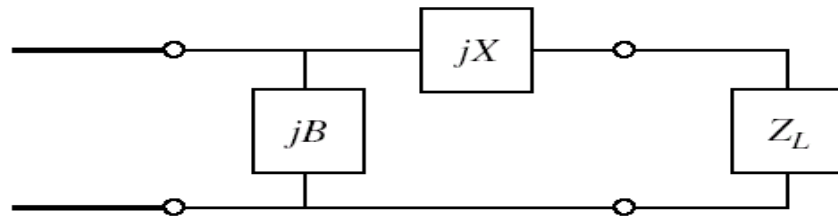


- Ajustar B para que a parte real seja igual a Z_0 .
- Ajustar X para anular a parte imaginária resultante.
- Duas soluções possíveis somente se $Z_0 < 1/GL$.

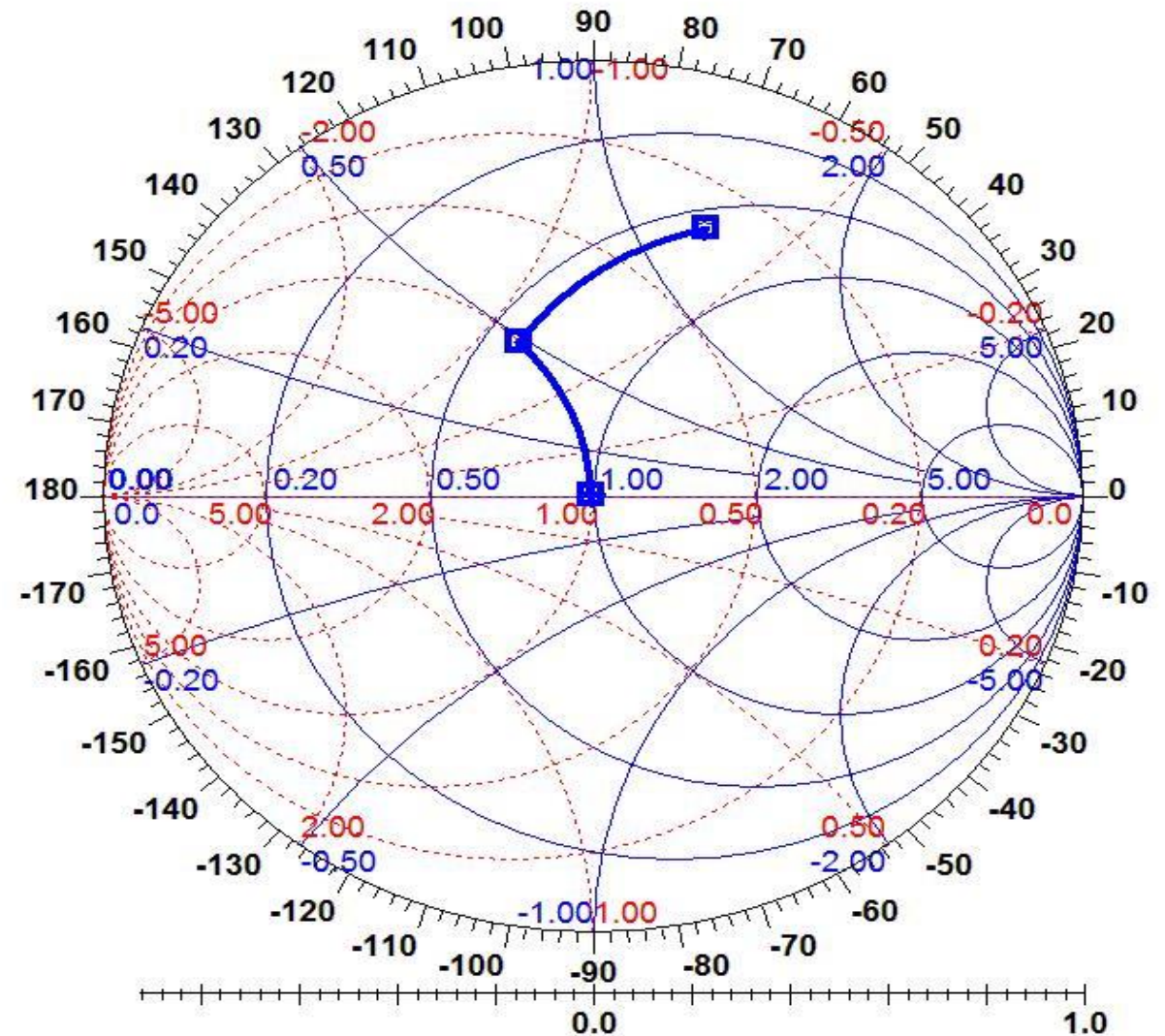


	Inductor	Capacitor
Impedance	$Z_L = j\omega L$	$Z_C = \frac{1}{j\omega C} = \frac{-j}{\omega C}$
Admittance	$Y_L = \frac{1}{j\omega L} = \frac{-j}{\omega L}$	$Y_C = j\omega C$

Qual é o procedimento?

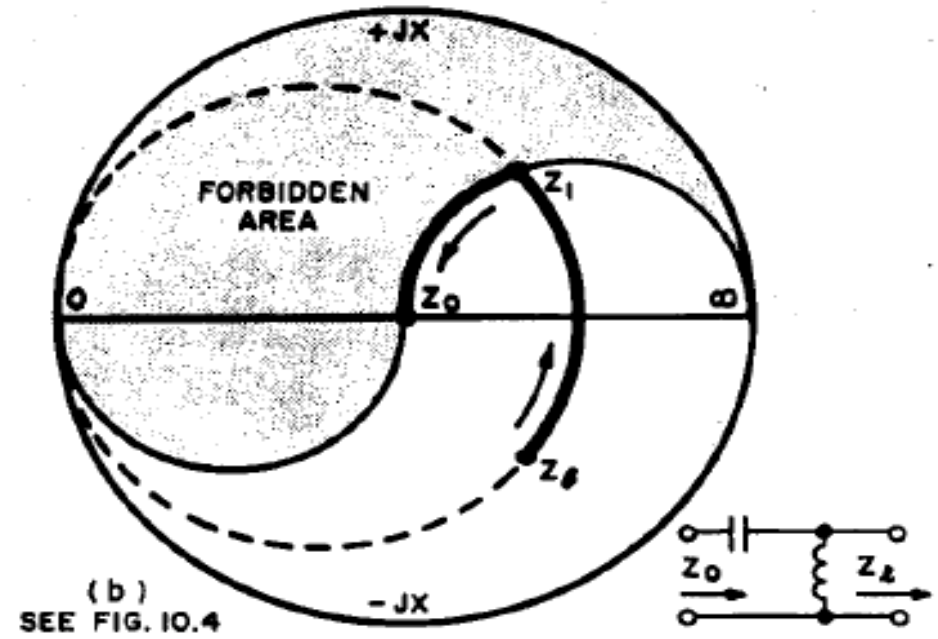
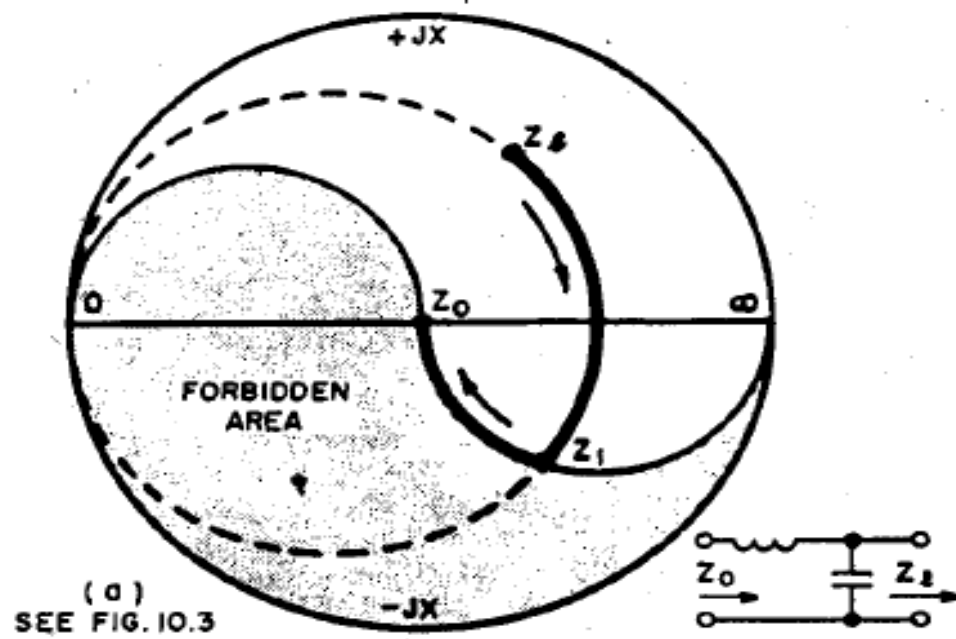


- Ajustar X para que a parte real seja igual a Y_o .
- Ajustar B para anular a parte imaginária resultante.
- Duas soluções possíveis somente se $Y_o < 1/R_L$.

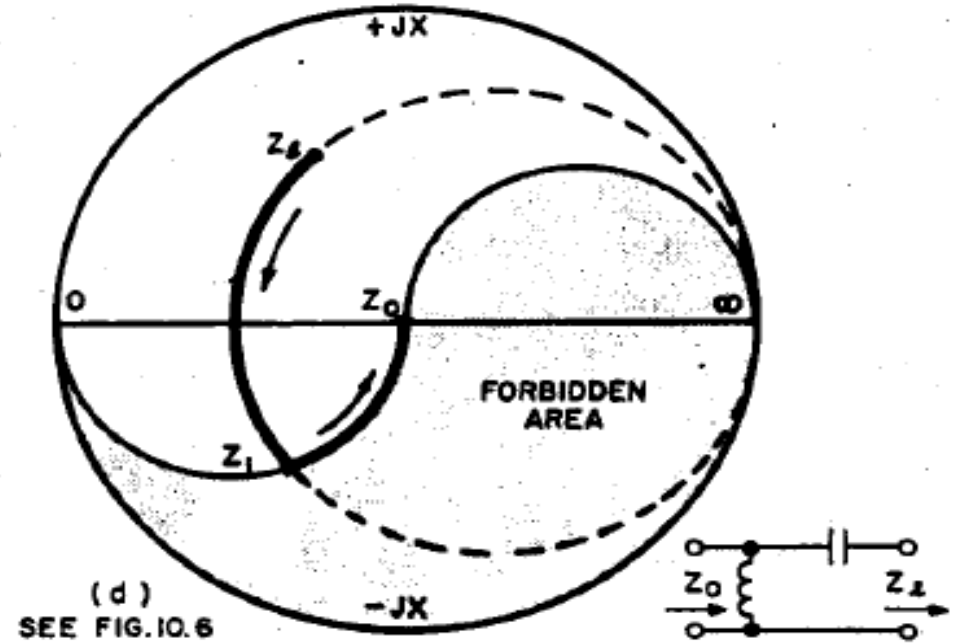
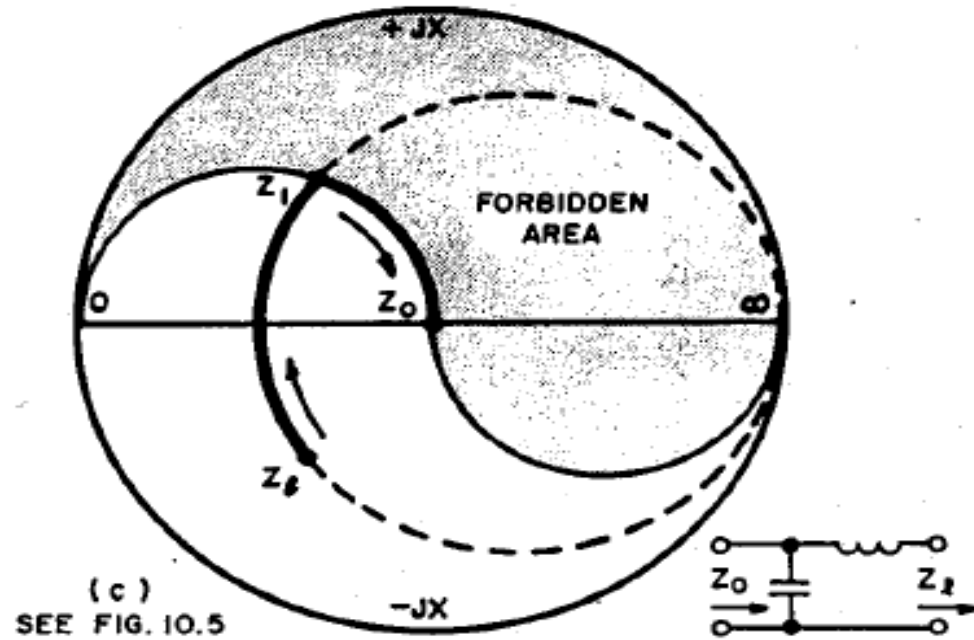


Redes de casamento em "L"

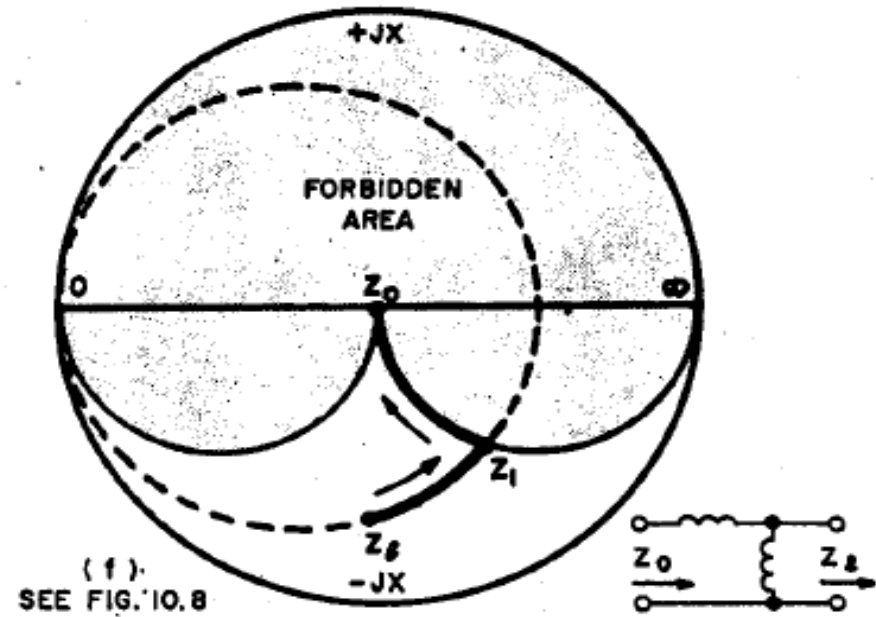
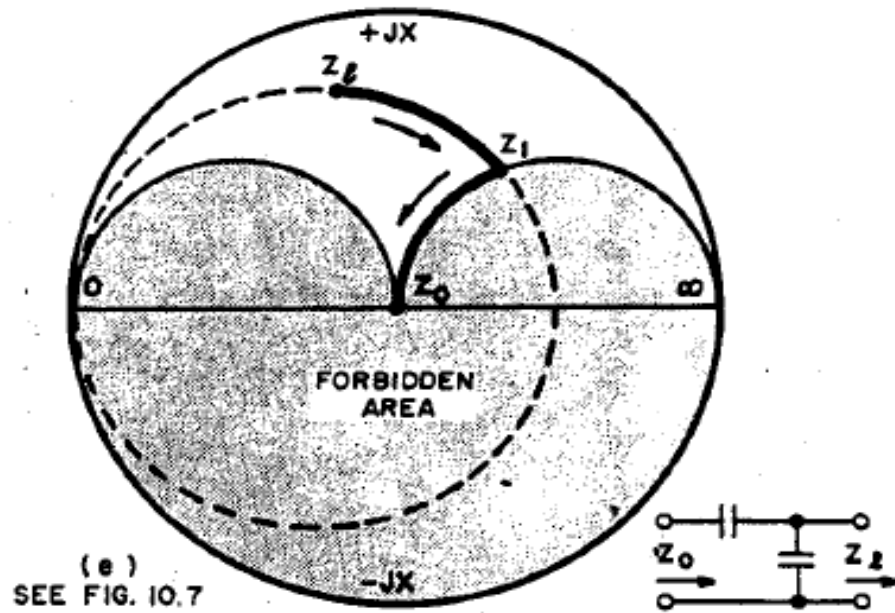
São 8 combinações de indutores e capacitores possíveis:



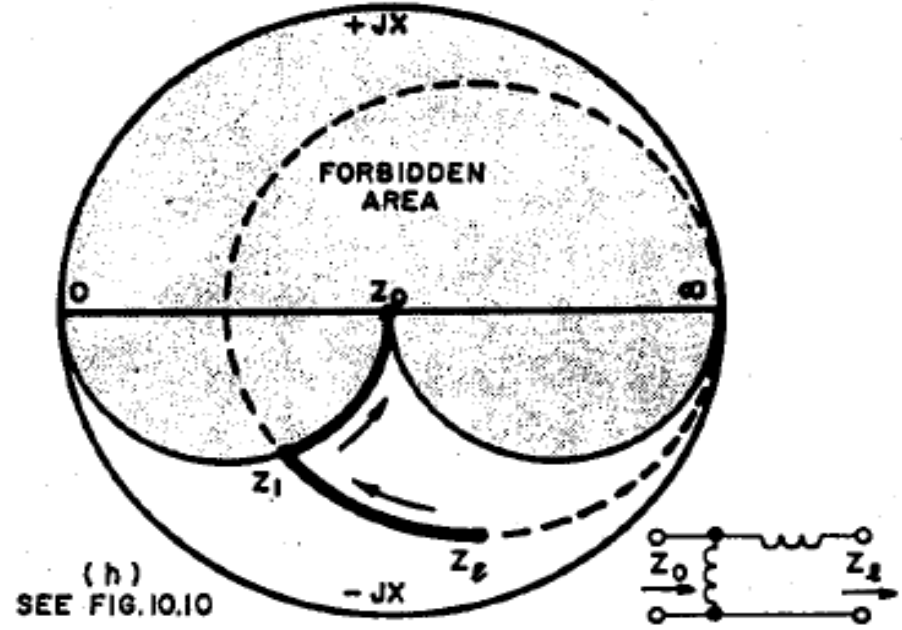
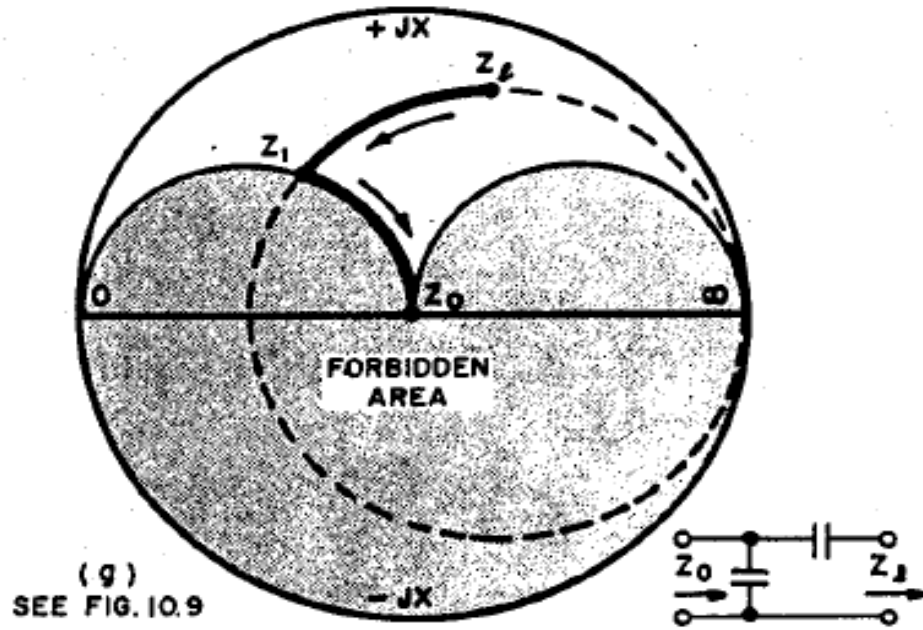
Redes de casamento em "L"



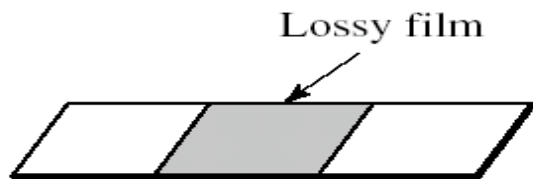
Redes de casamento em "L"



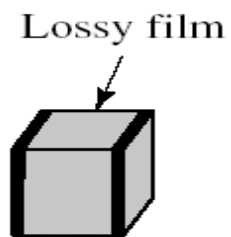
Redes de casamento em "L"



Elementos discretos utilizados em circuitos de microondas nas redes em "L"



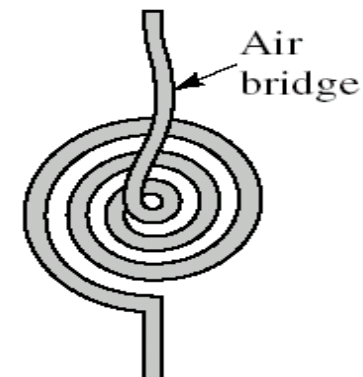
Planar resistor



Chip resistor



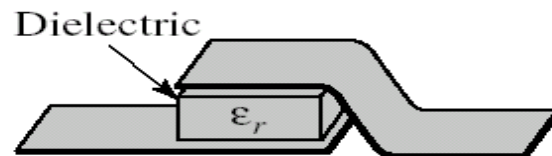
Loop inductor



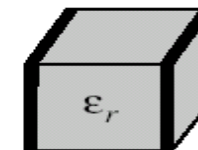
Spiral inductor



Interdigital gap capacitor

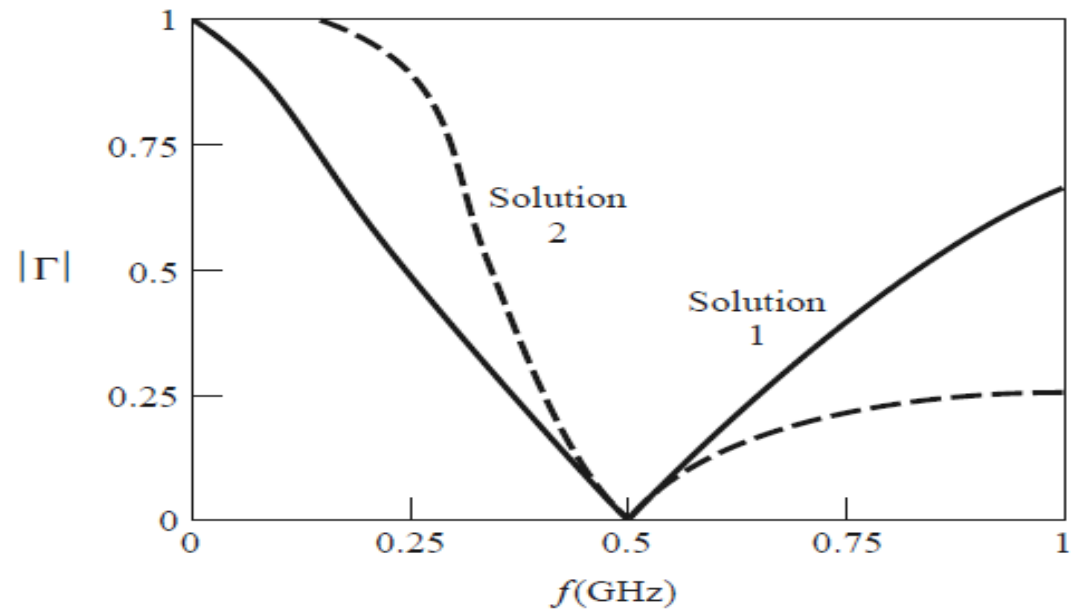
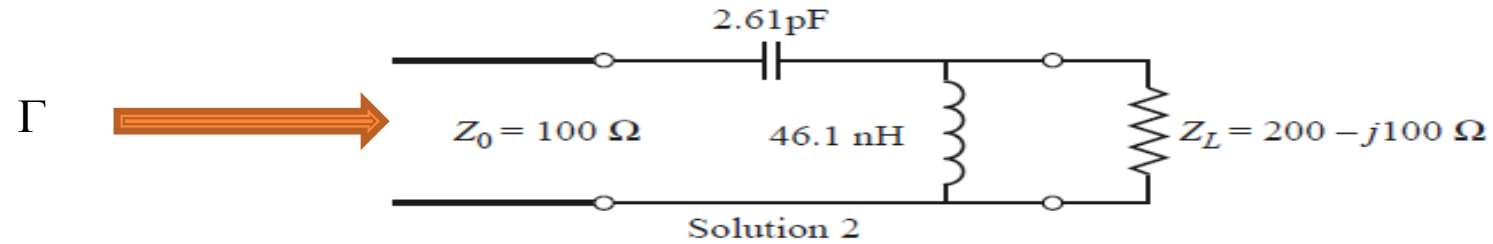
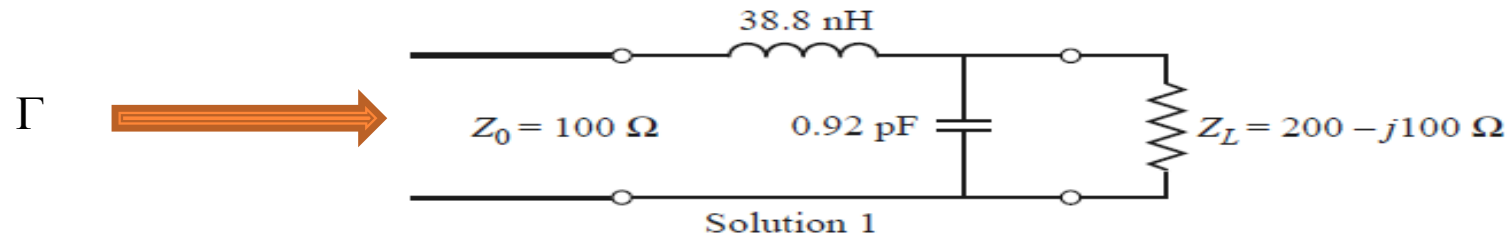


Metal-insulator-metal capacitor



Chip capacitor

Exemplo: Rede de Casamento em 500 MHz



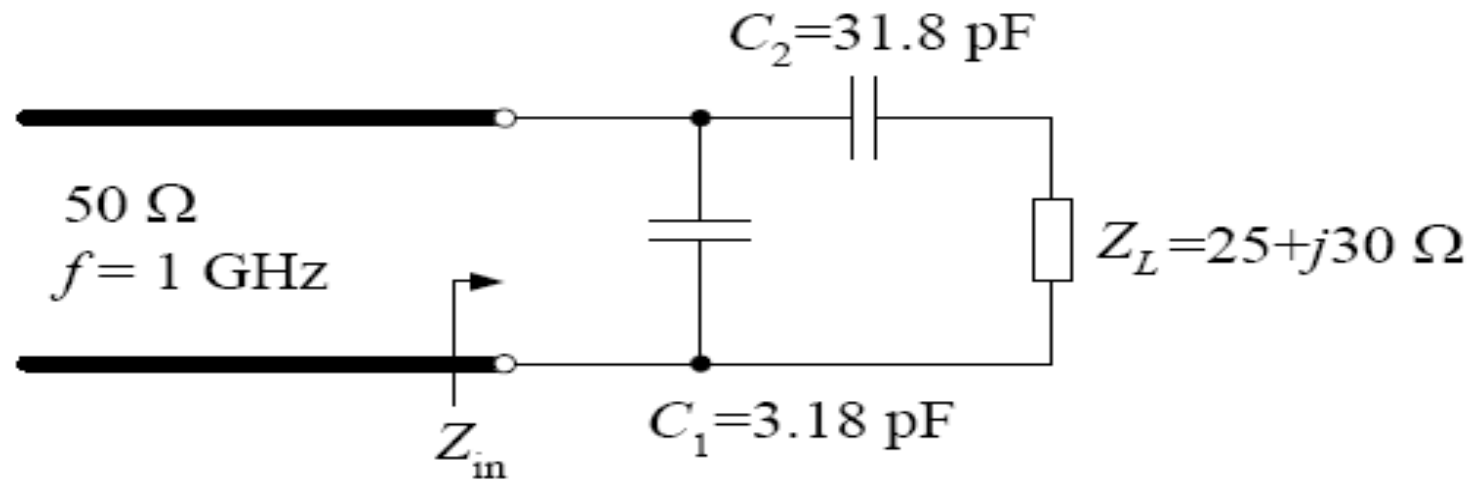
Exercício:

Projete uma rede em “L” para casar uma carga $Z_L=(25+j30) \Omega$ com uma linha de 50Ω na frequência de 2 GHz.

Exercício:

Projete uma rede em "L" para casar uma carga $Z_L=(25+j30)\Omega$ com uma linha de 50Ω na frequência de 1 GHz.

Resposta:



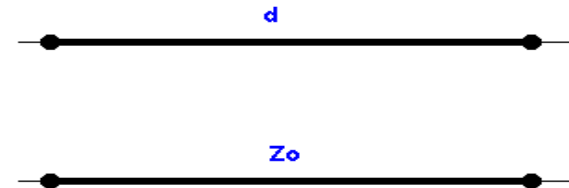
Exercício:

Projete uma rede em “L” para casar a carga $Z_L=(25-j60)\Omega$ com uma linha de $50\ \Omega$ na frequência de 2 GHz, utilizando uma rede diferente daquela encontrada no exercício anterior.

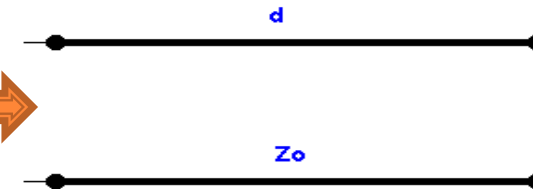
Relembrando: Tocos de linha de transmissão

Tocos são trechos de linhas de transmissão terminadas em curto circuito ou em circuito aberto cujas impedâncias de entrada são puramente reativas.

$$Z_{IN} = j.Z_0.tan(\beta.d)$$



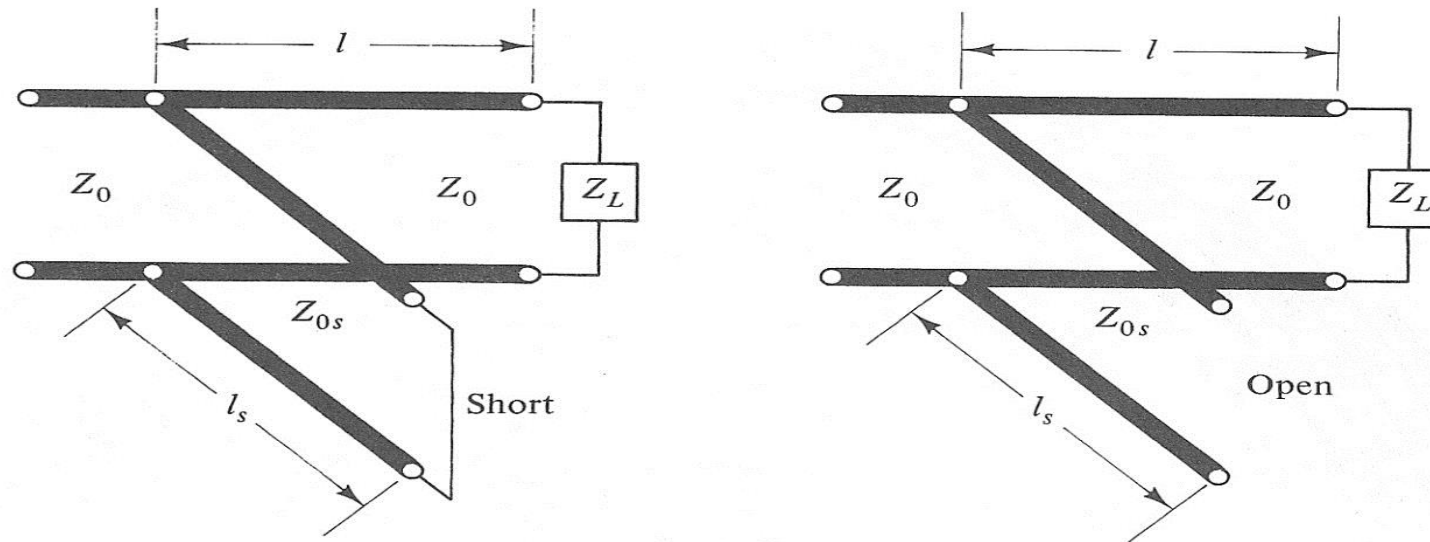
$$Z_{IN} = -j.Z_0.cotan(\beta.d)$$



Equivalência entre elementos concentrados e distribuídos

Capacitor paralelo	↔	Toco em aberto paralelo
Indutor paralelo	↔	Toco em curto paralelo
Indutor série	↔	Linha em série
Capacitor série	↔	Não há solução

Redes de casamento com toco simples em paralelo

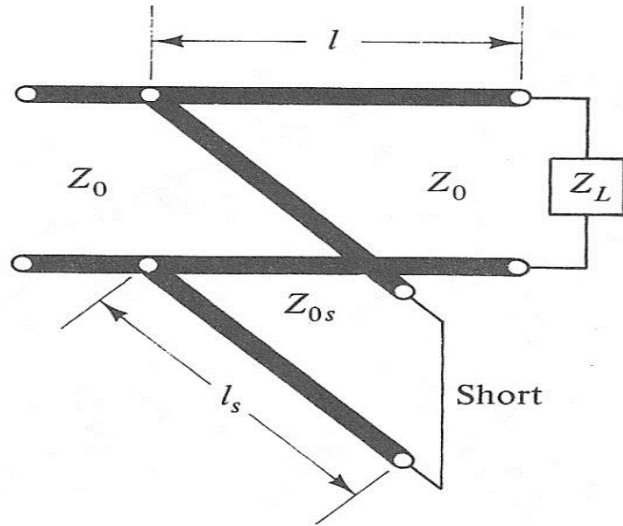


Parâmetros a serem determinados:

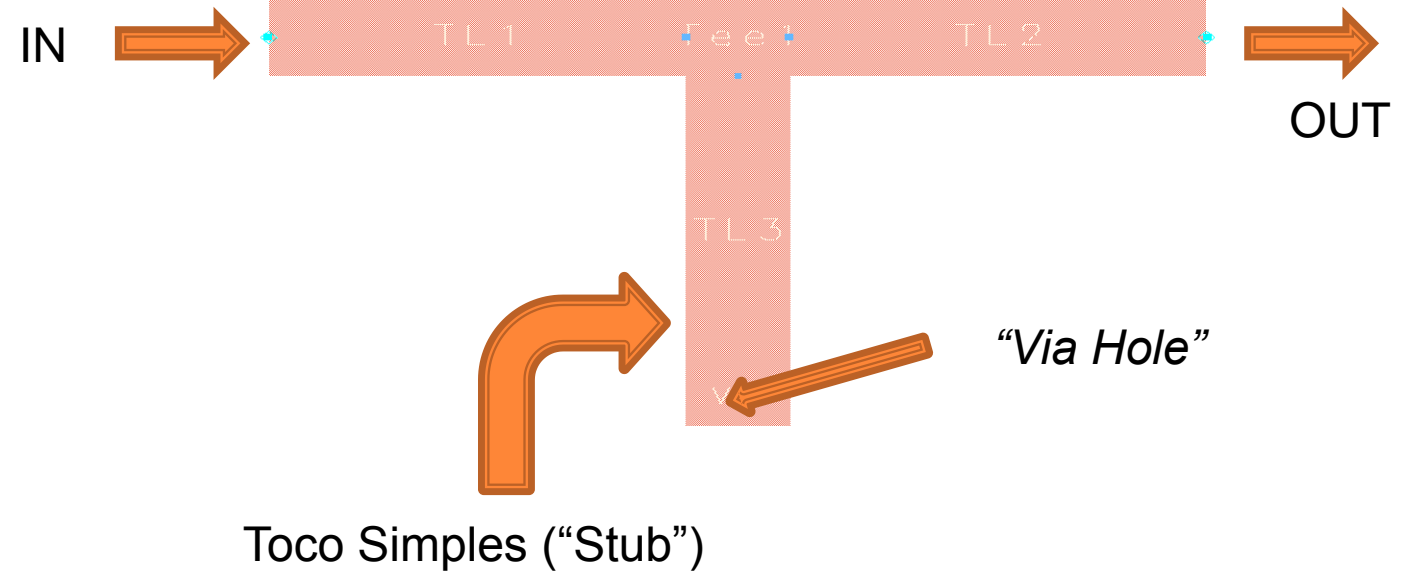
- Localização do toco (distância L)
- Comprimento do toco (distância L_s)

Redes de casamento com toco simples em paralelo

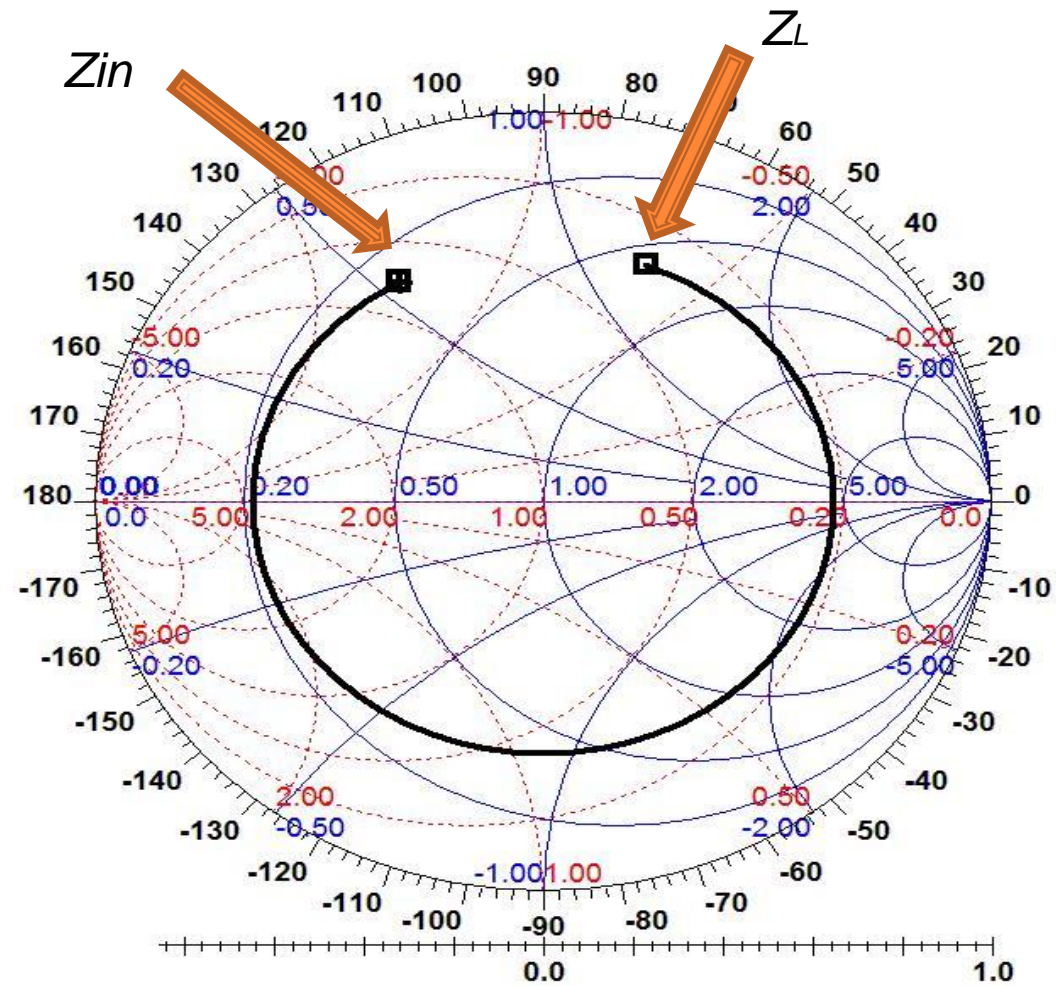
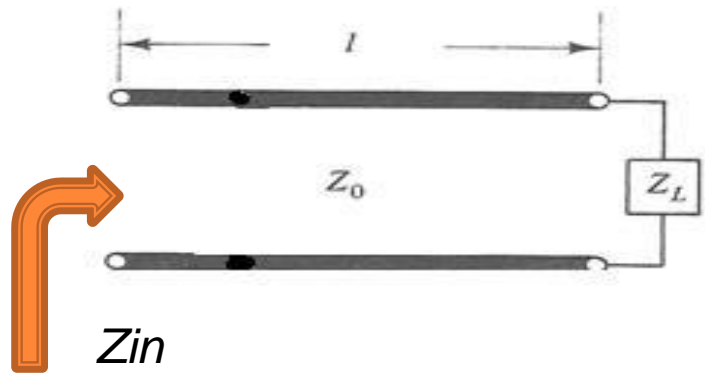
Esquema elétrico



Construído com "Microstrip"



Comportamento de uma Linha de Transmissão na Carta de Smith

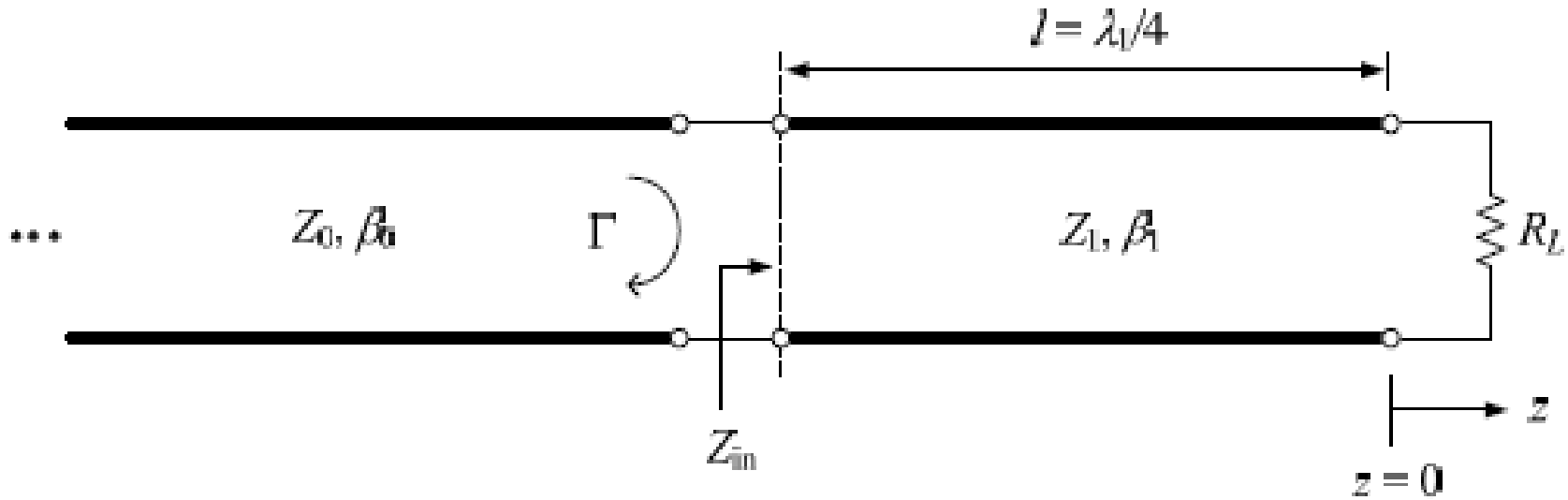


Exercício:

Um transistor com impedância de entrada de $Z_{in}=(5+j3,5)\Omega$ e impedância de saída de $Z_{out}=(10-j15)\Omega$ em 2 GHz.

Dimensione os casamentos de entrada e de saída utilizando casamento com toco simples.

Casamento com transformador $\lambda/4$



$$Z_{in} = \frac{Z_1^2}{R_L}$$

Casamento com transformador $\lambda/4$

