

# Círculo de Ganho Constante

SEL 369 Micro-ondas/SEL5900 Circuitos de Alta  
Frequência

Amílcar Careli César  
Departamento de Engenharia Elétrica da EESC-USP

# Atenção!

---



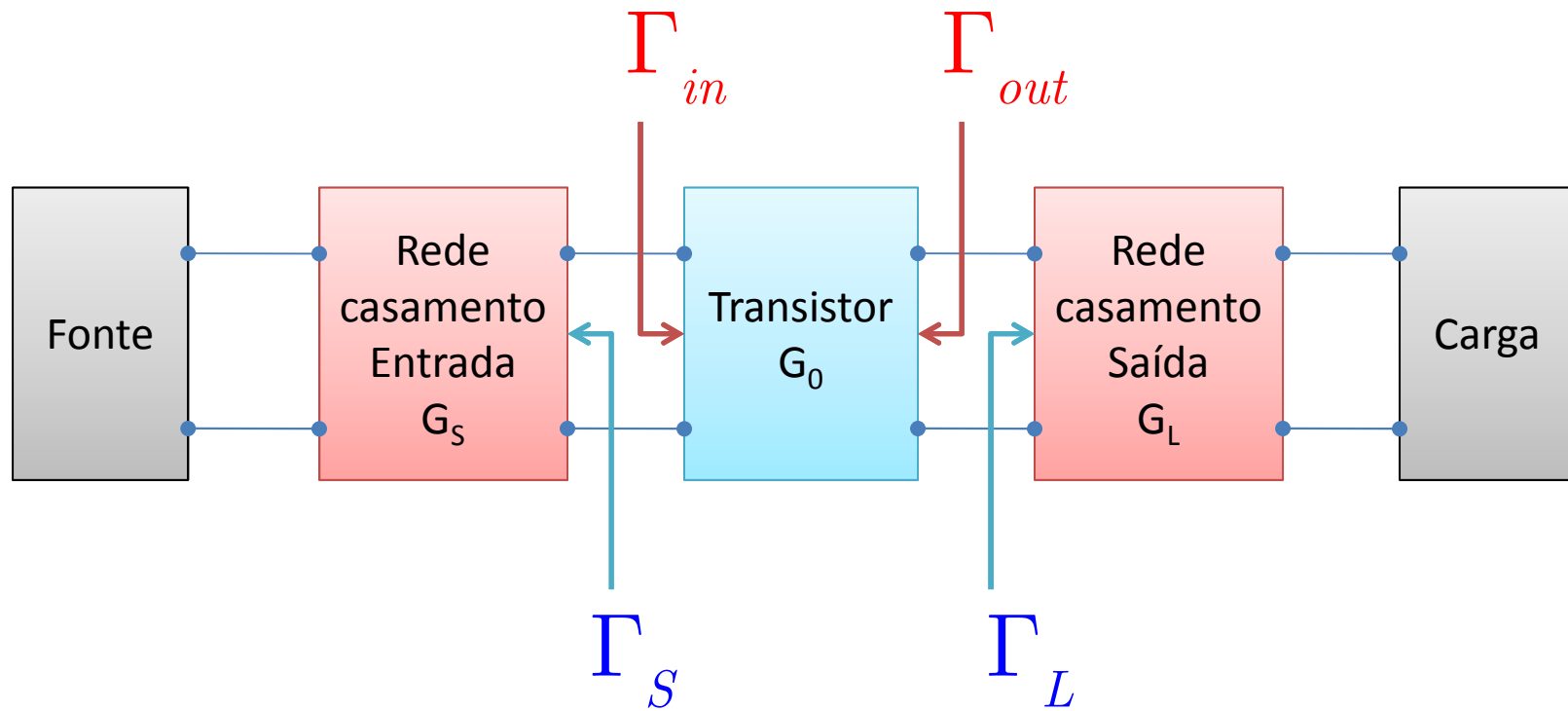
- ✓ Este material didático é planejado para servir de apoio às aulas de **SEL-369 Micro-ondas**, oferecida aos alunos regularmente matriculados no curso de engenharia elétrica/eletrônica e **SEL-5900 Circuitos de Alta Frequência**, oferecida aos alunos regularmente matriculados no curso de pós-graduação em engenharia elétrica.
- ✓ Não são permitidas a reprodução e/ou comercialização do material.
- ✓ solicitar autorização ao docente para qualquer tipo de uso distinto daquele para o qual foi planejado.

# Finalidade

---

- ✓ Projetar amplificador com ganho menor que o máximo
- ✓ Descasamento é utilizado para reduzir ganho

# Diagrama de blocos de amplificador



$$G_S = \frac{1 - |\Gamma_S|^2}{|1 - \Gamma_{in} \Gamma_S|^2}, \quad G_0 = |S_{21}|^2, \quad G_L = \frac{1 - |\Gamma_L|^2}{|1 - S_{22} \Gamma_L|^2}$$

# Figura de mérito unilateral

---

Caso unilateral,  $|S_{12}| \sim 0$

Figura de mérito unilateral

$$U = \frac{|S_{11}| |S_{12}| |S_{21}| |S_{22}|}{\left(1 - |S_{11}|^2\right) \left(1 - |S_{22}|^2\right)}$$

Erro causado pela aproximação

$$\frac{1}{(1+U)^2} < \frac{G_T}{G_{TU}} < \frac{1}{(1-U)^2}$$

Décimos de dB justificam o uso da aproximação

# Ganho transdutivo unilateral

---

Para  $S_{12} \sim 0$

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

$$G_S = \frac{1 - |\Gamma_S|^2}{|1 - S_{11}\Gamma_S|^2}, \quad G_0 = |S_{21}|^2, \quad G_L = \frac{1 - |\Gamma_L|^2}{|1 - S_{22}\Gamma_L|^2}$$

# Ganho transdutivo unilateral máximo

---

Valores máximos para  $\Gamma_S = S_{11}^*$  e  $\Gamma_L = S_{22}^*$

$$G_S = \frac{1 - |\Gamma_S|^2}{|1 - S_{11}\Gamma_S|^2}, \quad G_0 = |S_{21}|^2, \quad G_L = \frac{1 - |\Gamma_L|^2}{|1 - S_{22}\Gamma_L|^2}$$

$$G_{S_{\max}} = \frac{1}{1 - |S_{11}|^2}, \quad G_0 = |S_{21}|^2, \quad G_{L_{\max}} = \frac{1}{1 - |S_{22}|^2}$$

Terminações que produzem  $G_{S_{\max}}$  e  $G_{L_{\max}}$   
são 'terminações ótimas'

# Fator de ganho normalizado (1)

---

$$G_{S \max} = \frac{1}{1 - |S_{11}|^2}, \quad G_0 = |S_{21}|^2, \quad G_{L \max} = \frac{1}{1 - |S_{22}|^2}$$

Definição

$$g_S = \frac{G_S}{G_{S \max}} = \frac{1 - |\Gamma_S|^2}{|1 - S_{11}\Gamma_S|^2} \left(1 - |S_{11}|^2\right)$$

$$g_L = \frac{G_L}{G_{L \max}} = \frac{1 - |\Gamma_L|^2}{|1 - S_{22}\Gamma_L|^2} \left(1 - |S_{22}|^2\right)$$



## Fator de ganho normalizado (2)

---

$$g_S = \frac{G_S}{G_{S \max}} = \frac{1 - |\Gamma_S|^2}{|1 - S_{11}\Gamma_S|^2} \left(1 - |S_{11}|^2\right)$$

$$g_L = \frac{G_L}{G_{L \max}} = \frac{1 - |\Gamma_L|^2}{|1 - S_{22}\Gamma_L|^2} \left(1 - |S_{22}|^2\right)$$

$g_S = 0$  para  $|\Gamma_S| = 0$  e  $g_L = 0$  para  $|\Gamma_L| = 0$

$0 \leq g_S \leq 1$  e  $0 \leq g_L \leq 1$

## Círculo de ganho constante (1)

---

$$g_s = \frac{G_s}{G_{s_{\max}}} = \frac{1 - |\Gamma_s|^2}{|1 - S_{11}\Gamma_s|^2} \left(1 - |S_{11}|^2\right)$$

Desenvolvendo a expressão de  $g_s$

para determinar  $\Gamma_s$  (ver livro do Pozar, p. 624)

$$\left| \Gamma_s - \frac{g_s S_{11}^*}{1 - (1 - g_s)|S_{11}|^2} \right| = \frac{\sqrt{1 - g_s} \left(1 - |S_{11}|^2\right)}{1 - (1 - g_s)|S_{11}|^2}$$

$$\left| \Gamma_s - C_s \right| = R_s : \text{Equação de círculo}$$

## Círculo de ganho constante (2)

---

$$|\Gamma_S - C_S| = R_S$$

$$C_S = \frac{g_S S_{11}^*}{1 - (1 - g_S) |S_{11}|^2} : \text{centro}$$

$$R_S = \frac{\sqrt{1 - g_S} (1 - |S_{11}|^2)}{1 - (1 - g_S) |S_{11}|^2} : \text{raio}$$

## Círculo de ganho constante (3)

---

$$g_L = \frac{G_L}{G_{L\max}} = \frac{1 - |\Gamma_L|^2}{|1 - S_{22}\Gamma_L|^2} \left(1 - |S_{22}|^2\right)$$

Desenvolvendo a expressão de  $g_L$

para determinar  $\Gamma_L$  (ver livro do Pozar, p.624)

$$\left| \Gamma_L - \frac{g_L S_{22}^*}{1 - (1 - g_L)|S_{22}|^2} \right| = \frac{\sqrt{1 - g_L} \left(1 - |S_{22}|^2\right)}{1 - (1 - g_L)|S_{22}|^2}$$

$$\left| \Gamma_L - C_L \right| = R_L : \text{Equação de círculo}$$

## Círculo de ganho constante (4)

---

$$|\Gamma_L - C_L| = R_L$$

$$C_L = \frac{g_L S_{22}^*}{1 - (1 - g_L) |S_{22}|^2} : \text{centro}$$

$$R_L = \frac{\sqrt{1 - g_L} \left(1 - |S_{22}|^2\right)}{1 - (1 - g_L) |S_{22}|^2} : \text{raio}$$

## Círculo de ganho constante (5)

---

$$\text{Se } G_L = G_{L_{\max}} \rightarrow g_L = 1$$

$$C_L = \frac{g_L S_{22}^*}{1 - (1 - g_L) |S_{22}|^2} = S_{22}^* : \text{centro}$$

$$R_L = \frac{\sqrt{1 - g_L} \left(1 - |S_{22}|^2\right)}{1 - (1 - g_L) |S_{22}|^2} = 0 : \text{raio}$$

## Círculo de ganho constante (6)

---

Como  $G_L = \frac{1 - |\Gamma_L|^2}{|1 - S_{22}\Gamma_L|^2}$ , se  $\Gamma_L = 0 \rightarrow G_L = 1$  (0 dB) e

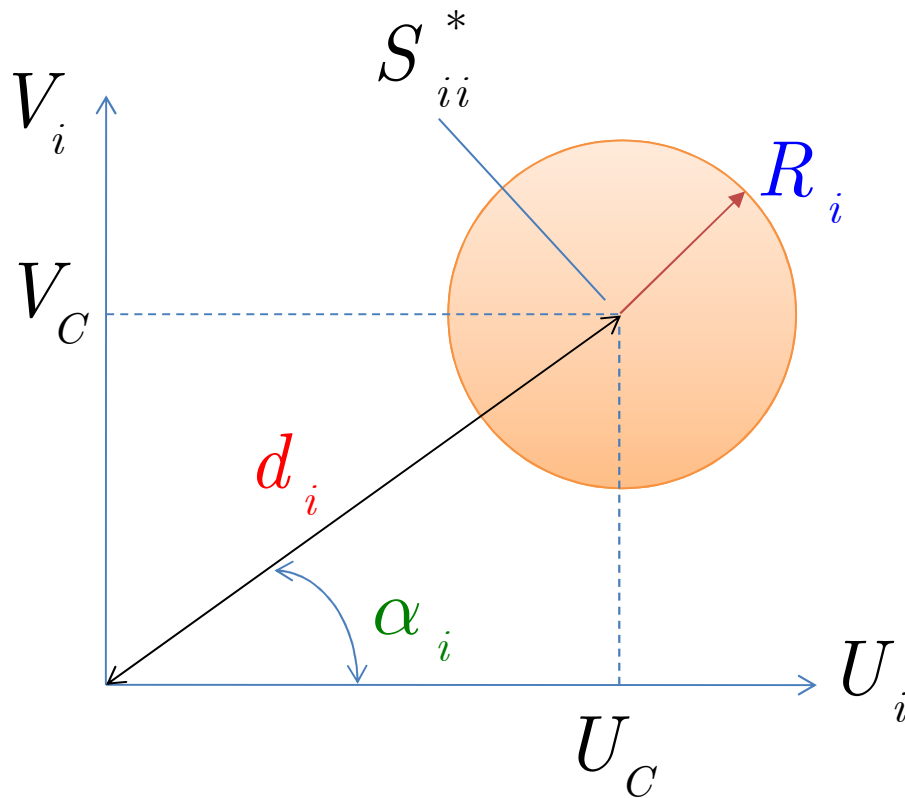
$$g_L = \frac{1 - |\Gamma_L|^2}{|1 - S_{22}\Gamma_L|^2} (1 - |S_{22}|^2) = 1 - |S_{22}|^2$$

$$C_L(0 \text{ dB}) = \frac{S_{22}^*}{1 + |S_{22}|^2} \text{ e } R_L(0 \text{ dB}) = \frac{|S_{22}|}{1 + |S_{22}|^2}$$

$$|C_L(0 \text{ dB})| = \left| \frac{S_{22}^*}{1 + |S_{22}|^2} \right| = \frac{|S_{22}^*|}{1 + |S_{22}|^2} = \frac{|S_{22}|}{1 + |S_{22}|^2}$$

A distância da origem da carta até o centro  
é igual ao raio  $\rightarrow$  o círculo de 0 dB passa pelo centro

# Círculo de ganho constante no plano complexo



$$\Gamma_i = U_i + jV_i \quad (i = S; L)$$

$$S_{ii} = A_{ii} + jB_{ii} \quad (ii = 11; 22)$$

$$U_C = \frac{g_i A_{ii}}{1 - (1 - g_i) |S_{ii}|^2}$$

$$V_C = \frac{-g_i B_{ii}}{1 - (1 - g_i) |S_{ii}|^2}$$

$$d_i = \sqrt{U_C^2 + V_C^2} = \frac{g_i |S_{ii}|}{1 - (1 - g_i) |S_{ii}|^2}$$

$$R_i = \frac{\sqrt{1 - g_i} (1 - |S_{ii}|^2)}{1 - (1 - g_i) |S_{ii}|^2}$$

$$\alpha_i = \text{tg}^{-1} \left( -\frac{B_{ii}}{A_{ii}} \right)$$



# Desenhar círculos de ganho constante

---

- 1) Localizar  $S_{ii}^*$  ( $ii = 11; 22$ )
- 2) Traçar segmento de reta da origem até  $S_{ii}^*$
- 3) Determinar os valores de  $0 \leq G_i \leq G_{i \max}$  ( $i = S; L$ ) para os círculos a serem desenhados
- 4) Calcular  $g_i = G_i / G_{i \max}$
- 5) Determinar  $d_i$  para cada  $g_i$
- 6) Determinar  $R_i$  para cada  $g_i$

# Exemplo (1)

---

Projetar um amplificador que tenha ganho de 11 dB em 4 GHz.

Desenhar os círculos de ganho constante para  $G_s = 2$  e 3 dB e  $G_L = 0$  e 1 dB.

Calcular e desenhar a perda de retorno e ganho global do amplificador de 3 a 5 GHz.

O sistema é  $50 \Omega$  e os parâmetros S do FET são:

f	$S_{11}$		$S_{21}$		$S_{12}$		$S_{22}$	
(GHz)		fase <sup>(0)</sup>		fase <sup>(0)</sup>	fase <sup>(0)</sup>		fase <sup>(0)</sup>	
3	0,80	-90	2,8	100	0	0,66	-50	
4	0,75	-120	2,5	80	0	0,60	-70	
5	0,71	-140	2,3	60	0	0,58	-85	

Ref.: David M. Pozar, Microwave Engineering, 4ª edição, Wiley, 2011, p. 577, exemplo 12.4

---

## Exemplo (2)

---

Como  $S_{12} = 0$  o transistor é unilateral.

Como  $|\Delta| < 1$  e  $K > 1$  o transistor é I.E.

$$G_{S_{\max}} = \frac{1}{1 - |S_{11}|^2} = 2,29 \rightarrow 3,6 \text{ dB}$$

$$G_{L_{\max}} = \frac{1}{1 - |S_{22}|^2} = 1,56 \rightarrow 1,9 \text{ dB}$$

$$G_0 = |S_{21}|^2 = 6,25 \rightarrow 8,0 \text{ dB}$$

$$G_{TU_{\max}} = 3,6 + 1,9 + 8,0 = 13,5 \text{ dB}$$

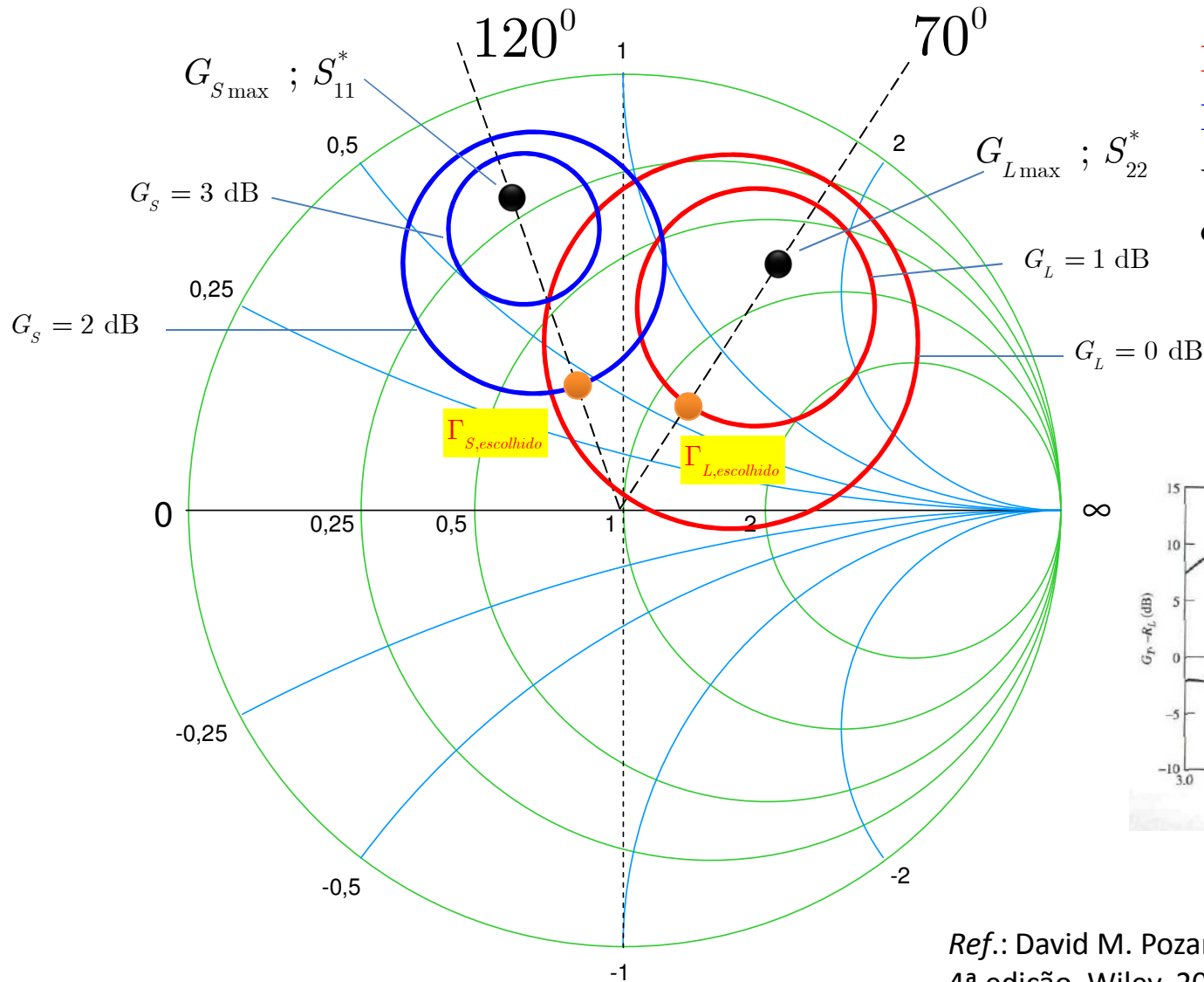
## Exemplo (3)

---

$G_S$	$g_S$	$C_S$		$R_S$
(dB)			fase <sup>(0)</sup>	
3	0,875	0,706	120	0,166
2	0,691	0,627	120	0,294

$G_L$	$g_L$	$C_L$		$R_L$
(dB)			fase <sup>(0)</sup>	
1	0,806	0,520	70	0,303
0	0,604	0,440	70	0,404

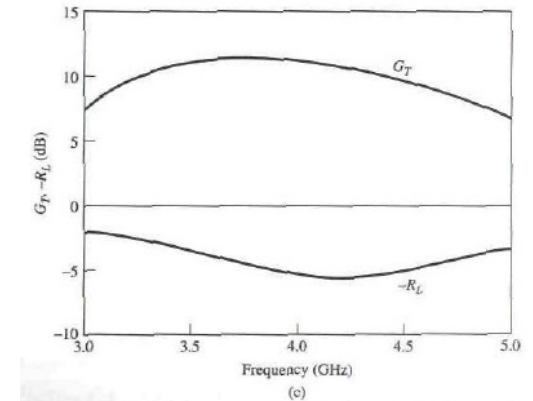
# Exemplo (4)



$$\Gamma_{S, \text{ escolhido}} = 0,33 \angle 120^\circ$$

$$\Gamma_{L, \text{ escolhido}} = 0,22 \angle 70^\circ$$

valores próximos do centro da carta



Ref.: David M. Pozar, Microwave Engineering, 4ª edição, Wiley, 2011, p. 577, exemplo 12.4

# Exemplo (5)

