

CAP. 3

REALIMENTAÇÃO

INTRODUÇÃO

Realimentação: uma “amostra” do sinal de saída é incorporada à entrada

Realimentação: {
Positiva (regenerativa)
Negativa (degenerativa)

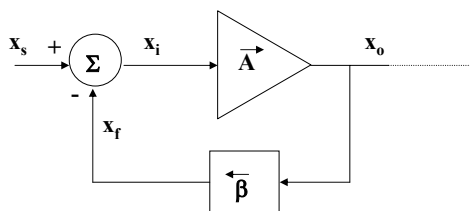
Vantagens da realimentação negativa

- Estabilização do ganho
- Redução da distorção não linear
- Redução do efeito do ruído
- Controle das impedâncias de entrada e saída
- Extensão da largura de banda

Desvantagens da realimentação negativa

- Diminuição do ganho
- Tendência à oscilação

3.1 ESTRUTURA GERAL DA REALIMENTAÇÃO



β : fator de realimentação
A: ganho do amplificador

$$x_i = x_s - x_f$$

$$x_o = Ax$$

$$x_f = \beta x_o$$

$$A_f = \frac{x_o}{x_s} = \frac{A}{1 + A\beta}$$

$A\beta$ = ganho de malha

$1 + A\beta$ = quantidade de realimentação

A_f = ganho de malha fechada

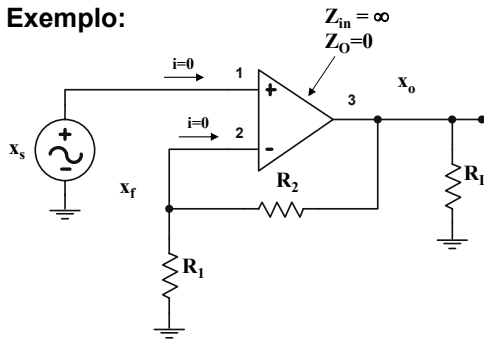
Se $A\beta \gg 1 \rightarrow A_f \approx 1/\beta$

O ganho é totalmente determinado pelo elo de realimentação

$$x_f = \beta x_o \rightarrow x_f = \frac{A\beta}{1 + A\beta} x_s$$

Se $A\beta \gg 1 \rightarrow x_f \approx x_s$ (x_f é uma réplica de x_s .)

Exemplo:

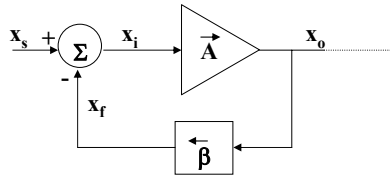


$$\beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$A_f = \frac{A}{1 + A\beta} = \frac{A}{1 + \frac{AR_1}{R_1 + R_2}}$$

$$A\beta = A \frac{R_1}{R_1 + R_2} \gg 1 \rightarrow$$

$$A_f \approx 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

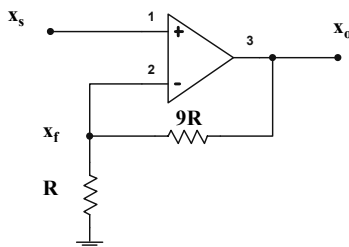


3.2 ALGUMAS PROPRIEDADES DA REALIMENTAÇÃO NEGATIVA

a) Dessensibilidade do ganho

$$A_f = \frac{A}{1 + A\beta} ; \quad \frac{dA_f}{A_f} = \frac{1}{1 + A\beta} \cdot \frac{dA}{A}$$

Exemplo

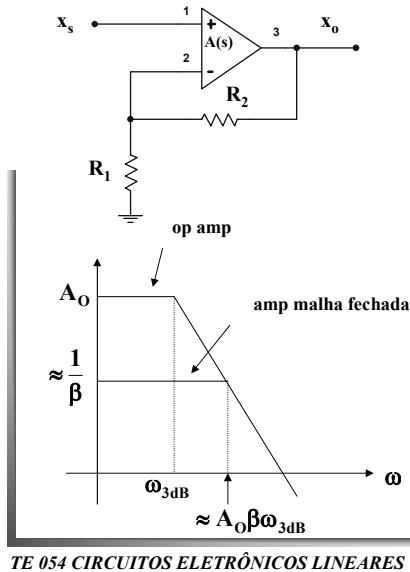


$$A = 10000$$

$$\beta = 0.1$$

$$\frac{dA_f}{A_f} = \frac{1}{1 + 10^3} \cdot \frac{dA}{A} \approx 10^{-3} \left(\frac{dA}{A} \right)$$

b) Extensão da largura de banda



$$A(s) = \frac{A_0}{1 + s/\omega_{3dB}}$$

$$A_f = \frac{A}{1 + A\beta} \quad A_r = \frac{A_0}{1 + A_0\beta + s/\omega_{3dB}}$$

$$A_f = \frac{A_0/(1 + A_0\beta)}{1 + s/\omega_{3dBf}}$$

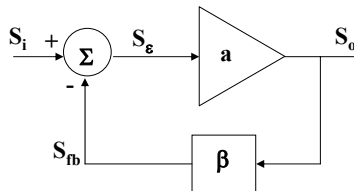
$$\omega_{3dBf} = (1 + A_0\beta)\omega_{3dB} \approx A_0\beta\omega_{3dB}$$

ω_{3dBf} **Frequência de corte do amplificador realimentado**

ω_{3dB} **Frequência de corte do amp. op.**

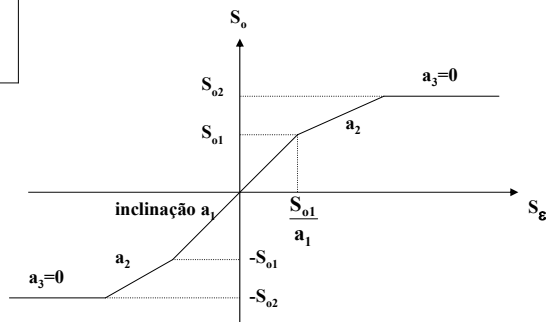
7

c) Redução na distorção



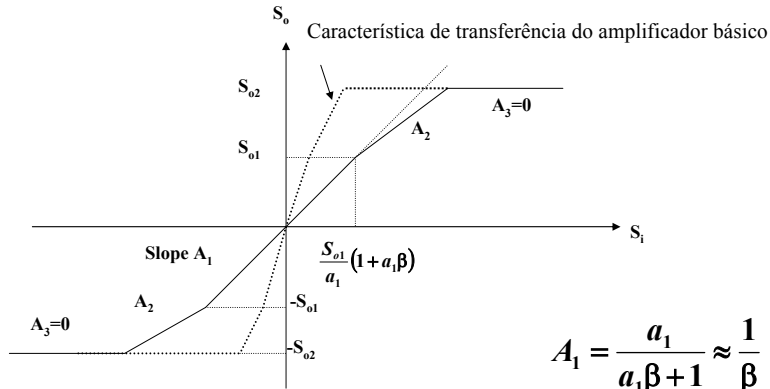
$$A_f = \frac{a}{1 + a\beta}$$

$$\frac{S_o}{S_i} = A_f$$



Característica de transferência do amplificador básico

8



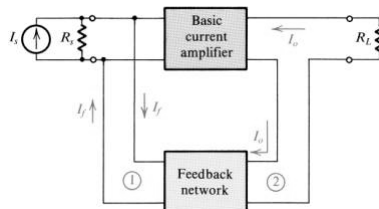
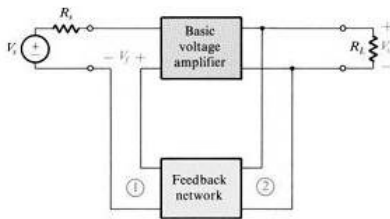
$$A_1 = \frac{a_1}{a_1 \beta + 1} \approx \frac{1}{\beta}$$

$$A_2 = \frac{a_2}{a_2 \beta + 1} \approx \frac{1}{\beta}$$

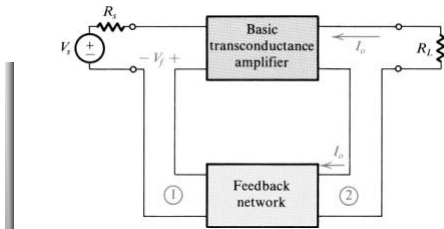
3.3 AS QUATRO TOPOLOGIAS BÁSICAS DA REALIMENTAÇÃO

a) Realimentação série-paralelo

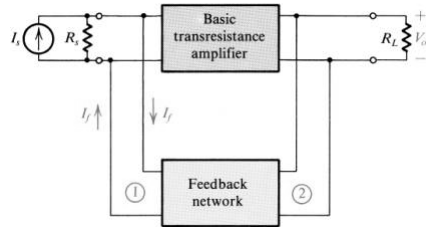
b) Realimentação paralelo-série



c) Realimentação série-série

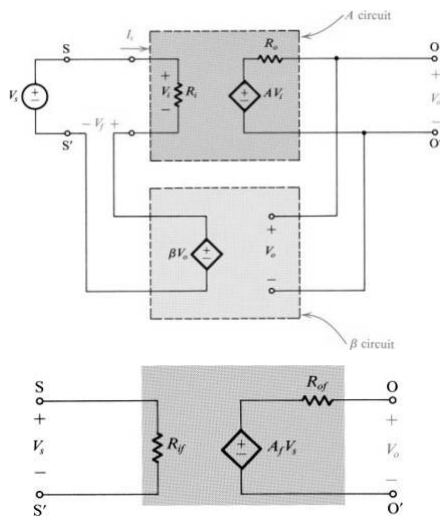


d) Realimentação paralelo-paralelo



3.4 AMPLIFICADOR COM REALIMENTAÇÃO SÉRIE-PARALELO

Situação ideal



$$A_f = \frac{A}{1 + A\beta}$$

$$R_{if} = R_i(1 + A\beta)$$

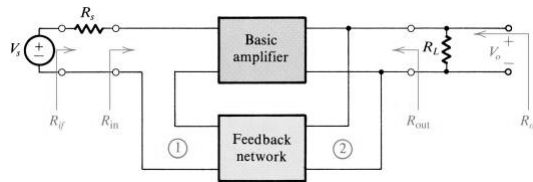
$$Z_{if}(s) = Z_i(s)[1 + A(s)\beta(s)]$$

$$R_{of} = R_o/(1 + A\beta)$$

$$Z_{of}(s) = Z_o(s)/[1 + A(s)\beta(s)]$$

Situação real:

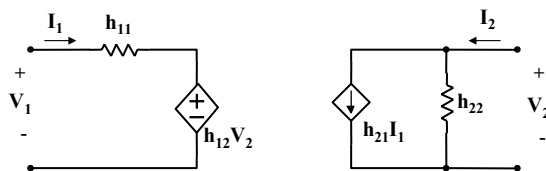
- a malha de realimentação carrega o amplificador básico
- a malha de realimentação afeta os valores de A , R_i , e R_o
- considerar o efeito de R_s e R_L



Problema: Determinar o circuito A e o circuito β

Parâmetros h são adequados para representar a rede de realimentação pois as variáveis independentes são a corrente de entrada e a tensão de saída

Parâmetros h



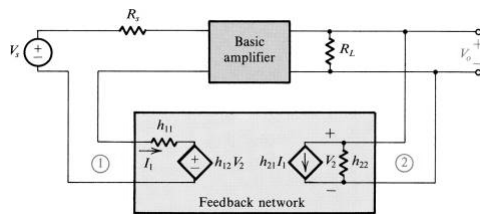
$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ V_2 \end{bmatrix}$$

$$h_{11} = \left. \frac{V_1}{I_1} \right|_{V_2=0} \quad h_{21} = \left. \frac{I_2}{I_1} \right|_{V_2=0}$$

$$h_{12} = \left. \frac{V_1}{V_2} \right|_{I_1=0} \quad h_{22} = \left. \frac{I_2}{V_2} \right|_{I_1=0}$$

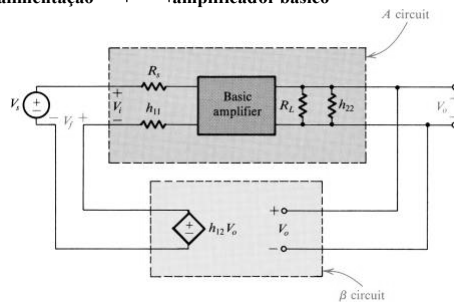
Nota:

h_{11} : V/A impedância de entrada
 h_{22} : A/V admitância de saída
 h_{12} : V/V ganho de tensão reverso
 h_{21} : A/A ganho de corrente



$|h_{21}|_{\text{malha de realimentação}} \ll |h_{21}|_{\text{amplificador básico}}$

$|h_{12}|_{\text{malha de realimentação}} \gg |h_{12}|_{\text{amplificador básico}}$



Conclusões:

- O efeito de carregamento da malha de realimentação é representado pelos parâmetros h_{11} e h_{22}

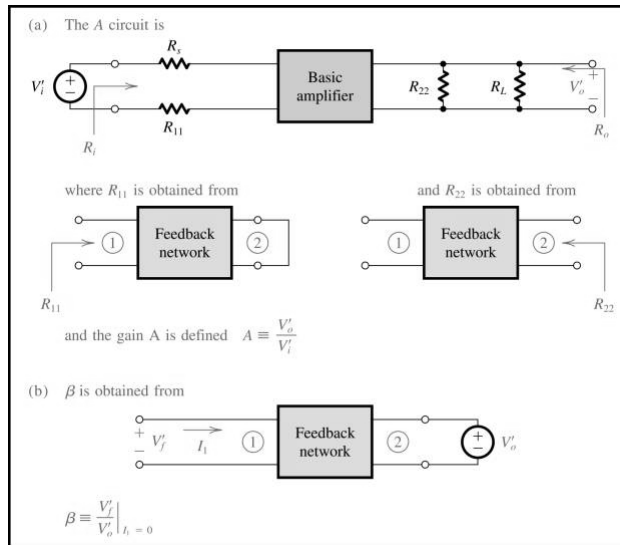
$$\bullet \beta = h_{12} = \frac{V_1}{V_2} \Big|_{I_1=0}$$

Observações:

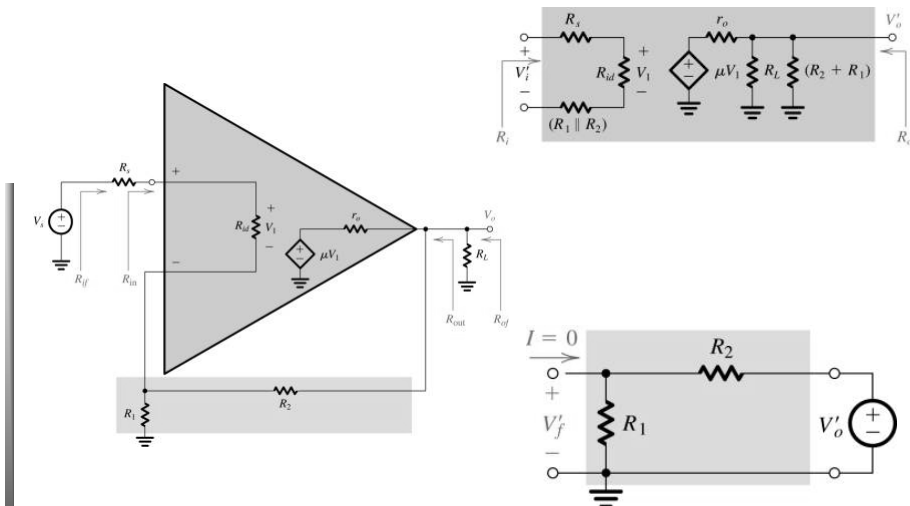
- R_i e R_o são as resistências de entrada e de saída do circuito A
- R_{if} e R_{of} são as resistências de entrada e de saída do amplificador realimentado incluindo R_s e R_L

$$\bullet R_{in} = R_{if} - R_s$$

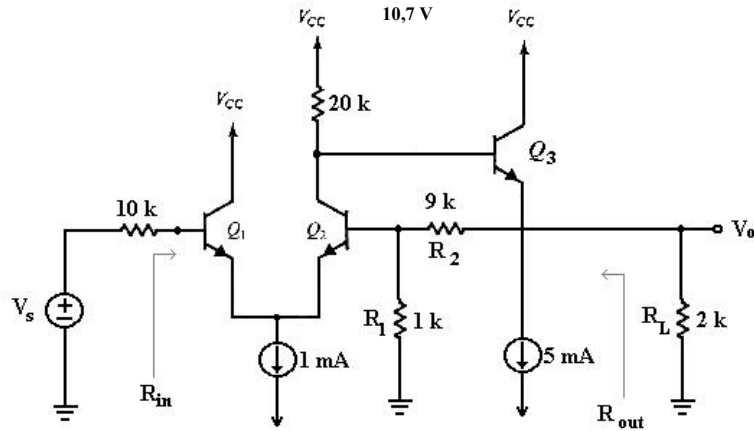
$$\bullet R_{out} = 1 / \left(\frac{1}{R_{of}} - \frac{1}{R_L} \right)$$



Exemplo

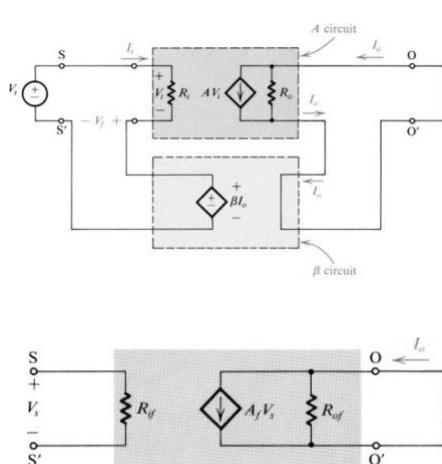


Exemplo: Determinar a corrente CC em cada TBJ, V_O , A , β , A_f , R_{in} , R_{out}



3.5 AMPLIFICADOR COM REALIMENTAÇÃO SÉRIE-SÉRIE

Situação ideal



$$A \equiv \frac{I_o}{V_i}, A \text{ é uma transcondutância}$$

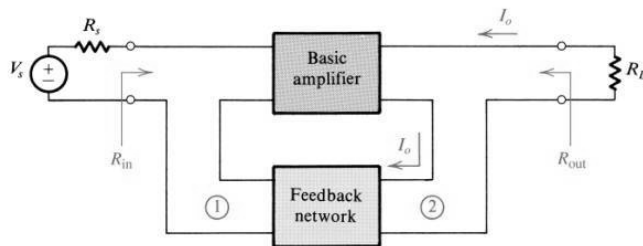
β é uma transresistência

$$A_f \equiv \frac{I_o}{V_s} = \frac{A}{1 + A\beta}$$

$$R_{if} = R_i(1 + A\beta)$$

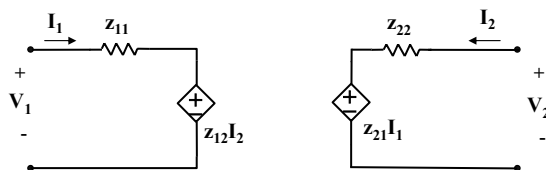
$$R_{of} = R_o(1 + A\beta)$$

Situação real



Parâmetros z são adequados para representar a rede de realimentação pois as variáveis independentes são a corrente de entrada e a corrente de saída

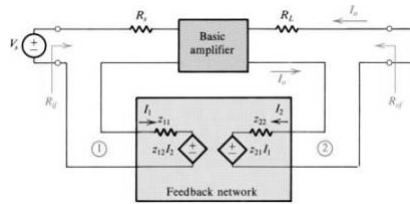
Parâmetros z



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

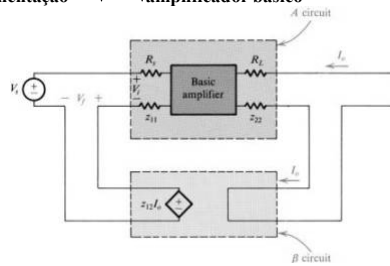
$$z_{11} = \left. \frac{V_1}{I_1} \right|_{I_2=0} \quad z_{21} = \left. \frac{V_2}{I_1} \right|_{I_2=0}$$

$$z_{12} = \left. \frac{V_1}{I_2} \right|_{I_1=0} \quad z_{22} = \left. \frac{V_2}{I_2} \right|_{I_1=0}$$



$|z_{21}|_{\text{malha de realimentação}} \ll |z_{21}|_{\text{amplificador básico}}$

$|z_{12}|_{\text{malha de realimentação}} \gg |z_{12}|_{\text{amplificador básico}}$



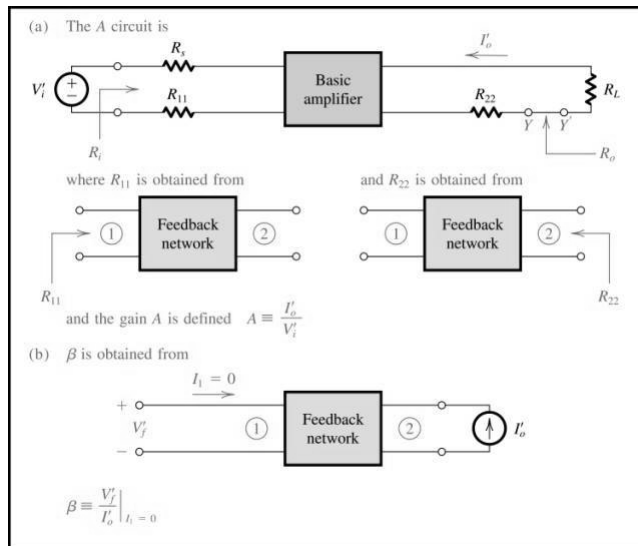
Conclusões:

- O efeito de carregamento da malha de realimentação é representado pelos parâmetros z_{11} e z_{22}

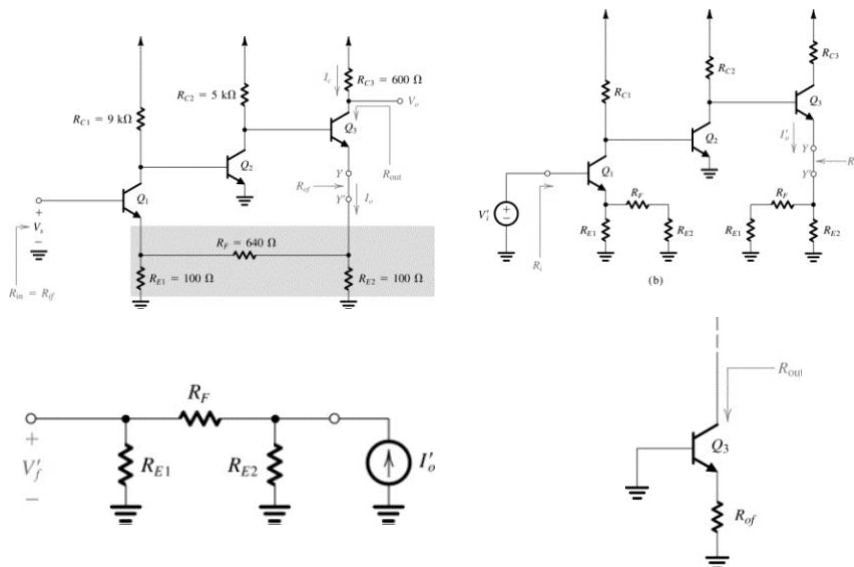
$$\bullet \beta = z_{12} = \frac{V_1}{I_2} \Big|_{I_1=0}$$

Observações:

- R_i e R_o são as resistências de entrada e de saída do circuito A
- R_{if} e R_{of} são as resistências de entrada e de saída do amplificador realimentado incluindo R_s e R_L
- $R_{in} = R_{if} - R_s$
- $R_{out} = R_{of} - R_L$



Exemplo 8.2 (Sedra)

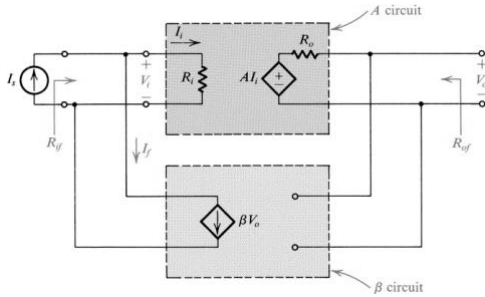


3.6 AMPLIFICADOR COM REALIMENTAÇÃO PARALELO-PARALELO

Situação ideal

$A \equiv \frac{V_o}{I_i}$, A é uma transresistância

β é uma transcondutância

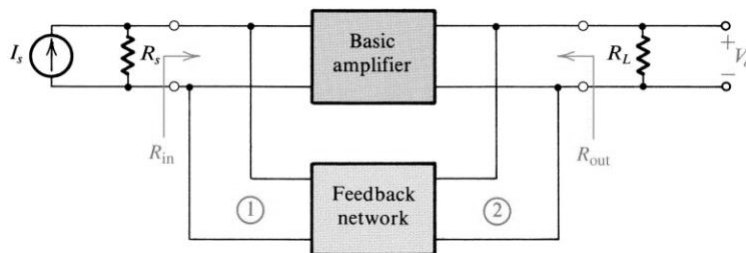


$$A_f \equiv \frac{V_o}{I_s} = \frac{A}{1 + A\beta}$$

$$R_{if} = R_i / (1 + A\beta)$$

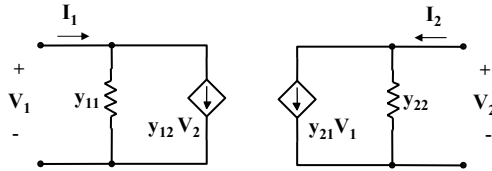
$$R_{of} = R_o / (1 + A\beta)$$

Situação real



Parâmetros y são adequados para representar a rede de realimentação pois as variáveis independentes são a tensão de entrada e a tensão de saída

Parâmetros y



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

$$y_{11} = \left. \frac{I_1}{V_1} \right|_{V_2=0} \quad y_{21} = \left. \frac{I_2}{V_1} \right|_{V_2=0}$$

$$y_{12} = \left. \frac{I_1}{V_2} \right|_{V_1=0} \quad y_{22} = \left. \frac{I_2}{V_2} \right|_{V_1=0}$$

Conclusões:

- O efeito de carregamento da malha de realimentação é representado pelos parâmetros y_{11} e y_{22}

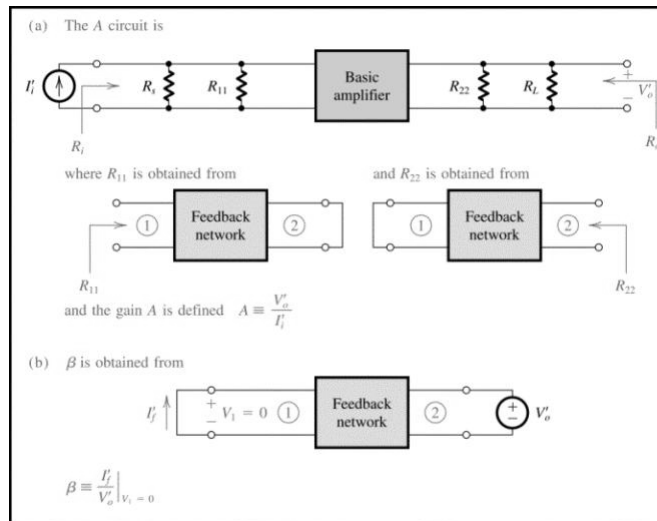
- $\beta = y_{12} = \left. \frac{I_1}{V_2} \right|_{V_1=0}$

Observações:

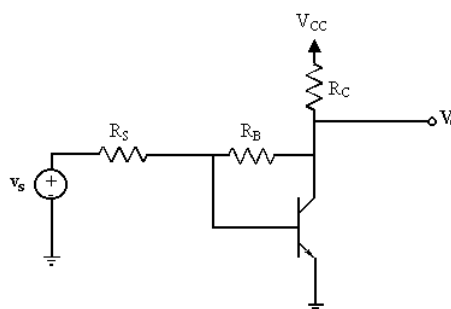
- R_i e R_o são as resistências de entrada e de saída do circuito A
- R_{if} e R_{of} são as resistências de entrada e de saída do amplificador realimentado incluindo R_s e R_L

- $R_{in} = 1 / \left(\frac{1}{R_{if}} - \frac{1}{R_s} \right)$

- $R_{out} = 1 / \left(\frac{1}{R_{of}} - \frac{1}{R_L} \right)$



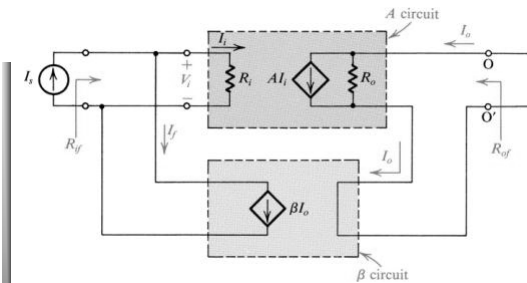
Exemplo 8.3 (Sedra): Determinar o ganho de tensão, R_{in} e R_{out} .



$V_{CC} = 12 \text{ V}$
 $R_C = 4,7 \text{ k}\Omega$
 $R_B = 47 \text{ k}\Omega$
 $R_S = 10 \text{ k}\Omega$

3.7 AMPLIFICADOR COM REALIMENTAÇÃO PARALELO-SÉRIE

Situação ideal

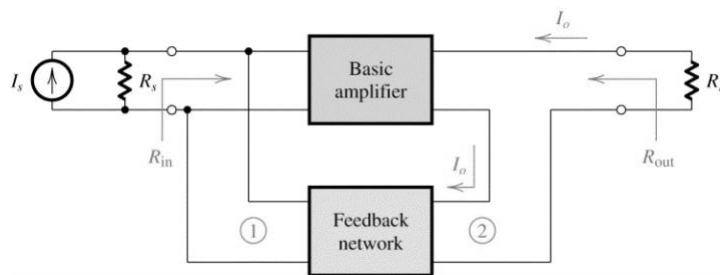


$$A_f \equiv \frac{I_o}{I_s} = \frac{A}{1 + A\beta}$$

$$R_{if} = R_i / (1 + A\beta)$$

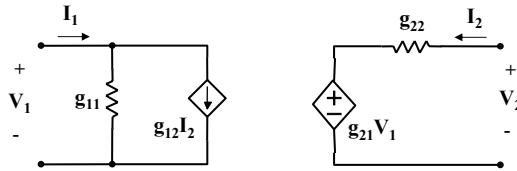
$$R_{of} = R_o (1 + A\beta)$$

Situação real



Parâmetros g são adequados para representar a rede de realimentação pois as variáveis independentes são a tensão de entrada e a corrente de saída

Parâmetros g



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

$$g_{11} = \left. \frac{I_1}{V_1} \right|_{I_2=0} \quad g_{21} = \left. \frac{V_2}{V_1} \right|_{I_2=0}$$

$$g_{12} = \left. \frac{I_1}{I_2} \right|_{V_1=0} \quad g_{22} = \left. \frac{V_2}{I_2} \right|_{V_1=0}$$

Conclusões:

- O efeito de carregamento da malha de realimentação é representado pelos parâmetros g_{11} e g_{22}

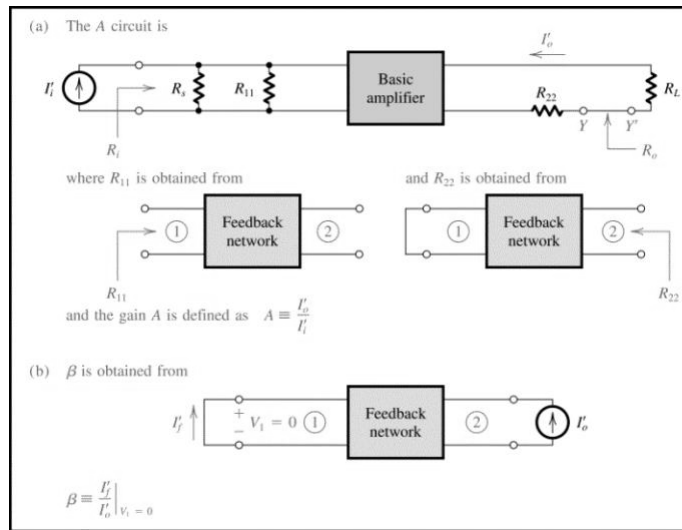
$$\bullet \beta = g_{12} = \left. \frac{I_1}{I_2} \right|_{V_1=0}$$

Observações:

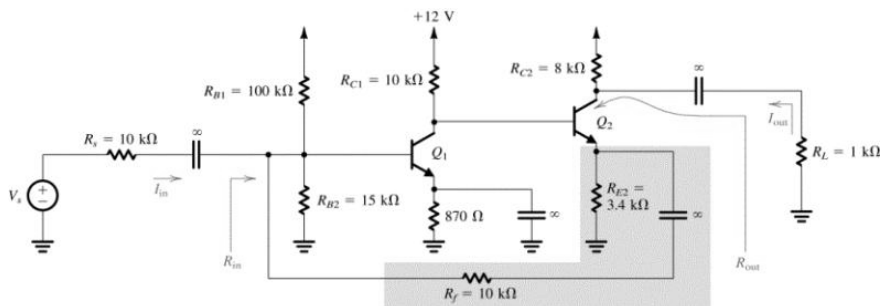
- R_i e R_o são as resistências de entrada e de saída do circuito A
- R_{if} e R_{of} são as resistências de entrada e de saída do amplificador realimentado incluindo R_s e R_L

$$\bullet R_{in} = 1 / \left(\frac{1}{R_{if}} - \frac{1}{R_s} \right)$$

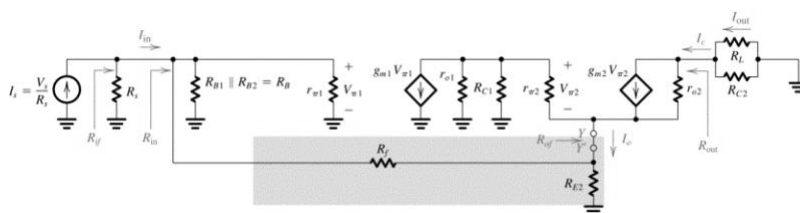
$$\bullet R_{out} = R_{of} - R_L$$



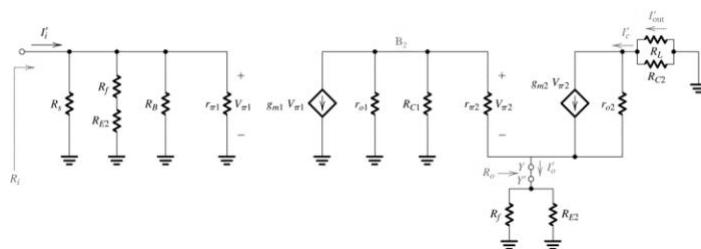
Exemplo 8.4 (Sedra): Determinar o ganho de corrente, R_{in} e R_{out} .



Modelo de pequenos sinais



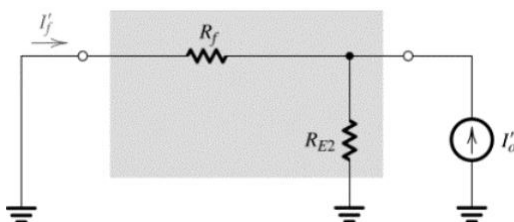
Circuito A



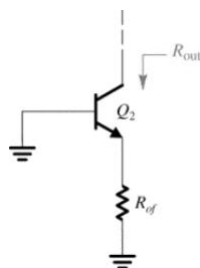
TE 054 CIRCUITOS ELETRÔNICOS LINEARES

39

Circuito para determinar β



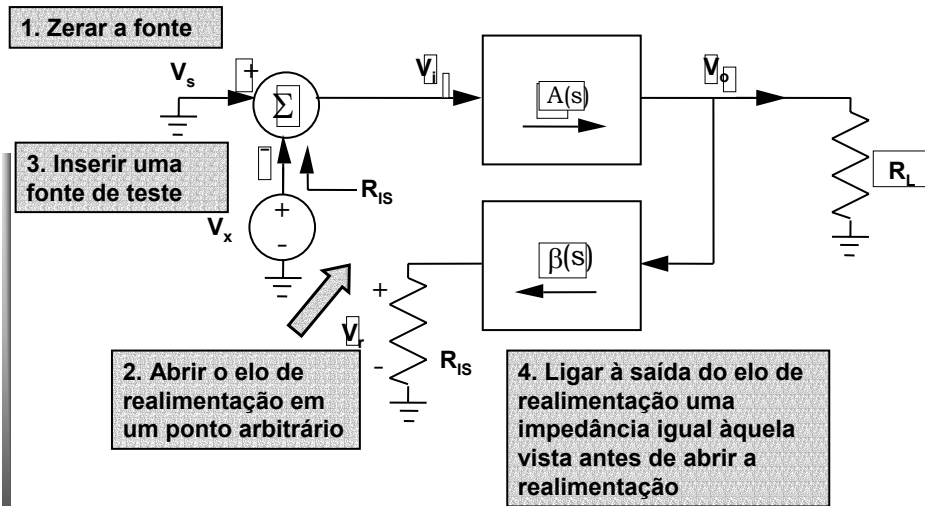
Circuito para determinar R_{out}



TE 054 CIRCUITOS ELETRÔNICOS LINEARES

40

3.8 DETERMINAÇÃO DIRETA DO GANHO DE MALHA



TE 054 CIRCUITOS ELETRÔNICOS LINEARES

41

Análise

$$V_r = \beta V_o$$

$$V_o = -A V_x$$

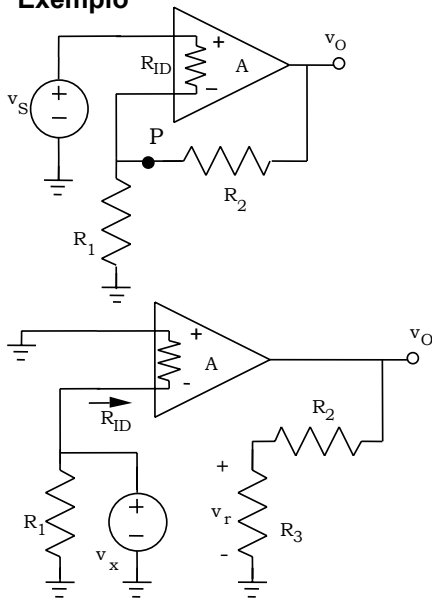
$$V_r = -A\beta V_x$$

$$\text{Ganho de malha } L = -\frac{V_r}{V_x} = A\beta$$

TE 054 CIRCUITOS ELETRÔNICOS LINEARES

42

Exemplo



$$R_3 = R_1 \parallel R_{ID}$$

$$V_r = \frac{R_3}{R_2 + R_3} V_o$$

$$V_r = \frac{R_3}{R_2 + R_3} (-AV_x)$$

$$L = -\frac{V_r}{V_x} = \frac{R_3}{R_2 + R_3} A$$

3.9 ESTABILIDADE

Função de transferência de malha fechada

$$A_f(s) = \frac{A(s)}{1 + A(s)\beta(s)}$$

Hipóteses:

- ganho CC constante
- pólos e zeros em altas frequências
- $\beta(s)$ constante em baixas frequências
- $A(s)\beta(s)$ constante e positivo em baixas frequências

ANÁLISE EM ALTAS FREQUÊNCIAS

Em regime permanente senoidal $A_f(j\omega) = \frac{A(j\omega)}{1 + A(j\omega)\beta(j\omega)}$

Ganho de malha $L(j\omega) = A(j\omega)\beta(j\omega) = |A(j\omega)\beta(j\omega)|e^{j\phi(\omega)}$

A estabilidade do amplificador realimentado é determinada pelo modo como o ganho de malha varia com a frequência

ω_{180} : Frequência na qual a fase é 180°

$L(j\omega_{180})$ é um número real negativo $\Rightarrow$ Realimentação positiva

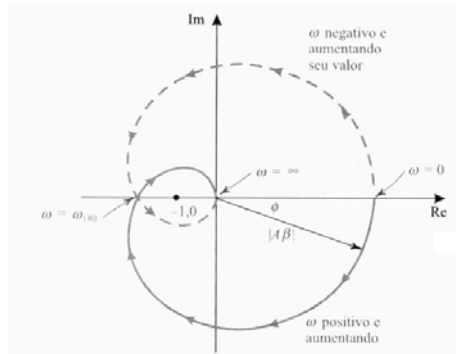
$|L(j\omega_{180})| < 1 \Rightarrow |A_f(j\omega)| > |A(j\omega)|$ Ainda estável

$|L(j\omega_{180})| = 1 \Rightarrow |A_f(j\omega)| = \infty$ Oscilação sustentada em ω_{180}

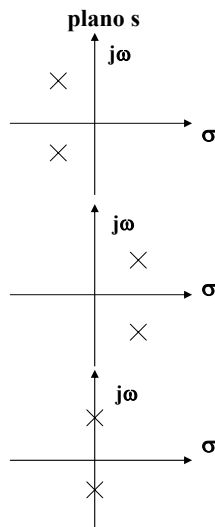
$|L(j\omega_{180})| > 1$ Oscilação com amplitude crescente

DIAGRAMA DE NYQUIST

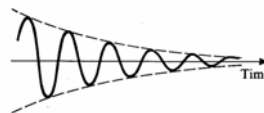
Gráfico polar de $L(j\omega)$ com a frequência como parâmetro



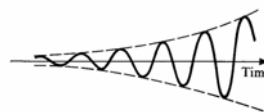
3.10 O EFEITO DA REALIMENTAÇÃO SOBRE OS PÓLOS



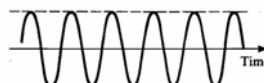
$$v(t) = v_0 e^{\sigma_0 t} \cos \omega_n t$$



(a)



(b)



(c)

Os pólos de um amplificador realimentado são as raízes de sua equação característica:

$$1 + A(s)\beta(s) = 0$$

AMPLIFICADORES COM PÓLO SIMPLES

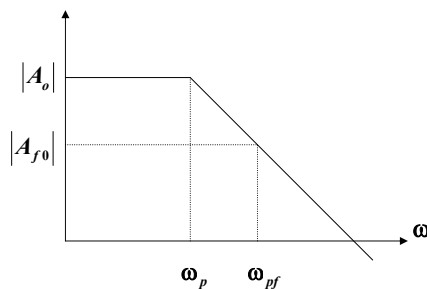
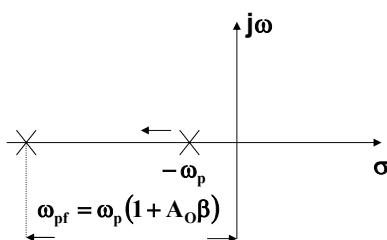
$$A(s) = \frac{A_0}{1 + s/\omega_p}$$

$$A_f(s) = \frac{A_0/(1 + A_0\beta)}{1 + s/\omega_p(1 + A_0\beta)}$$

$$\omega_{pf} = \omega_p(1 + A_0\beta)$$

Graficamente

Lugar das raízes
plano s



AMPLIFICADORES COM DOIS PÓLOS

$$A(s) = \frac{A_0}{(1 + s/\omega_{p1})(1 + s/\omega_{p2})}$$

Equação característica

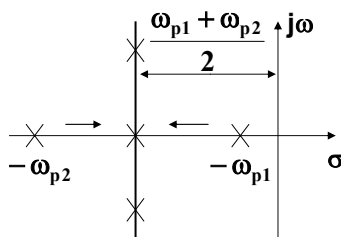
$$1 + A(s)\beta = 0$$

$$s^2 + s(\omega_{p1} + \omega_{p2}) + (1 + A_0\beta)\omega_{p1}\omega_{p2} = 0$$

Os pólos de malha fechada são dados por

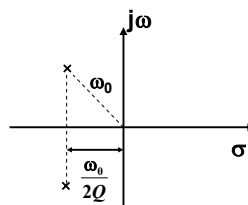
$$s = -\frac{1}{2}(\omega_{p1} + \omega_{p2}) \pm \frac{1}{2}\sqrt{(\omega_{p1} + \omega_{p2})^2 - 4(1 + A_0\beta)\omega_{p1}\omega_{p2}}$$

Lugar das raízes

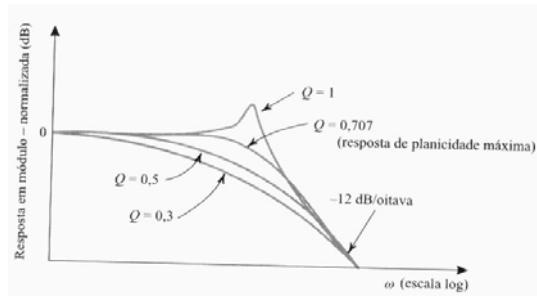


Forma da equação característica

$$s^2 + s \frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2 = 0$$



Módulo da resposta em frequência



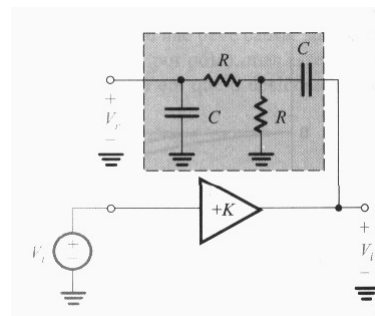
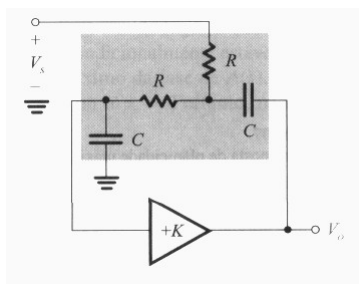
$$Q = \frac{\sqrt{(1 + A_0\beta)\omega_{p1}\omega_{p2}}}{\omega_{p1} + \omega_{p2}}$$

$Q < 0.5 \rightarrow$ pólos reais

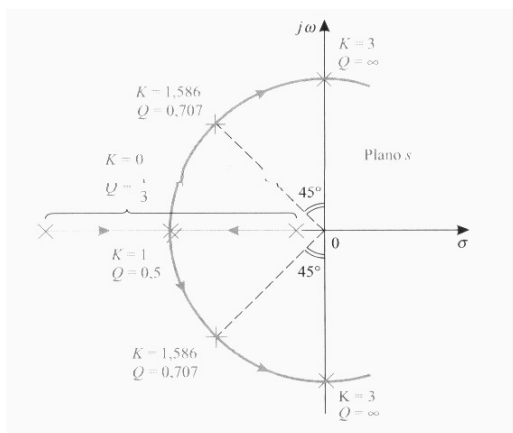
$Q = 0.5 \rightarrow$ pólos reais e iguais

$Q > 0.5 \rightarrow$ pólos complexos conjugados

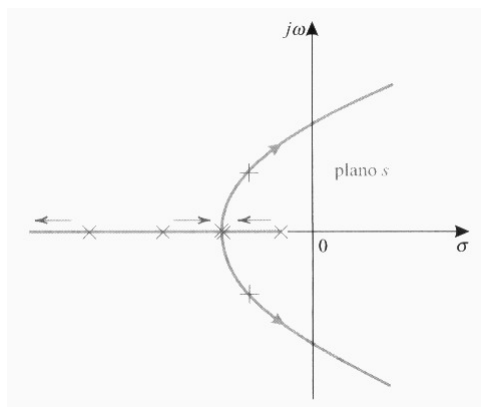
Exemplo 8.5 (Sedra)



Lugar das raízes

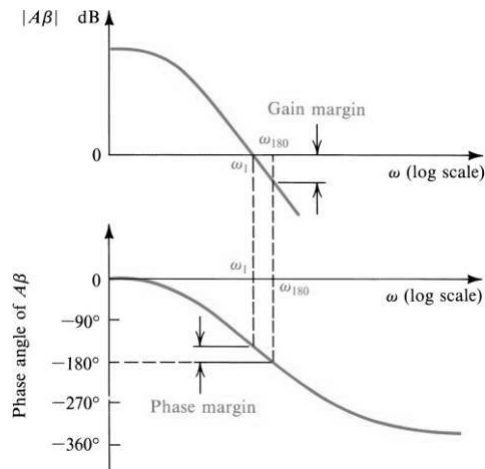


AMPLIFICADORES COM TRÊS OU MAIS PÓLOS



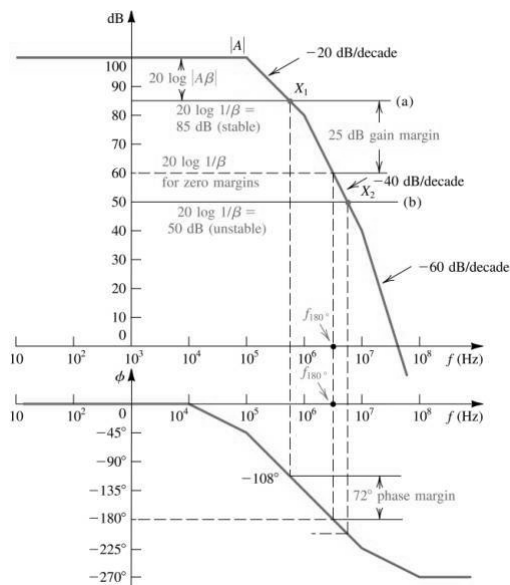
3.11 ESTABILIDADE USANDO AS CURVAS DE BODE

Margens de ganho e de fase



TE 054 CIRCUITOS ELETRÔNICOS LINEARES

57



TE 054 CIRCUITOS ELETRÔNICOS LINEARES

58

3.12 COMPENSAÇÃO EM FREQUÊNCIA

