



 UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESCOLA DE ENGENHARIA

UFMG

# ELT085 - Circuitos Eletrônicos Analógicos

Prof. Dr. Thiago de Oliveira  
Departamento de Eng. Eletrônica

 **g**ep  
GRUPO DE ELETRÔNICA  
DE POTÊNCIA DA UFMG




 UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESCOLA DE ENGENHARIA

UFMG

# Parte IV:

## Realimentação


 **g**ep  
GRUPO DE ELETRÔNICA  
DE POTÊNCIA DA UFMG



## Realimentação Negativa

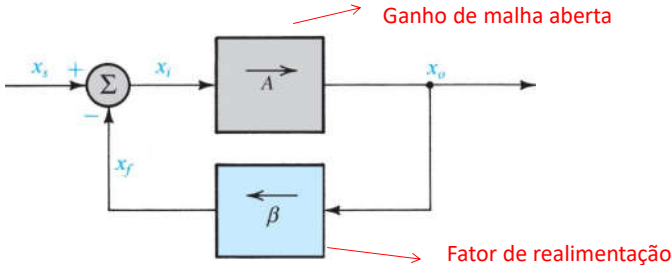
- A realimentação negativa de amplificadores traz algumas vantagens:
  - Fazer o ganho do circuito menos sensível à variação de parâmetros;
  - Reduzir distorção;
  - Reduzir o efeito de ruídos;
  - Controlar as impedâncias de entrada e saída;
  - Expandir a banda passante do circuito;
- Essas vantagens normalmente são atingidas ao custo de se ter uma redução do ganho do amplificador.

3




## Realimentação Negativa

- Estrutura de um circuito realimentado:



- Assume-se que a malha de realimentação não gera efeito de carga;
- A realimentação não altera o ganho de malha aberta;

4



**Definições**

- Ganho de malha fechada

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


- $A\beta$  é chamado o ganho de malha (*loop gain*);
- $(1 + A\beta)$  é chamado de “quantidade de realimentação”

$$A\beta \gg 1 \rightarrow A_f \approx \frac{1}{\beta}$$

$$x_i = x_s - x_f = \frac{x_s}{1 + A\beta} \approx 0, \text{ se } A\beta \gg 1$$

- Um alto ganho de malha faz com que o ganho de malha fechada seja determinado pela realimentação.
- Maior precisão;
- Equivalência entre os sinais de entrada: Curto-virtual

5



**Definições**

- Ganho de malha ( $A\beta$ )

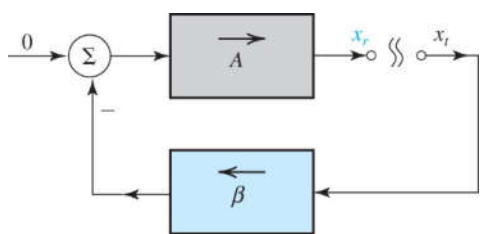
- A polaridade do ganho de malha irá determinar o tipo de realimentação (positiva ou negativa);
- As melhorias trazidas pela realimentação dependem do valor do ganho de malha, quanto maior, mais ideal se mostra o amplificador;
- Como o ganho de malha varia com a frequência, pode haver regiões onde o amplificador se torna instável, demandando técnicas que ajustem o ganho de malha com a frequência;

6

**gpe**  
GRUPO DE ELETRÔNICA  
DE POTÊNCIA DA UFMG

### Como determinar o ganho de malha

- Determinando o ganho de malha de forma explícita



OBS: A abertura da malha não deve provocar alteração em  $A$  ou  $\beta$

- Zere a entrada;
- Abra a realimentação na saída do circuito;
- Aplique o sinal externo  $x_t$ ;
- Calcule o ganho de malha como  $A\beta = -\frac{x_r}{x_t}$

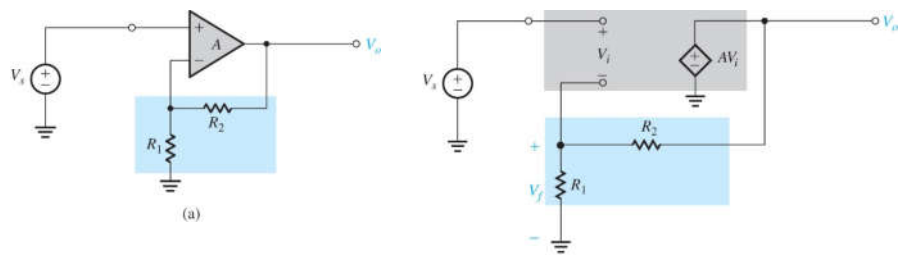
7

**gpe**  
GRUPO DE ELETRÔNICA  
DE POTÊNCIA DA UFMG

### Exemplo

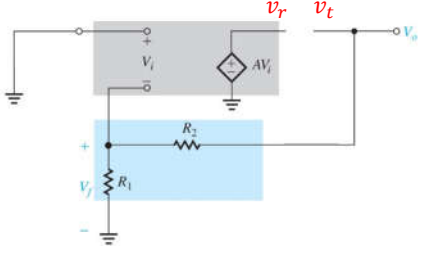
- Analisar o circuito não-inversor

- Projetar para  $A_f = 10 \text{ v/v}$ ;  $A = 100 \text{ kv/v}$ ;
- Levantar o fator de realimentação e o ganho de malha;
- Calcular o erro de tensão;
- Verificar a sensibilidade do ganho à variação de  $A$ ;



(a) (b)

**gpe**  
GRUPO DE ELETRÔNICA  
DE POTÊNCIA DA UFMG



**Exemplo**

- Analisar o circuito não-inversor

$$v_r = Av_i = -\frac{AR_1}{R_1 + R_2} v_t$$

$$A\beta = -\frac{v_r}{v_t} = A \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$


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

$$v_f = \frac{v_t R_1}{R_1 + R_2} \rightarrow \beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$v_i = 0 - v_f$$

9

**gpe**  
GRUPO DE ELETRÔNICA  
DE POTÊNCIA DA UFMG



**Efeito da Malha fechada**

- Desensibilizando o ganho de malha fechada

$$A_f = \frac{A}{1 + A\beta} \longrightarrow \partial A_f = \partial \frac{A}{1 + A\beta} = \frac{\partial A (1 + A\beta) - A\beta \partial A}{(1 + A\beta)^2}$$

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

- Uma variação do ganho de malha aberta será reduzida pela quantidade de realimentação em malha fechada;
- Torna o ganho menos sensível a perturbações no ganho de malha aberta.
- Ex:  $A = 100, \beta = 0.1 \rightarrow A_f = 9,09$ ;  $A = 80, \beta = 0.1 \rightarrow A_f = 9,0$ .
- i.e, uma redução de 20% em A, provocou uma redução de 0,99% em Af.

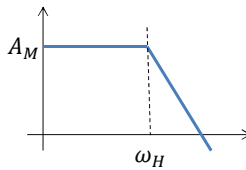
10

**gpe**  
GRUPO DE ELETRÔNICA  
DE POTÊNCIA DA UFMG

### Efeito da Malha fechada

- Expansão da banda passante:
  - Assuma que o ganho  $A(s)$  pode ser descrito como um passa-baixas de primeira ordem:

$$A(s) = \frac{A_M}{1 + s/\omega_H} \longrightarrow A_f(s) = \frac{A(s)}{1 + A(s)\beta}$$

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


$$\omega_{Hf} = \omega_H(1 + A_M\beta)$$

De forma semelhante, pode-se mostrar:

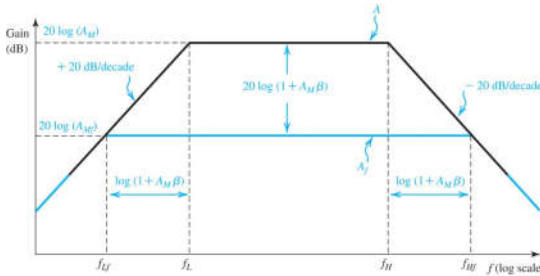
$$\omega_{Lf} = \frac{\omega_L}{1 + A_M\beta}$$

11

**gpe**  
GRUPO DE ELETRÔNICA  
DE POTÊNCIA DA UFMG

### Efeito da Malha fechada

- Comportamento da malha fechada





$$f_{Lr} = \frac{f_L}{1 + A_M\beta}$$

$$A_M = \frac{A_M}{1 + A_M\beta}$$

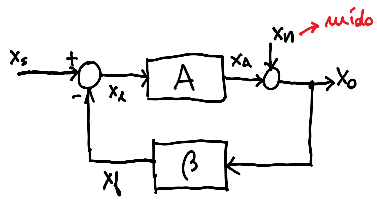
$$f_{Hr} = f_H(1 + A_M\beta)$$

12

### Efeito da Malha fechada

- Sensibilidade a ruído:
  - Não funciona para todo ruído;
  - Caso o ruído seja captado na entrada do circuito, não há que fazer;
  - Caso ele seja captado em algum ponto da malha, pode haver significativa redução.
- Ex: Ruído na saída do circuito





$$x_o = x_n + Ax_i$$

$$x_i = x_s - \beta x_o$$

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

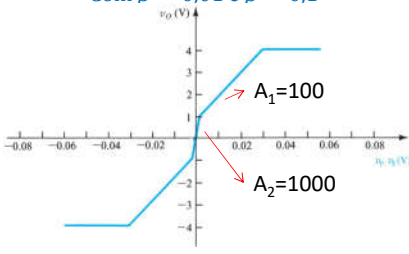
Influência do ruído é reduzida

13

### Efeito da Malha fechada

- Redução de distorção - Ex:
  - Considere um amplificador com uma característica de transferência não linear, que provocará distorção no sinal de saída.
  - Com  $\beta = 0,01$  e  $\beta = 0,1$



- Pode-se separar a região de ganho em duas partes.
- Calculando o ganho em malha fechada:

$$A_{f1} = \frac{A_1}{1 + A_1\beta} \begin{cases} \rightarrow A_{f1} |_{\beta=0,01} = 50 \\ \rightarrow A_{f1} |_{\beta=0,1} = 9,09 \end{cases}$$

$$A_{f2} = \frac{A_2}{1 + A_2\beta} \begin{cases} \rightarrow A_{f2} |_{\beta=0,01} = 90 \\ \rightarrow A_{f2} |_{\beta=0,1} = 9,9 \end{cases}$$

Amplificador original: Razão de ganhos = 10;  
 Amplificador realimentado com  $\beta = 0,01$ : Razão de ganhos = 1,8  
 Amplificador realimentado com  $\beta = 0,1$ : Razão de ganhos = 1,09

↓ Linearização

14






### Definições de Amplificadores Realimentados

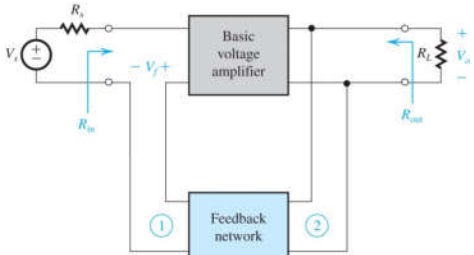
- Tipos de amplificadores
  - Tensão – Entrada V e Saída V;
  - Corrente – Entrada I e Saída I;
  - Transcondutância – Entrada V e saída I;
  - Transresistência – Entrada I e Saída V;
- A realimentação definirá que tipo de amplificador se terá;
- A classificação das malhas de realimentação dependem do tipo de amplificador desejado.

15




### Definições de Amplificadores Realimentados

- Amplificador Série-Paralelo: Amplificador de tensão
  - Como atua a realimentação em um amplificador de tensão?
    - Medição de uma amostra do sinal de tensão de saída – feito de forma shunt (paralela);
    - Alteração da tensão de entrada do amplificador – Como a fonte é modelada por seu equivalente thevenin, deve-se adicionar uma tensão em série com ela para afetar  $V_i$ ;
  - Logo se faz uma entrada **Série** e saída **Paralelo**, i.e., uma realimentação Série-Paralelo deve ser empregada ao se construir um **amplificador de tensão**;



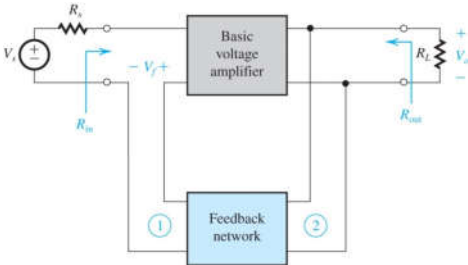
16





### Definições de Amplificadores Realimentados

- [Amplificador Série-Paralelo: Amplificador de tensão](#)




$$v_i \approx v_s - v_f$$

**Observações úteis:**

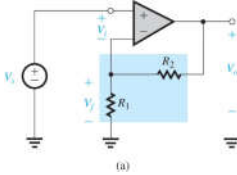
- O efeito da realimentação reduz  $V_i$ , elevando a  $R_{in}$ ;
- A realimentação reduz a sensibilidade da tensão de saída a variações, reduzindo  $R_{out}$ ;

17

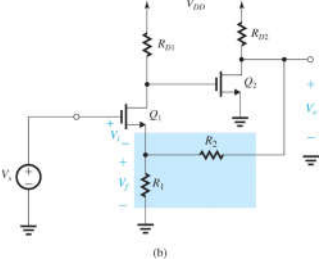


### Definições de Amplificadores Realimentados

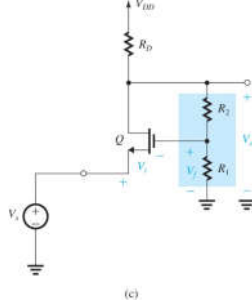
- [Amplificador Série-Paralelo: Amplificador de tensão](#)
  - Exemplos de circuitos Série-paralelo



(a)




(b)



(c)


18



### Amplificador Série-Paralelo

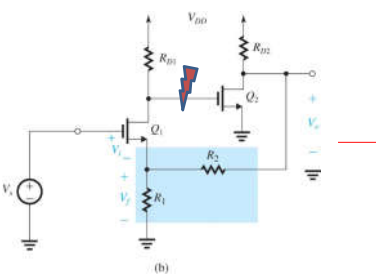
- Como analisar o ganho de malha?
  - Considerando que a malha de realimentação possa ser aberta sem alterar  $A$  e  $\beta$ , pode-se utilizar o método de definição do ganho de malha feito anteriormente;
  - **Metodologia:**
    - Identifique a malha de realimentação e defina  $\beta$ ;
    - Defina o ganho ideal  $A_f = 1/\beta$  e utilize-o como limite superior para a sua análise;
    - Use o método de cálculo de  $A\beta = -x_r/x_t$  previamente descrito. Escolha um ponto de abertura da malha que não afete os ganhos;
    - Calcule os demais parâmetros do circuito;

19



### Amplificador Série-Paralelo

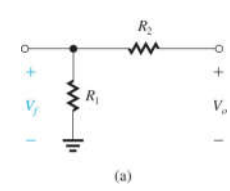
- Como analisar o ganho de malha? - Exemplo



(b)

Realimentação

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



(a)

20

**gpe**  
GRUPO DE ELETRÔNICA  
DE POTÊNCIA DA UFMG

### Amplificador Série-Paralelo

- Como analisar o ganho de malha? - Exemplo

Realimentação

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

$$A\beta = -\frac{v_r}{v_t} = \frac{(R_{D1}g_{m1})(R_{D2}g_{m2})\left(R_1 \parallel \frac{1}{g_{m1}}\right)}{R_{D2} + R_2 + R_1 \parallel \frac{1}{g_{m1}}}$$

$$i_{d2} = g_{m2}v_t$$

$$i_1 = -\frac{i_{d2}R_{D2}}{R_{D2} + R_2 + R_1 \parallel \frac{1}{g_{m1}}}$$

$$i_{d1} = \frac{i_1 R_1}{R_1 + \frac{1}{g_{m1}}}$$

$$v_r = i_{d1}R_{D1}$$

21

**gpe**  
GRUPO DE ELETRÔNICA  
DE POTÊNCIA DA UFMG

### Amplificador Série-Paralelo

- Como analisar o ganho de malha?
  - Nem sempre é possível encontrar um ponto de abertura da malha que não altere os valores de A e  $\beta$ ;
  - A análise anterior não explicita os valores de Rin e Rout;
  - Outros métodos mais genéricos podem ser utilizados.
- **Análise Sistemática:**
  - Busca separar o amplificador em um circuito A e um circuito  $\beta$ ;
  - Incorpora-se no circuito A a influência da realimentação, e.g., efeito de carga, impedância de entrada, etc;
  - Calcula-se os ganhos separadamente;
  - Definições sobre Rin e Rout podem ser feitas de forma simplificada

22

**gpe**  
GRUPO DE ELETRÔNICA  
DE POTÊNCIA DA UFMG

### Amplificador Série-Paralelo

- Análise sistemática – Caso Ideal (Realimentação ideal)

• A realimentação não afeta o circuito A;

$$v_i = v_s - v_f$$

$$v_f = \beta v_o$$

$$v_o = \frac{A}{1 + A\beta} v_o \quad v_i = \frac{v_s}{1 + A\beta}$$

$$R_{if} = \frac{v_s}{i_i} \rightarrow i_i = \frac{v_i}{R_i}$$

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

23

**gpe**  
GRUPO DE ELETRÔNICA  
DE POTÊNCIA DA UFMG

### Amplificador Série-Paralelo

- Análise sistemática – Caso Ideal (Realimentação ideal)

$$v_i = 0 - v_f$$

$$v_f = \beta v_x = -v_i$$

$$i_x = \frac{v_x - Av_i}{R_o} = \frac{1 + A\beta}{R_o} v_x$$

$$R_{of} = \frac{v_x}{i_x} = \frac{R_o}{1 + A\beta}$$

24

**gpe**  
GRUPO DE ELETRÔNICA  
DE POTÊNCIA DA UFMG

### Amplificador Série-Paralelo

- Análise sistemática – Caso Prático
  - Considerando um circuito mais realista

(a)

- A realimentação real pode ser modelada como um quadripolo:

(1)  $f+$   $f-$   $V_i$   $R_{11}$   $\beta V_o$   $R_{22}$   $V_o$  (2)

25

**gpe**  
GRUPO DE ELETRÔNICA  
DE POTÊNCIA DA UFMG

### Amplificador Série-Paralelo

- Análise sistemática – Caso Prático
  - Redesenhando o circuito

(b)

- Pode-se incorporar os elementos não-ideais no modelo do circuito A;
- Assim a análise seria igual ao caso ideal já discutido;
- **Obs:**

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

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

26

**gpe**  
GRUPO DE ELETRÔNICA  
DE POTÊNCIA DA UFMG

### Amplificador Série-Paralelo

- Análise sistemática – Caso Prático
  - Extraindo os parâmetros do circuito  $\beta$

(c)

(d)

$$\beta \equiv \frac{V_i}{V_o} \Big|_{I_i = 0}$$

27

**gpe**  
GRUPO DE ELETRÔNICA  
DE POTÊNCIA DA UFMG

### Amplificador Série-Paralelo

- Análise sistemática – Caso Prático
  - Extraindo os parâmetros do circuito  $A$

(e)

$$A = \frac{v_o}{v_i}$$

28



**gpe**  
GRUPO DE ELETRÔNICA  
DE POTÊNCIA DA UFMG

### Amplificador Série-Paralelo

- Análise sistemática – Caso Prático - Ex

(a) (b) (c)

Circuito A

Circuito  $\beta$

Analisar para:

$$g_m = \frac{4\text{mA}}{v}$$

$$R_D = 10\text{k}\Omega$$

$$R_1 = 1\text{k}\Omega \text{ e } R_2 = 9\text{k}\Omega$$

29

**gpe**  
GRUPO DE ELETRÔNICA  
DE POTÊNCIA DA UFMG

### Amplificador Série-Paralelo

- Análise sistemática – Caso Prático - Ex

$\beta_{npn} = 100$

+10.7 V

20 k $\Omega$

10 k $\Omega$

1 mA

5 mA


$R_2 = 9\text{k}\Omega$

$R_1 = 1\text{k}\Omega$

$R_L = 2\text{k}\Omega$

$R_{in}$   $R_{out}$

30




### Outros tipos de amplificadores

- A construção de outros modelos de amplificador pode ser feito analisando a forma de medição do sinal de saída e forma de atuação no sinal de entrada:
  - **Saída:**
    - Tensão – Medição shunt (paralela);
    - Corrente – Medição série;
  - **Entrada:**
    - Tensão – Atuação série;
    - Corrente – Atuação paralela (obs: o sinal é representado pelo seu modelo norton)
- Tipos de amplificadores
  - Tensão -> Série-paralelo;
  - Corrente -> Paralelo-série;
  - Transcondutância -> Série-Série;
  - Transresistância -> Paralelo-Paralelo.

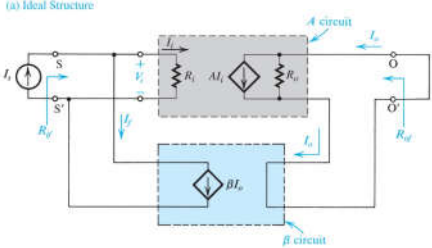
**Obs:** A realimentação tende a fazer com que  $R_{in}$  e  $R_{out}$  sejam mais ideais;

31



### Amplificador Paralelo-Série (Corrente)

(a) Ideal Structure

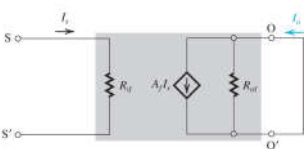


$$A_f \equiv \frac{I_o}{I_s} = \frac{A}{1 + A\beta}$$

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

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

(b) Equivalent Circuit



32

**gpe**  
GRUPO DE ELETRÔNICA  
DE POTÊNCIA DA UFMG

### Amplificador Paralelo-Série (Corrente)

(a) General Structure

(b) Finding the A Circuit and  $\beta$

(i) The A circuit is

where  $R_{in}$  is obtained from

and  $R_{out}$  is obtained from

and the gain A is defined as  $A = \frac{I_o}{I_s}$

(ii)  $\beta$  is obtained from

$\beta = \frac{I_o}{I_s} \Big|_{V_o=0}$

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

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

33

**gpe**  
GRUPO DE ELETRÔNICA  
DE POTÊNCIA DA UFMG

### Amplificador Paralelo-Série (Corrente)

- Exemplo

$g_{m1} = g_{m2} = 5\text{mA/V}$ ,  $R_D = 20\text{k}$ ,  $R_M = 10\text{k}$ ,  $R_F = 90\text{k}$   
 $r_{o2} = 20\text{k}\Omega$

$$\beta = -\frac{R_M}{R_M + R_F}$$

$$R_{11} = R_F + R_M$$

$$R_{22} = R_M \parallel R_F$$

**Circuito A**

34

**gpe**  
GRUPO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA DA UFMG

### Amplificador Paralelo-Série (Corrente)

- Exemplo

$$v_{o1} = \frac{R_{11}R_D(1 + g_{m1}r_{o1})}{R_{11} + R_D + r_{o1} + g_{m1}R_{11}r_{o1}} i_s$$

Se  $r_o \rightarrow \infty$

$$v_{o1} = \frac{g_{m1}R_{11}R_D}{1 + g_{m1}R_{11}} i_s$$

$$i_2 = -v_{o1}g_{m2}$$

$$i_o = i_2 \frac{r_{o2}}{R_L + R_{22} + r_{o2}}$$

$$A = \frac{i_o}{i_s} = -\frac{g_{m2}R_{11}R_D(1 + g_{m1}r_{o1})}{R_{11} + R_D + r_{o1} + g_{m1}R_{11}r_{o1}} \frac{r_{o2}}{R_L + R_{22} + r_{o2}}$$

Se  $r_o \rightarrow \infty$

$$A = \frac{i_o}{i_s} = -\frac{g_{m2}g_{m1}R_{11}R_D}{1 + g_{m1}R_{11}}$$

35

**gpe**  
GRUPO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA DA UFMG

### Amplificador Paralelo-Série (Corrente)

- Exemplo

$$R_i = \frac{v_{s1}}{i_s} = \frac{R_{11}(r_{o1} + R_D)}{R_{11} + R_D + r_{o1} + g_{m1}R_{11}r_{o1}}$$

Se  $r_o \rightarrow \infty$

$$R_i = \frac{R_{11}}{1 + g_{m1}R_{11}}$$

- Ro

$$R_o = \frac{i_x}{v_x}$$

$$R_o = R_L + R_{22} + r_{o2}$$

*não há fonte de energia →  $i_s = 0$   
 $v_{o1} = 0$*

36

**gpe**  
GRUPO DE ELETRÔNICA  
DE POTÊNCIA DA UFMG

### Amplificador Série-Série (Transcondutância)

(a) Ideal Structure

(b) Equivalent Circuit

(c) Formulas

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

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

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

37

**gpe**  
GRUPO DE ELETRÔNICA  
DE POTÊNCIA DA UFMG

### Amplificador Série-Série (Transcondutância)

(a) General Structure

(b) Finding the A Circuit and  $\beta$

(i) The A circuit is

where  $R_{i1}$  is obtained from

and  $R_{o2}$  is obtained from

and the gain  $A$  is defined  $A = \frac{I_o}{V_i}$

(ii)  $\beta$  is obtained from

$$\beta = \left. \frac{V_f}{I_o} \right|_{I_L = 0}$$

(c) Gain, Input, and Output Resistance

- Use the formulas in Fig. 11.18 to find  $A_f$ ,  $R_{if}$ , and  $R_{of}$ .
- $R_{in}$  and  $R_{out}$  can then be found from

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

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

38

**gpe**  
GRUPO DE ELETRÔNICA  
DE POTÊNCIA DA UFMG

### Amplificador Paralelo-paralelo (Transresistância)

(a) Ideal Structure

(b) Equivalent Circuit

(c) Formulas

$$A_v \equiv \frac{V_o}{I_i} = \frac{A}{1 + A\beta}$$

$$R_{g'} = R_g / (1 + A\beta)$$

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

39

**gpe**  
GRUPO DE ELETRÔNICA  
DE POTÊNCIA DA UFMG

### Amplificador Paralelo-paralelo (Transresistância)

(a) General Structure

(b) Finding the A Circuit and  $\beta$

(i) The A circuit is

where  $R_{g1}$  is obtained from

and  $R_{g2}$  is obtained from

and the gain A is defined  $A = \frac{V_o}{I_i}$

(ii)  $\beta$  is obtained from

$$\beta = \frac{I_f}{V_o} \Big|_{V_i = 0}$$

40



**gpe**  
GRUPO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA DA UFMG

### Exemplos

(a)

(a)

41


**gpe**  
GRUPO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA DA UFMG

### Exemplos

(a)

(a)

42




### Estabilidade de Amplificadores Realimentados

- Os ganhos  $A$  e  $\beta$  de um circuito realimentado são dependentes da frequência, logo:
 
$$A_f(s) = \frac{A(s)}{1 + A(s)\beta(s)}$$
- Assumindo  $s = j\omega$ 

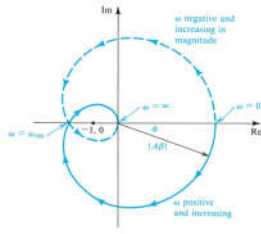
$$L(j\omega) = A(j\omega)\beta(j\omega) = |A(j\omega)\beta(j\omega)|e^{j\phi(\omega)}$$
  - Considere  $\omega_{180} \rightarrow \phi(\omega_{180}) = 180^\circ$ ;
  - Nesta frequência,  $L(j\omega_{180}) = -|A(j\omega_{180})\beta(j\omega_{180})|$ , i.e., a realimentação se torna positiva;
  - A estabilidade do circuito dependerá da magnitude do ganho de malha em  $\omega_{180}$

43

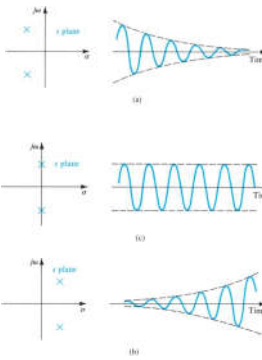


### Estabilidade de Amplificadores Realimentados

- Usando o diagrama de Nyquist:
 



**Assim:**




$|A\beta|_{\omega_{180}} < 1$

$|A\beta|_{\omega_{180}} = 1$

$|A\beta|_{\omega_{180}} > 1$
- Sabemos que se o contorno de Nyquist enlaçar o ponto -1, o sistema em malha fechada será instável.
- A frequência  $\omega_{180}$  define o ponto de transição, sendo que  $\mathcal{R}_e(\omega_{180}) = |A\beta|$

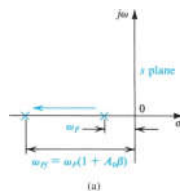
44



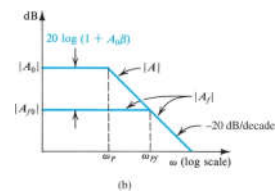
### Estabilidade de Amplificadores Realimentados

- Efeito com sistemas de primeira ordem
  - Assumindo  $\beta = cste$

$$A(s) = \frac{A_0}{1 + \frac{s}{\omega_p}} \longrightarrow A_f(s) = \frac{A_0}{1 + A_M\beta} \cdot \frac{1}{1 + \frac{s}{\omega_p(1 + A_M\beta)}}$$




(a)



(b)

- Um sistema de primeira ordem tem sua banda passante estendida pela realimentação;
- O pólo é sempre real e alocado no SPE, logo, sempre estável;
- Outra forma de verificar a estabilidade é que  $\phi(\infty) = 90^\circ$

45



### Estabilidade de Amplificadores Realimentados

- Efeito com sistemas de segunda ordem
  - Assumindo  $\beta = cste$

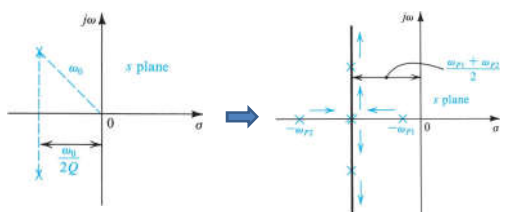
$$A(s) = \frac{A_0}{\left(1 + \frac{s}{\omega_{p1}}\right)\left(1 + \frac{s}{\omega_{p2}}\right)} \longrightarrow EC = 0 = s^2 + s(\omega_{p1} + \omega_{p2}) + (1 + A_0\beta)\omega_{p1}\omega_{p2}$$

Equação característica de Malha fechada

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

$$\omega_0 = \sqrt{\omega_{p1}\omega_{p2}(1 + A_0\beta)}$$

$$Q = \frac{\omega_0}{\omega_{p1} + \omega_{p2}}$$



46

**gpe**  
GRUPO DE ELETRÔNICA  
DE POTÊNCIA DA UFMG

## Estabilidade de Amplificadores Realimentados

- Efeito com sistemas de segunda ordem
  - Assumindo  $\beta = cste$

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

Equação característica de Malha fechada

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

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

$$\omega_0 = \sqrt{\omega_{p1}\omega_{p2}(1 + A_0\beta)}$$

$$Q = \frac{\omega_0}{\omega_{p1} + \omega_{p2}}$$

47


**gpe**  
GRUPO DE ELETRÔNICA  
DE POTÊNCIA DA UFMG

## Estabilidade de Amplificadores Realimentados

- Efeito com sistemas de terceira ordem ou maior
  - Assumindo  $\beta = cste$ ;
  - Um sistema de terceira ordem produz  $\phi(\omega) = 270^\circ$ , quando  $\omega \rightarrow \infty$ , logo, haverá um  $\omega = \omega_{180}$ ;
  - Com isso, as condições que levam o sistema à instabilidade podem ser satisfeitas e estudos para identificar essa condição devem ser realizados.

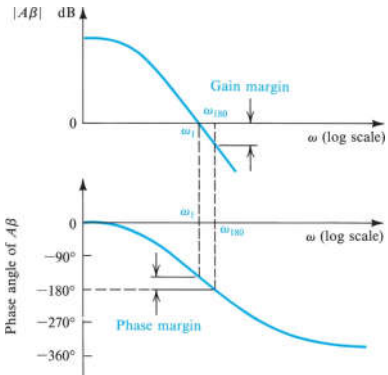
- Pode haver um  $A_0\beta$  que leve o sistema ao SPD;
- Como identificar se o sistema é instável?
- Como definir o máximo  $L(s)$ ;
- Como fazer compensação?

48



### Estabilidade usando Diagramas de Bode

- Diagrama de Bode – Resposta em frequência de  $L(j\omega)$



- **Margem de ganho:**  $MG = -|A\beta|_{\omega_{180}}$ 
  - Deve ser projetada para garantir que variações de  $L(s)$  com temperatura, entre outros, não instabilize o amplificador;
- **Margem de fase:**  $\theta = 180 - \phi(\omega_{0db})$ 
  - Deve ser positiva para sistemas estáveis;
  - A margem de fase define o ganho máximo na faixa de passagem:  

$$A_{fmax} \approx \frac{1}{\beta} |1 + e^{-j\theta}|^{-1}$$
  - Quanto menor  $\theta$ , menor o amortecimento da resposta

49



### Estabilidade usando Diagramas de Bode

- Abordagem alternativa;
  - Plota-se o Bode de  $A(s)$  e de  $\beta$ ;
  - O cruzamento dos dois gráficos define o ponto 0dB;



- Assumindo que exista um pólo dominante no amplificador;
- $\phi_A = 180^\circ$  ocorrerá sempre em um segmento de  $|A|$  com -40dB/dec ou mais;
- Uma forma de garantir estabilidade é intersectar  $1/\beta$  no segmento -20dB/dec

50

**gpe**  
GRUPO DE ELETRÔNICA  
DE POTÊNCIA DA UFMG

### Compensação de frequência

- Conceito teórico
  - Pode-se estabilizar um amplificador ao se introduzir um novo pólo em  $A(s)$  que altere a margem de ganho do sistema;

- Desvantagem do método:
  - Acrescer  $f_D$  reduz muito a banda passante e a quantidade de realimentação;
- Outra possibilidade é deslocar  $f_{p1}$ , o estabilizará o sistema com uma BW superior ao acréscimo de  $f_D$

51

**gpe**  
GRUPO DE ELETRÔNICA  
DE POTÊNCIA DA UFMG

### Compensação de frequência

- Exemplo;


- Um capacitor pode ser inserido entre B e B', de modo que:

$$f_{p1}' = \frac{1}{2\pi R_x (C_x + C_c)}$$

$$f_{p1} = \frac{1}{2\pi R_x C_x}$$

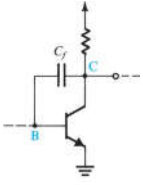
52





### Compensação Miller

- Em amplificadores multistádios, pode-se aplicar a compensação Miller no estágio de ganho de tensão (normalmente CE ou CS);



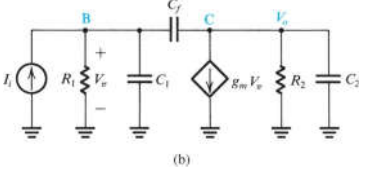
(a)

- Sem Cf

$$\omega_{p1} = \frac{1}{R_1 C_1} \qquad \omega_{p2} = \frac{1}{R_2 C_2}$$

- Com Cf

$$\omega'_{p1} \approx \frac{1}{g_m R_2 R_1 C_f} \qquad \omega'_{p2} \approx \frac{g_m C_f}{C_1 C_2 + C_f (C_1 + C_2)}$$



(b)

- Observa-se um deslocamento dos pólos de modo que  $\omega'_{p1}$  se torna dominante;
- O efeito de Cf é multiplicado pelo ganho do estágio, assim, permitindo o uso de capacitores de baixo valor

53