



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESCOLA DE ENGENHARIA

UFMG

# ELT085 - Circuitos Eletrônicos Analógicos

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

gpe  
GRUPO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA DA UFMG



gpe  
GRUPO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA DA UFMG

## Apresentação

- **Prof. Thiago de Oliveira**
  - Sala 2620
  - E-mail: [troliveira@ufmg.br](mailto:troliveira@ufmg.br)
  - [www.cpdee.ufmg.br/~troliveira](http://www.cpdee.ufmg.br/~troliveira)
- **Bibliografia**
  - Sedra, A.S.; Smith, K.C. *Microelectronic Circuits*. 7ª Edição, volume único, Oxford press;  
(edições anteriores também servem)  
**OBS: Lista de exercícios recomendados e folhas de resolução já disponíveis no Moodle;**



SEDRA/SMITH  
Microelectronic Circuits

Wireless Power

2



## Apresentação

- **Distribuição de Pontos e Datas Importantes**
  - Prova I –35pts - Sexta;
  - Prova II – 35pts- Sexta;
  - Projeto – 20 pts.
  - Exercício – 10 pts
- **Feriados**
  - .

3



## Modelo de Aula

- **Sala de aula invertida**
  - Os alunos deverão assistir ao conteúdo das aulas previamente
    - Todo conteúdo da disciplina está gravado em 50 vídeos e disponível no YouTube;
    - No moodle, os vídeos estão organizados pelo deadline de consumo;
  - As aulas presenciais serão utilizadas como:
    - Tira dúvidas;
    - Resolução de exercícios;
    - Complementação teórica/prática;
    - Simulação;
    - Projeto orientado.

4



## Apresentação

- Estrutura da disciplina**
  - Amplificadores
    - Estruturas
      - Célula de ganho
      - Estágio de entrada
      - Estágio de Potência
    - Resposta em frequência
    - Realimentação e Estabilidade
  - Geradores de Sinais
    - Osciladores Lineares
    - Osciladores Não-lineares
    - Conformadores de tensão

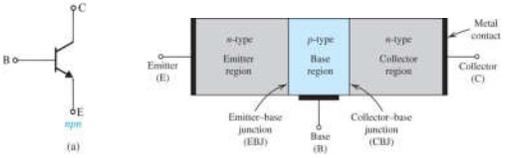
Prova I (circled in orange)  
Prova II (circled in blue)

5



## Revisão - Amplificadores Transistorizados

- TBJ - Dispositivo e regiões de operação**



(a)

**Table 6.1** BJT Modes of Operation

Mode	EBJ	CBJ
Cutoff	Reverse	Reverse
Active	Forward	Reverse
Saturation	Forward	Forward

  - Região Ativa**

$$V_{BE} \geq 0,7V \quad V_{BC} \leq 0,5V$$

$$V_{CE} \geq 0,2V$$

$$I_C = I_S e^{\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right)} \quad I_E = \frac{I_C}{\alpha}$$

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} \quad \alpha = \frac{\beta}{\beta + 1}$$
  - Região Saturação**

$$V_{BE} \geq 0,7V \quad V_{BC} \geq 0,5V$$

$$V_{CE} \approx 0,2V$$

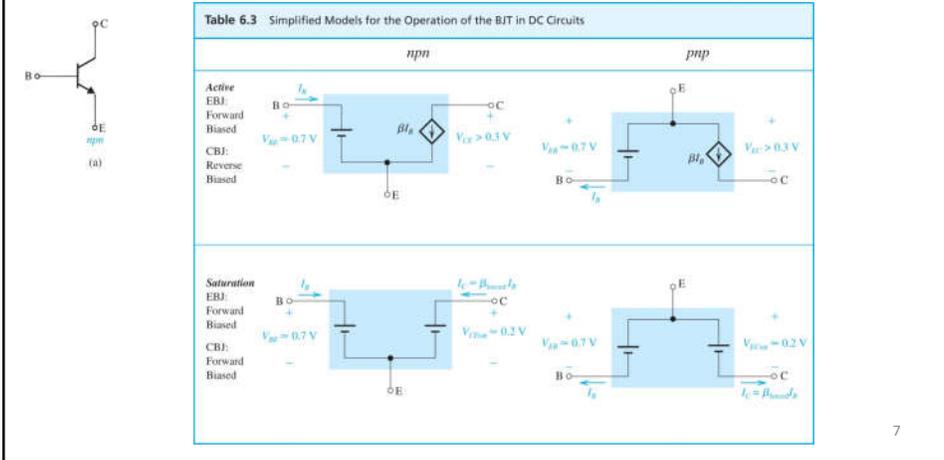
$$I_C = I_{Csat}$$

6



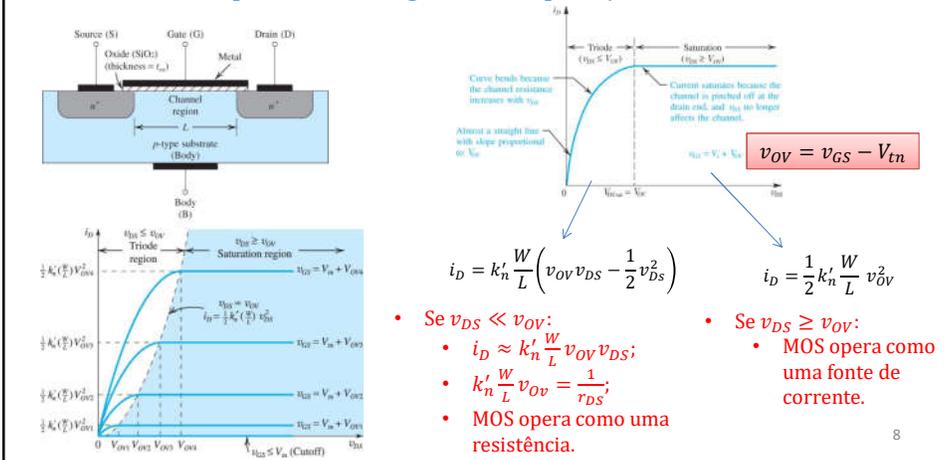
## Revisão – Amplificadores Transistorizados

- TBJ – Dispositivo e regiões de operação



## Revisão – Amplificadores Transistorizados

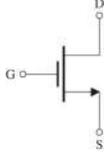
- MOS – Dispositivo e Regiões de Operação



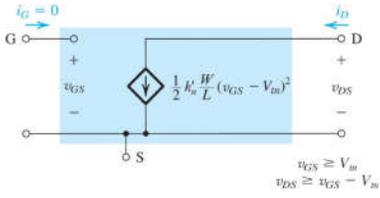


## Revisão – Amplificadores Transistorizados

- MOS – Dispositivo e Regiões de Operação



(c)



$i_G = 0$

$\frac{1}{2} k_n \frac{W}{L} (v_{GS} - V_{th})^2$

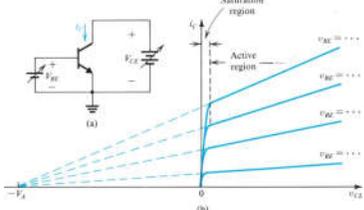
$v_{GS} \approx V_{in}$   
 $v_{DS} \approx v_{GS} - V_{in}$

9



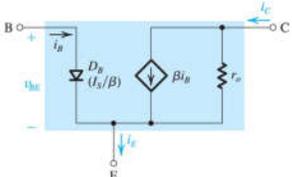
## Revisão – Amplificadores Transistorizados

- TBJ e MOS – Efeito Early na região linear



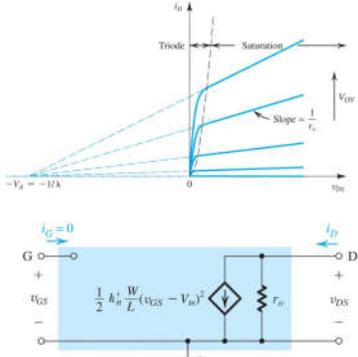
(a)

(b)



$\beta i_B$

$r_o$



$i_G = 0$

$\frac{1}{2} k_n \frac{W}{L} (v_{GS} - V_{th})^2$

$r_{DS}$

10

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

## Revisão – Amplificadores Transistorizados

- Operação de Amplificadores
  - Polariza-se o dispositivo na região linear;
  - O sinal a ser amplificado é sobreposto ao ponto quiescente;

11

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

## Revisão – Amplificadores Transistorizados

- Operação de Amplificadores
  - A análise de amplificadores utiliza-se do princípio da superposição;
    - Análise c.c. – define o ponto quiescente;
    - Análise c.a. – define parâmetros operacionais (ganho, resistências, BW, etc);
      - Necessidade de se desenvolver modelos de pequenos sinais, para realizar a análise c.a.;
      - Linearização do comportamento no ponto quiescente:

$$v_{GS} = V_{GS} + v_{gs} \rightarrow v_{OV} = V_{GS} + v_{gs} - V_{tn}$$

$$i_D = I_D + i_d = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} (V_{GS} + v_{gs} - V_{tn})^2$$

$$I_D = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{tn})^2$$

$$i_d = \left( k'_n \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{tn}) \right) v_{gs} \quad g_m$$

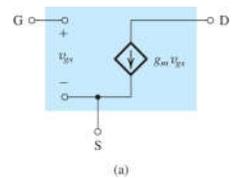
12

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

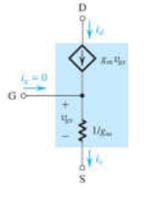


## Revisão – Amplificadores Transistorizados

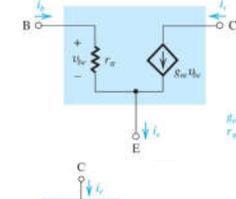
- Operação de Amplificadores
  - Modelos de pequenos sinais:



(a)



(b)



(c)

$$g_m = I_C / V_T$$

$$r_o = V_A / I_C = \beta / g_m$$

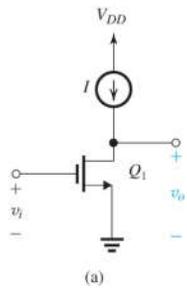
13

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

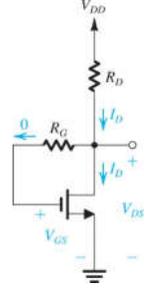


## Revisão – Amplificadores Transistorizados

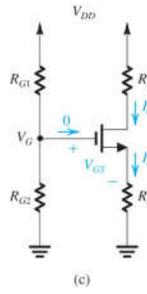
- Operação de Amplificadores
  - Tipos básicos de polarização de transistores:



(a)



(b)



(c)

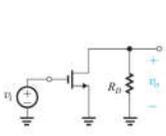
14

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

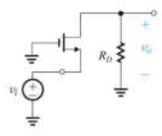


## Revisão – Amplificadores Transistorizados

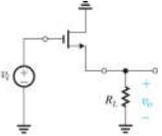
- Operação de Amplificadores
  - Tipos básicos de amplificadores



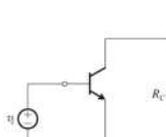
(a) Common Source (CS)



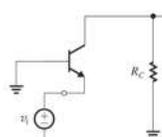
(b) Common Gate (CG)



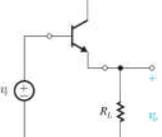
(c) Common Drain (CD)  
or Source Follower



(d) Common-Emitter (CE)



(e) Common-Base (CB)



(f) Common-Collector (CC)  
or Emitter Follower

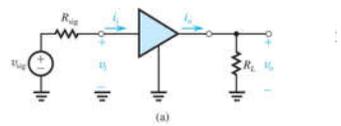
15

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

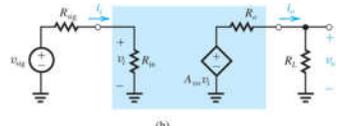


## Revisão – Amplificadores Transistorizados

- Operação de Amplificadores
  - Características de amplificadores básicos



(a)



(b)

Modelo	R <sub>in</sub>	R <sub>o</sub>	A <sub>vo</sub>
CE/CS	Alto	Alto	Alto Inv.
CC/CD	Alto	Baixo	Unitário
CB/CG	Baixo	Alto	Alto N.Inv

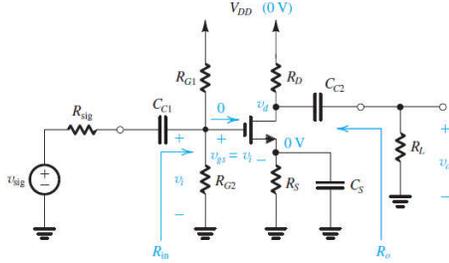
- CE/CS – Amplificador de tensão;
- CC/CD – Buffer de tensão;
- CB/CG – Buffer de corrente;

16



### Revisão - Amplificadores Transistorizados

- Exemplo de análise
  - Definir Polarização, características do amplificador e limites de operação:



- VDD = 15V;
- kn = 4mA/V<sup>2</sup>;
- Vtn = 1V;
- VA = 100V;
- ID = 0.5mA;
- VD = 6V;
- VS = 3.5V;
- IRG = 2uA;
- Rsig = 100k;
- RL = 10k;

17



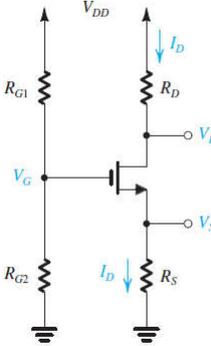
### Revisão - Amplificadores Transistorizados

- Exemplo de análise
  - Polarização

$$R_D = \frac{15V - 6V}{0.5mA} = 18k$$

$$R_S = \frac{3.5V}{0.5mA} = 7k$$

- VDD = 15V;
- kn = 4mA/V<sup>2</sup>;
- Vtn = 1V;
- VA = 100V;
- ID = 0.5mA;
- VD = 6V;
- VS = 3.5V;
- IRG = 2uA;
- Rsig = 100k;
- RL = 10k;



$$V_{GS} = \sqrt{\frac{2I_D}{k_n}} + V_{tn} = 1.5V \quad V_G = 1.5V + 3.5V = 5V$$

$$R_{G1} + R_{G2} = \frac{15}{2\mu A} = 7.5M\Omega$$

$$V_G = \frac{V_{DD}R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} \rightarrow R_{G1} = R_{G2} \left( \frac{V_{DD}}{V_G} - 1 \right) = 2R_{G2}$$

$R_{G1} = 5M\Omega$

$R_{G2} = 2.5M\Omega$

18

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

## Revisão - Amplificadores Transistorizados

- Exemplo de análise
  - Uma vez definidas as grandezas em nível c.c., podemos fazer a análise c.a.:

- $V_{DD} = 15V$ ;
- $k_n = 4mA/V^2$ ;
- $V_{tn} = 1V$ ;
- $V_A = 100V$ ;
- $I_D = 0.5mA$ ;
- $V_D = 6V$ ;
- $V_S = 3.5V$ ;
- $I_{RG} = 2\mu A$ ;
- $R_{sig} = 100k$ ;
- $R_L = 10k$ ;

19

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

## Revisão - Amplificadores Transistorizados

- Exemplo de análise
  - Análise c.a.

- $V_{DD} = 15V$ ;
- $k_n = 4mA/V^2$ ;
- $V_{tn} = 1V$ ;
- $V_A = 100V$ ;
- $I_D = 0.5mA$ ;
- $V_D = 6V$ ;
- $V_S = 3.5V$ ;
- $I_{RG} = 2\mu A$ ;
- $R_{sig} = 100k$ ;
- $R_L = 10k$ ;
- $R_D = 18k$ ;
- $R_S = 7k$ ;
- $R_{G1} = 5M$ ;
- $R_{G2} = 2.5M$ ;

$$g_m = k_n(V_{GS} - V_{tn}) = 2mA/V$$

$$r_o = \frac{V_A}{I_D} = 200k$$

$$R_{in} = R_{G1} \parallel R_{G2} = 1.67M$$

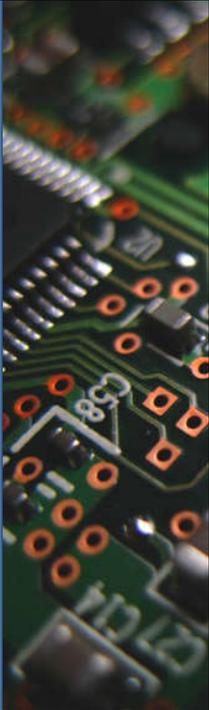
$$R_o = R_D \parallel r_o = 16.5k$$

$$A_{vo} = -\frac{g_m v_i R_o}{v_i} = -33 v/v$$

$$G = \frac{v_o}{v_{sig}} = \frac{R_{in}}{R_{sig} + R_{in}} \times (-g_m R_o \parallel R_L) = -11.75 v/v$$

20





# Associação de amplificadores em cascata

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



GRUPO DE ELETRÔNICA  
DE POTÊNCIA DA UFMG




## Associação de amplificadores

- A associação em cascata de estágios de amplificadores é uma técnica comumente empregada na construção de amplificadores mais completos, para se obter características globais mais próximas das ideais, para cada modelo de amplificador;
- No entanto, ao se analisar amplificadores multi-estágio, pode-se gerar dúvidas quanto às técnicas de análise de polarização e de pequenos sinais;
- **Polarização:**
  - Em amplificadores desacoplados, i.e., associados por meio de capacitores de bloqueio ou por pontos de alta impedância, pode-se analisar a polarização de cada estágio separadamente;
  - Em amplificadores diretamente acoplados, a conexão entre os estágios afeta a polarização, de modo que se deve fazer uma análise mais cuidadosa;

22

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

## Associação de amplificadores

- Exemplo de amplificador desacoplado:

23

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

## Associação de amplificadores

- Exemplo de amplificador diretamente acoplado

(a)

- Como analisar?

- Solução completa:** Levantar todas as equações do sistema e resolver (mais preciso, mas pode ser complexo para sistemas maiores);
- Solução iterativa:** Levantar todas as equações, assumir premissas simplificadas e resolver múltiplas vezes o sistema agregando o resíduo a cada iteração.

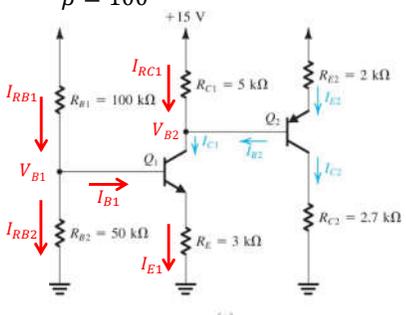
24




### Associação de amplificadores

- Solução completa

$\beta = 100$



$$\frac{(15 - V_{B1})}{100k} = \frac{V_{B1}}{50k} + I_{B1}$$

$$I_{E1} = \frac{V_{B1} - 0.7V}{3k}$$

$$I_{RC1} = I_{C1} - I_{B2}$$

$$V_{B2} = 15 - I_{RC1}5k$$

$$I_{E2} = \frac{15 - 0.7 - V_{B2}}{2k}$$

$$I_{B2} = \frac{I_{E2}}{\beta + 1} = \frac{I_{C2}}{\beta}$$

$$I_{B1} = \frac{I_{E1}}{\beta + 1} = \frac{I_{C1}}{\beta}$$

25




### Associação de amplificadores

- Solução completa

$$\frac{(15 - V_{B1})}{100k} = \frac{V_{B1}}{50k} + I_{B1}$$
→

$$\frac{(15 - V_{B1})}{100k} = \frac{V_{B1}}{50k} + \frac{V_{B1} - 0.7V}{(\beta + 1)3k}$$

$I_{E1} = \frac{V_{B1} - 0.7V}{3k}$

$V_{B1} = 4,574V$

$I_{E1} = 1.29mA$

$I_{B1} = 12.79\mu A$

$I_{C1} = 1.279mA$

$$V_{B2} = 15 - I_{RC1}5k$$
→

$$V_{B2} = 15 - 5kI_{C1} + 5kI_{B2}$$

$I_{RC1} = I_{C1} - I_{B2}$

$$V_{B2} = 15 - 5kI_{C1} + 5kI_{B2}$$
→

$$V_{B2} = 15 - 5kI_{C1} + \frac{5k(14.3 - V_{B2})}{2k(\beta + 1)}$$

$I_{E2} = \frac{15 - 0.7 - V_{B2}}{2k}$

$V_{B2} = 8,74V$

$I_{E2} = 2,78mA$

$I_{B2} = 27,52\mu A$

$I_{C2} = 2,75mA$

$I_{RC1} = 1,25mA$

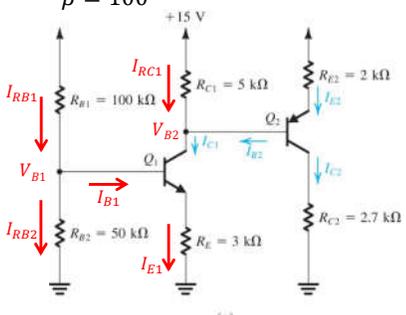
26




### Associação de amplificadores

- Solução iterativa

$\beta = 100$



Premissa inicial:  $\beta$  é muito grande!

$$\frac{(15 - V_{B1})}{100k} = \frac{V_{B1}}{50k} + I_{B1}^0$$

$$I_{E1} = \frac{V_{B1} - 0.7V}{3k}$$

$$I_{RC1} = I_{C1} - I_{B2}^0$$

$$V_{B2} = 15 - I_{RC1}5k$$

$$I_{E2} = \frac{15 - 0.7 - V_{B2}}{2k}$$

$$I_{B2} = \frac{I_{E2}}{\beta + 1} = \frac{I_{C2}}{\beta}$$

$$I_{B1} = \frac{I_{E1}}{\beta + 1} = \frac{I_{C1}}{\beta}$$

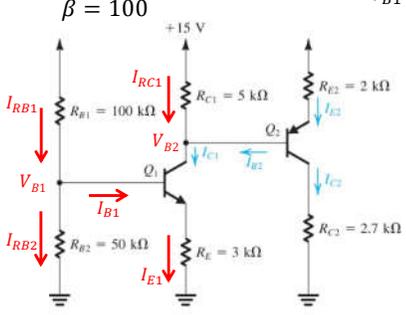
27




### Associação de amplificadores

- Solução iterativa

$\beta = 100$



Premissa inicial:  $\beta$  é muito grande!

$$V_{B1} = 100k \parallel 50k \left( \frac{15}{100k} - I_{B1} \right) \xrightarrow{I_{B1} = 0} V_{B1} = 5V$$

$$I_{E1} = \frac{V_{B1} - 0.7V}{3k} \xrightarrow{I_{B1} = 0} I_{E1} = 1,43mA$$

$$I_{RC1} = I_{C1} - I_{B2} \xrightarrow{I_{B2} = 0} I_{RC1} = 1,42mA$$

$$V_{B2} = 15 - I_{RC1}5k \xrightarrow{I_{B2} = 0} V_{B2} = 7,91V$$

$$I_{E2} = \frac{15 - 0.7 - V_{B2}}{2k} \xrightarrow{I_{B2} = 0} I_{E2} = 3,20mA$$

$$I_{B2} = \frac{I_{E2}}{\beta + 1} = \frac{I_{C2}}{\beta} \xrightarrow{I_{B2} = 0} I_{B2} = 31,68\mu A$$

$$I_{B1} = \frac{I_{E1}}{\beta + 1} = \frac{I_{C1}}{\beta} \xrightarrow{I_{B2} = 0} I_{B1} = 14,16\mu A$$

28

**gpe**  
GRUPO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA DA UFGM

### Associação de amplificadores

- Solução iterativa

$\beta = 100$

(a)

$$V_{B1} = 100k \parallel 50k \left( \frac{15}{100k} - I_{B1} \right) \longrightarrow \begin{matrix} V_{B1} = 4,53V \\ I_{B1} = 14,16\mu A \end{matrix}$$

$$I_{E1} = \frac{V_{B1} - 0,7V}{3k} \longrightarrow I_{E1} = 1,28mA$$

$$I_{RC1} = I_{C1} - I_{B2} \longrightarrow \begin{matrix} I_{RC1} = 1,25mA \\ I_{B2} = 31,68\mu A \end{matrix}$$

$$V_{B2} = 15 - I_{RC1} 5k \longrightarrow V_{B2} = 8,75V$$

$$I_{E2} = \frac{14,3V - V_{B2}}{2k} \longrightarrow I_{E2} = 2,78mA$$

$$I_{B2} = \frac{I_{E2}}{\beta + 1} = \frac{I_{C2}}{\beta} \longrightarrow I_{B2} = 27,52\mu A$$

$$I_{B1} = \frac{I_{E1}}{\beta + 1} = \frac{I_{C1}}{\beta} \longrightarrow I_{B1} = 12,67\mu A$$

29

**gpe**  
GRUPO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA DA UFGM

### Associação de amplificadores

- Solução iterativa

$\beta = 100$

(a)

$$V_{B1} = 100k \parallel 50k \left( \frac{15}{100k} - I_{B1} \right) \longrightarrow \begin{matrix} V_{B1} = 4,58V \\ I_{B1} = 12,67\mu A \end{matrix}$$

$$I_{E1} = \frac{V_{B1} - 0,7V}{3k} \longrightarrow I_{E1} = 1,29mA$$

$$I_{RC1} = I_{C1} - I_{B2} \longrightarrow \begin{matrix} I_{RC1} = 1,25mA \\ I_{B2} = 27,52\mu A \end{matrix}$$

$$V_{B2} = 15 - I_{RC1} 5k \longrightarrow V_{B2} = 8,75V$$

$$I_{E2} = \frac{14,3V - V_{B2}}{2k} \longrightarrow I_{E2} = 2,78mA$$

$$I_{B2} = \frac{I_{E2}}{\beta + 1} = \frac{I_{C2}}{\beta} \longrightarrow I_{B2} = 27,52\mu A$$

$$I_{B1} = \frac{I_{E1}}{\beta + 1} = \frac{I_{C1}}{\beta} \longrightarrow I_{B1} = 12,77\mu A$$

30

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

### Associação de amplificadores

- Solução iterativa

$\beta = 100$

(a)

$$V_{B1} = 100k \parallel 50k \left( \frac{15}{100k} - I_{B1} \right) \rightarrow V_{B1} = 4,57V$$

$$I_{B1} = 12,77\mu A$$

$$I_{E1} = \frac{V_{B1} - 0,7V}{3k} \rightarrow I_{E1} = 1,29mA$$

$$I_{RC1} = I_{C1} - I_{B2} \rightarrow I_{RC1} = 1,25mA$$

$$I_{B2} = 27,52\mu A$$

$$V_{B2} = 15 - I_{RC1} 5k \rightarrow V_{B2} = 8,75V$$

$$I_{E2} = \frac{14,3V - V_{B2}}{2k} \rightarrow I_{E2} = 2,78mA$$

$$I_{B2} = \frac{I_{E2}}{\beta + 1} = \frac{I_{C2}}{\beta} \rightarrow I_{B2} = 27,52\mu A$$

$$I_{B1} = \frac{I_{E1}}{\beta + 1} = \frac{I_{C1}}{\beta} \rightarrow I_{B1} = 12,77\mu A$$

31

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

### Associação de amplificadores

- Como aplicar a análise de pequenos sinais em um amplificador multi-estágio

32

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

## Associação de amplificadores

- Como aplicar a análise de pequenos sinais em um amplificador multi-estágio

$$R_B = R_1 \parallel R_2$$

33

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

## Associação de amplificadores

- Método 1 - Modelar cada estágio e associar as partes

34

**gpep**  
GRUPO DE ELETRÔNICA  
DE POTÊNCIA DA UFMG

## Associação de amplificadores

- Método 1 – Modelar cada estágio e associar as partes

$$v_o = v_{sig} \times \underbrace{\frac{R_{in1}}{R_{in1} + R_{sig}}}_{v_{\pi 1}} \times A_{v1} \times \underbrace{\left( \frac{R_{in2}}{R_{in2} + R_{o1}} \right)}_{v_{\pi 2}} \times A_{v2} \times \frac{R_L}{R_L + R_{o2}}$$

Efeito do acoplamento

35

**gpep**  
GRUPO DE ELETRÔNICA  
DE POTÊNCIA DA UFMG

## Associação de amplificadores

- Método 1 – Modelar cada estágio e associar as partes
  - Problemas desse método:
    - Caso os estágios possuam características que dependam dos demais estágios, a modelagem poderá produzir resultados errados;
    - Demanda a montagem de um circuito final para ser analisado;
  - Pontos a se atentar:
    - Caso os parâmetros do amplificador dependam dos vizinhos, levar isso em conta na modelagem dos estágios (isso ocorre principalmente nos amplificadores CG/CB e CC);

36

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

### Associação de amplificadores

- Método 1 – Agilizando o cálculo do ganho

– Ao se incorporar as impedâncias de entrada do estágio seguinte no cálculo de ganho de um estágio, agiliza-se o cálculo do ganho, pois os efeitos de acoplamento serão naturalmente levadas em consideração;

$$A_{v1} = \frac{v_{\pi1}}{v_{sig}} = \frac{R_{in1}}{R_{in1} + R_{sig}} = \frac{R_{B1} \parallel r_{\pi1}}{R_{B1} \parallel r_{\pi1} + R_{sig}}$$

$$A_{v2} = \frac{v_{\pi2}}{v_{\pi1}} = -g_{m1}(R_{C1} \parallel R_{B2} \parallel r_{\pi2})$$

$$A_{v3} = \frac{v_o}{v_{\pi2}} = -g_{m2}(R_{C2} \parallel R_L)$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_{sig}} = A_{v1} \times A_{v2} \times A_{v3}$$

37

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

### Associação de amplificadores

- Método 2 – Cálculo de ganho por divisor de corrente

$$i_{b1} = \left( \frac{v_{sig}}{R_{sig}} \right) \frac{R_{B1} \parallel R_{sig}}{R_{B1} \parallel R_{sig} + r_{\pi1}}$$

$$i_{b2} = -\beta_1 i_{b1} \frac{R_{B2} \parallel R_{C1}}{R_{B2} \parallel R_{C1} + r_{\pi2}}$$

$$i_{RL} = -\beta_2 i_{b2} \frac{R_{C2}}{R_{C2} + R_L}$$

$$v_o = i_{RL} R_L$$

38

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

## Associação de amplificadores

- Método 2 – Cálculo de ganho por divisor de corrente

$$v_o = \left( \frac{v_{sig}}{R_{sig}} \right) \times \frac{R_{B1} \parallel R_{sig}}{R_{B1} \parallel R_{sig} + r_{\pi 1}} \times -\beta_1 \times \frac{R_{B2} \parallel R_{C1}}{R_{B2} \parallel R_{C1} + r_{\pi 2}} \times -\beta_2 \times \frac{R_{C2}}{R_{C2} + R_L} \times R_L$$

39