

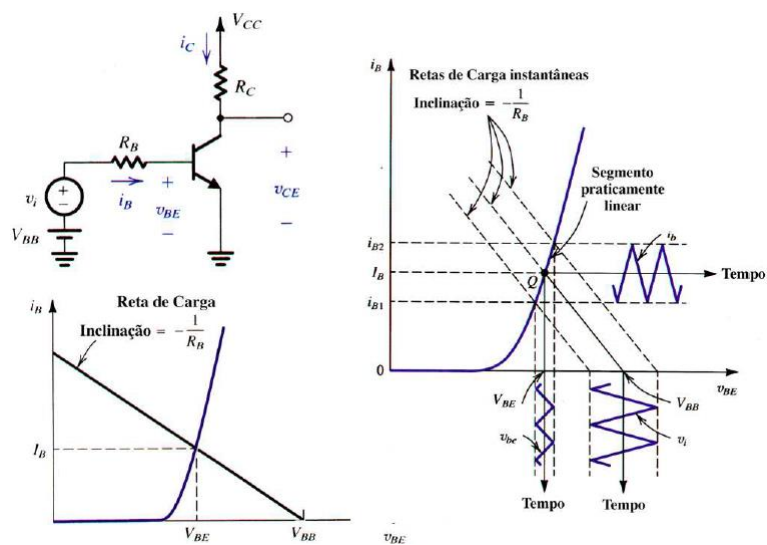
EE 530 Eletrônica Básica I

Transistores Bipolares Amplificadores

1

Polarização: Ponto de Operação (Q)

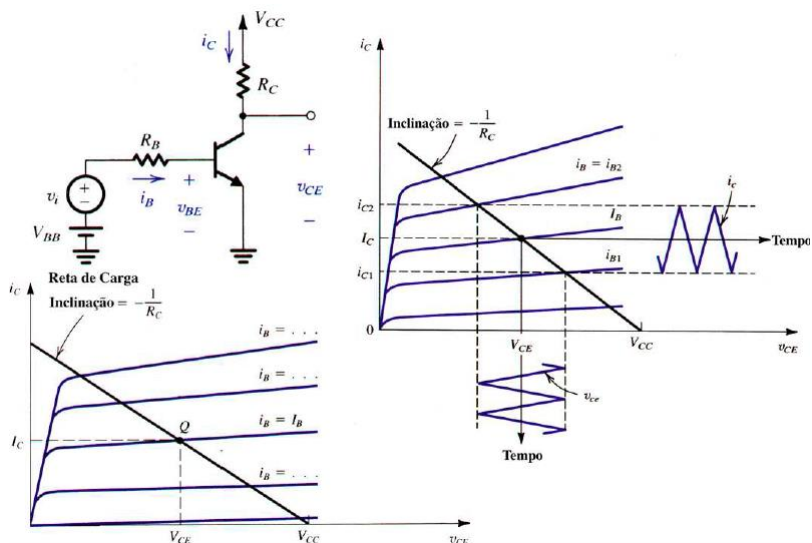
- O ponto Q define a região de operação e a máxima excursão do sinal de entrada de forma que a saída não sature.



2

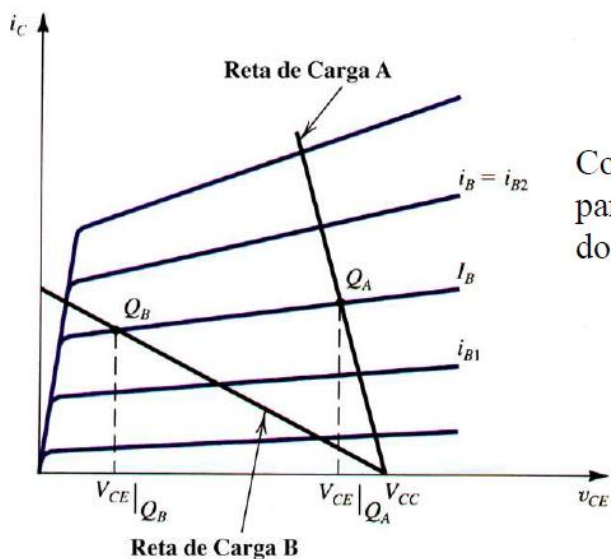
Polarização: Ponto de Operação (Q)

- O ponto Q define a região de operação e a máxima excursão do sinal de entrada de forma que a saída não sature.



3

Efeito da localização do ponto de polarização na excursão máxima do sinal

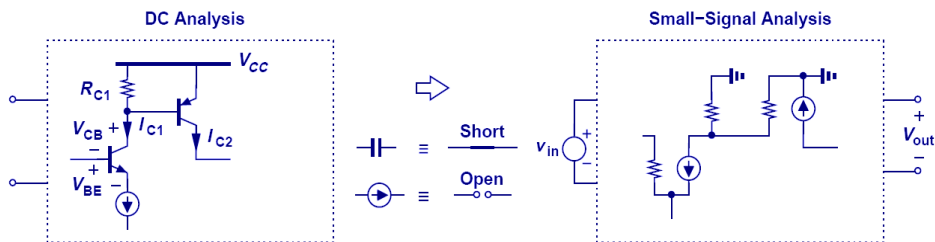


Como localizar o ponto Q para maximizar a excursão do sinal de saída?

4

Análise de pequenos sinais

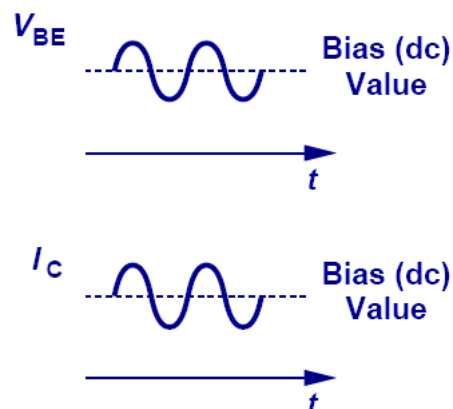
- Uma vez definido o ponto Q, basta fazer uma análise de pequenos sinais ($\Delta I_C < 10\% I_C$).



5

Análise de pequenos sinais

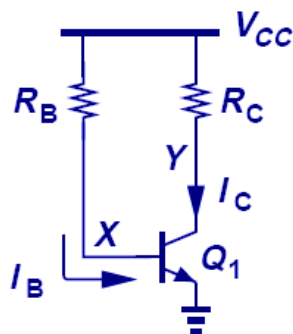
- A entrada e a saída variam em torno do ponto Q.



6

DETERMINE O PONTO DE OPERAÇÃO

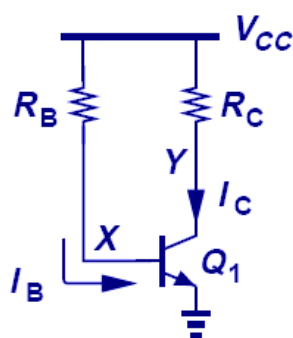
- $V_{CC}=10V$; $R_C=1\text{ k}\Omega$; $R_B=200\text{ k}\Omega$; $\beta=100$;
- $I_S=10^{-6}\text{ A}$; $V_T=26\text{ mV}$



7

Polarização simples

- I_C é altamente dependente de β
- Raramente é utilizada na prática



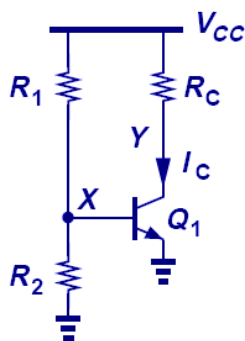
$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B}$$

$$I_C = \beta I_B$$

$$\begin{cases} I_C = \beta \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} \\ I_C = I_S \exp(V_{BE}/V_T) \end{cases}$$

DETERMINE O PONTO DE OPERAÇÃO

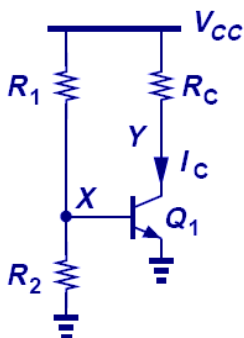
- $V_{CC}=10V$; $R_C=1\text{ k}\Omega$; $R_1=10\text{ k}\Omega$; $R_2=1\text{ k}\Omega$; $\beta=100$;
- $I_S=10^{-6}\text{ A}$; $V_T=26\text{ mV}$



9

Polarização por divisor de tensão

- Para diminuir a dependência de I_C com relação a β , fixamos o valor de V_{BE} .
- Uma pequena variação de R_2 ou R_1 , causa uma variação de V_{BE} e uma grande variação de I_C
- Raramente é utilizada na prática



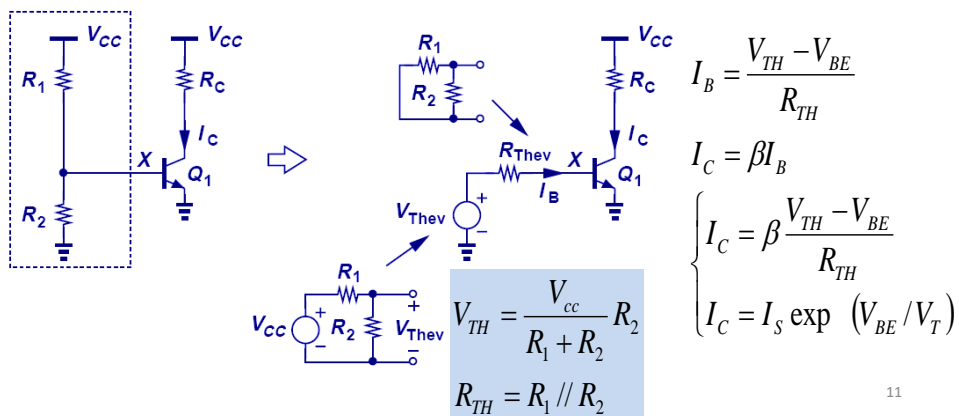
$$I_B \ll \frac{V_{CC}}{R_1 + R_2}$$

$$\begin{cases} V_{BE} = \frac{V_{CC}}{R_1 + R_2} R_2 \\ I_C = I_S \exp(V_{BE}/V_T) \end{cases}$$

10

Polarização por divisor de tensão

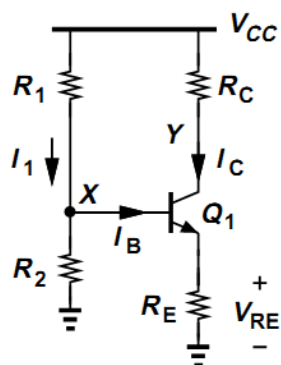
- I_B não desprezível.
- I_B é altamente dependente de β , R_1 e R_2
- Raramente é utilizada na prática



11

DETERMINE O PONTO DE OPERAÇÃO

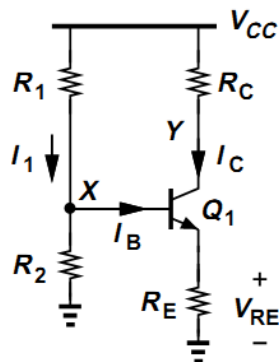
- $V_{CC}=10V$; $R_C=1 \text{ k}\Omega$; $R_1=10 \text{ k}\Omega$; $R_2=1 \text{ K}\Omega$; $\beta=100$;
- $I_S=10^{-6} \text{ A}$; $V_T=26 \text{ mV}$; $R_E=20 \Omega$



12

Polarização com degeneração de emissor

- Uma pequena variação de V_X , causada por R_1 ou R_2 , é absorvida pela queda de tensão em R_E , diminuindo a variação de V_{BE} .
- $\uparrow V_X \rightarrow \uparrow V_{BE} \rightarrow \uparrow I_C \rightarrow \uparrow V_{RE} \rightarrow \downarrow V_{BE}$ (Realimentação Negativa)



$$I_B \ll \frac{V_{CC}}{R_1 + R_2}$$

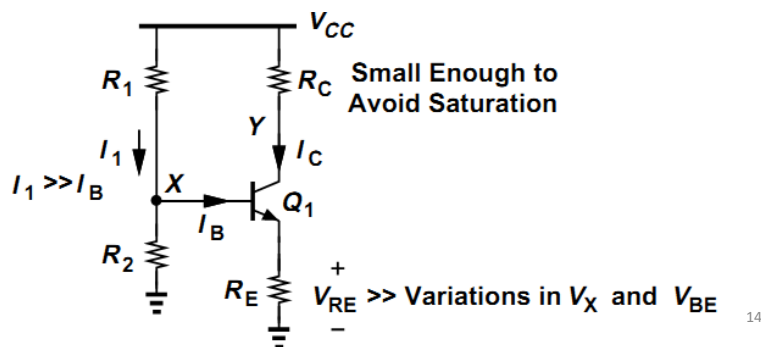
$$V_X = \frac{V_{CC}}{R_1 + R_2} R_2$$

$$V_{BE} = V_X - R_E I_E$$

$$\begin{cases} V_{BE} = V_X - R_E \alpha I_C \\ I_C = I_S \exp(V_{BE}/V_T) \end{cases}$$

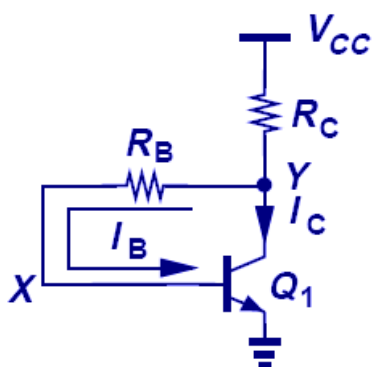
Polarização com degeneração de emissor

- Rotina de projeto:
 1. Escolher I_C de acordo com os parâmetros de pequenos sinais desejados (g_m e r_π)
 2. Escolher R_E , de forma que $V_{RE} \sim 200\text{mV}$
 3. Calcular $V_X = V_{BE} + R_E I_C$, $V_{BE} = V_T \ln(I_C/I_S)$
 4. Escolher R_1 e R_2 de forma que $I_1 \gg I_B$



Autopolarização

- O transistor está sempre polarizado na região ativa: $V_C > V_B$ e $V_B > V_E$
- $R_C \gg R_B/\beta$, para diminuir a dependência de I_C com β .



$$I_B \ll I_C$$

$$V_C = V_{BE} + R_B I_B$$

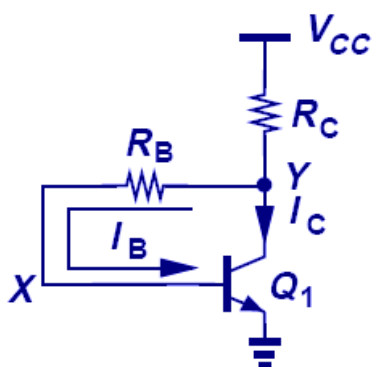
$$\begin{cases} V_C = V_{BE} + R_B \frac{I_C}{\beta} \Rightarrow I_C = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_C + \frac{R_B}{\beta}} \\ V_C \cong V_{CC} - R_C I_C \end{cases}$$

$I_C - I_B$

15

Autopolarização

- Rotina de projeto:
 1. Escolher I_C de acordo com os parâmetros de pequenos sinais desejados (g_m e r_π)
 2. Escolher $R_C = 10R_B/\beta$



$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{1,1R_C}$$

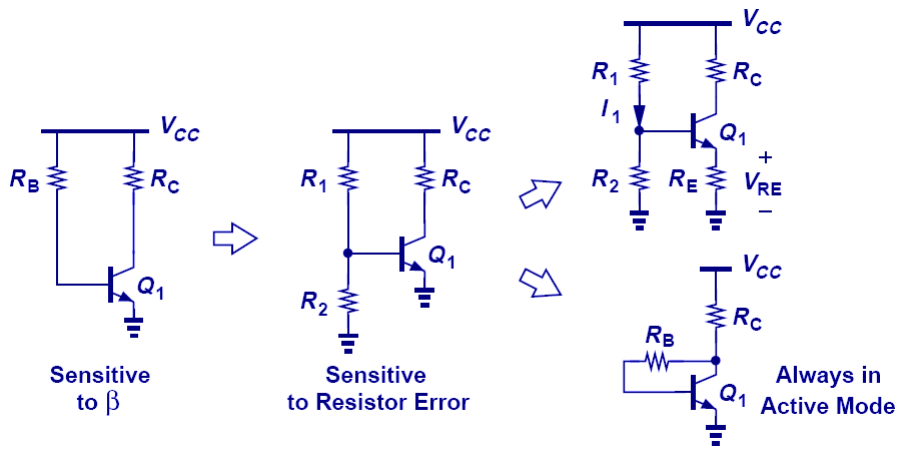
$$R_C = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{1,1I_C}$$

$$R_B = \frac{\beta R_C}{10}$$

- (1) $R_C \gg \frac{R_B}{\beta}$
- (2) $\Delta V_{BE} \ll V_{CC} - V_{BE}$

16

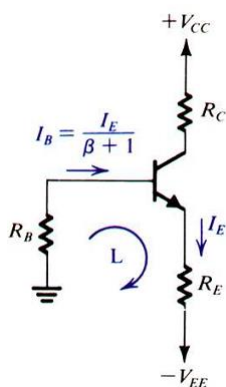
Resumo



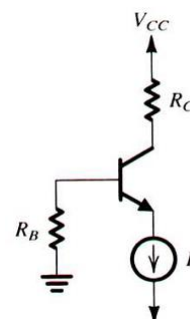
17

Outros tipos de polarização

- Para casa: Encontrar I_C



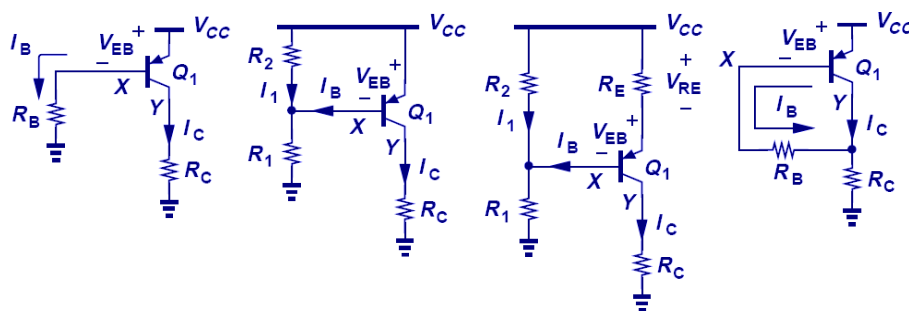
Duas fontes



Fonte de Corrente

18

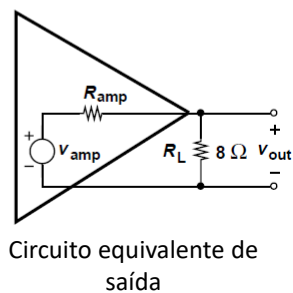
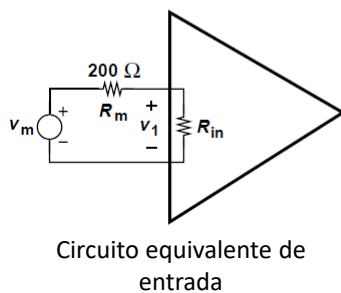
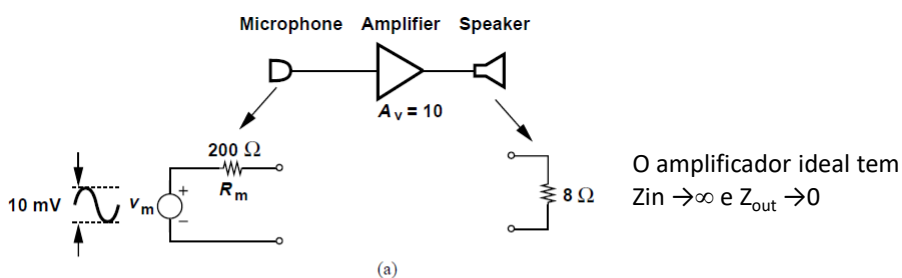
Polarização de transistores PNP



Terra = $-V_{CC}$
 $+V_{CC}$ = terra

19

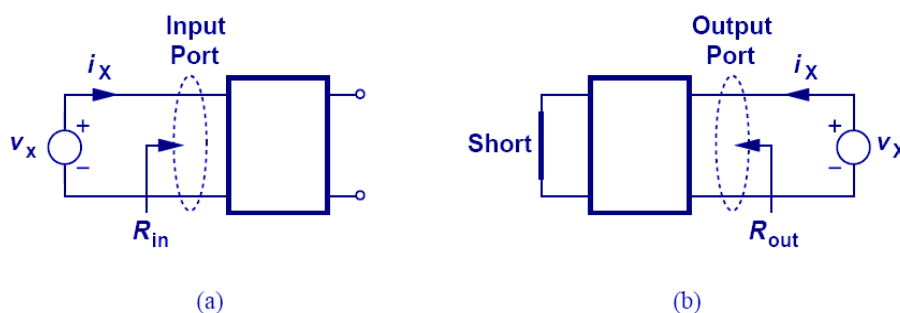
Amplificadores



20

Amplificadores

- Z_{in} e Z_{out}



$$R_x = \frac{V_x}{i_x}$$

21

Amplificadores com o TBJ

Passo a passo do processo de análise para pequenos sinais através dos modelos

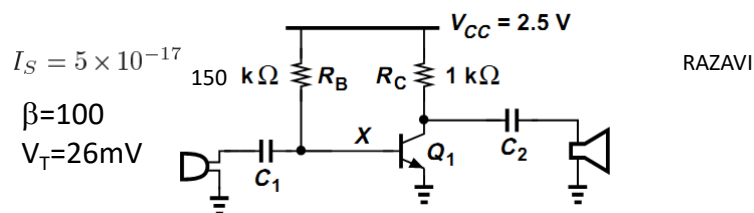
1. Determina-se o Ponto de Operação P.O. cc (I_C).
2. Calcula-se os parâmetros de pequenos sinais
 $g_m = I_C/V_T$, $r_\pi = \beta/g_m$ e $r_e = V_T/I_E \cong 1/g_m$.
3. Substitui-se as fontes cc de tensão por um curto-circuito e as fontes cc de corrente por um circuito aberto.
4. Substitui-se o TBJ pelo modelo equivalente.
5. Analisa-se o circuito resultante para determinar as grandezas de interesse.

22

9

Exercício

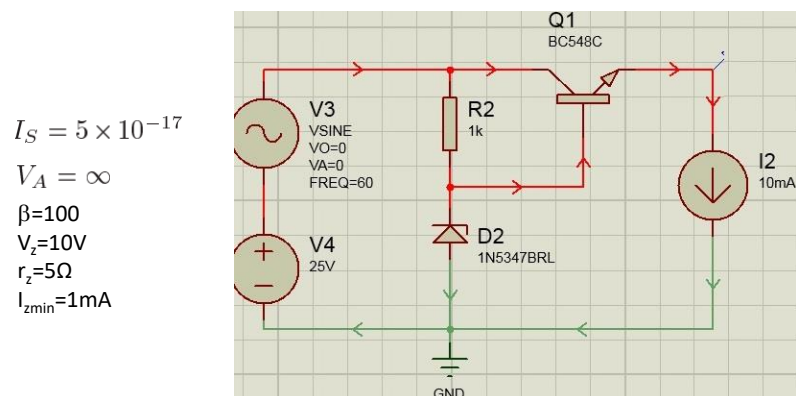
- Assuma que C_1 e C_2 tenham valor alto, com e sem o efeito Early ($V_A = 200V$) e calcule A_v , R_{in} e R_{out}



23

Exercício (para casa)

- Determine a regulação de linha e de carga.

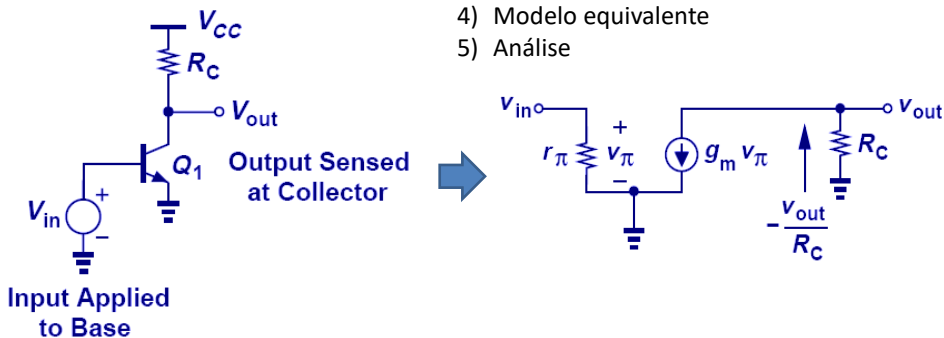


24

Amplificadores com o TBJ

- Emissor comum

- 1) Determinar o ponto de operação (I_C)
- 2) Calcula-se os parâmetros de pequenos sinais
- 3) $V_{cc}=0$ V e $I_{cc}=0$ A
- 4) Modelo equivalente
- 5) Análise

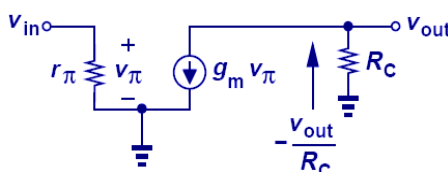


25

Amplificadores com o TBJ

- Emissor comum

- 1) Determinar o ponto de operação (I_C)
- 2) Calcula-se os parâmetros de pequenos sinais
- 3) $V_{cc}=0$ V e $I_{cc}=0$ A
- 4) Modelo equivalente
- 5) Análise

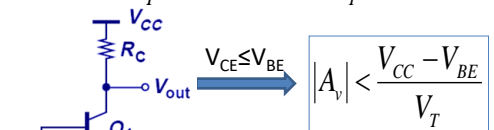


$$A_v = \frac{v_{out}}{v_{in}}$$

$$-\frac{v_{out}}{R_C} = g_m v_{\pi} = g_m v_{in}$$

$$A_v = -g_m R_C$$

$$|A_v| = \frac{I_C}{V_T} R_C \Rightarrow |A_v| = \frac{V_{RC}}{V_T} \Rightarrow |A_v| = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{V_T}$$



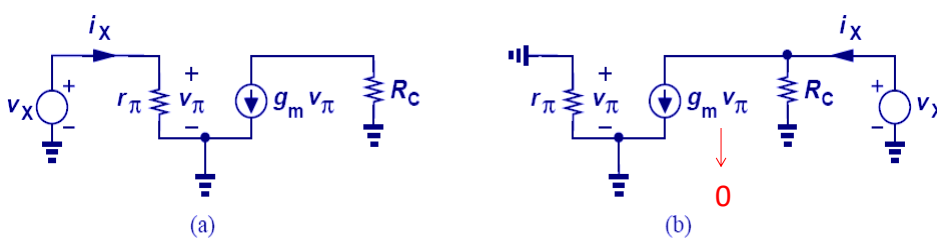
Limite de operação na região ativa

$$A_i = \frac{i_o}{i_i} = \frac{-g_m v_{\pi}}{v_{\pi} / r_{\pi}} = -r_{\pi} g_m = -\beta$$

26

Amplificadores com o TBJ

- Emissor comum
 - Impedância de entrada/saída



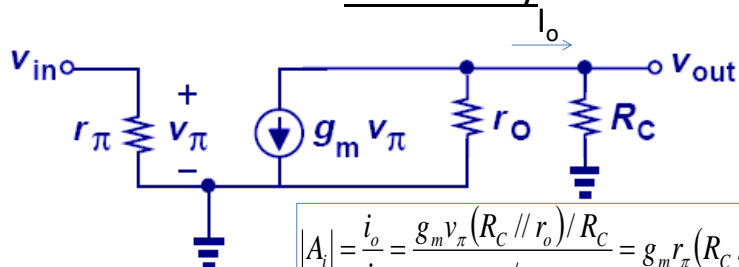
$$R_{in} = \frac{v_X}{i_X} = r_\pi$$

$$R_{out} = \frac{v_X}{i_X} = R_C$$

27

Amplificadores com o TBJ

- Emissor comum com Efeito Early



$$A_v = -g_m (R_C \parallel r_o)$$

$$R_{out} = R_C \parallel r_o$$

$$R_{in} = r_\pi$$

$$|A_i| = \frac{i_o}{i_i} = \frac{g_m v_\pi (R_C \parallel r_o) / R_C}{v_\pi / r_\pi} = g_m r_\pi (R_C \parallel r_o) / R_C$$

$$|A_i| = \beta \left(\frac{R_C r_o}{R_C + r_o} \right) \frac{1}{R_C}$$

$$|A_i| = \beta \left(\frac{r_o}{R_C + r_o} \right) \cong \beta$$

28

Fontes de figuras da aula

- Aula do prof. Fabiano Fruett
- Introdução à física dos semicondutores (H.A. Mello)
- Fundamentos da microeletrônica (Razavi)
- Microeletrônica (Sedra)

29

Sugestão de estudo

- Razavi, Cap. 5
- Sedra/Smith cap. 4 seções 4.9 até 4.11 e 4.13 até 4.15
Exercícios e problemas correspondentes

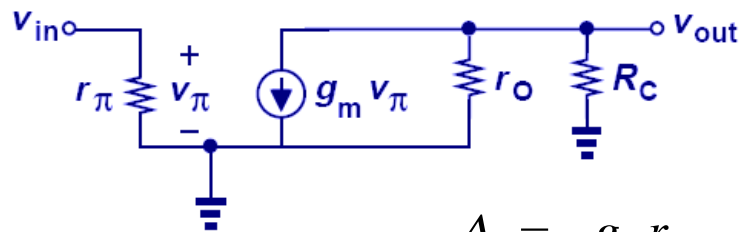
Para saber mais:

Paul R. Gray e Robert G. Meyer, Analysis and Design of Analog integrated Circuits, John Wiley & Sons

30

Amplificadores com o TBJ

- Emissor comum com Efeito Early
– GANHO INTRÍNSECO ($R_C \rightarrow \infty$)

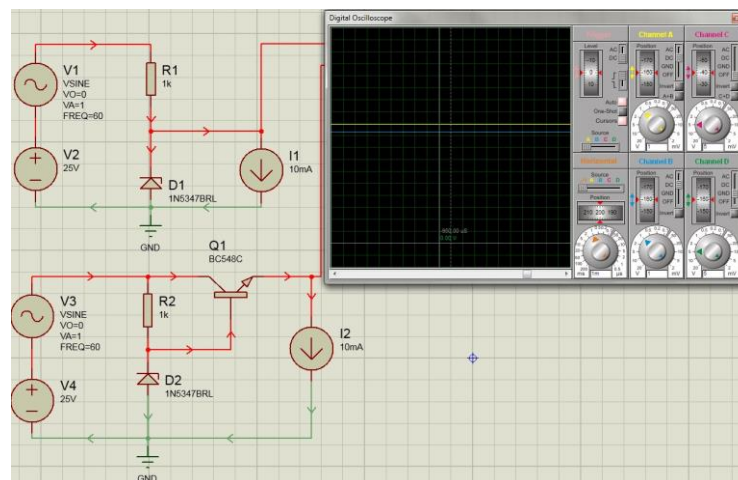


$$A_v = -g_m r_O$$

$$|A_v| = \frac{V_A}{V_T}$$

31

Fonte regulada



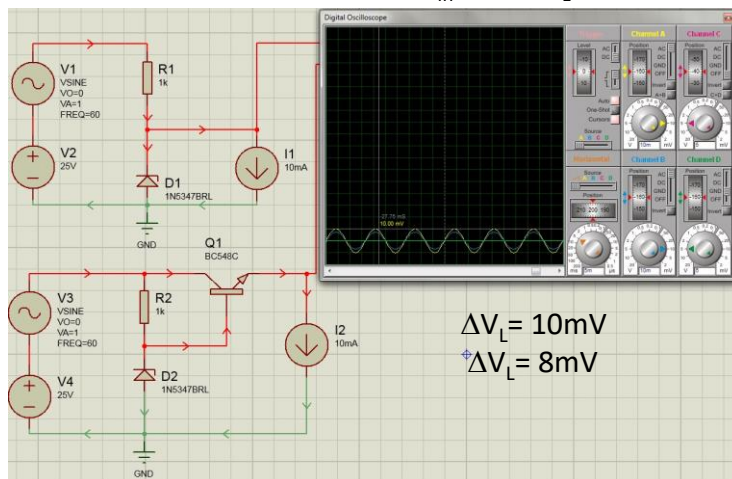
Corrente contínua

32

Fonte regulada

Regulação de linha

$\Delta V_{in}=1V$ e $\Delta I_L=0mA$

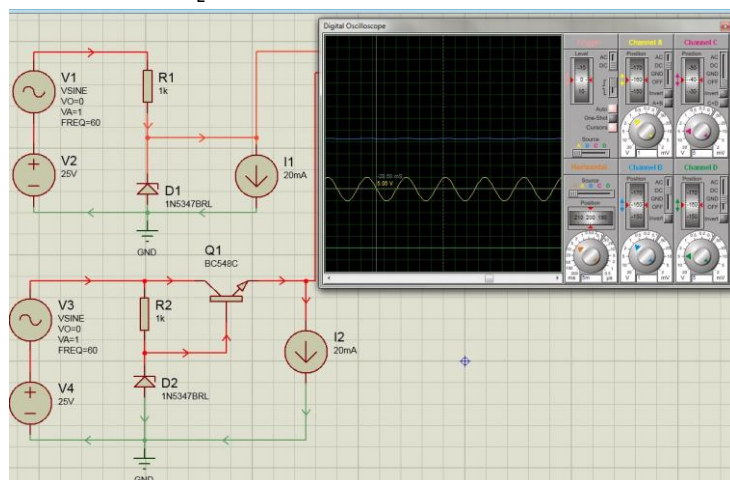


Corrente alternada

33

Fonte regulada

Aumento de I_L

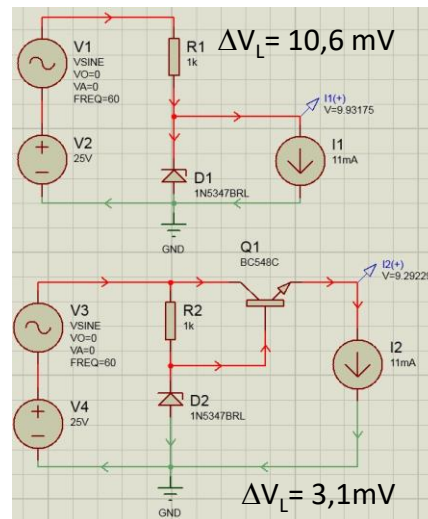
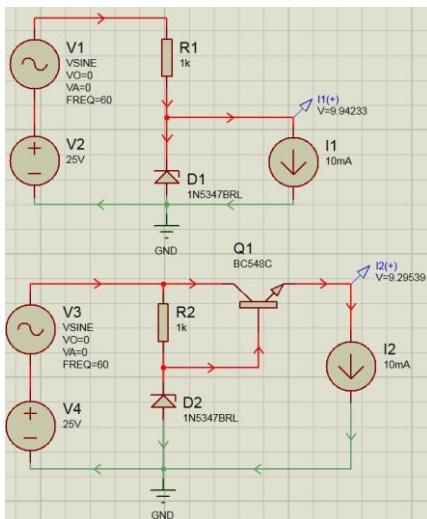


Corrente contínua

34

Fonte regulada

$V_{ac}=0$ e $\Delta I_L = 1\text{mA}$



35