

CHAPTER 5

Aula 24:

O Amplificador Emissor Comum (EC)

(p.290-293)

123
123

PSI 3321– Eletrônica Programação para a Terceira Prova

19ª 17/05	Estruturas e símbolos dos transistores bipolares de junção, definição dos modos de operação (corte, ativo, saturação) do TBJ, operação do transistor npn no modo ativo (polarização e distribuição de portadores minoritários).	Sedra, Cap. 5 p. 235-238
20ª 20/05	Equações das correntes no transistor (definição do ganho de corrente em emissor comum - β - e do ganho de corrente em base comum - α), modelos de circuitos equivalentes para grandes sinais do transistor npn operando no modo ativo, exercícios.	Sedra, Cap. 5 p. 239-243.
21ª 31/05	Análise cc de circuitos com transistores, exercícios selecionados: 5.1, 5.4, 5.10.	Sedra, Cap. 5 p. 246 + 264-269
22ª 03/06	O TBJ como amplificador para pequenos sinais (as condições c.c., a corrente de coletor e a transcondutância)	Sedra, Cap. 5, p. 263-264; p. 275-276.
23ª 07/06	A corrente de base e a resistência de entrada da base, a resistência de entrada do emissor. Ganho de tensão, Exemplo 5.38, modelos equivalentes (modelos π-híbrido e T)	Sedra, Cap. 5, p. 276-279
24ª 14/06	Aplicação dos modelos equivalentes para pequenos sinais, Efeito Early. O amplificador emissor comum (EC) - Exercício 5.43	Sedra, Cap. 5 p. 290-293
25ª 17/06	Aula de Exercícios	

3ª. Semana de Provas (20/06 a 24/06/2016)
Data: 22/06/2016 (quarta feira) – Horário: 13:10h às 15:10h

124

24ª Aula:

Amplificadores com TBJ

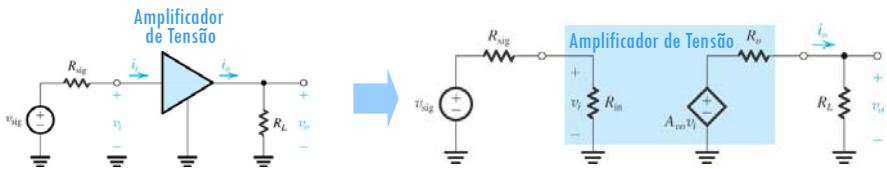
Criando Modelos para Pequenos Sinais para o TBJ

Ao final desta aula você deverá estar apto a:

- Explicar a importância e como determinar os principais parâmetros de qualidade de um amplificador (ganhos e impedâncias)
- Analisar circuitos amplificadores na configuração emissor comum determinando parâmetros como ganhos e impedâncias
- Analisar circuitos amplificadores para determinar a forma de onda de tensão de saída, considerando os limites de corte e saturação

125

Uma palavra sobre Circuitos Amplificadores



$$A_{vO} = \left. \frac{v_o}{v_i} \right|_{\text{Carga}=\infty} \quad R_i = \left. \frac{v_i}{i_i} \right|_{\text{Carga}=\infty}$$

$$A_v = \left. \frac{v_o}{v_i} \right|_{\text{Carga}=R_L}$$

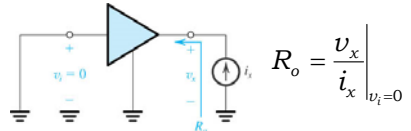
$$R_{in} = \left. \frac{v_i}{i_i} \right|_{\text{Carga}=R_L}$$

$$A_i = \left. \frac{i_o}{i_i} \right|_{\text{Carga}=R_L}$$

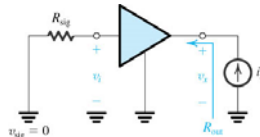
$$A_{is} = \left. \frac{i_{os}}{i_i} \right|_{\text{Carga}=\text{curto}} \quad (\text{max } A_i)$$

$$G_v = \left. \frac{v_o}{v_{sig}} \right|_{\text{Carga}=R_L}$$

$$G_{vO} = \left. \frac{v_o}{v_{sig}} \right|_{\text{Carga}=\infty}$$



$$R_o = \left. \frac{v_x}{i_x} \right|_{v_i=0}$$

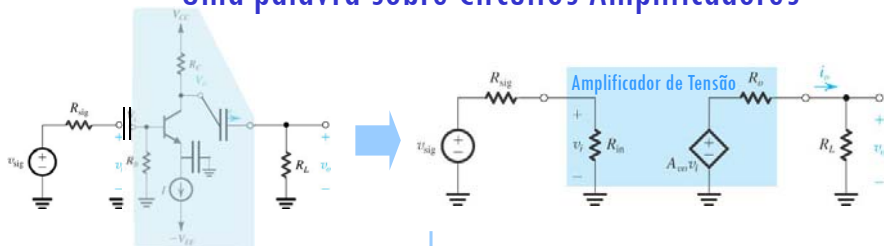


$$R_{out} = \left. \frac{v_x}{i_x} \right|_{v_{sig}=0}$$

Escolhemos estas!!!

126

Uma palavra sobre Circuitos Amplificadores



$$A_{vo} = \left. \frac{v_o}{v_i} \right|_{\text{Carga}=\infty} \quad R_i = \left. \frac{v_i}{i_i} \right|_{\text{Carga}=\infty}$$

$$A_v = \left. \frac{v_o}{v_i} \right|_{\text{Carga}=R_L}$$

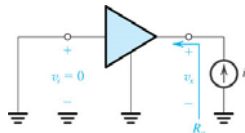
$$R_{in} = \left. \frac{v_i}{i_i} \right|_{\text{Carga}=R_L}$$

$$A_i = \left. \frac{i_o}{i_i} \right|_{\text{Carga}=R_L}$$

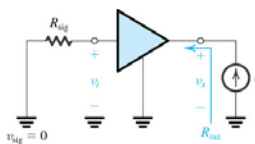
$$A_{is} = \left. \frac{i_{os}}{i_i} \right|_{\text{Carga}=\text{curto}} \quad (\text{max } A_i)$$

$$G_v = \left. \frac{v_o}{v_{sig}} \right|_{\text{Carga}=R_L}$$

$$G_{vo} = \left. \frac{v_o}{v_{sig}} \right|_{\text{Carga}=\infty}$$



$$R_o = \left. \frac{v_x}{i_x} \right|_{v_i=0}$$

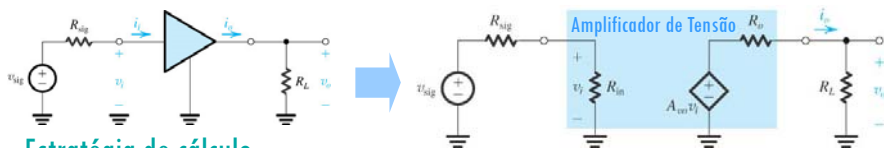


$$R_{out} = \left. \frac{v_x}{i_x} \right|_{v_{sig}=0}$$

Escolhemos estas!!!

127

Uma palavra sobre Circuitos Amplificadores

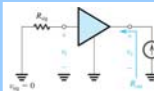


Estratégia de cálculo:

1. Ganho de Tensão: Determinar diretamente a relação \$v_o\$ por \$v_i\$ (ou \$v_{sig}\$), com ou sem carga — como for pedido.
2. Impedância de Entrada: Determinar diretamente a relação \$v_i\$ por \$i_i\$, com ou sem carga — como for pedido.
3. Impedância de Saída: Curto-circuitar a fonte de tensão de entrada (\$v_{sig}\$) e determinar a relação \$v_x\$ por \$i_x\$ injetado na saída
4. Ganho de Corrente (em curto circuito): Curto-circuitar a saída (\$R_L\$) e determinar a corrente \$i_o\$

$$A_v = \left. \frac{v_o}{v_i} \right|_{\text{Carga}=R_L}$$

$$R_{in} = \left. \frac{v_i}{i_i} \right|_{\text{Carga}=R_L}$$



$$R_{out} = \left. \frac{v_x}{i_x} \right|_{v_{sig}=0}$$

$$A_{is} = \left. \frac{i_{os}}{i_i} \right|_{\text{Carga}=\text{curto}} \quad (\text{max } A_i)$$

$$G_v = \left. \frac{v_o}{v_{sig}} \right|_{\text{Carga}=R_L}$$

Relações

- $\frac{v_i}{v_{sig}} = \frac{R_{in}}{R_{in} + R_{sig}}$
- $A_v = A_{vo} \frac{R_L}{R_L + R_o}$
- $A_{vo} = G_m R_o$

- $G_v = \frac{R_{in}}{R_{in} + R_{sig}} A_{vo} \frac{R_L}{R_L + R_o}$
- $G_{vo} = \frac{R_i}{R_i + R_{sig}} A_{vo}$
- $G_v = G_{vo} \frac{R_L}{R_L + R_{out}}$

128

Tabela 4.3 RELAÇÕES ENTRE OS PARÂMETROS DO MODELO PARA PEQUENOS SINAIS DO TBJ

Parâmetros do Modelo em Termos das Correntes de Polarização cc :

$$g_m = \frac{I_C}{V_T}$$

$$r_\pi = \frac{V_T}{I_B} = \beta \left(\frac{V_T}{I_C} \right) \quad r_o = \frac{V_A}{I_C}$$

Em termos de g_m :

$$r_\pi = \frac{\beta}{g_m}$$

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

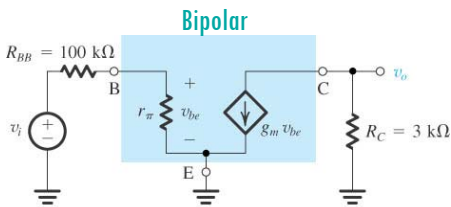
$$\alpha = \frac{\beta}{\beta + 1}$$

$$\beta + 1 = \frac{1}{1 - \alpha}$$

131

Exemplo 5.14: Desejamos analisar o circuito abaixo para determinar seu ganho de tensão. Suponha $\beta = 100$

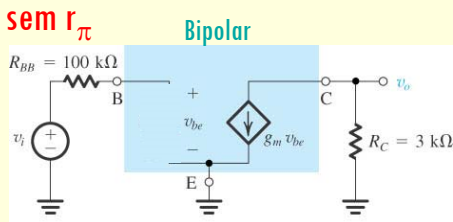
5. Analise o circuito resultante para determinar as grandezas de interesse (por exemplo, ganho de tensão, resistência de entrada).



$$v_o = -g_m v_{be} \times R_C \quad v_{be} = \frac{r_\pi}{R_{BB} + r_\pi} v_i$$

$$A_v|_{\text{Carga}=\infty} = \frac{v_o}{v_i} \Big|_{\text{Carga}=\infty} = -\frac{r_\pi}{R_{BB} + r_\pi} g_m R_C$$

$$A_v|_{\text{Carga}=\infty} = -\frac{1,09}{100 + 1,09} 92m \times 3k = -2,98 \frac{V}{V}$$

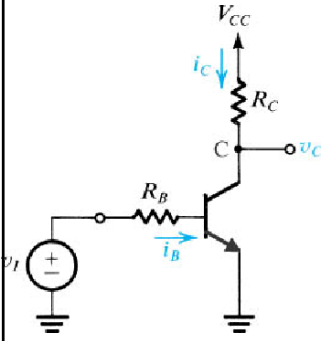


$$v_o = -g_m v_{be} \times R_C \quad v_{be} = v_i$$

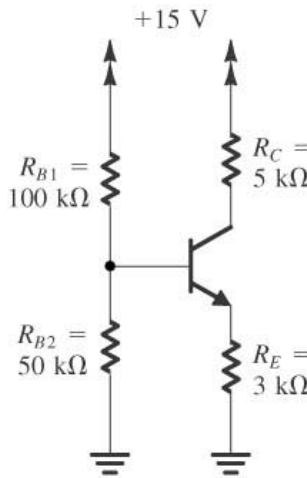
$$A_v|_{\text{Carga}=\infty} = \frac{v_o}{v_i} \Big|_{\text{Carga}=\infty} = -g_m R_C$$

$$A_v|_{\text{Carga}=\infty} = -92m \times 3k = -276 \frac{V}{V}$$

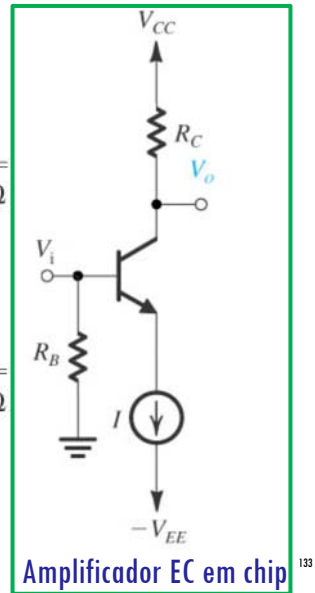
O Amplificador TBJ Emissor Comum (EC)



Amplificador EC
"conceitual"



Amplificador EC
1980

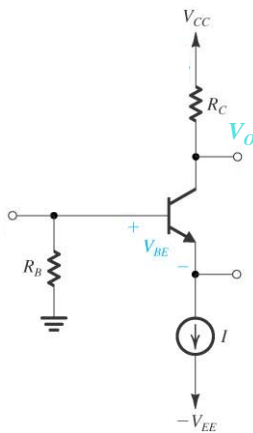


Amplificador EC em chip

133

O Amplificador TBJ Emissor Comum (EC)

Polarização



134

O Amplificador TBJ Emissor Comum sem R_e (EC)

Análise Pequenos Sinais

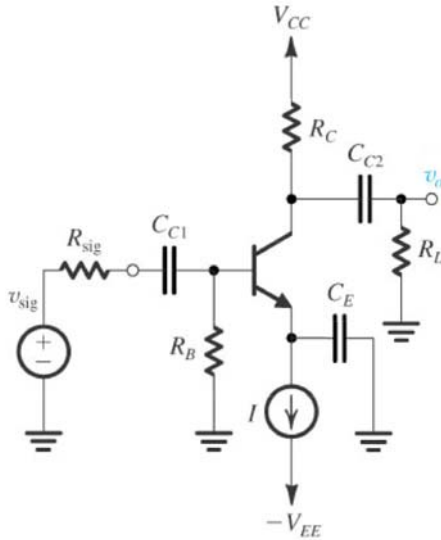
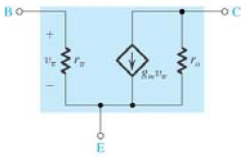
2. parâmetros

$$g_m = I_C / V_T$$

$$r_x = \beta / g_m$$

$$r_o = |V_A| / I_C$$

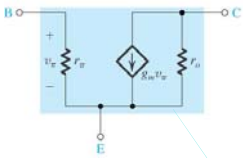
4. modelos



135

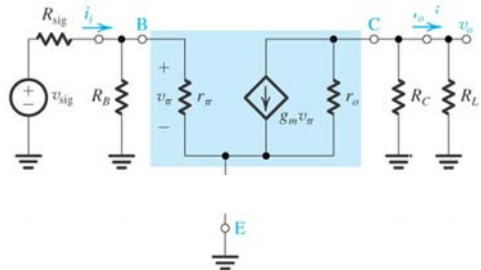
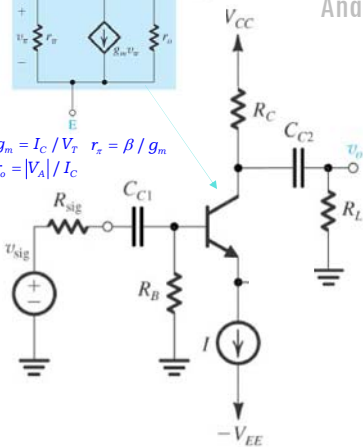
O Amplificador TBJ Emissor Comum sem R_e (EC) e sem capacitor C_E

Análise Pequenos Sinais



$$g_m = I_C / V_T \quad r_x = \beta / g_m$$

$$r_o = |V_A| / I_C$$

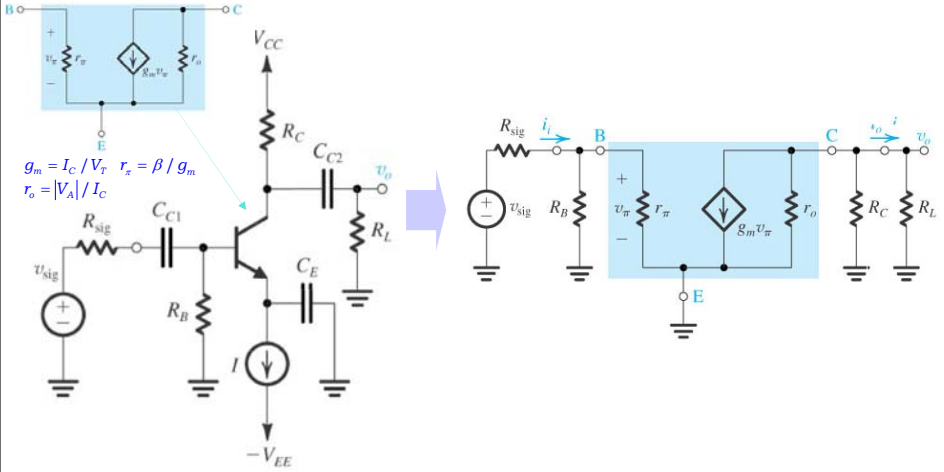


Agora basta determinar as grandezas de interesse (ganhos, impedâncias, etc.)

136

O Amplificador TBJ Emissor Comum sem R_e (EC)

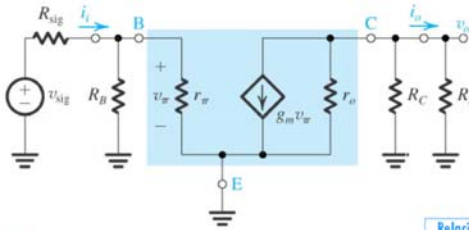
Análise Pequenos Sinais



Agora basta determinar as grandezas de interesse (ganhos, impedâncias, etc.)

O Amplificador TBJ Emissor Comum sem R_e (EC)

Análise Pequenos Sinais



Estratégia de cálculo:

1. Ganho de Tensão: Determinar diretamente a relação v_o por v_i (ou v_{sig}).
2. Impedância de Entrada: Determinar diretamente a relação v_i por i_i .
3. Impedância de Saída: Curto-circuitar a fonte de tensão de entrada (v_{sig}) e determinar a relação v_x por i_x .
4. Ganho de Corrente (em curto circuito): Curto-circuitar a saída (R_L) e determinar a corrente i_o .

Relações

- $v_i = \frac{R_{in}}{R_{in} + R_{sig}} v_{sig}$
- $A_v = A_{v_{mid}} \frac{R_L}{R_L + R_{out}}$
- $A_{v_{mid}} = \frac{R_C}{R_C + R_{out}} A_{v_{oc}}$
- $A_{v_{oc}} = G_m R_C$
- $G_m = \frac{R_{in}}{R_{in} + R_{sig}} A_{v_{oc}}$
- $G_v = G_m \frac{R_L}{R_L + R_{out}}$
- $G_o = \frac{R_{in}}{R_{in} + R_{sig}} A_{v_{oc}} \frac{R_L}{R_L + R_{out}}$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} \Big|_{\text{Carga}=R_L}$$

$$R_{in} = \frac{v_i}{i_i} \Big|_{\text{Carga}=R_L}$$

$$R_{out} = \frac{v_x}{i_x} \Big|_{v_{sig}=0}$$

$$A_{iS} = \frac{i_{oS}}{i_i} \Big|_{\text{Carga}=\text{curto}} \quad (\text{max } A_i)$$

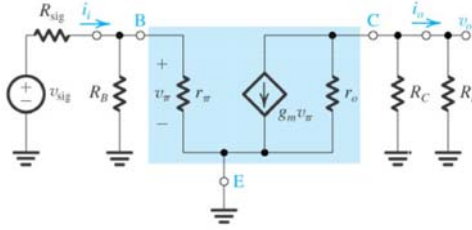
$$G_v = \frac{v_o}{v_{sig}} \Big|_{\text{Carga}=R_L}$$

O Amplificador TBJ Emissor Comum sem R_e (EC)

Análise Pequenos Sinais

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} \Big|_{\text{Carga}=R_L}$$

$$G_v = \frac{v_o}{v_{sig}} \Big|_{\text{Carga}=R_L}$$



$$R_{in} = \frac{v_i}{i_i} \Big|_{\text{Carga}=R_L}$$

1. Ganho de Tensão: Determinar diretamente a relação v_o por v_i (ou v_{sig}).

$$v_o = -(R_L \parallel R_C \parallel r_o) g_m v_\pi$$

$$\text{Se } v_\pi = v_i \rightarrow A_v = \frac{v_o}{v_i} = -g_m (r_o \parallel R_C \parallel R_L)$$

$$G_v? \quad v_\pi = v_{sig} \frac{(R_B \parallel r_\pi)}{R_{sig} + (R_B \parallel r_\pi)}$$

$$v_o = -(R_L \parallel R_C \parallel r_o) g_m v_{sig} \frac{(R_B \parallel r_\pi)}{R_{sig} + (R_B \parallel r_\pi)}$$

$$G_v = \frac{v_o}{v_{sig}} = -\frac{(R_B \parallel r_\pi)}{R_{sig} + (R_B \parallel r_\pi)} g_m (r_o \parallel R_C \parallel R_L)$$

2. Impedância de Entrada: Determinar diretamente a relação v_i por i_i

$$\text{Se } v_\pi = v_i \rightarrow R_{in} = \frac{v_i}{i_i} = \frac{(R_B \parallel r_\pi) i_i}{i_i}$$

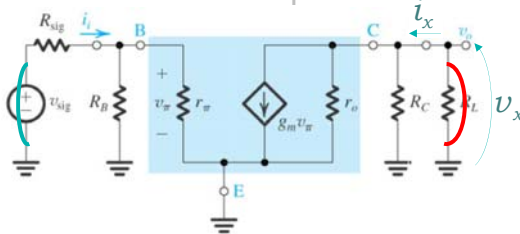
$$R_{in} = R_B \parallel r_\pi$$

139

O Amplificador TBJ Emissor Comum sem R_e (EC)

Análise Pequenos Sinais

$$R_{out} = \frac{v_x}{i_x} \Big|_{v_{sig}=0}$$



$$A_{is} = \frac{i_{os}}{i_i} \Big|_{\text{Carga}=\text{curto}}$$

3. Impedância de Saída: Curto-circuitar a fonte de tensão de entrada (v_{sig}) e determinar a relação v_x por i_x

$$v_{sig} = 0 \rightarrow i_i = 0 \rightarrow v_\pi = 0$$

$$\text{Se } v_\pi = 0 \rightarrow g_m v_\pi = 0 \text{ (aberto)}$$

$$v_x = (r_o \parallel R_C) i_x$$

$$\frac{v_x}{i_x} = R_{out} = (r_o \parallel R_C)$$

4. Ganho de Corrente (em curto circuito): Curto-circuitar a saída (R_L) e determinar a corrente i_o

$$i_i = \frac{v_\pi}{r_\pi \parallel R_B}$$

$$i_{os} = -(i_{R_C} + i_{r_o} + g_m v_\pi)$$

$$i_{os} = -g_m v_\pi$$

$$i_{os} = -g_m (r_\pi \parallel R_B) i_i$$

$$A_{is} = \frac{i_{os}}{i_i} = -g_m (r_\pi \parallel R_B)$$

$$A_{is} \approx -g_m r_\pi = -g_m \frac{\beta}{g_m} = -\beta$$

2. parâmetros

$$g_m = I_C / V_T$$

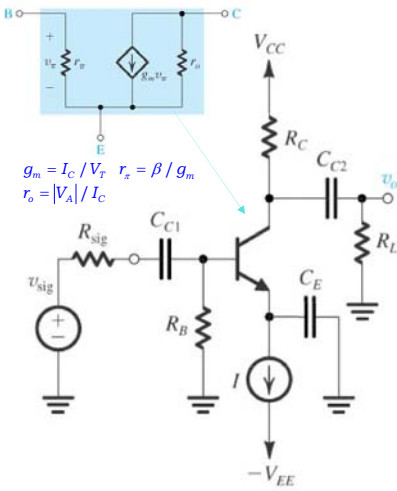
$$r_\pi = \beta / g_m$$

$$r_o = |V_A| / I_C$$

140

O Amplificador TBJ Emissor Comum sem R_e (EC)

Análise Pequenos Sinais



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

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

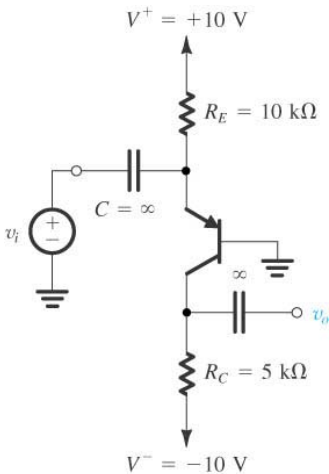
$$R_{out} = (r_o \parallel R_C)$$

$$A_{is} \approx -g_m r_\pi = -g_m \frac{\beta}{g_m} = -\beta$$

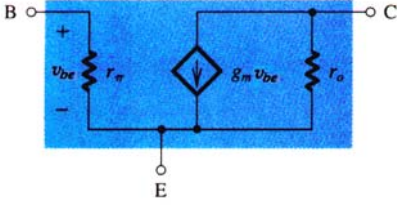
Exemplo 5.16: Desejamos analisar o circuito abaixo para determinar o ganho de tensão e as formas de onda nos vários pontos do circuito. O capacitor C é um capacitor de acoplamento cuja função é acoplar o sinal v_i ao emissor e ao mesmo tempo bloquear grandezas cc . Desse modo a polarização cc estabelecida juntamente por V^+ , V^- , R_E e R_C não será alterada quando o sinal v_i for conectado. Para o objetivo deste exemplo, suporemos C como sendo de valor infinito — isto é, agirá como um perfeito curto-circuito nas frequências de interesse e $\beta = 100$. De forma similar, um outro capacitor de valor muito alto será usado para acoplar o sinal de saída v_o para outras partes do sistema. Use o modelo T.

Estratégia de análise:

1. Determine o ponto de operação cc do TBJ e em particular o valor da corrente cc de coletor, I_C
2. Calcule os valores dos parâmetros do modelo para pequenos sinais: $g_m = I_C / V_T$, $r_\pi = \beta / g_m$ e/ou outros parâmetros (r_o , $r_o = V_T / I_E$)
3. Elimine as fontes cc substituindo cada fonte cc de tensão por um curto-circuito e cada fonte cc de corrente por um circuito aberto. Substitua os capacitores externos por curtos (freq medias).
4. Substitua a TBJ por um dos seus modelos equivalentes. Embora qualquer um dos modelos possa ser utilizado, um deles deve ser mais conveniente dependendo do circuito a ser analisado.
5. Analise o circuito resultante para determinar as grandezas de interesse (por exemplo, ganho de tensão, resistência de entrada).



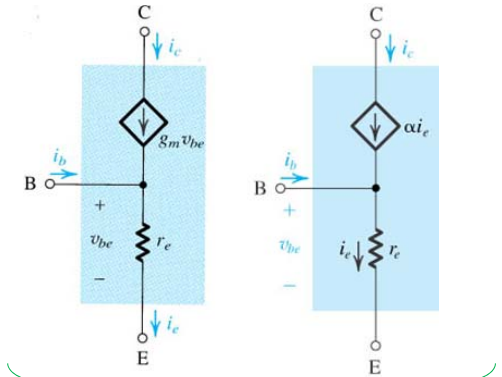
Os Modelos para Pequenos Sinais para o TBJ



Modelo Tradicional
(π -Híbrido)

$$v_{be} = i_b r_\pi$$

$$g_m = \frac{I_C}{V_T} \quad r_\pi = \frac{\beta}{g_m} \quad r_o \approx \frac{V_A}{I_C}$$



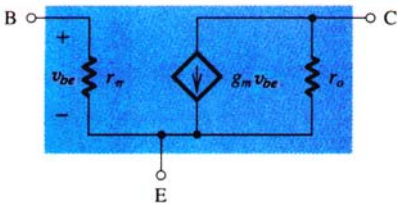
Modelo T

$$v_{be} = i_e r_e = (\beta + 1) i_b r_e$$

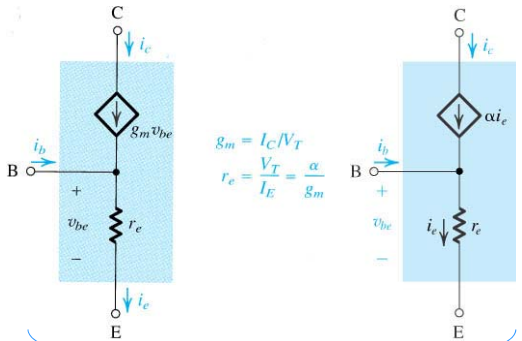
$$i_b r_\pi = (\beta + 1) i_b r_e \rightarrow r_e = \frac{r_\pi}{\beta + 1}$$

143

Os Modelos para Pequenos Sinais para o TBJ



Modelo Tradicional
(π -Híbrido)



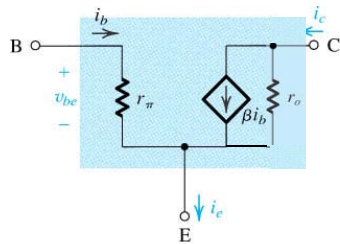
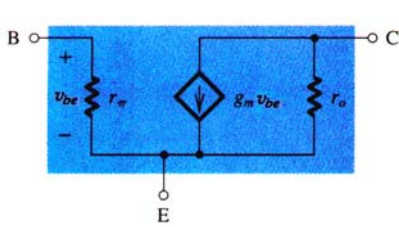
Modelo T

$$r_e = \frac{r_\pi}{\beta + 1} = \frac{\beta}{g_m} \frac{1}{\beta + 1} = \frac{\alpha}{g_m}$$

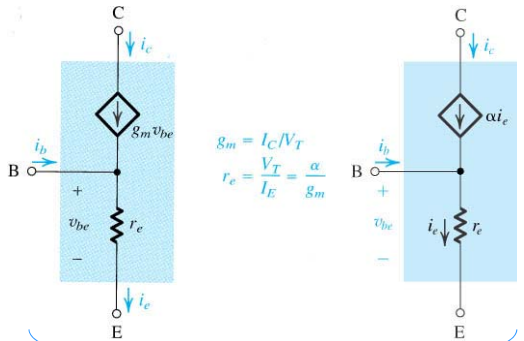
$$r_e = \frac{\alpha}{g_m} = \frac{V_T}{I_C / \alpha} = \frac{V_T}{I_E}$$

144

Os Modelos para Pequenos Sinais para o TBJ



Modelo Tradicional
(π -Híbrido)



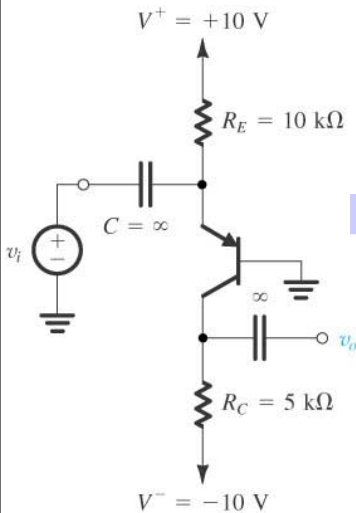
Modelo T

$$g_m = I_C / V_T$$

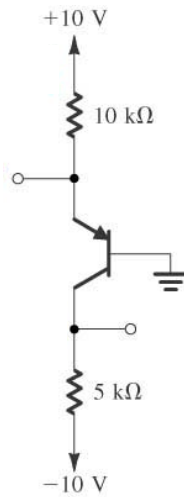
$$r_e = \frac{V_T}{I_E} = \frac{\alpha}{g_m}$$

Exemplo 5.16:

1. Determine o ponto de operação cc do TBJ e em particular o valor da corrente cc de coletor, I_C



Supondo Reg Ativa



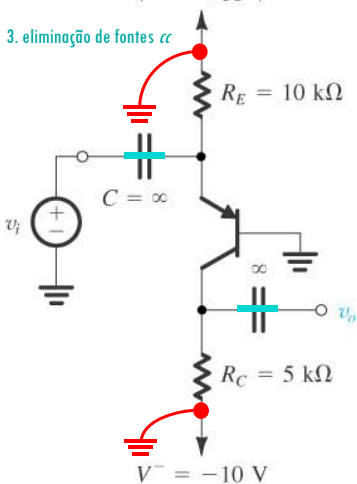
(b)

Exemplo 5.16:

2. Calcule os valores dos parâmetros do modelo para pequenos sinais: $g_m = I_C / V_T$; $r_\pi = \beta / g_m$ e/ou $r_e = V_T / I_E$
3. Elimine as fontes cc substituindo cada fonte cc de tensão/corrente por curto-circuitos/circuitos abertos e os caps por curtos (sinal passa integralmente)
4. Crie o circuito para peq sinais e substitua a TBJ por um dos seus modelos equivalentes

$$V^+ = +10 \text{ V}$$

3. eliminação de fontes cc



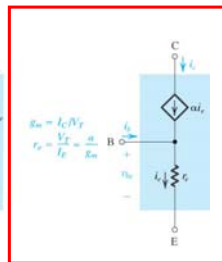
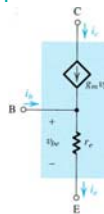
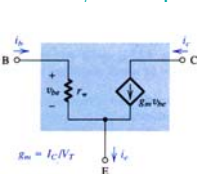
2. parâmetros

$$g_m = I_C / V_T = 0,92 \text{ mA} / 25 \text{ mV} = 37 \text{ mA/V}$$

$$r_\pi = \beta / g_m = 100 / 37 \text{ mA/V} = 2,7 \text{ k}\Omega$$

$$r_e = V_T / I_E = 25 \text{ mV} / 0,93 \text{ mA/V} = 27 \Omega$$

4. circuito/modelos para peq sinais



147

Exemplo 5.16:

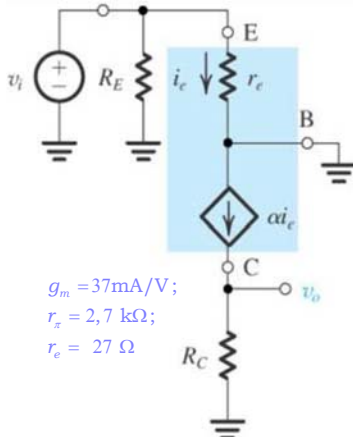
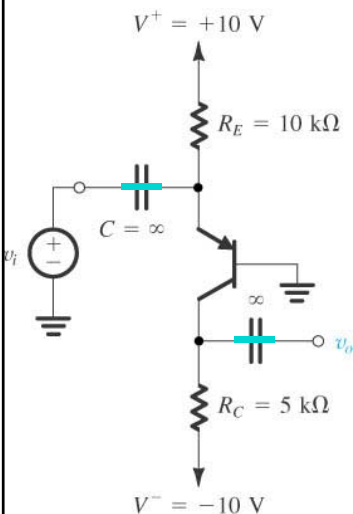
5. Analise o circuito resultante para determinar as grandezas de interesse (por exemplo, ganho de tensão, resistência de entrada).

$$V^+ = +10 \text{ V}$$

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

$$R_C = 5 \text{ k}\Omega$$

$$V^- = -10 \text{ V}$$



$$g_m = 37 \text{ mA/V};$$

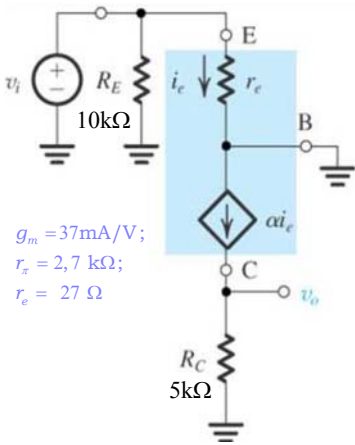
$$r_\pi = 2,7 \text{ k}\Omega;$$

$$r_e = 27 \Omega$$

148

Exemplo 5.16:

5. Analise o circuito resultante para determinar as grandezas de interesse (por exemplo, ganho de tensão, resistência de entrada).



$$i_e = \frac{v_i}{r_e}$$

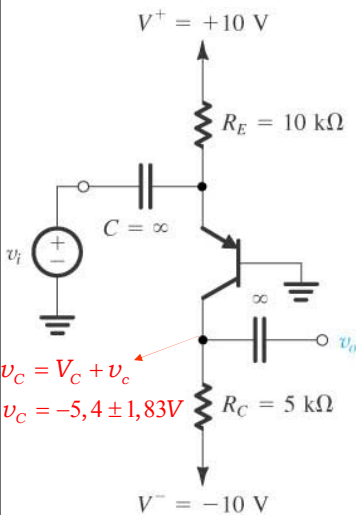
$$v_o = \alpha i_e \times R_C$$

$$A_v|_{\text{Carga}=\infty} = \frac{v_o}{v_i}|_{\text{Carga}=\infty} = \alpha \frac{1}{r_e} R_C$$

$$A_v|_{\text{Carga}=\infty} = \frac{0,99}{27} 5\text{k} = +183 \frac{\text{V}}{\text{V}}$$

149

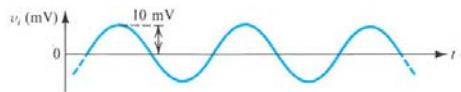
DESAFIO: Exemplo 5.16: Máxima excursão para pequenos sinais?



$$v_{eb_{\text{MAX}}} = \pm 10\text{mV}$$

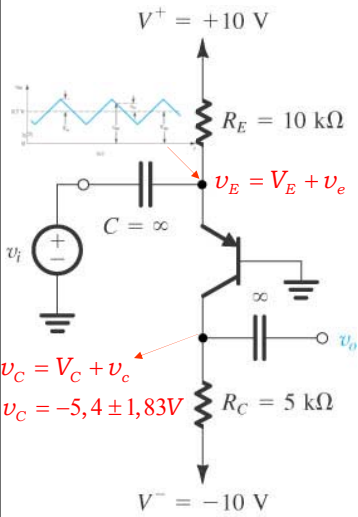
$$v_{o_{\text{MAX}}} = v_{i_{\text{MAX}}} A_v \Leftrightarrow v_{c_{\text{MAX}}} = v_{eb_{\text{MAX}}} A_v$$

$$v_{c_{\text{MAX}}} = 0,01 \times 183 = \pm 1,83\text{V}$$



150

MEGADESAFIO: Exemplo 5.16: Máxima excursão para grandes sinais?

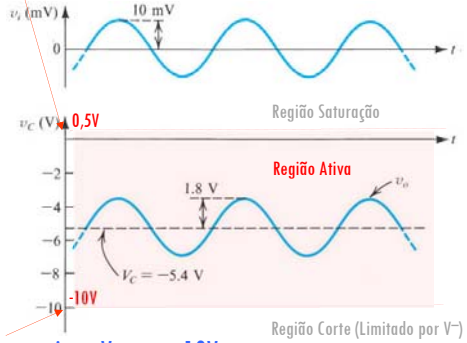


$$v_{eB_{MAX}} = \pm 10\text{ mV} \quad v_{o_{MAX}} = v_{i_{MAX}} A_v \Leftrightarrow v_{c_{MAX}} = v_{eB_{MAX}} A_v$$

$$v_{c_{MAX}} = 0,01 \times 183 = \pm 1,83\text{ V}$$

Saturação:

$$v_C = v_{BE} - v_{EC_{SAT}} = 0,7 - 0,2 = +0,5\text{ V}$$



151

Na região de saturação

~~$$i_C = I_S e^{v_{BE}/V_T}$$~~

~~$$i_C = \beta i_B$$~~

$$i_E = i_C + i_B$$

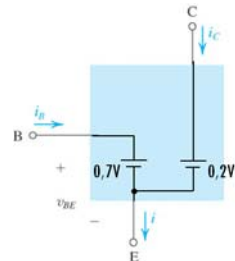
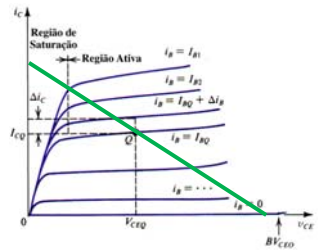
$$V_{BE} = 0,7\text{ V}$$

$$V_{CE_{sat}} = 0,2\text{ V}$$

$$\beta_{FORÇADO} = \frac{i_{C_{sat}}}{i_B}$$

Região Ativa

Região Saturação



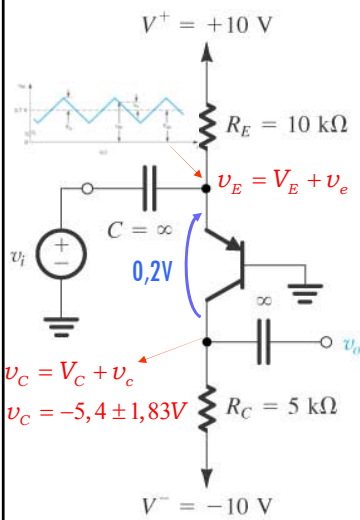
E o corte?

$$V_{BE} < 0,5\text{ V} \rightarrow i_B, i_C, i_E = 0 \text{ e } V_{CE} = \text{aberto!}$$

14

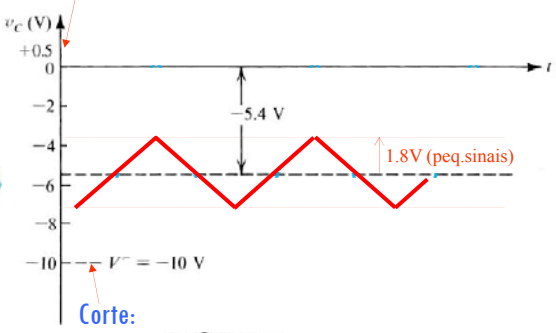
MEGADESAFIO: Exemplo 5.16: Máxima excursão para grandes sinais?

6. Máxima excursão para grandes sinais: analisar corte e saturação



Saturação:

$$v_C = v_{BE} - v_{EC_{SAT}} = 0,7 - 0,2 = +0,5\text{V}$$



$$v_C = V_C + v_c$$

$$v_C = -5,4 \pm 1,83\text{V}$$

$$i_C = 0 \rightarrow v_C = V^- + R_C i_C = -10\text{V}$$