



CHAPTER 5

Aula 21:

**O Transistor como Amplificador
(p.263-264, p.275-276)**

Eletrônica I – PSI3321

Programação para a Segunda Prova (cont.)

21 ^a	02/06	Análise cc de circuitos com transistores, exercícios selecionados: 5.1, 5.4, 5.10.	Sedra, Cap. 5 p. 246 + 264-269	
22 ^a	06/06	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.	Teste 11 9h20-9h35
23 ^a	09/06	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	
24 ^a	13/06	Aplicação dos modelos equivalentes para pequenos sinais, Efeito Early. O amplificador emissor comum (EC) - Exercício 5.43	Sedra, Cap. 5 p. 290-293	Teste 12 9h20-9h35
25 ^a	20/06	O amplificador emissor comum com resistência de emissor	Sedra, Cap. 5 p.293-295	Teste 13 9h20-9h35
26 ^a	23/06	O amplificador base comum (BC)	Sedra, Cap. 5 p. 296-297	
27 ^a	27/06	O amplificador coletor comum (CC)	Sedra, Cap. 5 p. 297-302	Teste 14 9h20-9h35
28 ^a	30/06	Aula de Exercícios		
2 ^a . Semana de Provas (01/07 a 07/07/2017)				
Data: xx/xx/2017 (xxxx-feira) – Horário: xx:xxhs				

21^a Aula:

Amplificadores com TBJ

Criando Modelos para Pequenos Sinais para o TBJ

Ao final desta aula você deverá estar apto a:

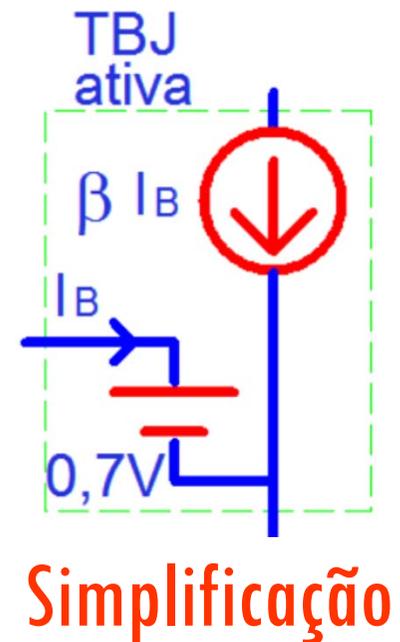
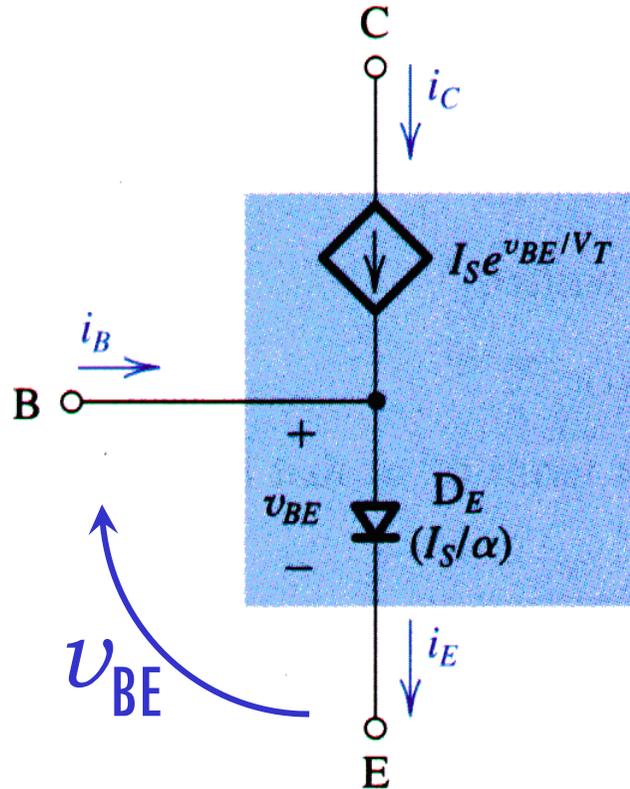
- Explicar como os modelos de transistores TBJ para pequenos sinais são criados
- Criar modelos para pequenos sinais do TBJ
- Determinar ganhos de tensão para pequenos sinais em circuitos simples que empreguem transistor TBJ

Um modelo para o Transistor NPN na região ativa

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

$$i_E = (I_S/\alpha) e^{v_{BE}/V_T}$$

$$i_B = (I_S/\beta) e^{v_{BE}/V_T}$$



Modelo (npn) para grandes sinais na região ativa!

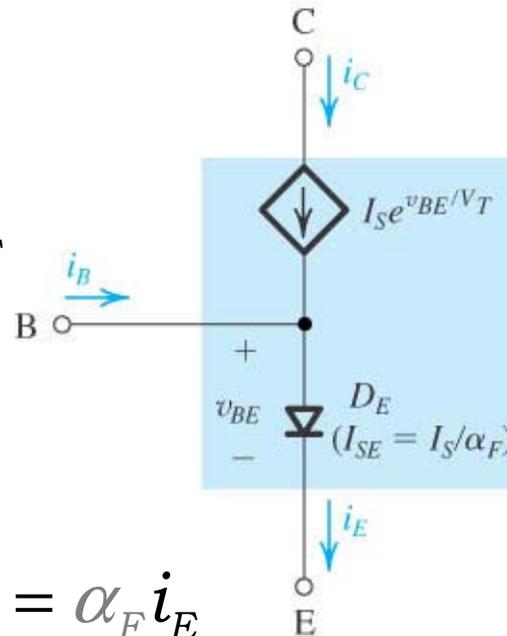
Adequando Modelos

Alguns modelos para o Transistor NPN na região ativa

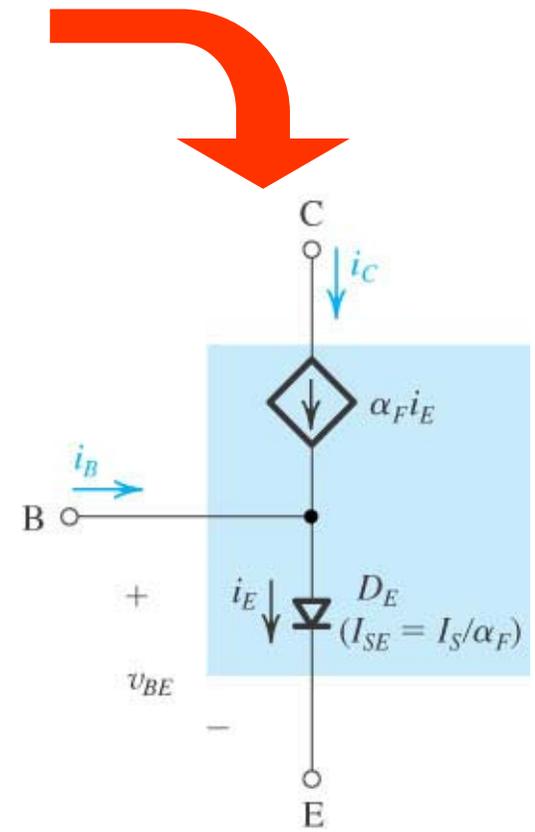
$$i_C = I_S e^{v_{BE}/V_T}$$

$$i_E = \underbrace{(I_S / \alpha_F)}_{I_{SE}} e^{v_{BE}/V_T}$$

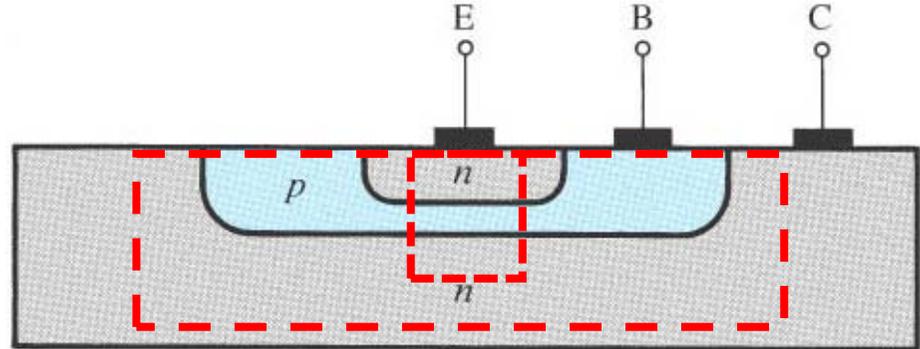
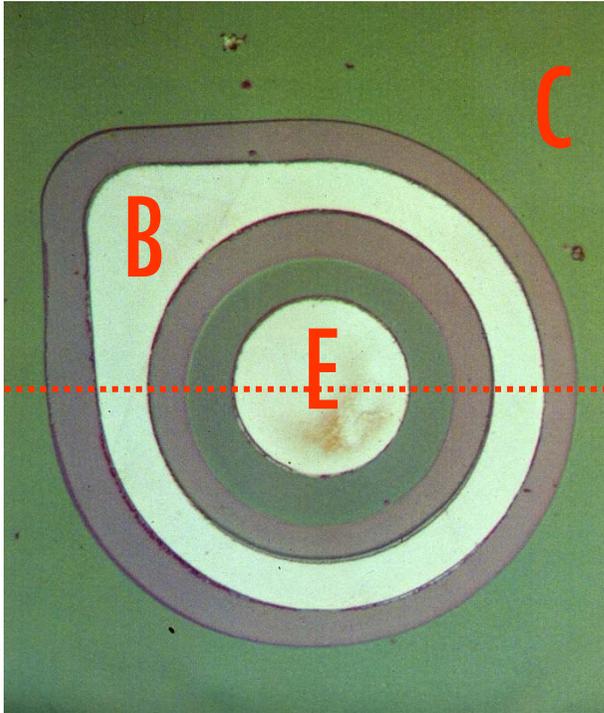
$$i_C = \alpha_F (I_S / \alpha_F) e^{v_{BE}/V_T} = \alpha_F i_E$$



modo ativo

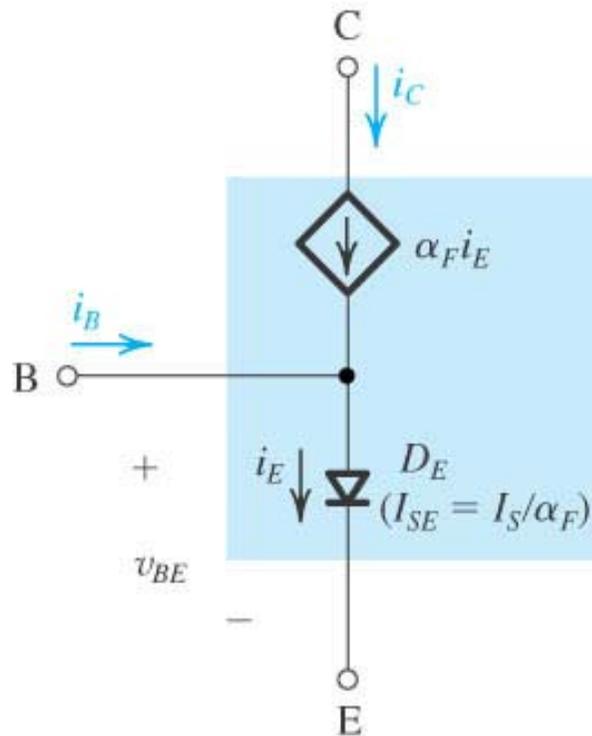


Um Transistor npn Real



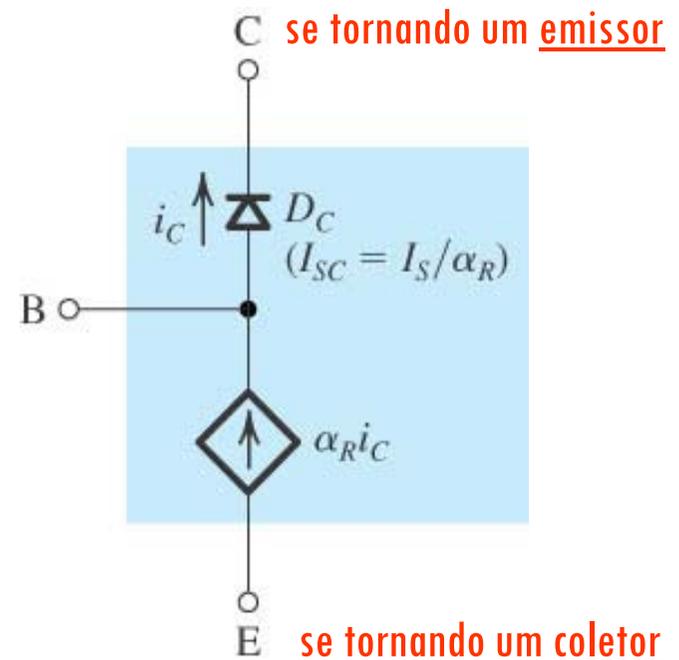
Incluindo a Assimetria do Transistor npn Real no modelo para grandes sinais

modo ativo (j_{BE} dir pol
 j_{BC} rev pol)

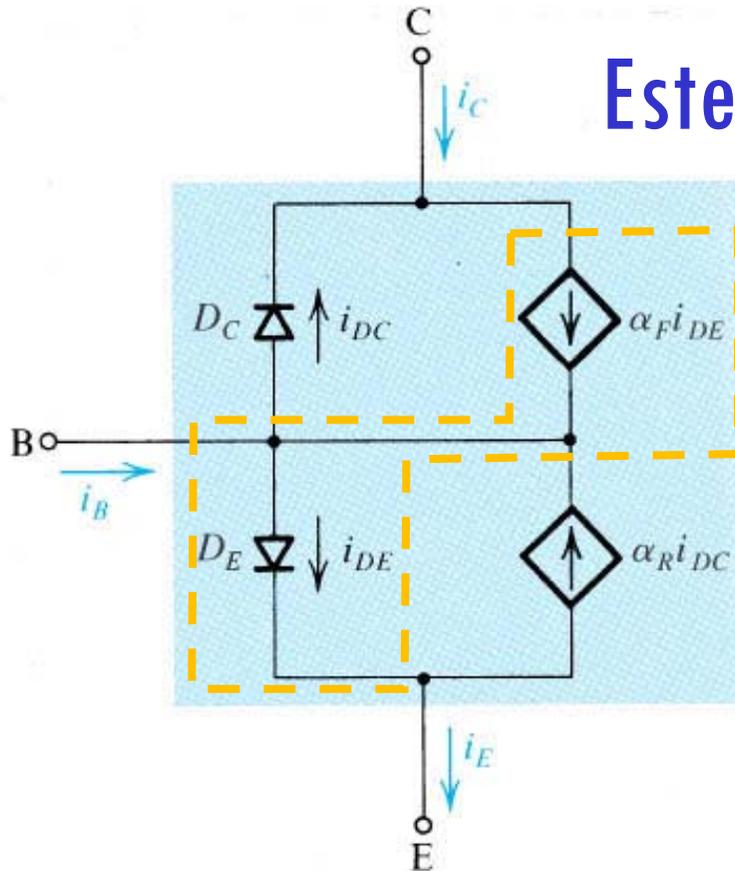


(b)

modo inverso (j_{BE} rev pol
 j_{BC} dir pol)



O modelo de Ebers-Moll (EM-npn)



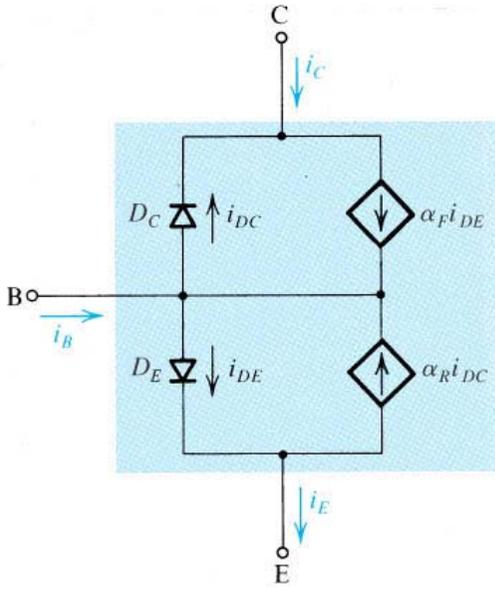
Este é o modelo do SPICE!!!

Este é o nosso modelo!!!

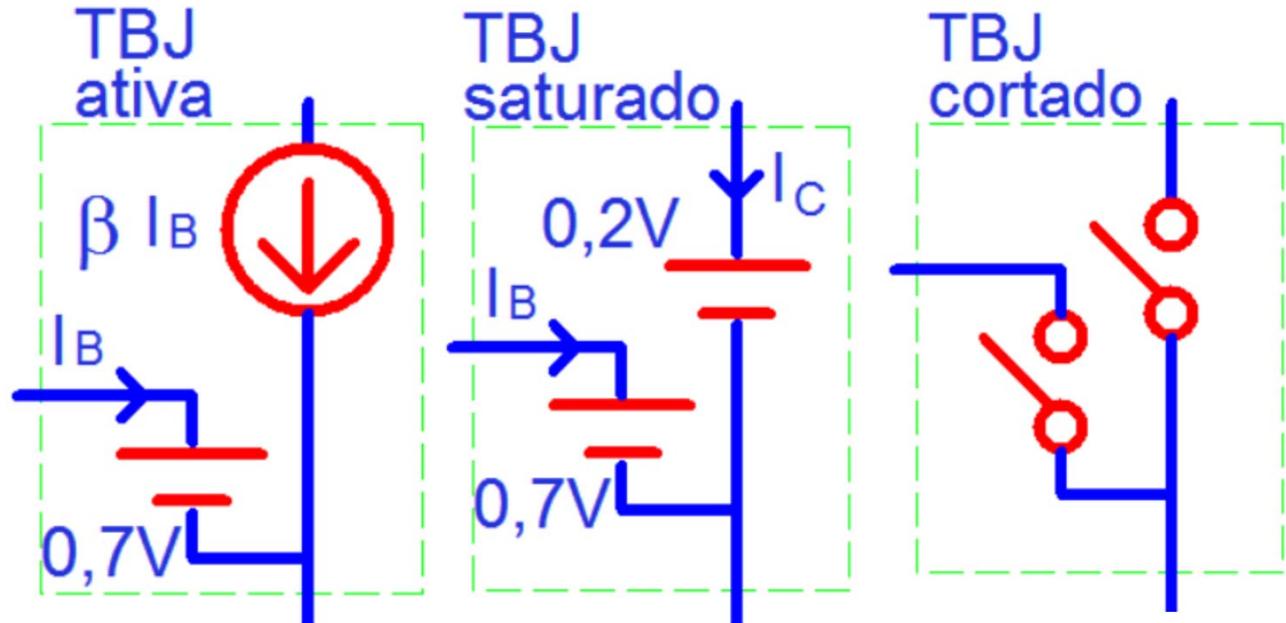
Exercício:
Qual o Modelo EM-pnp???

Modelo para grandes sinais para todas as regiões!

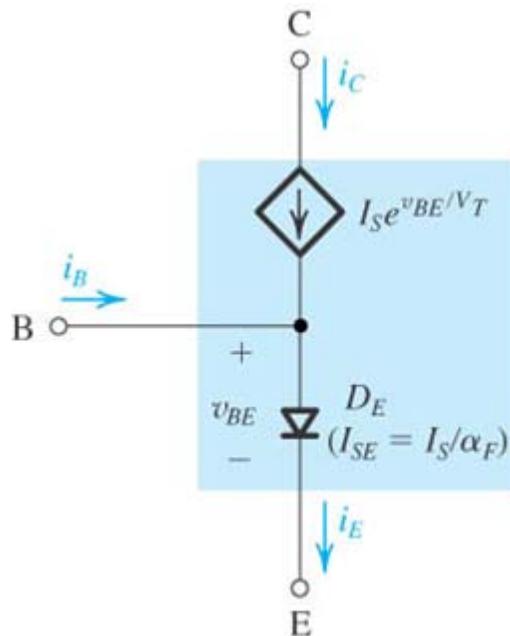
O modelo de Ebers-Moll (EM-npn)



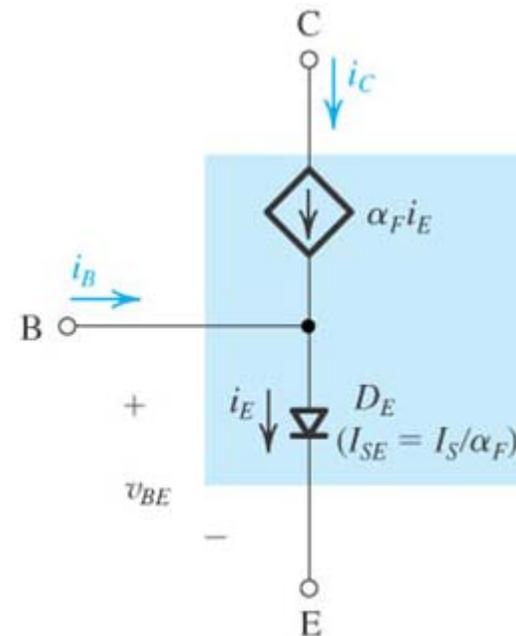
Modelo para grandes sinais para todas as regiões!



Vimos alguns modelos para o Transistor NPN na região ativa



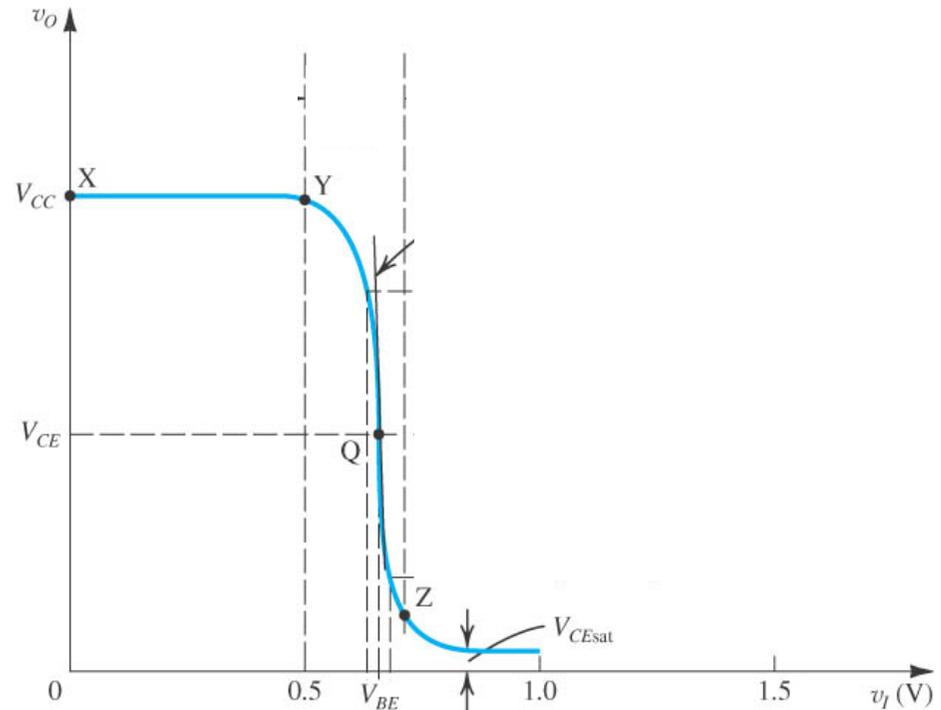
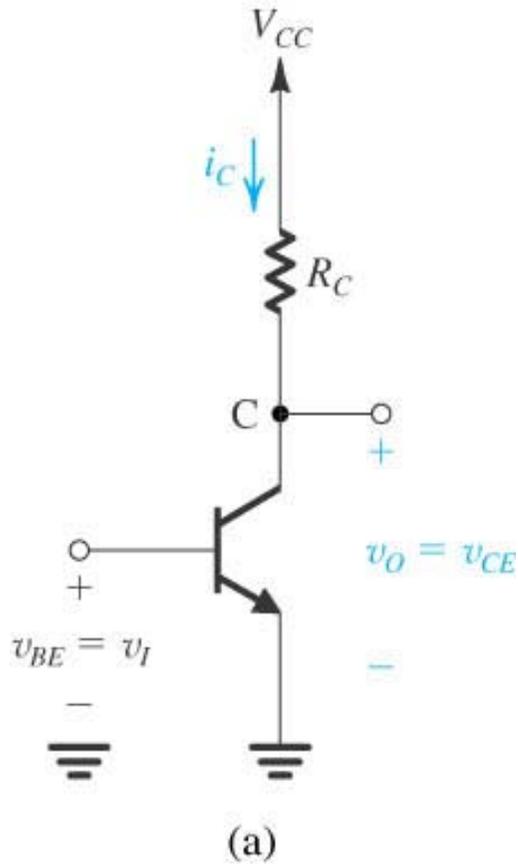
(a)



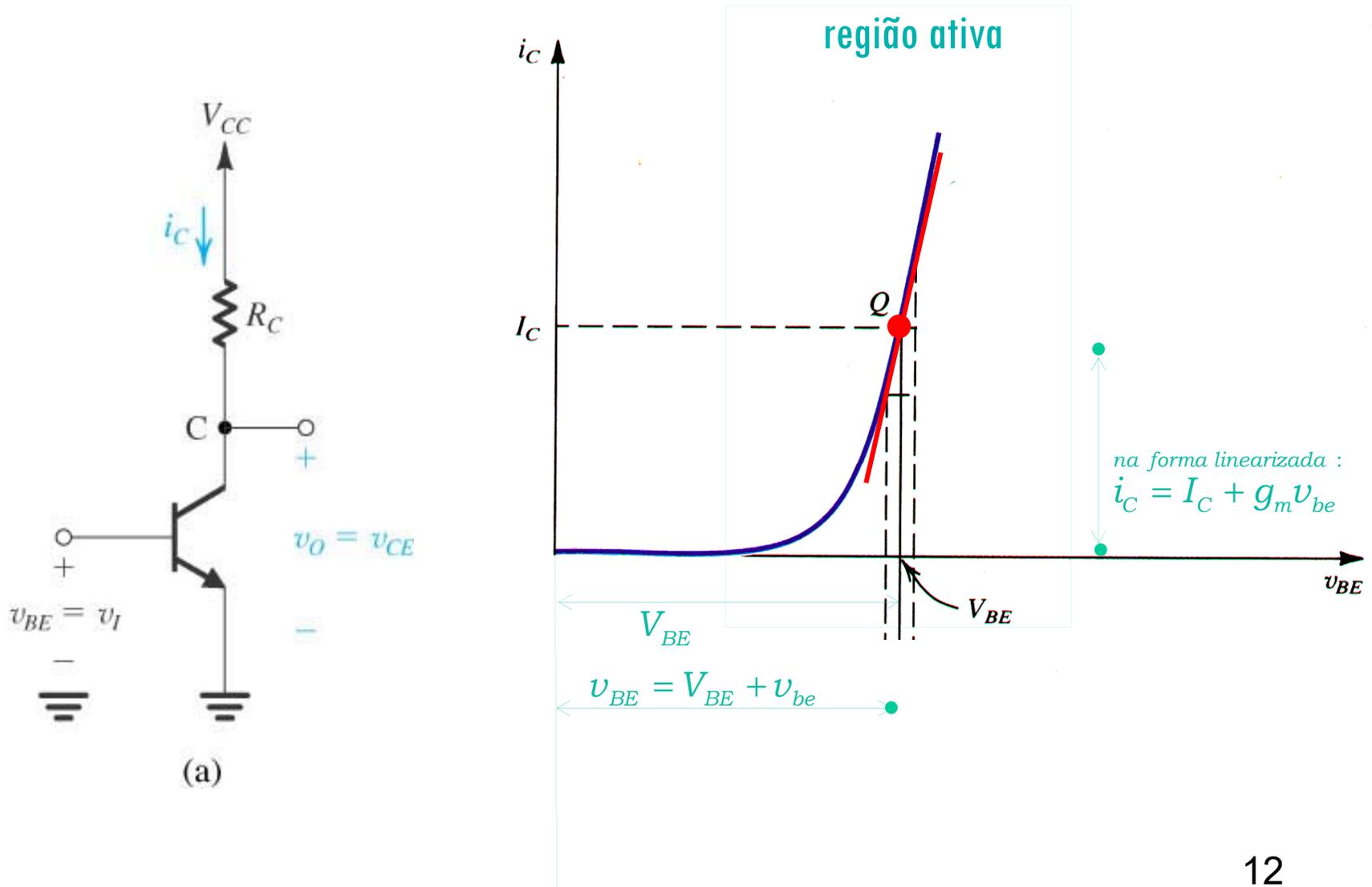
(b)

Modelos (nnp) para grandes sinais na região ativa!
A escolha de um deles é por conveniência

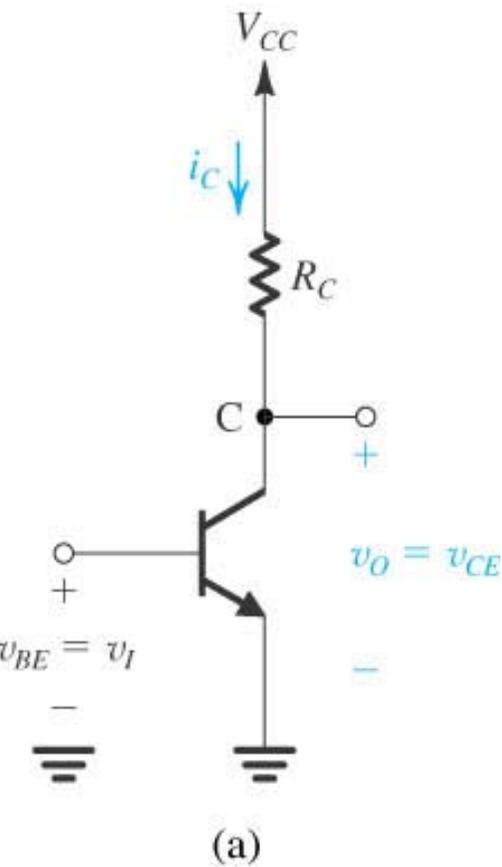
O Transistor TBJ como Amplificador



Criando um Modelo para Pequenos Sinais para o Transistor TBJ



Criando um Modelo para Pequenos Sinais para o Transistor TBJ: A transcondutância



Entrada: $v_{BE} = V_{BE} + v_{be}$

Saída: $i_C = I_C + i_c$

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

$$i_c = I_S e^{(V_{BE} + v_{be})/V_T} = I_S e^{V_{BE}/V_T} e^{v_{be}/V_T} = I_C e^{v_{be}/V_T}$$

Expandindo e^{v_{be}/V_T} em série de Taylor:

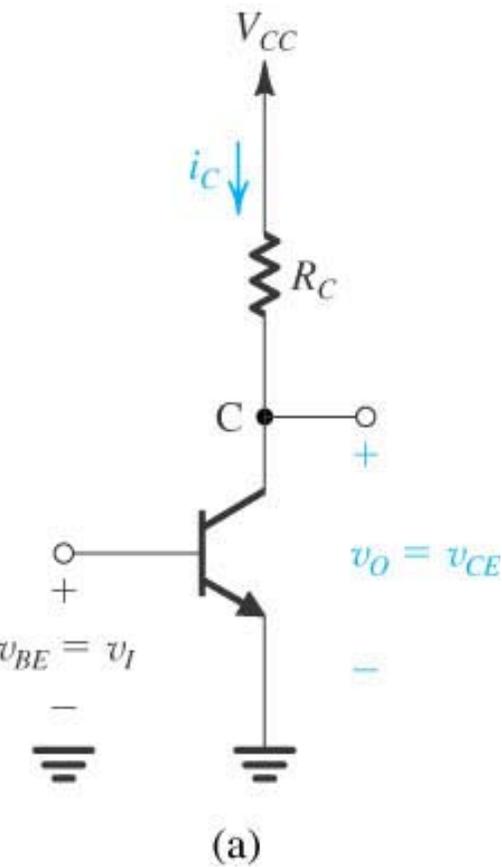
$$e^{v_{be}/V_T} = \left(1 + \frac{v_{be}}{V_T} + \frac{v_{be}^2}{2V_T^2} + \dots \right)$$

$$i_c = I_C e^{v_{be}/V_T} = I_C \left(1 + \frac{v_{be}}{V_T} + \frac{v_{be}^2}{2V_T^2} + \dots \right)$$

$$i_c \cong I_C \left(1 + \frac{v_{be}}{V_T} \right) \quad \text{se} \quad \frac{v_{be}^2}{2V_T^2} \ll \frac{v_{be}}{V_T} \quad \text{ou} \quad v_{be} \ll 2V_T$$

$v_{be} < 10\text{mV}$

Criando um Modelo para Pequenos Sinais para o Transistor TBJ: A transcondutância



Entrada: $v_{BE} = V_{BE} + v_{be}$

Saída: $i_C = I_C + i_c$

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

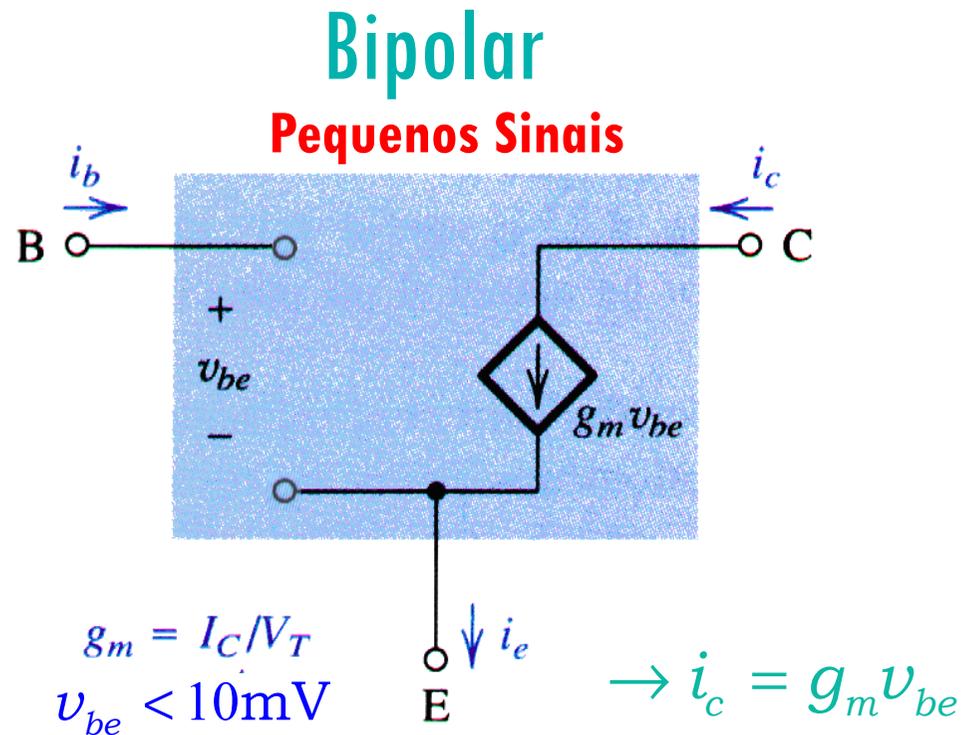
$$i_C \cong I_C \left(1 + \frac{v_{be}}{V_T} \right) \text{ Se } v_{be} < 10\text{mV}$$

$$i_C = I_C + i_c \cong I_C \left(1 + \frac{v_{be}}{V_T} \right) = I_C + I_C \frac{v_{be}}{V_T}$$

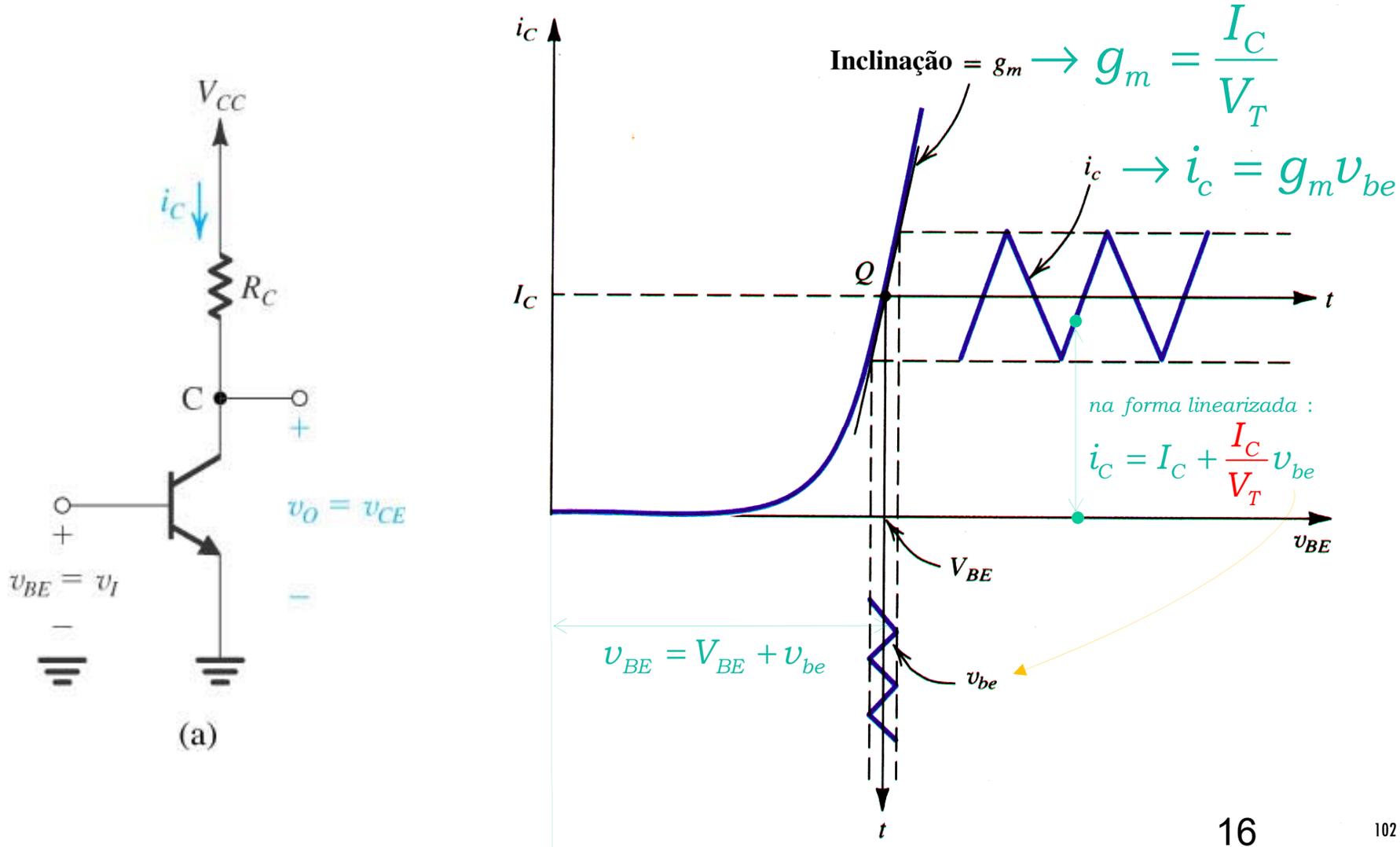
$$i_c = I_C + \frac{I_C}{V_T} v_{be} \quad \text{e} \quad i_c = \frac{I_C}{V_T} v_{be}$$

$$\therefore \frac{i_c}{v_{be}} = \frac{I_C}{V_T} = g_m \quad \text{ou seja, } i_c = g_m v_{be}$$

Criando um Modelo para Pequenos Sinais para o Transistor TBJ: A transcondutância



Criando um Modelo para Pequenos Sinais para o Transistor TBJ: A transcondutância



Aula passada: O Modelo para Pequenos Sinais para o Transistor TBJ

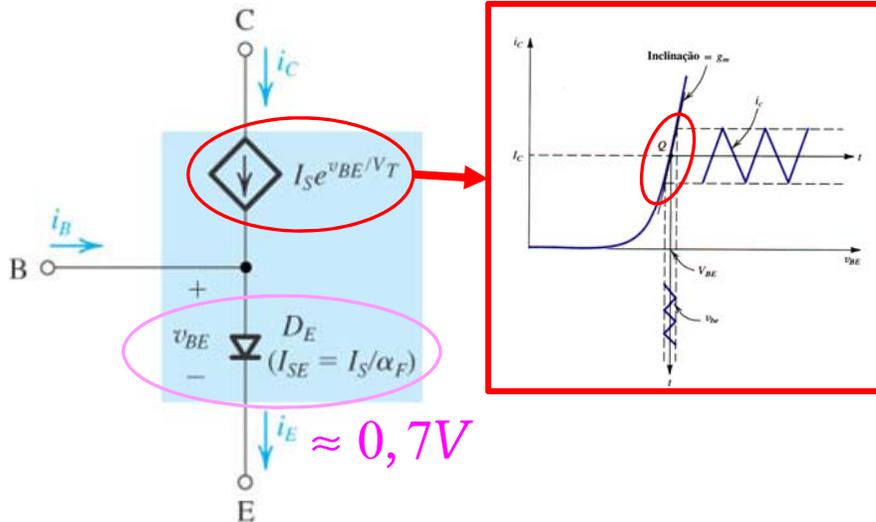
Região ativa (npn) p/ **Grandes Sinais!**

$$V_{BE} \approx 0,7V$$

$$i_E = i_C + i_B$$

$$I_C = \beta I_B = \alpha \left(= \frac{\beta}{\beta + 1} \right) I_E$$

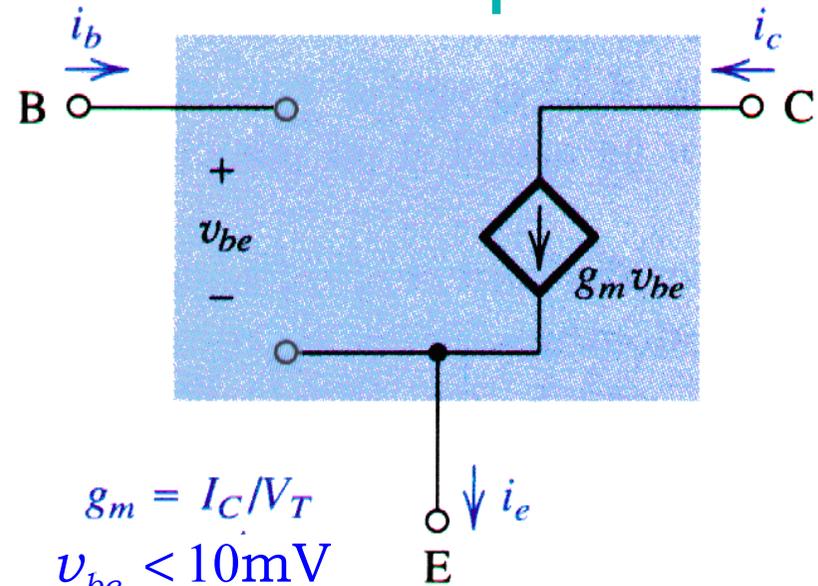
$$I_C = I_S e^{V_{BE}/V_T}$$



(a)

Região ativa (npn) p/ **Pequenos Sinais**

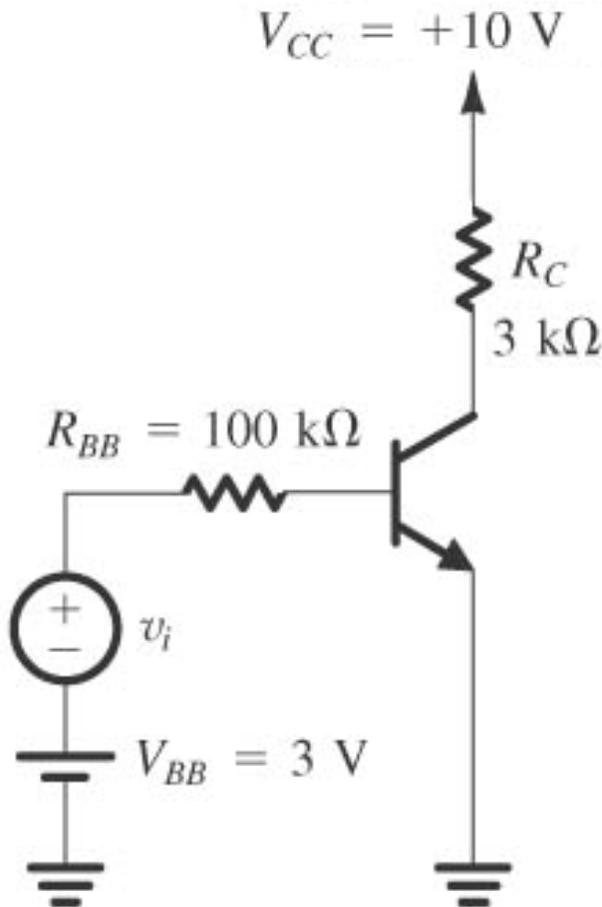
TBJ npn



$$g_m = I_C / V_T$$

$$v_{be} < 10mV$$

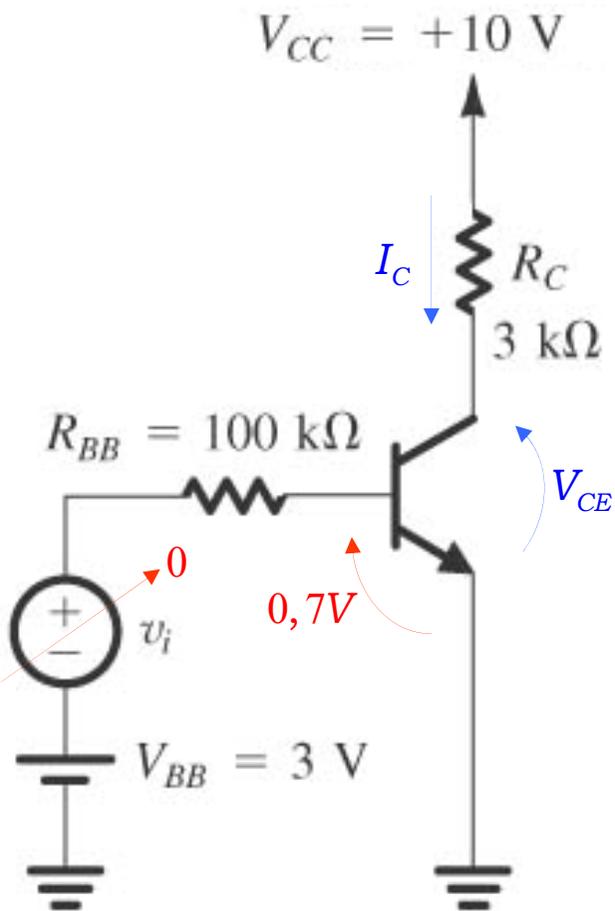
Exemplo 5.14: Desejamos analisar o circuito abaixo para determinar seu ganho de tensão. Suponha $\beta = 100$



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: $g_m = I_C / V_T$
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.
4. Substitua o 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).

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



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

$$I_B = \frac{3 - 0,7V}{100k} \approx 23\mu A$$

$$I_C = \beta I_B = 100 \times 23\mu A = 2,3mA$$

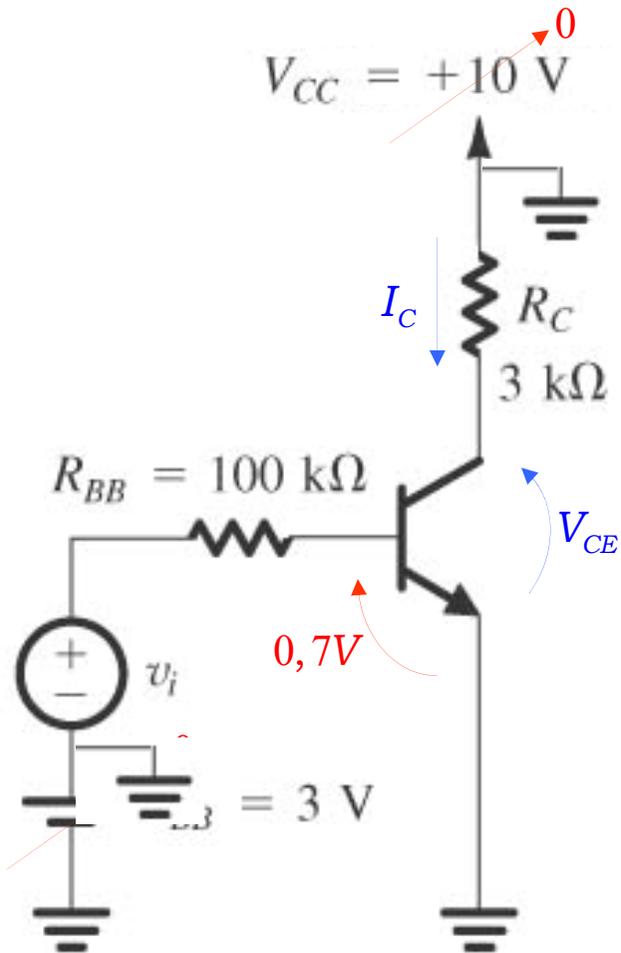
$$V_{CE} = V_{CC} - R_C I_C = 10V - 2,3m \times 3k = 3,1V$$

Na ativa? $V_C = 3,1V; V_B = 0,7V; V_E = 0V$

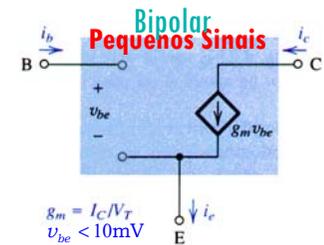
2. Calcule os valores dos parâmetros do modelo para pequenos sinais: $g_m = I_C / V_T$

$$g_m = \frac{I_C}{V_T} = \frac{2,3m}{25m} = 92mS = 92 \frac{mA}{V}$$

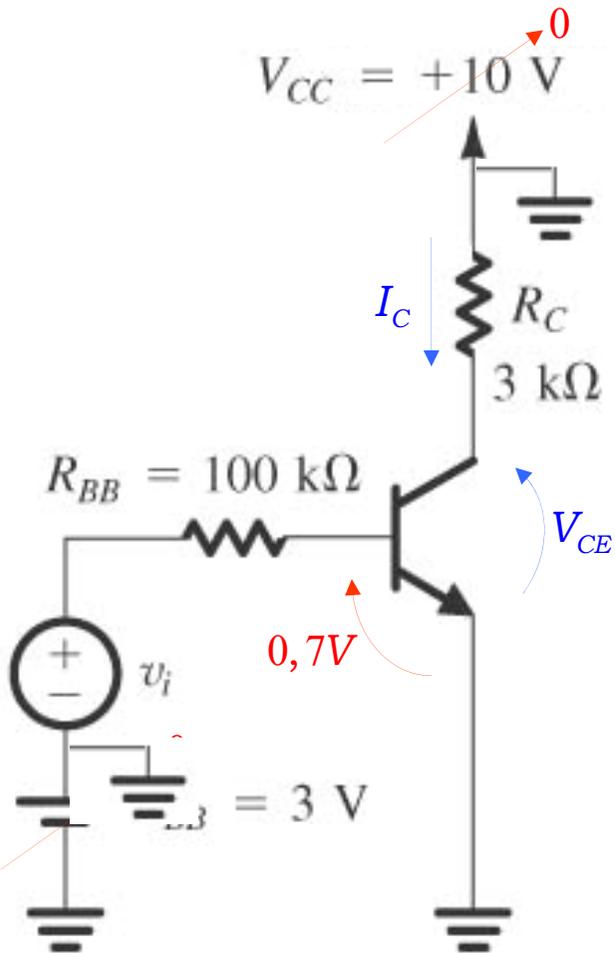
Exemplo 5.14: Desejamos analisar o circuito abaixo para determinar seu ganho de tensão. Suponha $\beta = 100$



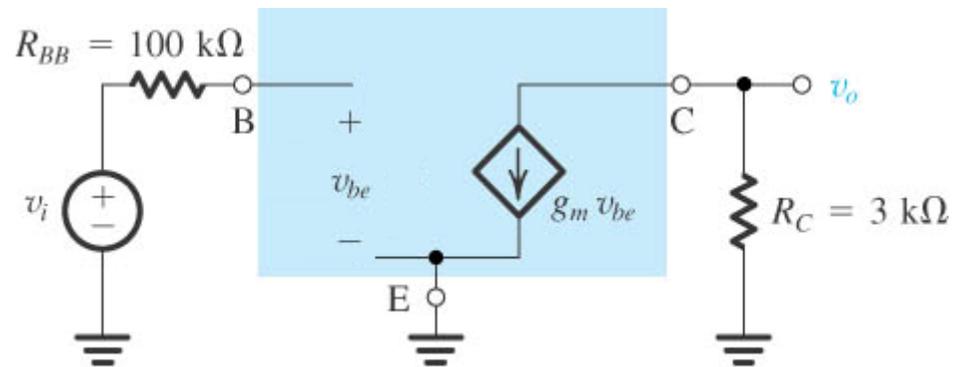
3. Elimine as fontes \mathcal{L} substituindo cada fonte \mathcal{L} de tensão por um curto-circuito e cada fonte \mathcal{L} de corrente por um circuito aberto.
4. Substitua o TBJ por um dos seus modelos equivalentes. Embora qualquer um dos modelos possa ser utilizado, um deles deve ser mais conveniente dependendo do circuito a ser analisado.



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).

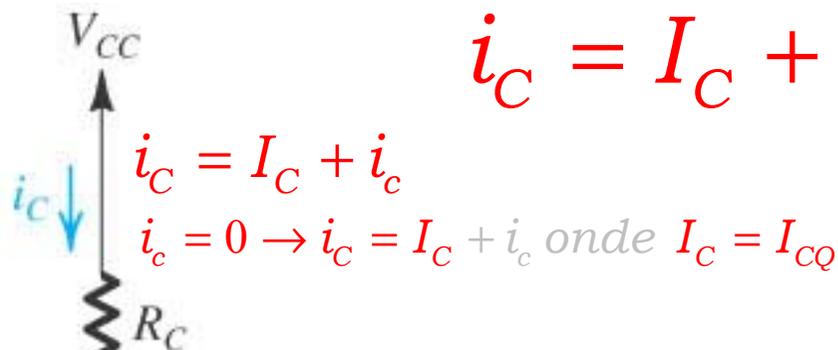


$$v_O = -g_m v_{be} \times R_C \quad v_{be} = v_i$$

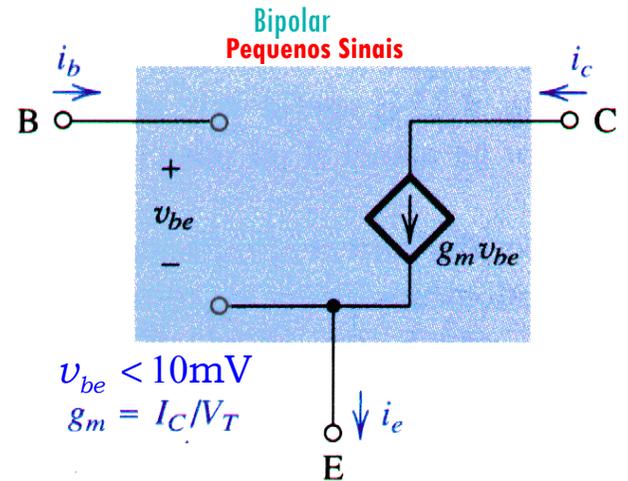
$$A_v \Big|_{\text{Carga}=\infty} = \frac{v_O}{v_i} \Big|_{\text{Carga}=\infty} = -g_m R_C$$

$$A_v \Big|_{\text{Carga}=\infty} = -g_m R_C = -92m \times 3k = -276 \text{ V/V}$$

Visualizando Graficamente o Modelo do TBJ



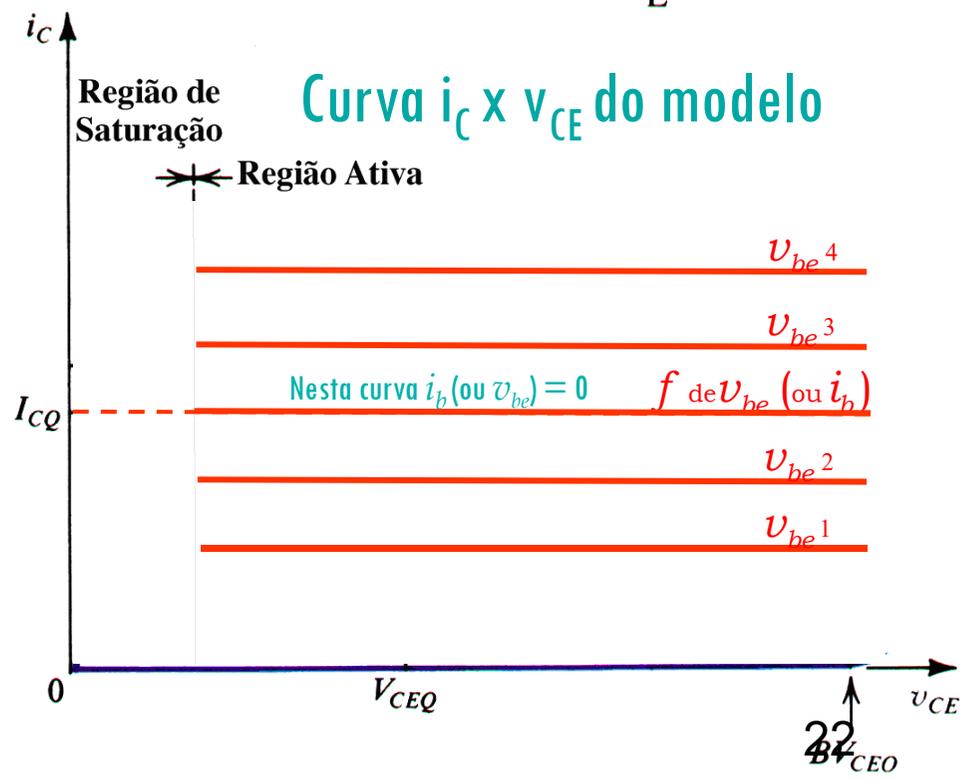
$$i_C = I_C +$$



se $v_{BE} = V_{BE}$

$v_{BE} = v_I$

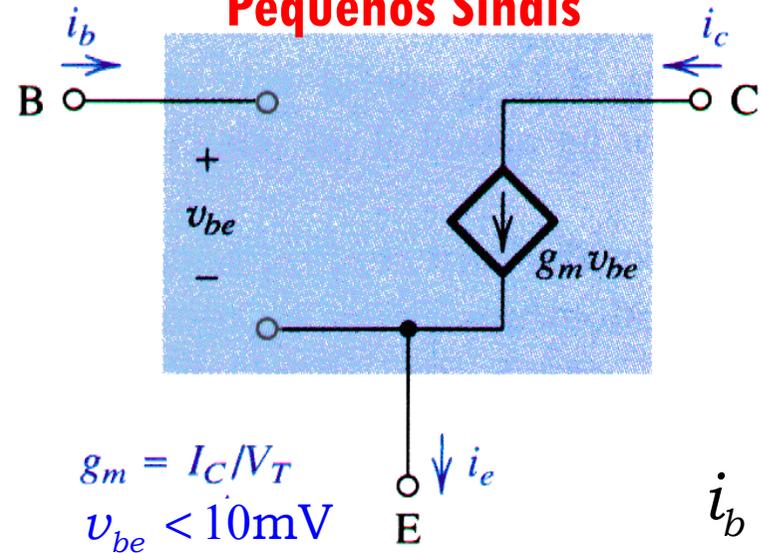
$v_O = v_{CE}$



Aprimorando o Modelo para Pequenos Sinais para o Transistor TBJ: a resistência r_π

Bipolar

Pequenos Sinais



$i_b \neq 0!!! \rightarrow$ resistência entre b e e
 estabelecer uma relação entre v_{be} e i_b (resistência)

$$i_C = I_C + i_c$$

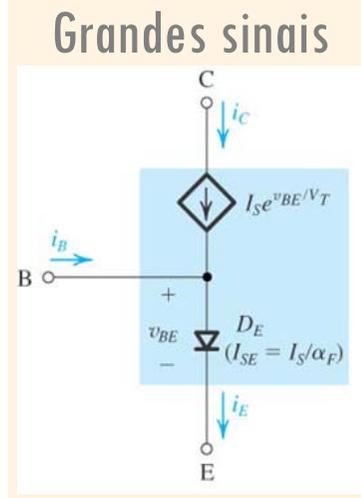
$$i_B = \frac{I_C}{\beta} + \frac{i_c}{\beta}$$

$$i_b = \frac{1}{\beta} \frac{I_C}{V_T} v_{be} = \frac{1}{r_\pi} v_{be}$$

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

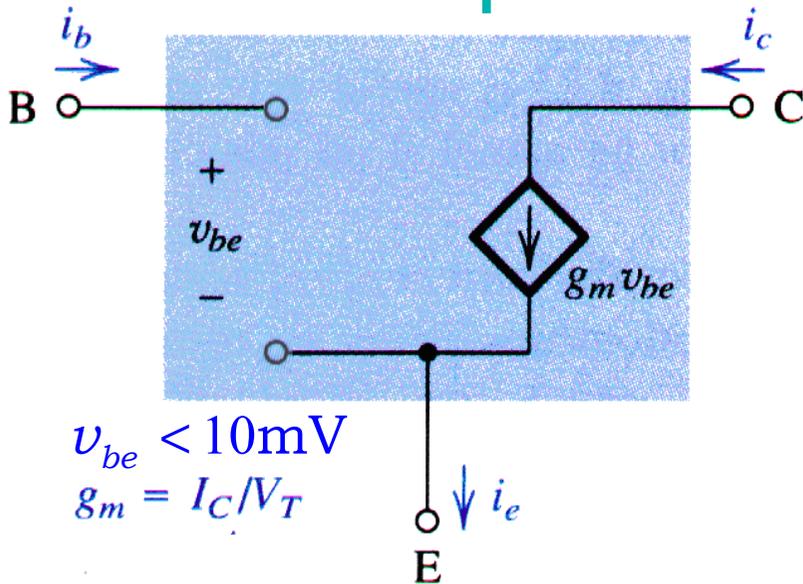
O Modelo para Pequenos Sinais para o Transistor TBJ:

A resistância r_π



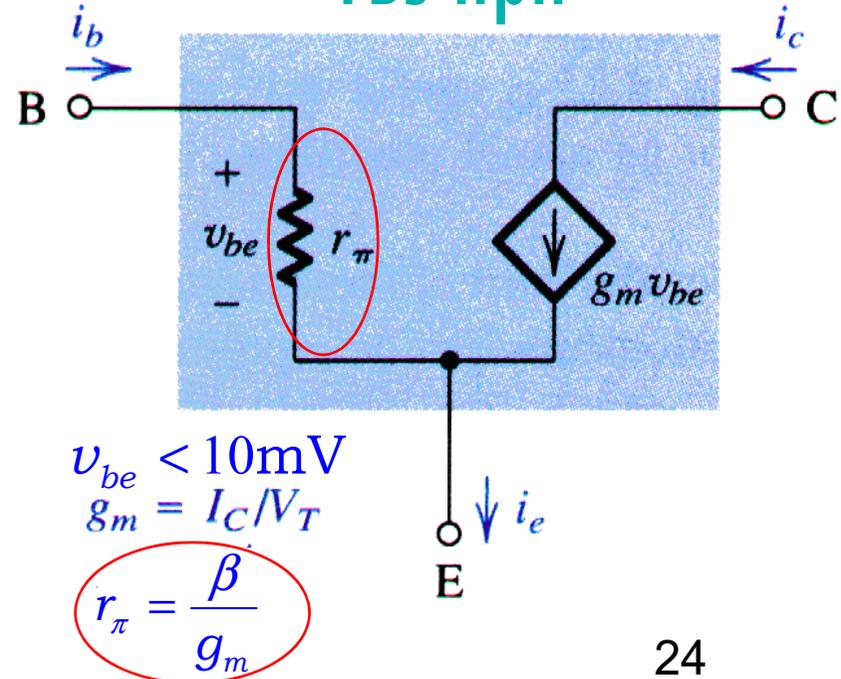
Região ativa (nnp) p/ Pequenos Sinais
(muito simples)

TBJ npn



Região ativa (nnp) p/ Pequenos Sinais
(melhorado)

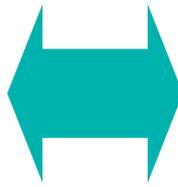
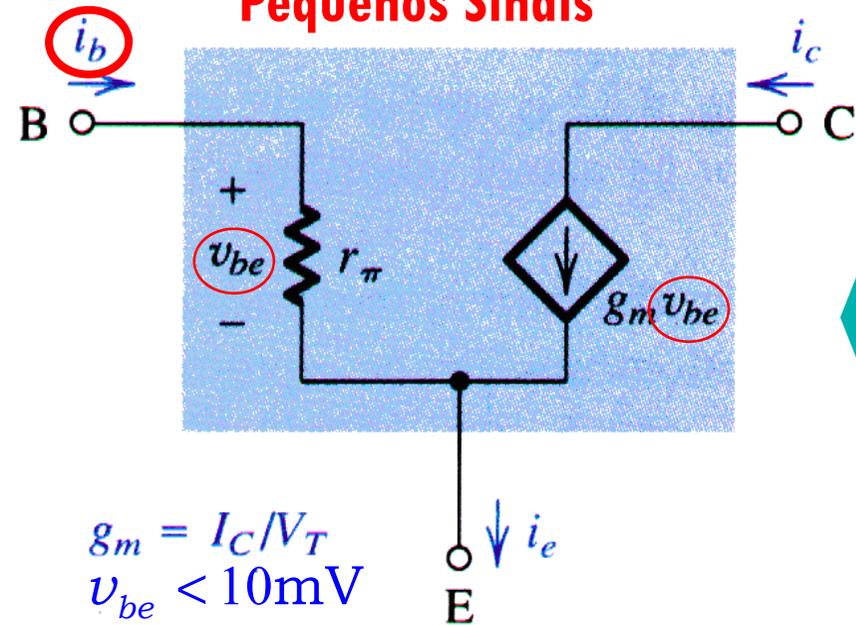
TBJ npn



Adequando o Modelo para Pequenos Sinais para o TBJ com a resistência r_π

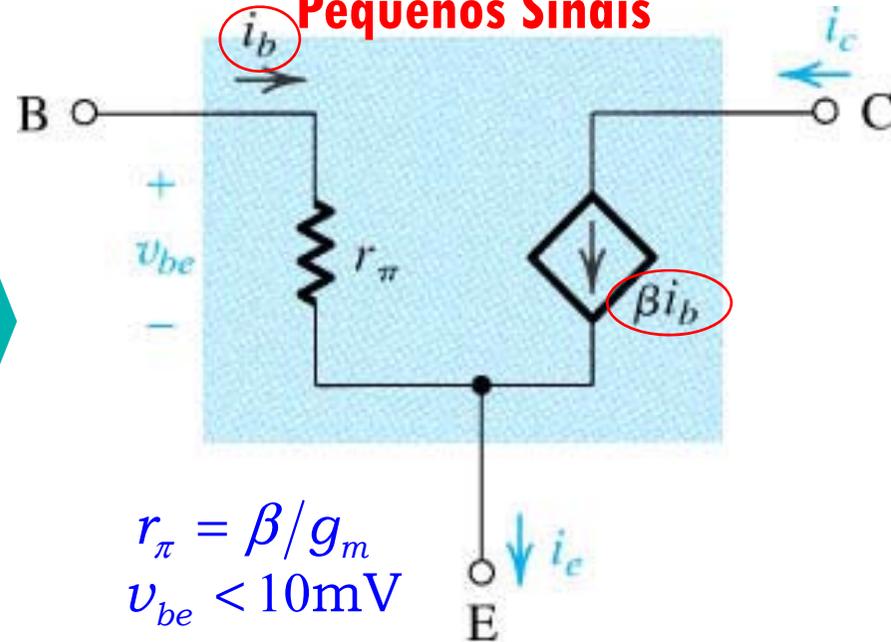
Bipolar

Pequenos Sinais



Bipolar

Pequenos Sinais

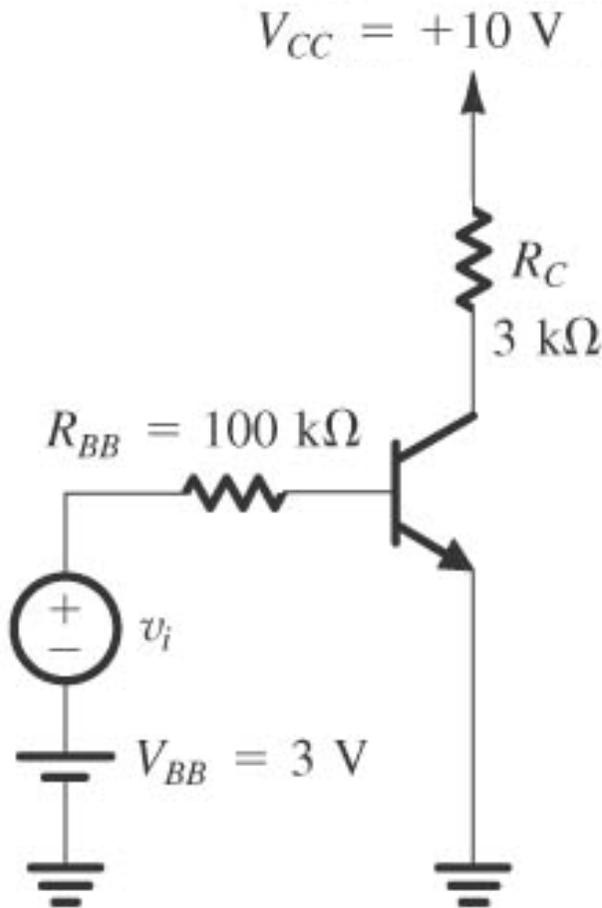


$$v_{be} = r_\pi i_b \therefore g_m v_{be} = g_m r_\pi i_b$$

$$\text{como } r_\pi = \frac{\beta}{g_m} \rightarrow g_m v_{be} = g_m \frac{\beta}{g_m} i_b = \beta i_b$$

$$g_m = I_C / V_T$$

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

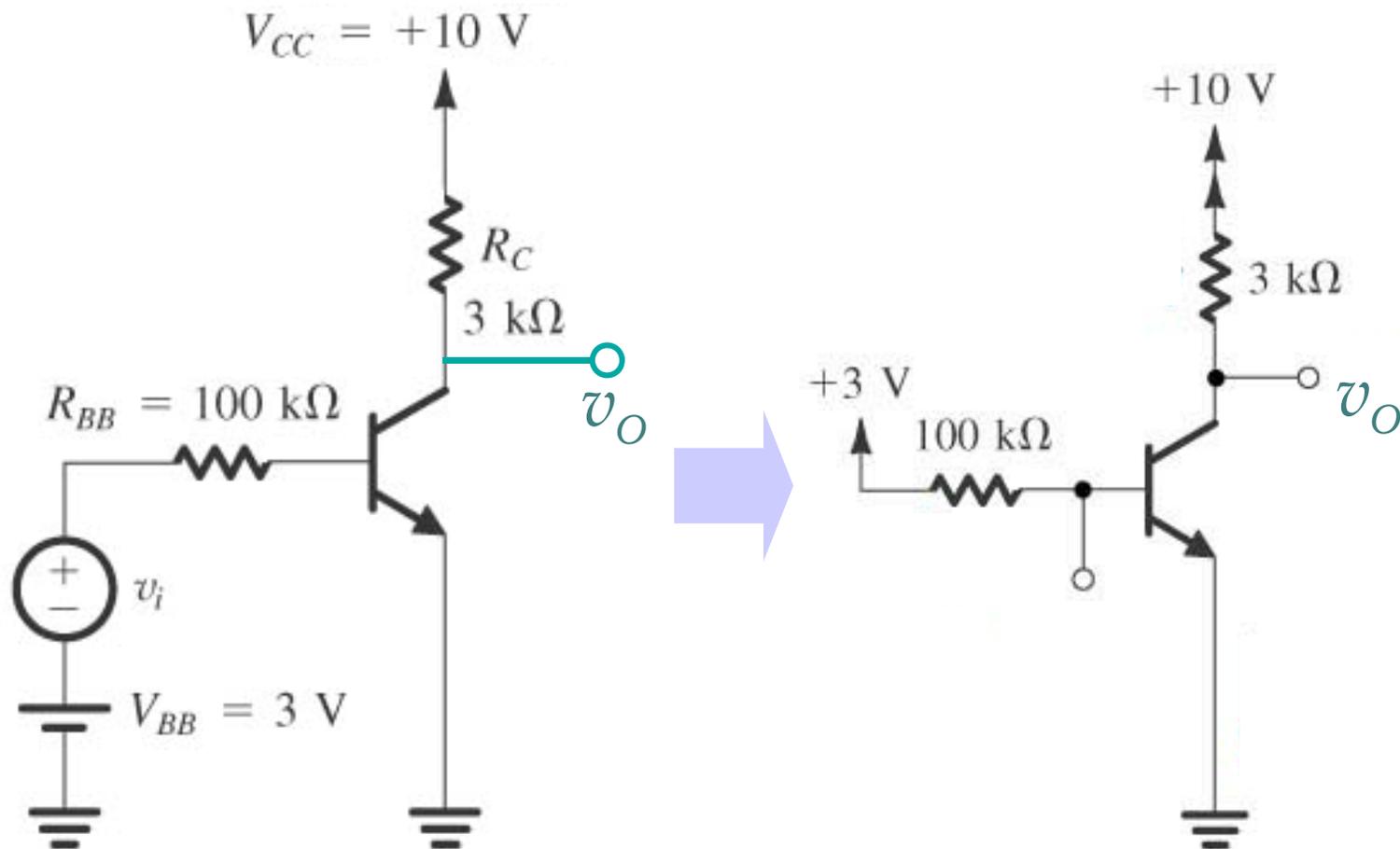


Estratégia de análise:

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: $g_m = I_C / V_T$ e $r_\pi = \beta / g_m$
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.
4. Substitua o 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).

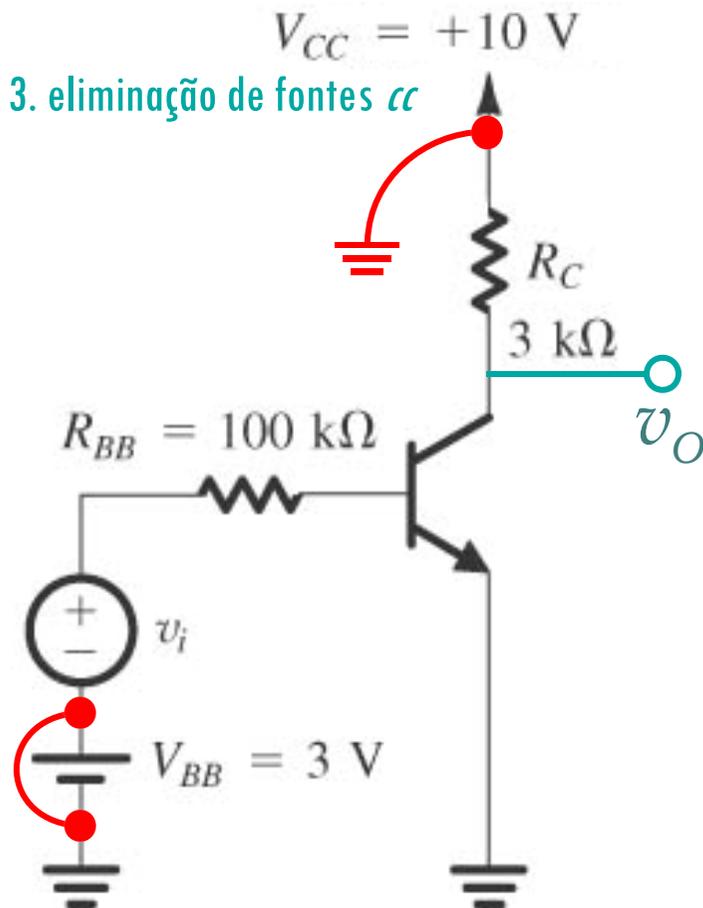
Exemplo 5.14: Desejamos analisar o circuito abaixo para determinar seu ganho de tensão. Suponha $\beta = 100$

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



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

2. Calcule os valores dos parâmetros do modelo para pequenos sinais: $g_m = I_C / V_T$ e $r_\pi = \beta / g_m$
3. Elimine as fontes \mathcal{C} substituindo cada fonte \mathcal{C} de tensão/corrente por curto-circuitos/circuitos abertos
4. Substitua a TBJ por um dos seus modelos equivalentes

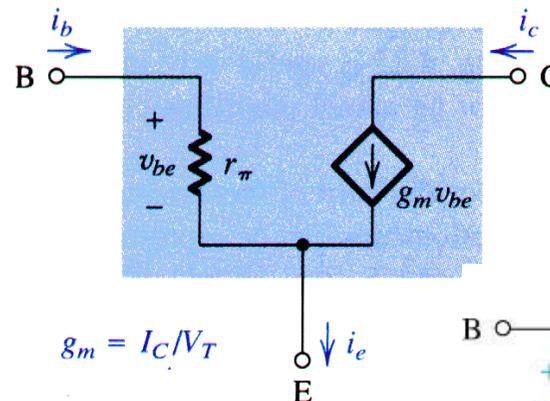


2. parâmetros

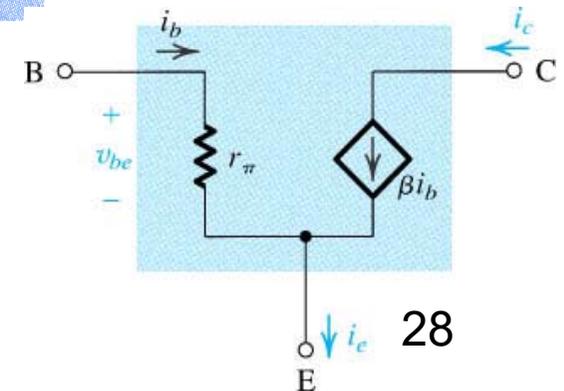
$$g_m = I_C / V_T = 2,3\text{mA} / 25\text{mV} = 92\text{mA/V}$$

$$r_\pi = \beta / g_m = 100 / 92\text{mA/V} = 1,09\text{ k}\Omega$$

4. modelos

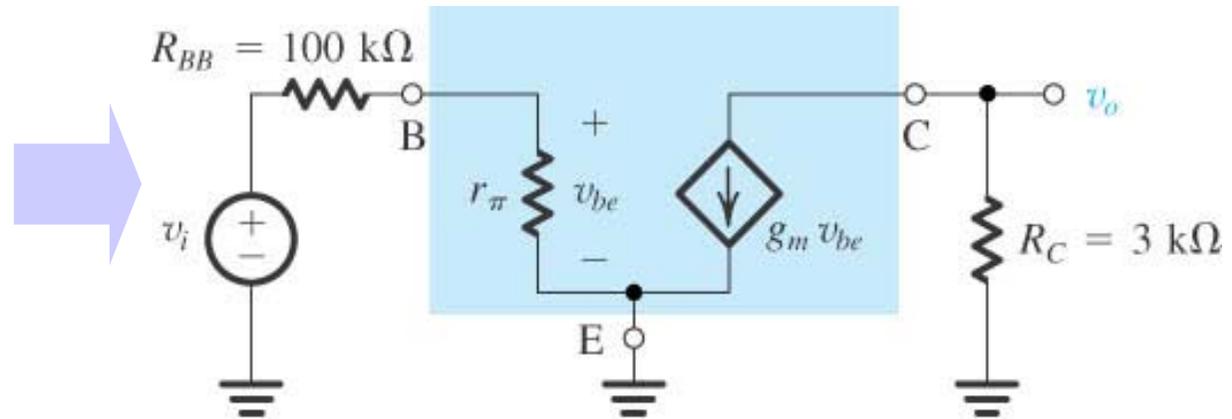
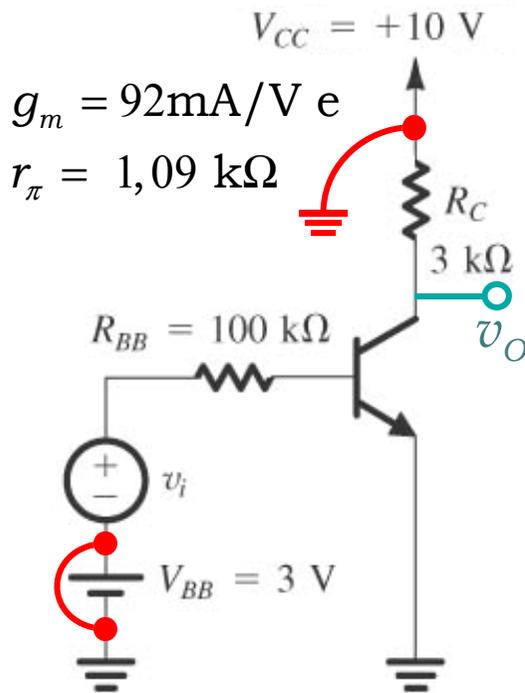


$$g_m = I_C / V_T$$



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).



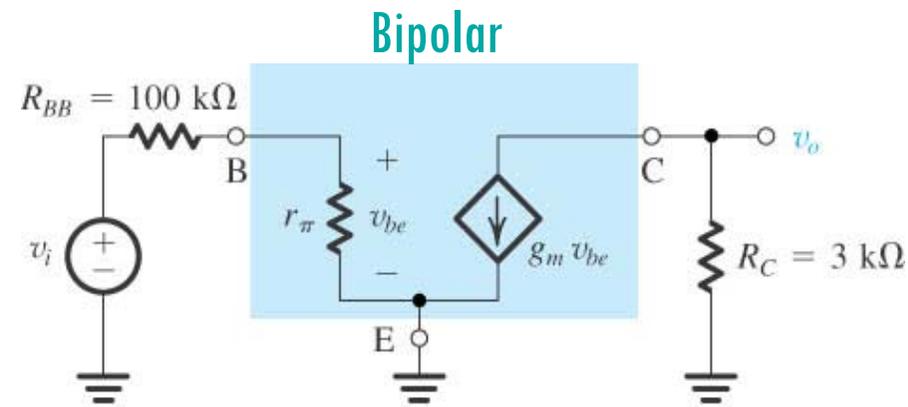
$$v_O = -g_m v_{be} \times R_C \quad v_{be} = \frac{r_\pi}{R_{BB} + r_\pi} v_i$$

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

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

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

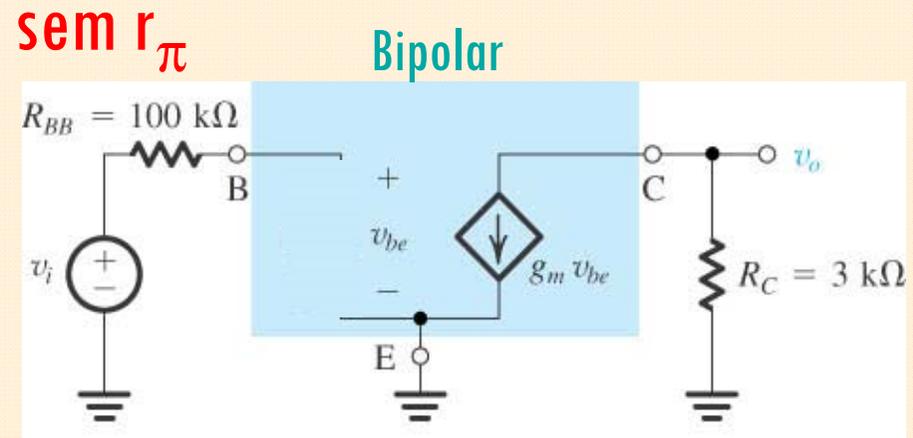
5. Analise o circuito resultante para determinar as grandezas de interesse (por exemplo, ganho de tensão, resistência de entrada).



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

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

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



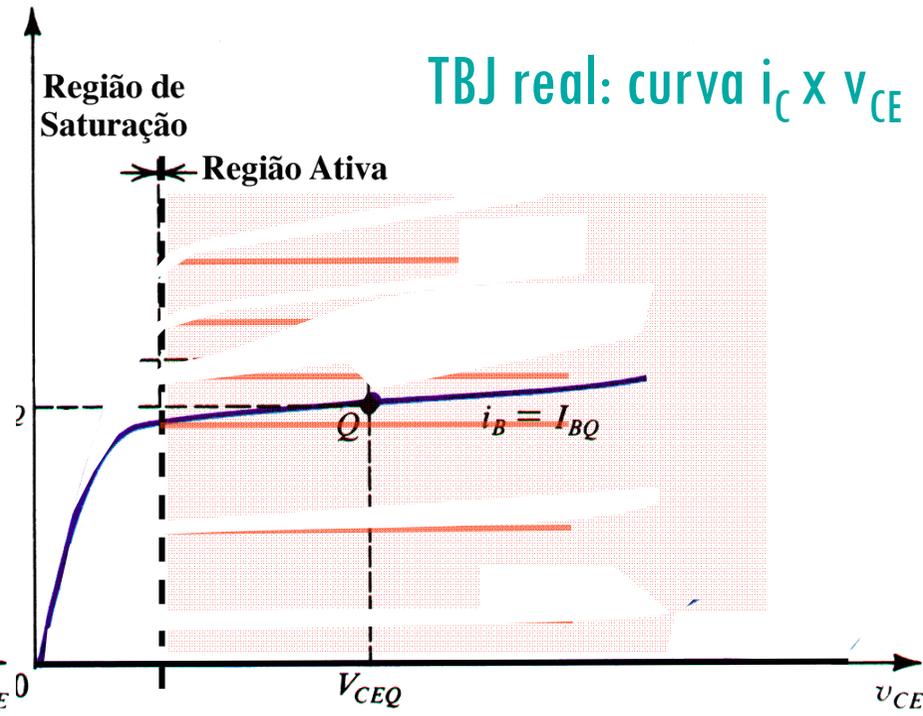
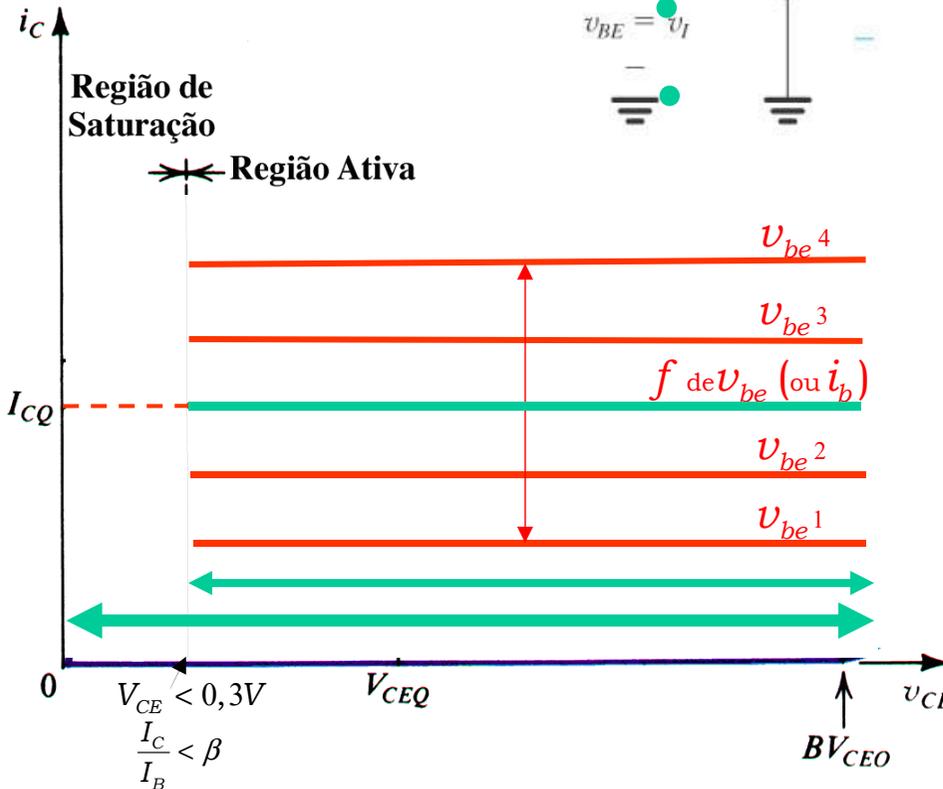
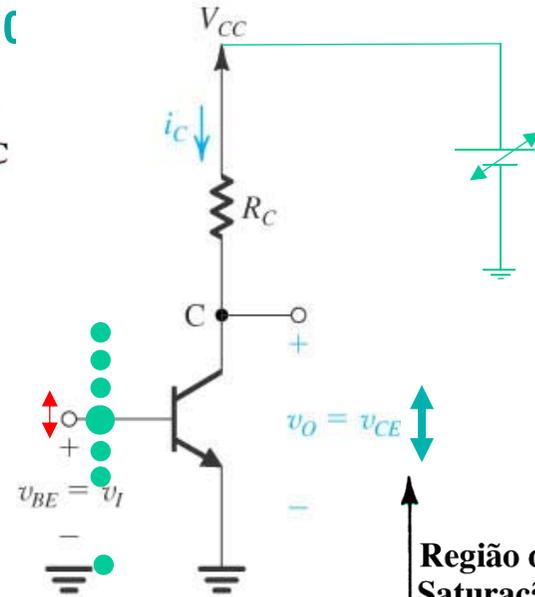
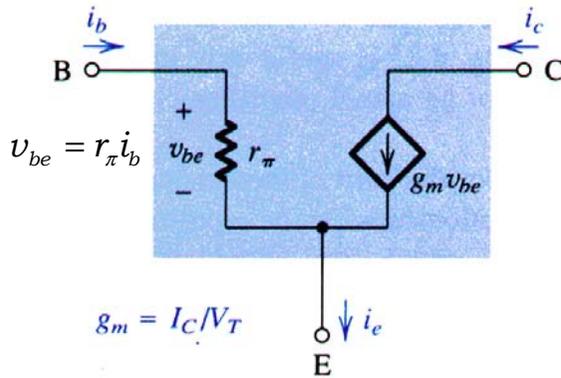
$$v_O = -g_m v_{be} \times R_C \quad v_{be} = v_i$$

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

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

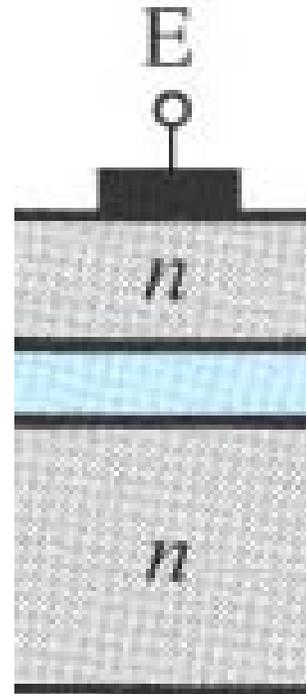
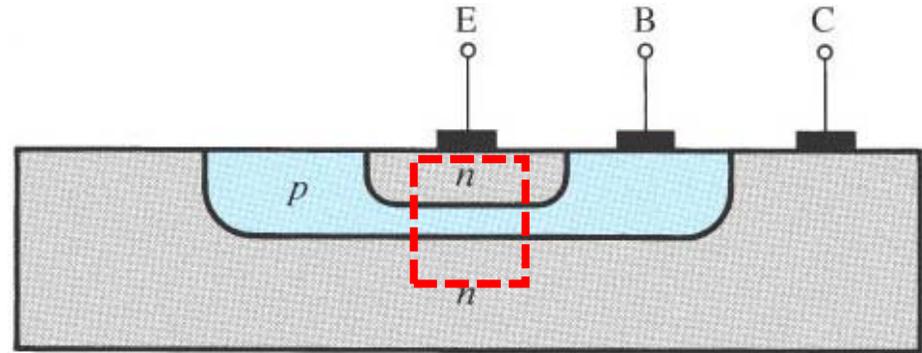
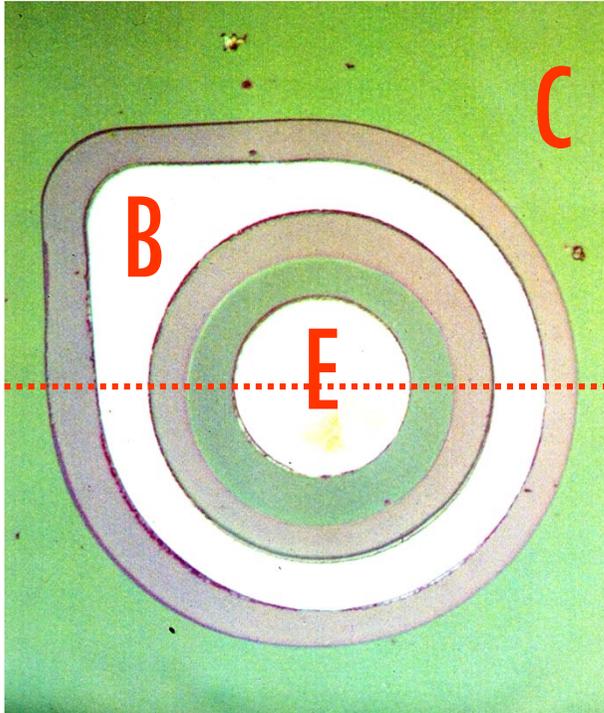
Visualizando Graficamente e Aprimorando ainda mais o Modelo do TBJ

Curva $i_C \times v_{CE}$ do modelo



TBJ real: curva $i_C \times v_{CE}$

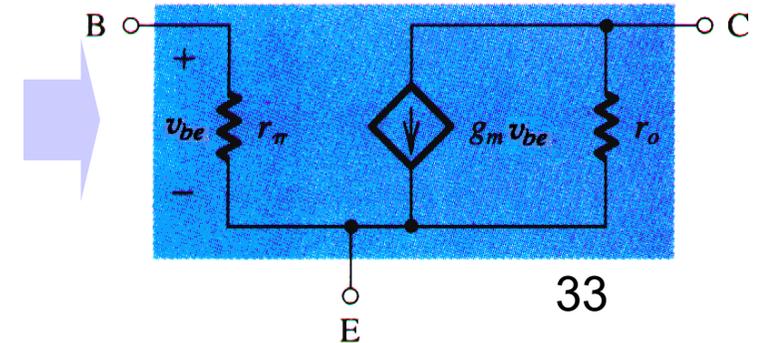
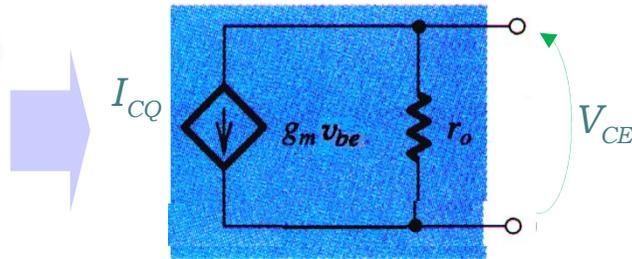
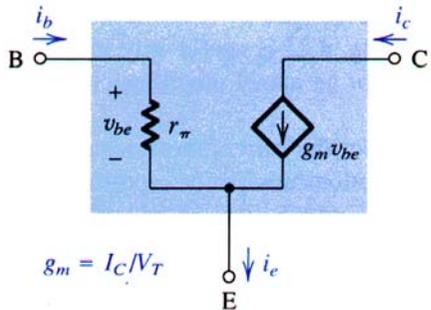
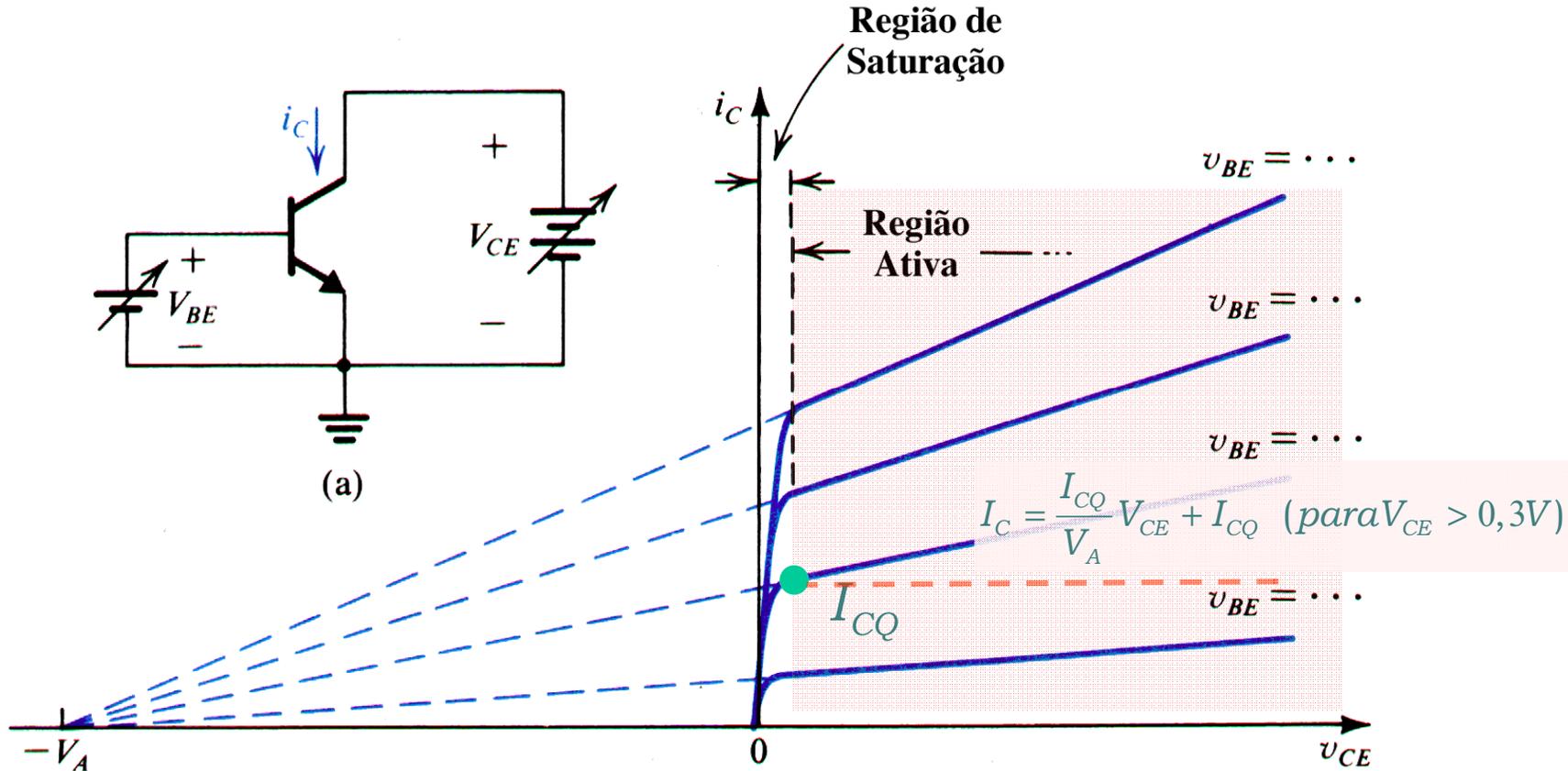
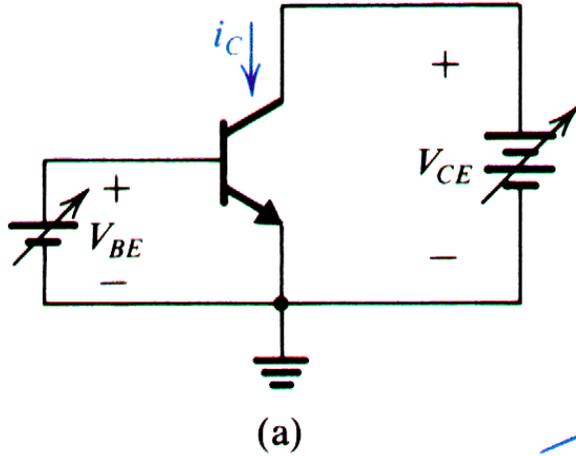
Um Transistor npn Real e o estreitamento da base (Efeito Early)



$$\beta = 1 / \left(\frac{D_p}{D_n} \frac{N_A}{N_D} \frac{W}{L_p} + \frac{1}{2} \frac{W^2}{D_n \tau_b} \right)$$

Aprimorando o Modelo do TBJ

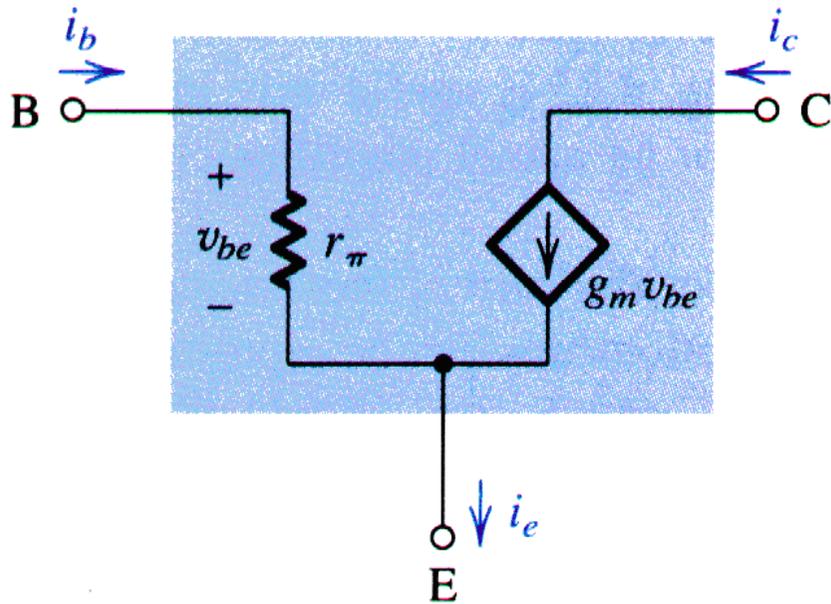
O Efeito Early



O Modelo π -híbrido para Pequenos Sinais para o Transistor TBJ

TBJ npn Pequenos Sinais

$$v_{be} < 10\text{mV}$$

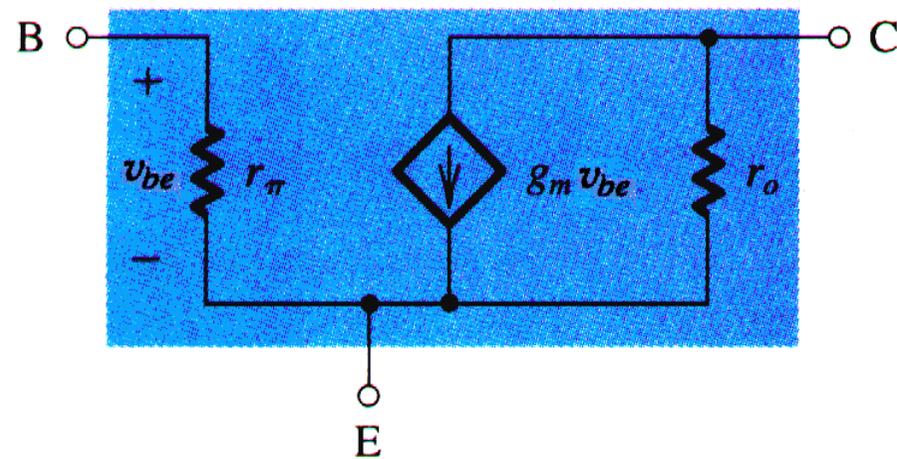


$$g_m = \frac{I_C}{V_T} \quad r_\pi = \frac{\beta}{g_m}$$

TBJ npn

Pequenos Sinais (completo para cálculos manuais)

$$v_{be} < 10\text{mV}$$



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