



CHAPTER 5

# Aula 20:

**Análise CC (Polarização) em circuitos com TBJs  
(p.246, p.264-269)**

# PSI 3321 – Eletrônica

## Programação para a Terceira Prova

19 <sup>a</sup> 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
20 <sup>a</sup> 20/05	Equações das correntes no transistor (definição do ganho de corrente em emissor comum - $\beta$ - e do ganho de corrente em base comum - $\alpha$ ), modelos de circuitos equivalentes para grandes sinais do transistor npn operando no modo ativo, exercícios.	Sedra, Cap. 5 p. 239-243.
21 <sup>a</sup> 31/05	Análise cc de circuitos com transistores, exercícios selecionados: 5.1, 5.4, 5.10.	Sedra, Cap. 5 p. 246 + 264-269
22 <sup>a</sup> 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.
23 <sup>a</sup> 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 $\pi$ -híbrido e T)	Sedra, Cap. 5, p. 276-279
24 <sup>a</sup> 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
25 <sup>a</sup> 17/06	Aula de Exercícios	

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

# 21<sup>a</sup> Aula:

## Análise/Síntese cc de circuitos com transistores TBJ

Ao final desta aula você deverá estar apto a:

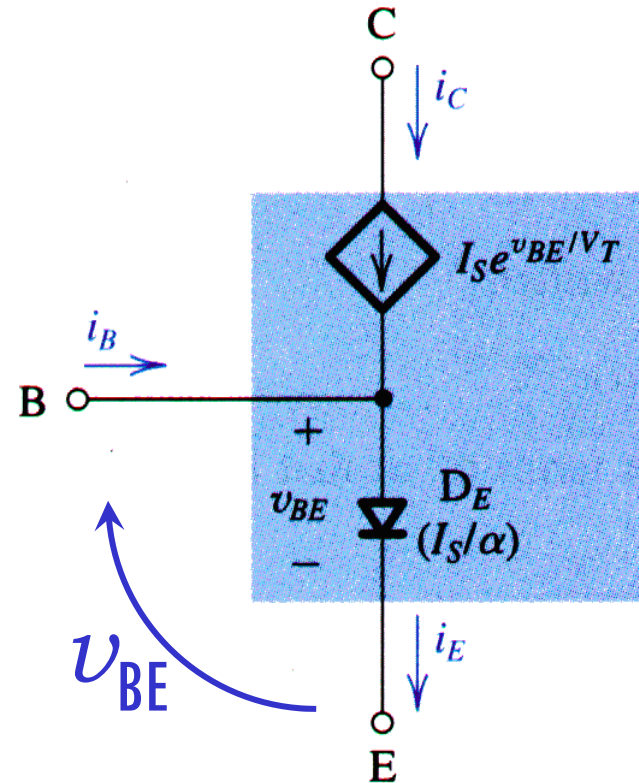
- Analisar (determinação de  $I_s$  e  $V_s$ ) circuitos de polarização para transistores TBJ nas regiões ativa, de saturação e de corte
- Síntetizar (ou projetar, i.e., escolher valores de componentes para obter  $I_s$  e  $V_s$  desejados) circuitos de polarização operando na região ativa

# Um modelo para o Transistor NPN na região ativa

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

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

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



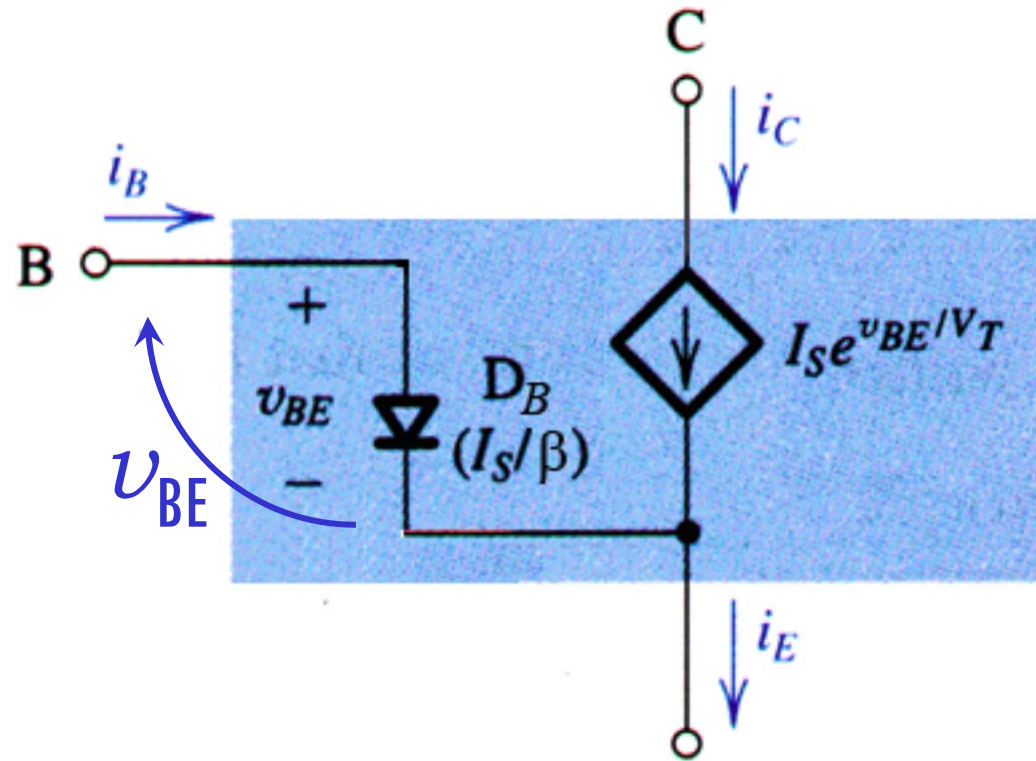
**Modelo (nnp) para grandes sinais na região ativa!**

# Outro modelo para o Transistor NPN na região ativa

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

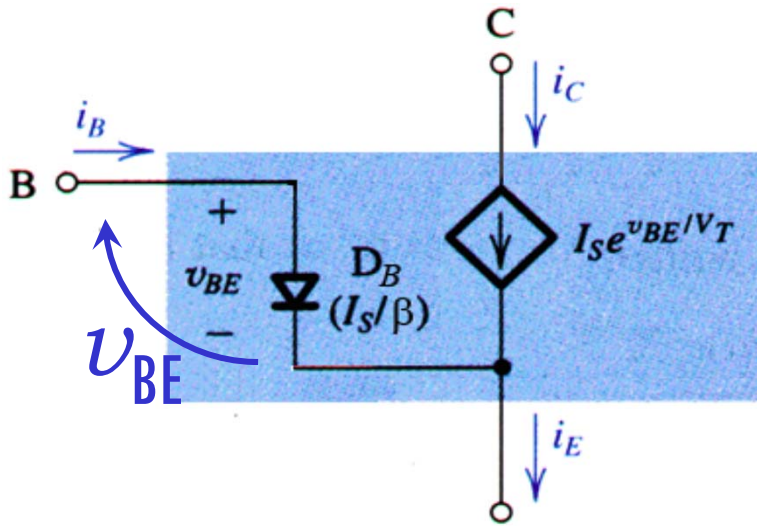
$$i_E = (I_S/\alpha) e^{v_{BE}/V_T}$$

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



**Modelo (nnp) para grandes sinais na região ativa!**

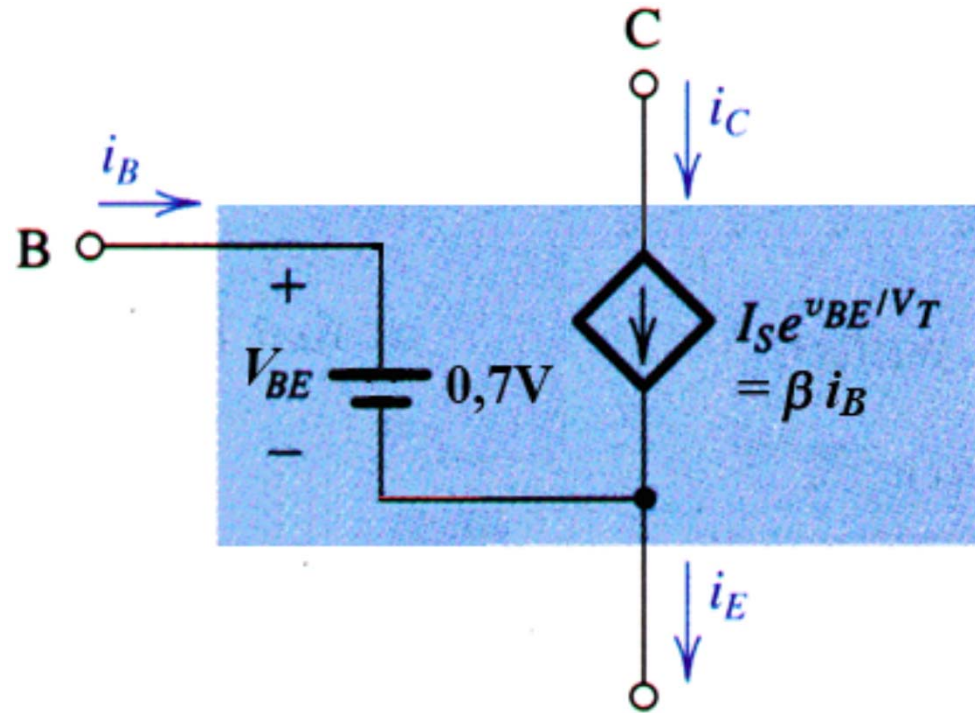
# Modelo aproximado para o Transistor NPN na região ativa



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

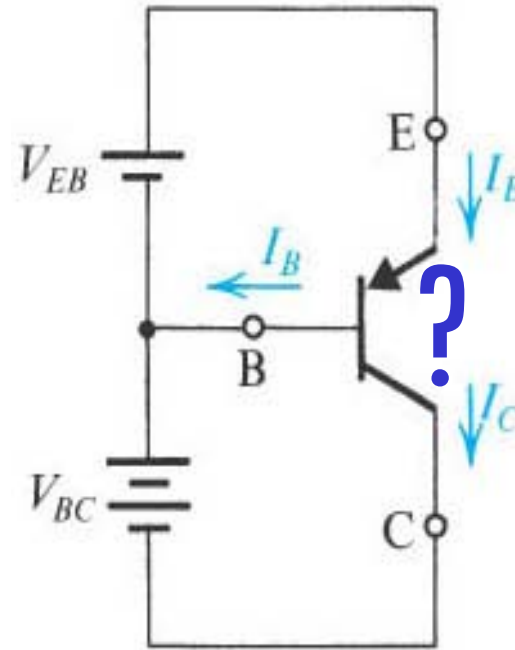
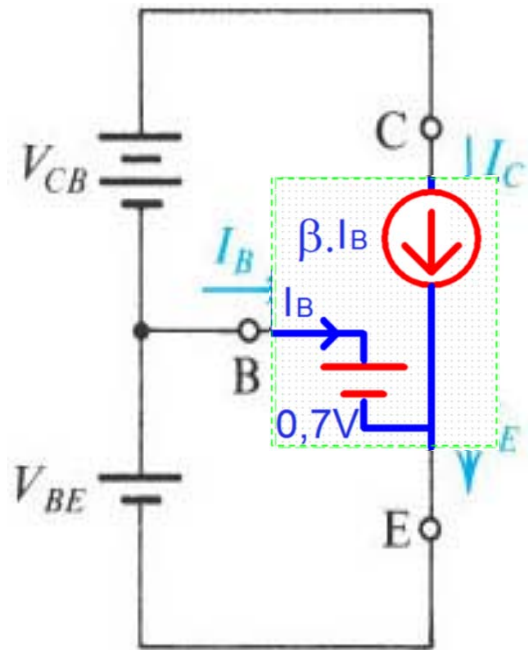
$$i_E = (I_S/\alpha) e^{v_{BE}/V_T}$$

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



**Modelo (npn) para grandes sinais na região ativa!**

# Polarizando transistores bipolares na região ativa



# Polarizando transistores bipolares na região ativa

**Tabela 5.2** RESUMO DAS RELAÇÕES CORRENTE-TENSÃO PARA O TBJ NO MODO ATIVO

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

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

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

$$V_{BE} = 0,7 \text{ V ou, se precisar ajustar, } \Delta V_{BE} = 2,3 V_T \log (I_{E2}/I_{E1})$$

Nota: Nas exp. acima, para o transistor pnp, substitua  $v_{BE}$  por  $v_{EB}$  e inverta

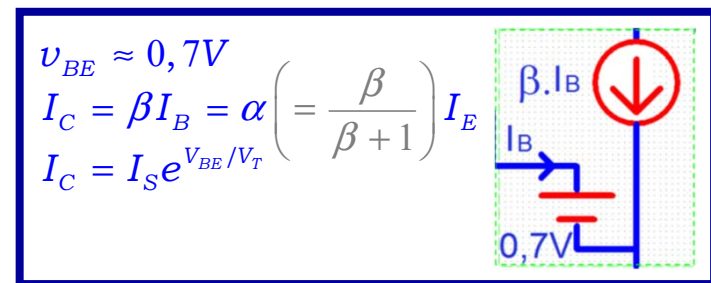
$$i_C = \alpha i_E \quad i_B = (1 - \alpha) i_E = \frac{i_E}{\beta + 1} \quad \text{o sentido das correntes.}$$

$$i_C = \beta i_B \quad i_E = (\beta + 1) i_B$$

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

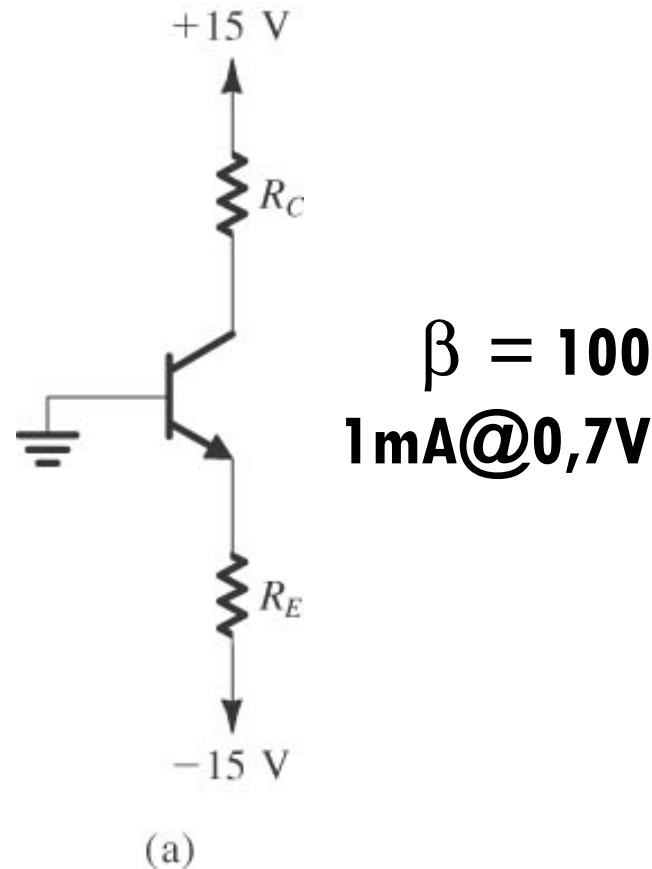
$$I_E = I_C + I_B$$

$V_T$  = tensão térmica =  $kT/q \cong 25 \text{ mV}$  a temperatura ambiente

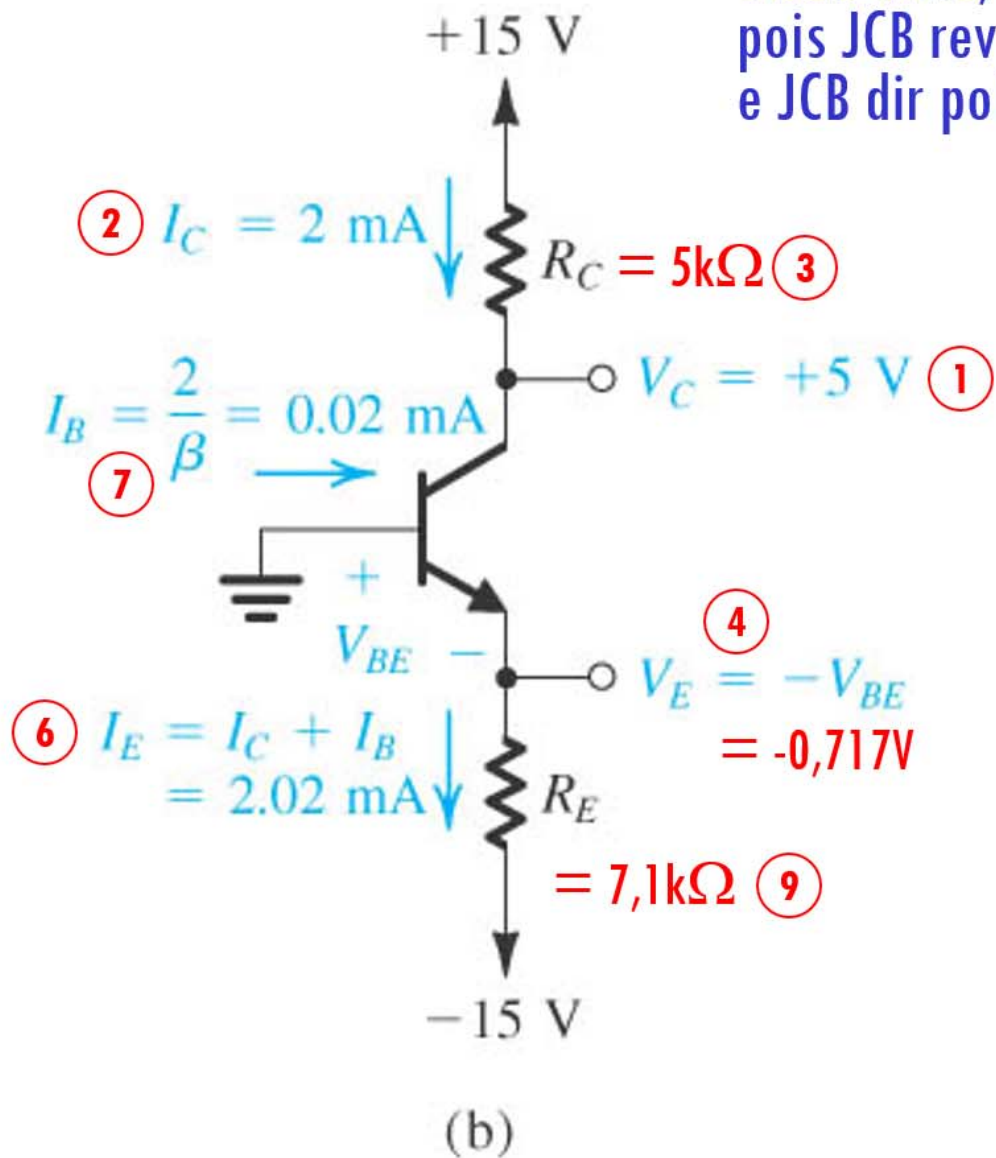




**Exemplo 5.1:** O transistor no circuito da Figura 4.11(a) tem  $\beta = 100$  e exibe um  $V_{BE}$  de 0,7 V quando  $i_C = 1$  mA. Projete o circuito de modo que uma corrente de 2 mA circule pelo coletor e a tensão no coletor seja de +5 V .



modo ativo,  
pois JCB rev pol  
e JCB dir pol



$$R_C = \frac{+15 - V_C}{i_C} = \frac{+15 - 5}{2\text{m}} = 5\text{k}\Omega$$

---

⑤  $V_{BE} = 0,7 \text{ V} @ 1 \text{ mA}$  e

$$V_{D2} = V_{D1} + 2,3 n V_T \log \frac{I_{D2}}{I_{D1}}$$

Assim,

$$V_{BE} @ 2 \text{ mA} = 0,7 + 0,017 = 0,717 \text{ V}$$

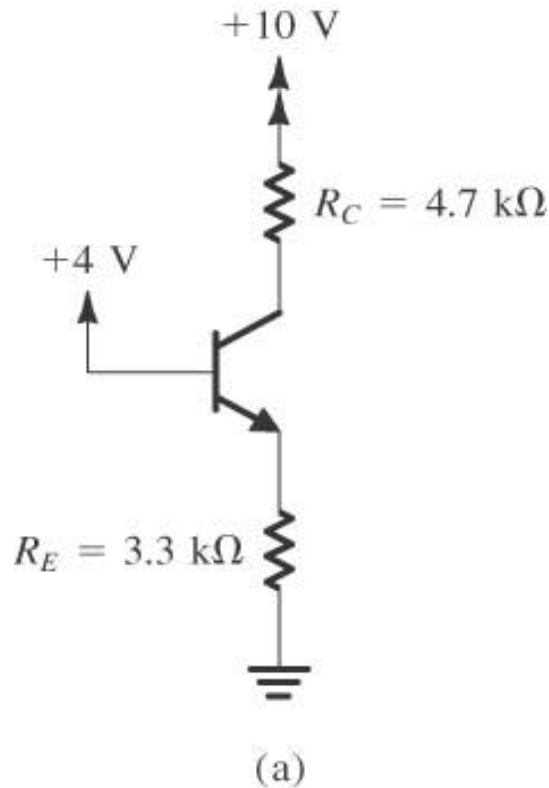

---

⑧  $R_E = \frac{V_E - (-15)}{i_E}$

$$= \frac{-0,717 + 15}{2,02} = 7,07 \text{ k}\Omega$$

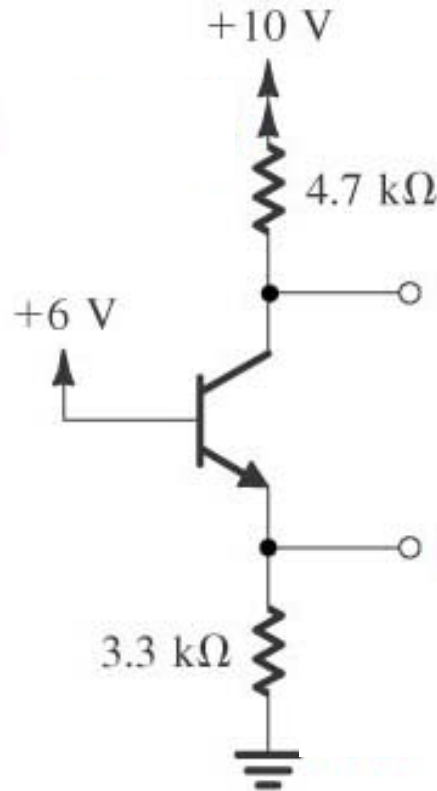
**Exemplo 5.4:** Desejamos analisar o circuito abaixo para determinar todas as tensões nodais e correntes dos ramos. Vamos supor que  $\beta$  é especificado com um valor de 100.

$$\beta = 100$$
$$I_S? V_S?$$



**Exemplo 5.5:** Desejamos analisar o circuito abaixo para determinar todas as tensões nodais e correntes dos ramos. Vamos supor que  $\beta$  é especificado com um valor de 50.

$$\beta = 50$$
$$I_s? \quad V_s?$$



# Exemplo 5.4

$\beta = 10 \rightarrow I_S? V_S?$

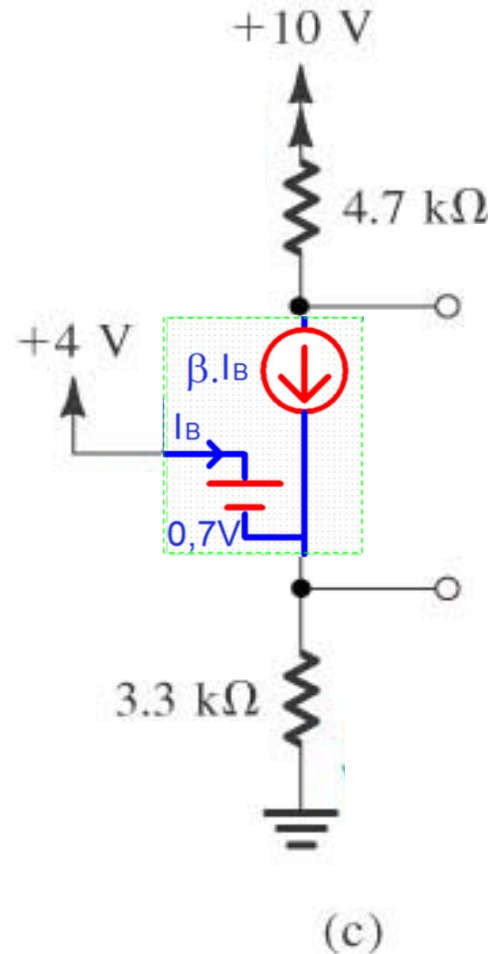
suponho modo ativo,  
pois JCB rev pol  
e JCB dir pol

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

$$i_E = i_C + i_B$$

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

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



# Exemplo 5.4

$\beta = 10 \rightarrow I_S? V_S?$

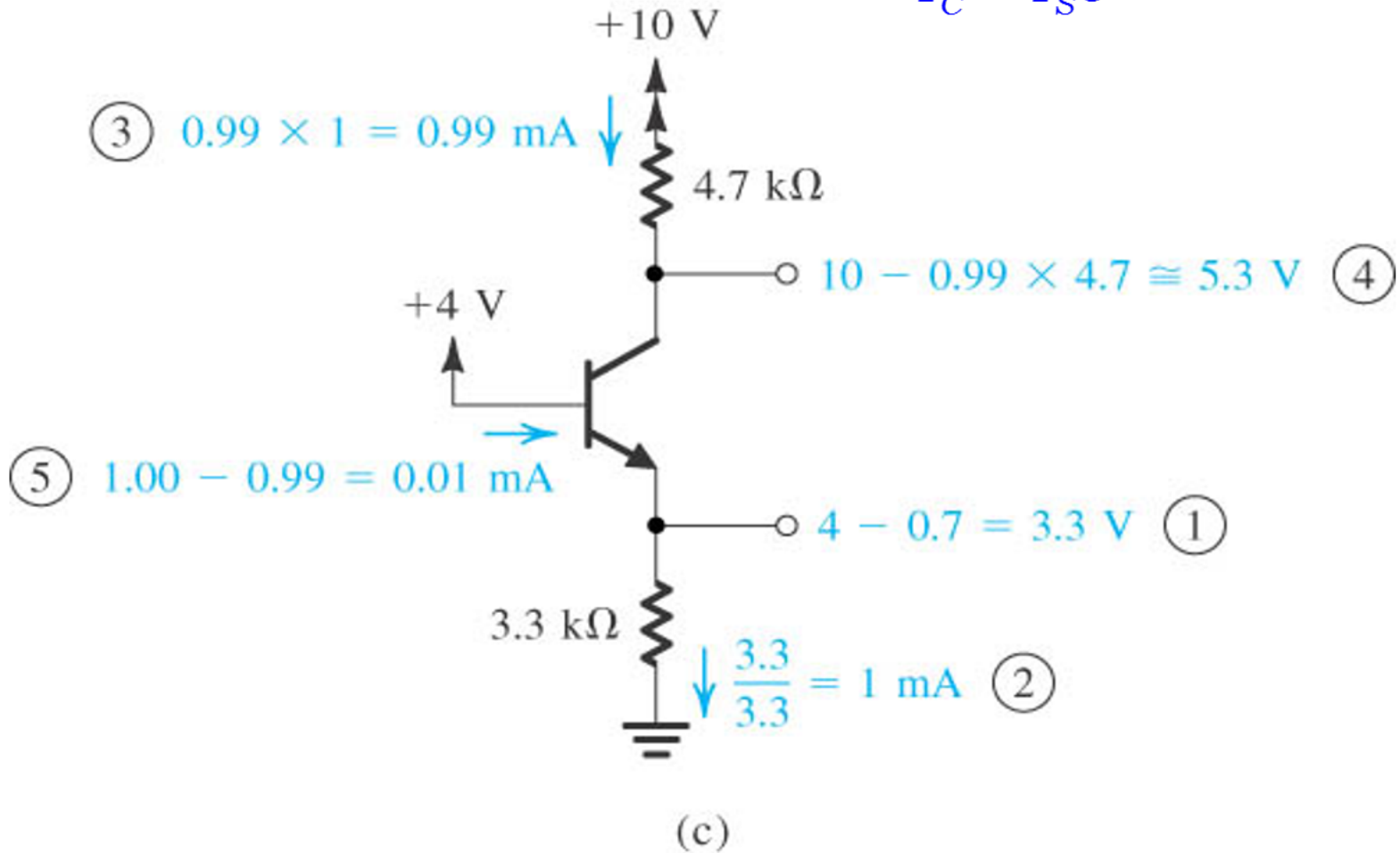
suponho modo ativo,  
pois JCB rev pol  
e JCB dir pol

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

$$i_E = i_C + i_B$$

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

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



# Exemplo 5.5

$\beta > 50 \rightarrow I_S? V_S?$

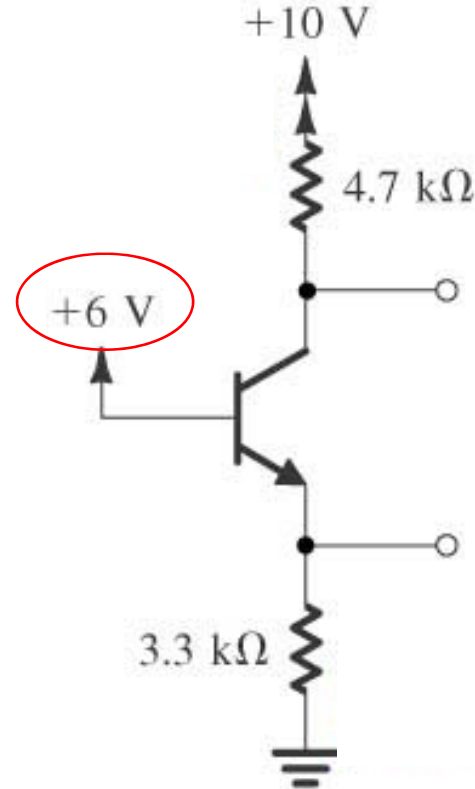
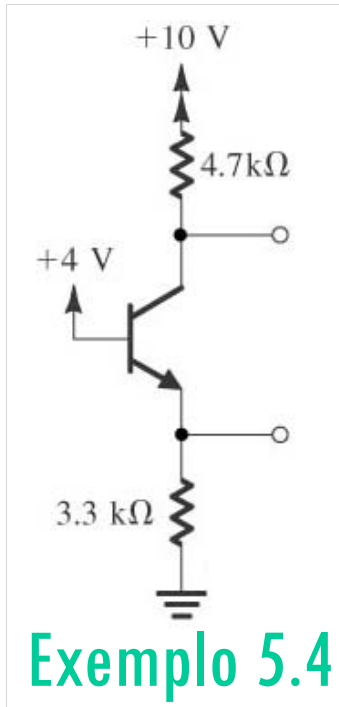
suponho modo ativo,  
pois JCB rev pol  
e JCB dir pol

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

$$i_E = i_C + i_B$$

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

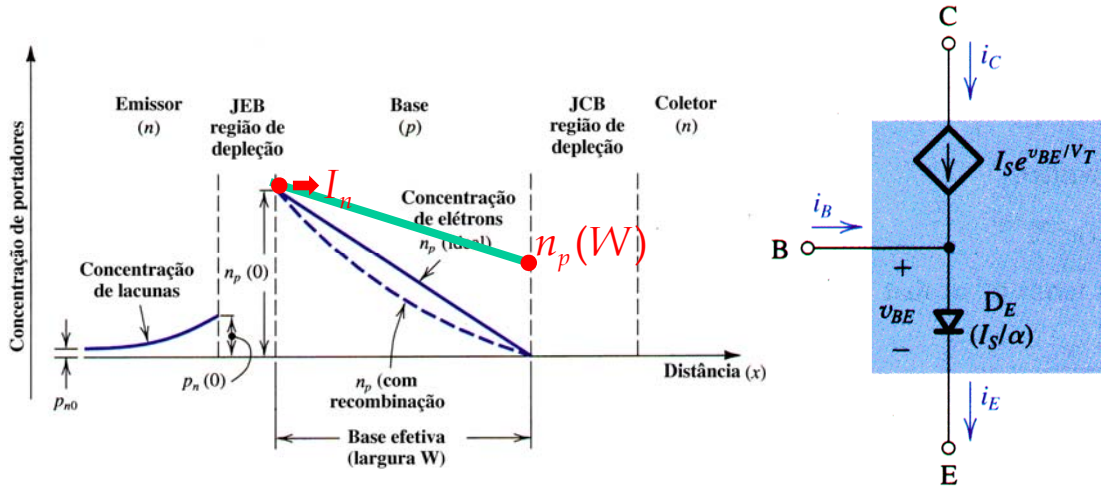
$$I_C = I_S e^{V_{BE}/V_T}$$



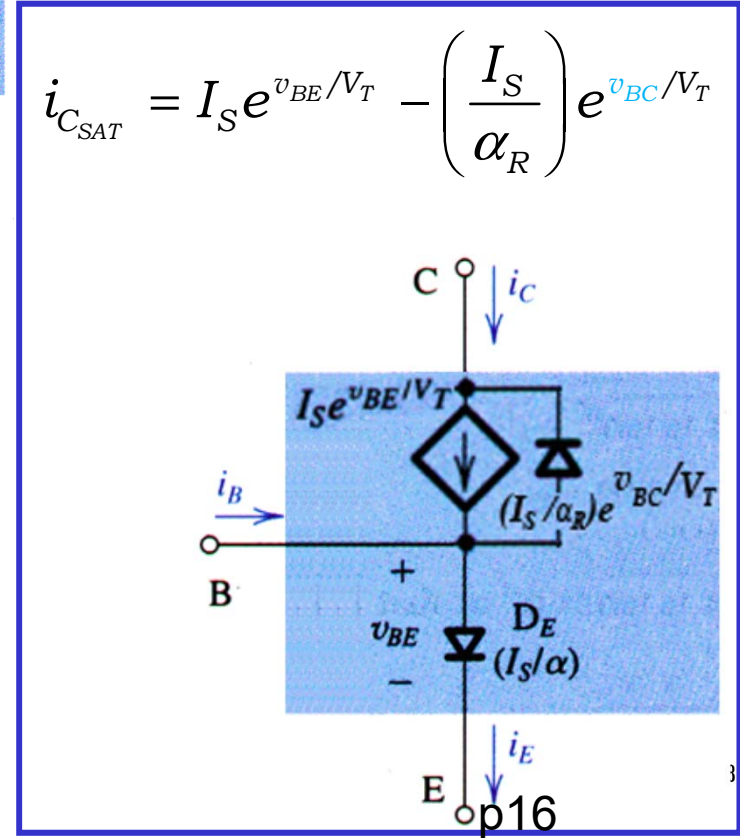
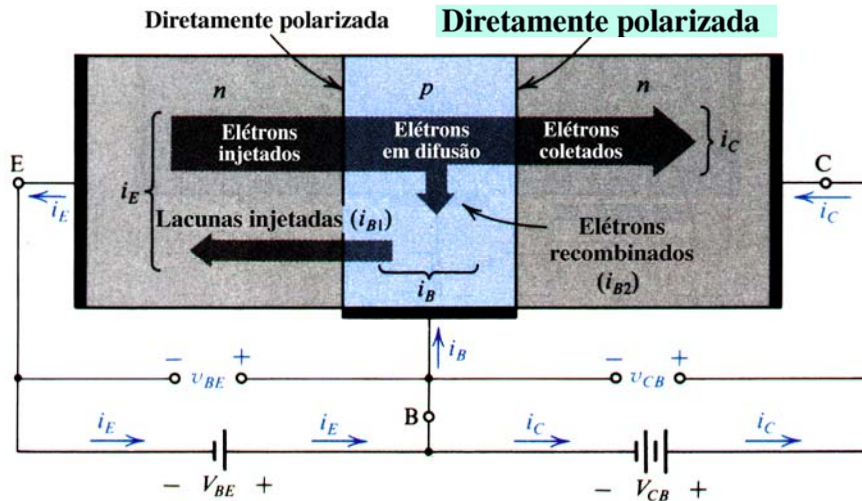
(b)

# O Transistor Bipolar

## $j_{BE}$ dir. pol. e $j_{BC}$ dir. pol. (modo saturação)

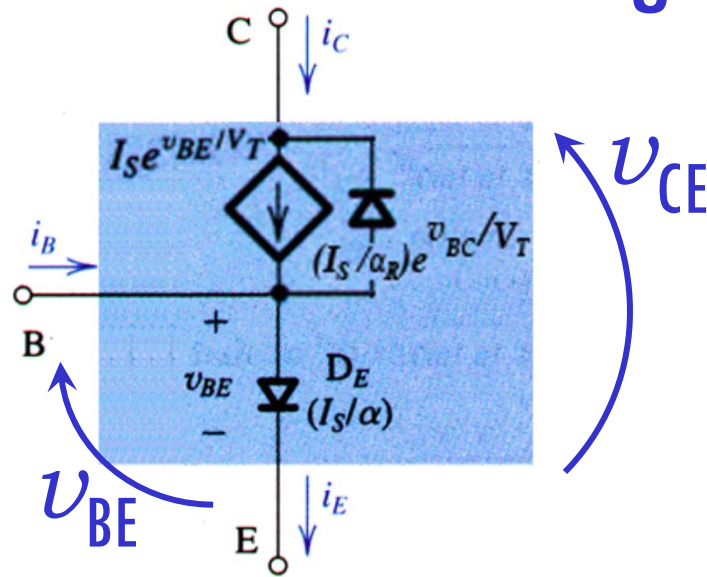


$$i_{C_{SAT}} = I_S e^{v_{BE}/V_T} - \left( \frac{I_S}{\alpha_R} \right) e^{v_{BC}/V_T}$$



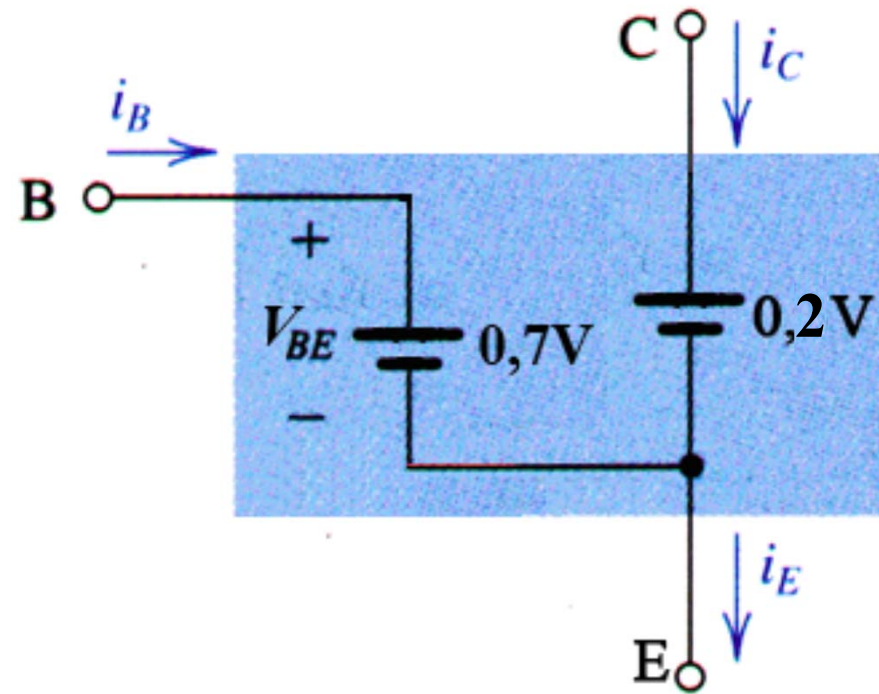


# Modelo aproximado para o Transistor NPN na região ativa



$$i_{C_{SAT}} = I_S e^{v_{BE}/V_T} - \left( \frac{I_S}{\alpha_R} \right) e^{v_{BC}/V_T}$$

$$i_B = i_E - i_C$$



Modelo (npn) para grandes sinais na região ativa!

# Modos de Operação

Tabela 4.1 MODOS DE OPERAÇÃO DO TBJ.

Modo	JEB	JBC
Corte	Reversa	Reversa
Ativo	Direta	Reversa
Saturação	Direta	Direta
Ativo Reverso	Reversa	Direta

**INDEPENDENTE SE NPN OU PNP!!!**

# Na região de saturação

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

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

$$i_E = i_C + i_B \checkmark$$

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

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

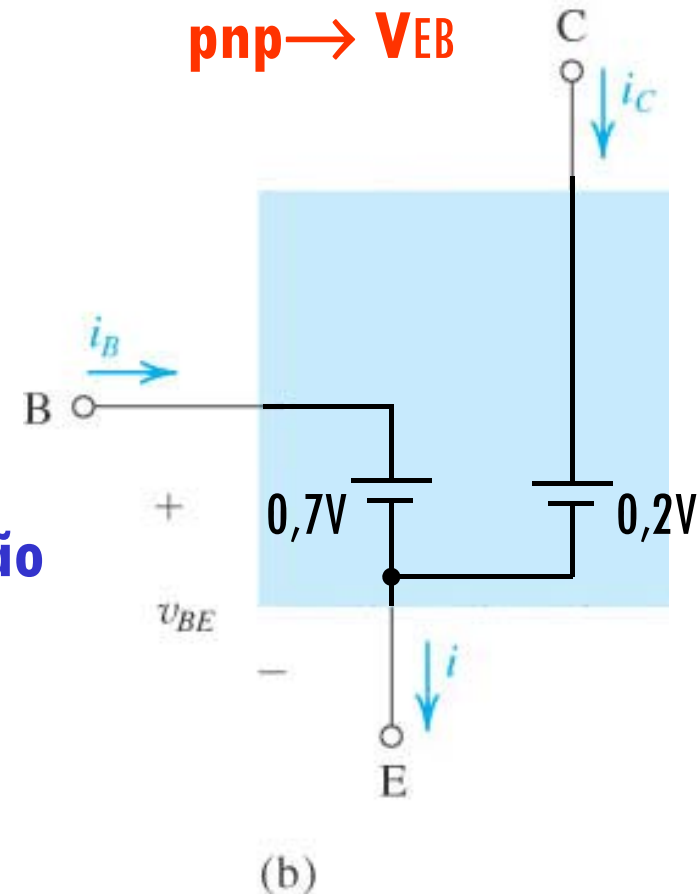
$$\beta_{FORÇADO} = \frac{i_{Csat}}{i_B}$$

Região Ativa

Região Saturação

nnp  $\rightarrow$   $V_{BE}$

pnnp  $\rightarrow$   $V_{EB}$



# Ativa ou Saturação?

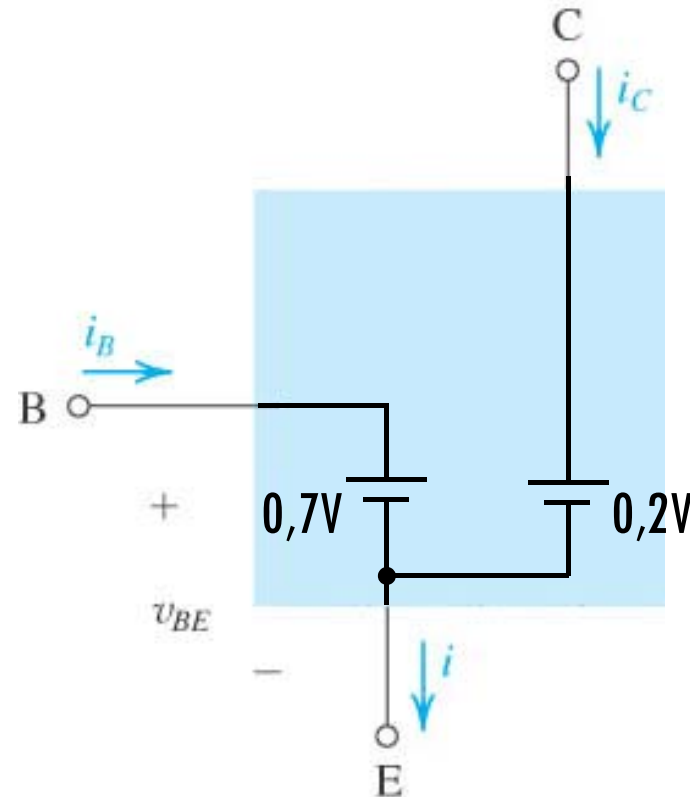
- Assuma inicialmente ativa (se ninguém falar nada)
- Confira se ativa ou saturação
- Se saturação, refaça, considerando as seguintes expressões:

$$i_E = i_C + i_B$$

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

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

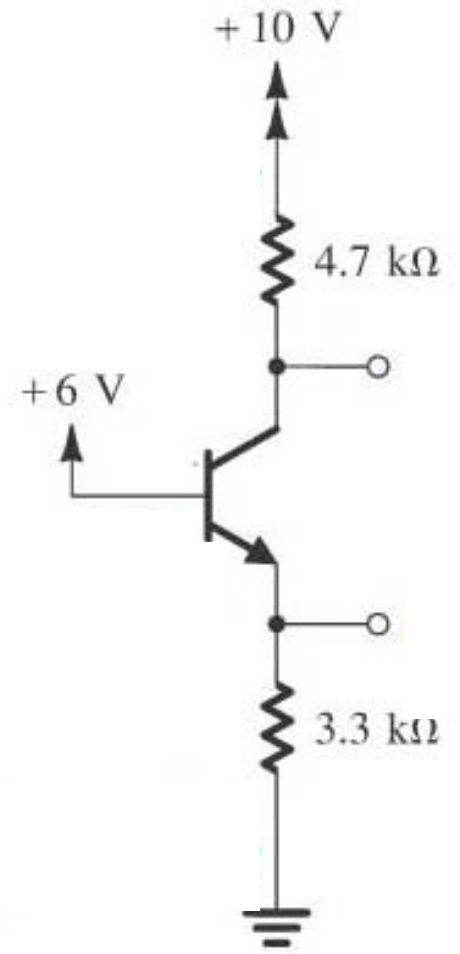
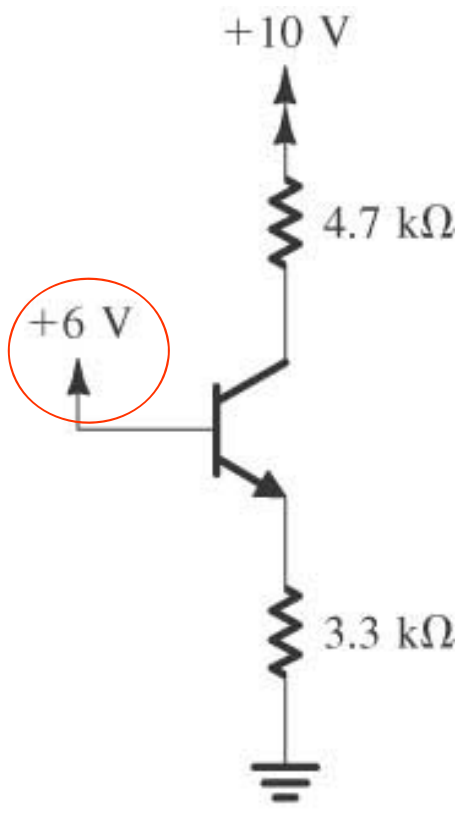
$$\beta_{FORÇADO} = \frac{i_{C_{sat}}}{i_B}$$



- Sempre confira ao final se ativa ou saturação

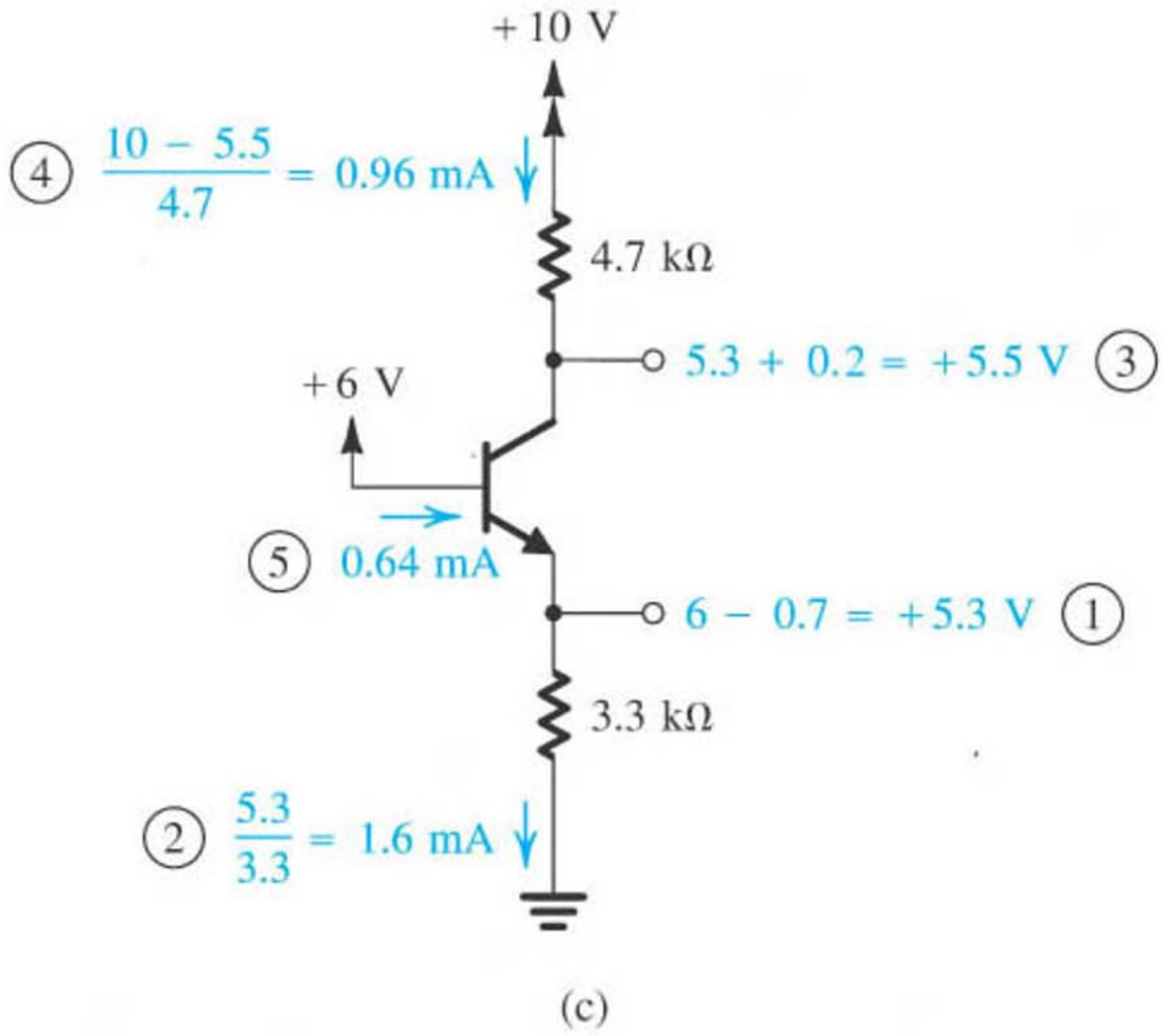
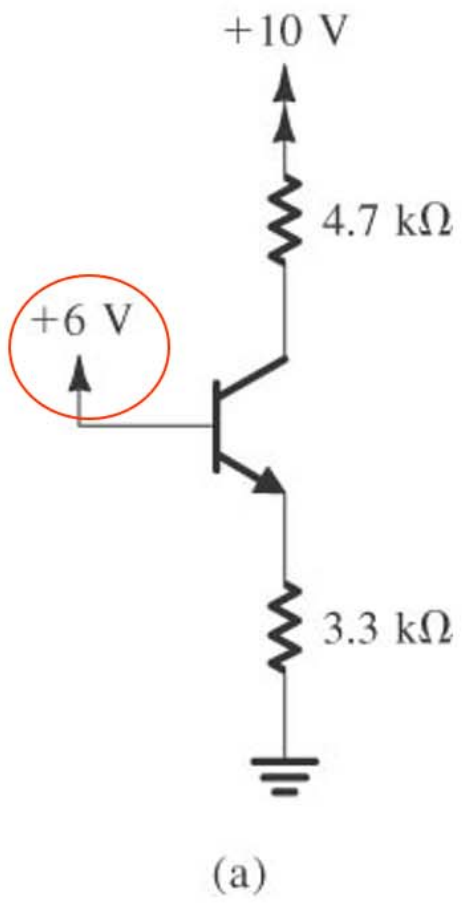
# Exemplo 5.5 Se na região de saturação

$\beta > 50$   
 $I_s?$   $V_s?$



# Exemplo 5.5 Se na região de saturação

$\beta > 50$   
 $I_s?$   $V_s?$



# Ou usando o modelo da região de saturação

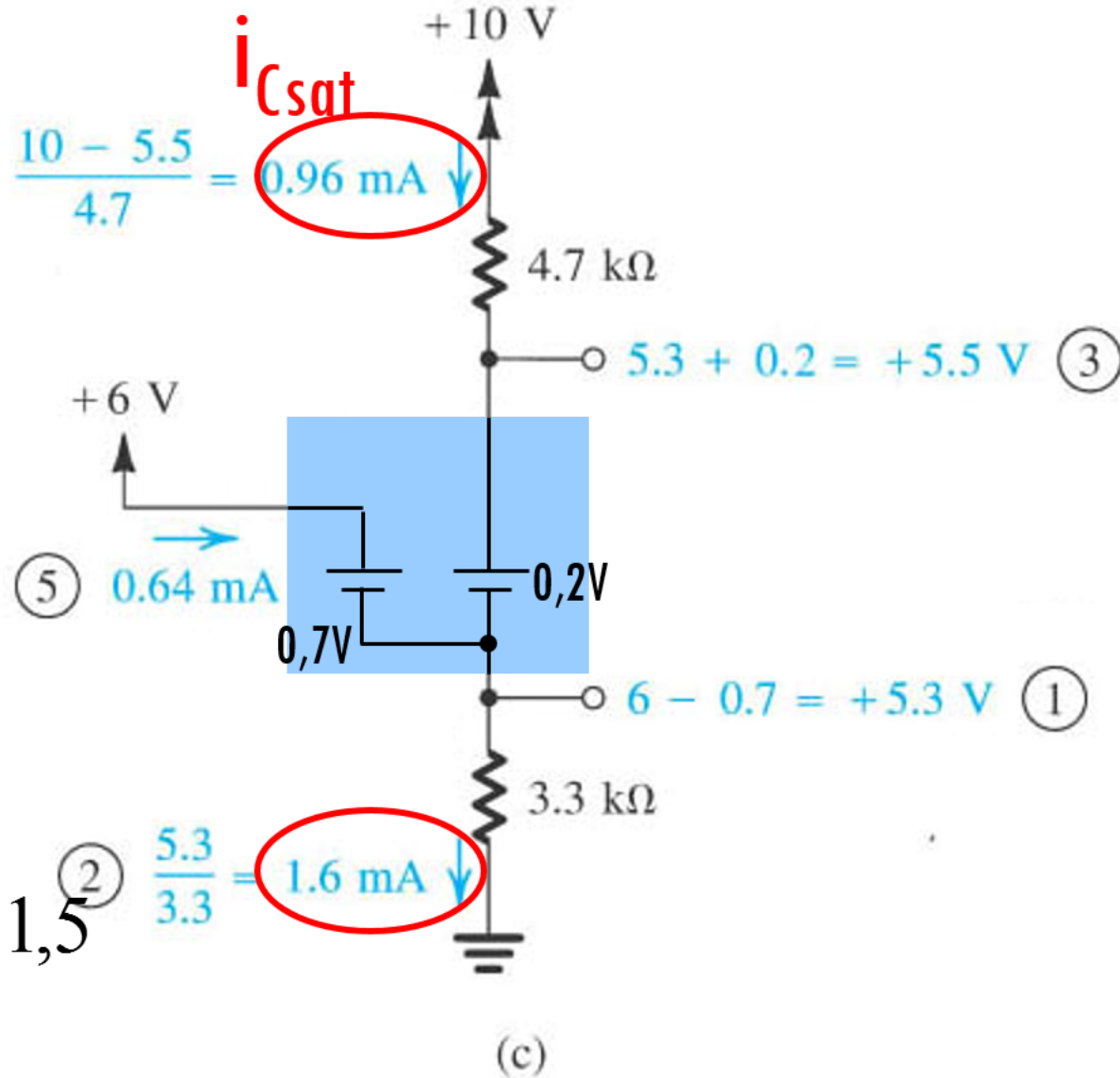
$$i_E = i_C + i_B$$

$$V_{BE} = 0,7V \quad (4)$$

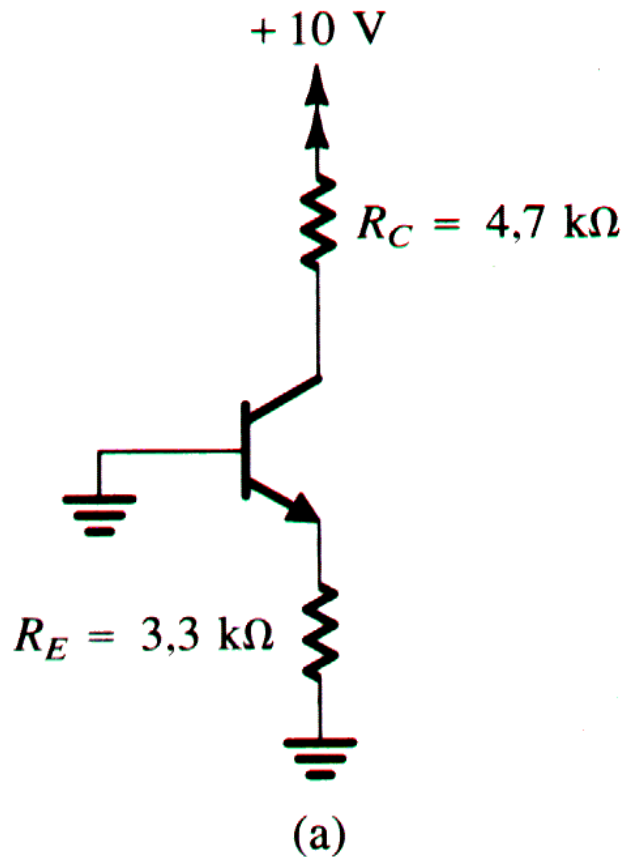
$$V_{CE_{sat}} = 0,2V$$

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

$$\beta_{FORÇADO} = \frac{0,96}{0,64} = 1,5 \quad (2)$$



**Exemplo 5.6** Desejamos analisar o circuito abaixo para determinar todas as tensões nodais e todas as correntes nos ramos. Observe que esse circuito é idêntico ao considerado nos Exemplos 5.4 e 5.5, exceto que agora a tensão na base é zero.





# Modos de Operação

Tabela 4.1 MODOS DE OPERAÇÃO DO TBJ.

---

Modo	JEB	JBC
Corte	Reversa	Reversa
Ativo	Direta	Reversa
Saturação	Direta	Direta
Ativo Reverso	Reversa	Direta

---

**INDEPENDENTE SE NPN OU PNP!!!**

# Na região de corte

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

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

$$i_E = i_C + i_B \quad \checkmark$$

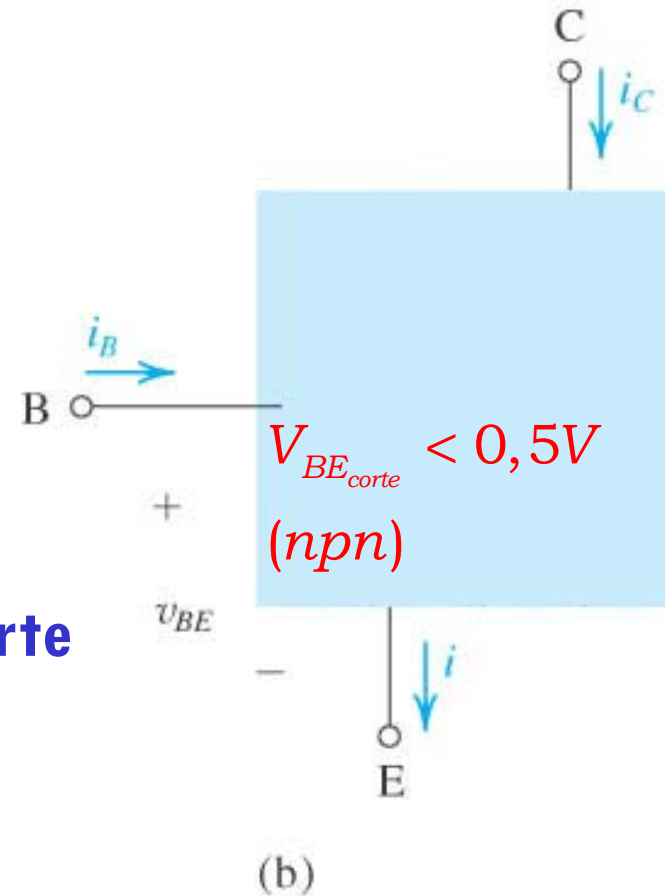
~~$$V_{BE} = 0,7V$$~~

**Região Ativa**

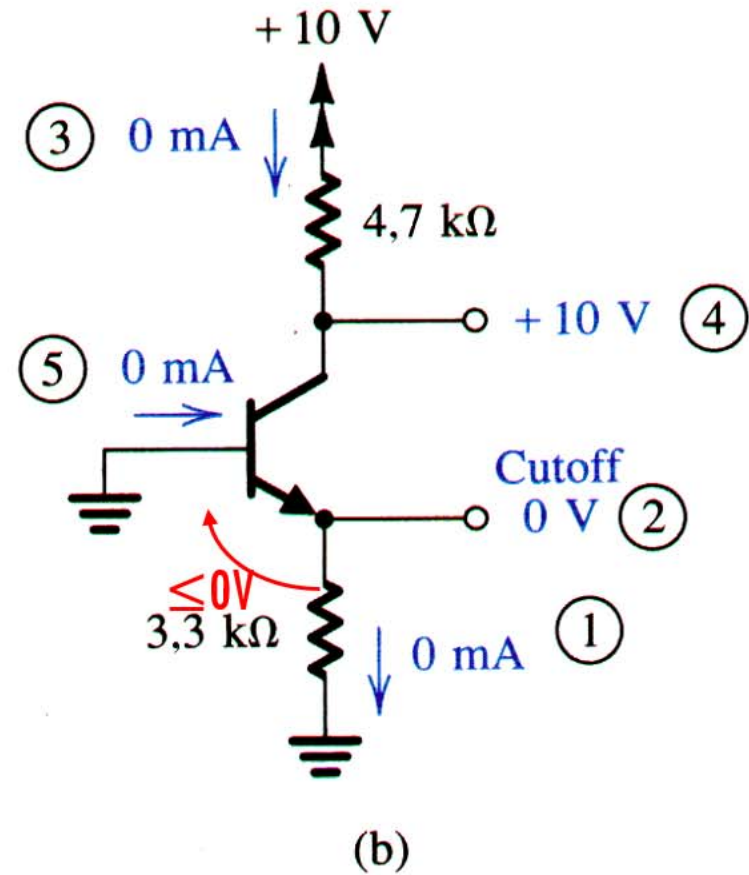
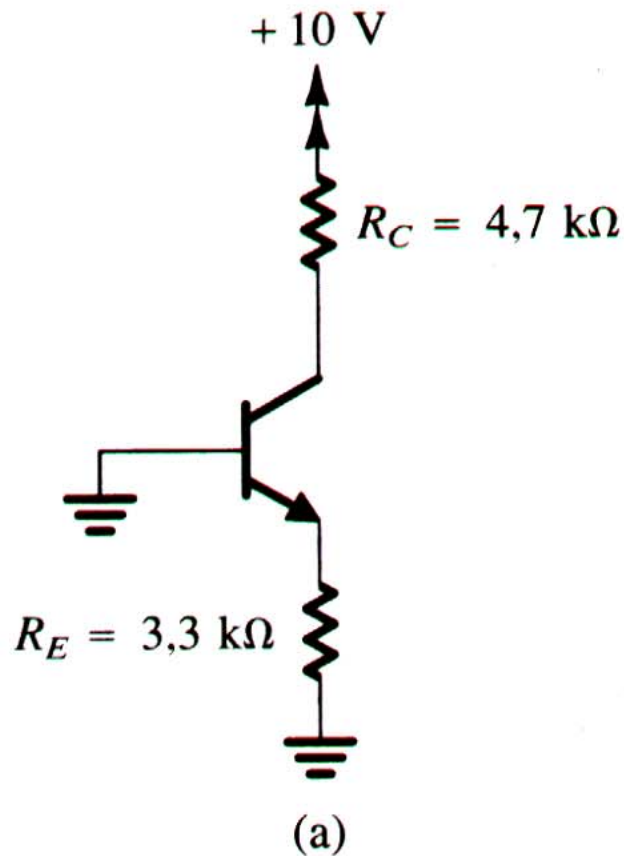
$$V_{BE_{corte}} < 0,5V \quad (npn)$$

$$i_B = 0; i_C = 0; i_E = 0$$

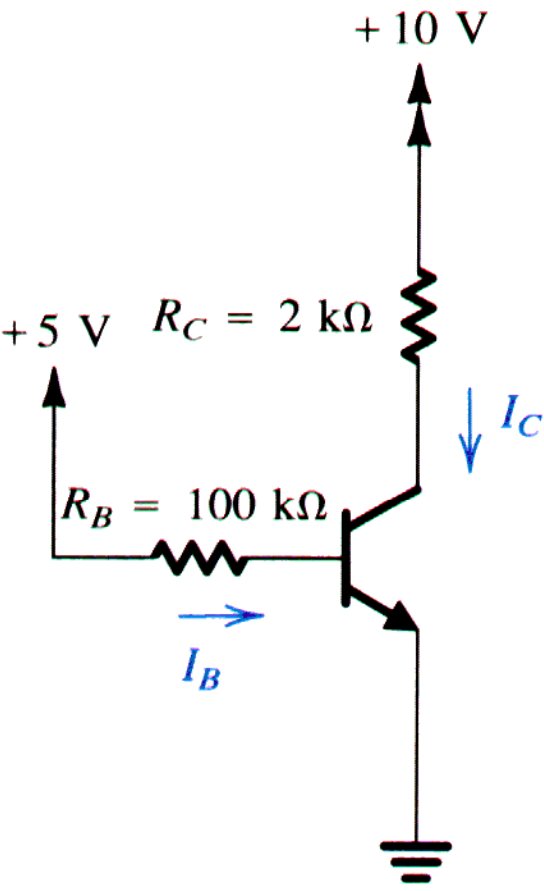
**Região Corte**



**Exemplo 5.6** Desejamos analisar o circuito abaixo para determinar todas as tensões nodais e todas as correntes nos ramos. Observe que esse circuito é idêntico ao considerado nos Exemplos 5.4 e 5.5, exceto que agora a tensão na base é zero.

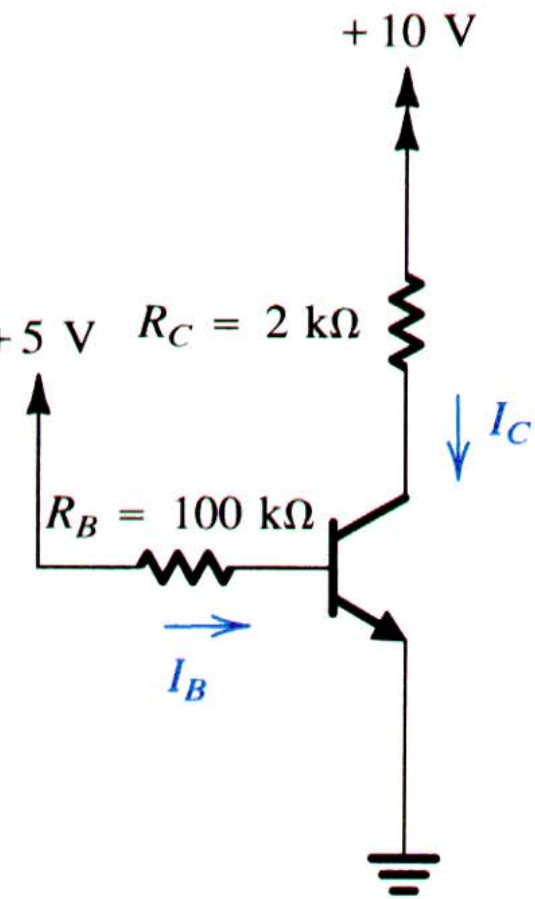


**Exemplo 5.8** Desejamos analisar o circuito da Figura 4.20(a) para determinar todas as tensões nodais e todas as correntes nos ramos. Suponha  $\beta = 100$ .

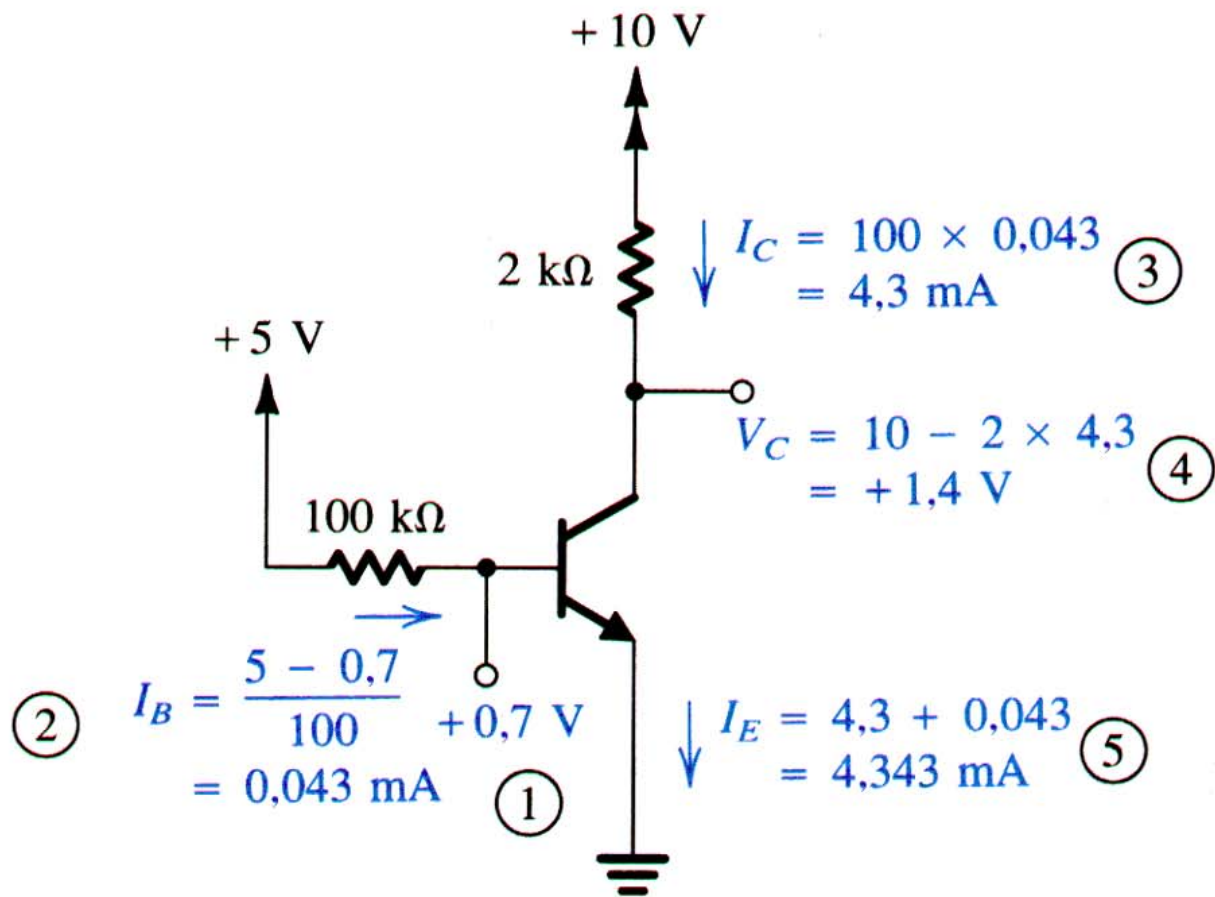


(a)

**Exemplo 5.8** Desejamos analisar o circuito da Figura 4.20(a) para determinar todas as tensões nodais e todas as correntes nos ramos. Suponha  $\beta = 100$ .



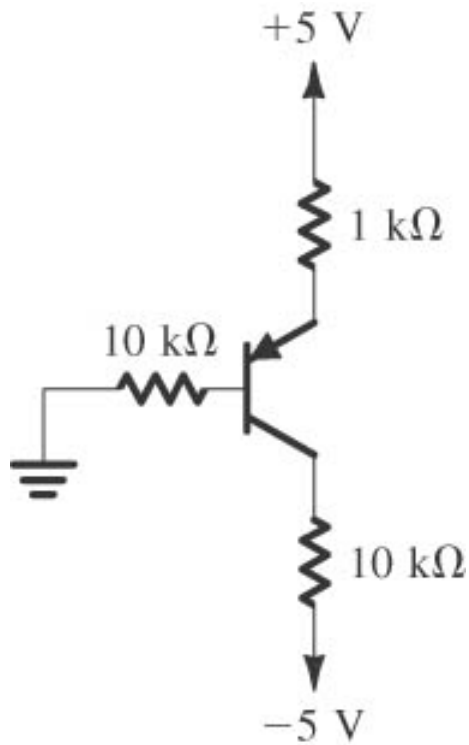
(a)



(b)

**Exemplo 5.9** Desejamos analisar o circuito abaixo para determinar todas as tensões nodais e todas as correntes nos ramos. O valor mínimo de  $\beta$  é especificado como 30.

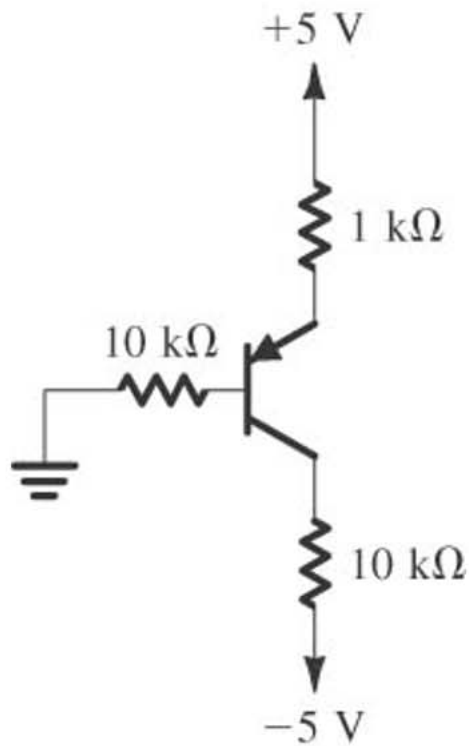
Supor inicialmente reg. ativa. Verifique que  $V_c$  dará um valor absurdo



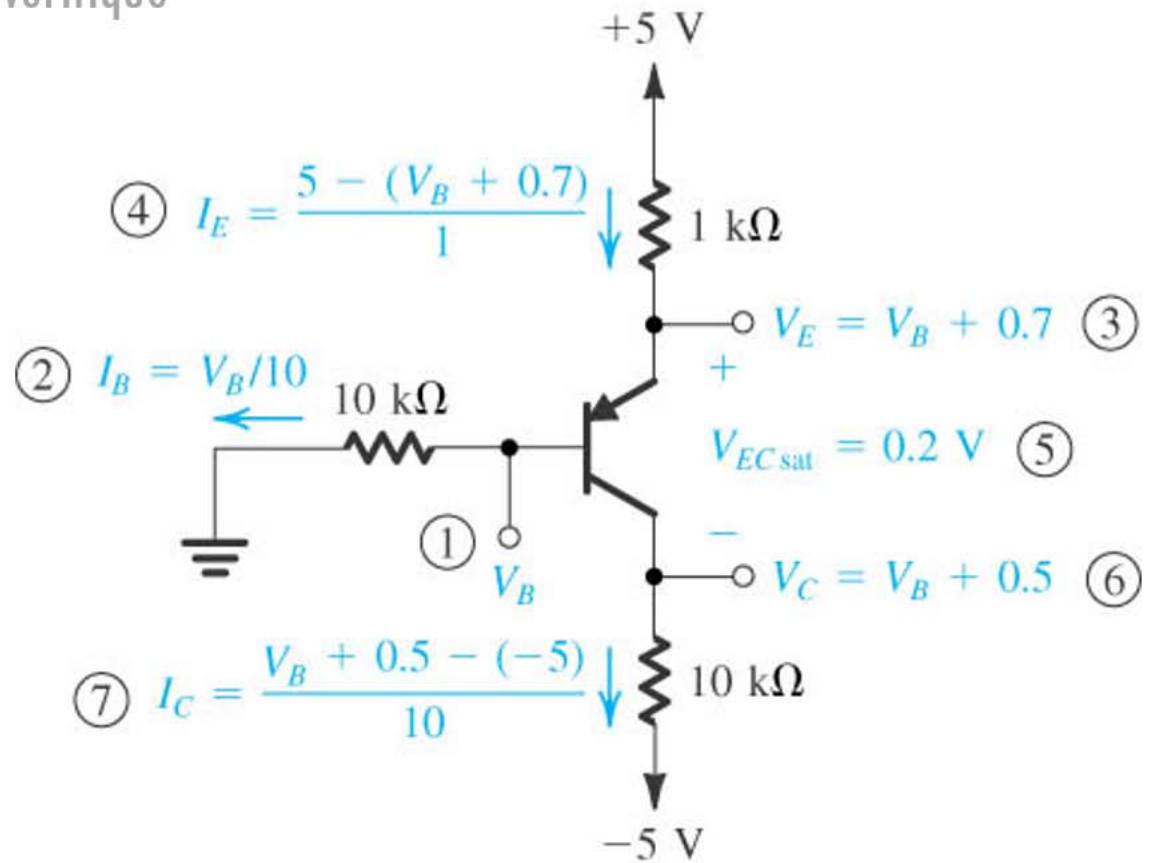
(a)

**Exemplo 5.9** Desejamos analisar o circuito abaixo para determinar todas as tensões nodais e todas as correntes nos ramos. O valor mínimo de  $\beta$  é especificado como 30.

Supor inicialmente reg. ativa. Verifique que  $V_C$  dará um valor absurdo

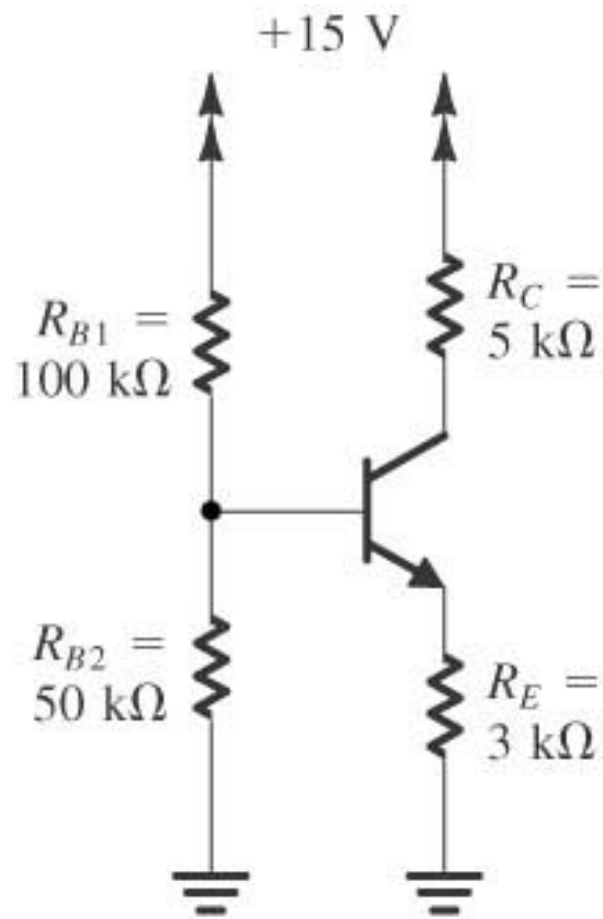


(a)



(b)

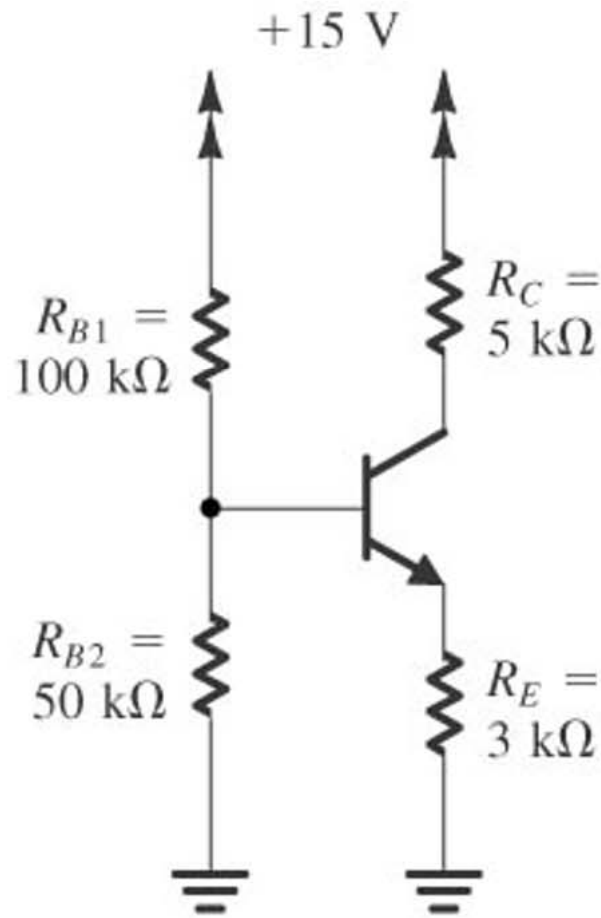
**Exemplo 5.10** Desejamos analisar o circuito abaixo para determinar todas as tensões nodais e todas as correntes nos ramos. Suponha  $\beta = 100$ .



(a)

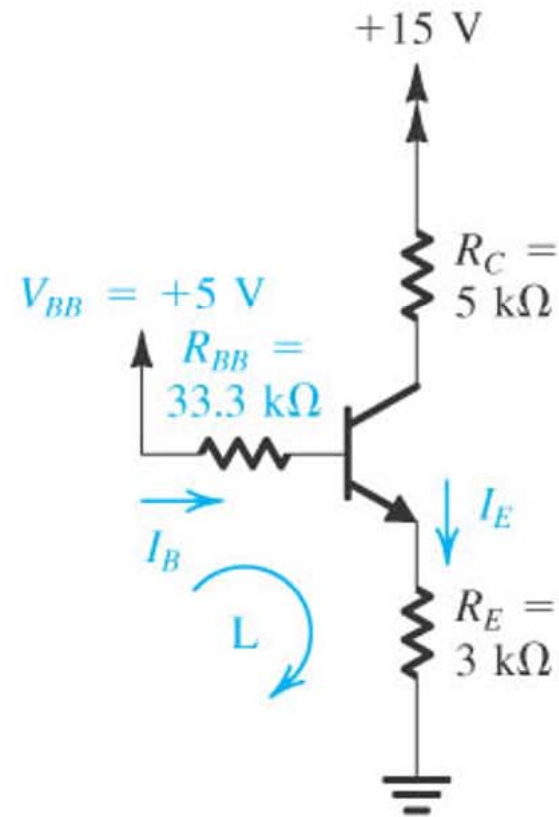


**Exemplo 5.10** Desejamos analisar o circuito abaixo para determinar todas as tensões nodais e todas as correntes nos ramos. Suponha  $\beta = 100$ .



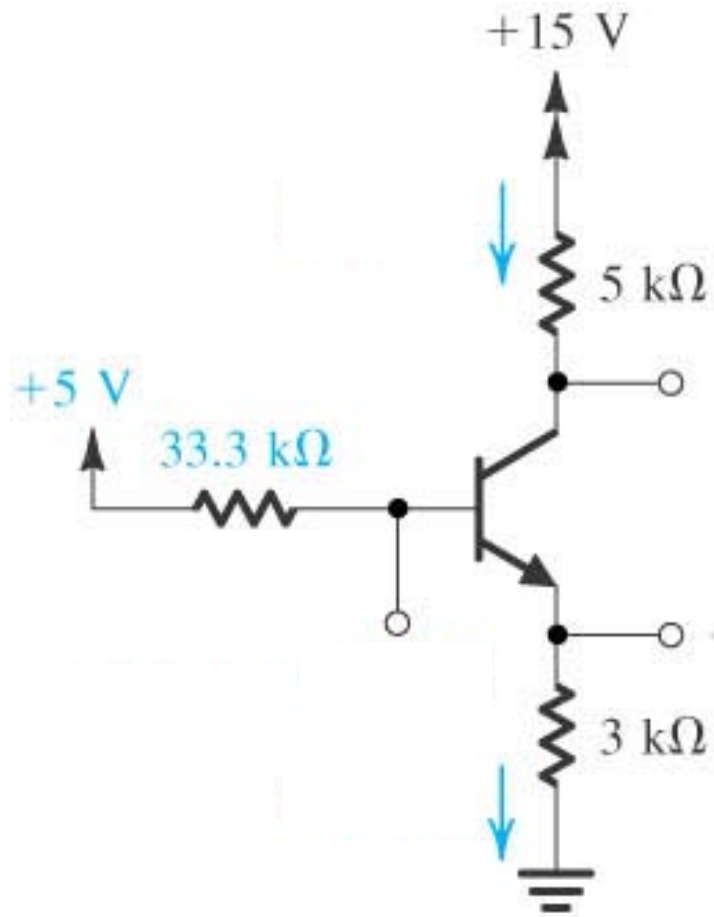
(a)

Thévenin  
→



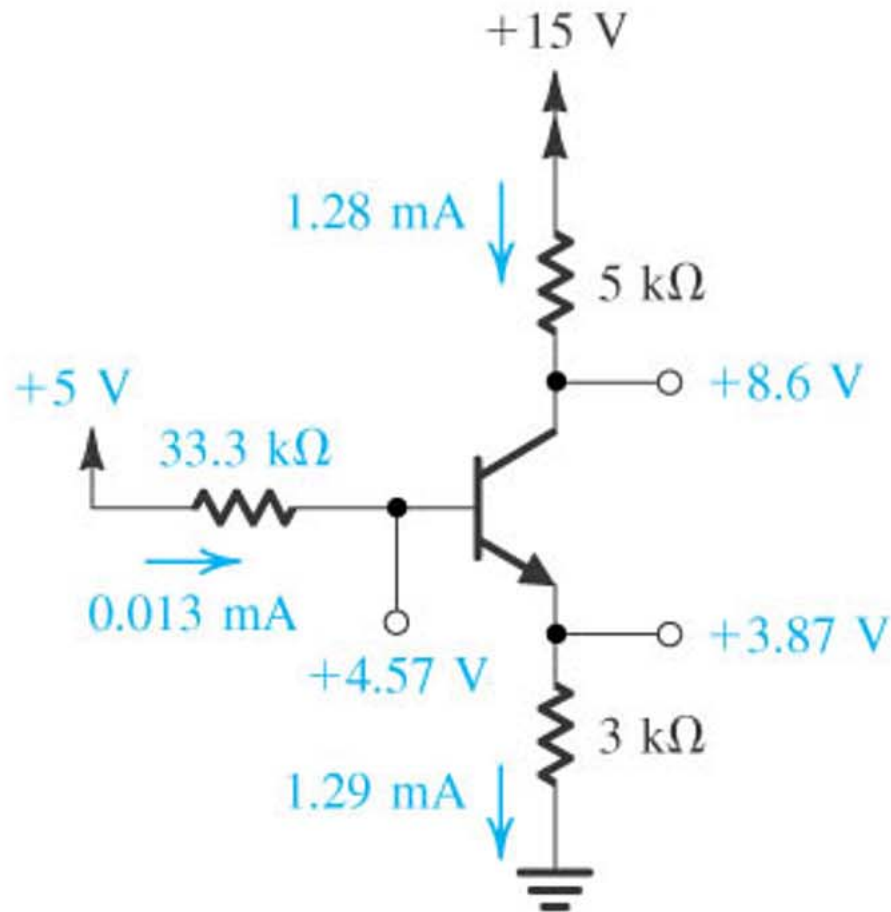
(b)

**Exemplo 5.10** Desejamos analisar o circuito abaixo para determinar todas as tensões nodais e todas as correntes nos ramos. Suponha  $\beta = 100$ .



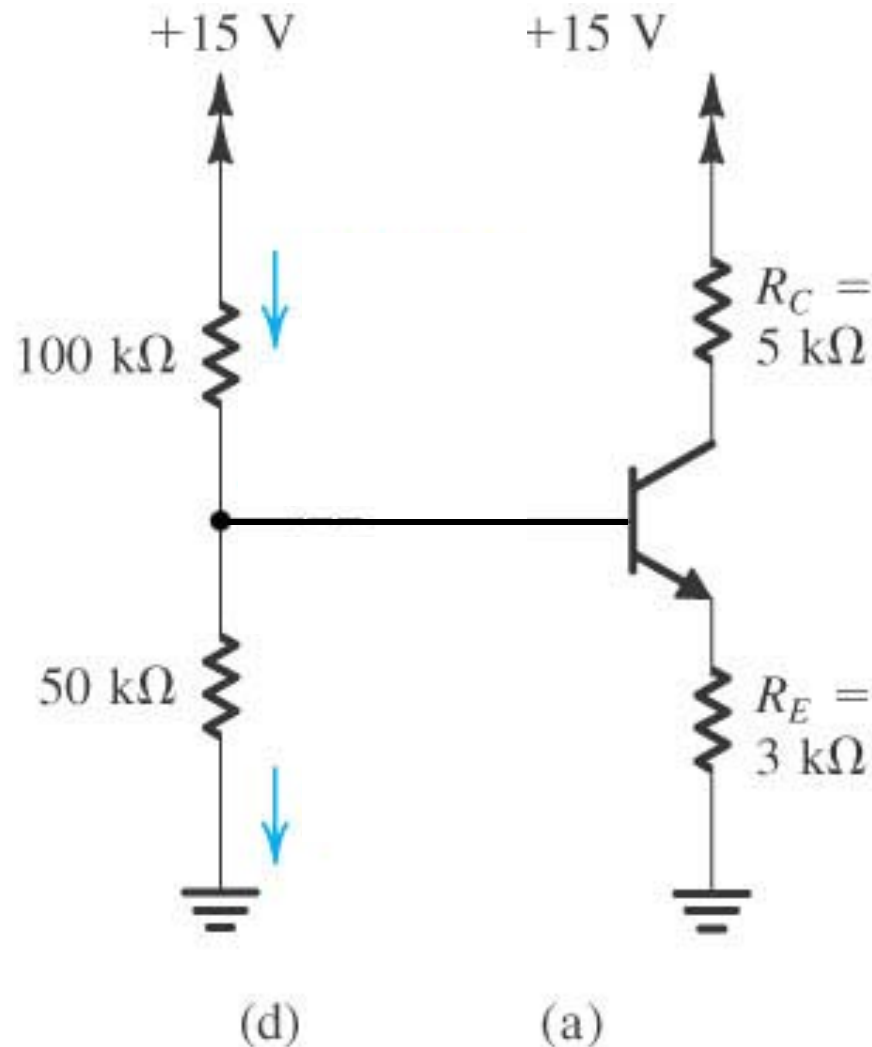
(c)

**Exemplo 5.10** Desejamos analisar o circuito abaixo para determinar todas as tensões nodais e todas as correntes nos ramos. Suponha  $\beta = 100$ .

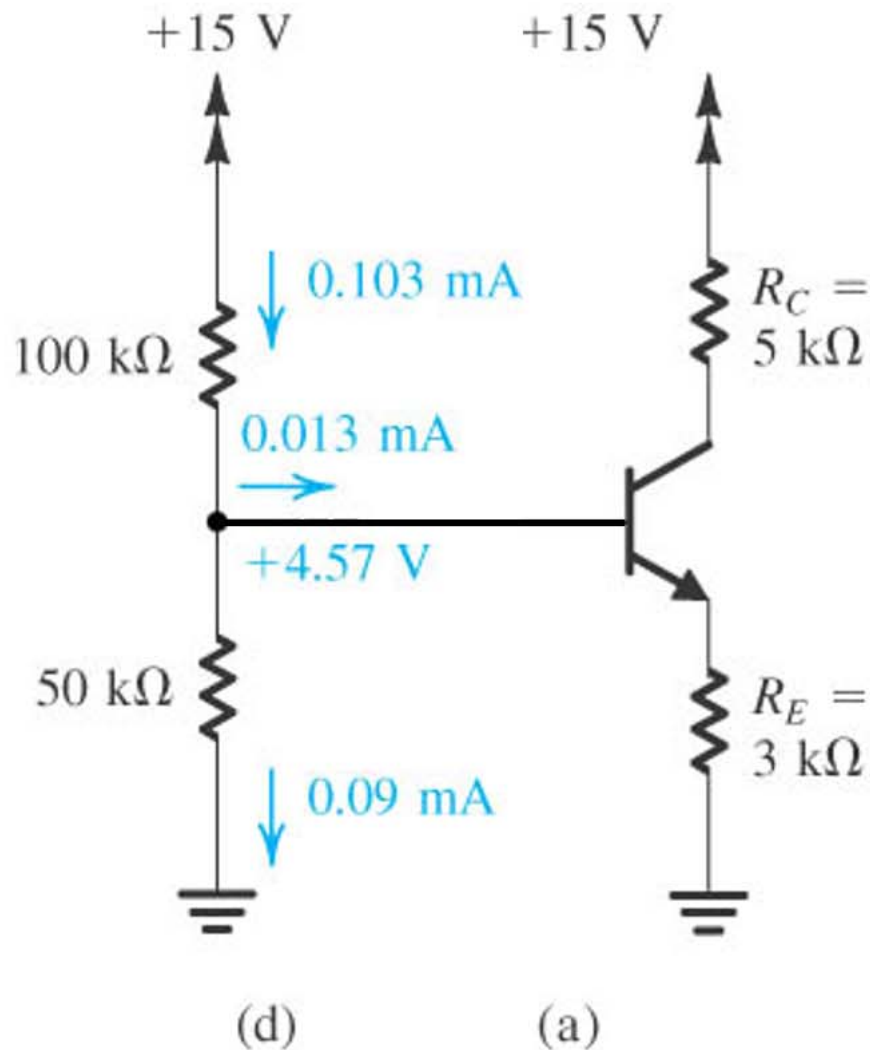


(c)

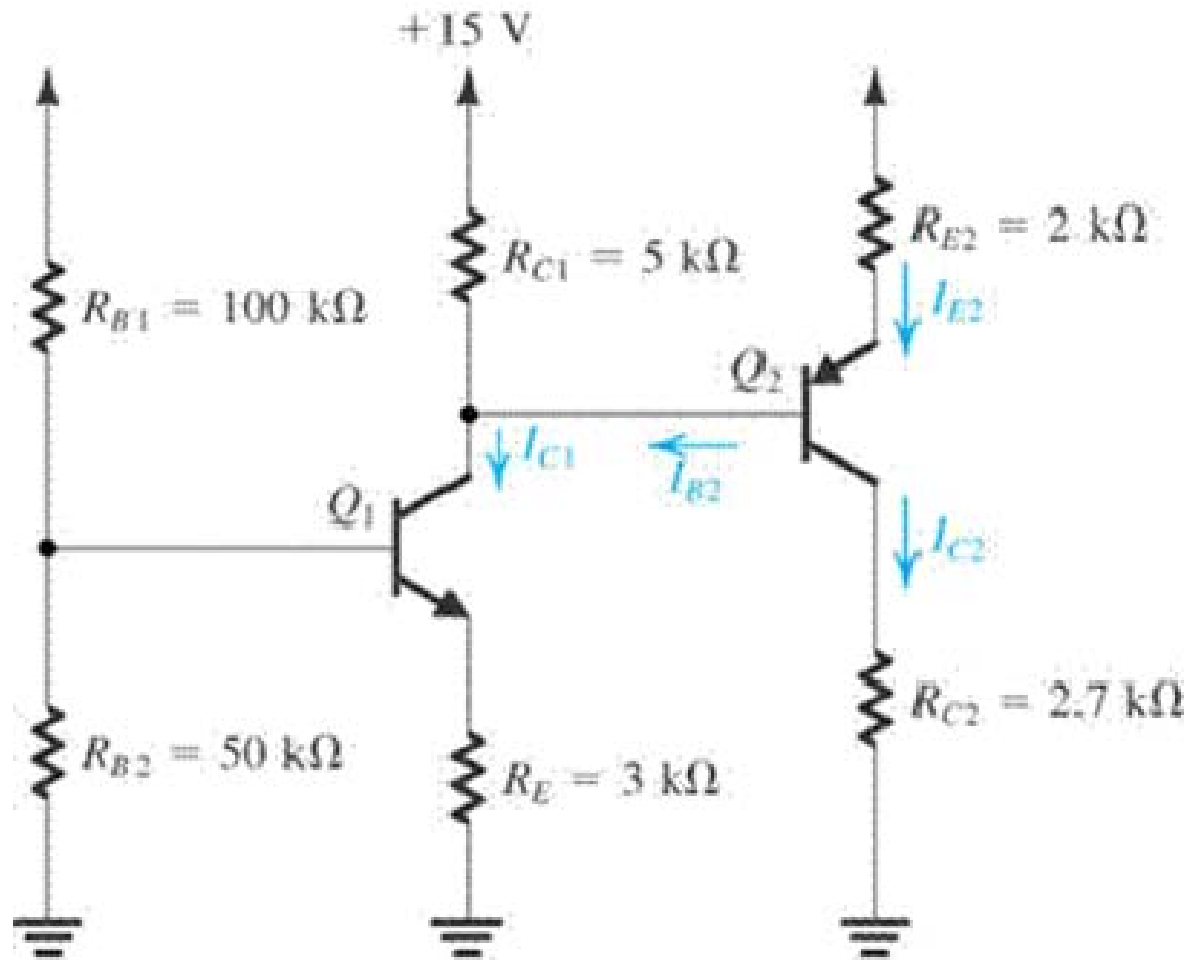
**Exemplo 5.10** Desejamos analisar o circuito abaixo para determinar todas as tensões nodais e todas as correntes nos ramos. Suponha  $\beta = 100$ .



**Exemplo 5.10** Desejamos analisar o circuito abaixo para determinar todas as tensões nodais e todas as correntes nos ramos. Suponha  $\beta = 100$ .



**DESAFIO: Exemplo 5.11** Desejamos analisar o circuito abaixo para determinar todas as tensões nodais e todas as correntes nos ramos. Suponha  $\beta = 100$ .



# Resumo: Polarizando transistores bipolares na região ativa

Tabela 5.2 RESUMO DAS RELAÇÕES CORRENTE-TENSÃO PARA O TBJ NO MODO ATIVO

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

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

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

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

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

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

$V_{BE} = 0,7 \text{ V}$  ou, se precisar ajustar,  $\Delta V_{BE} = 2,3 V_T \log (I_{E2}/I_{E1})$

Nota: Nas exp. acima, para o transistor pnp, substitua  $v_{BE}$  por  $v_{EB}$  e inverta o sentido das correntes.

$$i_C = \alpha i_E \quad i_B = (1 - \alpha) i_E = \frac{i_E}{\beta + 1}$$

$$i_C = \beta i_B \quad i_E = (\beta + 1) i_B$$

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

$$I_E = I_C + I_B$$

$V_T =$  tensão térmica  $= kT/q \cong 25 \text{ mV}$  a temperatura ambiente

# Resumo: Ativa ou Saturação?

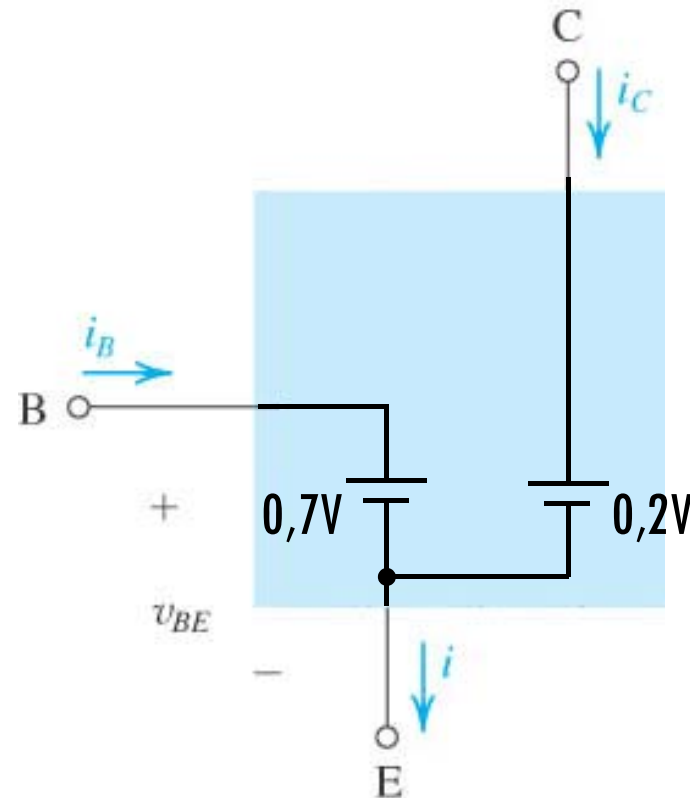
- Assuma inicialmente ativa (se ninguém falar nada)
- Confira se ativa ou saturação
- Se saturação, refaça, considerando as seguintes expressões:

$$i_E = i_C + i_B$$

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

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

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



- Sempre confira ao final se ativa ou saturação



# Resumo: Na região de corte

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

~~$i_C = \beta i_B$~~

$i_E = i_C + i_B$  ✓

~~$V_{BE} = 0,7V$~~

**Região Ativa**

$V_{BE_{corte}} < 0,5V$  (npn)

$i_B = 0; i_C = 0; i_E = 0$

**Região Corte**

