

# CHAPTER 5

## Aula 21:

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

48  
48

## 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 - $\beta$ - 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.
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 $\pi$ -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		

49  
1

## 21ª Aula: Análise/Síntese cc de circuitos com transistores TBJ

Ao final desta aula você deverá estar apto a:

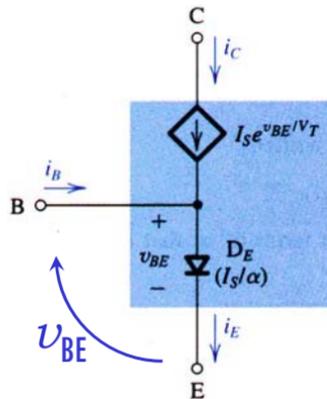
- Analisar (determinação de  $I_S$  e  $V_S$ ) circuitos de polarização para transistores TBJ nas regiões ativa, de saturação e de corte
- Sintetizar (ou projetar, i.e., escolher valores de componentes para obter  $I_S$  e  $V_S$  desejados) circuitos de polarização operando na região ativa

50

## Um modelo para o Transistor NPN na região ativa

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

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

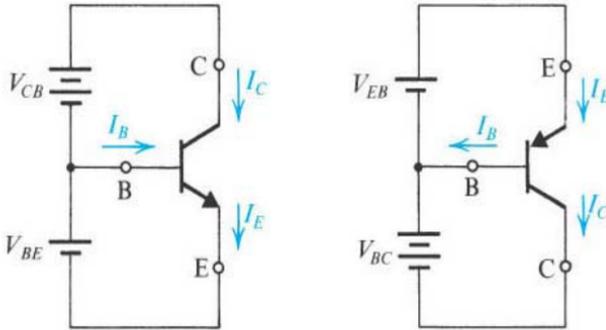


**Modelo (npn) para grandes sinais na região ativa!**

51

2

# Polarizando transistores bipolares na região ativa



52

# Polarizando transistores bipolares na região ativa

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

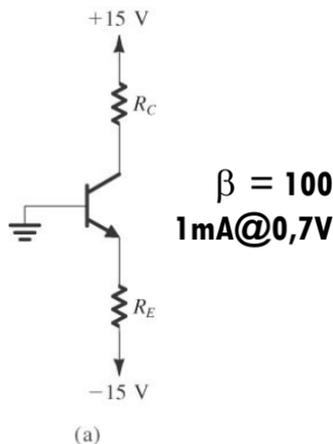
$$I_E = I_C + I_B$$

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

53

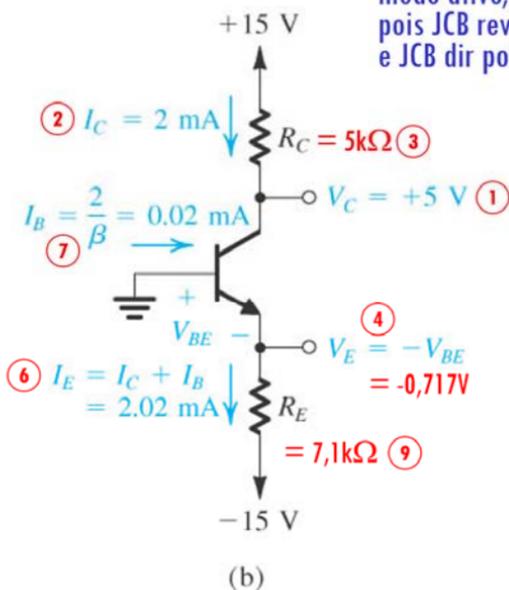
3

**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 .



54

modo ativo,  
pois JCB rev pol  
e JCB dir pol



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

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

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

Assim,

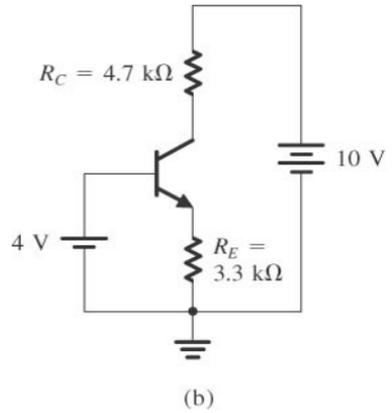
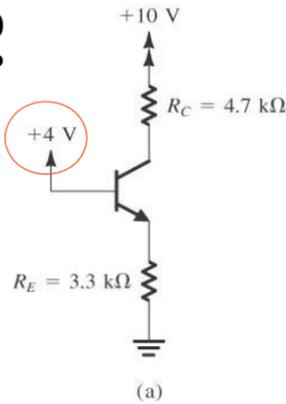
$$V_{BE} @ 2\text{mA} = 0,7 + 0,017 = 0,717\text{V}$$

$$R_E = \frac{V_E - (-15)}{i_E}$$

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

**Exemplo 5.4:** Considere o circuito mostrado na Figura 4.16(a), o qual está redesenhado na Figura 4.16(b) para lembrar ao leitor da convenção empregada no decorrer deste livro para indicar as conexões das fontes  $\alpha$ . Desejamos analisar esse circuito 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 5.4**

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

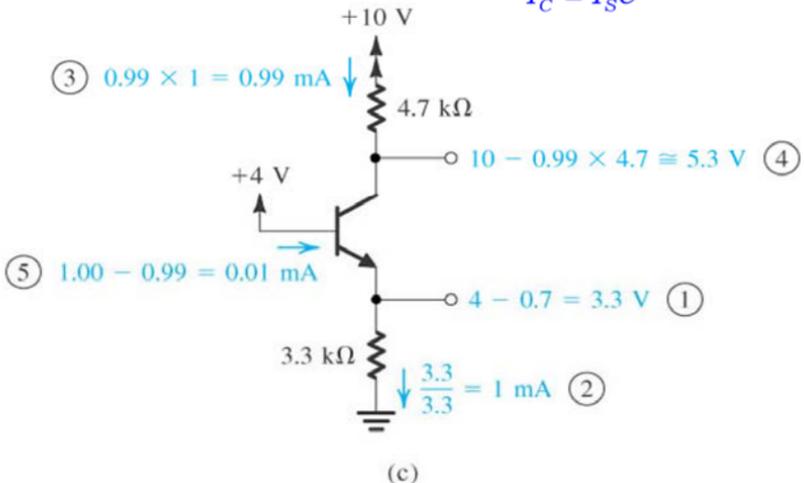
suponho modo ativo,  
 pois JCB rev pol  
 e JCB dir pol

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

$i_E = i_C + i_B$

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

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



# Exemplo 5.5

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

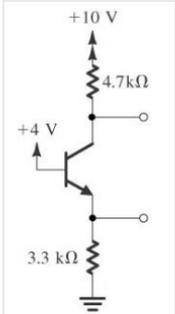
suponho modo ativo,  
pois JCB rev pol  
e JCB dir pol

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

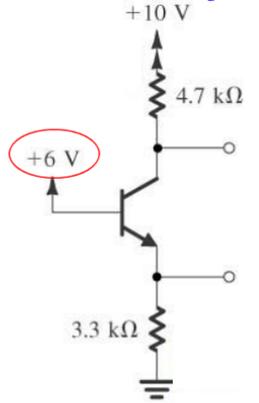
$$i_E = i_C + i_B$$

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

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



Exemplo 5.4



(b)

# Exemplo 5.5

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

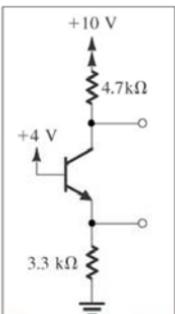
suponho modo ativo,  
pois JCB rev pol  
e JCB dir pol

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

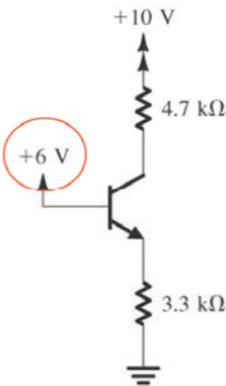
$$i_E = i_C + i_B$$

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

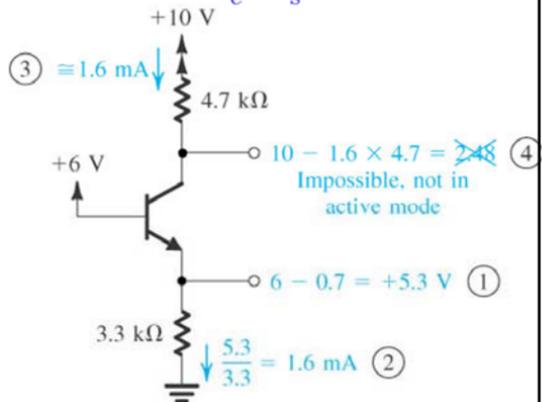
$$I_C = I_S e^{v_{BE}/V_T}$$



Exemplo 5.4



(a)



(b)

# 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!!!**

62

## Na região de saturação

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

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

$$i_E = i_C + i_B \checkmark$$

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

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

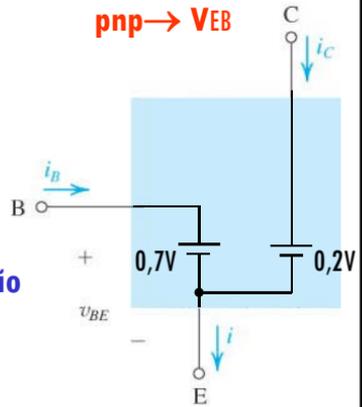
$$\beta_{FORÇADO} = \frac{i_{C_{sat}}}{i_B}$$

Região Ativa

Região Saturação

nnp → VBE

pnnp → VEB



(b)

63

7

# Ativa ou Saturação?

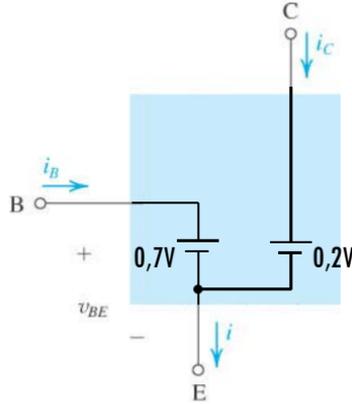
- Assuma inicialmente ativa (se ninguém falar nada)
- Confira se ativa ou saturação
- Se saturação, refaça, considerando as seguintes expressões:

$$i_E = i_C + i_B$$

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

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

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



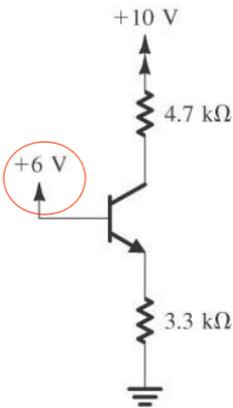
- Sempre confira ao final se ativa ou saturação

64

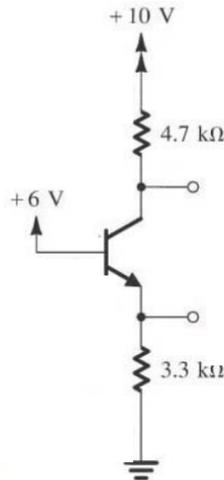
## Exemplo 5.5 Se na região de saturação

$$\beta > 50$$

$$I_s? V_s?$$



(a)



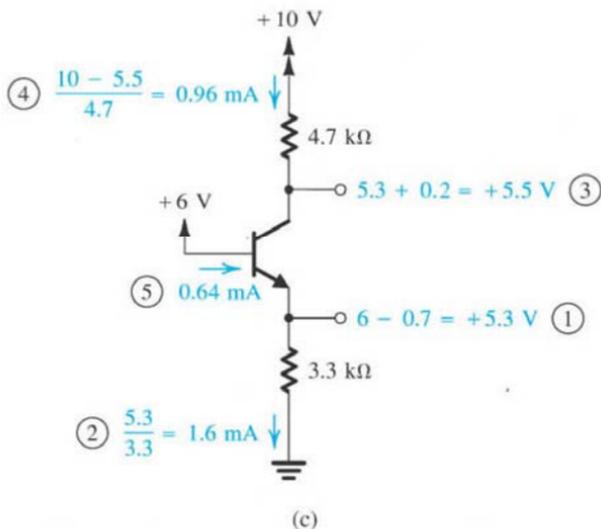
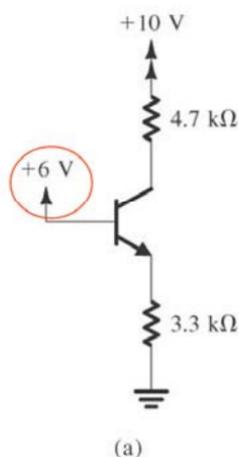
(c)

65

8

## Exemplo 5.5 Se na região de saturação

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



## Ou usando o modelo da região de saturação

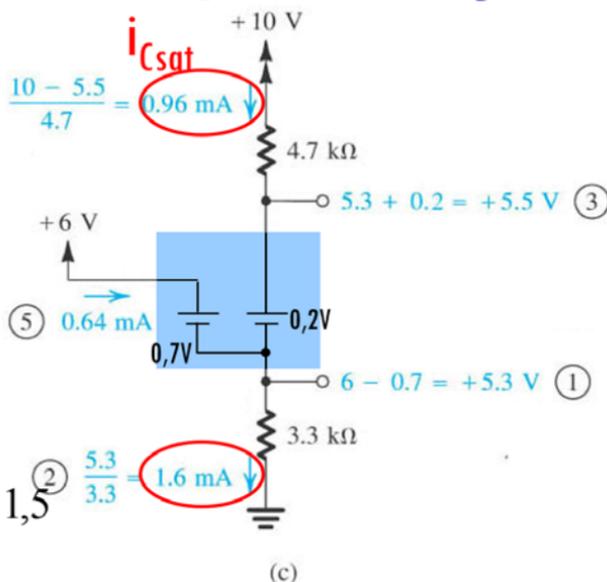
$$i_E = i_C + i_B$$

$$V_{BE} = 0,7V \quad (4) \quad \frac{10 - 5,5}{4,7} = 0,96 \text{ mA}$$

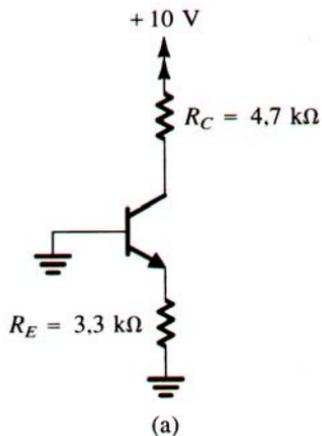
$$V_{CE_{sat}} = 0,2V$$

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

$$\beta_{FORÇADO} = \frac{0,96}{0,64} = 1,5 \quad (2) \quad \frac{5,3}{3,3} = 1,6 \text{ mA}$$



**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

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

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

$$i_E = i_C + i_B \checkmark$$

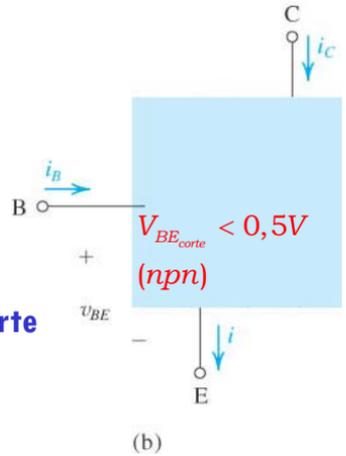
~~$$V_{BE} = 0,7V$$~~

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

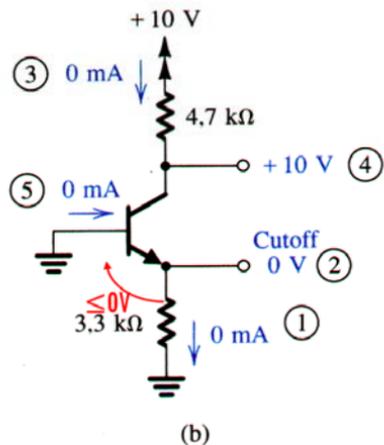
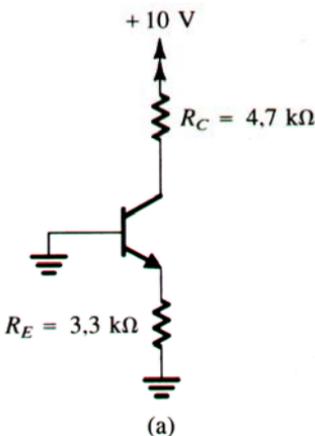
$$i_B = 0; i_C = 0; i_E = 0$$

Região Ativa

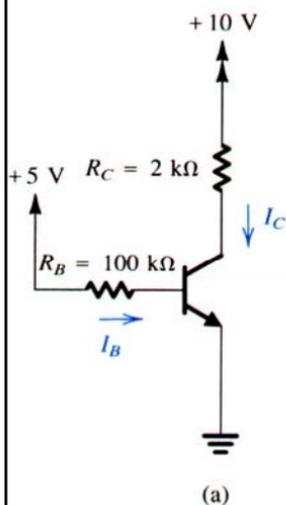
Região Corte



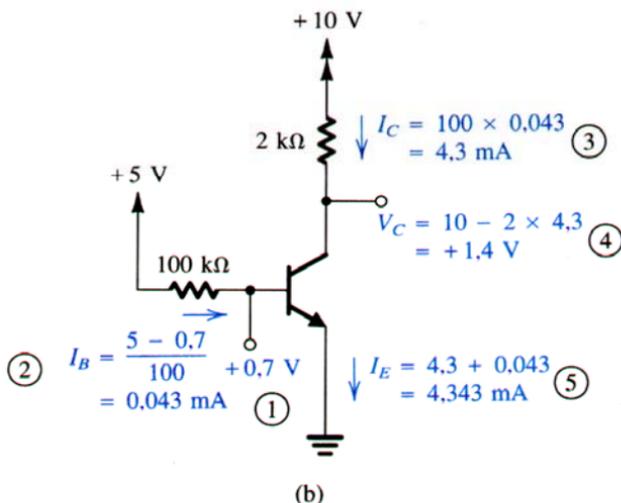
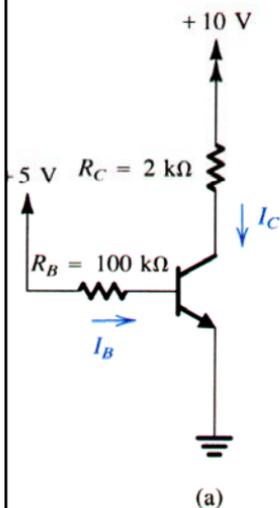
**Exemplo 5.6** Desejamos analisar o circuito abaixo para determinar todas as tensões nodais e todas as correntes nos ramos. Observe que esse circuito é idêntico ao considerado nos Exemplos 5.4 e 5.5, exceto que agora a tensão na base é zero.



**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  $\beta = 100$ .

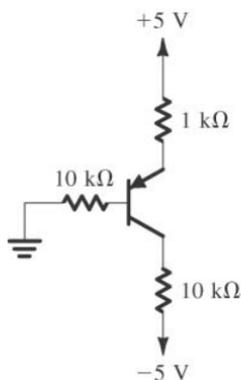


**Exemplo 5.8** Desejamos analisar o circuito da Figura 4.20(a) para determinar todas as tensões nodais e todas as correntes nos ramos. Suponha  $\beta = 100$ .



**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.

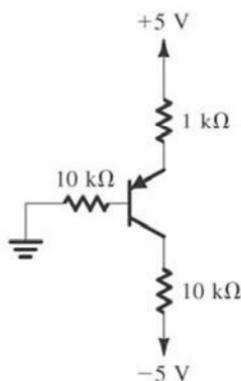
Supor inicialmente reg. ativa. Verifique que  $V_C$  dará um valor absurdo



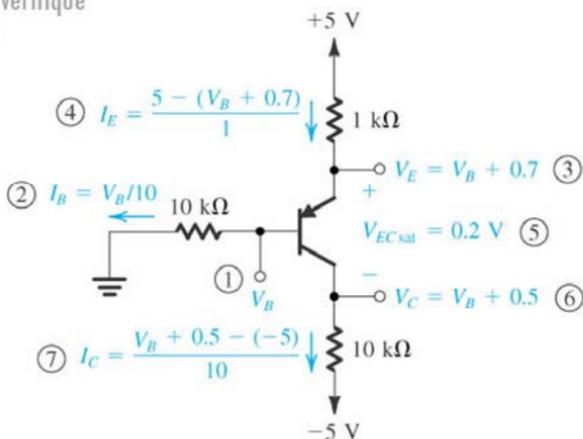
(a)

**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

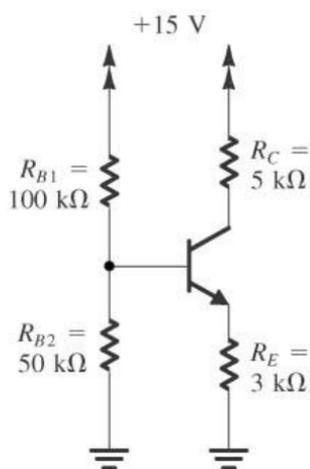


(a)



(b)

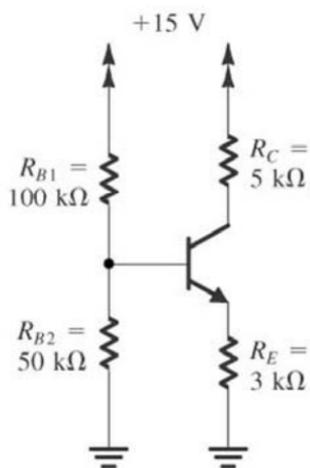
**Exemplo 5.10** Desejamos analisar o circuito abaixo para determinar todas as tensões nodais e todas as correntes nos ramos. Suponha  $\beta = 100$ .



(a)

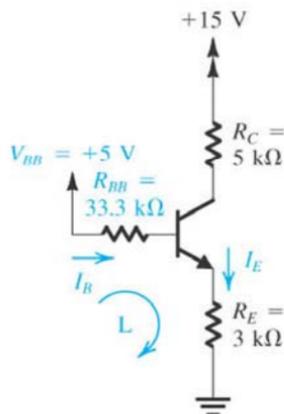
78

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



(a)

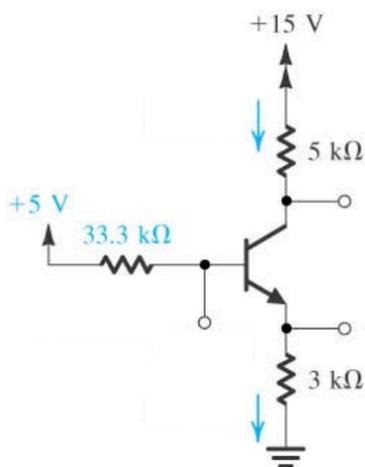
Thévenin



(b)

83

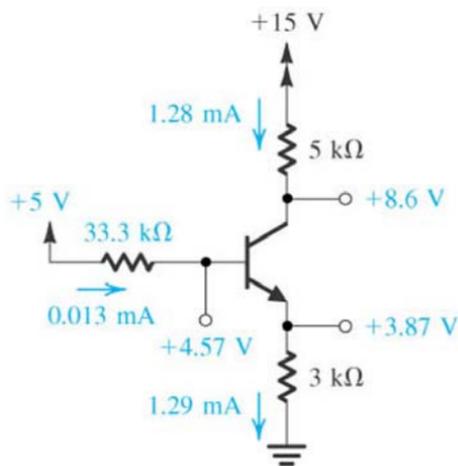
**Exemplo 5.10** Desejamos analisar o circuito abaixo para determinar todas as tensões nodais e todas as correntes nos ramos. Suponha  $\beta = 100$ .



(c)

88

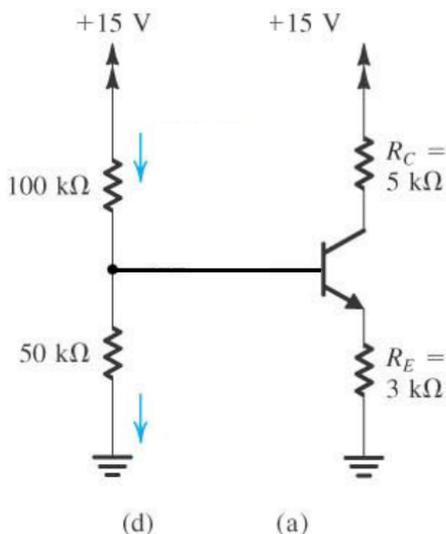
**Exemplo 5.10** Desejamos analisar o circuito abaixo para determinar todas as tensões nodais e todas as correntes nos ramos. Suponha  $\beta = 100$ .



(c)

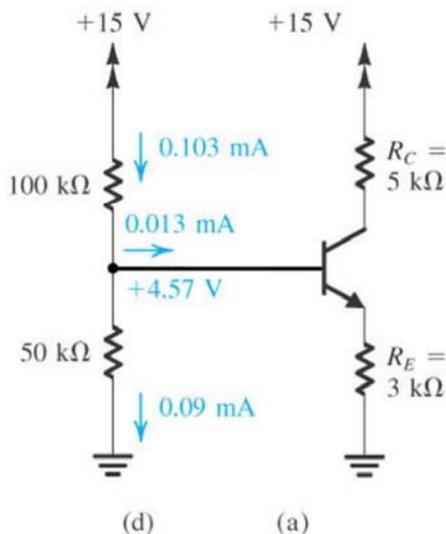
89

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



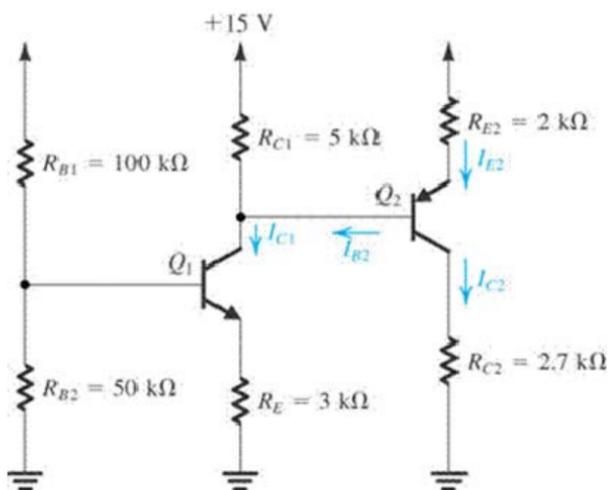
82

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



87

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



84

## Resumo: Polarizando transistores bipolares na região ativa

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$I_E = I_C + I_B$$

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

85

## Resumo: Ativa ou Saturação?

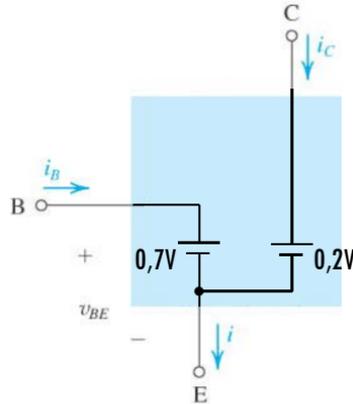
- Assuma inicialmente ativa (se ninguém falar nada)
- Confira se ativa ou saturação
- Se saturação, refaça, considerando as seguintes expressões:

$$i_E = i_C + i_B$$

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

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

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



- Sempre confira ao final se ativa ou saturação

66

## Resumo: Na região de corte

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

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

$$i_E = i_C + i_B \checkmark$$

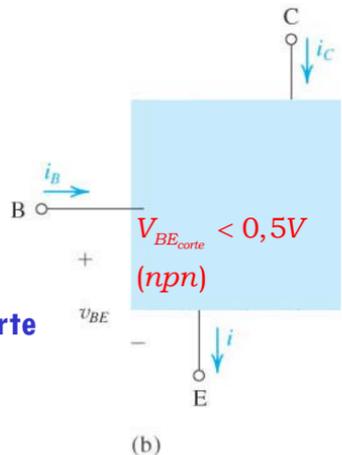
~~$$V_{BE} = 0,7V$$~~

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

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

Região Ativa

Região Corte



(b)

67