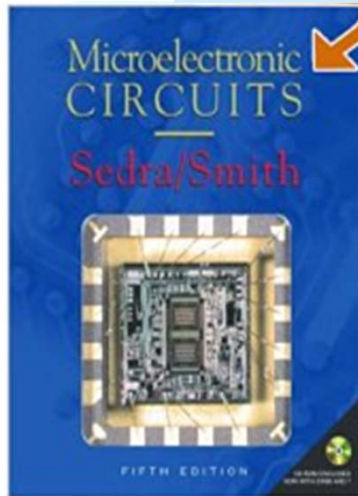


Transistor Bipolar de Junção TBJ



Cap. 4 Sedra/Smith
Cap. 2 Boylestad
Cap. 6 a 8 Malvino

Modelos do TBJ
Polarização – Ponto Q



Notas de Aula SEL 313 Circuitos Eletrônicos 1 Parte 2

1º Sem/2017 Prof. Manoel

(2 aulas)

Modelos do TBJ

(região ativa)

A partir do modo de operação chega-se aos modelos fundamentais (**Base-Comum**)

- em (a) o Coletor se comporta como uma **fonte de corrente controlada pela tensão v_{BE}** .
- em (b) essa fonte é **controlada pela corrente i_E** .
- os terminais B e E são sempre polarizados diretos com uma tensão **$\sim 0,7V$**

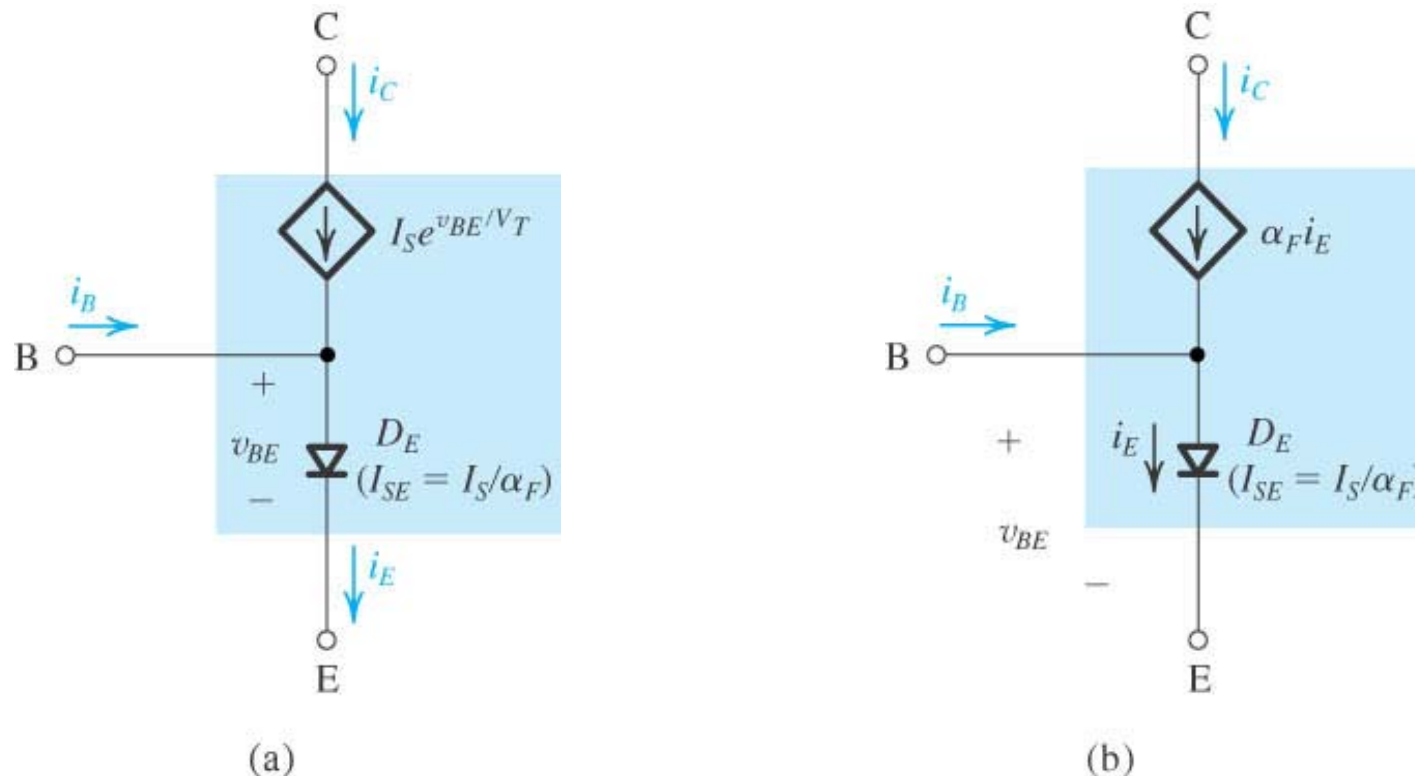


Figura 2.21 Modelo grandes sinais do caso NPN em Base-Comum.

Modelos do TBJ (região ativa)

Para o caso da configuração **Emissor-Comum**:

- em (a) novamente uma fonte de corrente controlada pela tensão v_{BE} .
- em (b) fonte controlada pela corrente i_B .
- $v_{BE} \sim 0,7V$

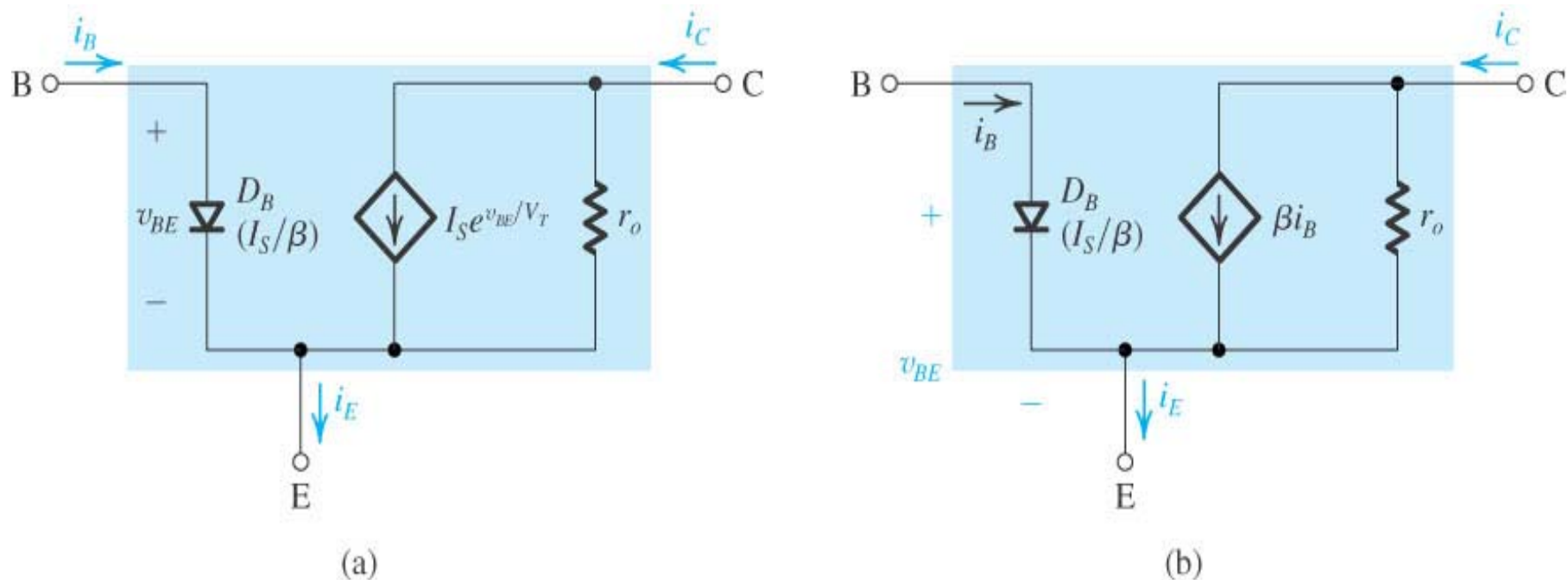


Figura 2.22 Modelo grandes sinais do caso NPN em Emissor-Comum.

Transistor PNP

(dual do NPN)

Corrente predominante → lacunas

Mesmo tipo de operação

Mesmo equacionamento

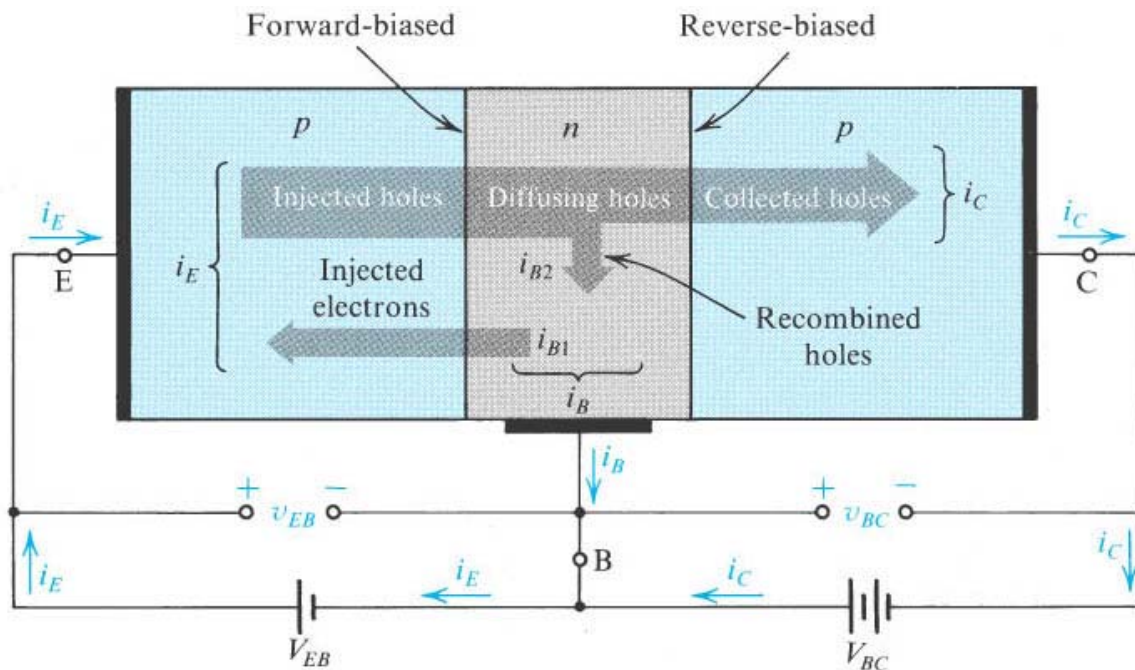


Figura 2.23 Estrutura do TBJ PNP.

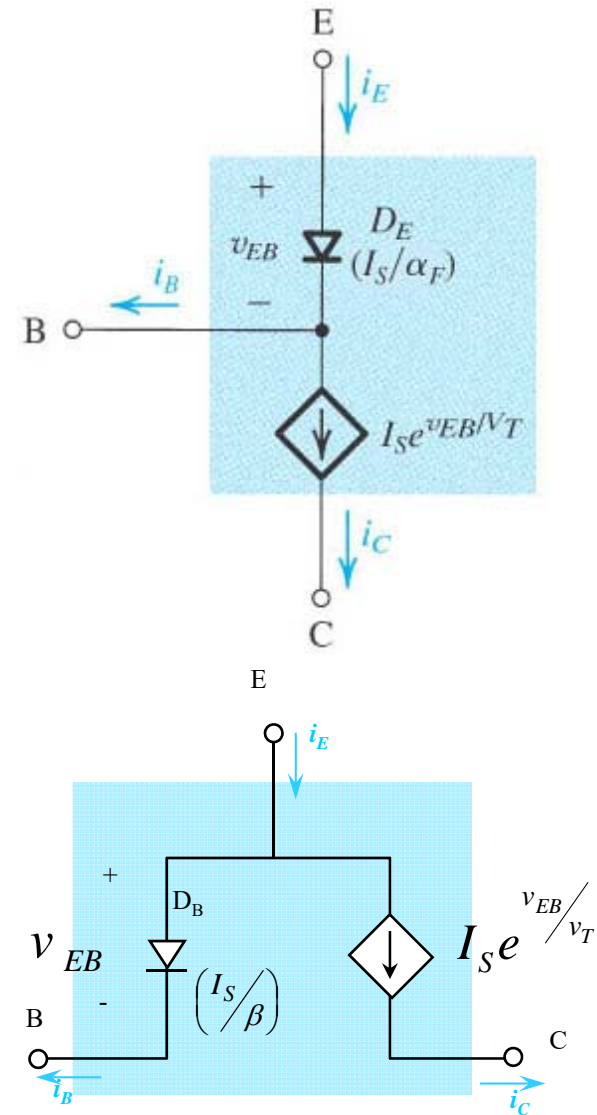


Figura 2.24 Modelos fonte de corrente controladas do TBJ PN PNP em Emissor-Comum.

Simbologia e Convenções

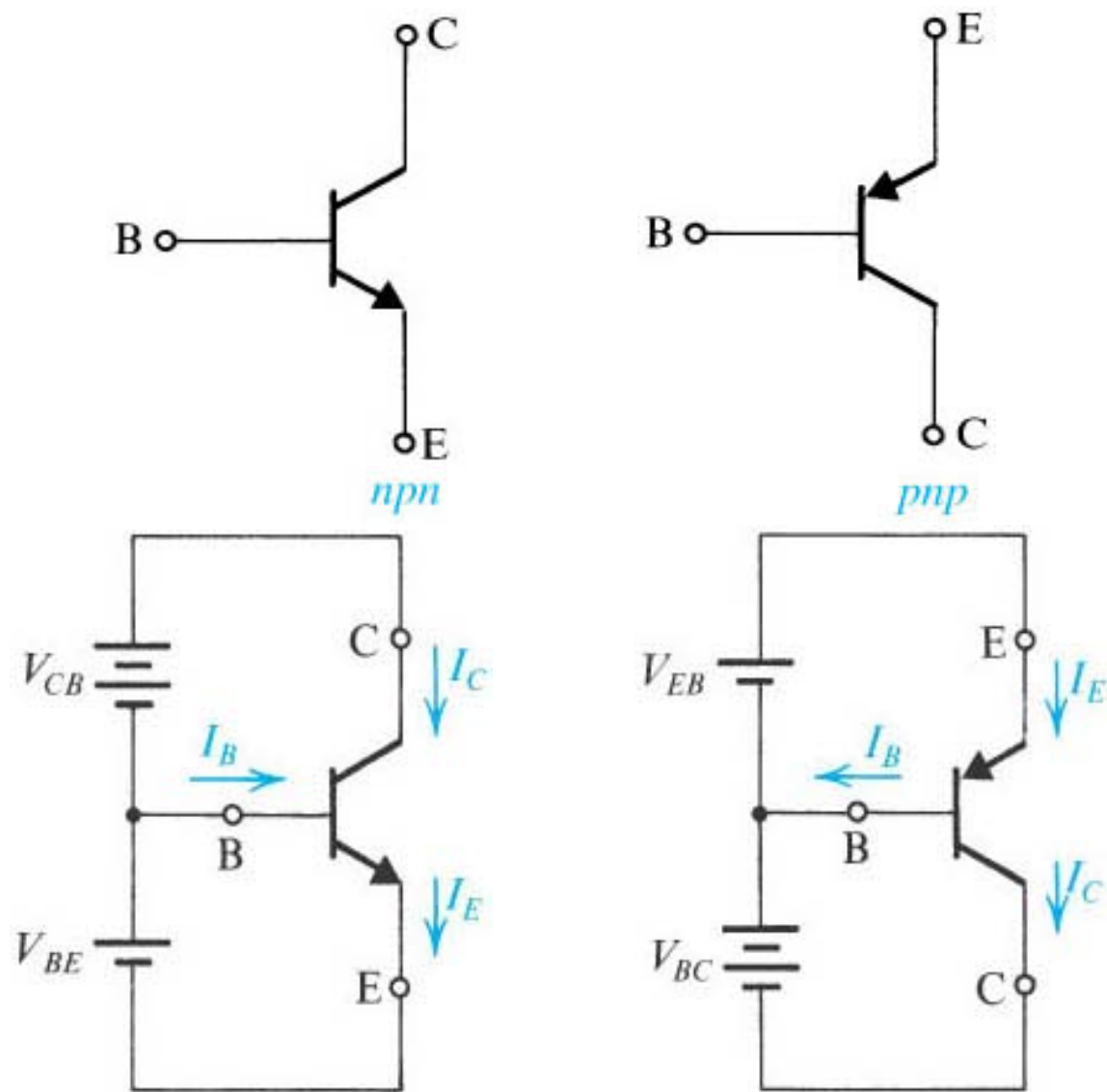


Figura 2.25 Símbolos para os transistores NPN e PNP e convenção de correntes.

Resumo equações dos TBJs

Corrente de coletor

$$i_C = I_S e^{v_{BE}/V_T} \quad (2.6-a)$$

Corrente de base

$$i_B = \frac{i_C}{\beta} = \left(\frac{I_S}{\beta} \right) e^{v_{BE}/V_T} \quad (2.6-e)$$

Corrente de emissor

$$i_E = \frac{i_C}{\alpha} = \left(\frac{I_S}{\alpha} \right) e^{v_{BE}/V_T} \quad (2.6-b)$$

Corrente de coletor

$$i_C = \alpha i_E = \beta i_B \quad (2.6-f)$$

Corrente de emissor

$$i_E = (\beta + 1) i_B \quad (2.6-c)$$

Corrente de base

$$i_B = (1 - \alpha) i_E = \frac{i_E}{\beta + 1} \quad (2.6-g)$$

Ganho corrente CC
Emissor-comum

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \quad (2.6-d)$$

Ganho corrente CC
base-comum

$$\alpha = \frac{\beta}{\beta + 1} \quad (2.6-h)$$

Área de operação típica

Limites de Tensão, Corrente e Potência

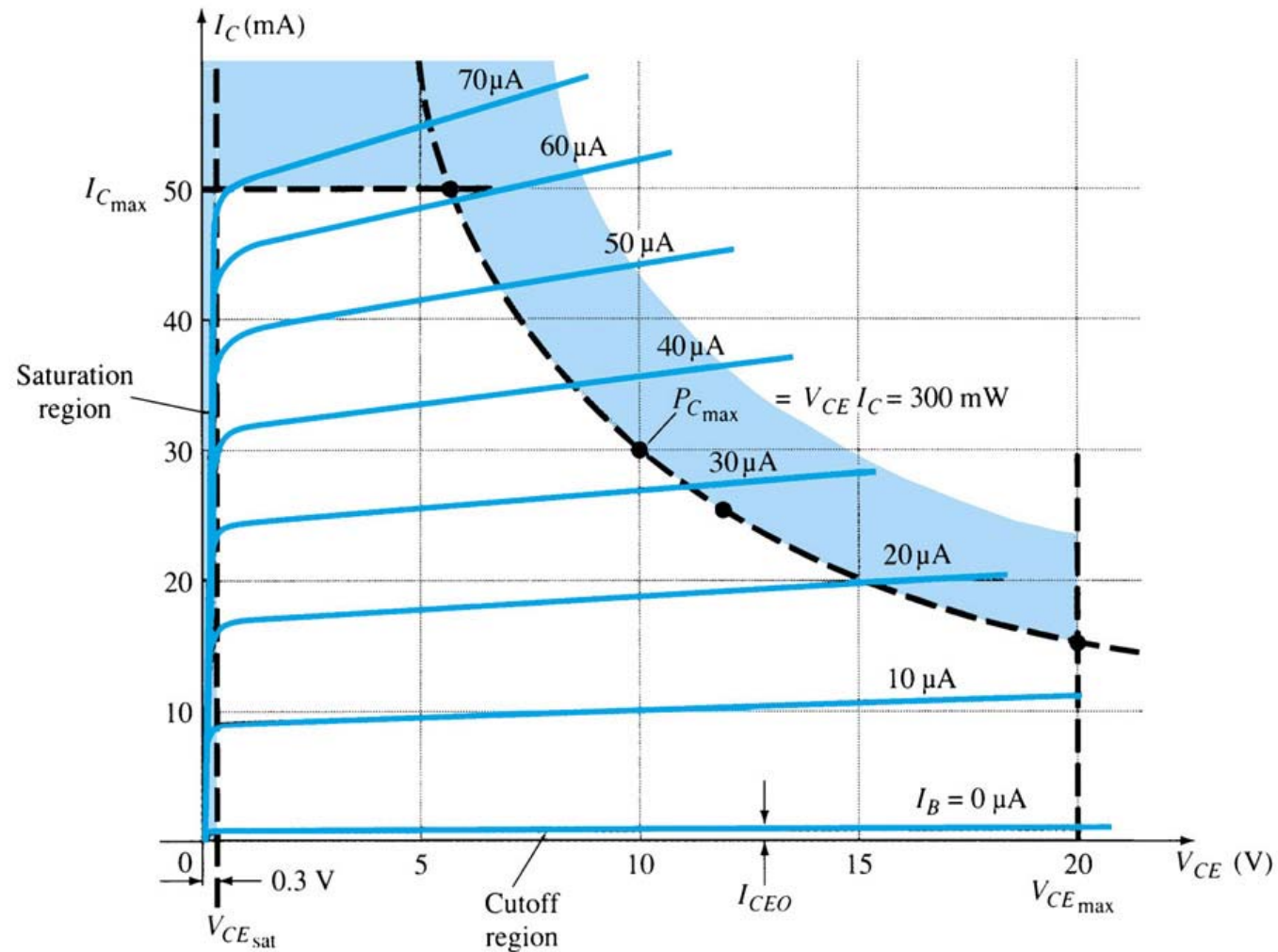
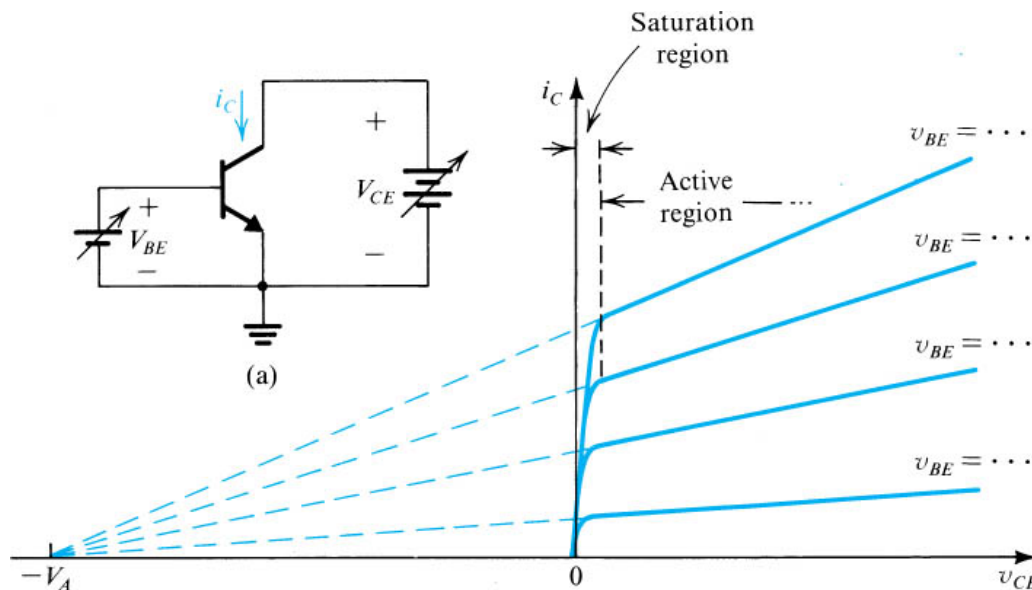


Figura 2.26 Área de operação segura na região Ativa – SOA *Safety Operating Area*

Efeito Early

Relaciona dependência de i_C com v_{CB} :

→ Aumento de v_{CB} aumenta depleção em JBC e diminui largura efetiva da base e isto aumenta I_S , conseqüentemente i_C .



$$i_C = I_S e^{v_{BE}/V_T} \left(1 + \frac{v_{CE}}{V_A} \right) \quad (2.7)$$

Figura 2.27 Característica de saída NPN revelando dependência de v_{CB}

Inclinação das curvas determina uma resistência de saída : $r_0 \rightarrow$

$$r_0 = \left. \frac{\partial v_{CE}}{\partial i_C} \right|_{v_{BE}=Cte.} = \frac{V_A}{I_C} \quad (2.8)$$

Polarização do TBJ – Ponto de Operação CC

Neste caso, considera-se apenas as fontes de tensão e de corrente CC do circuito de **POLARIZAÇÃO**.

Polarização do TBJ : Ajustes das tensões e correntes para um ponto de operação : Por exemplo → **Região Ativa**

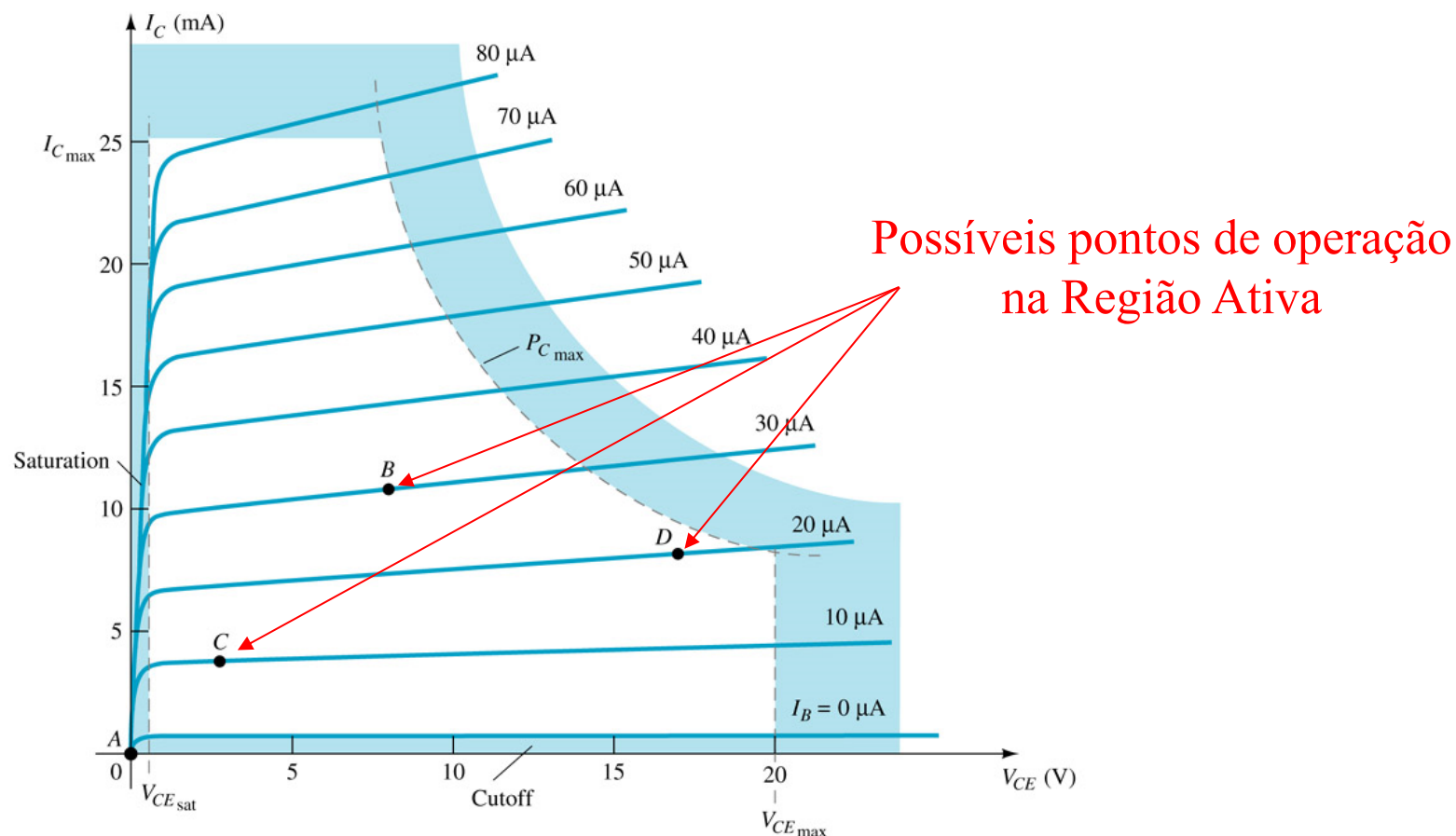


Figura 2.28 - Pontos de Operação na Região Ativa.

Circuitos com TBJ

Análise CC do ponto de operação (real)

→ Ajuste dos resistores externos para garantir as tensões e correntes desejadas.

→ Para a região ativa a junção J_{BE} é sempre direta com $\sim 0,7V$ e a junção J_{CB} deve ser sempre reversa.

EXEMPLO 2.1 – Deseja-se $I_C = 2mA$ e $V_C = 5V$,
sendo que $\beta = 100$ e $V_{BE} = 0.7V$
se $I_C = 1mA$.

→ Obter R_C e R_E para o ponto de de operação desejado.

Solução : → Assumir Região Ativa :

(i) $V_{BE} = 0.7V$ e

(ii) J_{CB} reversa

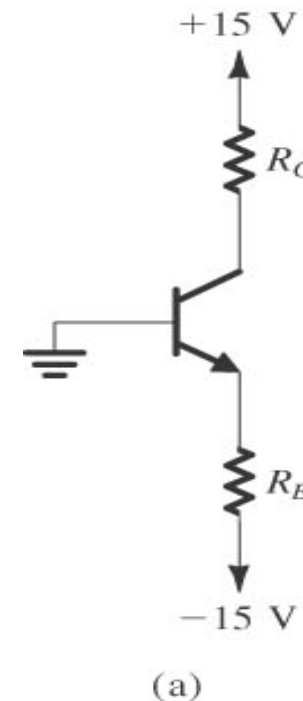


Figura 2.29 (a) - Exemplo 2.1

Exemplo 2.1

P/ $V_C = 5V \rightarrow V_{RC} = 10V$, ou seja:

$$V_{RC} = V_{cc}^+ - V_C = 15 - 5 = 10V$$

ou, com $I_C = 2mA$, tem-se :

$$R_C = \frac{V_{RC}}{I_C} = 5K\Omega$$

Se $I_C = 2mA$ e $\beta = 100$, então :

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{2m}{100} = 20\mu A$$

$$I_E = I_C + I_B = 2,02mA$$

Por outro lado, $V_E = -V_{BE} = -0.7V$! Assim :

$$R_E = \frac{V_{RE}}{I_E} = \frac{V_E - V_{cc}^-}{I_E} = 7,079K\Omega$$

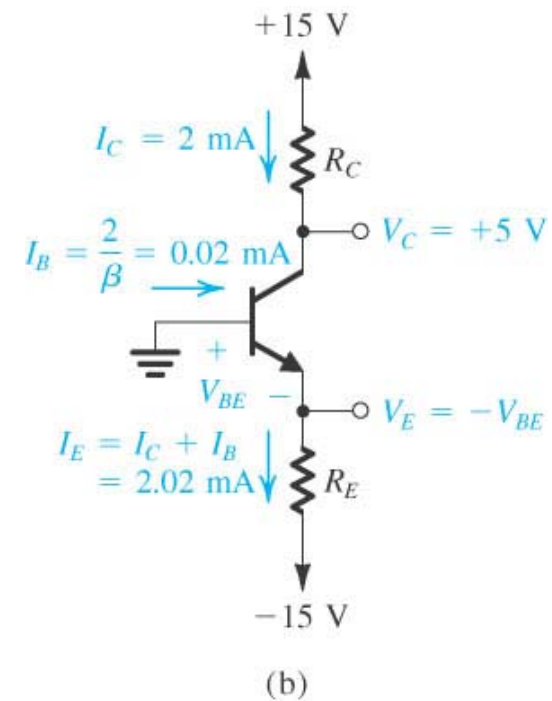


Figura 2.29 (b) - Solução Exemplo 2.1

Exemplo 2.1

Para ser mais exato, pode-se obter o valor real de V_{BE} quando $I_C = 2\text{mA}$!!!

$$1\text{mA} = I_S e^{\left(\frac{0,7}{0,025}\right)}$$

$$I_S = 6,9144 \cdot 10^{-16} \text{ A}$$

e assim , com $I_C = 2\text{mA}$,

$$2\text{mA} = 6,9144 \cdot 10^{-16} e^{\left(\frac{V_{BE}}{0,025}\right)}$$

$$V_{BE} = 0,7173\text{V}$$

O novo valor de R_E resulta então:

$$R_E = \frac{V_E - V_{cc}^-}{I_E} = \frac{-0.7173 - (-15)}{2,02\text{mA}} = 7,071 \text{ K}\Omega$$

Aqui a **JCB** está claramente **reversa** por **5 V** e o TBJ se encontra na **Região Ativa**. Se os cálculos determinasse uma **JCB direta**, há que se ignorar tudo e refazer como se o TBJ estivesse na **SATURAÇÃO**.

Exercício 2.1

Obter as tensões e correntes nodais, sendo $\beta = 50$ e $V_E = -0.7V$

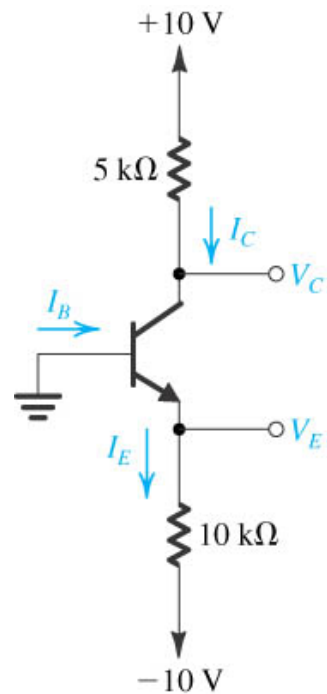


Figura 2.30 (a) - Exercício 2.1 (a)

Se $V_B = 1,0V$ e $V_E = 1,7V$ obter α , β e V_C

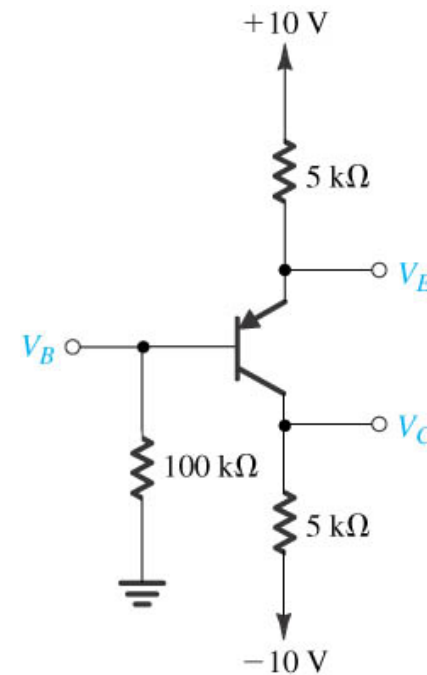


Figura 2.30 (b) - Exercício 2.1 (b)

Exemplo 2.2

Obter as tensões e correntes nodais, sendo $\beta = 100$

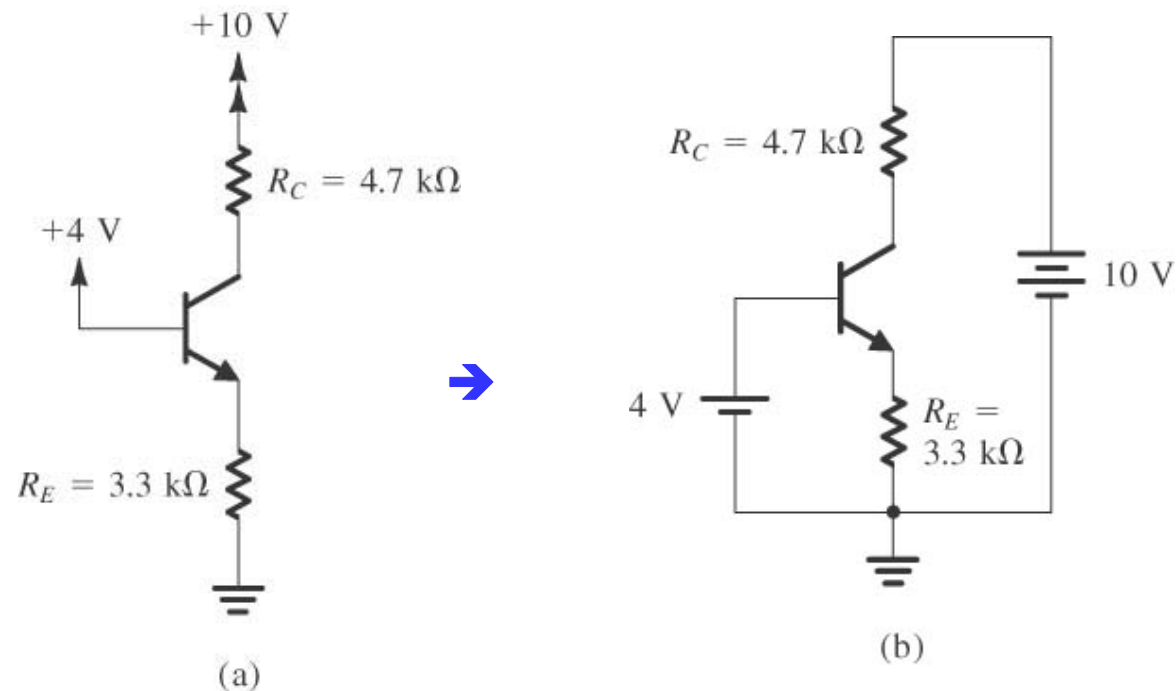


Figura 2.31 - Exemplo 2.2.

Solução : → Assumindo Região Ativa :

(i) $V_{BE} = 0.7V$ e

(ii) JCB deve ser reversa

Duas malhas de circuito :

$$\begin{cases} 4V = V_{BE} + R_E I_E \\ 10V = R_C I_C + V_{CE} + R_E I_E \end{cases} \quad (V_{CE} \text{ ???})$$

Exemplo 2.2 Cont.

Da 1a. Malha de circuito:

$$I_E = \frac{4V - V_{BE}}{R_E} = \frac{V_E}{R_E} = \frac{3,3V}{3,3K} = 1,0 \text{ mA}$$

$$I_C = \alpha I_E = \frac{\beta}{\beta + 1} I_E = \frac{100}{100 + 1} 1\text{mA} = 0,99\text{mA}$$

No coletor, V_C vale:

$$V_C = 10V - R_C I_C = 10 - 4,7K \cdot 0,99\text{mA} = 5,3V$$

Verificação Região Ativa (?) :

$$V_C = 5,3V \quad V_B = 4V \quad \therefore$$

$$V_{BC} = -1,3V$$

REVERSA !!
Reg.Ativa OK

Corrente de Base :

$$I_B = \frac{I_E}{\beta + 1} = \frac{I_C}{\beta} = I_E - I_C = 0,01\text{mA}$$

Exemplo 2.2 Cont.

Solução Final :

$$V_B = 4 \text{ V}$$

$$V_C = 5,3 \text{ V}$$

$$V_E = 3,3 \text{ V}$$

$$I_B = 10 \text{ } \mu\text{A}$$

$$I_C = 0.99 \text{ mA}$$

$$I_E = 1 \text{ mA}$$

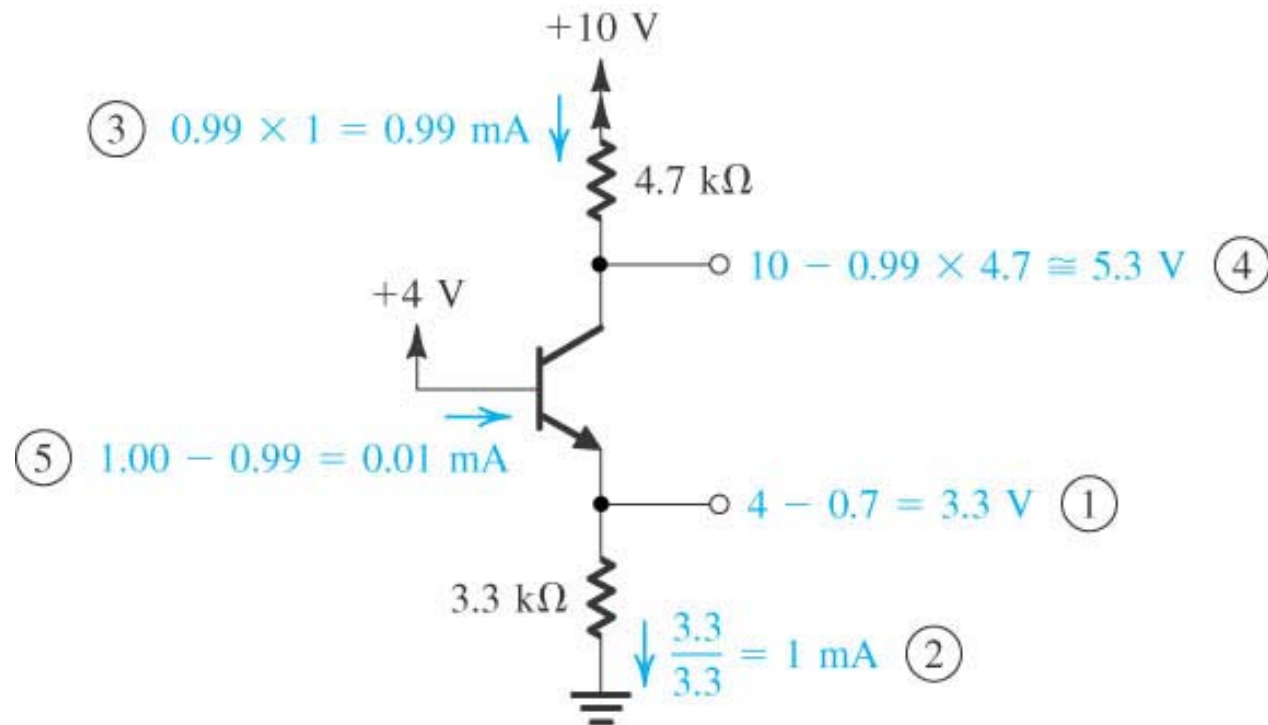
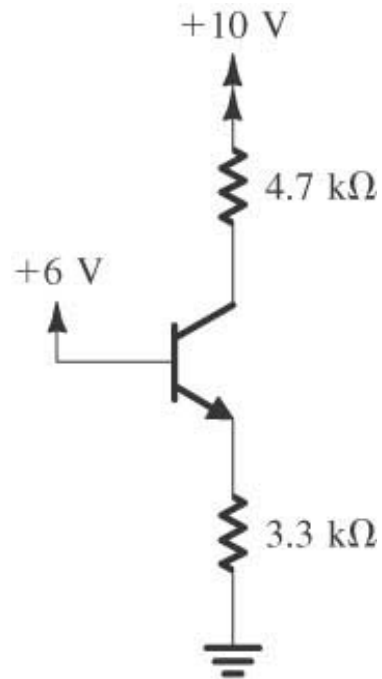


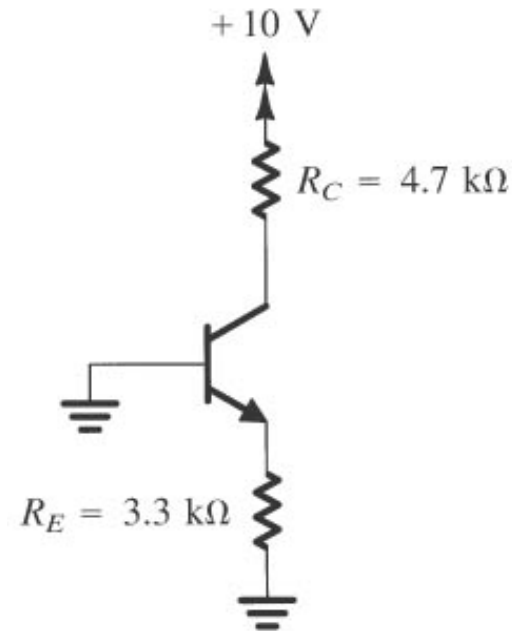
Figura 2.32 - Exemplo 2.2 solução final.

Exercício 2.2

Mostre que no caso (a) o TBJ está Saturado e
no caso (b) o TBJ se encontra em Corte. ($\beta = 100$)



(a)



(b)

Figura 2.33 - Exercício 2.2

Exemplo 2.3

Encontrar as tensões e correntes nodais a seguir, sendo $\beta = 100$.

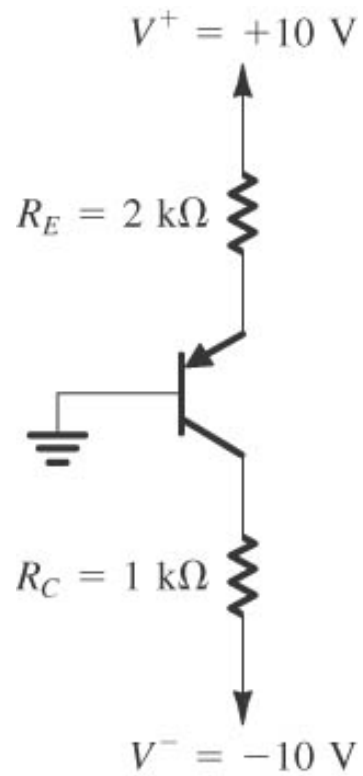
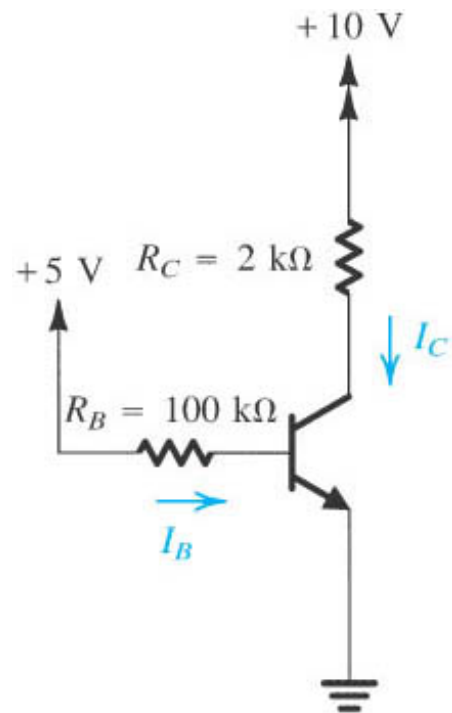


Figura 2.34 - Exemplo 2.3

Solução

Exemplo 2.4

Encontrar as tensões e correntes nodais a seguir, sendo $\beta = 100$.



Solução

Figura 2.35 - Exemplo 2.4

Dependência do ganho β

As topologias de polarização dos exemplos 2 a 4 são bastante afetadas com o valor de β .

Se o ganho dos transistores mudar em +100%, os resultados seriam:

		V_C (V)	I_C (mA)	I_B (μ A)
Exemplo 2	$\beta = 100$	5,35	0,99	10
	$2\beta = 200$	5,32	0,995	4,975
	% 100	0,50	0,43	50
Exemplo 3	$\beta = 100$	-5,4	4,6	46
	$2\beta = 200$	-5,37	4,63	23,1
	% 100	0,497	0.497	49,7
Exemplo 4	$\beta = 100$	1,4	4,3	43
	$2\beta = 200$	(-7,2)	8,6	43
	% 100	(??)	100	0 ← Saturado !!!

Dependência do ganho β

Os exemplos 2 e 3 (**com DUPLA APLIMENTAÇÃO**) promovem pequenas alterações em I_C e V_C e grande alteração em I_B .

O exemplo 4 (**ALIMENTAÇÃO SIMPLES e sem R_E**) promovem grandes alterações em V_C e I_C não afetando I_B . Num caso de $R_E \neq 0$, I_B também se altera, porém diminui a influência de β .

O valor de β de muitos fabricantes pode variar em amplas faixas para um mesmo tipo de TBJ (**tipicamente entre 100 e 300**).

Para evitar ou minimizar o a influência de β com **Alimentação Simples**, a topologia de **Polarização Automática** é uma opção.

Esta configuração é vista nos exemplos 5 e 6 a seguir.

Exemplo 2.5

Obter as tensões e correntes nodais para $\beta = 100$.

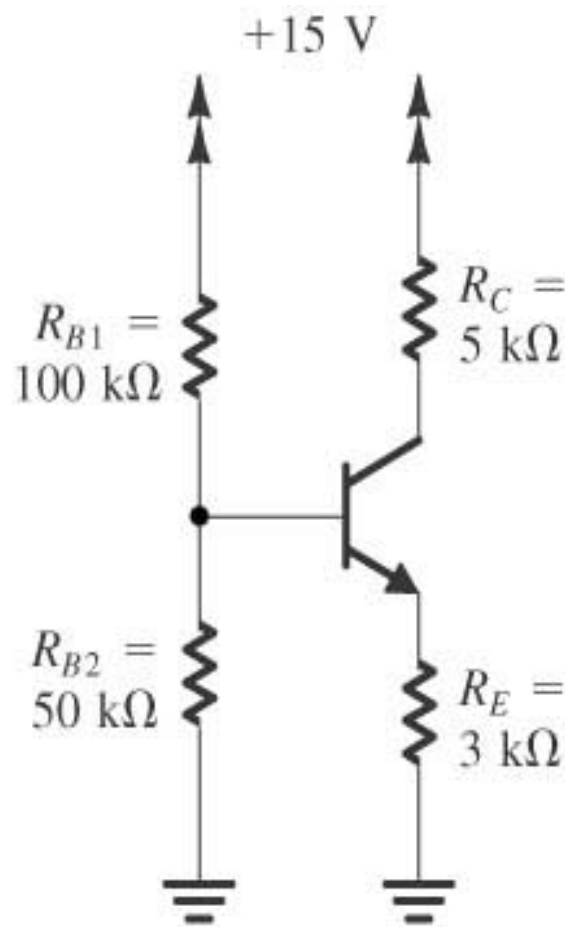


Figura 2.36 (a) -
Exemplo 2.5

Neste tipo de circuito, inicialmente procede-se uma simplificação de circuito através da substituição do trecho (V_{CC} , R_{B1} , R_{B2} e Terra) por um Equivalente de Thévenin resultando numa fonte

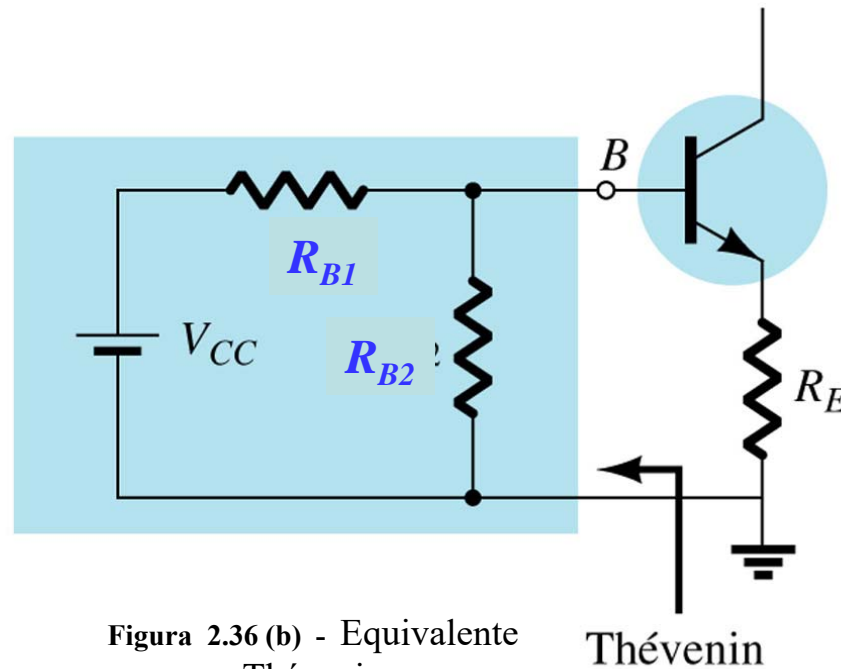


Figura 2.36 (b) - Equivalente
Thévenin

Exemplo 2.5 Cont.

Obtenção do Thévenin equivalente de base.

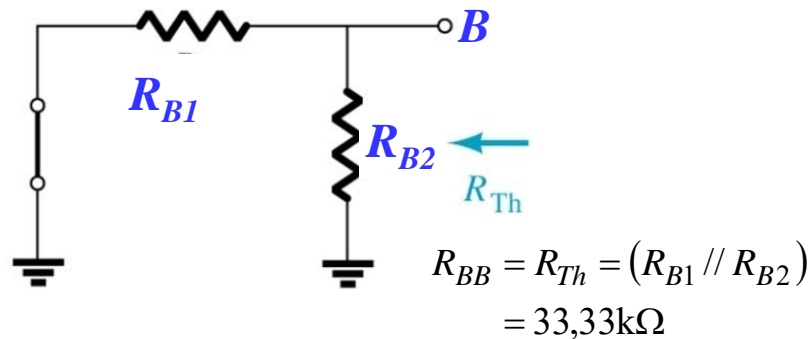


Figura 2.37 (a) - Obtenção de R_{Th}

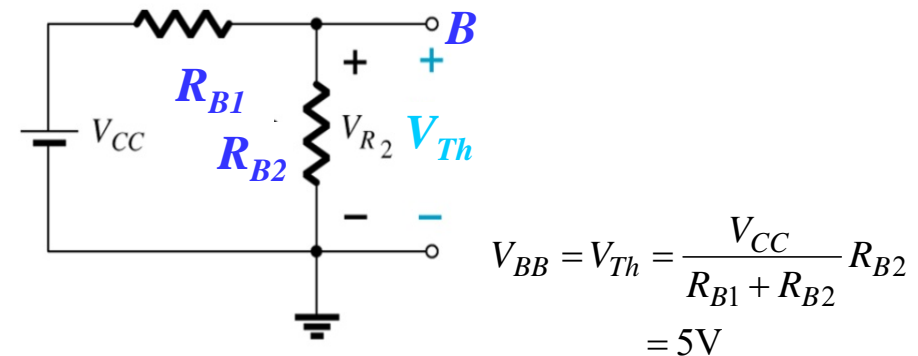
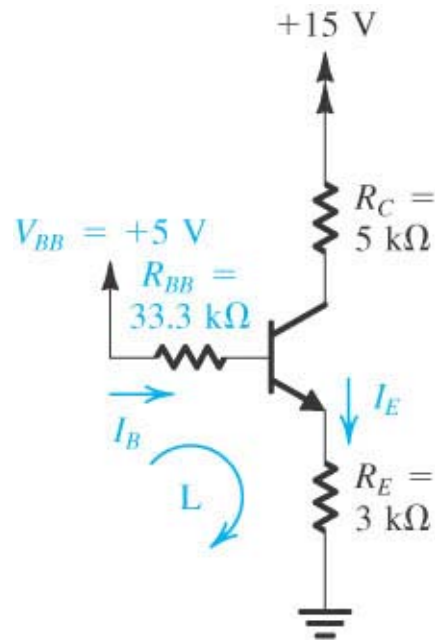


Figura 2.37 (a) - Obtenção de V_{Th}



Solução do circuito :

$$V_{BB} = R_{BB} I_B + V_{BE} + R_E I_E$$

$$= R_{BB} \frac{I_E}{\beta + 1} + V_{BE} + R_E I_E$$



$$I_E = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_E + \frac{R_{BB}}{\beta + 1}}$$

$$= 1,291\text{ mA}$$

$$V_B = V_{BE} + R_E I_E = 4,57\text{ V}$$

$$V_C = V_{CC} - R_C I_C$$

$$I_B = \frac{I_E}{(\beta + 1)} = 12,78\text{ }\mu\text{A}$$

$$I_C = \beta I_B = 1.278\text{ mA}$$

Figura 2.38 - Exemplo 2.5 simplificado.

Exemplo 2.5 Cont.

Finalizando : (como o coletor está mais positivo que a Base
→ Região Ativa OK)

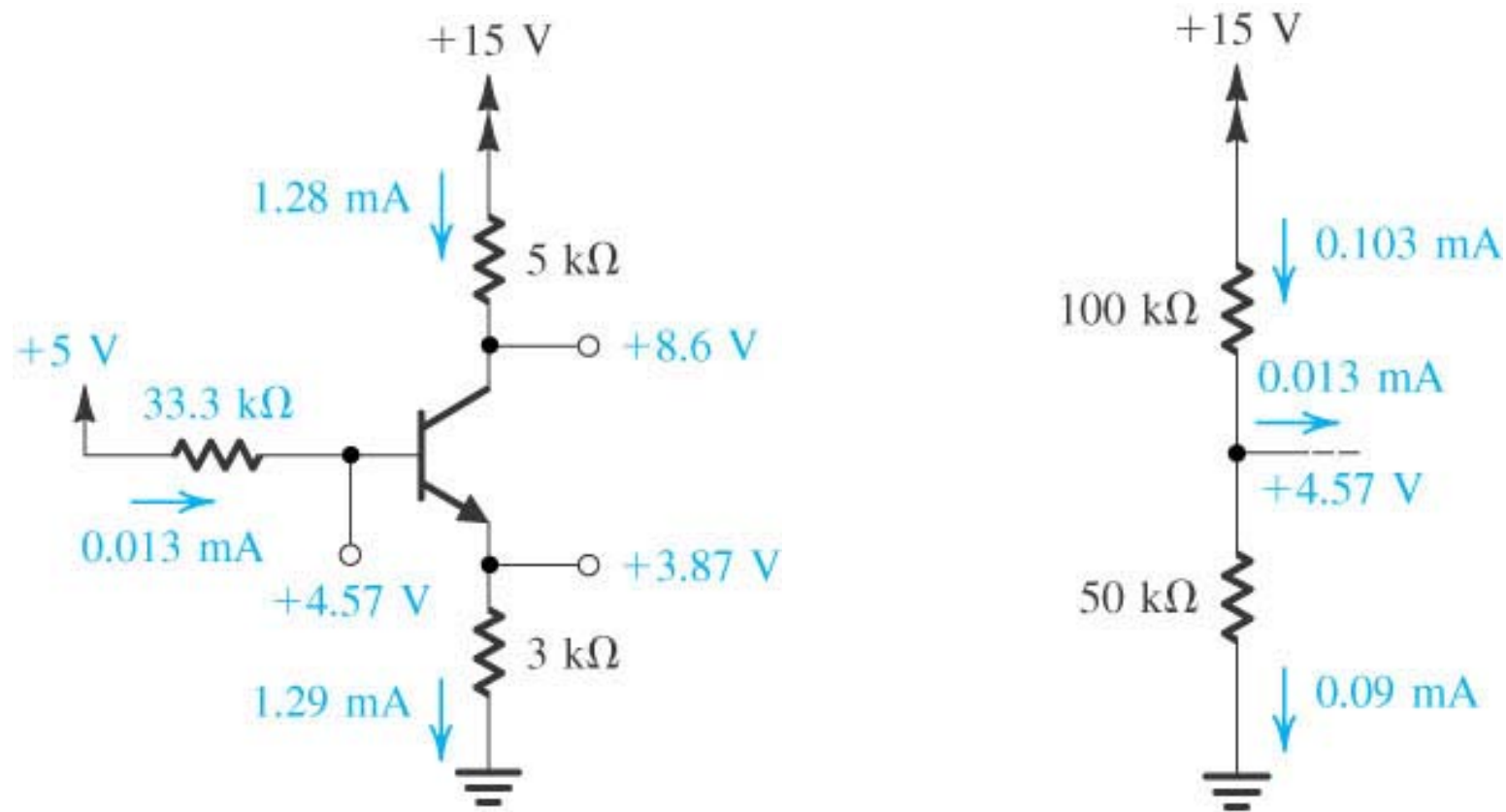
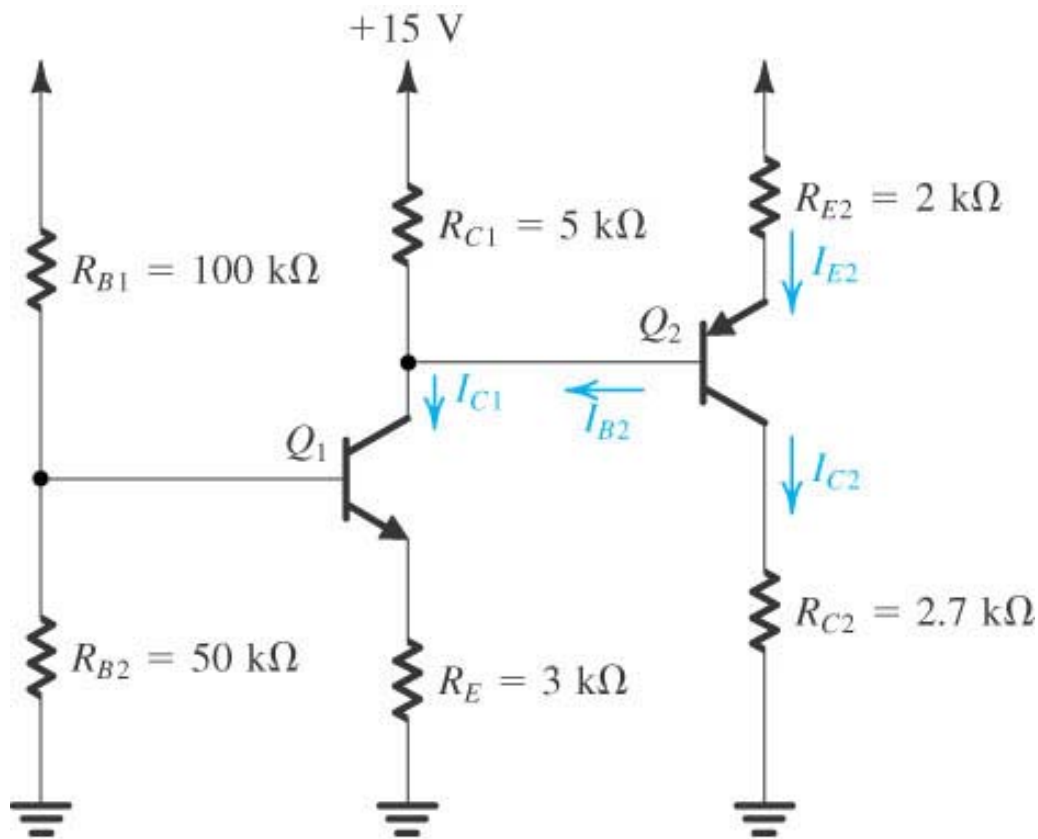


Figura 2.39 - Solução final do exemplo 2.5.

Exemplo 2.6

Obter tensões e correntes nodais. Ambos TBJ com $\beta = 100$.



O primeiro estágio (de Q_1) é o mesmo do exemplo 5 e já foi calculado.

Este é um exemplo de circuitos **acoplados diretos** que podem alterar seus próprios pontos de operação assim que se conectam. Cada caso deve ser analisado de forma individual.

Figura 2.40 - Exemplo 2.6

Exemplo 2.6 Cont.

No caso em questão pode se assumir que I_{B2} é tão pequena em relação a I_{C1} tal que o primeiro estágio não é afetado, ou seja, $I_{C1} = 1,277 \text{ mA}$ e $V_{C1} = 8,61 \text{ V}$. Desta forma vale então:

$$V_{C1} = V_{B2}$$

$$\begin{aligned} V_{E2} &= V_{C1} + V_{EB2} \\ &= 8,6 + 0,7 = 9,3 \text{ V} \end{aligned}$$

$$I_{E2} = \frac{15 - V_{E2}}{R_{E2}} = 2,85 \text{ mA}$$

$$I_{C2} = \alpha I_{E2} = \frac{\beta}{\beta + 1} I_{E2} = 2,82 \text{ mA}$$

$$V_{C2} = R_{C2} I_{C2} = 7,62 \text{ V}$$

Desde que a base está mais positiva que o coletor, Q_2 também está em modo ativo e vale então:

$$I_{B2} = \frac{I_{E2}}{\beta + 1} = 28,5 \text{ } \mu\text{A}$$

e, realmente,

$$I_{B2} = 28 \text{ } \mu\text{A} \lll I_{C1} = 1.28 \text{ mA}$$

Exemplo 2.6 Cont.

Pode-se agora refinar os cálculos, estabelecendo então que :

$$I_{RC1} = I_{C1} - I_{B2} = 1.28 \text{ mA} - 28,5 \text{ } \mu\text{A} = 1.252 \text{ mA}$$

Portanto, o novo valor de $V_{C1} = V_{B2}$ será :

$$V_{B2} = V_{C1} = V_{CC} - R_{C1} I_{RC1} = 8,74 \text{ V}$$

Refazendo-se todos os cálculos, chega-se a :

$$V_{E2} = 9,44 \text{ V}$$

$$I_{E2} = 2,78 \text{ mA}$$

$$I_{C2} = 2,75 \text{ mA}$$

$$V_{E2} = 7,43 \text{ V}$$

$$I_{B2} = 27,5 \text{ } \mu\text{A}$$

Repetir ?!



Exercício 2.3

- (A) - Para o circuito da figura 2.31, avalie o maior valor da tensão de base V_B para que o TBJ permaneça na região ativa.
- (B) – Recalcule o circuito da figura 2.31 para se obter $I_C = 0.5 \text{ mA}$ e a junção JCB reversa em 2V.
- (C) – Avalie o maior valor possível de R_C no circuito da figura 2.34 para que o TBJ permaneça na região ativa.
- (D) – Recalcule o circuito da figura 2.34 para que se obtenha $I_C = 1 \text{ mA}$ e a junção coletor-base reversa em 4V.
- (E) - O circuito da figura 2.35 deve usar um transistor cujo β varia entre 50 e 150. Qual deve ser o valor de R_C para que se garanta a operação na região ativa. Neste caso qual a possível variação de V_C .

Exercício 2.4

- (A) – Se no circuito da figura 2.36 for usado um TBJ com $\beta=50$, qual será o novo valor de I_C e sua variação percentual.
- (B) – No circuito da figura 2.40 calcule a corrente total drenada da fonte e qual a potência total dissipada no circuito.
- (C) – Ainda com relação ao circuito da figura 3.40, deve-se agregar o estágio a seguir tal que a base de Q_3 seja conectada no coletor de Q_2 . O transistor Q_3 tem $\beta=100$. Deseja-se os valores de V_{C2} (reavaliado) , de V_{E3} e de I_{C3} .

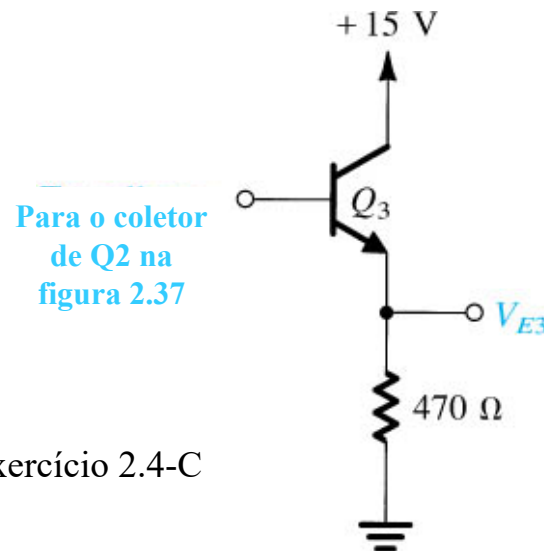


Figura 2.41 - Exercício 2.4-C

Exercício 2.5

Resolver os casos a seguir, obtendo todas tensões e correntes nodais. (fonte : Boylestad) (ignore os capacitores)

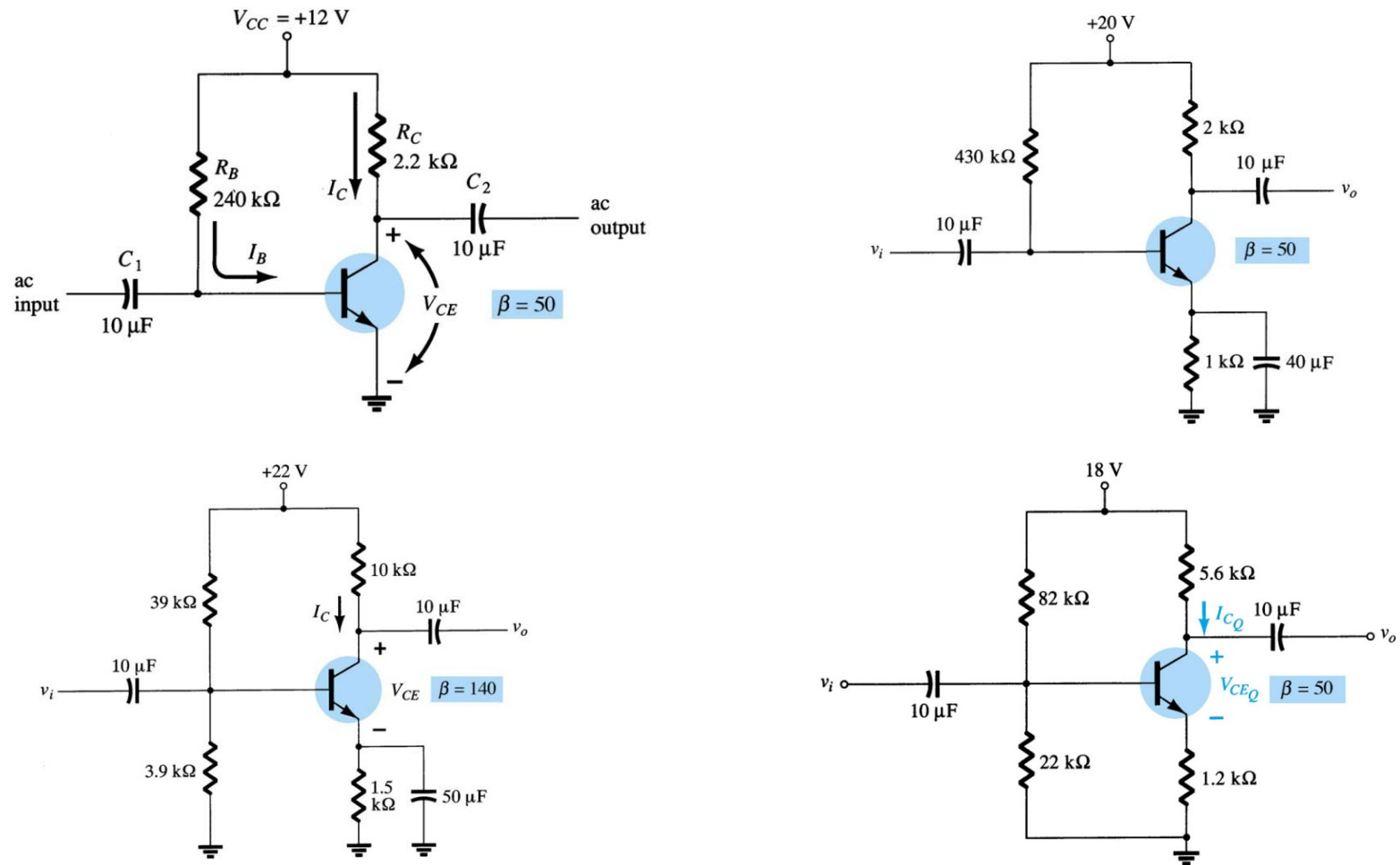


Figura 2.42 - Exercício 2.5.

Bibliografia

CONTEÚDO:

SEDRA : Pgs. 227 a 239

BOYLESTAD : Pgs. 119 a 129

MALVINO : Pags. 203 – 267

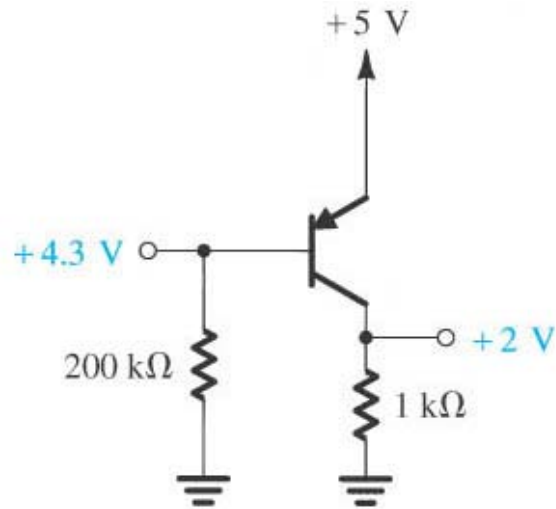
EXERCÍCIOS

SEDRA : Exs. 4.1 a 4.7 Pgs. 319 a 320

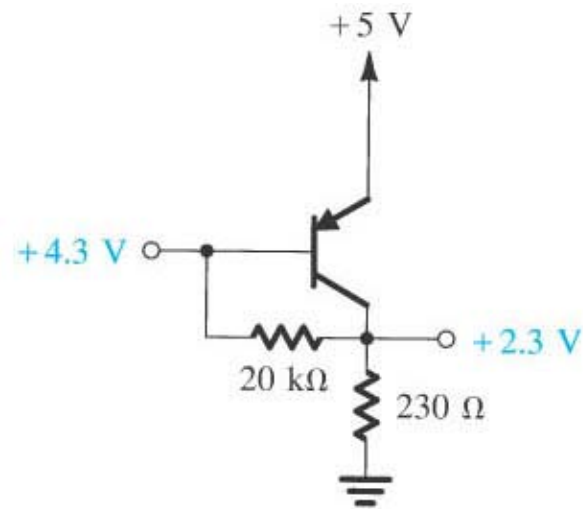
BOYLESTAD : Exs. 1 a 39 Pgs. 7 a 118

MALVINO : Exs. 6.1 a 6,24 Pgs.219 a 220

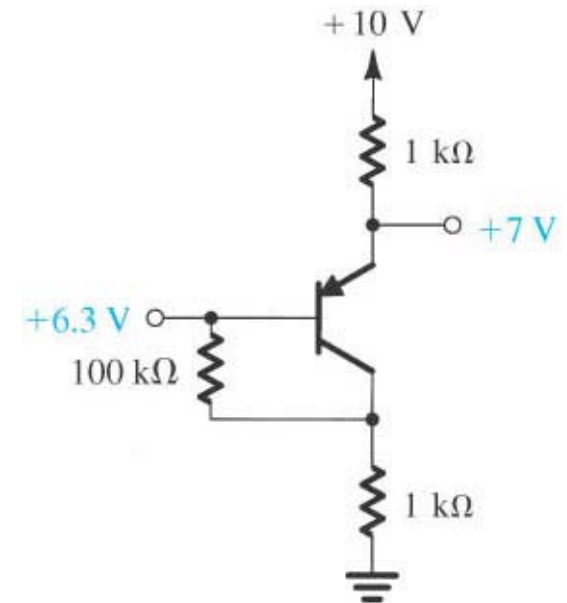
Encontrar tensões e correntes nodais, V_{BE} , V_{CE} , V_{CB} e β para cada circuito.



$$\begin{aligned} V_{BE} &= \\ V_{CE} &= \\ V_{CB} &= \\ I_C &= \\ I_B &= \\ I_E &= \\ \beta &= \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} V_{BE} &= \\ V_{CE} &= \\ V_{CB} &= \\ I_C &= \\ I_B &= \\ I_E &= \\ \beta &= \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} V_{BE} &= \\ V_{CE} &= \\ V_{CB} &= \\ I_C &= \\ I_B &= \\ I_E &= \\ \beta &= \end{aligned}$$