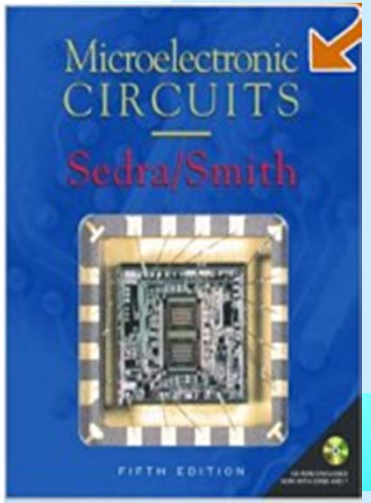
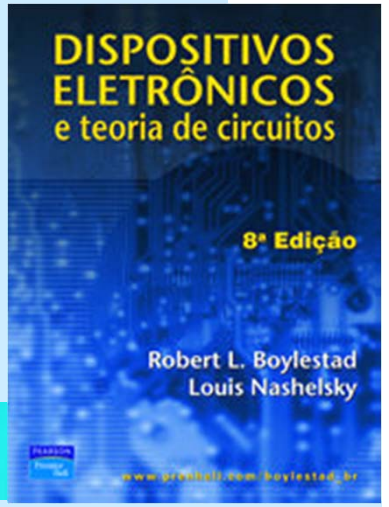
Transistor Bipolar de Junção
TBJ



Cap. 4 Sedra/Smith
Cap. 4 Boylestad



TBJ em Modo Saturado

Notas de Aula SEL 313
Circuitos Eletrônicos 1
Parte 8

1º Sem/2017 Prof. Manoel

TBJ com Chave : Saturação e Corte

Região de Corte :

Considere o circuito a seguir.

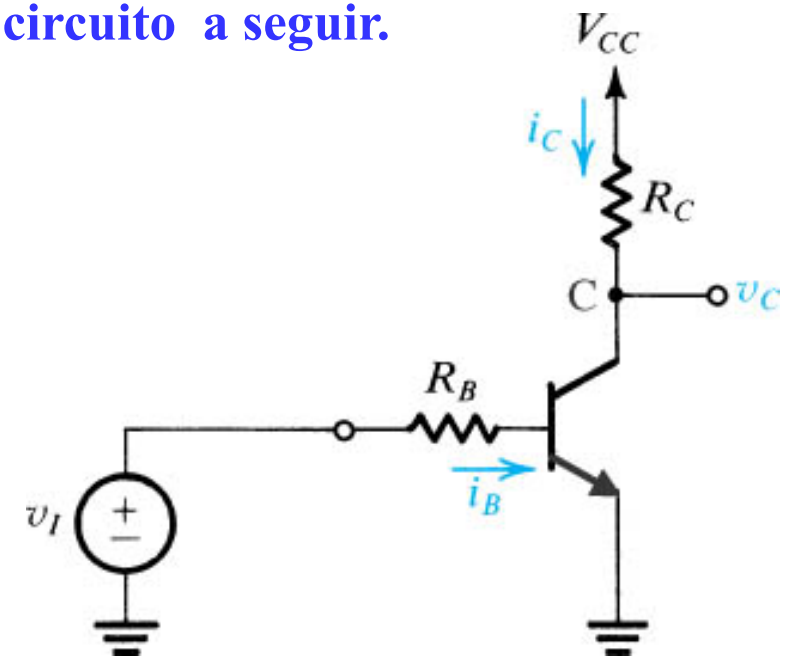


Figura 2.81 Circuito para análise de Corte e Saturação.

Se v_i < 0,5V praticamente não há corrente significativa na base e pode-se admitir ainda que JEB está reversa e consequentemente JCB também. Isto caracteriza a região de corte sendo :

$$i_B = 0; \qquad i_E = 0; \qquad i_C = 0 \quad e \quad v_C = V_{CC} \tag{2.74}$$

Transição na região ativa

Se entretanto, $v_i = v_{BE} = 0{,}7V$ uma corrente significativa circula pela Base, tal que :

$$i_B = \frac{v_i - V_{BE}}{R_B} \cong \frac{v_i - 0{,}7}{R_B} \qquad \textbf{(2.75)}$$

Se o valor de β é conhecido a corrente de coletor será ($\beta\, i_B$) e para se confirmar a região ativa verifica-se :

$$v_C = V_{CC} - R_C\, i_C \qquad \textbf{(2.76)}$$

Caso a junção JCB esteja reversa o TBJ se encontra na Região Ativa. Neste caso i_B cresce muito, devido a β, e consequentemente o valor de v_C decresce segundo (2.76).

No limite, v_C irá decrescer até que a junção JCB se torne polarizada direta e o TBJ passa a operar na Saturação.

Se v_i for mantido em níveis entre o limite de Corte e de Saturação, um grande nível de amplificação linear de tensão pode ser verificado (no caso da figura 2.81).

Característica de transferência na região ativa

Para o circuito do exemplo, se o ponto Q for adequado e se v_i for limitado a pequenos sinais, verifica-se que v_{CE} (que é a saída) pode apresentar grandes variações sem distorção (linear).

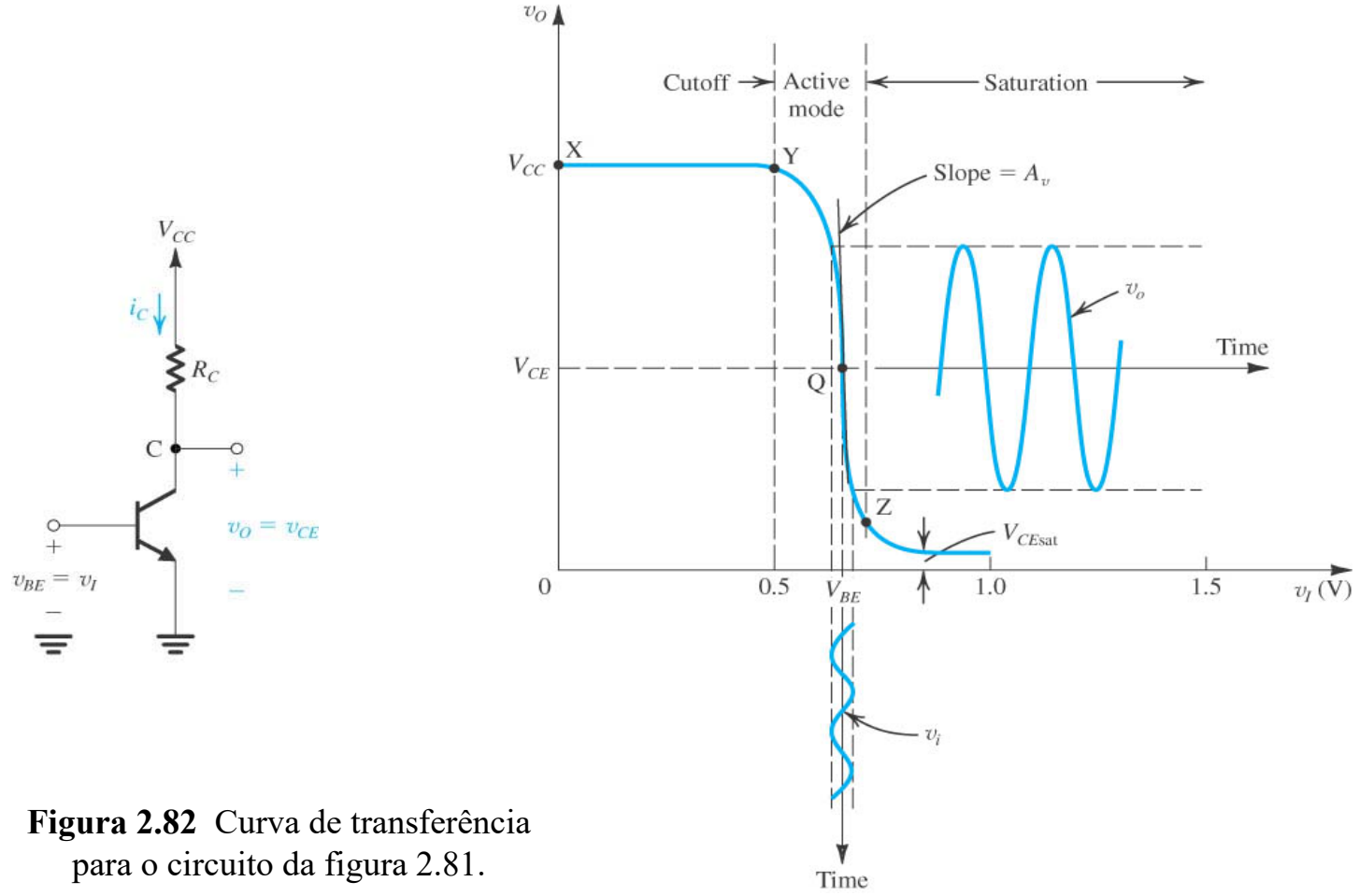


Figura 2.82 Curva de transferência para o circuito da figura 2.81.

TBJ na Saturação

A região de Saturação ocorre quando o coletor atingir a capacidade máxima de corrente de coletor enquanto ainda estiver na região ativa, o que ocorre para v_{CB}=0, ou seja, no exemplo da figura 2.81, isto ocorre para :

e,

$$v_{CB} = 0\,\text{V} \quad \Rightarrow \quad v_B = 0{,}7\,\text{V} \quad \therefore \quad v_C = 0{,}7\,\text{V} \qquad \textbf{(2.77)}$$

$$\tilde{I}_C = \frac{V_{CC} - V_C}{R_C} \cong \frac{V_{CC} - 0{,}7}{R_C} \qquad \textbf{(2.78)}$$

com :

$$\tilde{I}_B = \frac{\tilde{I}_C}{\beta} \qquad \textbf{(2.79)}$$

Se i_B crescer mais ainda que $\tilde{I}_B$, i_C aumenta ainda um pouco e v_C diminui.

No limite JCB exibe uma tensão direta de 0,4V a 0,6V. Aumentos de i_B na saturação pouco se reflete em i_C. Por isto, o valor de β_{SAT} é muito pequeno.

Na saturação não vale mais a relação $i_C = \beta\, i_B$!!!

TBJ na Saturação

Considerando-se a figura 2.81 na saturação, $v_C = v_{CE} = v_{CE_SAT}$. O valor de v_{BE} será pouco superior a 0,7V, mas ainda próximo deste valor.

Se v_B é em torno de 0,4V a 0,6V maior que v_C, então o valor de v_{CE_SAT} será em torno de 0,1V a 0,3V. ➔ Normalmente usa-se $v_{CE_SAT} = 0,2$ V.

$$I_{C_SAT} = \frac{V_{CC} - V_{CE_SAT}}{R_C} \cong \frac{V_{CC} - 0,2}{R_C} \qquad \textbf{(2.80)}$$

Para se obter i_{C_SAT}, deve-se garantir :

$$I_B^* \geq \frac{I_{C_SAT}}{\beta} \qquad \textbf{(2.81)}$$

Na prática, usa-se este valor com um fator de 2 a 10 vezes maior. Daí em diante o valor de β muda pra β_{SAT} o qual é expresso por :

$$\beta_{SAT} \geq \frac{I_{C_SAT}}{I_B} \qquad \left(\text{ou simplesmente} \quad := \frac{I_C}{I_B} \quad \text{do ponto de operação saturado} \right) \qquad \textbf{(2.82)}$$

TBJ na Saturação

Na figura (2.83) com escala expandida próximo da origem, observa o efeito de mudança do valor de β entre as regiões de saturação e ativa (uma mesma variação de I_B promove diferente variação de I_C). Verifica-se ainda que na região de saturação a inclinação da curva determina uma resistência de saída em modo saturado R_{CEsat}

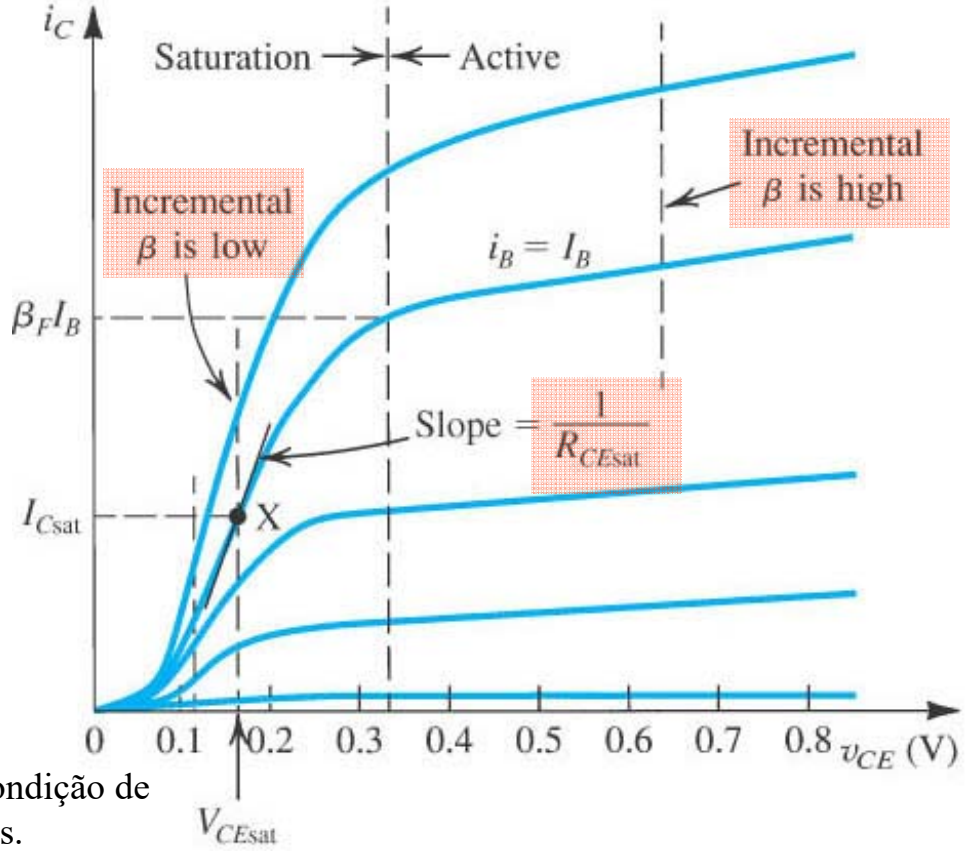


Figura 2.83 Detalhe da condição de saturação dos TBJs.

Modelos do TBJ na Saturação e no Corte

Na região de Corte :

Para este caso, desde que não há corrente algum no elemento a configuração do circuito é simplesmente substituída por uma equivalente sem o TBJ.

Na região de Saturação :

Das análises anteriores os modelos adequados são indicados a seguir para o TBJ-NPN. Se R_{CEsat} for muito pequena, pode-se eliminá-la. Em alguns casos o TBJ pode ser substituído por um curto-circuito dos 3 terminais.

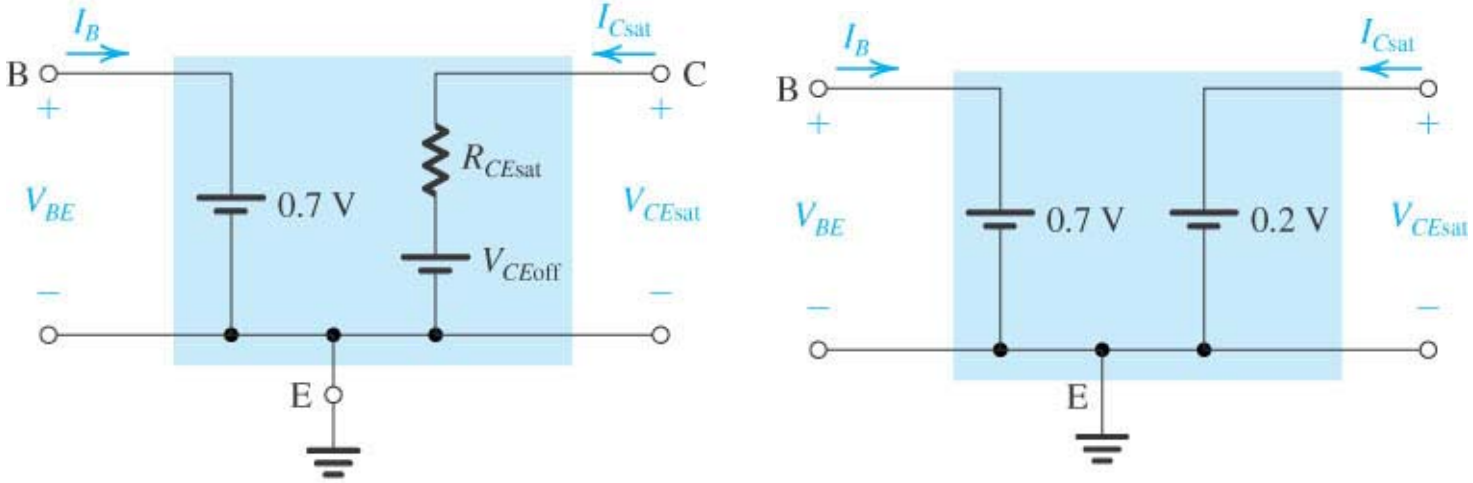


Figura 2.84 Modelos da condição de TBJ saturado.

Exemplo 2.15

Obter tensões e corrente nodais sendo β=100 e $\beta_{mim} = 50$.

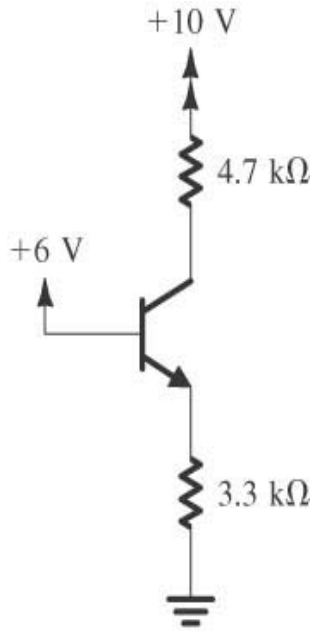


Figura 2.85 Circuito do exemplo 2.15.

Solução :

Este circuito já foi analisado no exercício 2 da parte 2.
Naquele caso foi verificado que o TBJ se encontra saturado, pois :

$$\begin{cases} V_E = 6 - V_{BE} = 6 - 0{,}7 = 5{,}3 \ \text{V} \\ I_E = \dfrac{V_E}{R_E} = \dfrac{5{,}3}{3{,}3\text{k}} = 1{,}6 \ \text{mA} \\ V_C = 10 - R_C \, I_C = 10 - 4{,}7\,\text{k}\dfrac{1{,}6\,\text{m}}{\alpha} = 2{,}52 \ \text{V} \\ V_{CB} = V_B - V_C = 6 - 2{,}52 = +3{,}48 \quad \text{V} \quad \text{(direto)} \\ \therefore \quad V_C < V_B \Rightarrow \text{Saturado !!} \end{cases}$$

Com a condição de saturado, obtém-se :

$$V_C = V_E + V_{CEsat} = 5{,}3 + 0{,}2 = 5{,}5 \ \text{V}$$

$$I_C = \frac{10 - V_C}{R_C} = \frac{10 - 5{,}5}{4{,}7\text{k}} = 0{,}96 \ \text{mA}$$

$$I_B = I_E - I_C = (1{,}6 - 0{,}96) \ \text{mA} = 0{,}64 \ \text{mA}$$

$$\beta_{sat} = \frac{I_C}{I_B} = \frac{0{,}96}{0{,}64} = 1{,}5$$

Como β_{sat} e menor que β_{mim} o TBJ se encontra realmente saturado.

Exemplo 2.15 Cont.

Obter R_B que garanta a saturação com fator 10 e sabendo-se $50 \leq \beta \leq 150$.

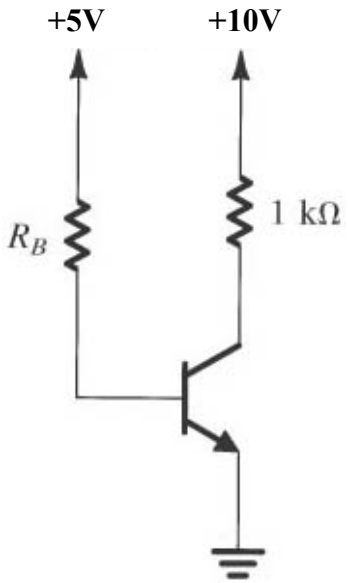


Figura 2.86 Circuito do exemplo 2.15.

Solução :

Se é para que o TBJ esteja saturado, então :

$$V_{CEsat} = V_C = 0{,}2 \text{ V}$$

$$I_{Csat} = \frac{10\text{-}V_{CEsat}}{1\,\text{k}} = \frac{10\text{-}0{,}2}{1\,\text{k}} = 9{,}8\,\text{mA}$$

Usando β_{mim} :

$$I_B = \frac{I_{Csat}}{\beta_{mim}} = \frac{9{,}8\,\text{m}}{50} = 0{,}196\,\text{mA}$$

ou, com fator 10 :

$$I_B = 10 I_B^* = 1{,}96\,\text{mA}$$

Portanto :

$$R_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{I_B} = \frac{5 - 0{,}7}{1{,}96\,\text{mA}} = 2{,}2\,\text{k}\Omega$$

Exemplo 2.16

Obter as tensões e correntes nodais sendo $\beta = 100$ e $\beta_{mim} = 30$.

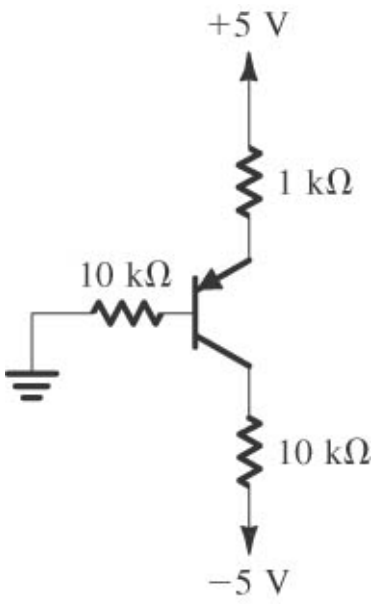


Figura 2.87 Circuito do exemplo 2.16.

Solução :

Verificação região de operação. Inicialmente ➔ Reg. Ativa (?)

$$V_{BE} = 0{,}7 \text{ V} \qquad I_B \cong 0 \qquad I_C = I_E$$

No emissor :

$$5 = R_E\, I_E + V_{EB}$$

$$I_E = \frac{5 - 0{,}7}{1\text{k}} = 4{,}3 \text{ mA}$$

$$I_C = I_E = 4{,}3 \text{ mA}$$

No coletor :

$$5 = V_{BC} + R_C\, I_C$$

$$V_{BC} = 5 - R_C\, I_C = -38{,}0\text{V} \text{ (!! impossívell !!)}$$

Com o valor de 38 V no coletor,o resultado da suposição é impossível e o TBJ não pode estar na região ativa.

Exemplo 2.16 Cont.

Pode ainda ser verificado no circuito anterior que a máxima corrente de coletor (emissor) em modo ativo seria (5V÷10kΩ)= 0,5 mA (para V_{CE}=0V).

Admitindo-se então o caso do TBJ saturado :

$$V_E = V_B + V_{EB} = V_B + 0{,}7$$

$$V_C = V_E - V_{CEsat} = V_B + 0{,}7 - 0{,}2 = V_B + 0{,}5$$

$$I_E = \frac{5 - V_E}{1\text{k}} = \frac{5 - V_B - 0{,}7}{1\text{k}} = (4{,}3 - V_B) \ \text{mA}$$

$$I_B = \frac{V_B}{10\text{k}} = 0{,}1 V_B \ \text{mA}$$

$$I_C = \frac{V_C - (-5)}{10\text{k}} = \frac{V_B + 0{,}5 + 5}{10\text{k}} = (V_B + 0{,}55) \ \text{mA}$$

$$I_E = I_B + I_C \quad \Rightarrow \quad (4{,}3 - V_B) = (0{,}1 V_B) + (V_B + 0{,}55)$$

$$V_B = 3{,}13\text{V}$$

$$\begin{cases} V_E = 3{,}83 \ \text{V} \\ V_C = 3{,}53 \ \text{V} \\ I_E = 1{,}17 \ \text{mA} \\ I_C = 0{,}86 \ \text{mA} \\ I_B = 0{,}313 \ \text{mA} \end{cases}$$

$$\beta_{sat} = \frac{I_C}{I_B} = \frac{0{,}86}{0{,}313} = 2{,}4 \qquad << \qquad 30 \ \text{!!}$$

Exercício 2.17

Obter as tensões e correntes nodais do circuito a seguir.

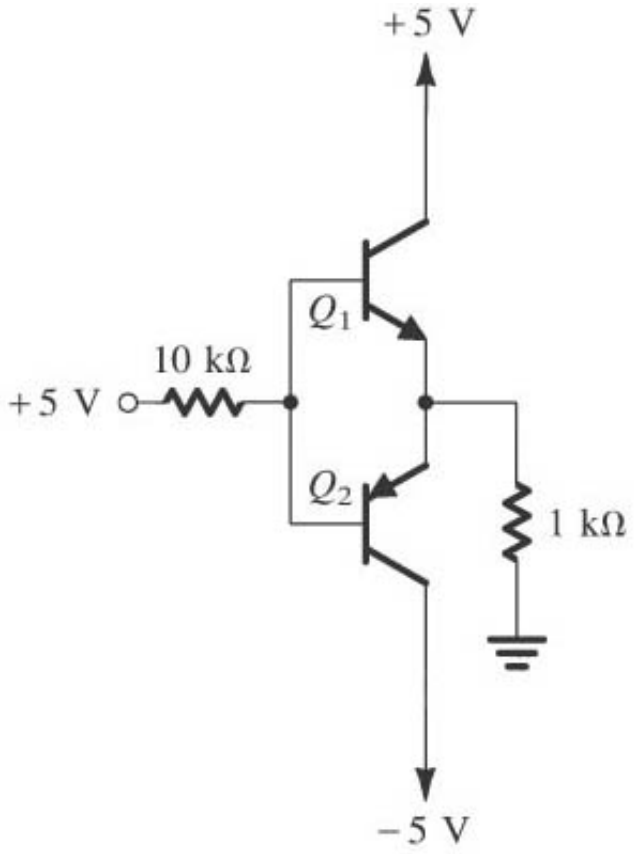


Figura 2.88 Circuito do exercício 2.17

Bibliografia

Conteúdo:

SEDRA : Pgs, 281 - 289
BOYLESTAD : Pgs. 123 / 143 a 149
MALVINO : Pgs. 232 - 236

Exercícios:

SEDRA : Exs. 4.38 e 4.39 Pgs. 325.
BOYLESTAD : Exs. 36 - 38 Pgs. 171
MALVINO : Exs. 7.16 a 7.19 Pg. 255