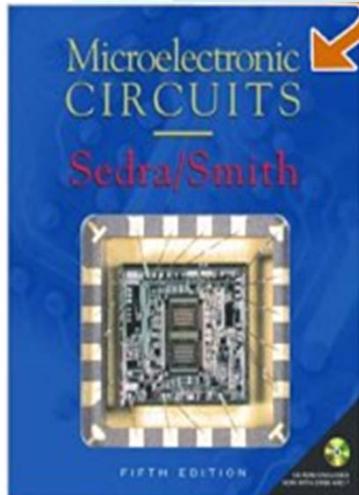
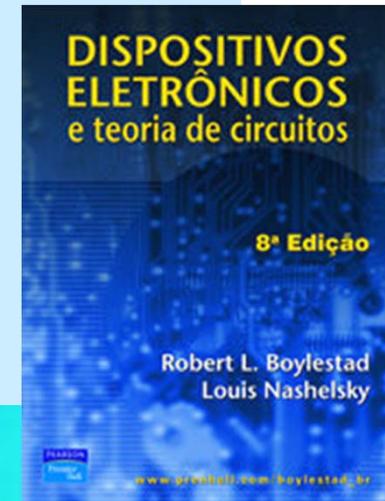


# Transistor Bipolar de Junção TBJ



Cap. 4 Sedra/Smith  
Cap. 4 Boylestad  
Cap. 8 Malvino



Modos de Polarização

Notas de Aula SEL 313  
Circuitos Eletrônicos 1  
Parte 3

1º Sem/2017 Prof. Manoel

## Análise Gráfica de Polarização Estável

Análise gráfica usa as curvas característica de entrada e saída do TBJ. Portanto o usuário deve providenciar tais curvas, que são fornecidas pelos fabricantes. Entretanto, tais curvas nem sempre são disponíveis.

No caso aqui, as curvas características serão usadas para se analisar a questão do ponto de operação Q para fins de operação linear.

Na análise gráfica da polarização usa-se o conceito de Reta de Carga, tal como já visto para o caso dos diodos.

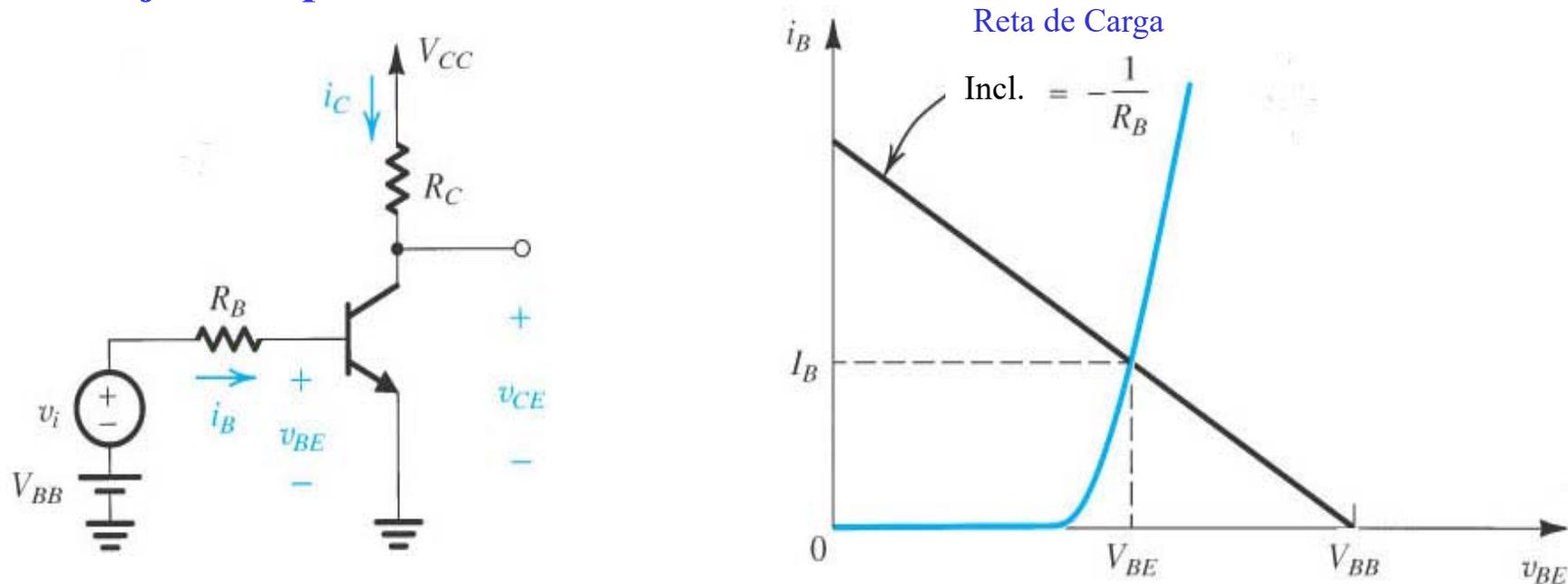


Figura 2.43 Circuito emissor comum para análise gráfica e característica de entrada.

## Reta de carga de entrada

O circuito da figura 2.43 representa um amplificador em Emissor-Comum. A característica de entrada é determinada pela malha de circuito Base-Emissor que impõe a corrente de base  $I_B$  em relação a um determinado  $V_{BE}$ .

Este ponto de operação CC, ponto Q, pode ser alterado em função da fonte  $V_{BB}$  ou da resistência  $R_B$ :

$$V_{BE} = V_{BB} - R_B I_B \quad (2.9-a)$$

ou

$$I_B = \frac{V_{BB}}{R_B} - \frac{1}{R_B} V_{BE} \quad (2.9-b)$$

A fonte de sinal  $v_i(t)$  promoverá pequenos deslocamentos em torno deste ponto Q, ou seja:  $\Delta v_{be}(t)$  e  $\Delta i_b(t)$ .

Para o circuito em questão a reta de carga de saída é determinada pela malha de circuito Emissor-Coletor, pela fonte  $V_{CC}$  e pela “carga”  $R_C$ .

## Reta de carga de saída

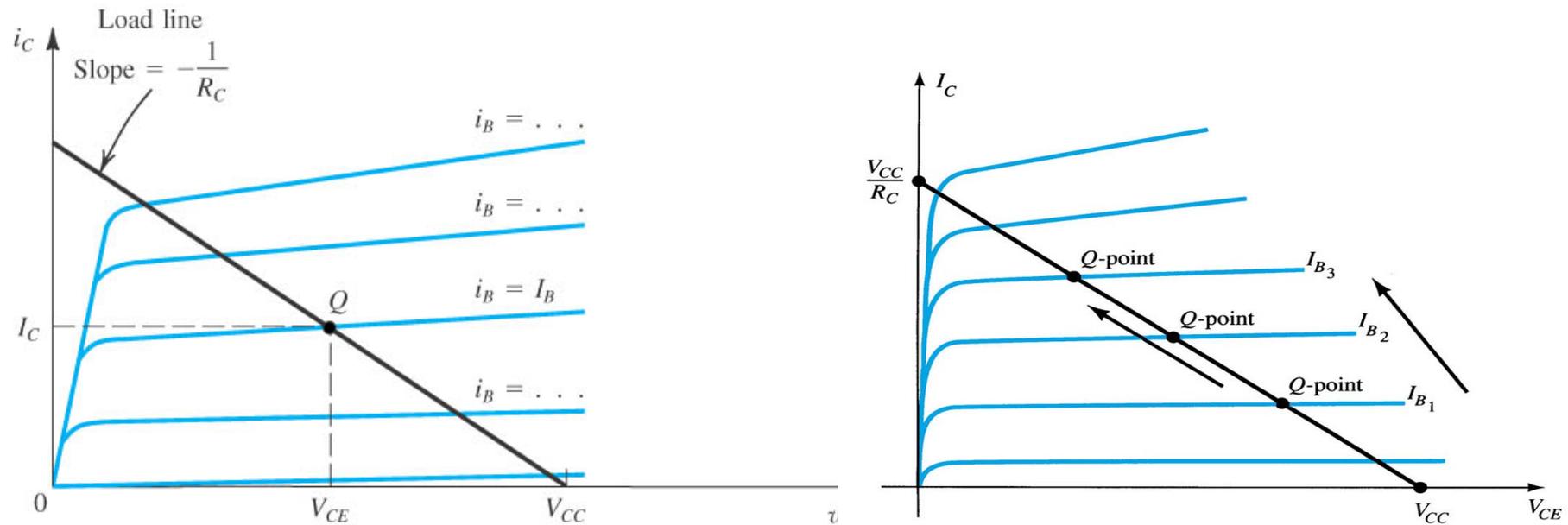


Figura 2.44 Reta de carga de saída. Ponto de operação e deslocamento do ponto Q.

O ponto Q determinado pelos valores CC são :  $(V_{CE} \times I_C)$  neste circuito e pode ser obtido ou alterado pelas relações a seguir.

$$V_{CE} = V_{CC} - R_C I_C \quad (2.10-a)$$

ou

$$I_C = \frac{V_{CC}}{R_C} - \frac{1}{R_C} V_{CE} \quad (2.10-b)$$

## Influência de $V_{CC}$ e $R_C$

Para um dado valor de corrente de Base  $I_B$ , o ponto Q pode se alterar em função da carga ou da alimentação  $V_{CC}$ .

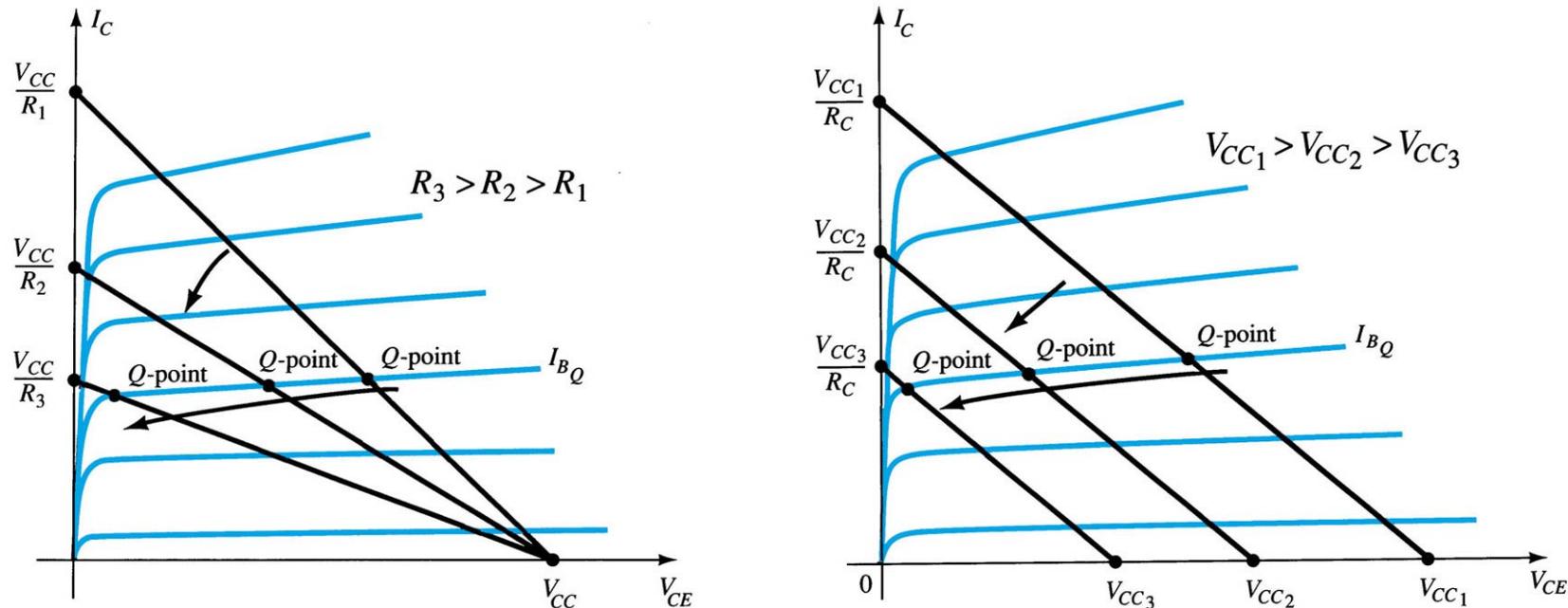


Figura 2.45 Variações de reta de carga em função da carga ou de  $V_{CC}$ .

Os pontos Q's obtidos por  $R_{C3}$  ou por  $V_{CC3}$  oferecem pouca excursão negativa de  $v_{ce}$ , enquanto que no caso de  $R_{C1}$  ou  $V_{CC1}$ ,  $v_{ce}$  poderá ter pouca excursão de amplitudes positivas.

# Operação em modo CA

Admitindo que  $v_i(t)$  seja uma onda triangular e que o ponto Q esteja numa região central da reta de carga, o comportamento da operação do amplificador com TBJ é evidenciado a seguir.

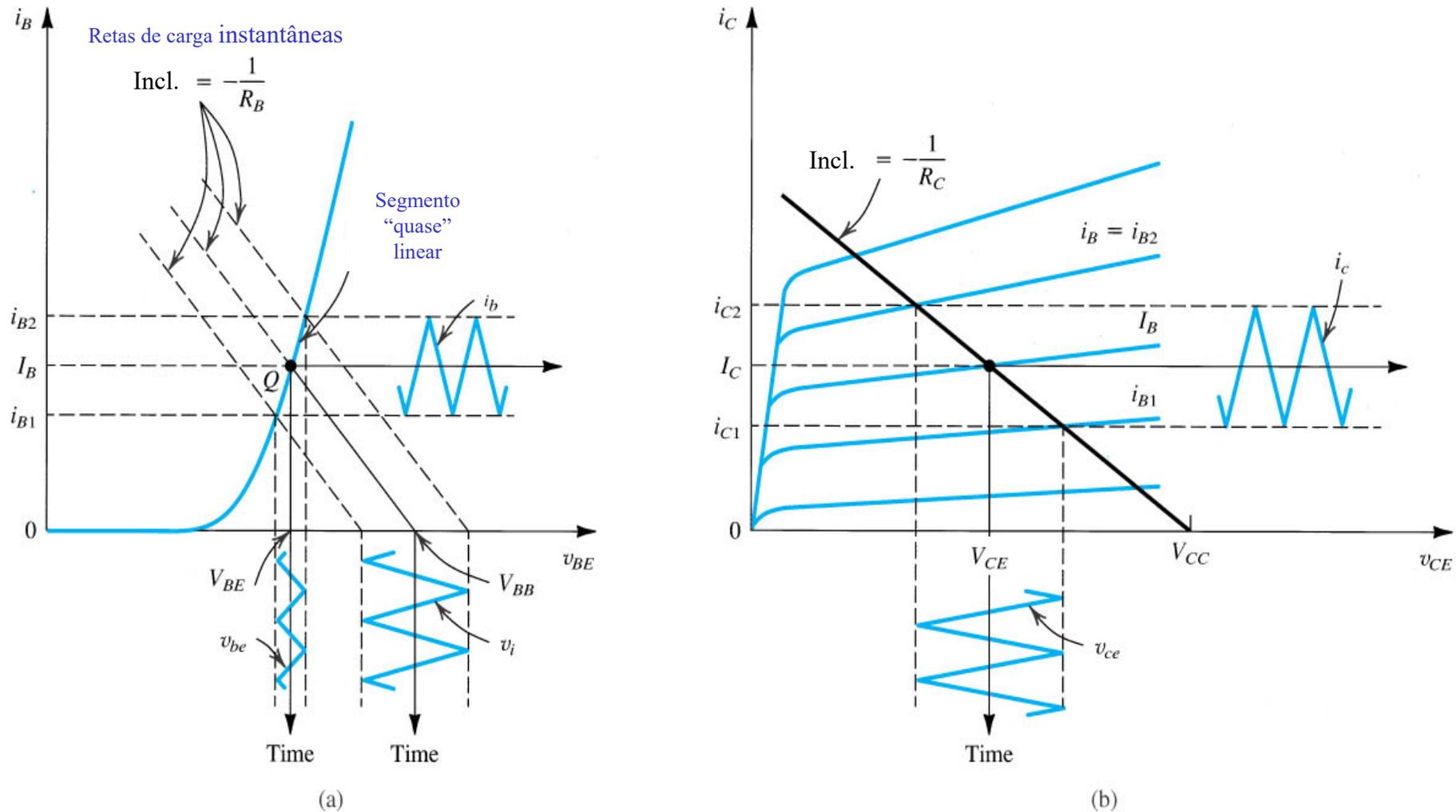


Figura 2.46 Operação do TBJ em amplificação.

# Projeto de Polarização

O projeto de Polarização se resume na obtenção do ponto Q em termos de tensões e correntes que determinem a região Ativa de forma estável.

Devem apresentar pouca sensibilidade à temperatura e  $\beta$  do TBJ.

Muitas das análises dos amplificadores dependem do ponto Q , por isso devem ser estáveis.

Muitos casos de polarização já foram analisados e serão apenas classificados em termos de fontes simples, duplas e fontes de corrente.

## Arranjo com fonte simples

Estes casos foram vistos no exemplos 2.1 e 2.5, e exercícios propostos. A vantagem aqui é necessidade de apenas uma fonte de alimentação.

Como já demonstrado, algumas destas topologias apresentam maior ou menor dependência com  $\beta$ .

## Exemplos de fonte simples

Duas formas de polarização com fonte simples são vistas a seguir.

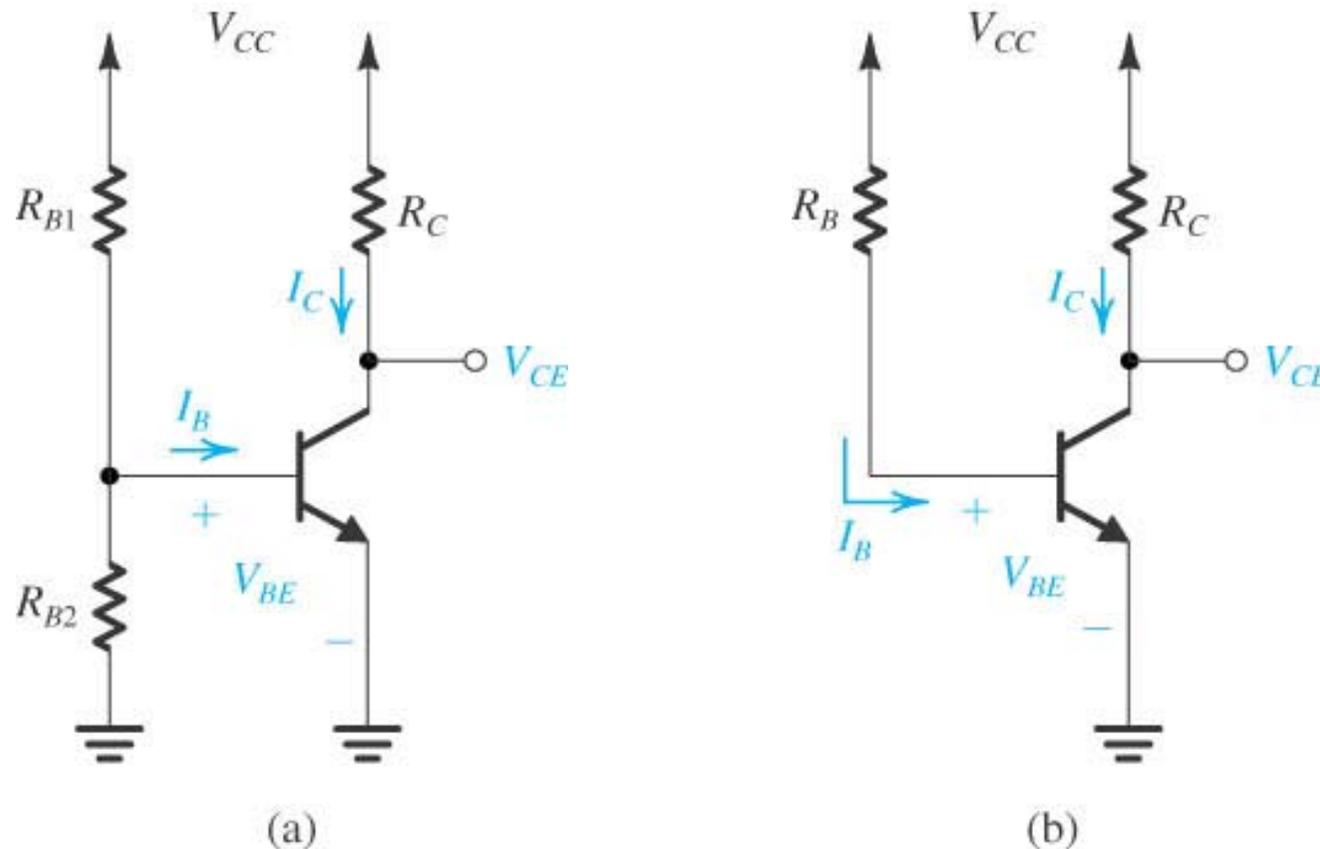


Figura 2.47 Configurações de polarização com fonte simples.

O primeiro caso estabelece uma imposição de  $V_{BE}$  e no segundo de  $I_B$ . Ambos os casos apresentam grandes sensibilidades á variação de  $\beta$ . Devem ser evitados para situações críticas de operação.

## Topologia de polarização automática

Este caso já foi estudado no exemplo 5 e se caracteriza por apresentar boa uma estabilidade em relação a variações de  $\beta$ . A seguir está ilustrada esta topologia e seu equivalente de Thévenin do circuito de Base.

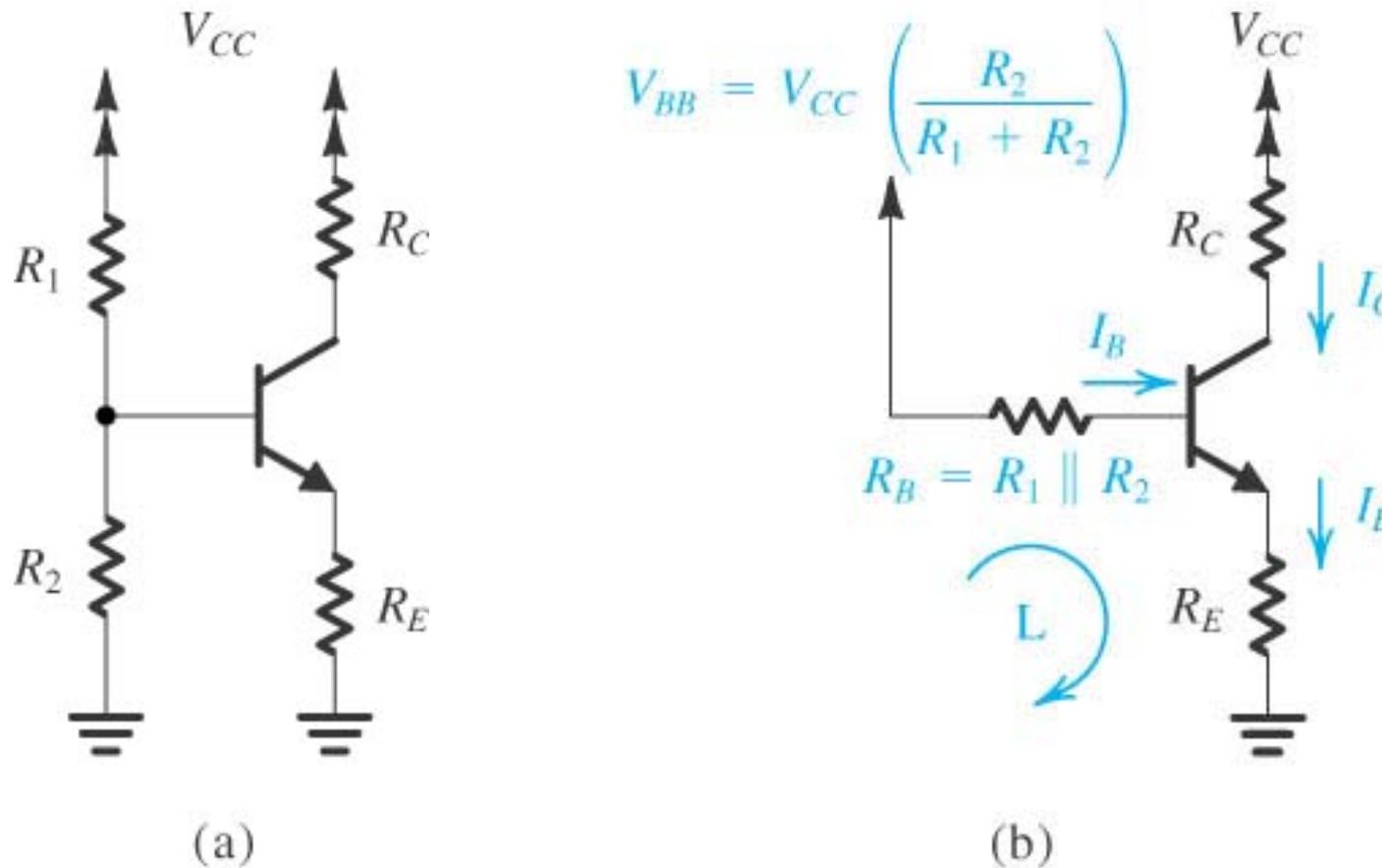


Figura 2.48 Configuração de polarização automática.

## Análise da polarização automática

O circuito de base pode ser simplificado com o equivalente de Thévenin, tal que :

$$V_{BB} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC} \quad R_{BB} = R_1 // R_2 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \quad (2.11)$$

A corrente de emissor será :

$$I_E = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_E + \frac{R_{BB}}{\beta + 1}} \quad (2.12)$$

Para se ter  $I_E$  pouco sensível á temperatura e à  $\beta$ , recomenda-se :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{BB} \gg V_{BE} = 0,7\text{V} \end{array} \right. \quad (2.13-a)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} R_E \gg \frac{R_{BB}}{\beta + 1} \end{array} \right. \quad (2.13-b)$$

Porém,  $V_{BB}$  grande significa  $V_{RC}$  e/ou  $V_{CB}$  pequenos e então resultando em baixo ganho de tensão.

$V_{CB}$  deve ( ou  $V_{CE}$ ) deve ser grande para permitir grandes excursões de sinal na saída sem distorções.

## Regras para o polarização automática

Como regra geral adota-se uma distribuição da tensão de alimentação de forma que :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{BB} \cong V_{CC}/3 \\ V_{CB} \quad (\text{ou } V_{CE}) \cong V_{CC}/3 \\ V_{RC} \cong V_{CC}/3 \end{array} \right. \quad (2.14)$$

Para se satisfazer (2.13-b) deve-se ter  $R_{BB}$  pequena e isto implica  $R_1$  e  $R_2$  também pequenos. Desta forma  $R_1$  e  $R_2$  drenam muita corrente da fonte, deteriora a eficiência e reduzem a impedância de entrada do amplificador.

Para se atingir independência de  $\beta$ , a corrente no divisor resistivo  $R_1$   $R_2$  deve ser muito maior que  $I_B$ . Para isto adota-se :

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{R1} \cong I_{R2} = I_E \\ \text{ou} \\ I_{R1} \cong I_{R2} = 0,1I_E \end{array} \right. \quad (2.15-a)$$

$$(2.15-b)$$

## Exemplo 2.7

Para o circuito da figura 2.48, deseja-se  $I_E=1\text{mA}$ , sendo  $V_{CC}=12\text{V}$  e  $\beta=100$ .

Solução com  $I_{R1}=I_{R2}=0,1I_E$

Distribuindo-se  $1/3 V_{CC}$  entre  $R_C$ ,  $V_{CB}$  e  $V_B$ , tem-se :

$$\begin{aligned} V_B &= 4\text{V} \quad (\text{com } I_B \cong 0) \\ V_E &= 4 - V_{BE} = 3,3\text{V} \end{aligned} \quad R_E = \frac{V_E}{I_E} = \frac{3,3}{1\text{m}} = 3,3 \text{ k}\Omega$$

Para o circuito de base, com  $I_B$  aproximadamente 0 :

$$(R_1 + R_2)0,1 \cdot I_E = V_{CC} \quad \Rightarrow \quad R_1 + R_2 = \frac{V_{CC}}{0,1 \cdot I_E} = 120\text{k}\Omega$$

e sendo,  $V_B = 4\text{V}$  :

$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC} = 4\text{V}$$

e cuja solução fornece :

$$R_1 = 40 \text{ k}\Omega \quad \text{e} \quad R_2 = 80 \text{ k}\Omega$$

## Exemplo 2.7 cont.

Usando-se as relações reais do circuito :

$$\begin{cases} I_E = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_E + \frac{R_B}{\beta + 1}} = 0,93 \text{ mA} & (\text{erro } 7\%) \\ I_B = \frac{I_E}{\beta + 1} = 9,2 \text{ } \mu\text{A} \end{cases}$$

Solução(2) com  $I_{R1}=I_{R2}=I_E$  :

$$\rightarrow R_1 = 8 \text{ k}\Omega \quad \text{e} \quad R_2 = 4 \text{ k}\Omega$$

Neste caso, a impedância de entrada seria menor e a corrente em  $R_1$  e  $R_2$  seria maior. As correntes de emissor e base seriam :

$$\begin{cases} I_E = 0,992 \text{ mA} & (\text{erro } 0,7\%) \\ I_B = 9,82 \text{ } \mu\text{A} \end{cases}$$

Em ambos os casos,  $R_C$  seria dado por :

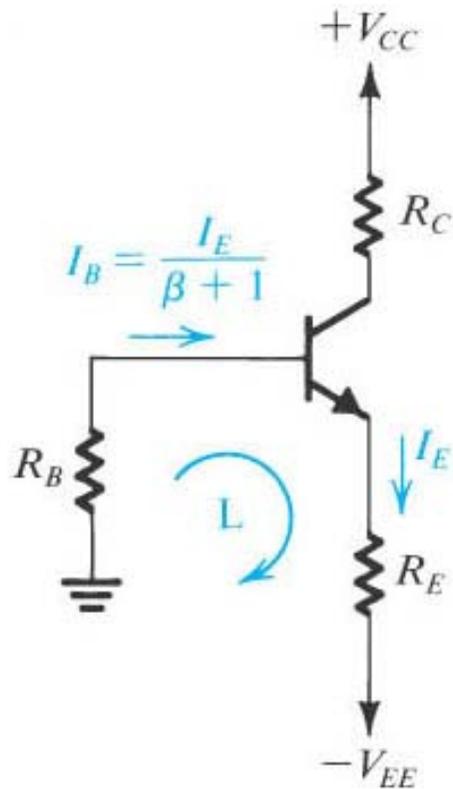
$$\begin{cases} R_C = 4,3 \text{ k}\Omega & (\text{solução 1}) \\ R_C = 4,03 \text{ k}\Omega & (\text{solução 2}) \end{cases} \quad \begin{cases} V_C = 8,03 \text{ V} \\ V_B = 3,97 \text{ V} \\ V_E = 3,27 \text{ V} \end{cases}$$

$\rightarrow$  Refazendo-se os cálculos com  $I_B$  diferente de zero :

## Arranjo de polarização com 2 fontes

Um caso deste tipo foi visto no exemplo 3 . O circuito de base pode ser equacionado em função da corrente de base  $I_B$  ou da corrente de emissor  $I_E$ .

Neste caso, tal como já visto, o circuito se comporta bem sob variações de  $\beta$  com relação à saída.



Equacionando-se o circuito de base por  $I_E$  :

$$I_E = \frac{V_{EE} - V_{BE}}{R_E + \frac{R_B}{\beta + 1}} \quad (2.16)$$

Equacionando-se o circuito de base por  $I_B$  :

$$I_B = \frac{V_{EE} - V_{BE}}{(\beta + 1)R_E + R_B} \quad (2.17)$$

Figura 2.49 Arranjo de polarização com 2 fontes.

## Arranjo alternativo de fonte simples

Uma topologia de fonte simples com boa estabilidade a variações de  $\beta$  é vista a seguir:

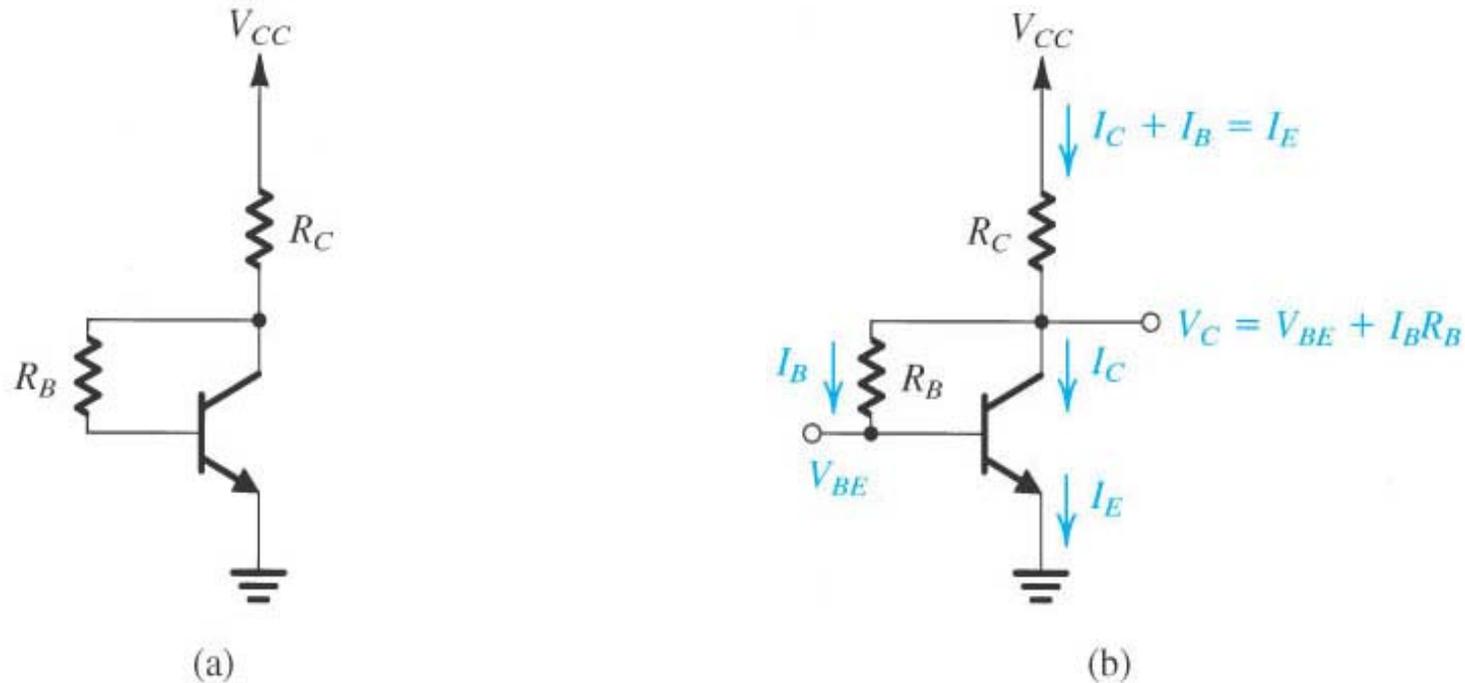


Figura 2.50 Arranjo alternativo com fonte simples.

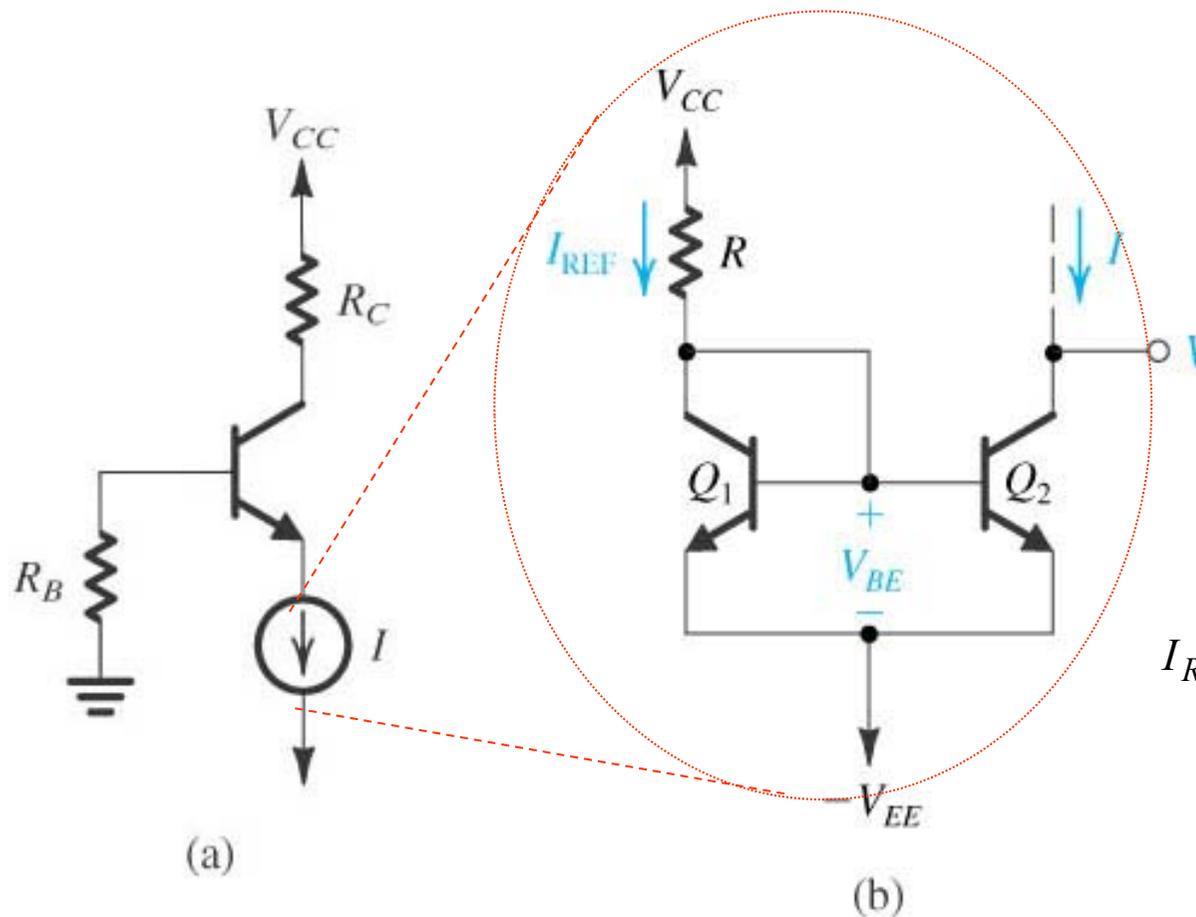
Aqui, o circuito pode ser equacionado em função de  $I_B$  ou de  $I_E$  a partir da fonte, coletor, base e emissor como :

$$\begin{aligned} V_{CC} &= R_C I_E + R_B I_B + V_{BE} \\ &= R_C I_E + \frac{I_E}{(\beta + 1)} R_B + V_{BE} \\ \Rightarrow I_E &= \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_C + \frac{R_B}{(\beta + 1)}} \end{aligned} \quad (2.18)$$

## Arranjo com fonte de corrente

Um arranjo com fonte de corrente **CC** na polarização é visto a seguir.

No circuito mostrado  $I_E$  será independente de  $\beta$  ou  $R_B$ . Isto implica que  $R_B$  pode ser elevado, permitindo alta impedância de entrada para o amplificador.



A fonte de corrente pode ser implementada tal como indicado pelo circuito ao lado, a partir fontes de tensão. Este circuito é conhecido como Espelho de Corrente. Pode-se mostrar que :

$$I_{REF} = \frac{V_{CC} - (-V_{EE}) - V_{BE}}{R} \quad (2.19)$$

Usando-se  $Q_1=Q_2$ , tendo-se o mesmo  $V_{BE}$  então  $I=I_{REF}$ .

Figura 2.51 Polarização com fonte de corrente.

## Exercício 2.6-a

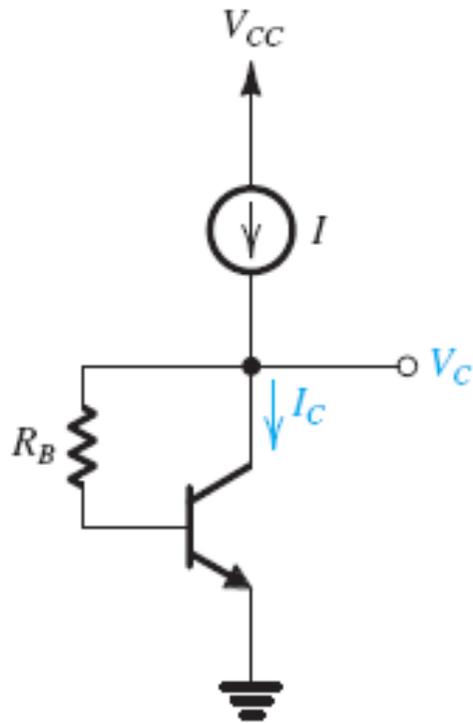
- A) - Refazer o exemplo 2.11 com  $\beta = 200$
- B) - Refazer o exemplo 2.11 com  $\beta = 300$
- C) - Comparar as variações (%) do ponto Q do exemplo 2.11 com os resultados acima.

## Exercício 2.6-b

No circuito a seguir inicialmente  $\beta = 90$ ,  $I_C$  deve ser  $3\text{mA}$  e  $V_C = 1,7\text{ V}$ .

(a) - Obtenha o valor da fonte corrente  $I$  necessária e o valor de  $R_B$ .

(b) - Se o valor de  $\beta$  sofre um incremento de  $100\%$  quanto varia percentualmente as tensões e correntes do circuito.



# Bibliografia

## Conteúdo :

**SEDRA : Pgs. 258 a 268**

**BOYLESTAD : 119 a 142 (Cap. 4)**

**MALVINO : 262 a 277**

## Exercícios :

**SEDRA : 25 ao 28 Pgs. 322 - 323**

**BOYLESTAD : 1 a 35 Pgs. 165 -171**

**MALVINO : 1 a 23 Pgs. 281 - 283**