



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DO SUL E SUDESTE DO PARÁ - UNIFESSPA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E ENGENHARIAS - IGE
FACULDADE DE COMPUTAÇÃO E ENG. ELÉTRICA – FACEEL
CURSO ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

Microeletrônica

Prof. José Carlos Da Silva

jcdsilv@hotmail.com

jose-carlos.silva@unifesspa.edu.br

whatsApp: 19-993960156

Setembro/2021

Conteúdo

- Introdução;
- Transistor Bipolar de Junção (TBJ ou BJT)
- Configuração Único Estágio (Polarização DC):
 - Emissor Comum:
 - Polarização Fixa;
 - Polarização do Emissor;
 - Polarização por Divisor de Tensão.
- Simulação (Análise DC):
 - Emissor Comum:
 - Polarização Fixa;
 - Polarização do Emissor;
 - Polarização por Divisor de Tensão.

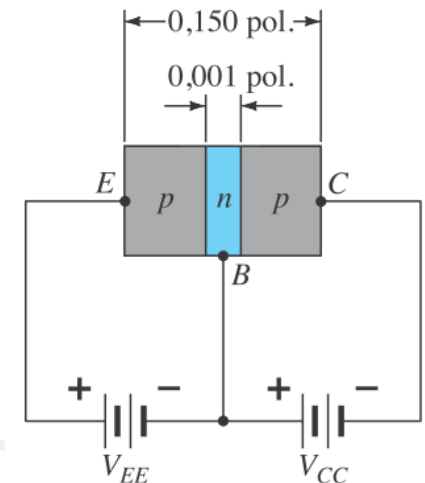
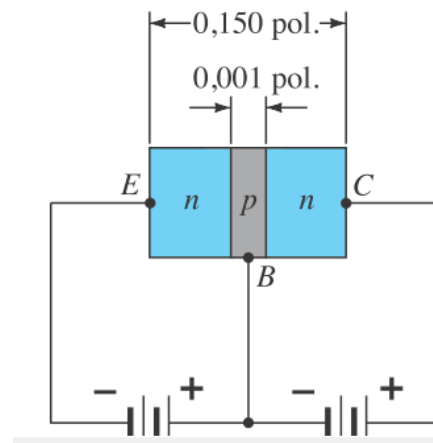
Transistor Bipolar de Junção (TBJ ou BJT)

Vacuum Tube Op-Amps

- First op amps built in 1930's-1940's
 - Technically feedback amplifiers due to only having one useable input
- Used in WWII to help how to strike military targets
 - Buffers, summers, differentiators, inverters
- Took $\pm 300V$ to $\pm 100V$ to power



http://en.wikipedia.org/wiki/Image:K2-w_vacuum_tube_op-amp.jpg



Transistor Bipolar de Junção (TBJ ou BJT) (Construção)

- O transistor é um dispositivo semicondutor de três camadas que consiste em duas camadas de material do tipo *n* e uma do tipo *p* ou em duas camadas do tipo *p* e uma do tipo *n*;
- Denominado transistor npn e o outro transistor pnp (Sendo um complementar ao outro em certas aplicações);
- A camada total de um transistor bipolar é aproximadamente uma razão de 150:1 da camada central (ou interna);
- A dopagem da camada central (ou interna) também é consideravelmente menor do que a das externas (normalmente 1:10 ou menos);
- As camadas externas são denominadas: Emissor (E) e Coletor (C);
- A camada central (ou interna) : Base (B).

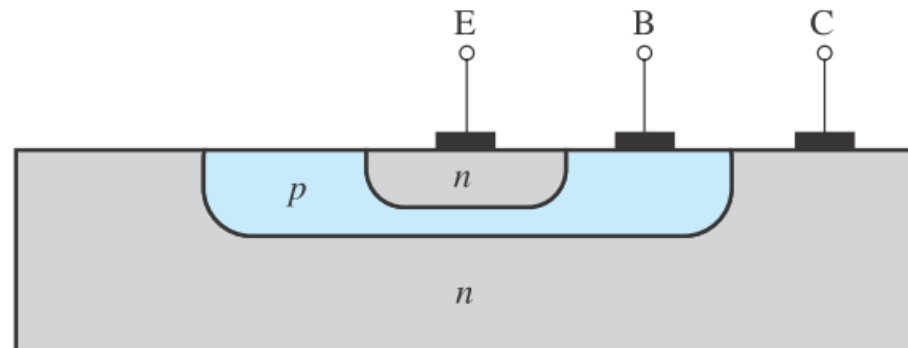
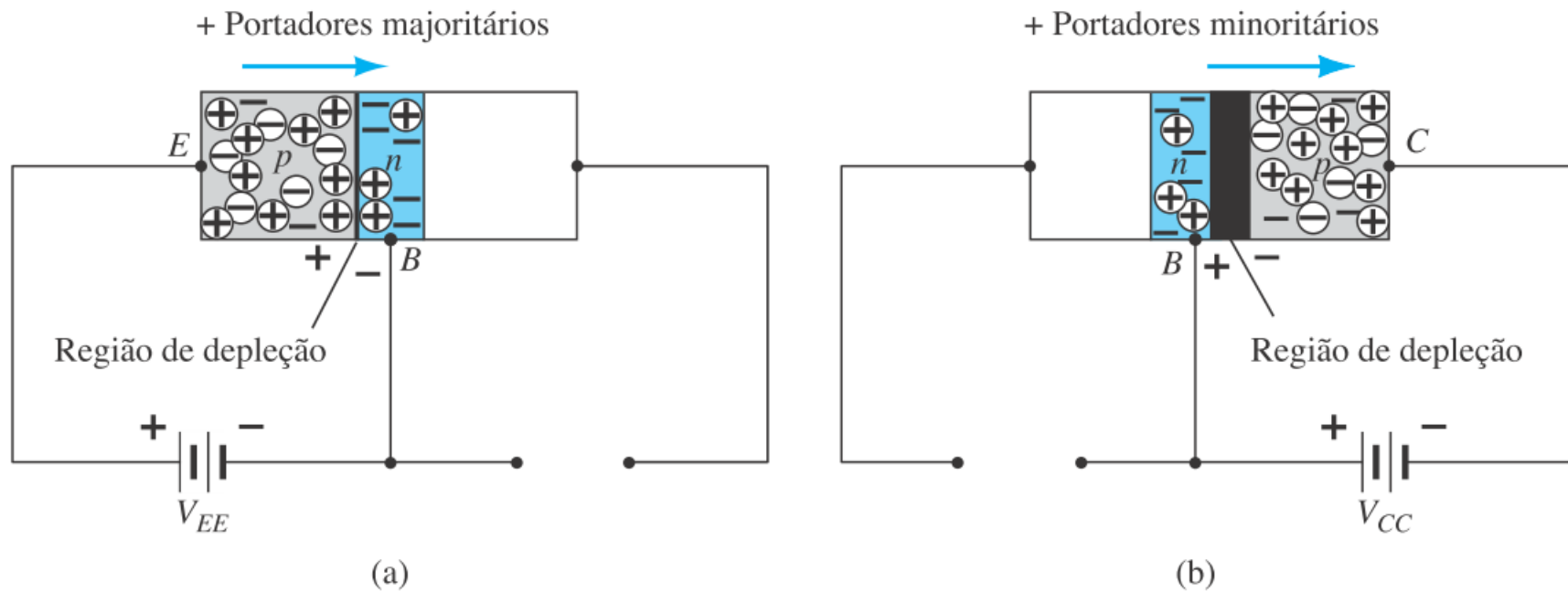


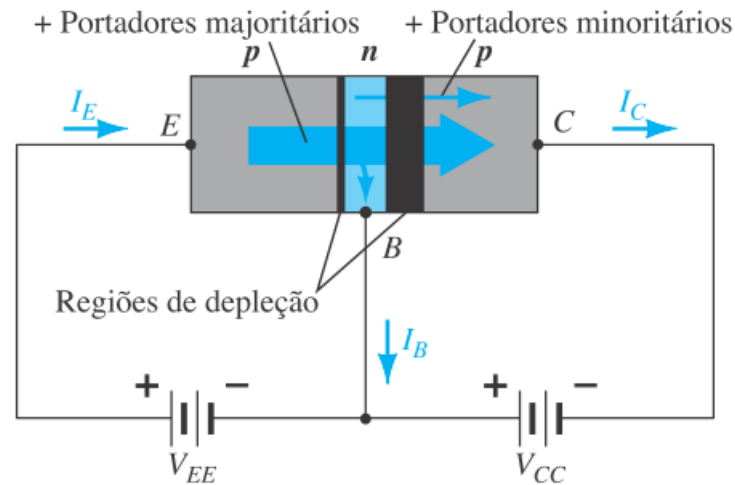
Figure 6.7 Cross section of an *nnp* BJT.

Transistor Bipolar de Junção (TBJ ou BJT) (Operação)



Polarização de um transistor: (a) direta; (b) reversa.

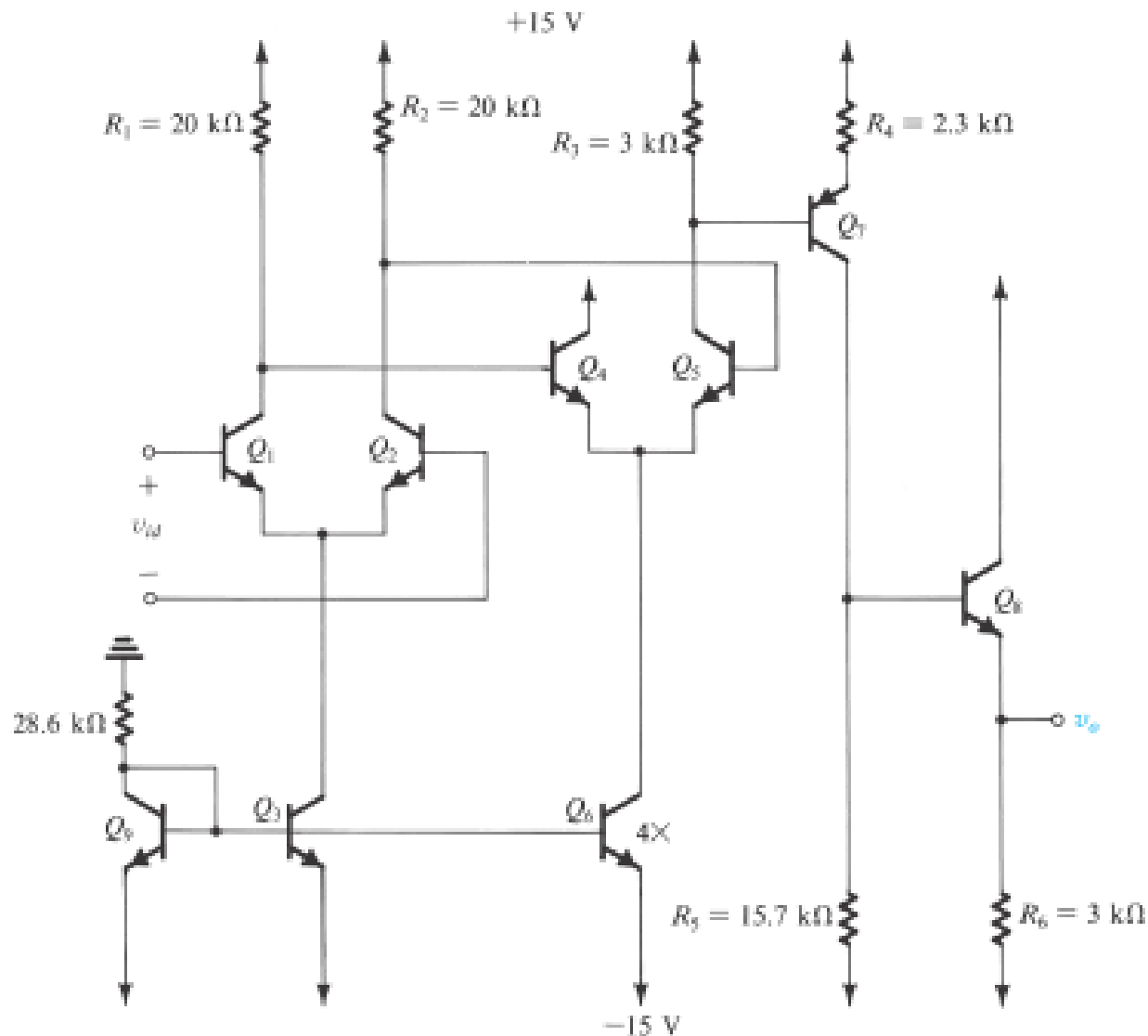
Transistor Bipolar de Junção (TBJ ou BJT) (Operação)



$$I_E = I_C + I_B$$

$$\beta_{CC} = \frac{I_C}{I_B}$$

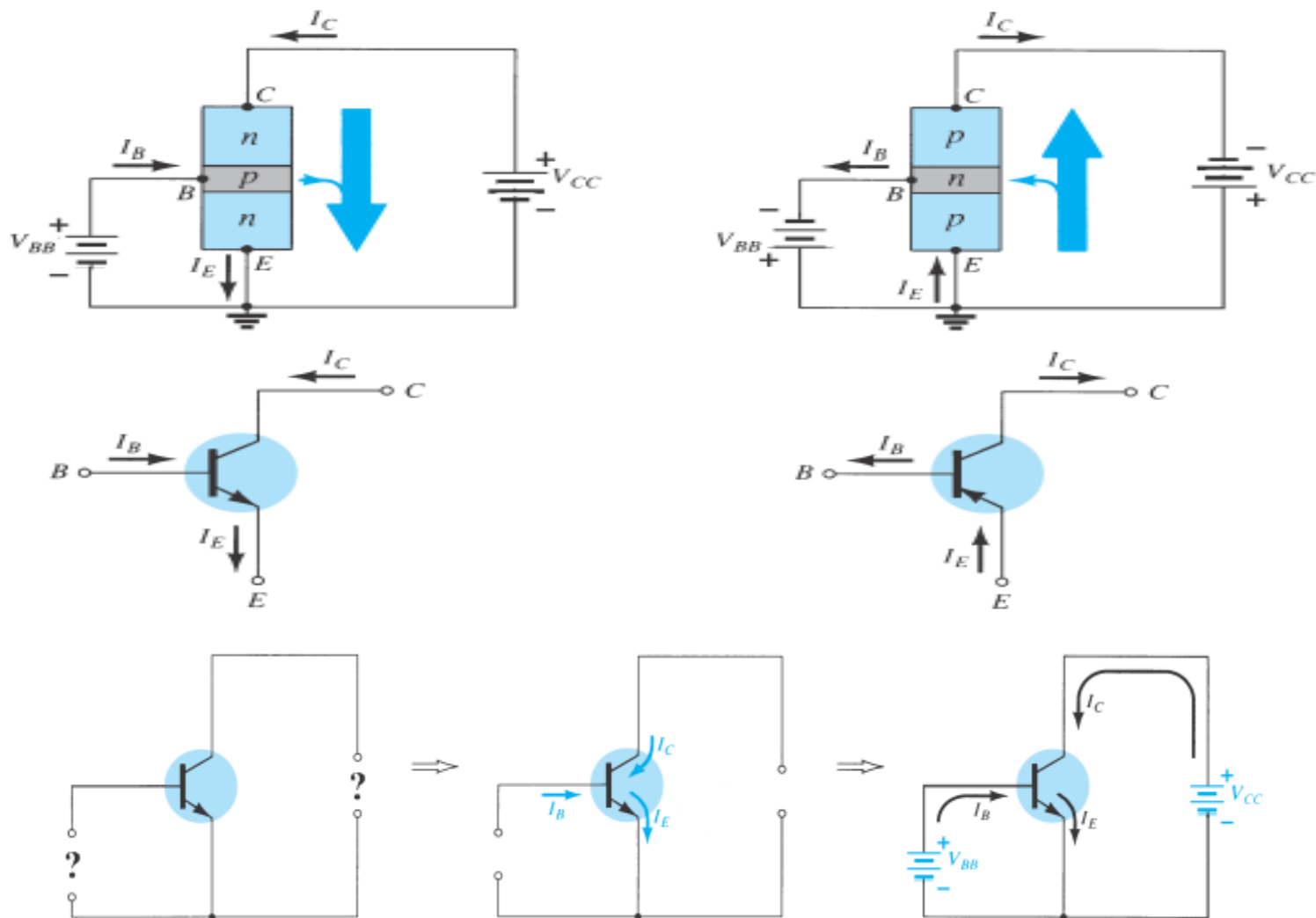
AMP-OP (TBJ)



Análise e Projeto De Amplificadores

- Necessário conhecer as respostas DC e AC;
- Aplica-se o teorema da superposição;
- Deve-se determinar uma faixa de operação e estabilidade (Imunidade a variação de temperatura, processo (Beta) e alimentação);
- Deve-se definir um ponto de operação (polarização DC);
- Analise de malhas (LTK e LCK) .

CONFIGURAÇÃO EMISSOR COMUM



CONFIGURAÇÃO EMISSOR COMUM

Curva $I_C \times V_{CE}$

(Pontos de Polarização)

A operação no corte, na saturação e nas regiões lineares das curvas características do TBJ são:

1. Operação na região linear (Ativa):

Junção base-emissor polarizada diretamente.

Junção base-coletor polarizada reversamente:

2. Operação na região de corte:

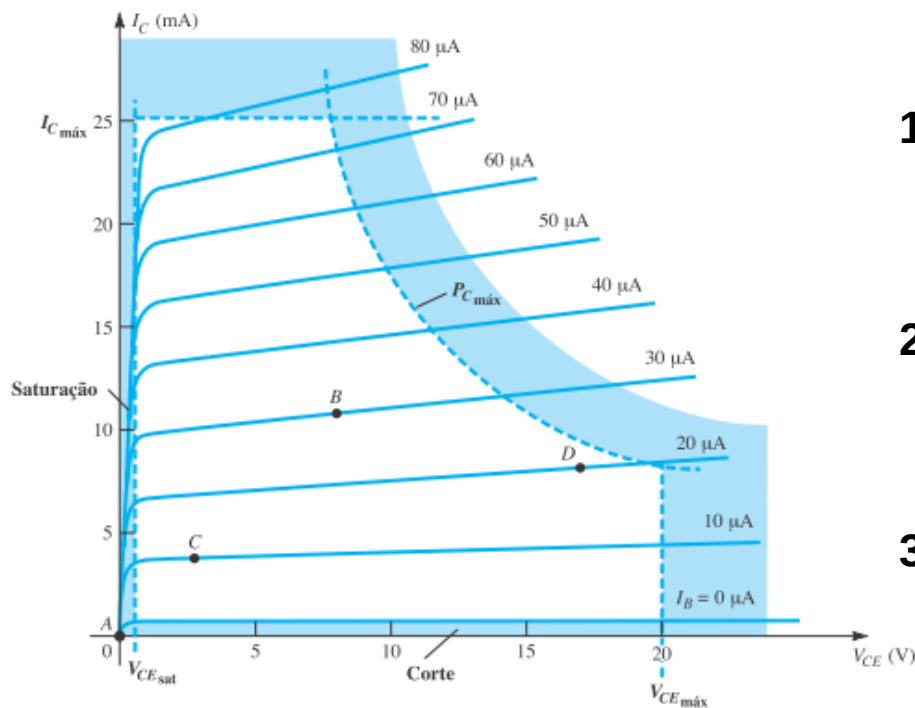
Junção base-emissor polarizada reversamente.

Junção base-coletor polarizada reversamente.

3. Operação na região de saturação:

Junção base-emissor polarizada diretamente.

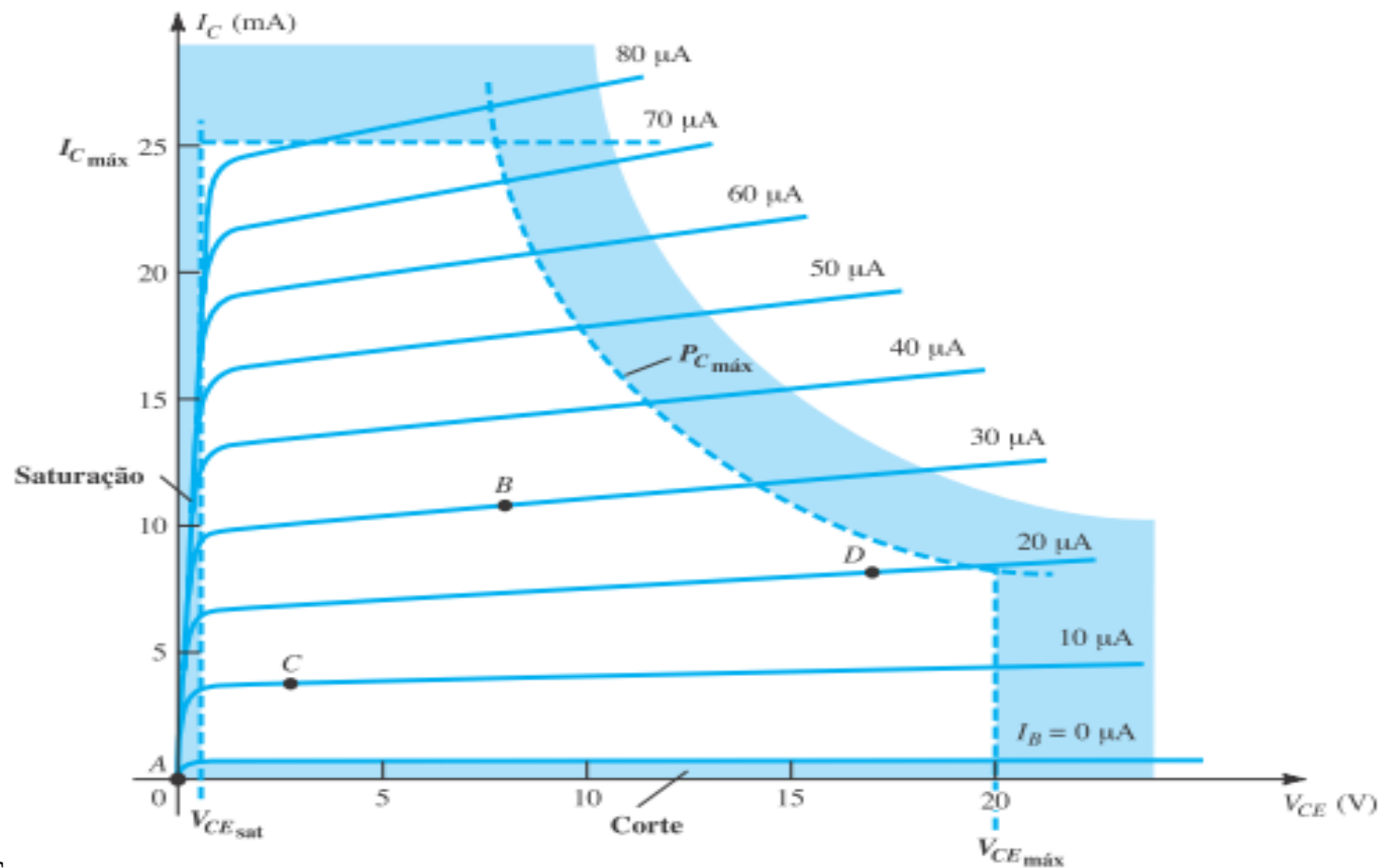
Junção base-coletor polarizada diretamente.



CONFIGURAÇÃO EMISSOR COMUM

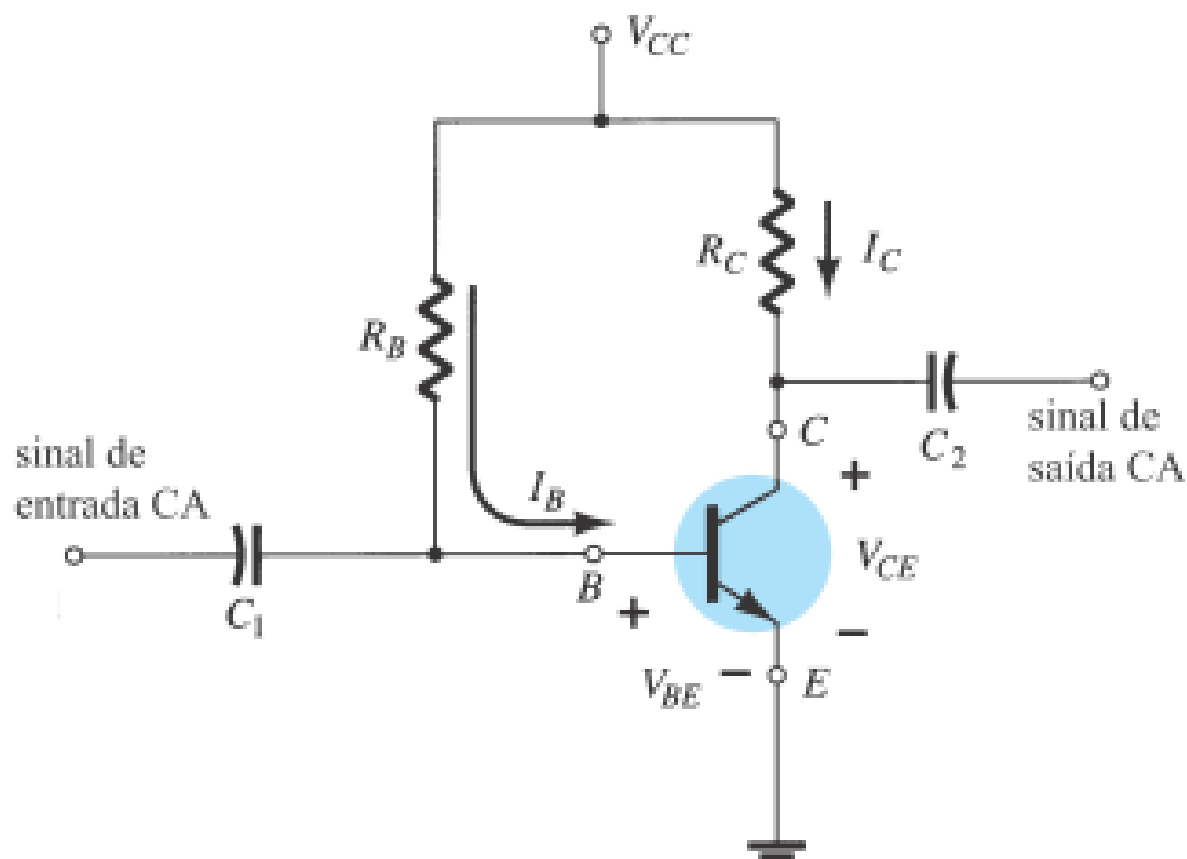
Curva $I_C \times V_{CE}$

(Pontos de Polarização)



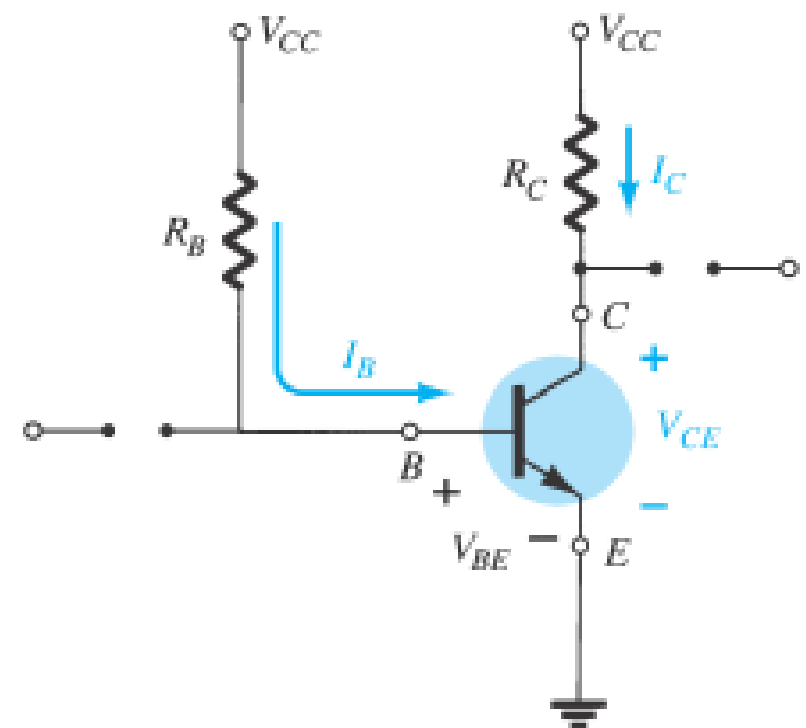
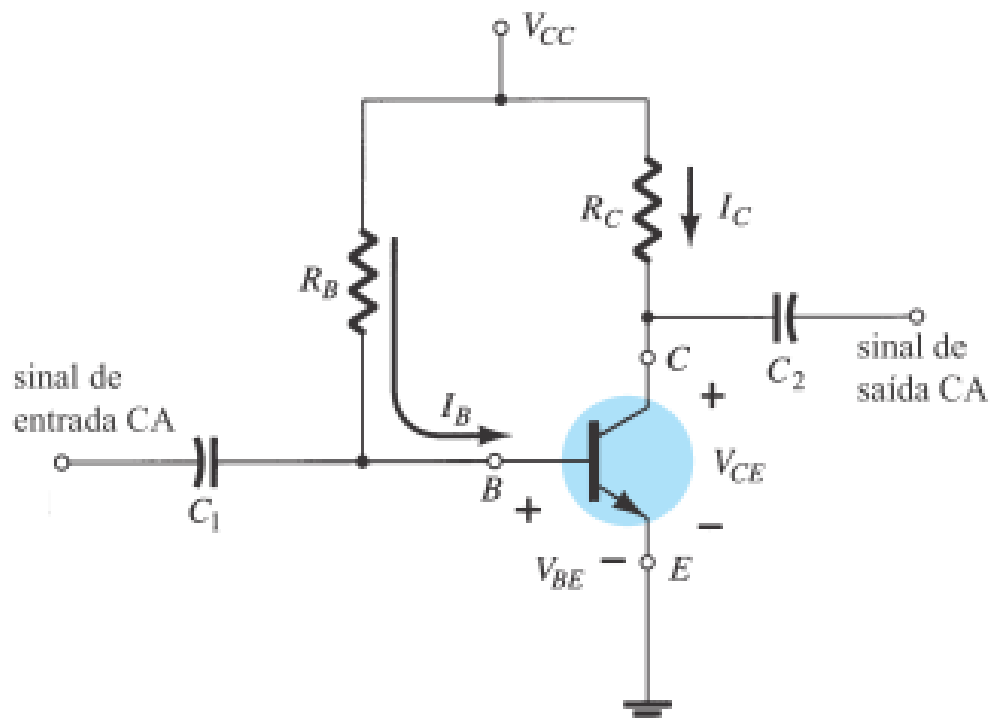
CONFIGURAÇÃO EMISSOR-COMUM

(Polarização – Fixa)



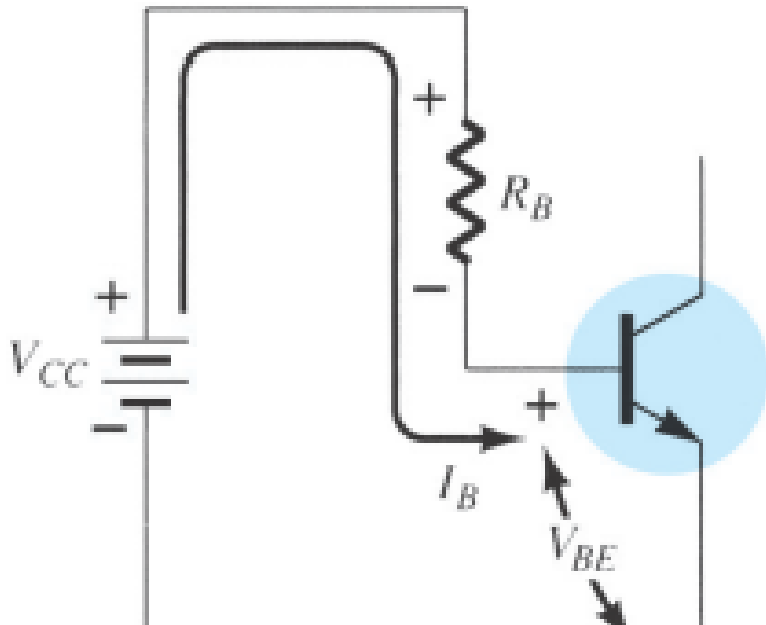
CONFIGURAÇÃO EMISSOR-COMUM

(Polarização – Fixa)



CONFIGURAÇÃO EMISSOR-COMUM

(Polarização – Fixa)



Analizando a malha base-emissor e aplicando LTK (Lei das Tensões de Kirchhoff) no sentido horário , obtemos:

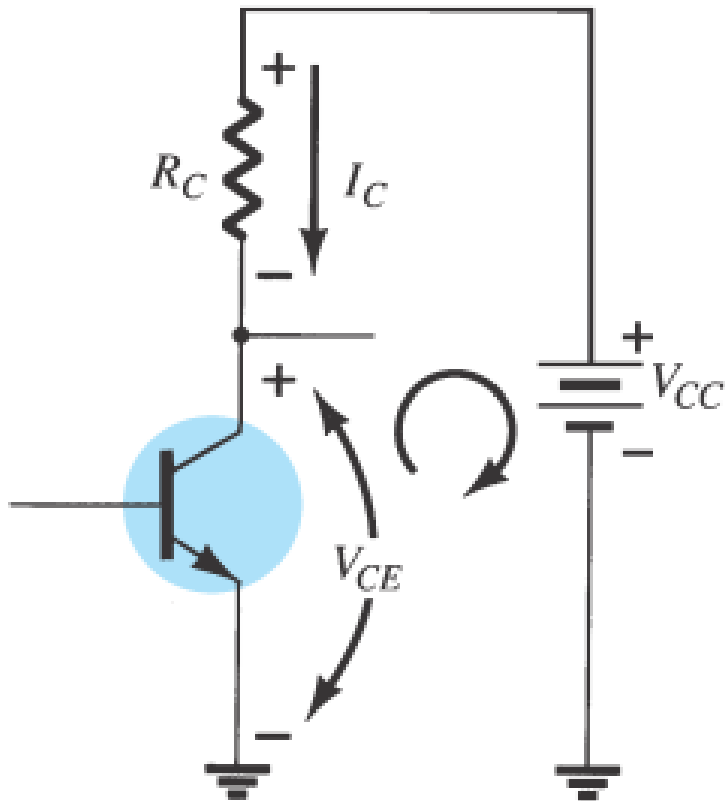
$$+V_{CC} - I_B R_B - V_{BE} = 0$$

Isolando a variável I_B , obtemos :

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B}$$

CONFIGURAÇÃO EMISSOR-COMUM

(Polarização – Fixa)



Analizando a malha coletor-emissor obteremos I_C da relação:

$$I_C = \beta I_B$$

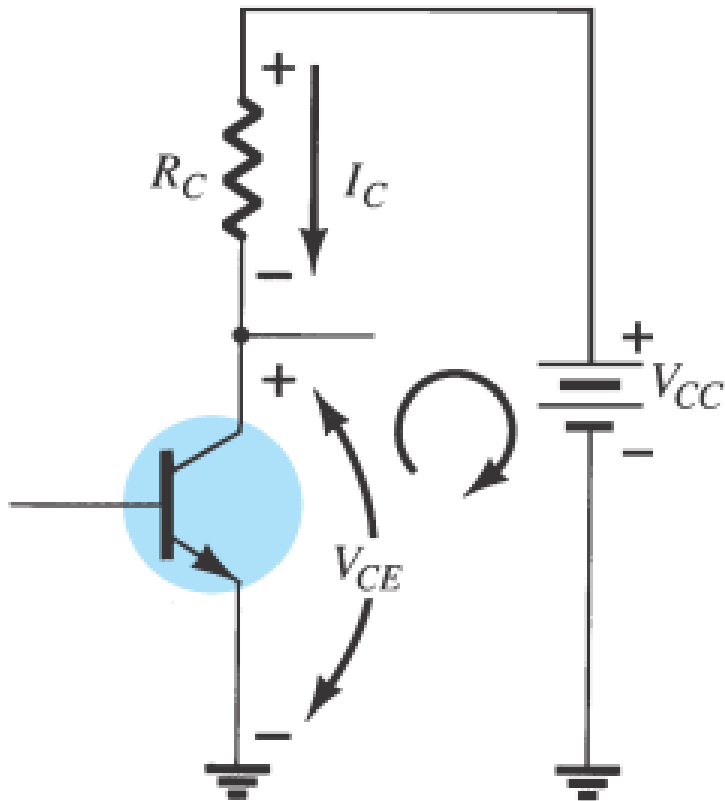
Analizando a malha coletor-emissor e aplicando LTK (Lei das Tensões de Kirchhoff) no sentido horário , obtemos:

$$V_{CE} + I_C R_C - V_{CC} = 0$$

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

CONFIGURAÇÃO EMISSOR-COMUM

(Polarização – Fixa)



Observando a malha coletor-emissor, obtemos os outros pontos de polarização da configuração:

$$V_{CE} = V_C - V_E$$

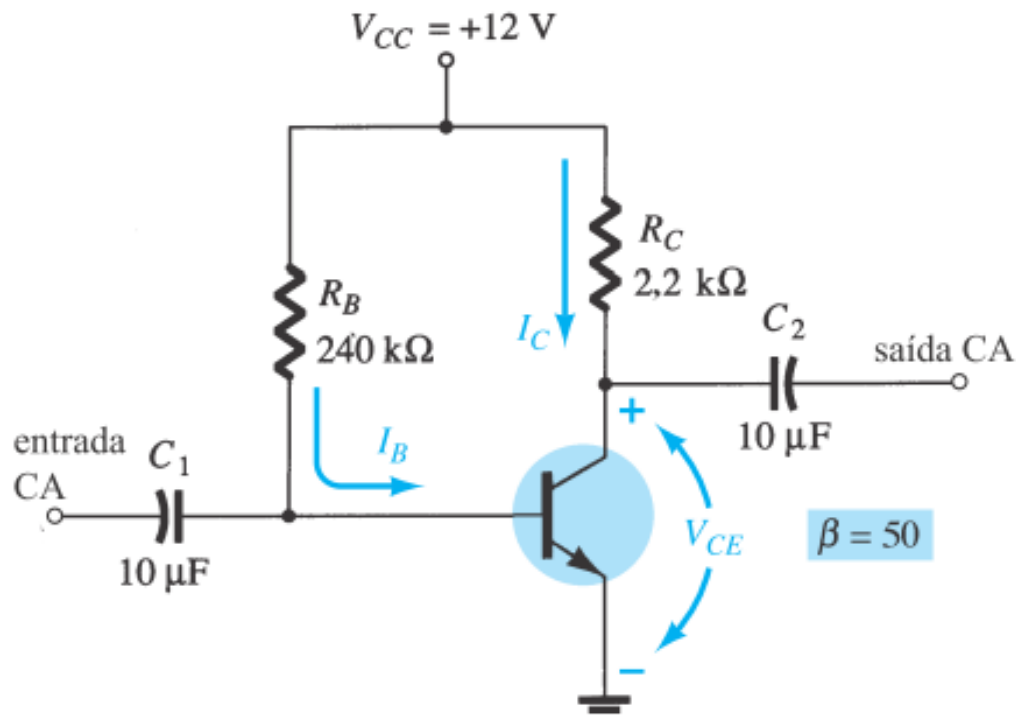
$$V_{CE} = V_C$$

$$V_{BE} = V_B - V_E$$

$$V_{BE} = V_B$$

CONFIGURAÇÃO EMISSOR-COMUM

(Exemplo – Polarização Fixa)

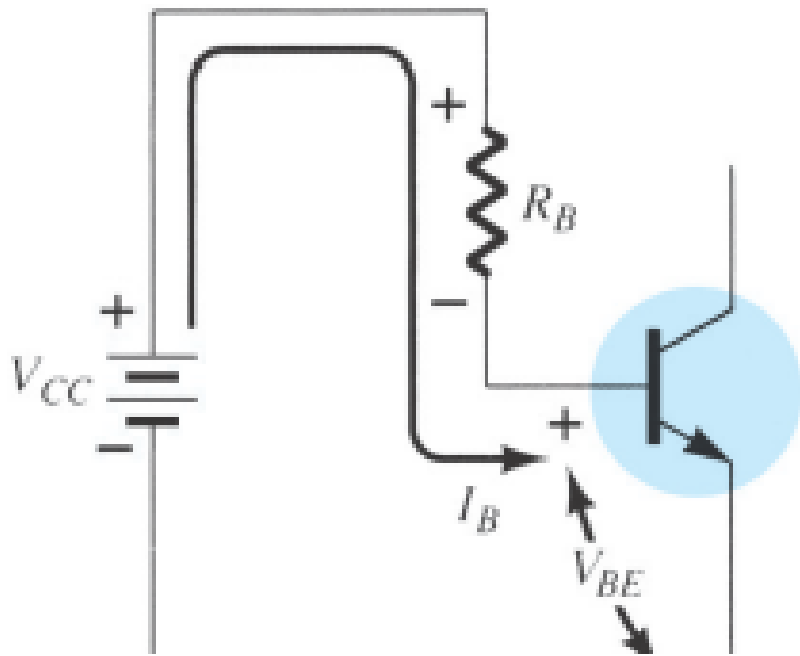


Para configuração de polarização fixa (Figura a esquerda), determine:

- a) I_{BQ} e I_{CQ}
- b) V_{CEQ}
- c) V_B e V_C
- d) V_{BC}

CONFIGURAÇÃO EMISSOR-COMUM

(Solução – Polarização Fixa)



Utilizando a equação de I_B , obtemos :

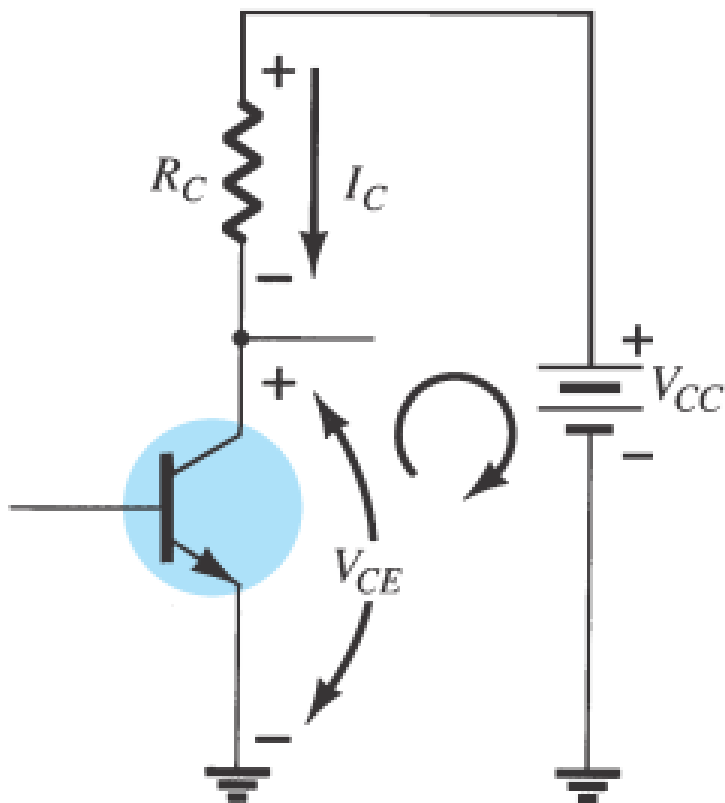
$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} = \frac{12\text{ V} - 0,7\text{ V}}{240\text{ k}\Omega} = 47,08\text{ }\mu\text{A}$$

Da relação abaixo:

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} = (50)(47,08\text{ }\mu\text{A}) = 2,35\text{ mA}$$

CONFIGURAÇÃO EMISSOR-COMUM

(Solução – Polarização - Fixa)



Utilizando a equação definida de VCE:

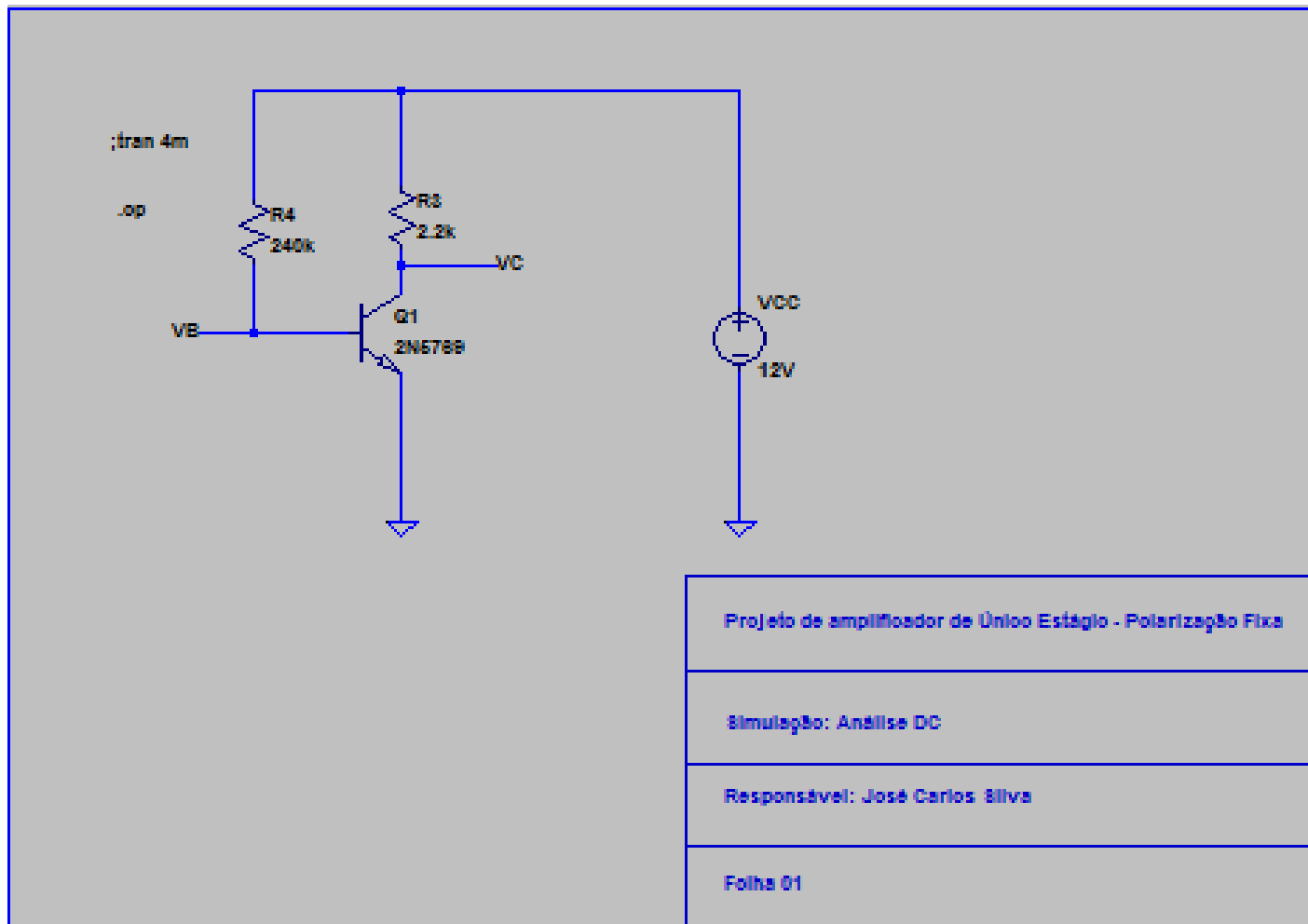
$$\begin{aligned} V_{CEQ} &= V_{CC} - I_C R_C \\ V_{CEQ} &= 12 \text{ V} - (2,35 \text{ mA})(2,2 \text{ k}\Omega) \\ V_{CEQ} &= \mathbf{6,83 \text{ V}} \end{aligned}$$

E outros pontos de polarização:

$$\begin{aligned} V_B &= V_{BE} = \mathbf{0,7 \text{ V}} \\ V_C &= V_{CE} = \mathbf{6,83 \text{ V}} \\ V_{BC} &= V_B - V_C = 0,7 \text{ V} - 6,83 \text{ V} \\ V_{BC} &= \mathbf{-6,13 \text{ V}} \end{aligned}$$

CONFIGURAÇÃO EMISSOR-COMUM

(Simulação – Polarização Fixa)



CONFIGURAÇÃO EMISSOR-COMUM

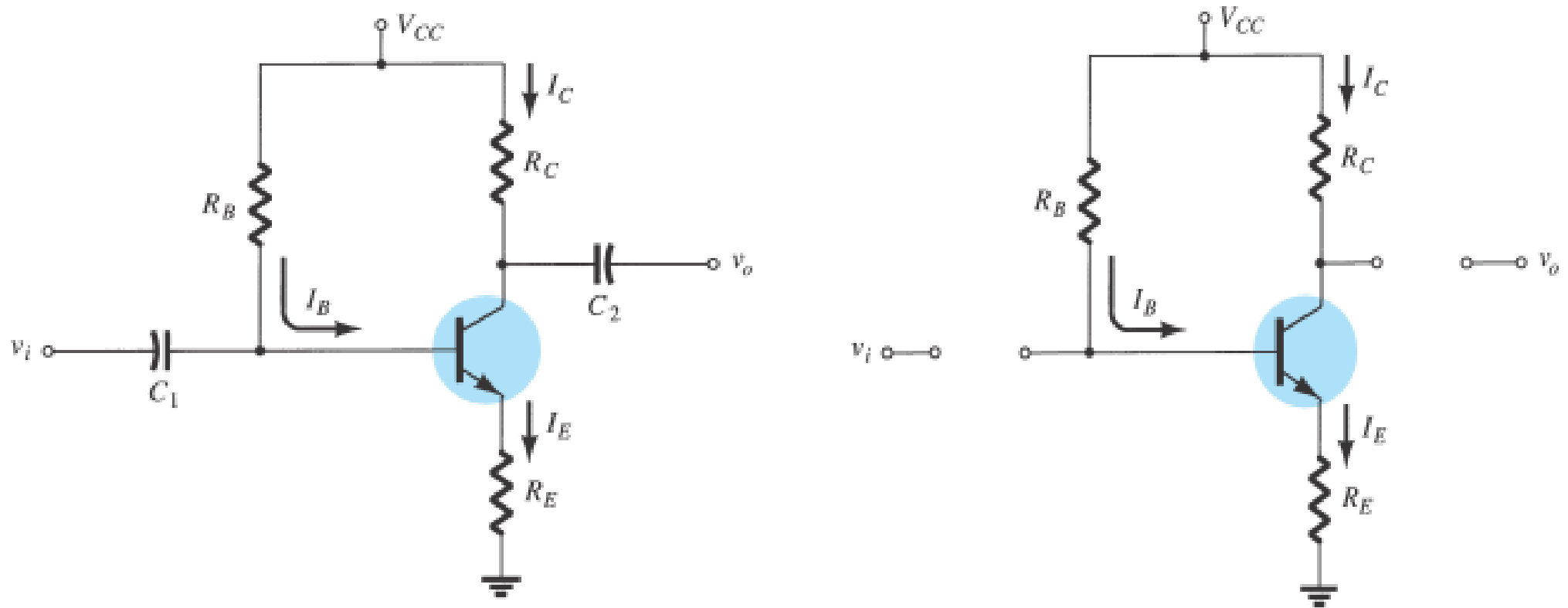
(Simulação – Polarização Fixa)

--- Operating Point ---

V(vc) :	6.8649	voltage
V(vb) :	0.796156	voltage
V(n002) :	12	voltage
Ic (Q1) :	0.00233416	device_current
Ib (Q1) :	4.66833e-005	device_current
Ie (Q1) :	-0.00238085	device_current
I (R4) :	4.66827e-005	device_current
I (R3) :	0.00233413	device_current
I (Vcc) :	-0.00238082	device_current

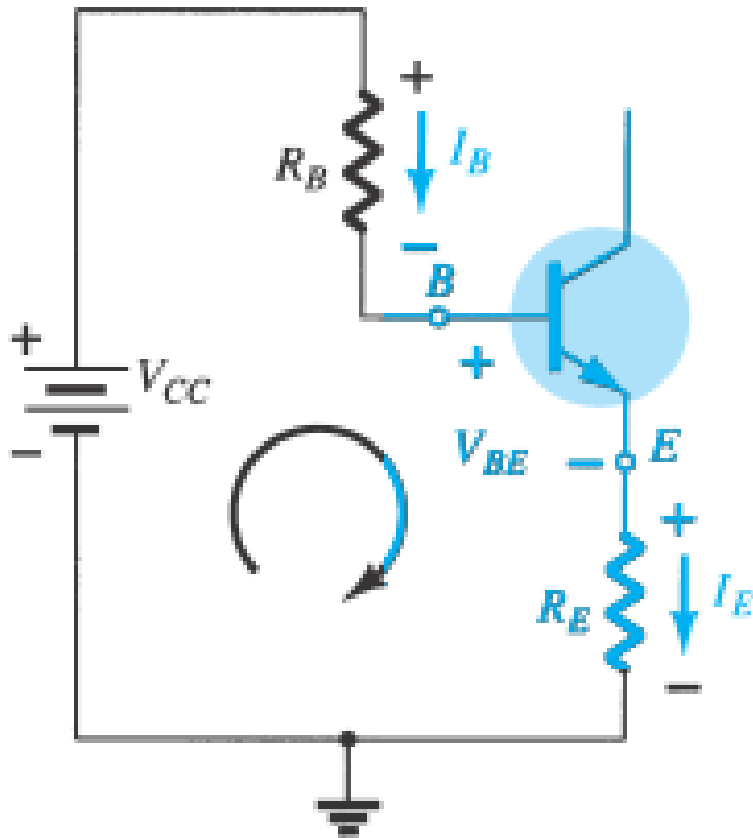
CONFIGURAÇÃO EMISSOR-COMUM

(Polarização Do Emissor)



CONFIGURAÇÃO EMISSOR-COMUM

(Polarização Do Emissor)



Analizando a malha base emissor e aplicando LTK (Lei das Tensões de Kirchhoff) no sentido horário , obtemos:

$$+V_{CC} - I_B R_B - V_{BE} - I_E R_E = 0$$

Usando a relação abaixo:

$$I_E = I_C + I_B$$

$$I_E = \beta I_B + I_B$$

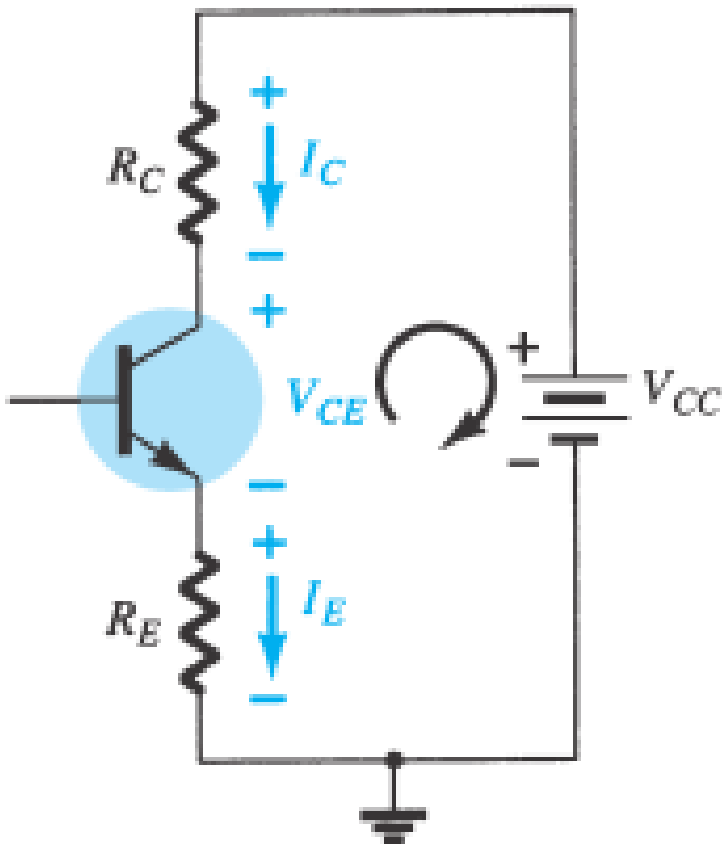
$$I_E = (\beta + 1)I_B$$

Substituindo a I_E na equação da malha base emissor e isolando a variável I_B , obtemos :

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

CONFIGURAÇÃO EMISSOR-COMUM

(Polarização Do Emissor)



Observando a malha coletor-emissor, obtemos os outros pontos de polarização da configuração:

$$+I_E R_E + V_{CE} + I_C R_C - V_{CC} = 0$$

Usando a relação abaixo:

$$I_E \cong I_C$$

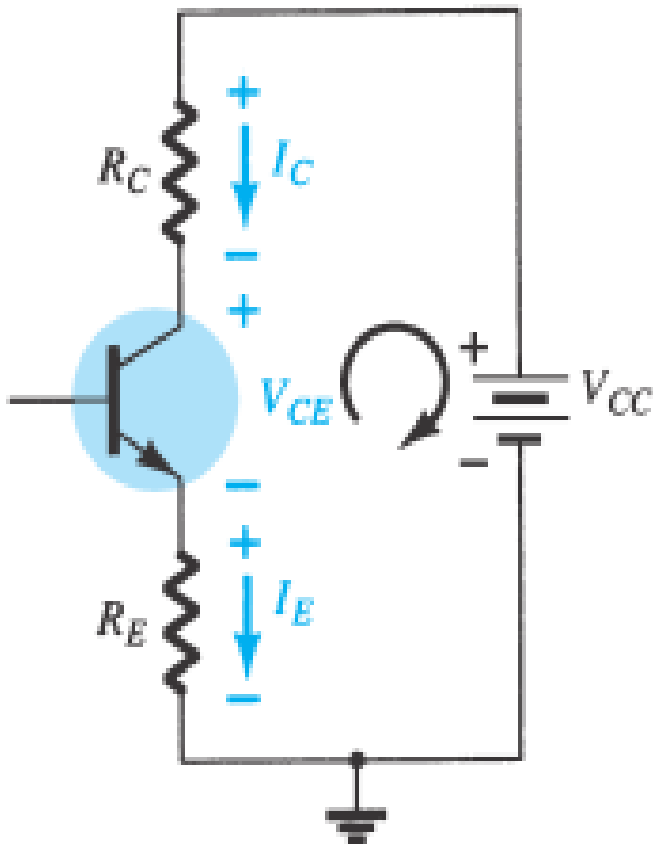
Substituindo a I_E na equação da malha coletor emissor e isolando a variável I_B , obtemos :

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C(R_C + R_E)$$

CONFIGURAÇÃO EMISSOR-COMUM

(Polarização Do Emissor)

Observando os pontos de polarização e manipulando as equações definimos as tensões de polarização



$$V_E = I_E R_E$$

$$V_C = V_{CE} + V_E$$

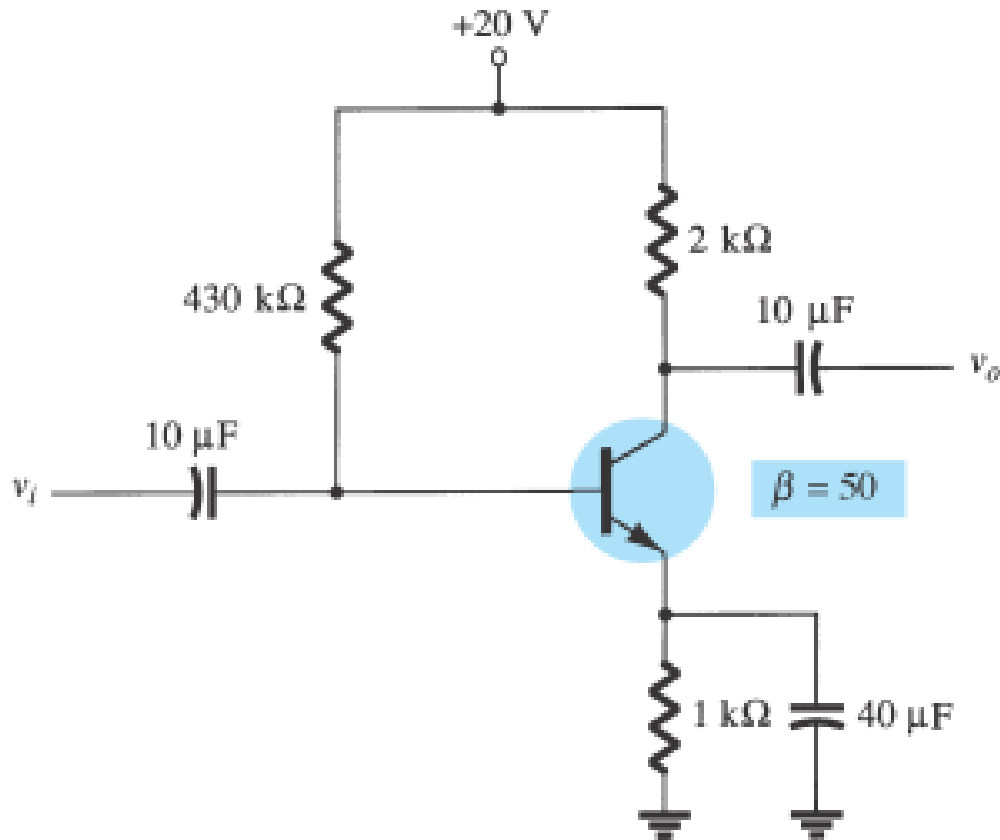
$$V_C = V_{CC} - I_C R_C$$

$$V_B = V_{CC} - I_B R_B$$

$$V_B = V_{BE} + V_E$$

CONFIGURAÇÃO EMISSOR-COMUM

(Exemplo – Polarização do Emissor)

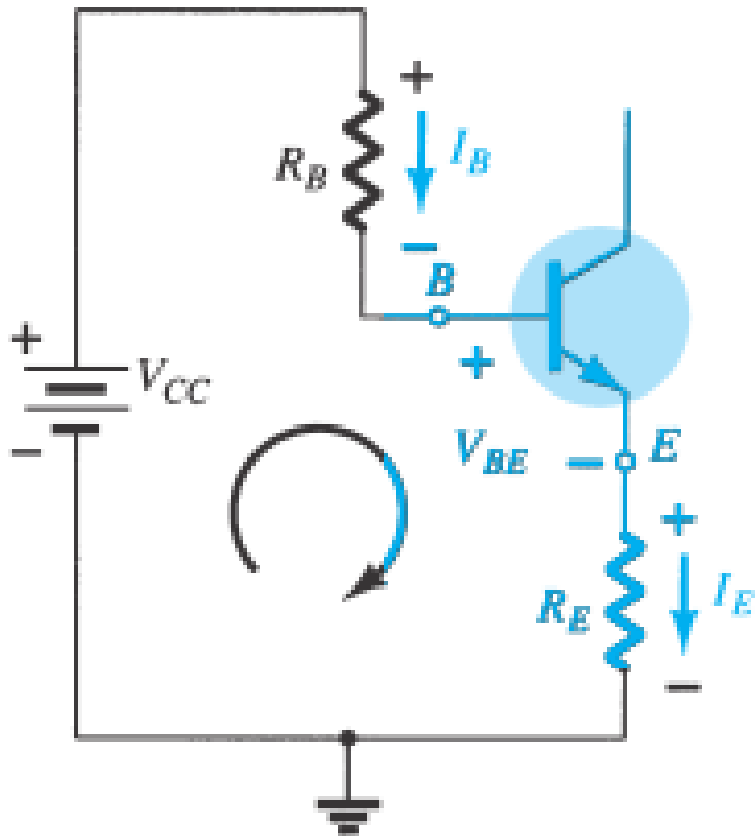


Para configuração de polarização do emissor (Figura a esquerda), determine:

- a) I_B
- b) I_C
- c) V_{CE}
- d) V_C
- e) V_E
- f) V_B
- g) V_{BC}

CONFIGURAÇÃO EMISSOR-COMUM

(Solução – Polarização do Emissor)



Utilizando a equação de I_B , obtemos :

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + (\beta + 1)R_E} = \frac{20 \text{ V} - 0,7 \text{ V}}{430 \text{ k}\Omega + (51)(1 \text{ k}\Omega)}$$

$$I_B = \frac{19,3 \text{ V}}{481 \text{ k}\Omega} = 40,1 \mu\text{A}$$

Da relação abaixo:

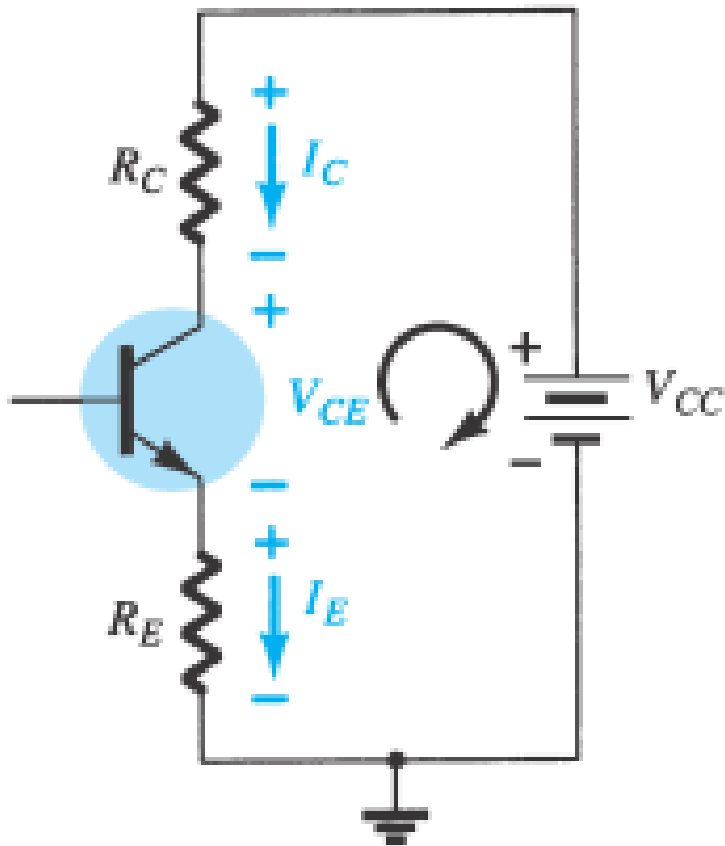
$$I_C = \beta I_B$$

$$I_C = (50)(40,1 \mu\text{A})$$

$$I_C \cong 2,01 \text{ mA}$$

CONFIGURAÇÃO EMISSOR-COMUM

(Solução – Polarização do Emissor)



Utilizando a equação definida de VCE:

$$\begin{aligned}V_{CE} &= V_{CC} - I_C(R_C + R_E) \\&= 20 \text{ V} - (2,01 \text{ mA})(2 \text{ k}\Omega + 1 \text{ k}\Omega) \\&= 20 \text{ V} - 6,03 \text{ V} = \mathbf{13,97 \text{ V}}\end{aligned}$$

E outros pontos de polarização:

$$\begin{aligned}V_C &= V_{CC} - I_C R_C \\&= 20 \text{ V} - (2,01 \text{ mA})(2 \text{ k}\Omega) = 20 \text{ V} - 4,02 \text{ V} \\&= \mathbf{15,98 \text{ V}}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}V_E &= V_C - V_{CE} \\&= 15,98 \text{ V} - 13,97 \text{ V} \\&= \mathbf{2,01 \text{ V}}\end{aligned}$$

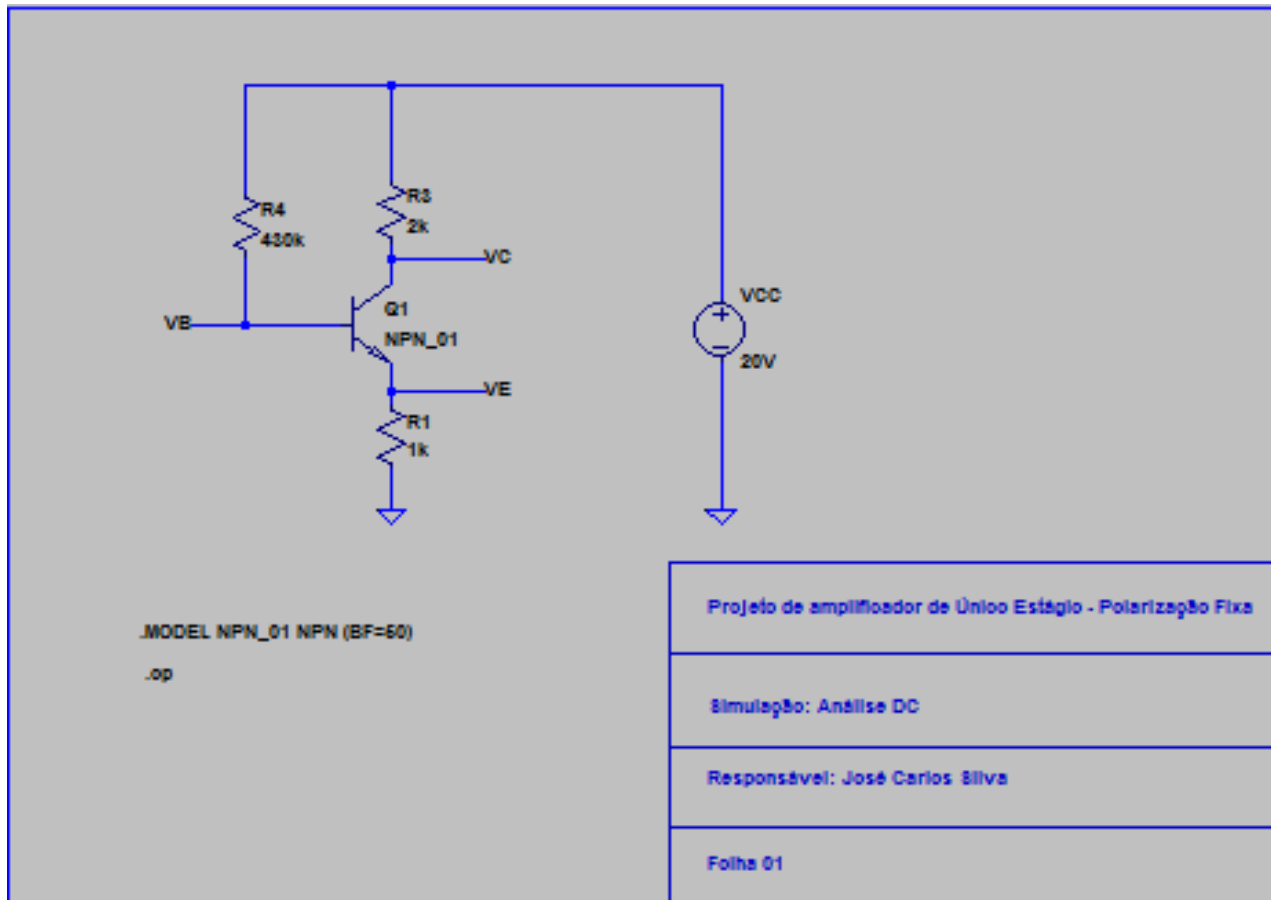
$$\begin{aligned}\text{ou } V_E &= I_E R_E \cong I_C R_E \\&= (2,01 \text{ mA})(1 \text{ k}\Omega) \\&= \mathbf{2,01 \text{ V}}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}V_B &= V_{BE} + V_E \\&= 0,7 \text{ V} + 2,01 \text{ V} \\&= \mathbf{2,71 \text{ V}}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}V_{BC} &= V_B - V_C \\&= 2,71 \text{ V} - 15,98 \text{ V} \\&= \mathbf{-13,27 \text{ V}} \text{ (com polarização reversa, como exigido)}\end{aligned}$$

CONFIGURAÇÃO EMISSOR-COMUM

(Simulação – Polarização Do Emissor)



CONFIGURAÇÃO EMISSOR-COMUM

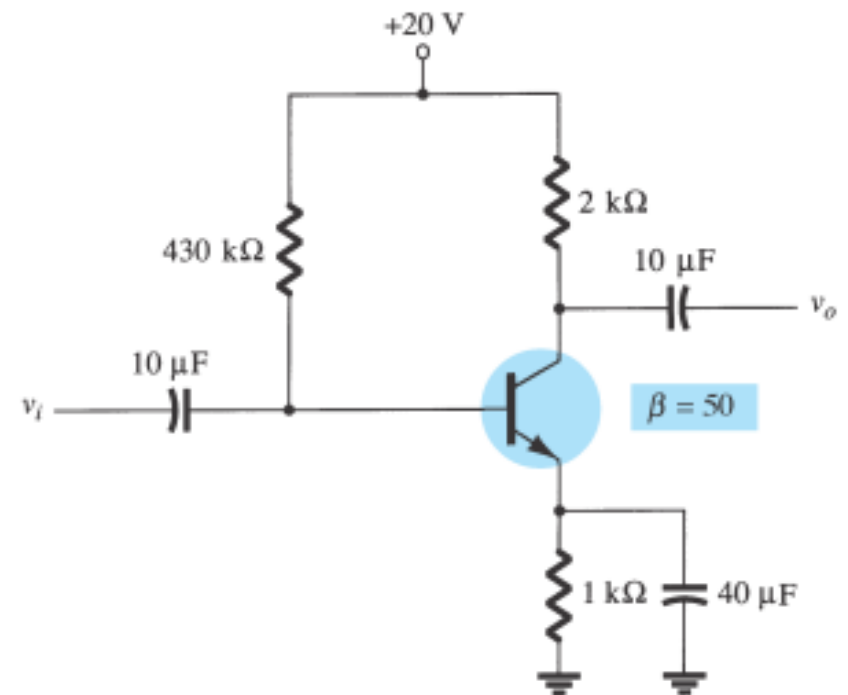
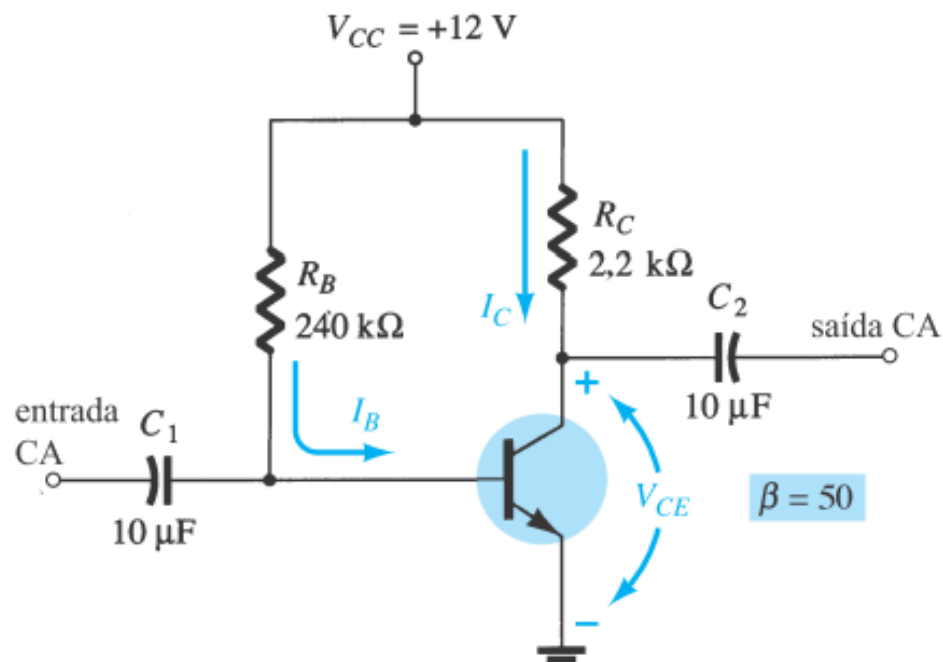
(Simulação – Polarização do Emissor)

--- Operating Point ---

V(vc) :	16.0067	voltage
V(vb) :	2.82871	voltage
V(ve) :	2.0366	voltage
V(n002) :	20	voltage
Ic(Q1) :	0.00199676	device_current
Ib(Q1) :	3.99352e-005	device_current
Ie(Q1) :	-0.00203669	device_current
I(R1) :	0.0020366	device_current
I(R4) :	3.99332e-005	device_current
I(R3) :	0.00199666	device_current
I(Vcc) :	-0.0020366	device_current

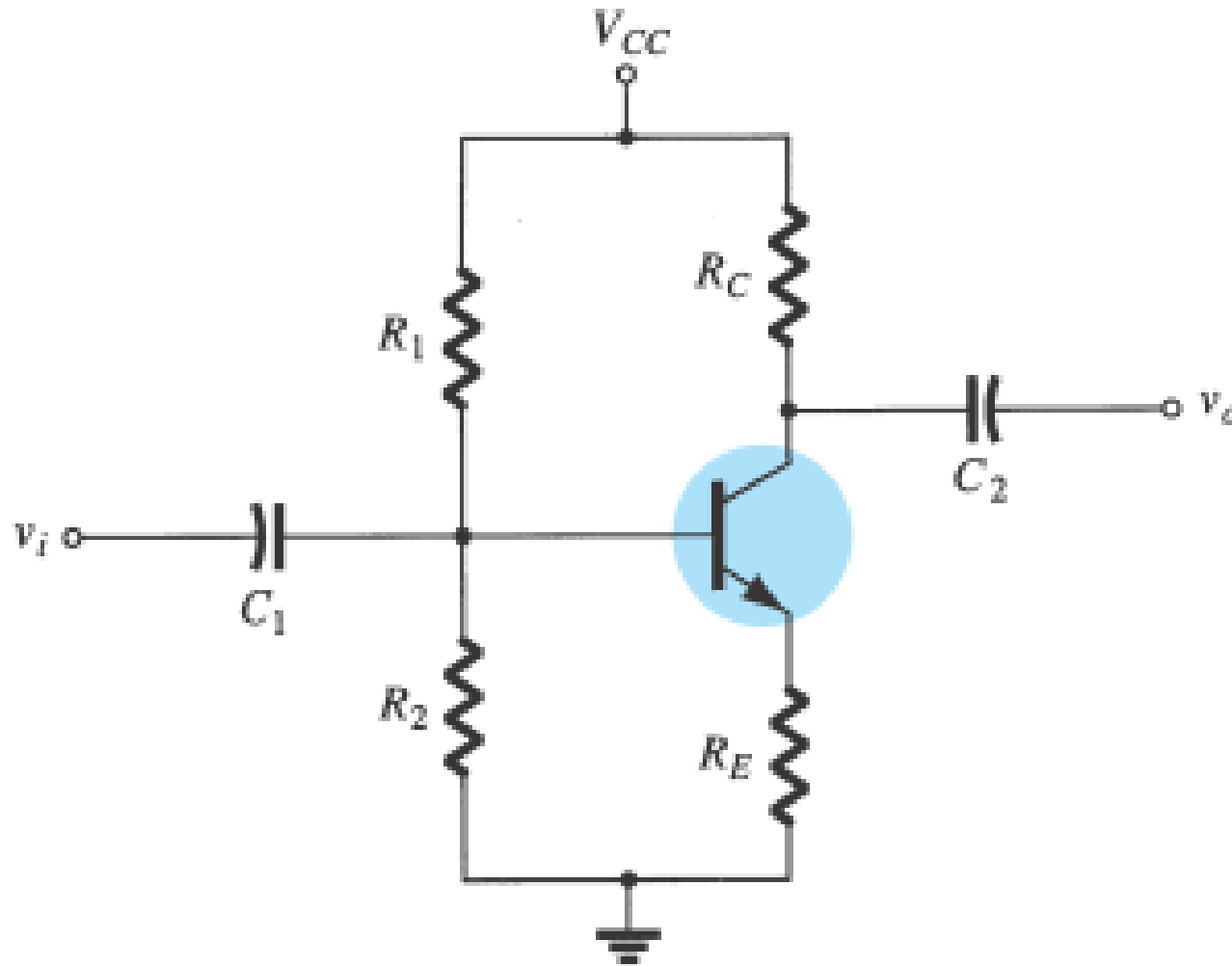
Atividades – Polarização Fixa e Polarização do Emissor

Prepare uma tabela e compare as tensões e correntes de polarização dos circuitos das figuras abaixo, para o valor de $\beta=50$ e para o novo valor de $\beta=100$. Compare as variações de I_C e V_{CE} para o aumento de β ,



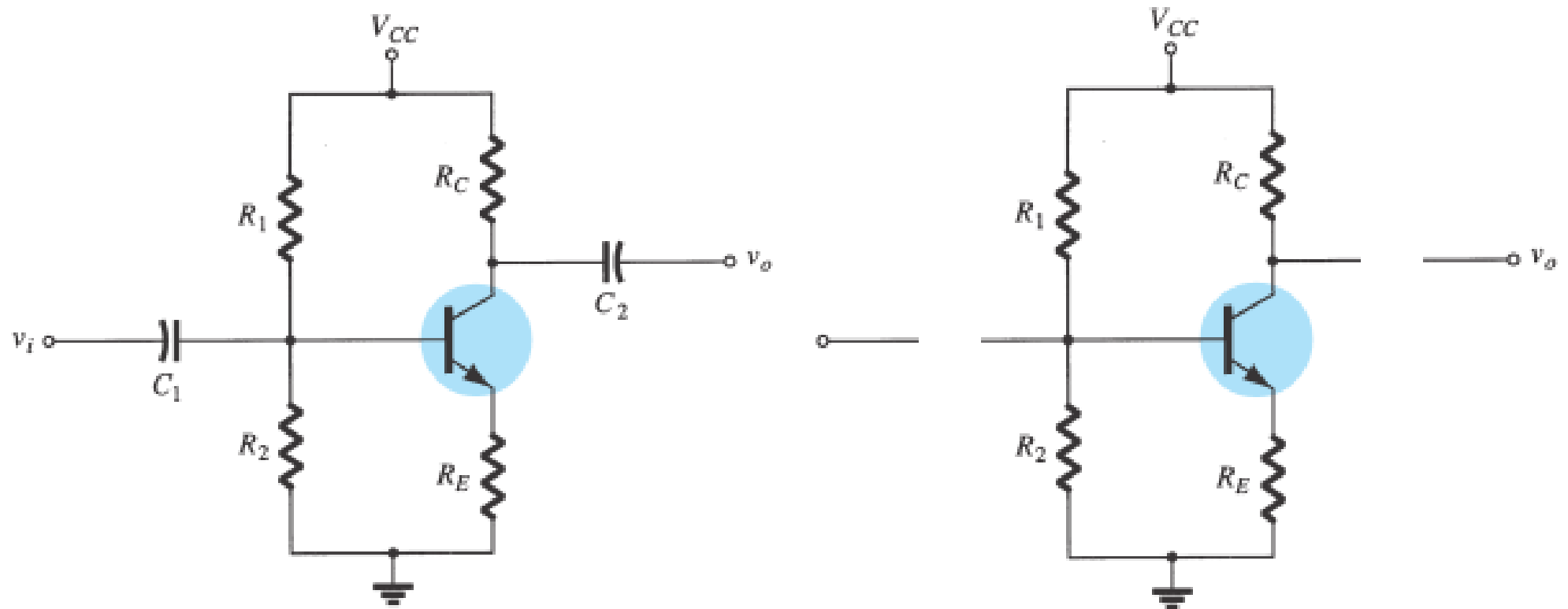
CONFIGURAÇÃO EMISSOR-COMUM

(Polarização Por Divisor de Tensão)



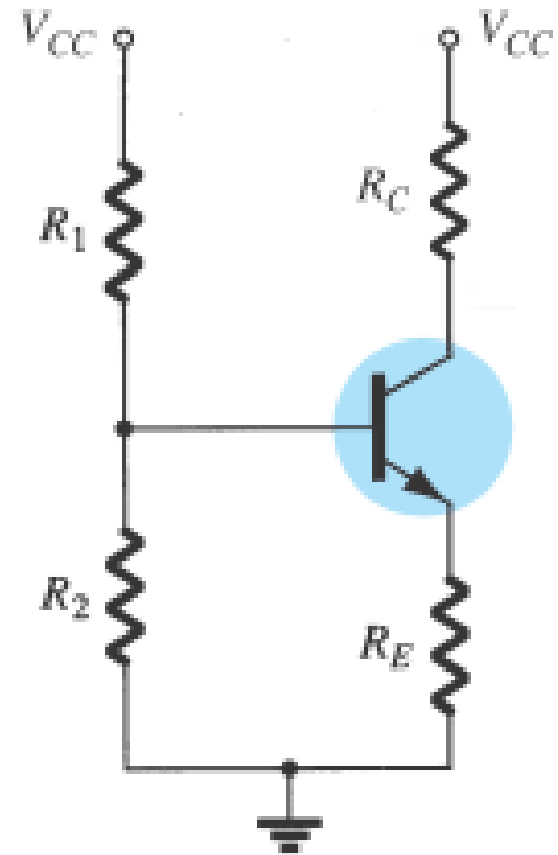
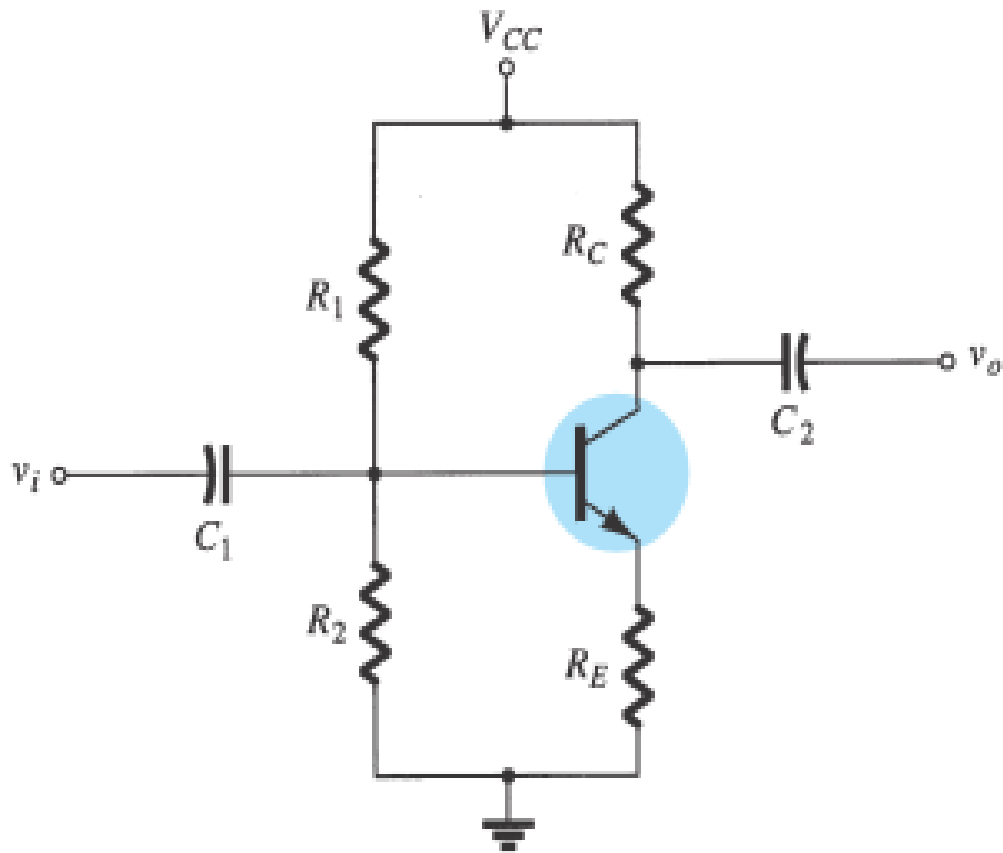
CONFIGURAÇÃO EMISSOR-COMUM

(Polarização Por Divisor de Tensão)



CONFIGURAÇÃO EMISSOR-COMUM

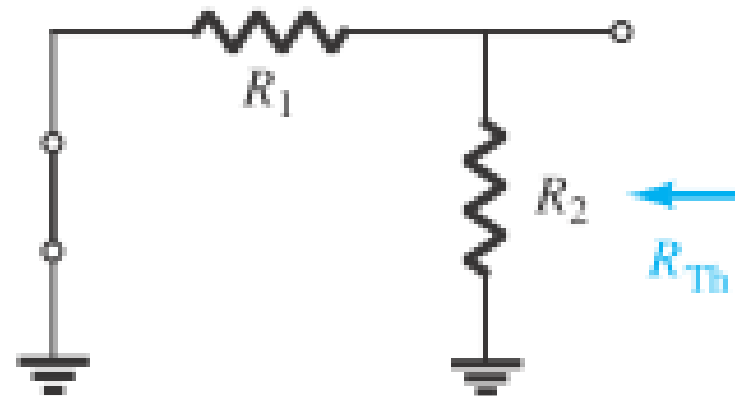
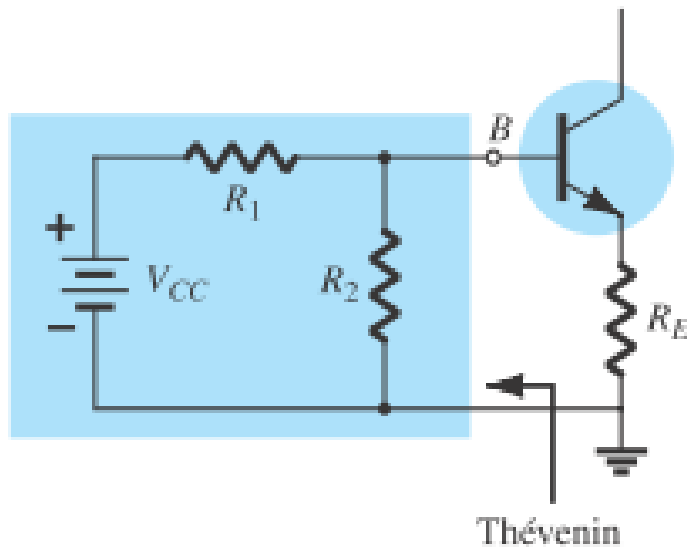
(Polarização Por Divisor de Tensão)



CONFIGURAÇÃO EMISSOR-COMUM

(Polarização Por Divisor de Tensão)

1 -Definir a Resistência Equivalente de Thévenin R_{TH} : Primeiramente substitui-se a fonte de tensão por um curto-circuito e utilizando e utilizando associação paralela de resistores temos:

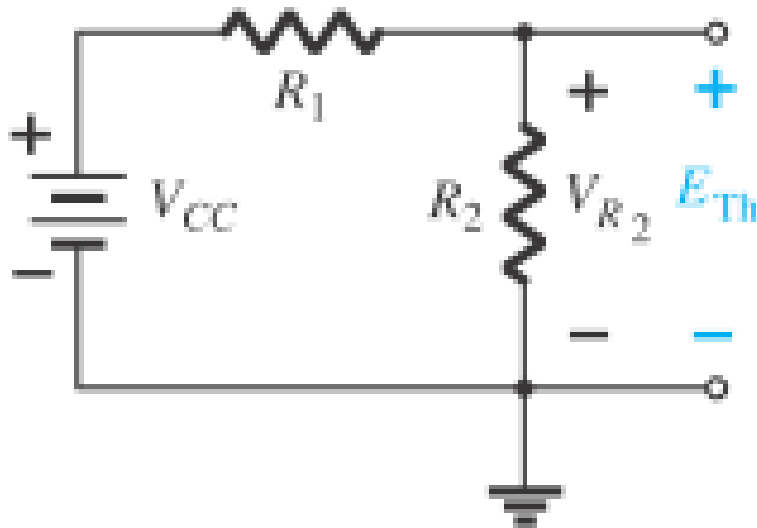


$$R_{TH} = R_1 \parallel R_2$$

CONFIGURAÇÃO EMISSOR-COMUM

(Polarização Por Divisor de Tensão)

2 -Definir a Tensão de Thévenin E_{TH} - Retornar a fonte de tensão V_{CC} no circuito; e a tensão de E_{TH} do circuito aberto é determinada (figura abaixo) como segue (Aplicando a regra do divisor de tensão):

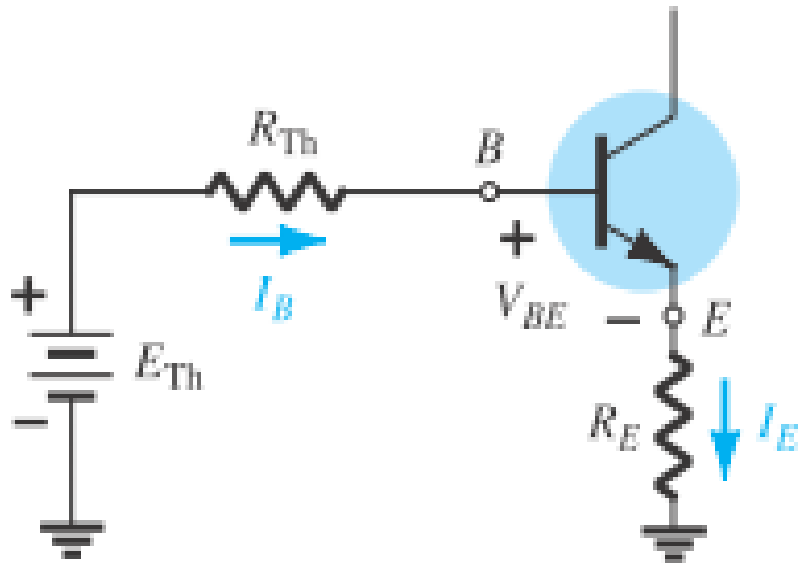


$$E_{Th} = V_{R_2} = \frac{R_2 V_{CC}}{R_1 + R_2}$$

CONFIGURAÇÃO EMISSOR-COMUM

(Polarização Por Divisor de Tensão)

3 - O circuito de Thévenin é redesenhado (figura abaixo) e determinamos a corrente de polarização I_{BQ} , utilizando LTK, no sentido horário da malha indicada:



$$E_{Th} - I_B R_{Th} - V_{BE} - I_E R_E = 0$$

Substituindo I_E em I_B :

$$I_E = (\beta + 1)I_B$$

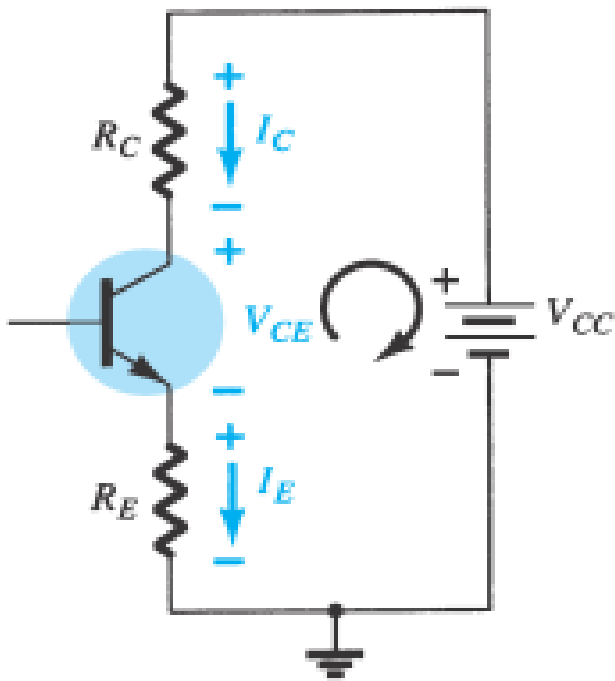
Temos I_B :

$$I_B = \frac{E_{Th} - V_{BE}}{R_{Th} + (\beta + 1)R_E}$$

CONFIGURAÇÃO EMISSOR-COMUM

(Polarização Por Divisão de Tensão)

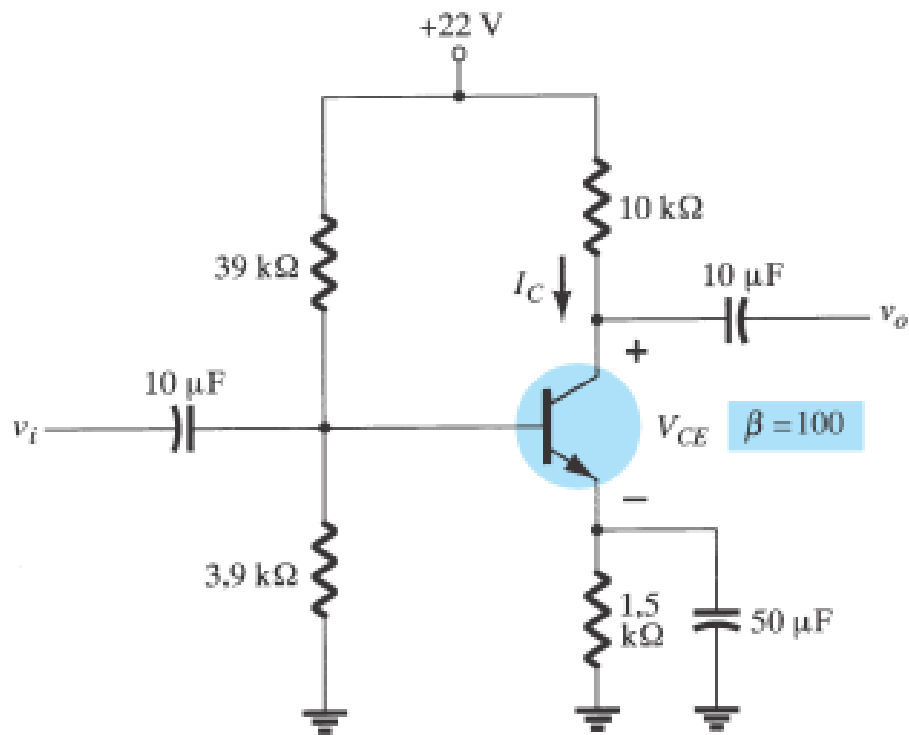
5 – Uma vez determinado I_{BQ} , as demais variáveis (I_C , V_{CE} , V_E , V_B , V_{BC}) são determinadas utilizando o mesmo procedimento utilizando para a configuração de polarização do emissor:



$$V_{CE} = V_{CC} - I_C(R_C + R_E)$$

CONFIGURAÇÃO EMISSOR-COMUM

(Exemplo – Polarização por Divisor de Tensão)

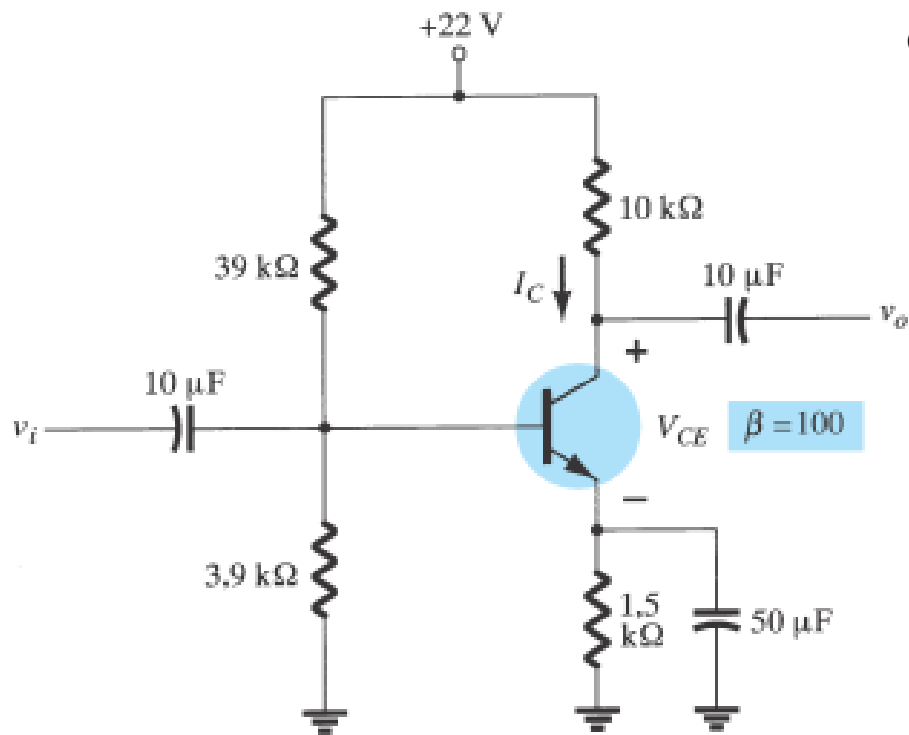


Para configuração de polarização por divisão de tensão (figura a esquerda), determine:

- a) I_{BQ} ;
- b) I_C ;
- c) V_{CE} ;
- d) V_E ;
- e) V_B ;
- f) V_{BC} .

CONFIGURAÇÃO EMISSOR-COMUM

(Exemplo – Polarização por Divisor de Tensão)



Utilizando o teorema de thévenin, podemos obter R_{TH} e E_{TH} :

$$R_{TH} = R_1 \parallel R_2$$

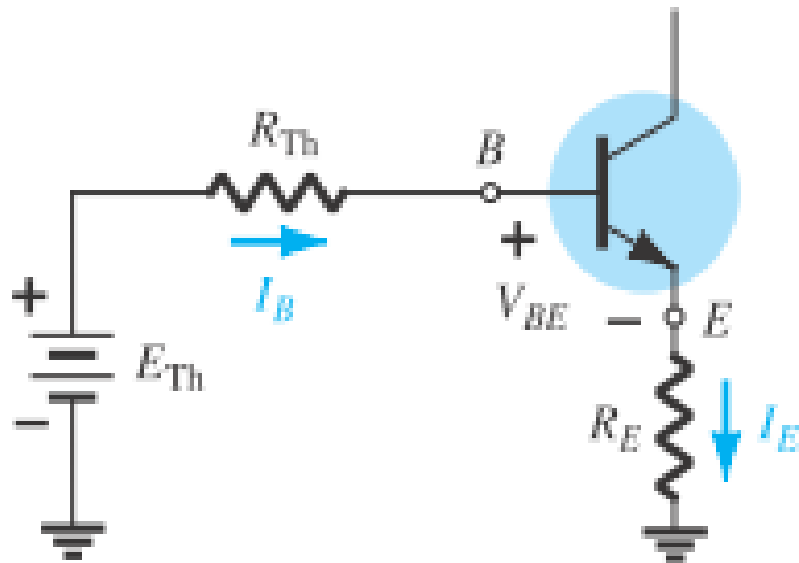
$$R_{TH} = \frac{(39 \text{ k}\Omega)(3,9 \text{ k}\Omega)}{39 \text{ k}\Omega + 3,9 \text{ k}\Omega} = 3,55 \text{ k}\Omega$$

$$E_{TH} = \frac{R_2 V_{CC}}{R_1 + R_2}$$

$$E_{TH} = \frac{(3,9 \text{ k}\Omega)(22 \text{ V})}{39 \text{ k}\Omega + 3,9 \text{ k}\Omega} = 2 \text{ V}$$

CONFIGURAÇÃO EMISSOR-COMUM

(Solução – Polarização por Divisor de Tensão)



Utilizando a equação de I_B , obtemos :

$$I_B = \frac{E_{Th} - V_{BE}}{R_{Th} + (\beta + 1)R_E}$$
$$I_B = \frac{2\text{ V} - 0,7\text{ V}}{3,55\text{ k}\Omega + (101)(1,5\text{ k}\Omega)} = \frac{1,3\text{ V}}{3,55\text{ k}\Omega + 151,5\text{ k}\Omega}$$
$$I_B = 8,38\text{ }\mu\text{A}$$

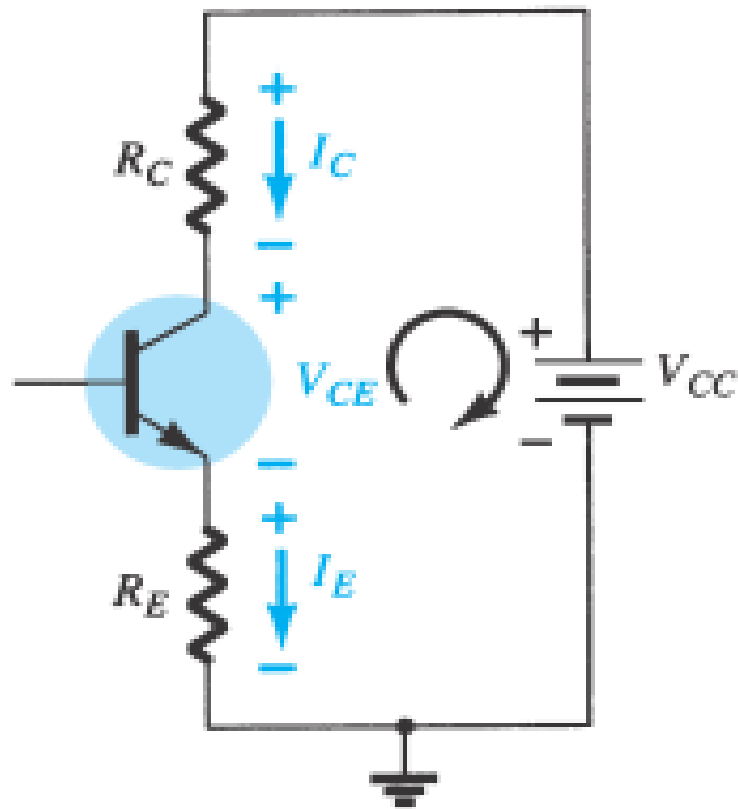
Da relação abaixo, determinamos I_C :

$$I_C = \beta I_B$$
$$I_C = (100)(8,38\text{ }\mu\text{A})$$
$$I_C = 0,84\text{ mA}$$

CONFIGURAÇÃO EMISSOR-COMUM

(Solução – Polarização por Divisor de Tensão)

Utilizando a equação de V_{CE} , obtemos :



$$V_{CE} = V_{CC} - I_C(R_C + R_E)$$

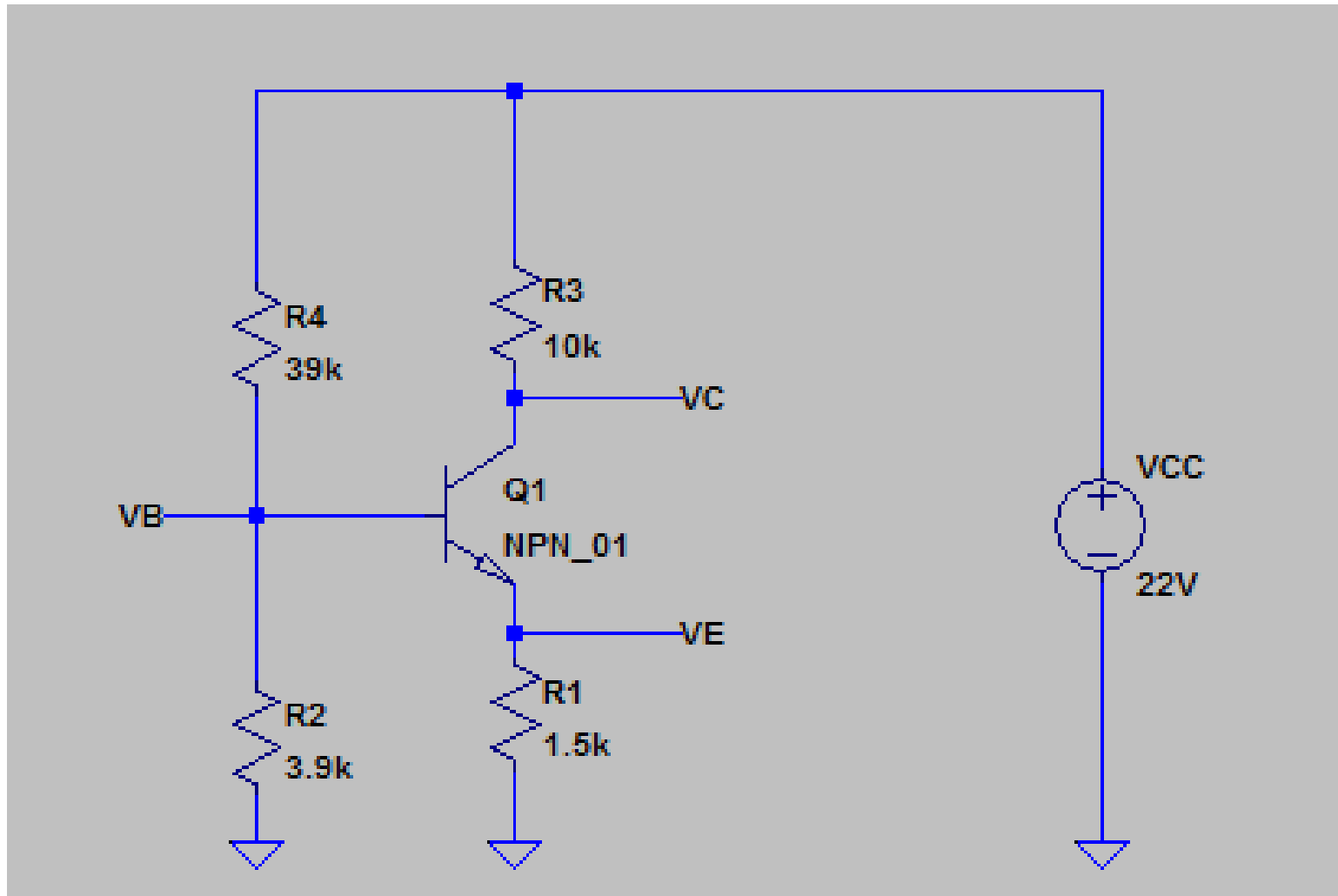
$$V_{CE} = 22 \text{ V} - (0,84 \text{ mA})(10 \text{ k}\Omega + 1,5 \text{ k}\Omega)$$

$$V_{CE} = 22 \text{ V} - 9,66 \text{ V}$$

$$V_{CE} = 12,34 \text{ V}$$

CONFIGURAÇÃO EMISSOR-COMUM

(Simulação – Polarização Por Divisor de Tensão)



CONFIGURAÇÃO EMISSOR-COMUM

(Simulação – Polarização Por Divisor de Tensão)

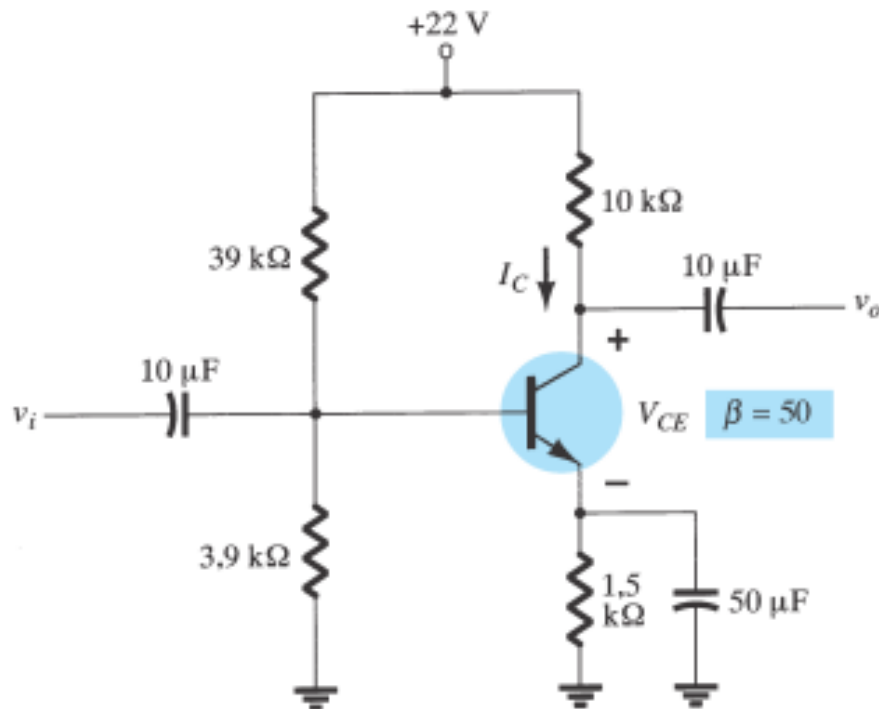
--- Operating Point ---

V(vc) :	14.0557	voltage
V(vb) :	1.97183	voltage
V(ve) :	1.20355	voltage
V(n002) :	22	voltage
Ic(Q1) :	0.00079445	device_current
Ib(Q1) :	7.94449e-006	device_current
Ie(Q1) :	-0.000802395	device_current
I(R2) :	0.000505598	device_current
I(R1) :	0.00080237	device_current
I(R4) :	0.000513543	device_current
I(R3) :	0.000794425	device_current
I(Vcc) :	-0.00130797	device_current

CONFIGURAÇÃO EMISSOR-COMUM

(Exemplo – Polarização por Divisor de Tensão)

Para configuração de polarização por divisão de tensão (figura a esquerda), determine:



a) I_{BQ} ;

b) I_C ;

c) V_{CE} ;

d) V_E ;

e) V_B ;

f) V_{BC} ;

g) Montar uma tabela comparando os resultados deste exercício com os dos exercícios anteriores.

Referencias

- Boylestad e Nashelsky. “Dispositivos Eletrônicos e teoria de circuitos”, Prentice Hall, 11 Edição, 784p, 2013;
- Sedra e Smith, “Microeletrônica”, Pearson Prentice Hall, 5 Edição, 948p, 2007.