



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

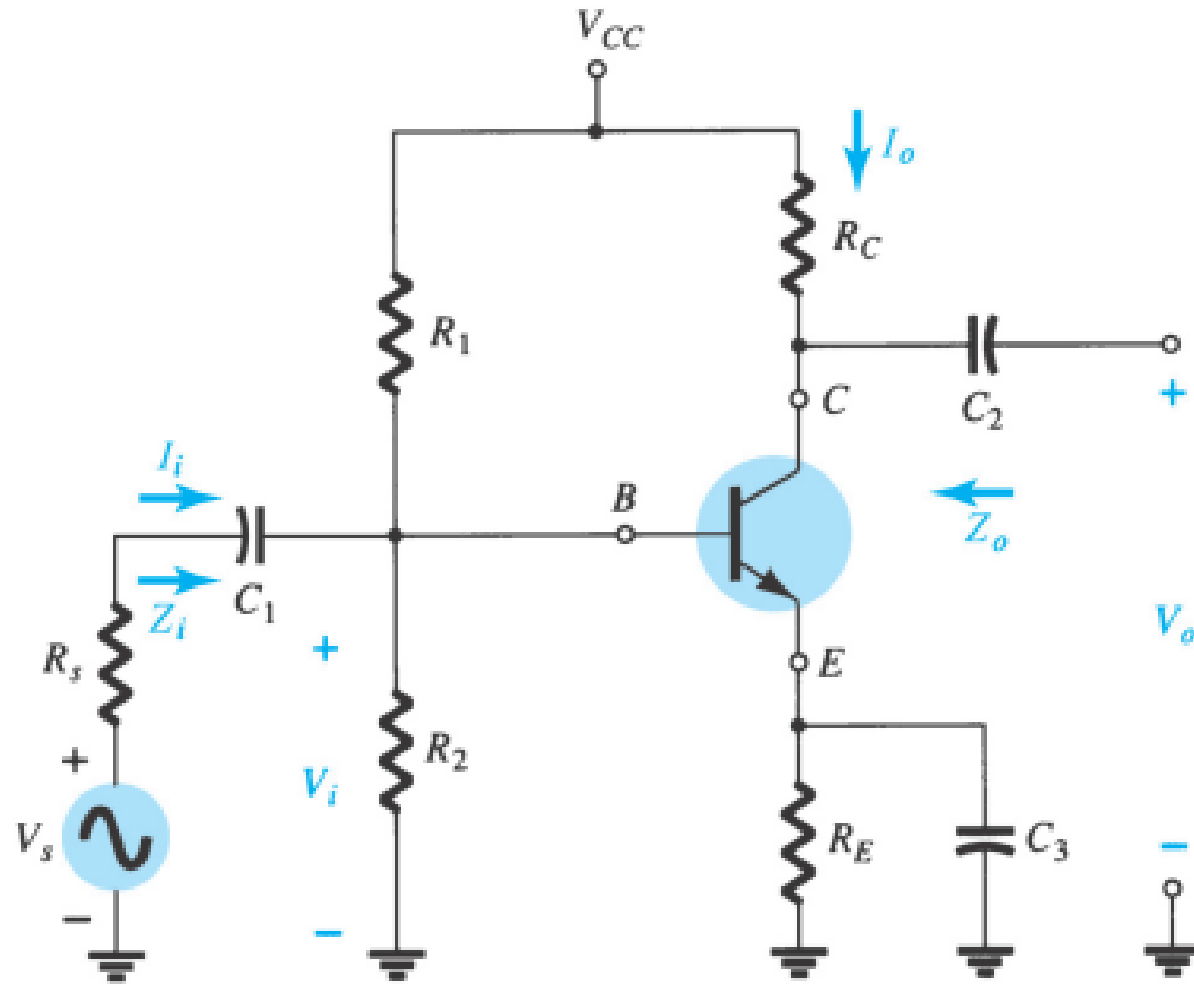
whatsApp: 19-993960156

Setembro/2021

Analise e Projeto De Amplificadores

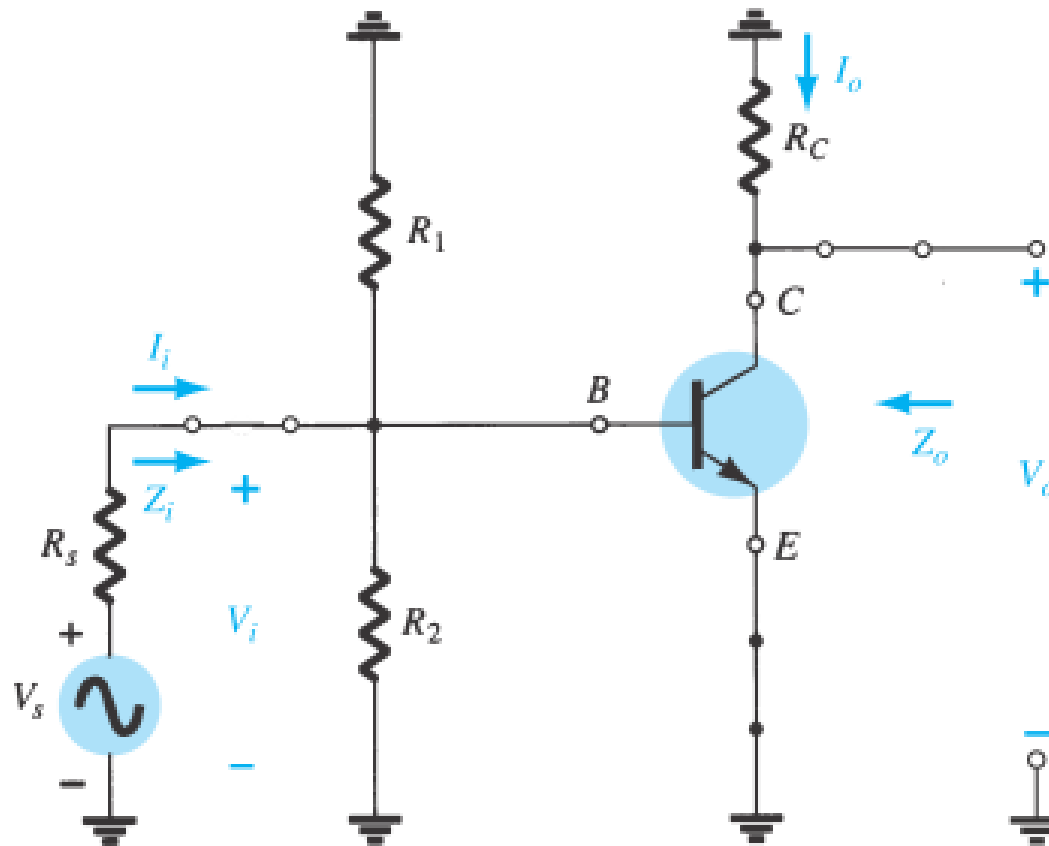
- Será necessário realizar:
 - Analise DC (Polarização DC);
 - Analise AC (Impedância de entrada e saída, ganho e etc).
- Será necessário aplicar:
 - Teorema da superposição;
 - Analise de malhas (LTK e LCK);
- Será necessário determinar e analisar as faixas de operação e estabilidade (Imunidade a variação de temperatura, processo (Beta) e alimentação).

Analise AC (TBJ)



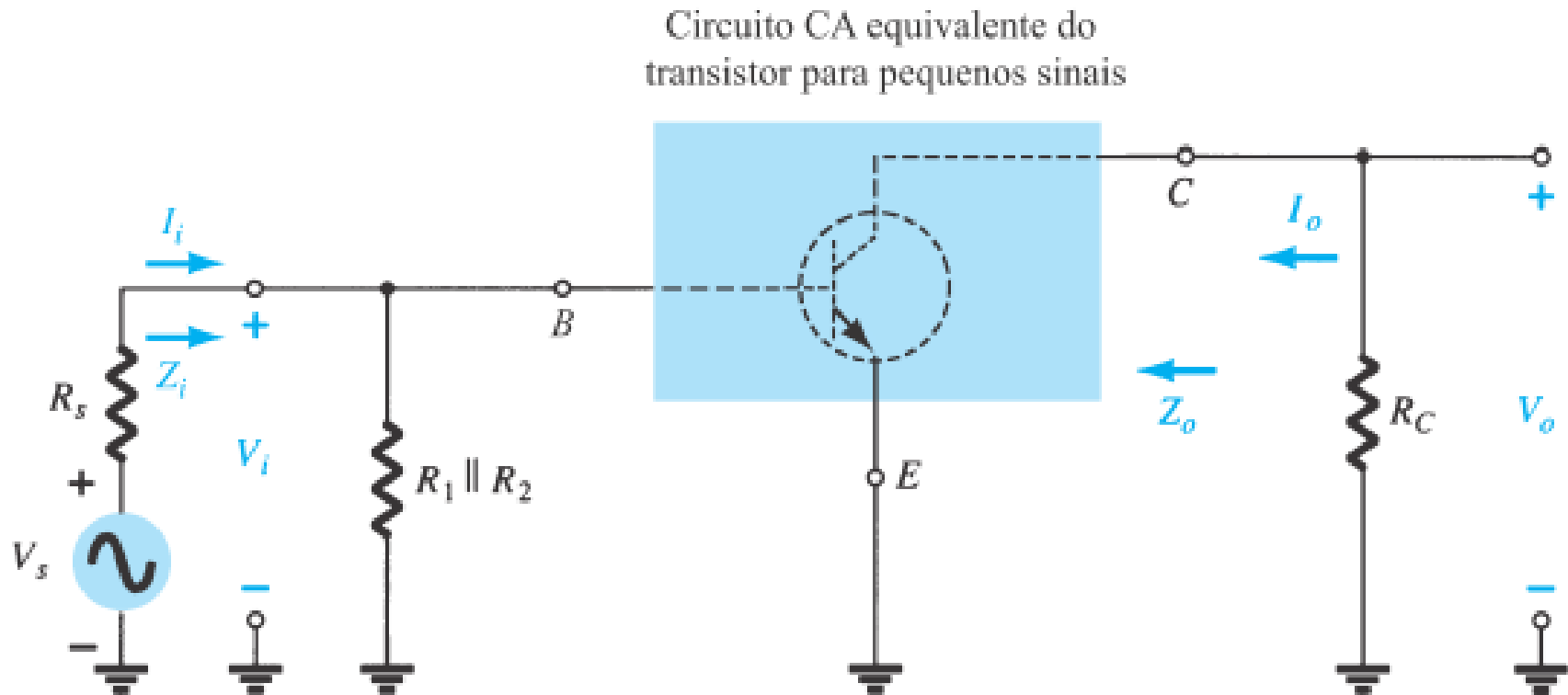
Analise AC (TBJ)

- Método:**
- 1- Fixando-se todas as fontes de tensão CC em zero e substituindo-as por um curto-circuito equivalente;
 - 2- Substituindo-se todos os capacitores por um curto-circuito equivalente;

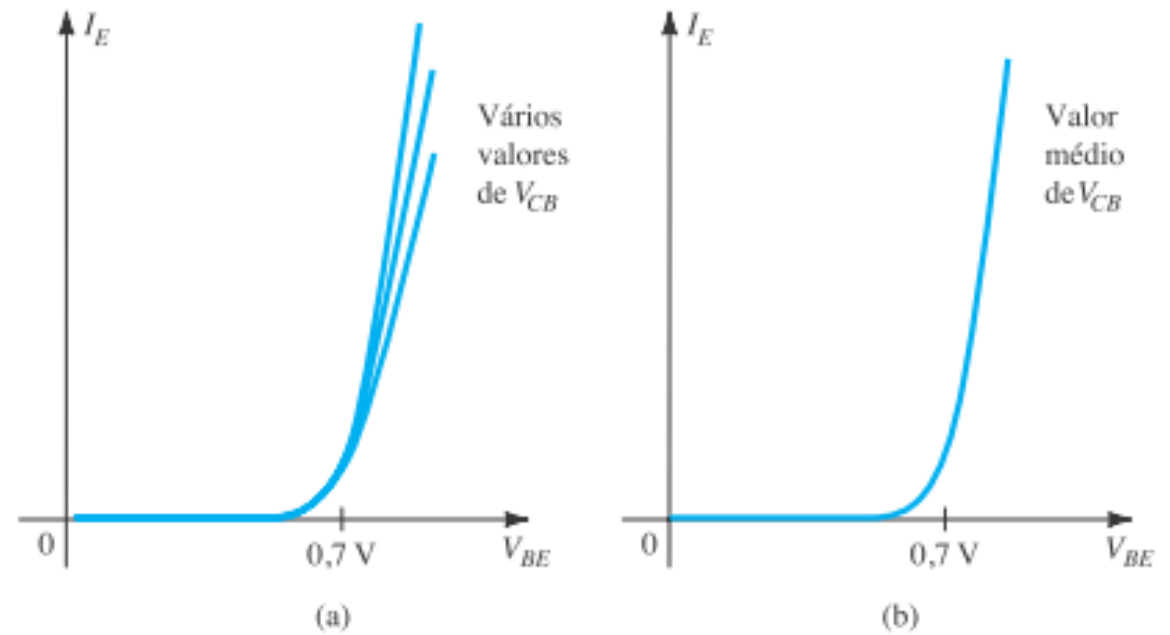
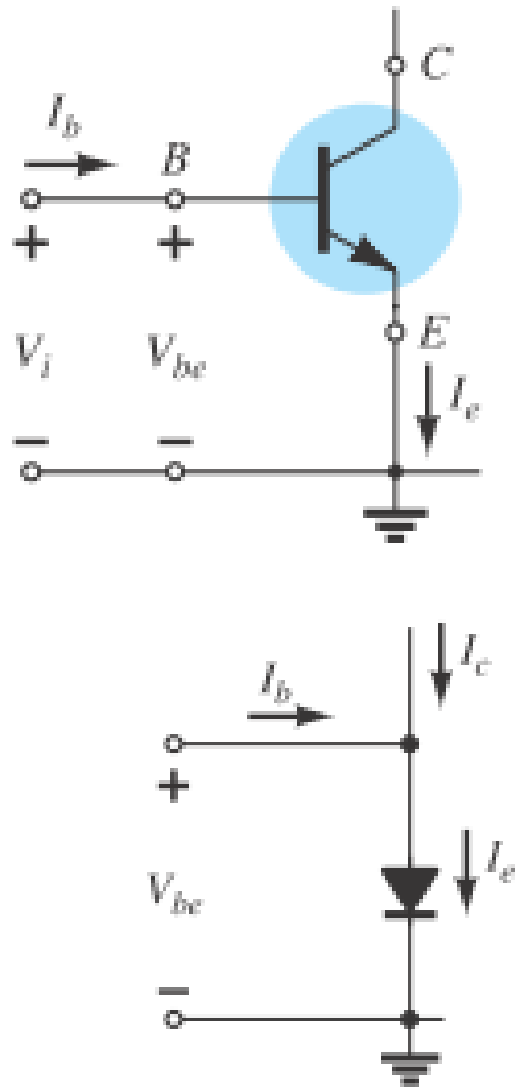


Analise AC (TBJ)

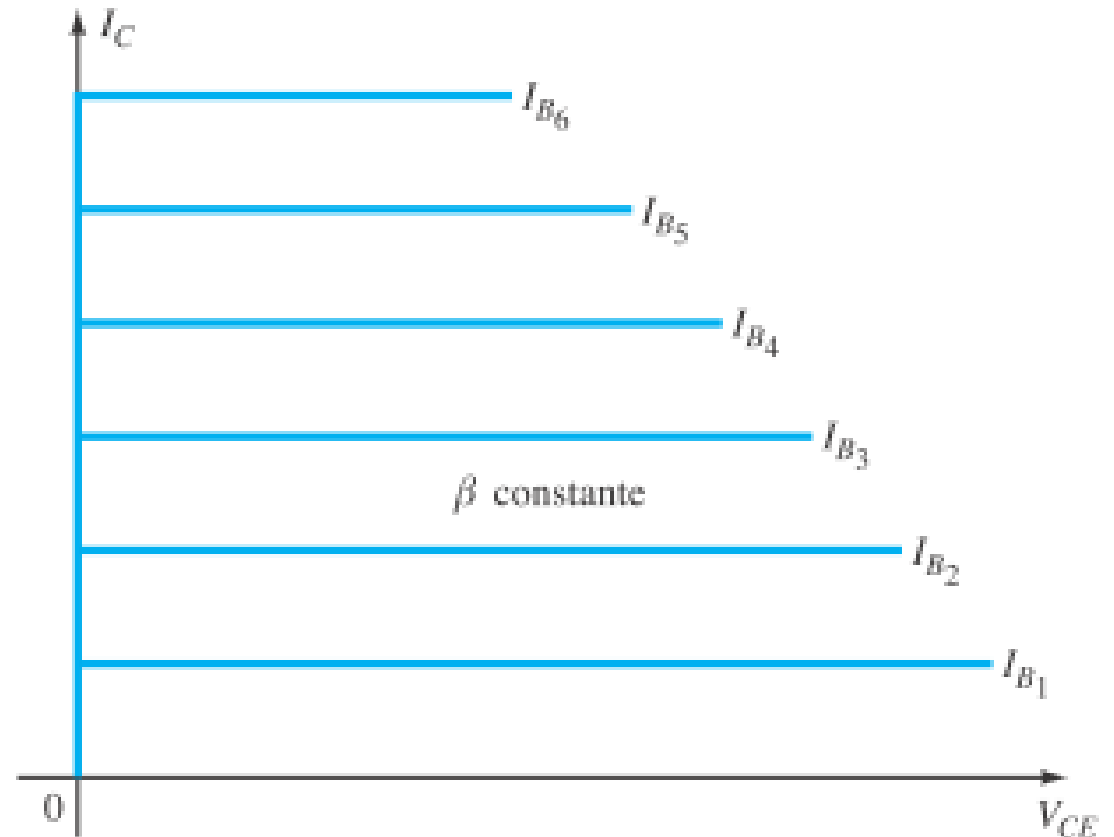
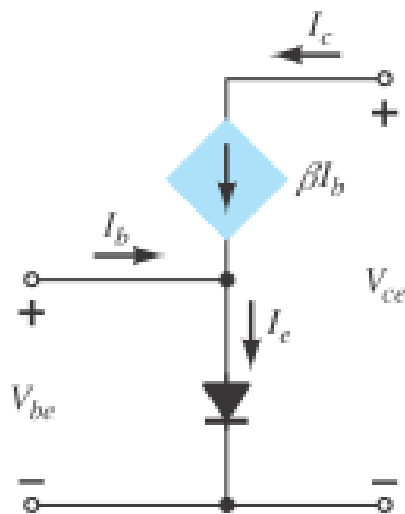
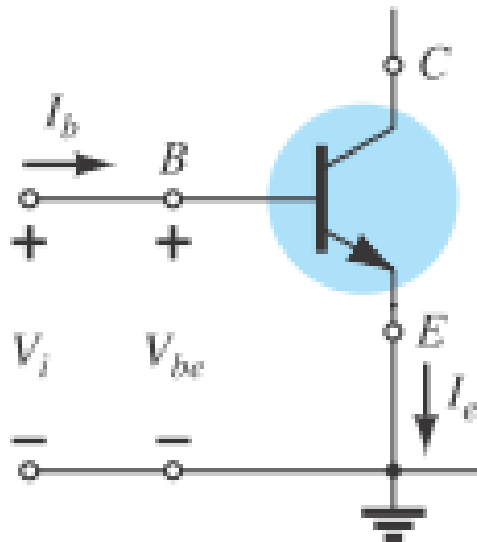
- Método:**
- 3 - Removendo-se todos os elementos em paralelo com os curtos-circuitos equivalentes introduzidos nas etapas 1 e 2;
 - 4- Redesenhando-se o circuito de um modo mais conveniente e lógico.



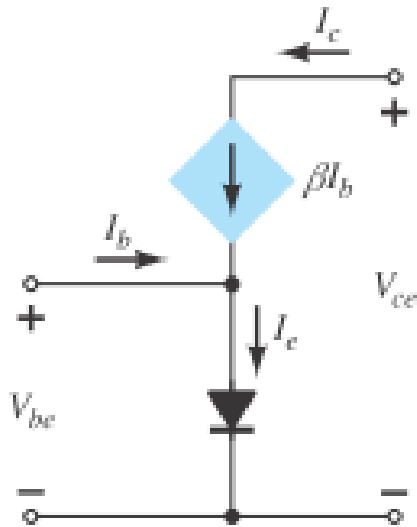
Análise AC (Modelo equivalente - r_e (TBJ))



Analise AC (Modelo equivalente - r_e (TBJ))

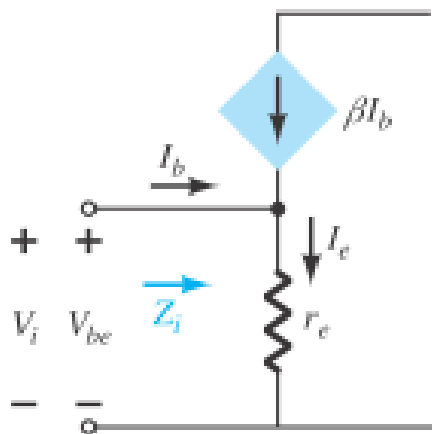


Analise AC (Modelo equivalente - r_e (TBJ))



1 – Do estudo dos diodos, temos a resistência do diodo r_D

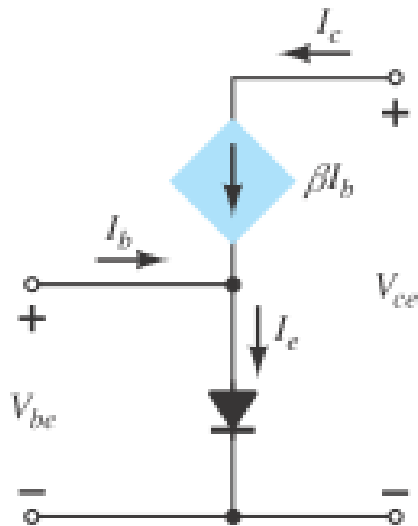
$$r_D = 26 \text{ mV} / I_D$$



2 – Mudando-se o subscrito r_D tem-se a resistência do diodo r_e :

$$r_e = 26 \text{ mV} / I_E$$

Analise AC (Modelo equivalente - r_e (TBJ))



1 – Agora podemos determinar Z_i :

$$Z_i = \frac{V_i}{I_b} = \frac{V_{be}}{I_b}$$

2 – Solucionando :

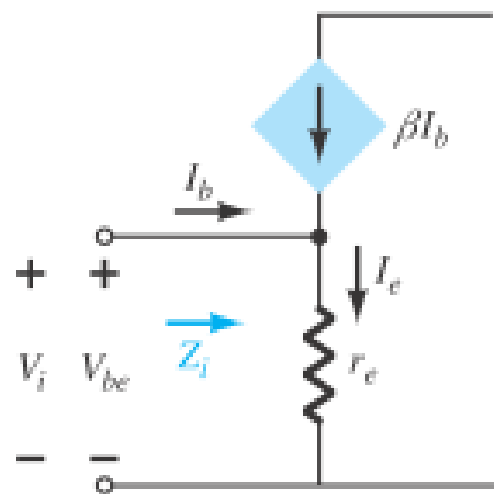
$$V_{be} = I_e r_e = (I_c + I_b) r_e = (\beta I_b + I_b) r_e$$

$$V_{be} = (\beta + 1) I_b r_e$$

3 - Tem-se:

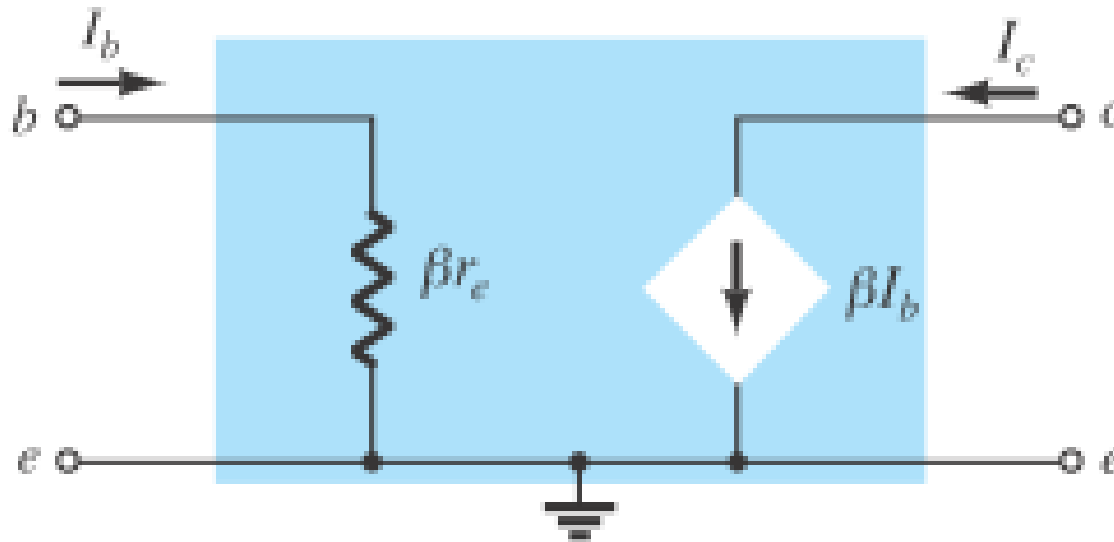
$$Z_i = \frac{V_{be}}{I_b} = \frac{(\beta + 1) I_b r_e}{I_b}$$

$$Z_i = (\beta + 1) r_e \cong \beta r_e$$

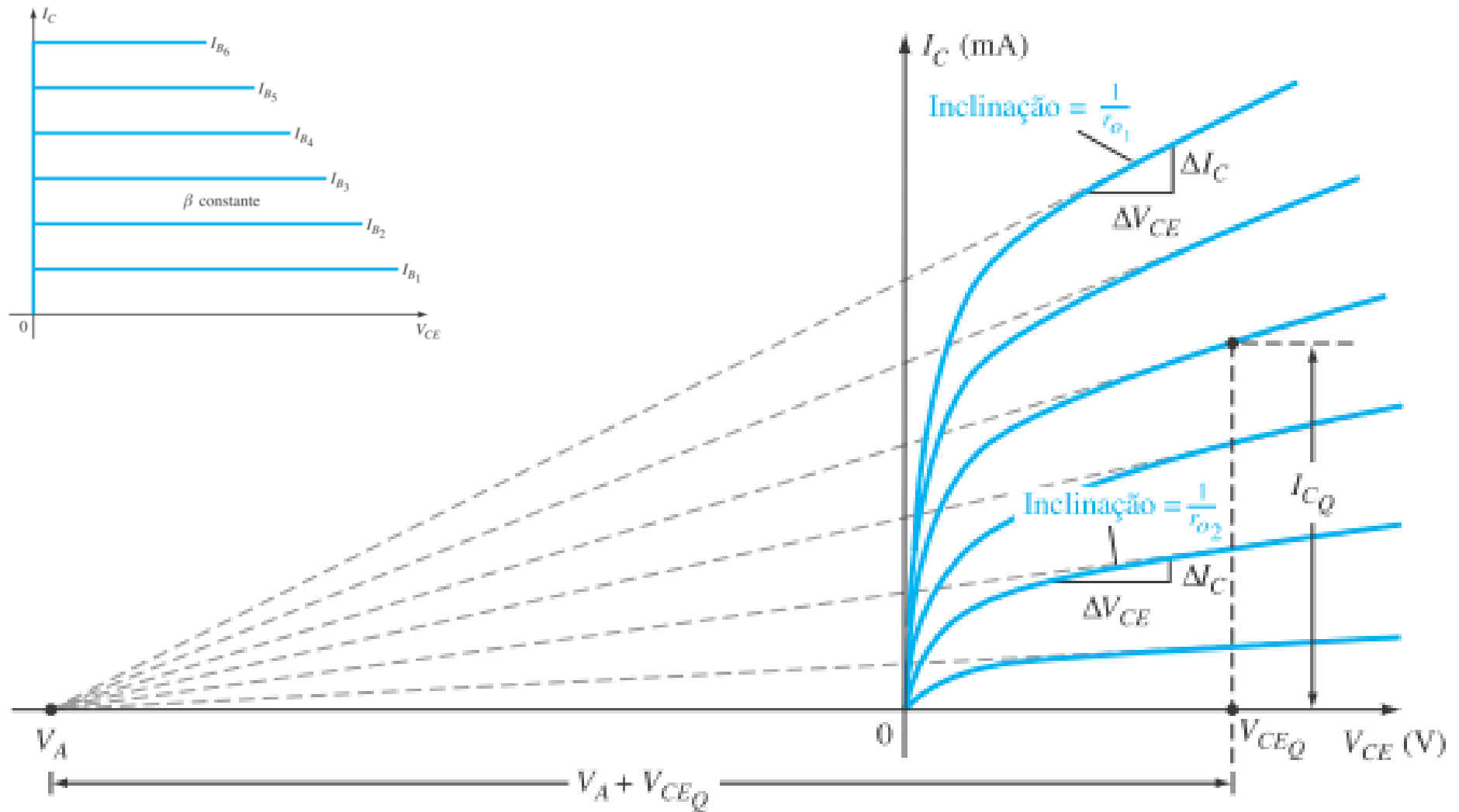


Analise AC (Modelo Equivalente - r_e (TBJ))

1 –O resultado é que a impedância vista “entrando” na base do circuito é um resistor igual a beta vezes o valor de r_e e a corrente de saída do coletor ainda está conectada à corrente de entrada por beta, como mostra a mesma figura.



Analise AC (Efeito Early (r_o))



Analise AC (Efeito Early (r_o))

1 -Devido as correntes I_b das curvas ($I_c \times V_{ce}$) na pratica não serem plana, pois existe uma inclinação como mostrado na figura anterior (inclinação que define a resistência de saída - r_o):

$$r_o = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{V_A + V_{CEQ}}{I_{CQ}}$$

2 - Devido tensão de Early (V_A)ser muito maior que V_{ce_q} ,podemos simplificar para :

$$r_o \cong \frac{V_A}{I_{CQ}}$$

Analise AC (Efeito Early (r_o))

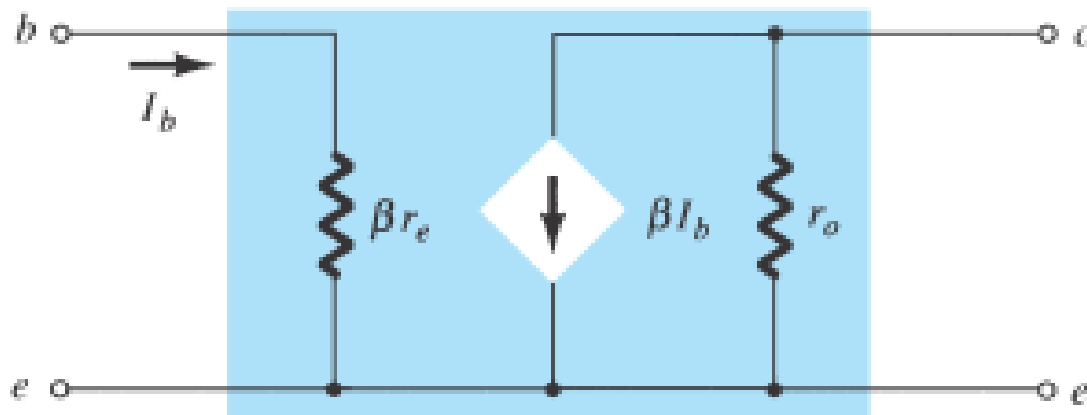
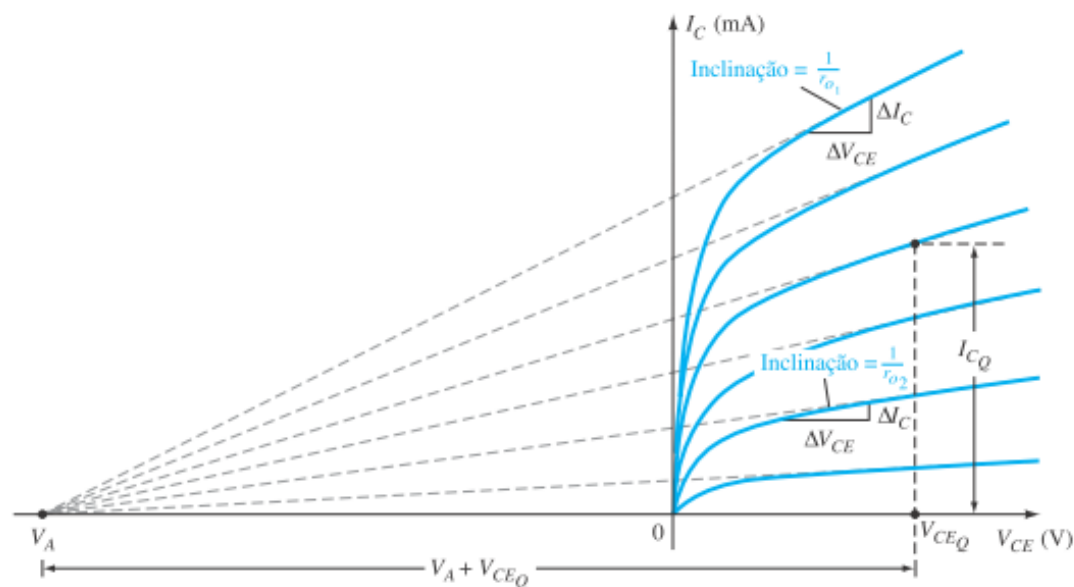
1 -Para o caso que a tensão de Early não estiver disponível podemos usar as curvas (I_C x V_{CE}) para obtê-la:

$$\text{Inclinação} = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{\Delta I_C}{\Delta V_{CE}} = \frac{1}{r_o}$$

2 – Resultando em:

$$r_o = \frac{\Delta V_{CE}}{\Delta I_C}$$

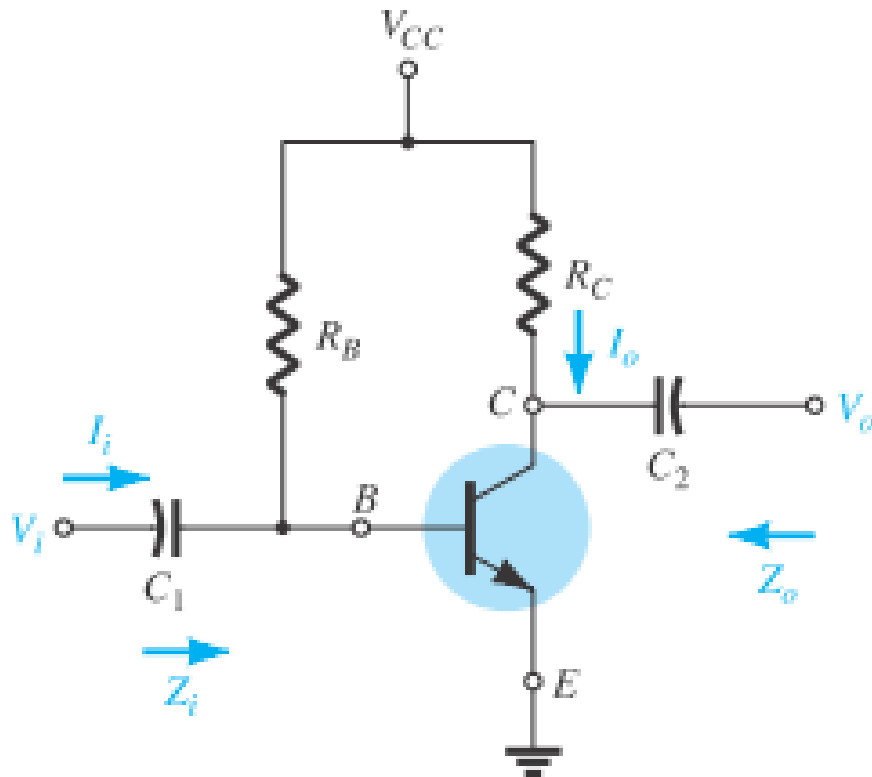
Analise AC (Efeito Early (r_o))



Analise AC (Modelo equivalente - r_e (TBJ))

(Polarização Fixa)

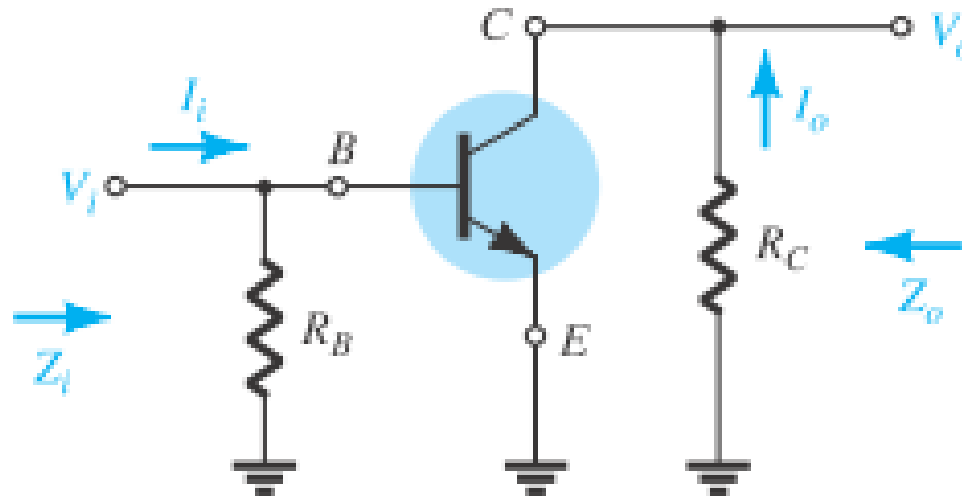
1 -Configuração emissor comum (Polarização - Fixa)



Analise AC (Modelo equivalente - r_e (TBJ))

(Polarização Fixa)

- Método:**
- 1- Fixando-se todas as fontes de tensão CC em zero e substituindo-as por um curto-circuito equivalente;
 - 2- Substituindo-se todos os capacitores por um curto-circuito equivalente;

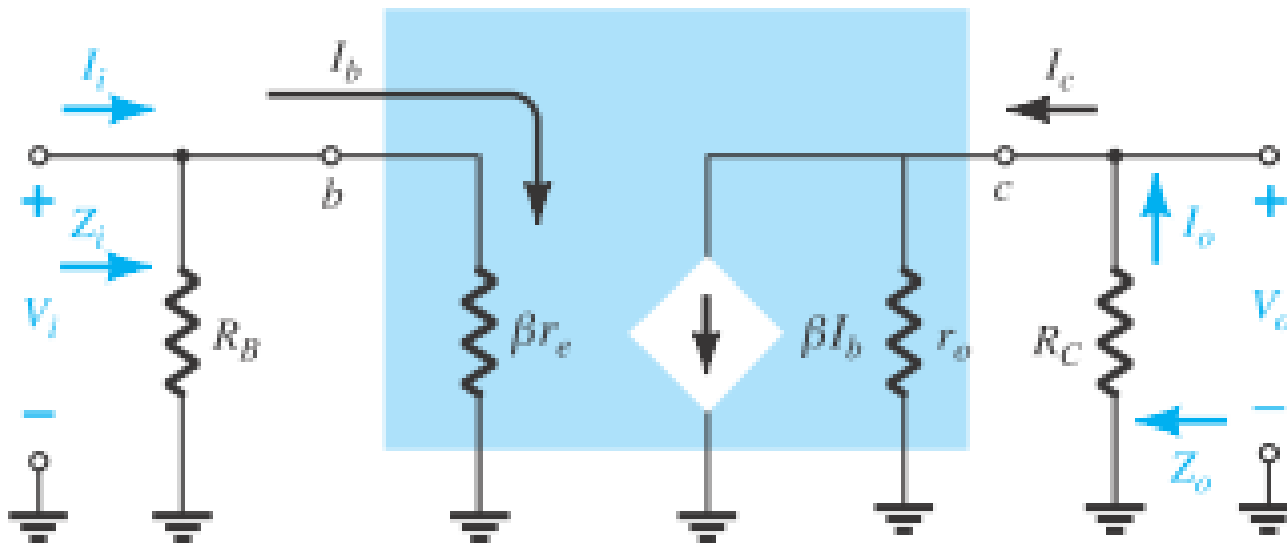


Análise AC (Modelo equivalente - r_e (TBJ))

(Polarização Fixa)

Método:

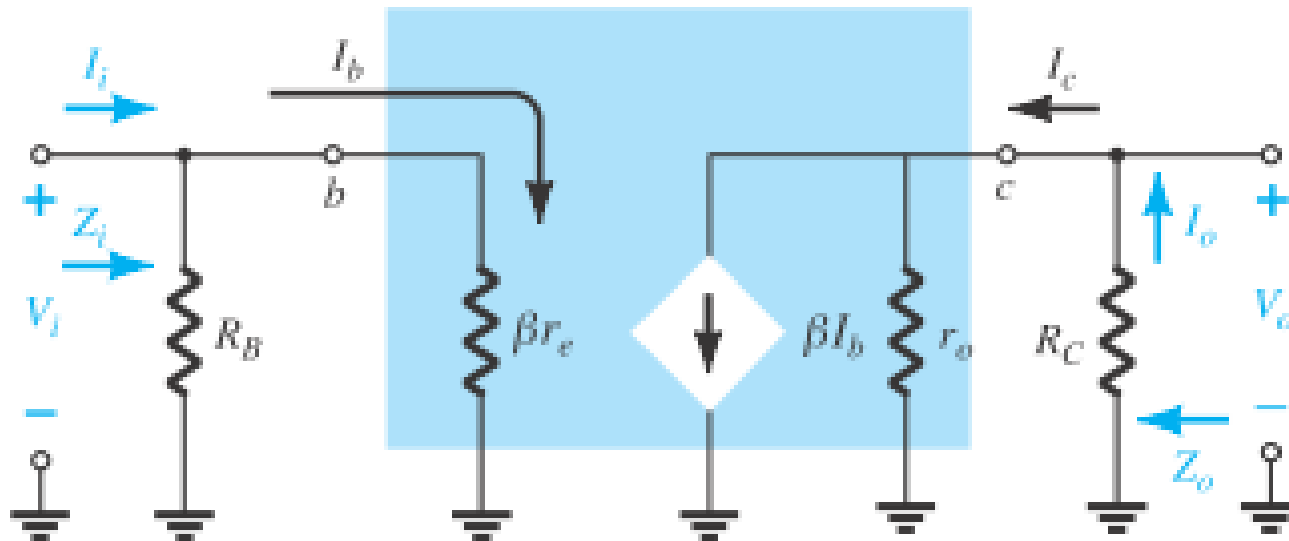
- 1- Fixando-se todas as fontes de tensão CC em zero e substituindo-as por um curto-circuito equivalente;
- 2- Substituindo-se todos os capacitores por um curto-circuito equivalente;
- 3 - Removendo-se todos os elementos em paralelo com os curtos-circuitos equivalentes introduzidos nas etapas 1 e 2;
- 4 - Redesenhando-se o circuito de um modo mais conveniente e lógico e incluir o modelo equivalente r_e .



Analise AC (Modelo equivalente - r_e (TBJ))

(Polarização Fixa)

A Figura revela Z_i :

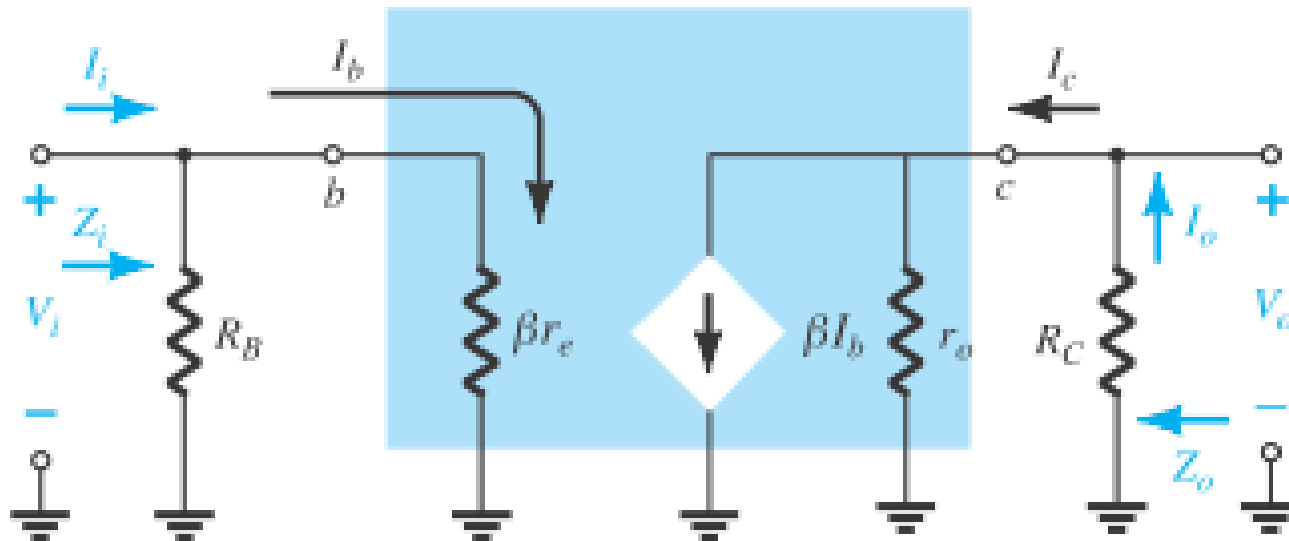


$$Z_i = R_B \parallel \beta r_e \text{ ohms}$$

Analise AC (Modelo equivalente - r_e (TBJ))

(Polarização Fixa)

A Figura revela Z_i :

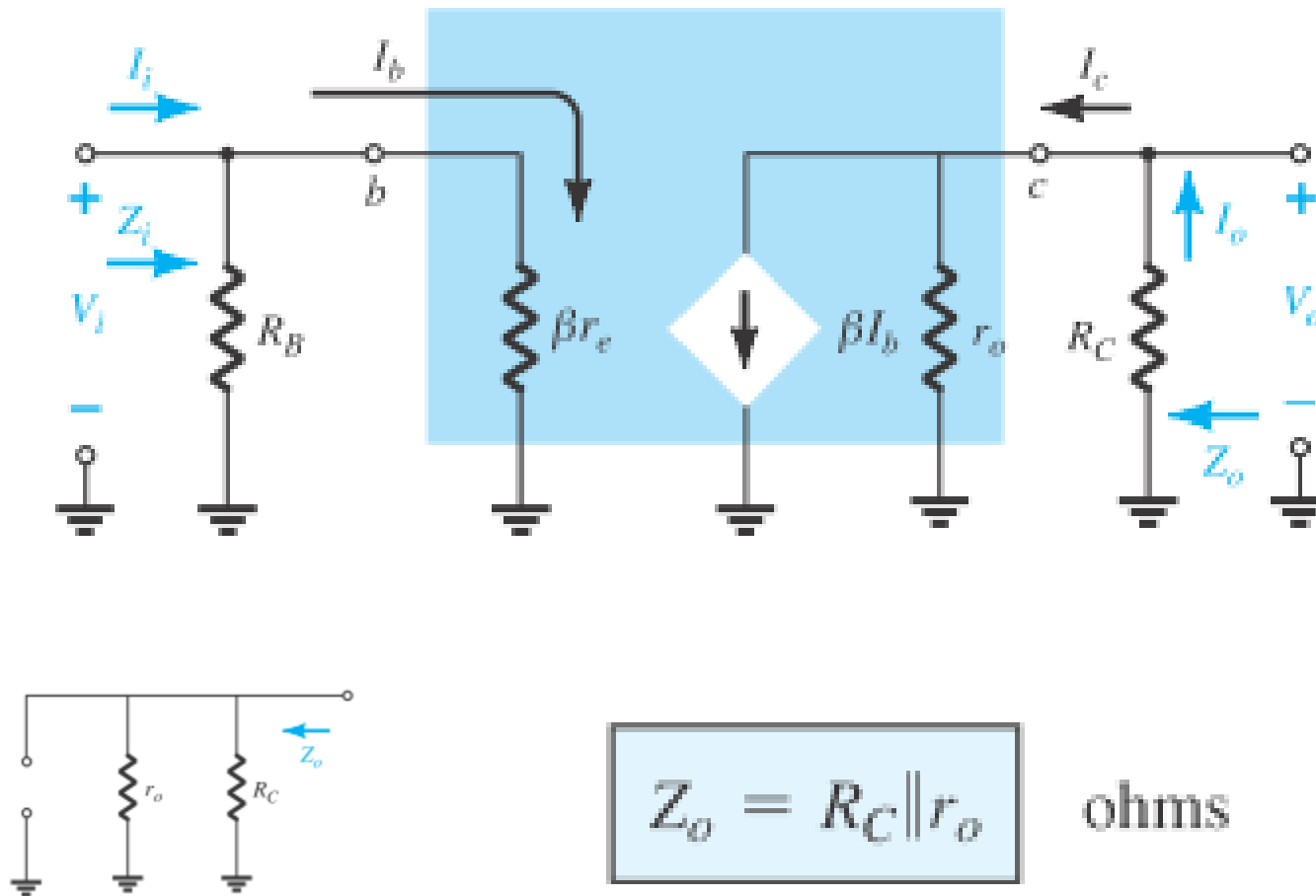


$$Z_i \cong \beta r_e \quad R_B \geq 10\beta r_e \quad \text{ohms}$$

Analise AC (Modelo equivalente - r_e (TBJ))

(Polarização Fixa)

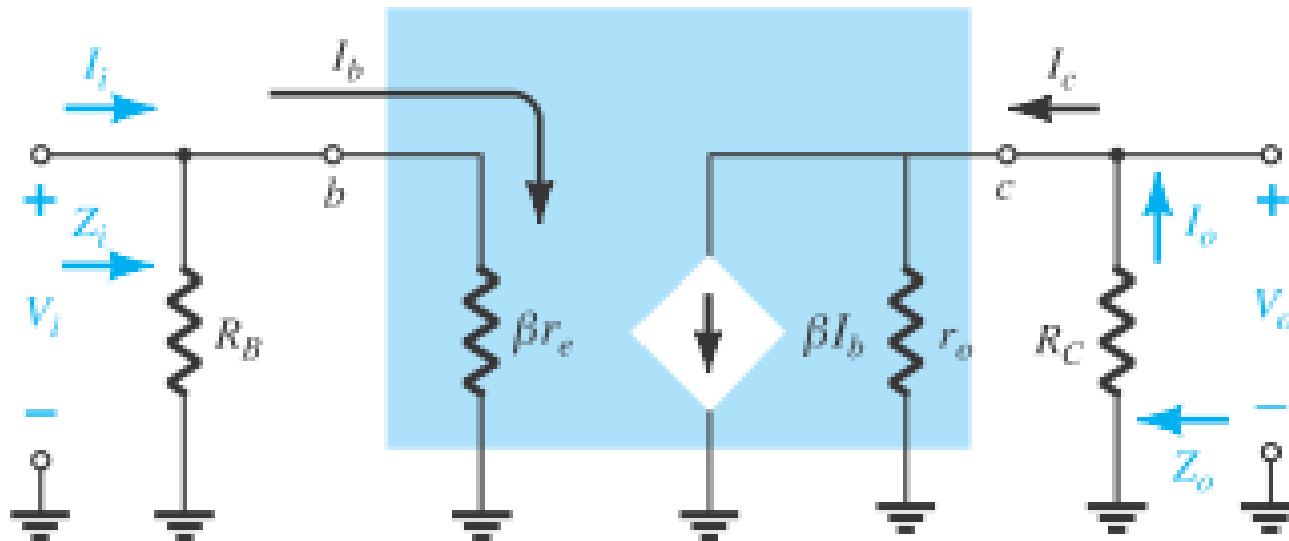
A Figura revela Z_o :



Analise AC (Modelo equivalente - r_e (TBJ))

(Polarização Fixa)

A Figura revela Z_o :

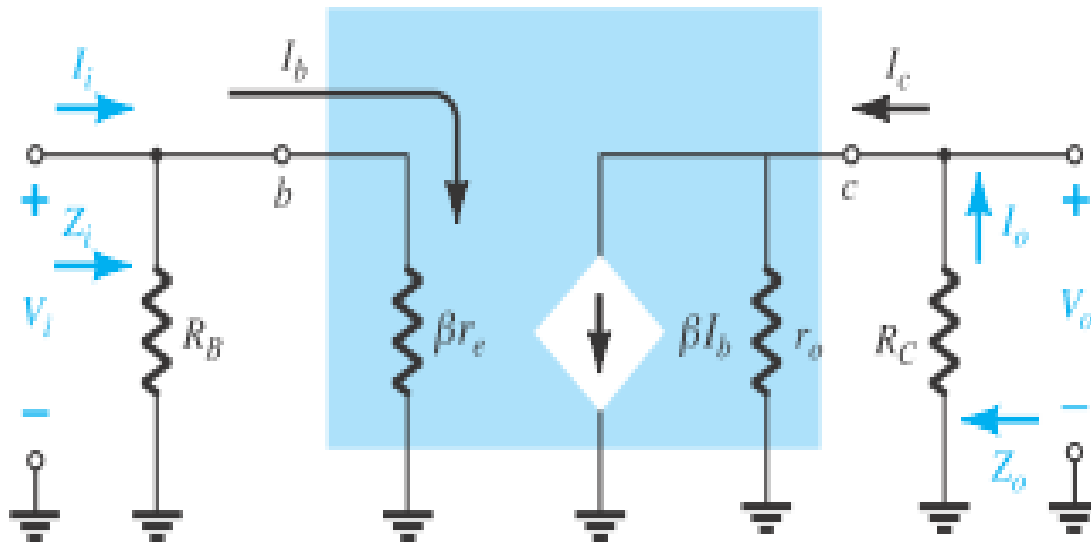


$$Z_o \cong R_C \quad r_o \cong 10R_C$$

Analise AC (Modelo equivalente - r_e (TBJ))

(Polarização Fixa)

Ganho A_v (resistores $R_C//r_o$):



$$V_o = -\beta I_b (R_C \parallel r_o)$$

$$I_b = \frac{V_i}{\beta r_e}$$

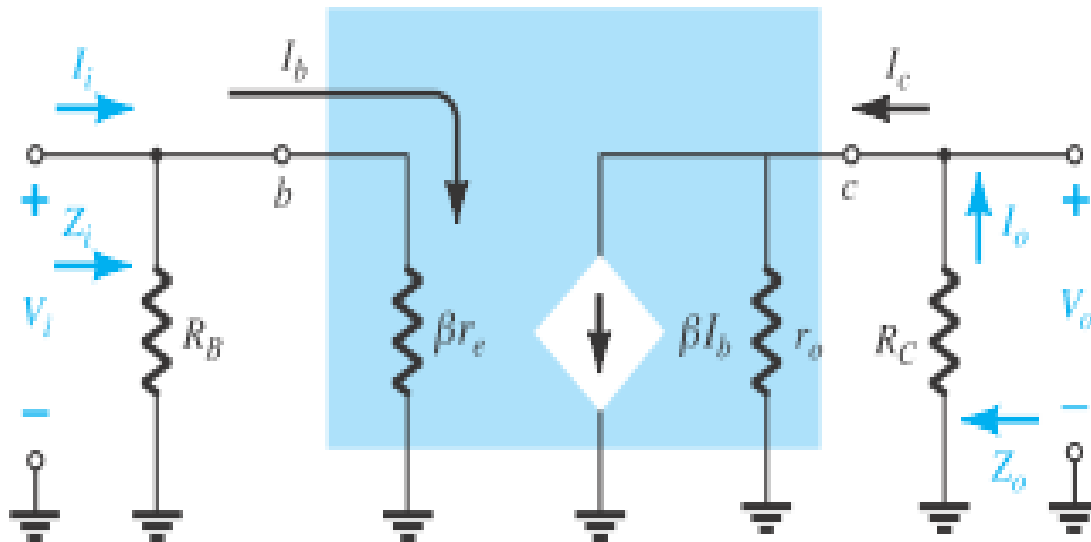
$$V_o = -\beta \left(\frac{V_i}{\beta r_e} \right) (R_C \parallel r_o)$$

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = - \frac{(R_C \parallel r_o)}{r_e}$$

Analise AC (Modelo equivalente - r_e (TBJ))

(Polarização Fixa)

Ganho A_v (resistores $R_C//r_o$):

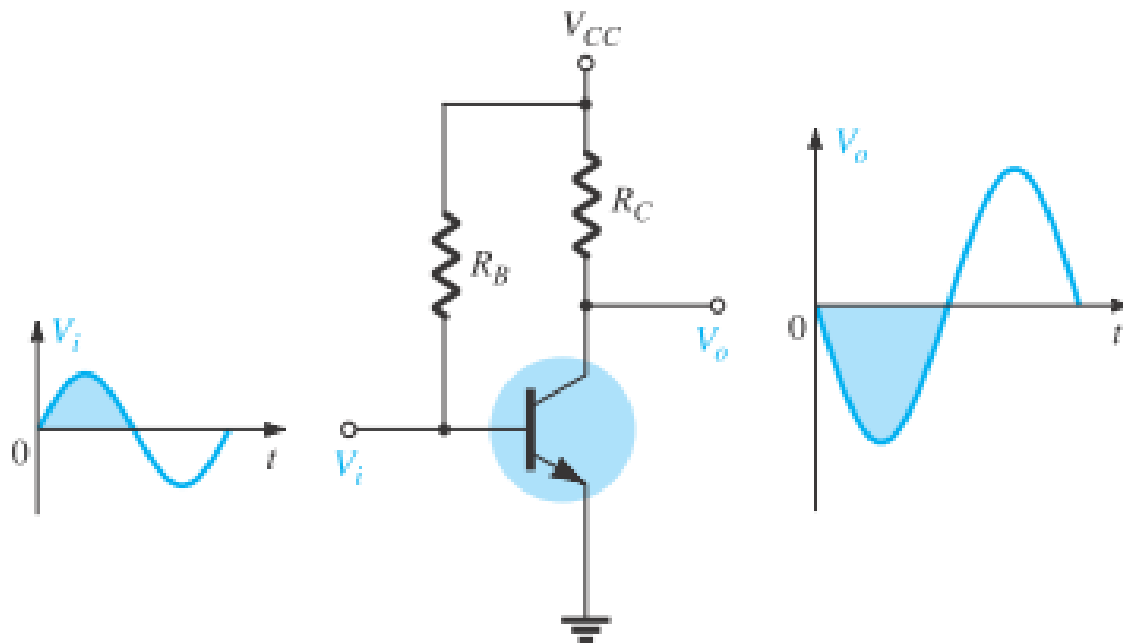


$$A_v = -\frac{R_C}{r_e} \quad r_o \geq 10R_C$$

Analise AC (Modelo equivalente - r_e (TBJ))

(Polarização Fixa)

Relação de Fase (180°):



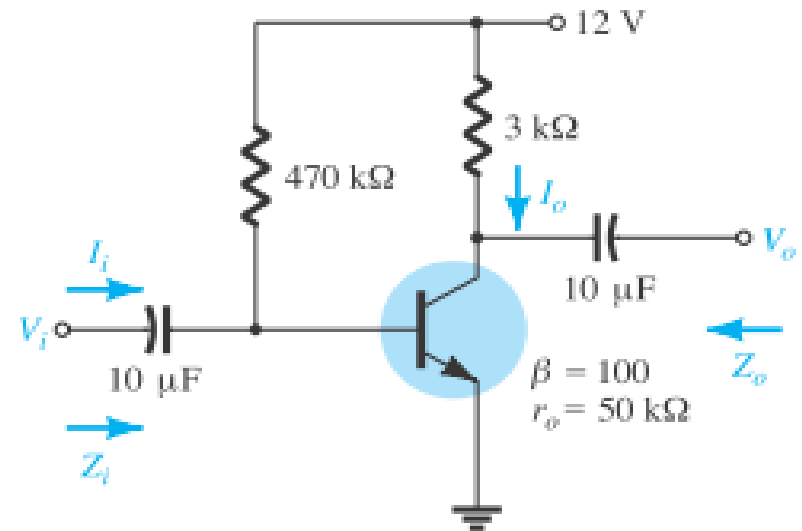
$$A_v = -\frac{R_C}{r_e} \quad r_o \geq 10R_C$$

Analise AC (TBJ)

(Atividade – Emissor Comum - Polarização Fixa)

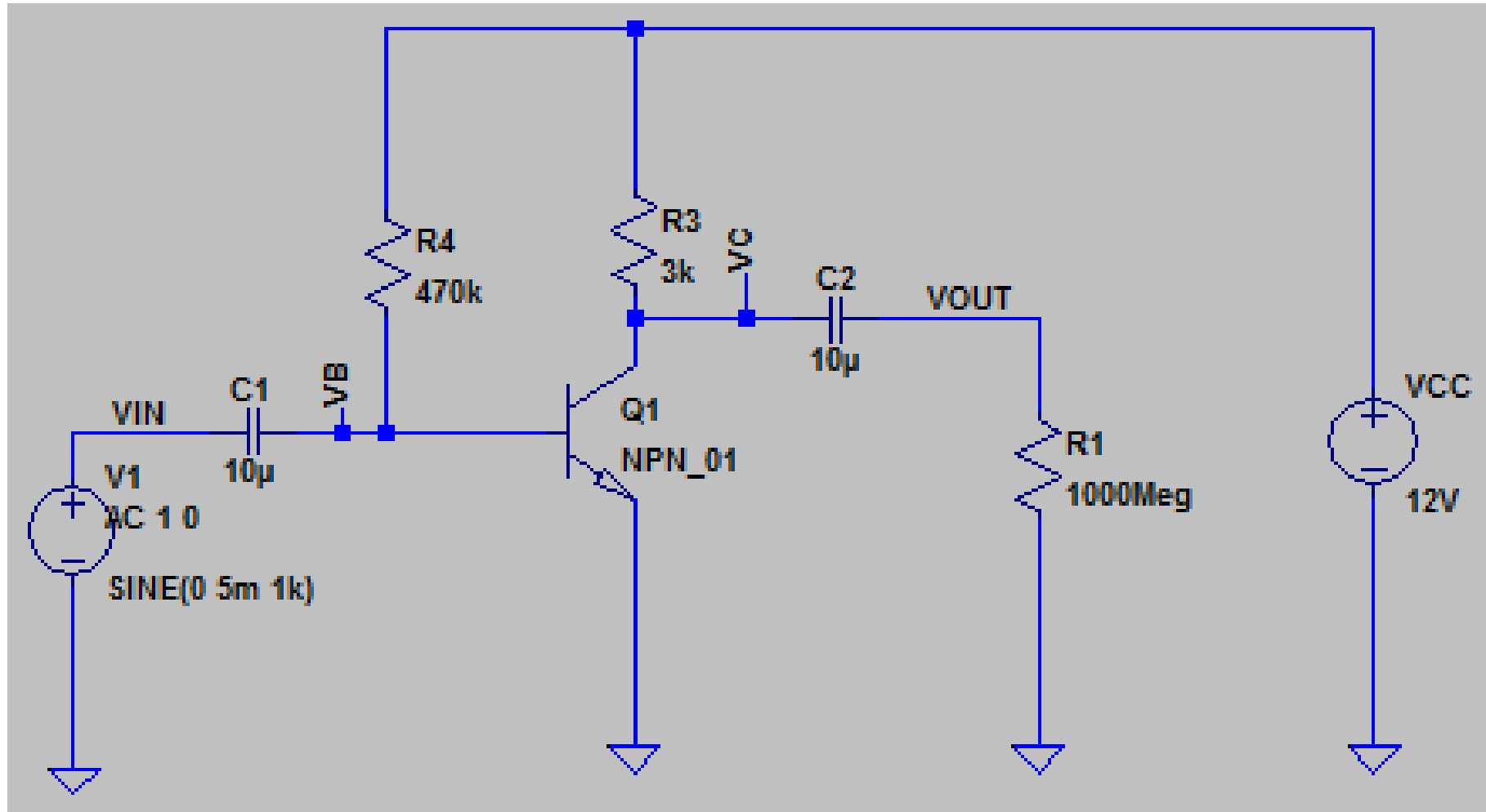
Para o circuito da Figura

- a) Determine r_e .
- b) Determine Z_i (com $r_o = \infty \Omega$).
- c) Calcule Z_o (com $r_o = \infty \Omega$).
- d) Determine A_v (com $r_o = \infty \Omega$).
- e) Repita os itens (c) e (d) incluindo $r_o = 50 \text{ k}\Omega$ em todos os cálculos e compare os resultados.



Analise AC (TBJ)

(Simulação – Emissor Comum - Polarização Fixa)



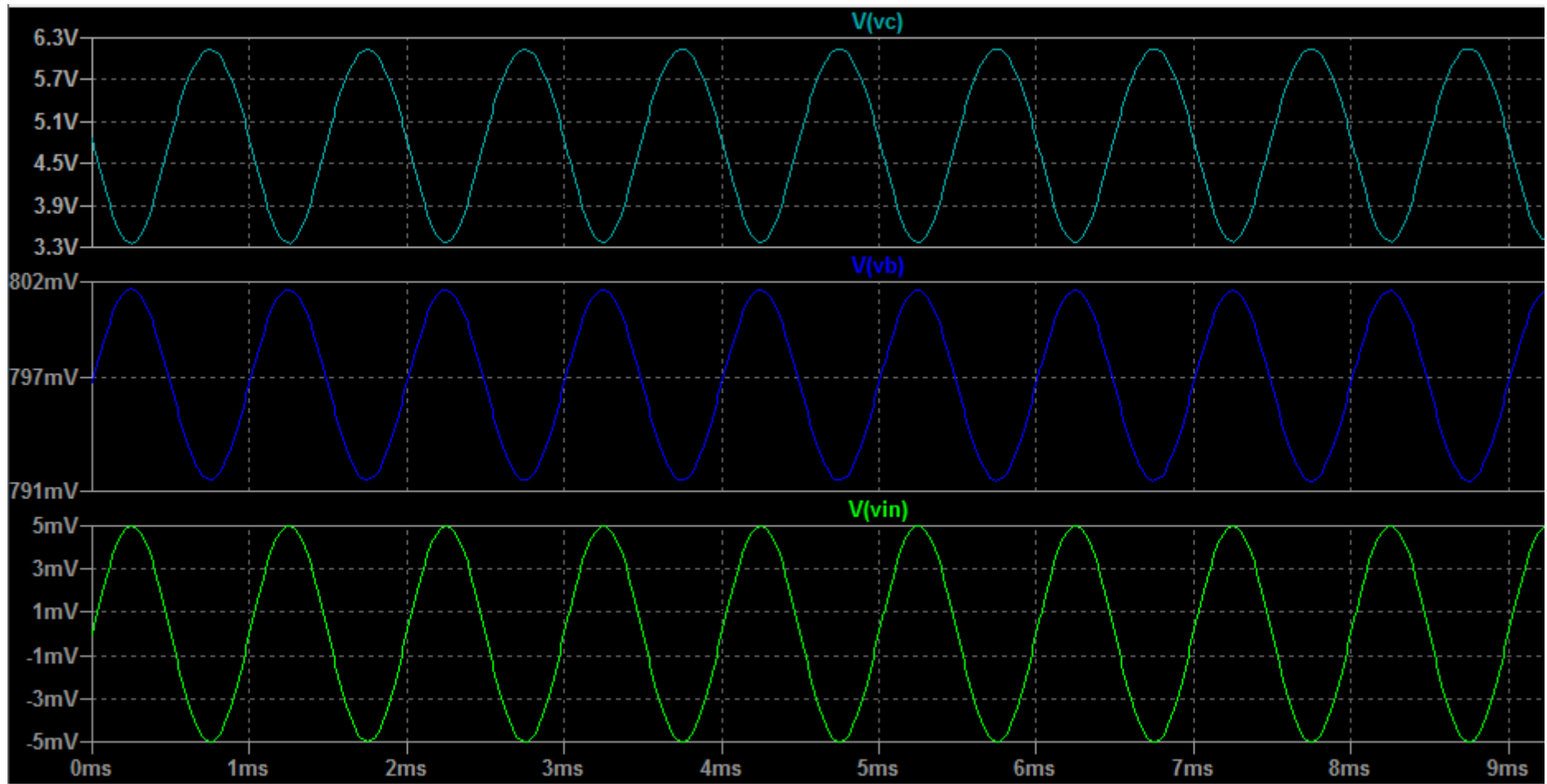
Analise AC

(Simulação – Emissor Comum - Polarização Fixa)

```
|      --- Operating Point ---  
  
V(vc) :      4.84896      voltage  
V(vb) :      0.796699    voltage  
V(n002) :     12         voltage  
V(vin) :      0          voltage  
V(vout) :     4.84896e-008 voltage  
Ic(Q1) :     0.00238371   device_current  
Ib(Q1) :     2.38371e-005 device_current  
Ie(Q1) :     -0.00240754  device_current  
I(C2) :     -4.84896e-017 device_current  
I(C1) :     7.96699e-018  device_current  
I(R1) :     4.84896e-017  device_current  
I(R4) :     2.38368e-005  device_current  
I(R3) :     0.00238368    device_current  
I(V1) :     7.96699e-018  device_current  
I(Vcc) :     -0.00240752  device_current
```

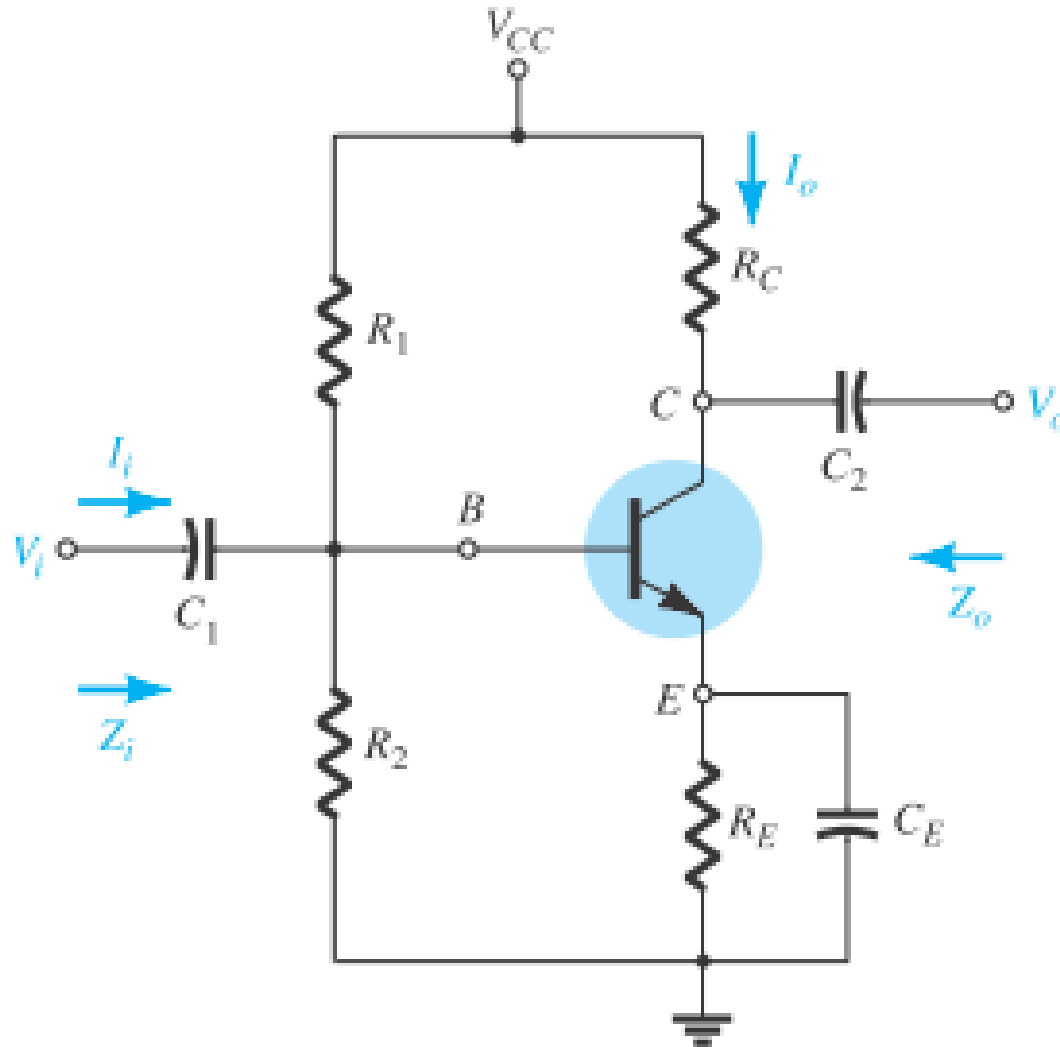
Analise AC

(Simulação Transiente – Emissor Comum - Polarização Fixa)



Analise AC (TBJ)

(Configuração Emissor Comum – Polarização -Divisor de tensão)

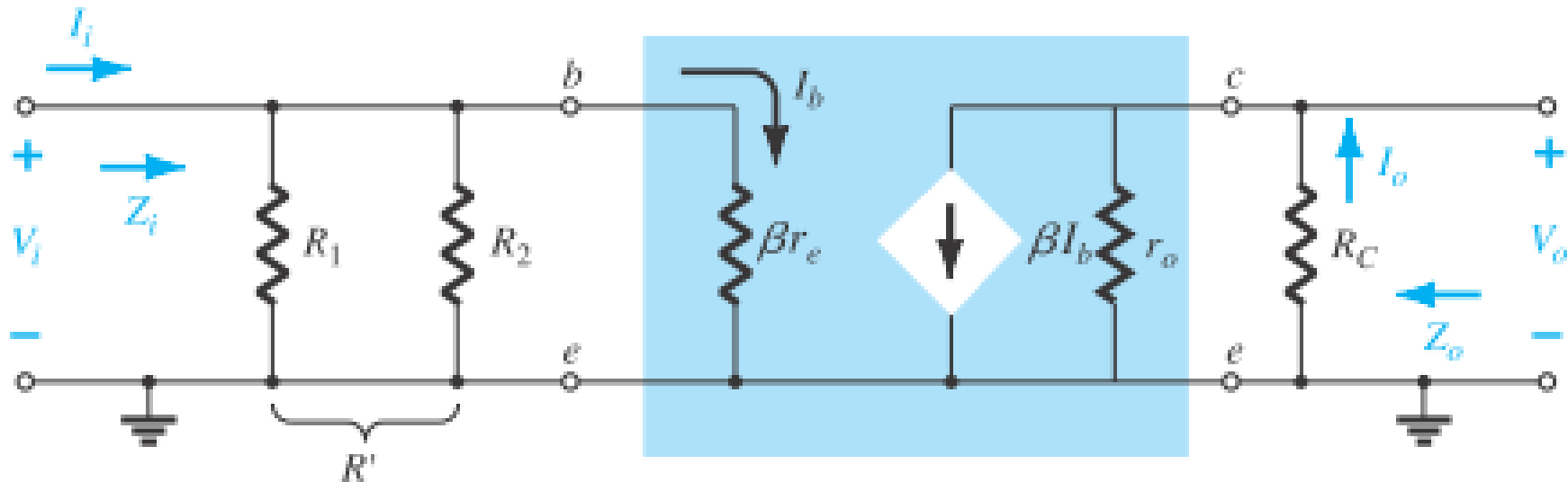


Analise AC (TBJ)

(Configuração Emissor Comum – Polarização -Divisor de tensão)

Aplicação do método para pequenos sinais, para simplificação dos circuitos e substituição do transistor pelo modelo RE' semelhantes a Configuração Emissor

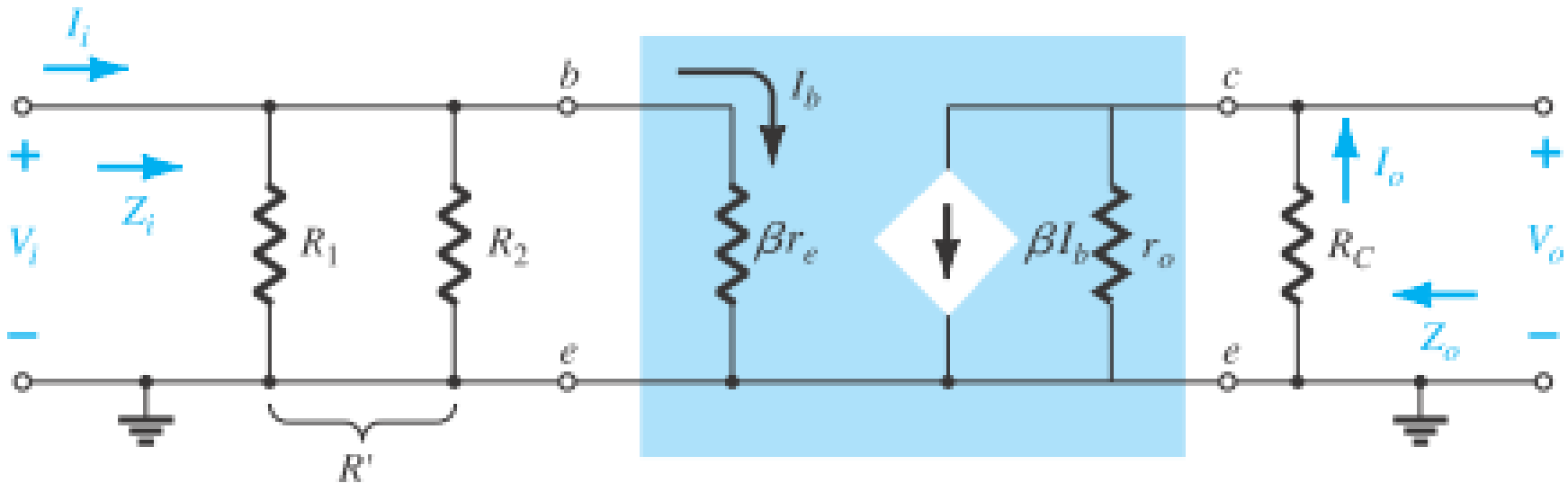
Comum – Polarização – Fixa:



Analise AC (TBJ)

(Configuração Emissor Comum – Polarização -Divisor de tensão)

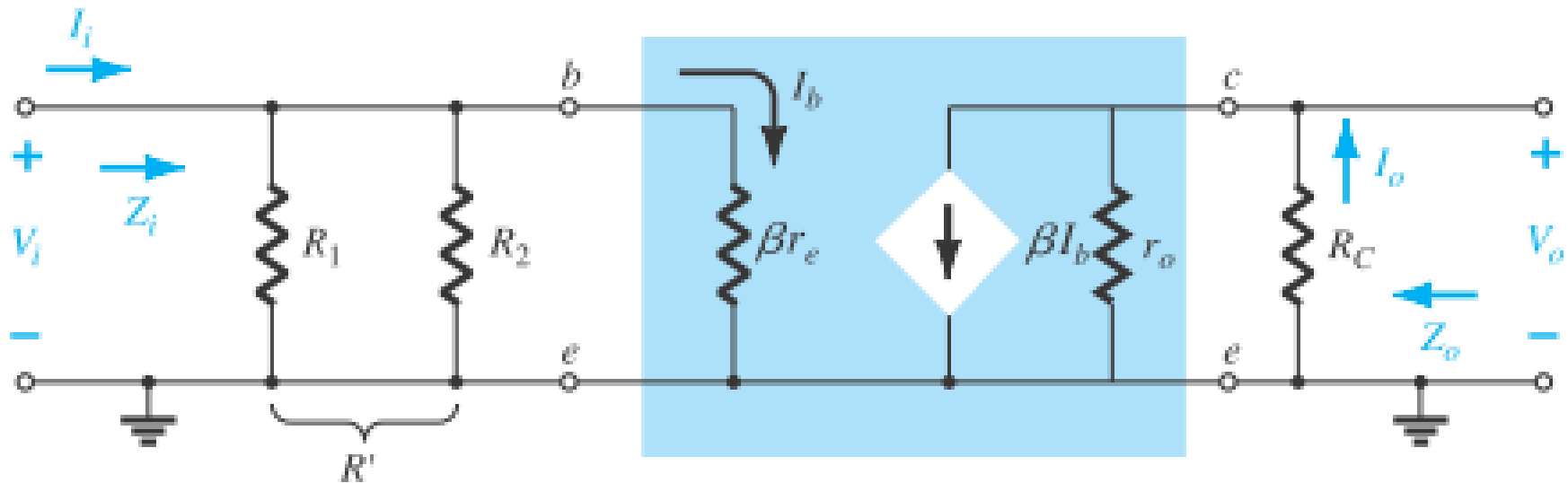
Definição do R' ($R_1 // R_2$):



Analise AC (TBJ)

(Configuração Emissor Comum – Polarização -Divisor de tensão)

Definição do Z_i :

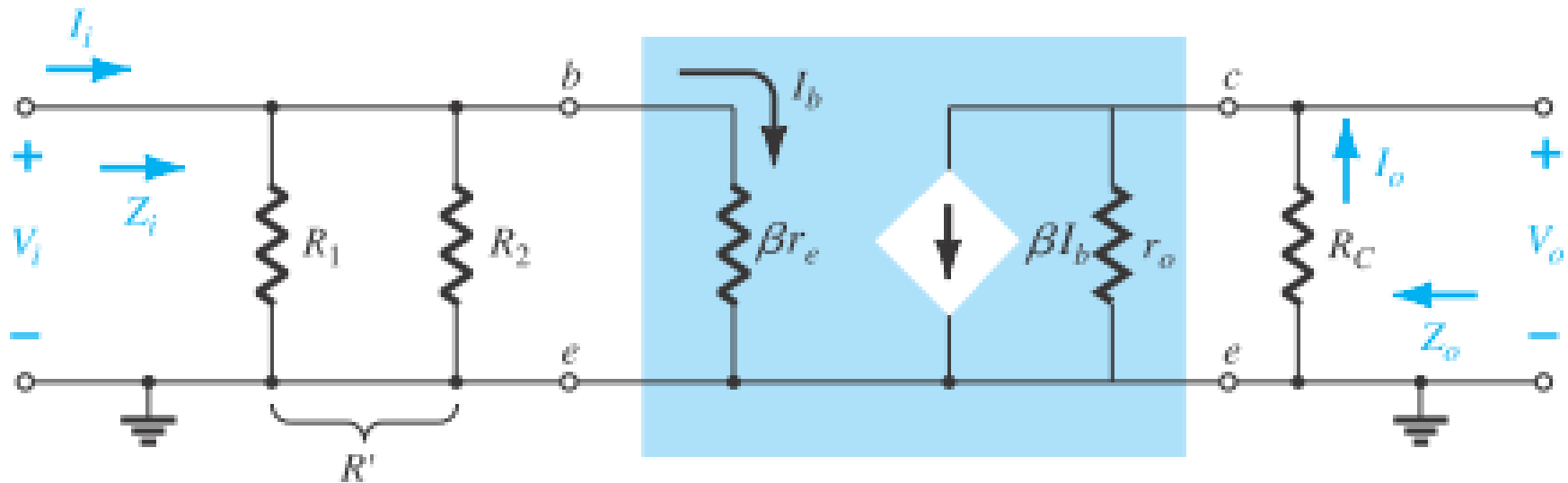


$$Z_i = R' \parallel \beta r_e$$

Analise AC (TBJ)

(Configuração Emissor Comum – Polarização -Divisor de tensão)

Definição do Z_o :

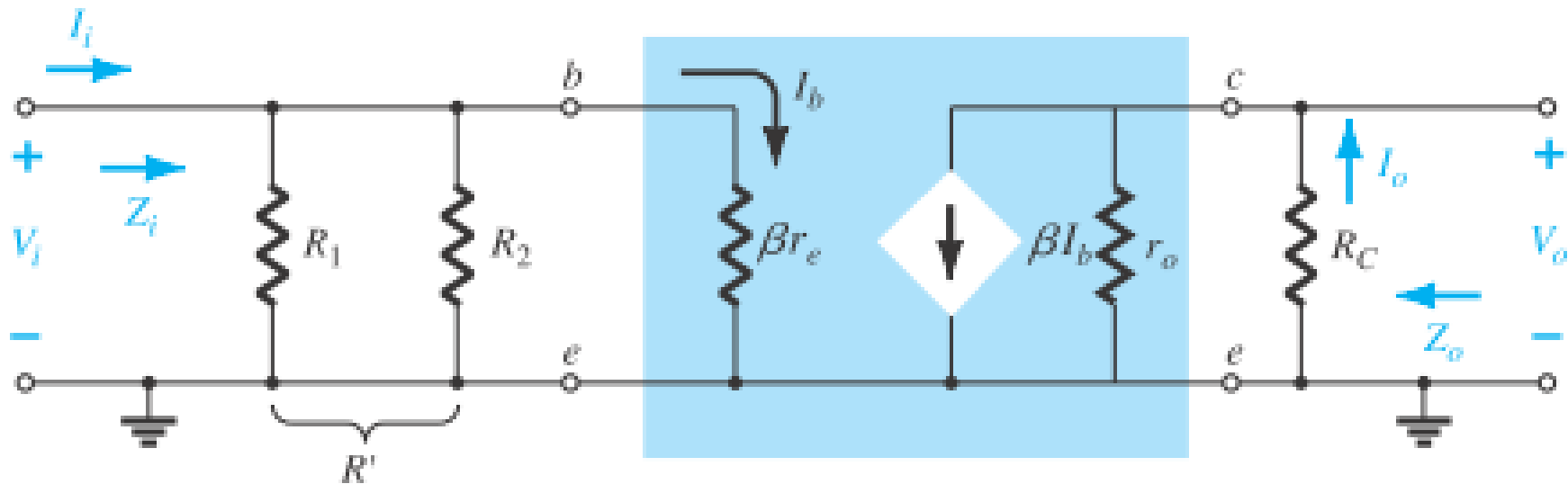


$$Z_o = R_C \parallel r_o$$

Analise AC (TBJ)

(Configuração Emissor Comum – Polarização -Divisor de tensão)

Definição do Z_o :

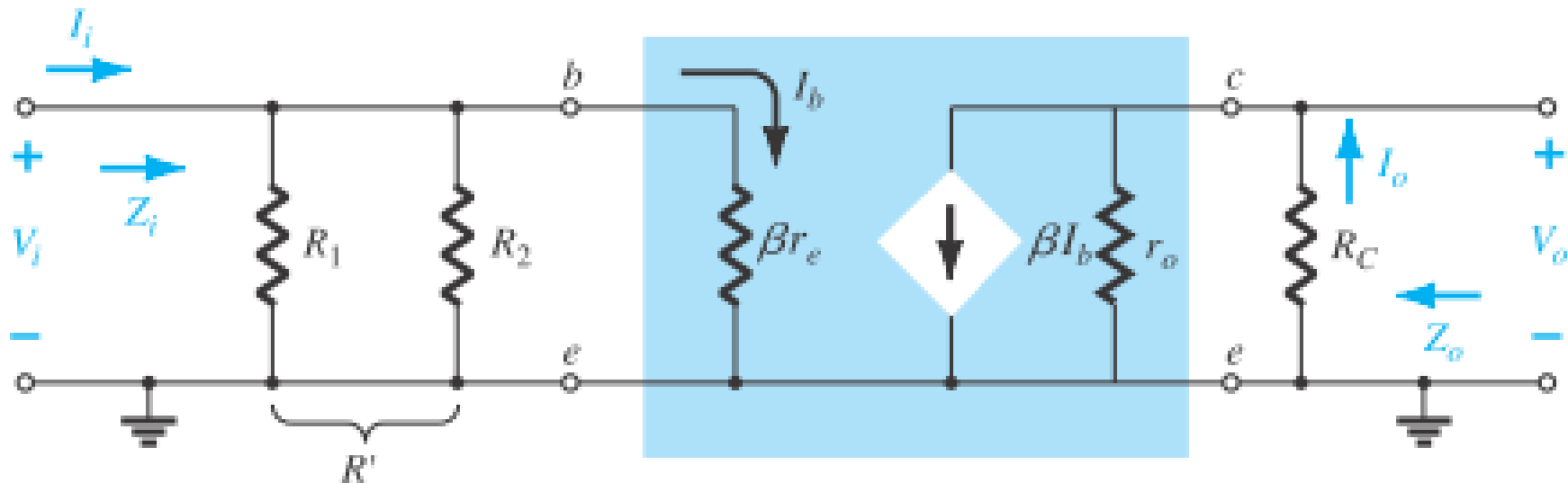


$$Z_o \cong R_C \quad r_o \geq 10R_C$$

Analise AC (TBJ)

(Configuração Emissor Comum – Polarização -Divisor de tensão)

Definição do A_v (visto que $r_o \parallel R_C$):



$$V_o = -(\beta I_b)(R_C \parallel r_o)$$

$$I_b = \frac{V_i}{\beta r_e}$$

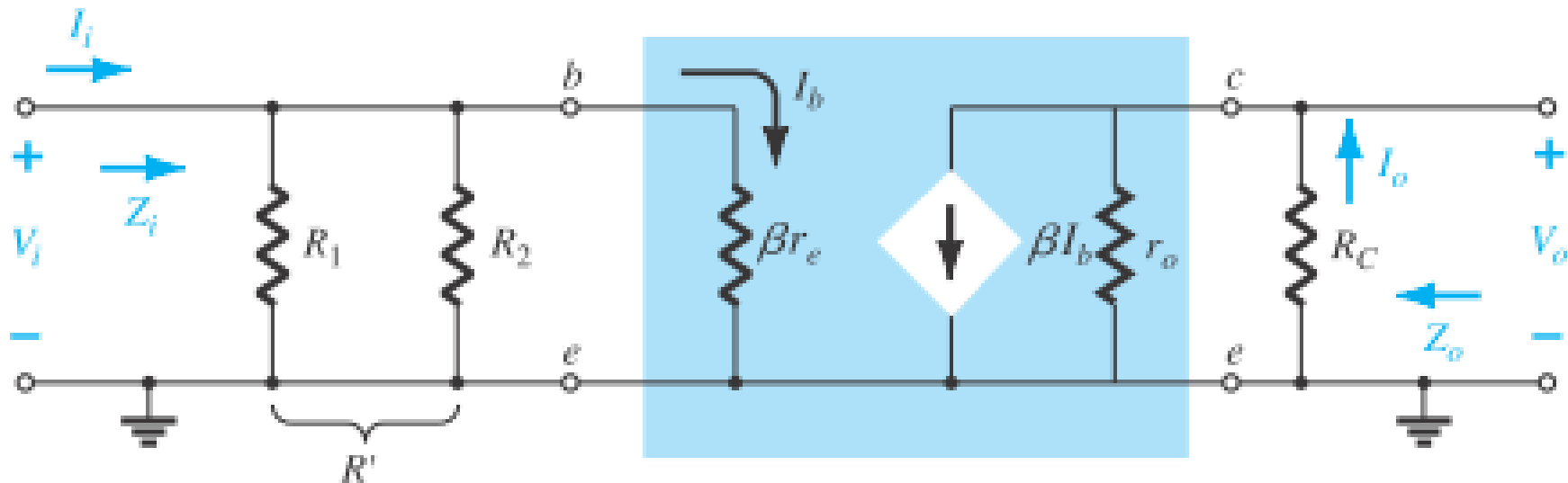
$$V_o = -\beta \left(\frac{V_i}{\beta r_e} \right) (R_C \parallel r_o)$$

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = \frac{-R_C \parallel r_o}{r_e}$$

Analise AC (TBJ)

(Configuração Emissor Comum – Polarização -Divisor de tensão)

Definição do A_v (visto que $r_o \parallel R_C$):

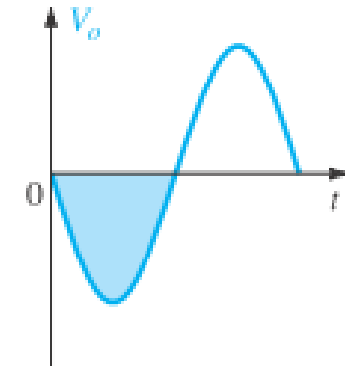
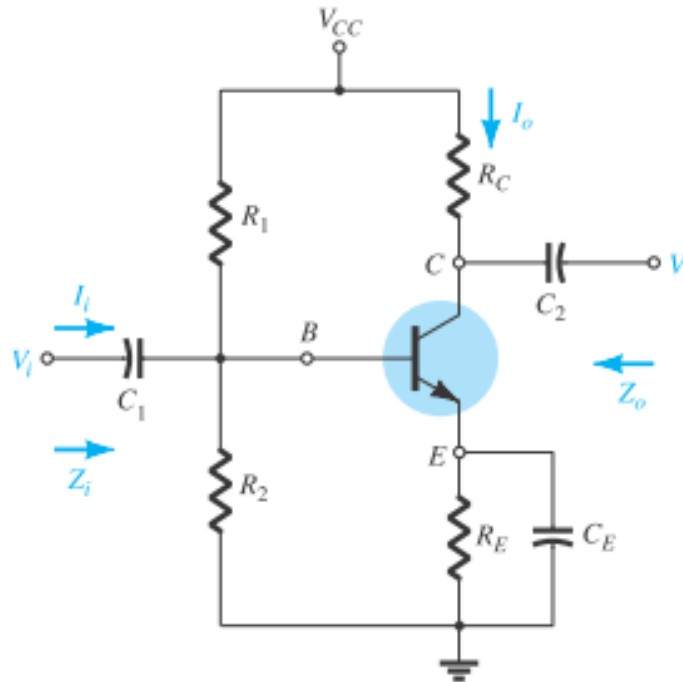
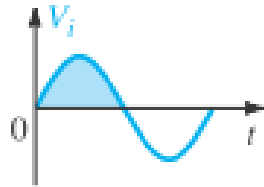


$$A_v = \frac{V_o}{V_i} \cong -\frac{R_C}{r_e} \quad r_o \geq 10R_C$$

Analise AC (TBJ)

(Configuração Emissor Comum – Polarização -Divisor de tensão)

Relação de Fase (180°):



$$A_v = -\frac{R_C}{r_e}$$

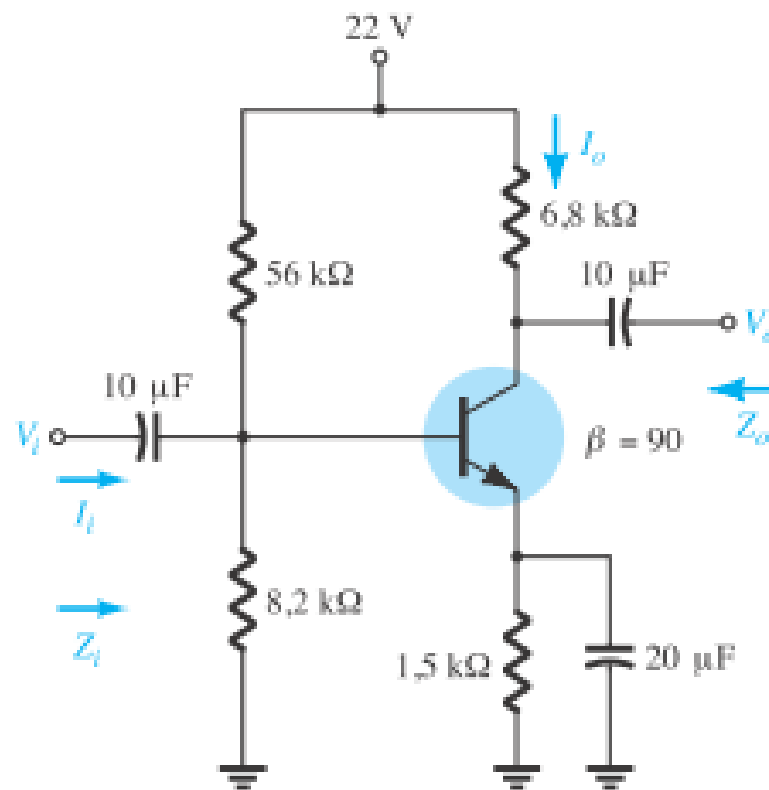
$$r_o \geq 10R_C$$

Analise AC (TBJ)

(Atividade – Configuração Emissor Comum – Polarização -Divisor de tensão)

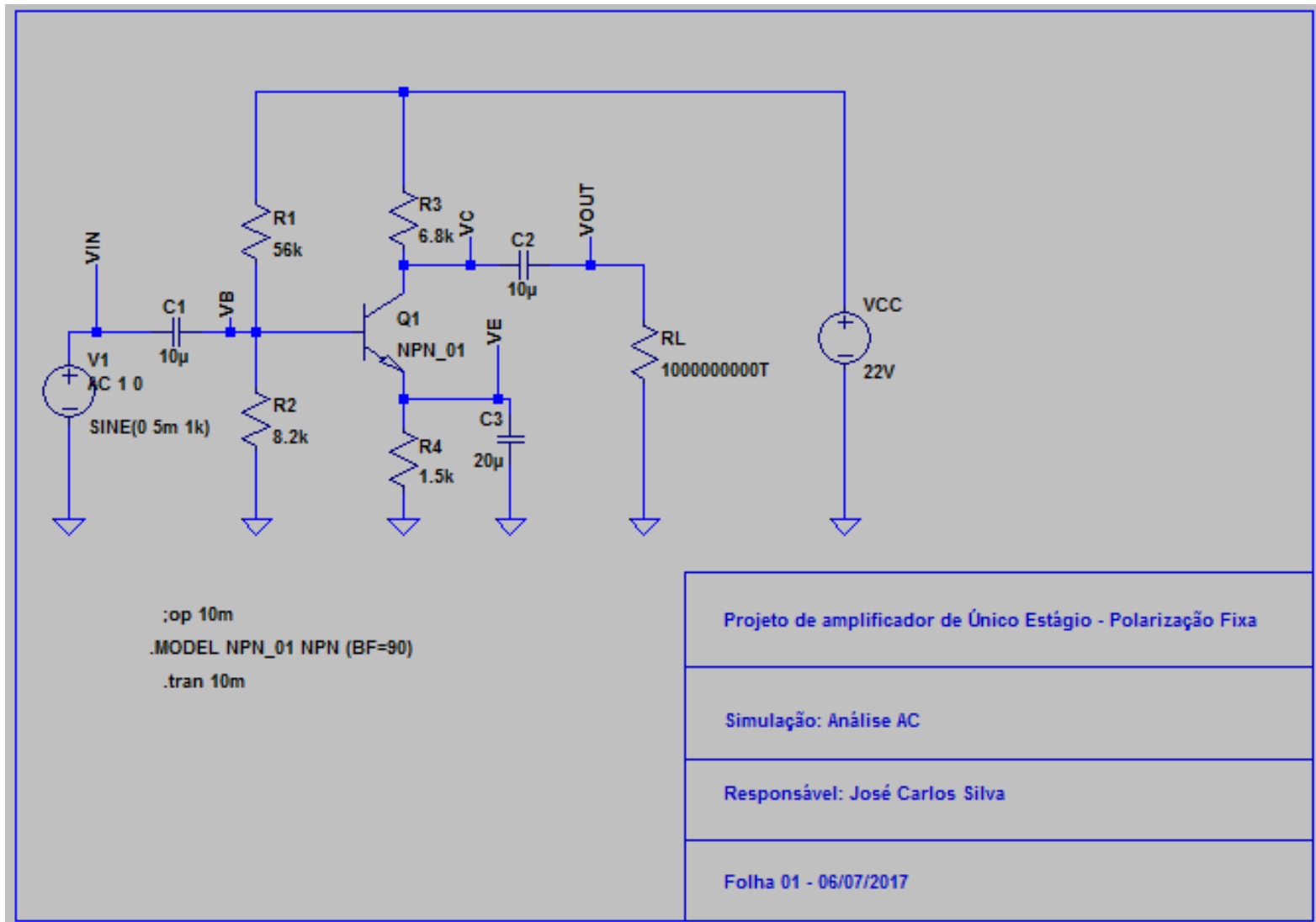
Para o circuito da Figura 5.28, determine:

- a) r_e .
- b) Z_i .
- c) Z_o ($r_o = \infty \Omega$).
- d) A_v ($r_o = \infty \Omega$).
- e) Os parâmetros dos itens (b) até (d) se $r_o = 50 \text{ k}\Omega$, e compare os resultados.



Analise AC (TBJ)

(Atividade – Configuração Emissor Comum – Polarização -Divisor de tensão)



Analise AC (TBJ)

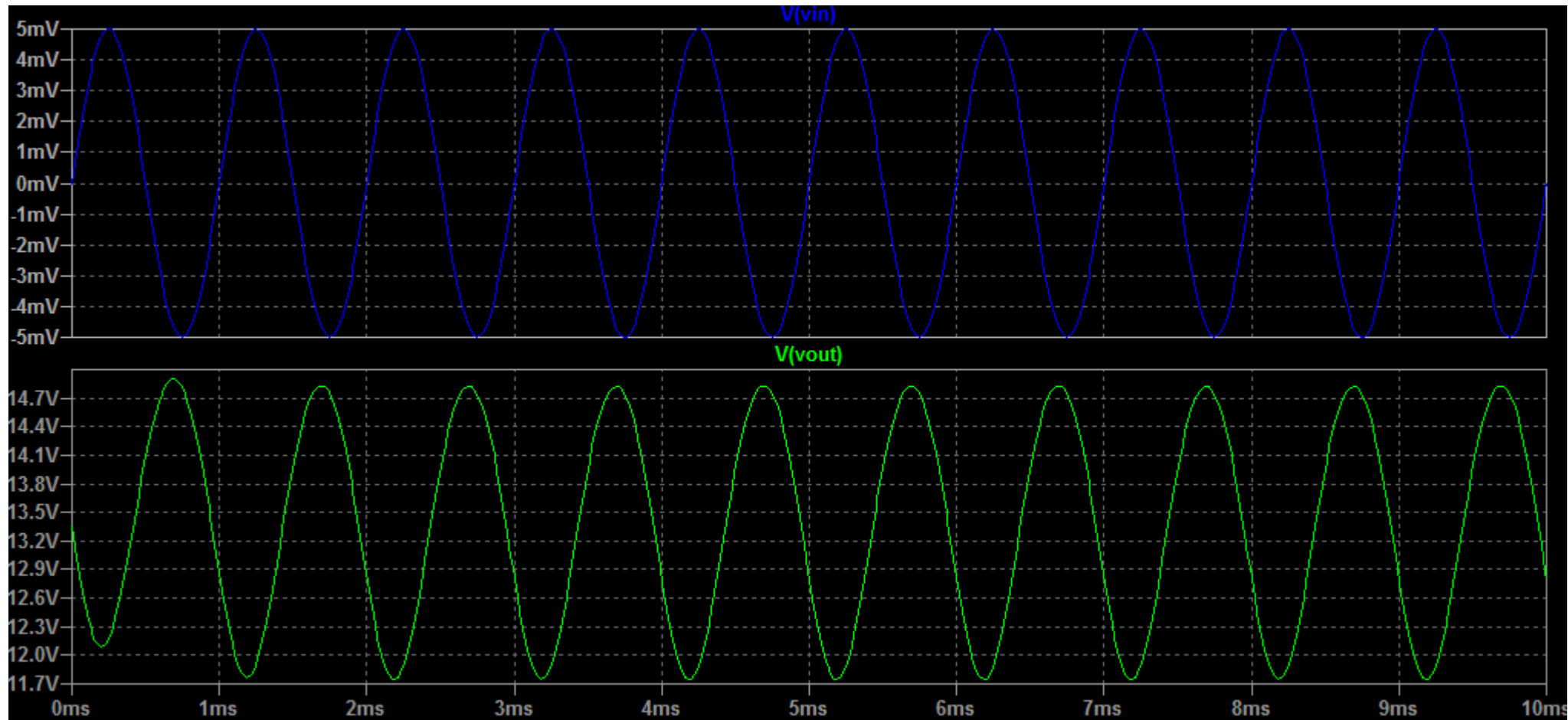
(Atividade – Configuração Emissor Comum – Polarização -Divisor de tensão)

--- Operating Point ---

V(vc) :	13.3537	voltage
V(vb) :	2.70892	voltage
V(ve) :	1.92847	voltage
V(n002) :	22	voltage
V(vin) :	0	voltage
V(vout) :	13.3523	voltage
Ic(Q1) :	0.00127152	device_current
Ib(Q1) :	1.4128e-005	device_current
Ie(Q1) :	-0.00128565	device_current
I(C3) :	-3.85694e-017	device_current
I(C2) :	-1.33523e-020	device_current
I(C1) :	2.70892e-017	device_current
I(R4) :	0.00128565	device_current
I(R2) :	0.000330356	device_current
I(R1) :	1.33523e-020	device_current
I(R1) :	0.000344484	device_current
I(R3) :	0.00127152	device_current
I(V1) :	2.70892e-017	device_current
I(Vcc) :	-0.001616	device_current

Analise AC (TBJ)

(Simulação Transiente – Configuração Emissor Comum –
Polarização -Divisor de tensão)

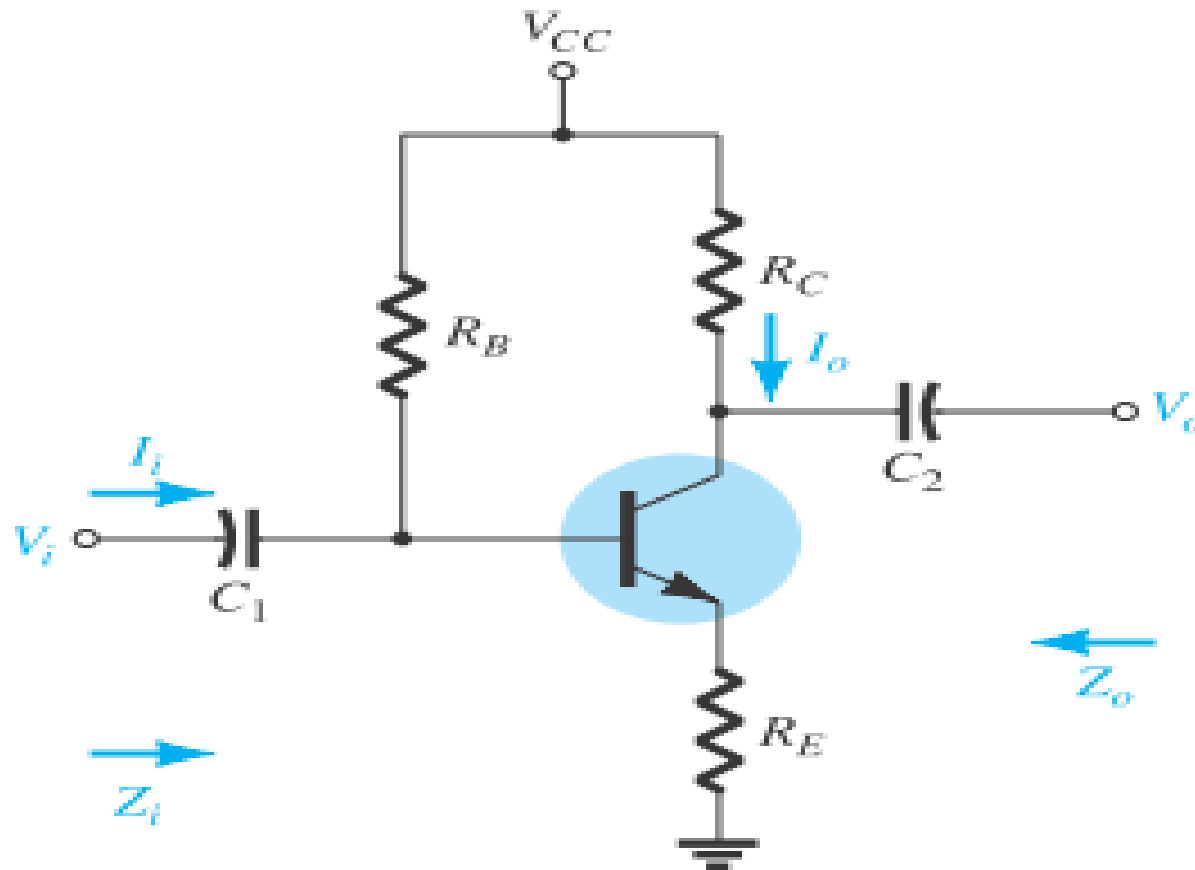


Analise AC (TBJ)

(Configuração Emissor Comum – Polarização Do Emissor)

Analisaremos a Configuração Emissor Comum (Polarização do Emissor) com o foco do resistor do emissor R_E , sofrer ou não desvio (curto-circuitado) no domínio AC.

Na primeira análise consideraremos o resistor R_E .

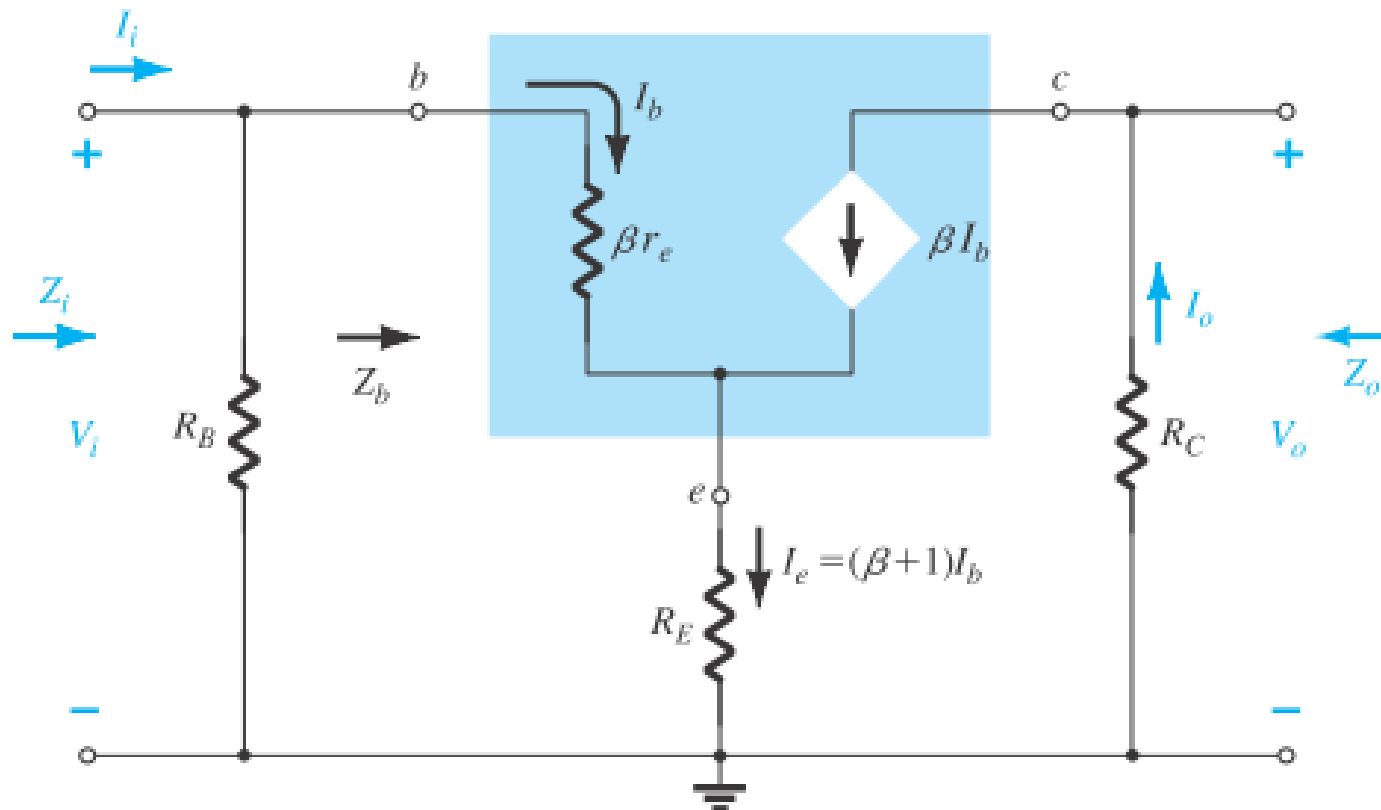


Analise AC (TBJ)

(Configuração Emissor Comum – Polarização Do Emissor)

Aplicação do método para pequenos sinais, para simplificação dos circuitos e substituição do transistor pelo modelo RE' semelhantes a Configuração Emissor

Comum – Polarização – Fixa e Polarização Por Divisor de Tensão:c



Analise AC (TBJ)

(Configuração Emissor Comum – Polarização do Emissor)

Aplicando a leis das tensões de kirchhoff do lado da entrada temos (figura anterior):

$$V_i = I_b \beta r_e + I_e R_E$$

$$V_i = I_b \beta r_e + (\beta + 1) I_b R_E$$

A impedância de entrada, voltada para dentro do circuito à direita temos (figura anterior):

$$Z_b = \frac{V_i}{I_b} = \beta r_e + (\beta + 1) R_E$$

Portanto, a impedância de entrada, com resistor R_E sem desvio é:

$$Z_b = \beta r_e + (\beta + 1) R_E$$

Analise AC (TBJ)

(Configuração Emissor Comum – Polarização Do Emissor)

Como β é \gg do que 1, temos:

$$Z_b \cong \beta r_e + \beta R_E$$

$$Z_b \cong \beta(r_e + R_E)$$

Visto que a $R_E \gg r_e$, temos:

$$Z_b \cong \beta R_E$$

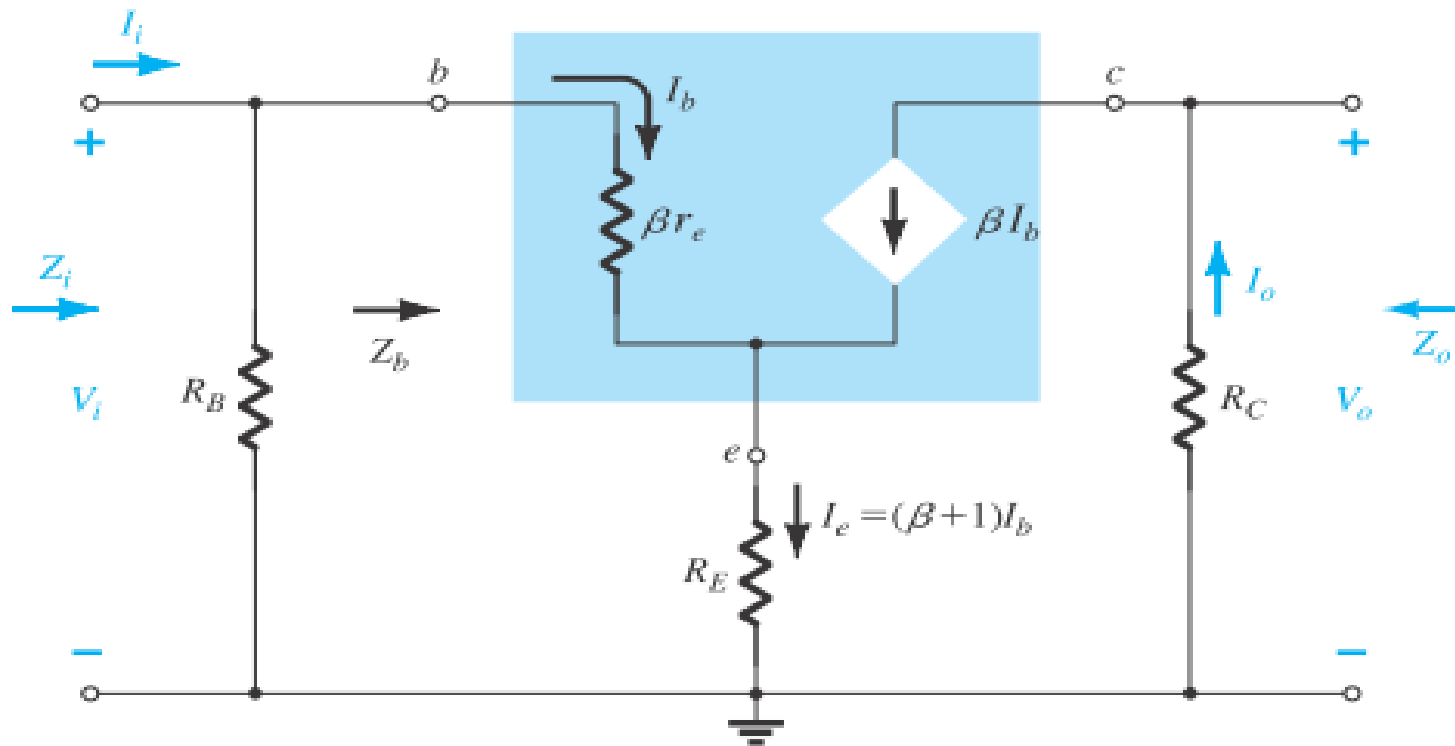
Assim temos Z_i :

$$Z_i = R_B \parallel Z_b$$

Analise AC (TBJ)

(Configuração Emissor Comum – Polarização do Emissor)

Definição do Z_o :



$$Z_o = R_C$$

Analise AC (TBJ)

(Configuração Emissor Comum – Polarização Do Emissor)

Definição do A_v :

$$I_b = \frac{V_i}{Z_b}$$

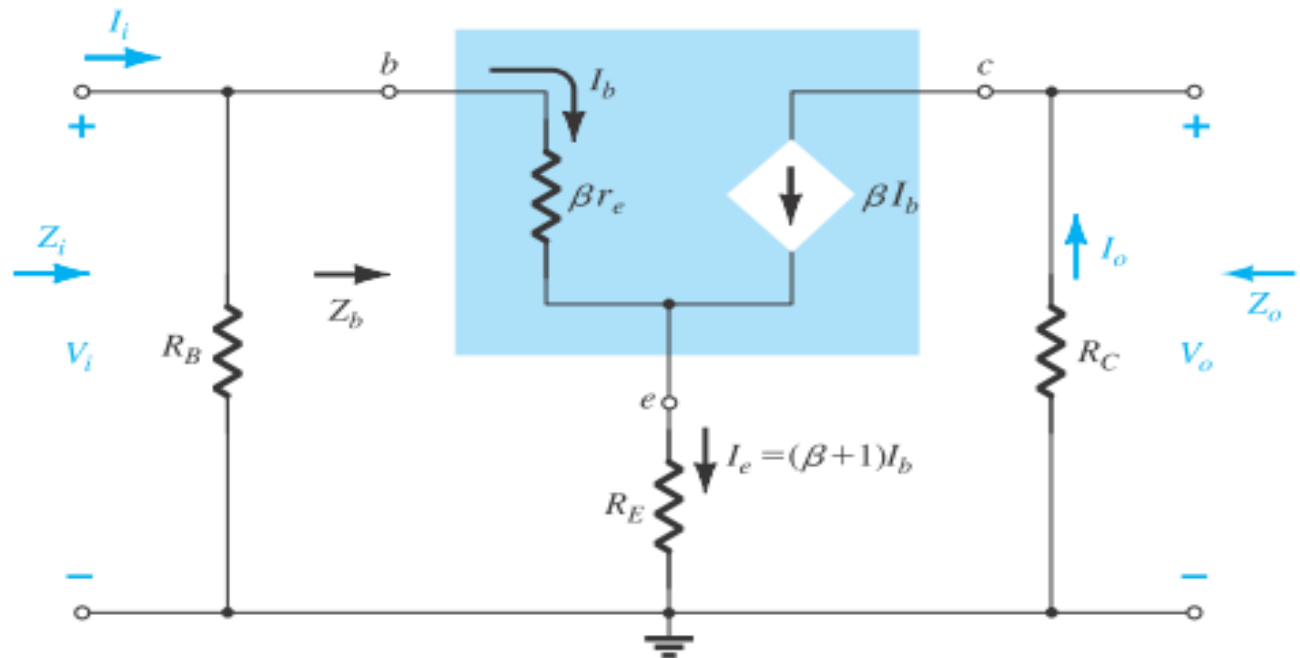
$$V_o = -I_o R_C = -\beta I_b R_C$$

$$V_o = -\beta \left(\frac{V_i}{Z_b} \right) R_C$$

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = -\frac{\beta R_C}{Z_b}$$

Como Z_b :

$$Z_b \cong \beta(r_e + R_E)$$



Analise AC (TBJ)

(Configuração Emissor Comum – Polarização Do Emissor)

Temos A_v :

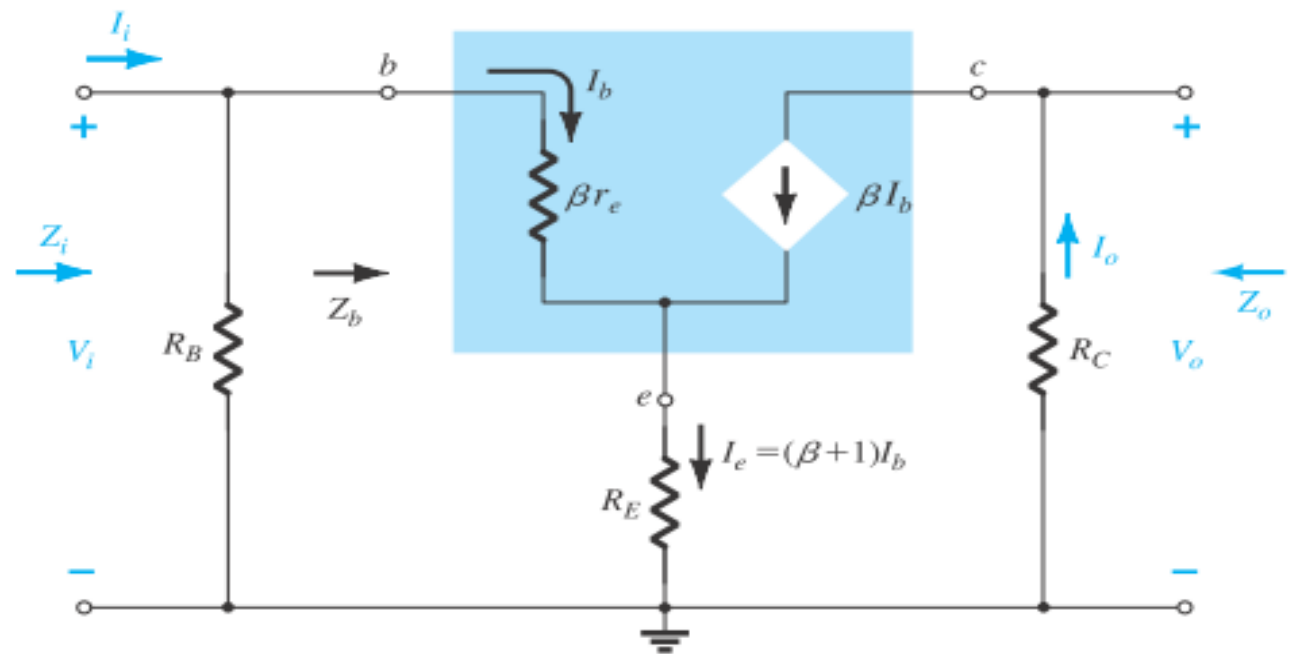
$$A_v = \frac{V_o}{V_i} \cong -\frac{R_C}{r_e + R_E}$$

Aproximando Z_b :

$$Z_b \cong \beta R_E$$

Temos A_v :

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} \cong -\frac{R_C}{R_E}$$

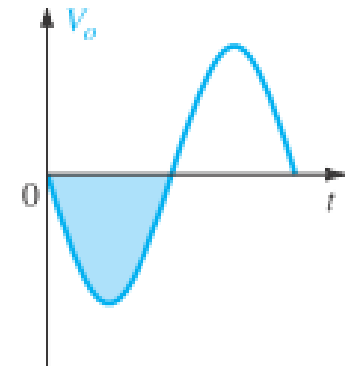
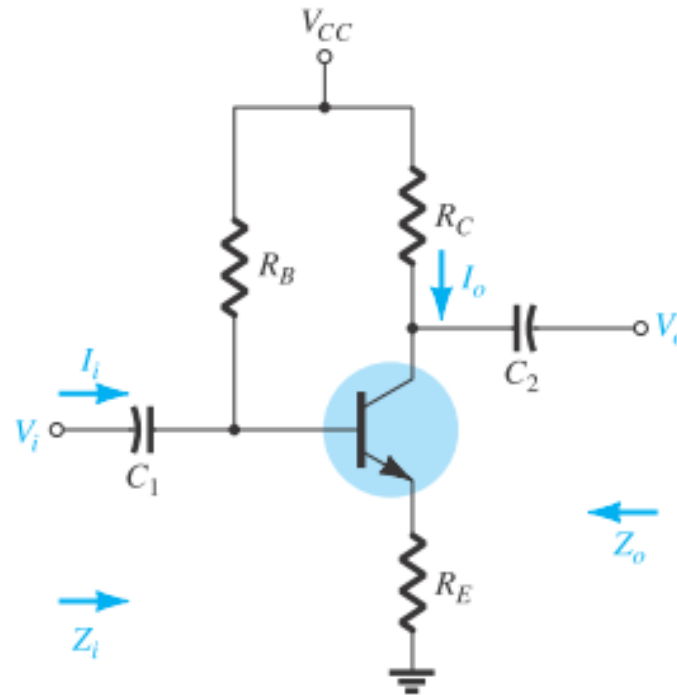
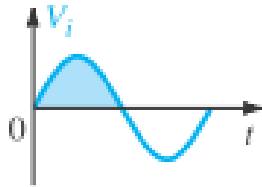


Analise AC (TBJ)

(Configuração Emissor Comum – Polarização Do Emissor)

0

Relação de Fase (180°):



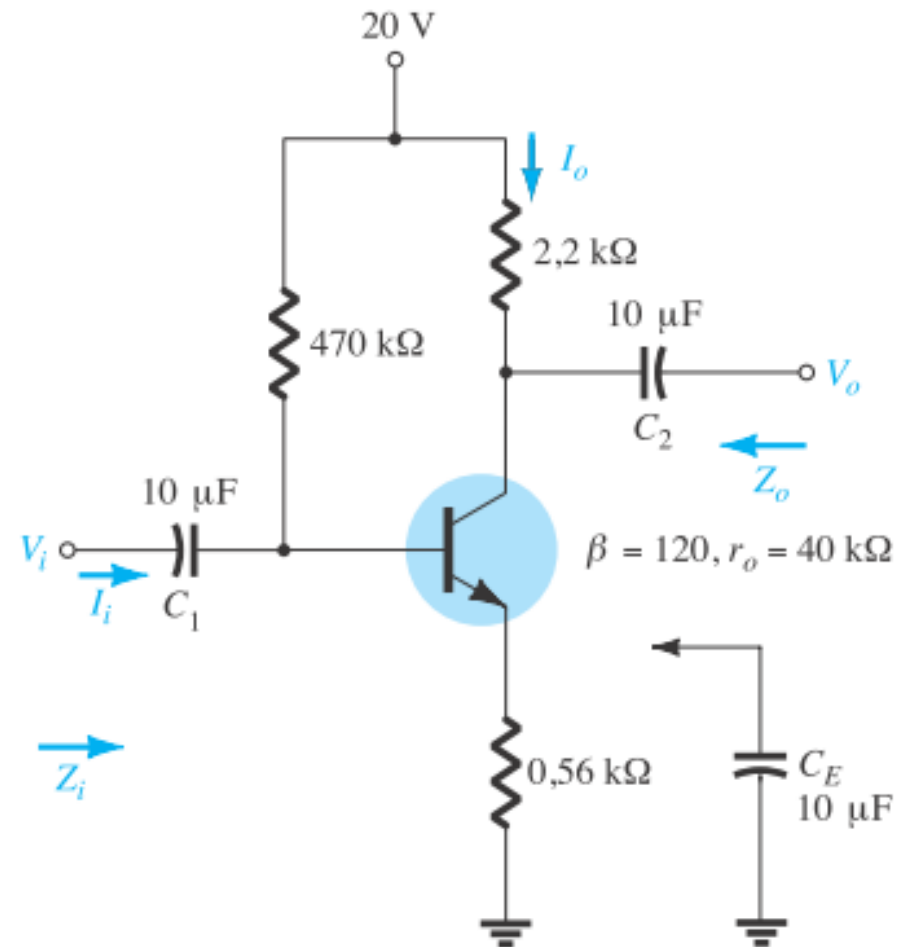
$$A_v = \frac{V_o}{V_i} \cong -\frac{R_C}{R_E}$$

Analise AC (TBJ)

(Atividade – Configuração Emissor Comum – Polarização Do Emissor)

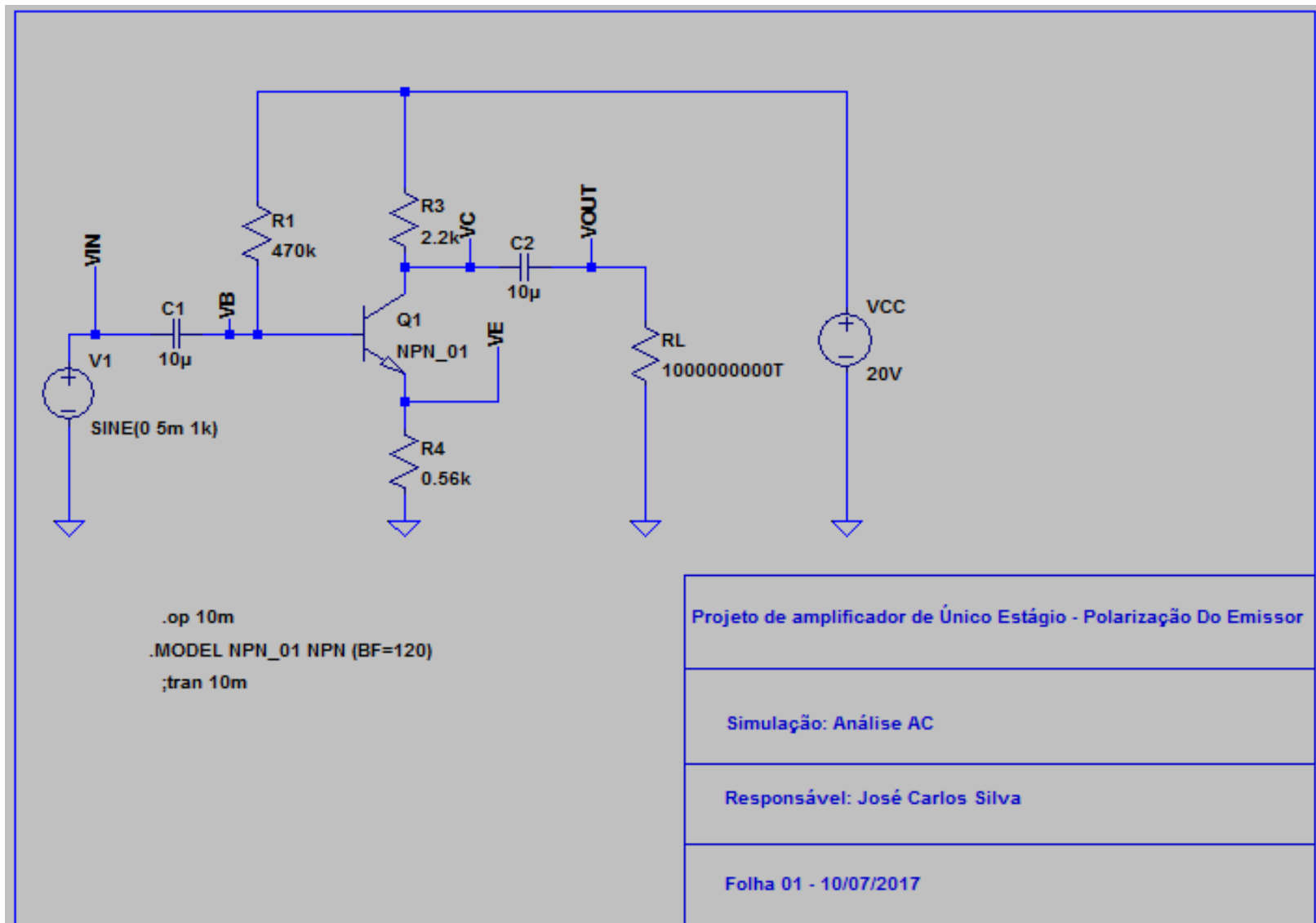
Para o circuito da Figura 5.32, sem C_E (sem desvio), determine:

- a) r_e .
- b) Z_i .
- c) Z_o .
- d) A_v .



Analise AC (TBJ)

(Atividade – Configuração Emissor Comum – Polarização Do Emissor)



Analise AC (TBJ)

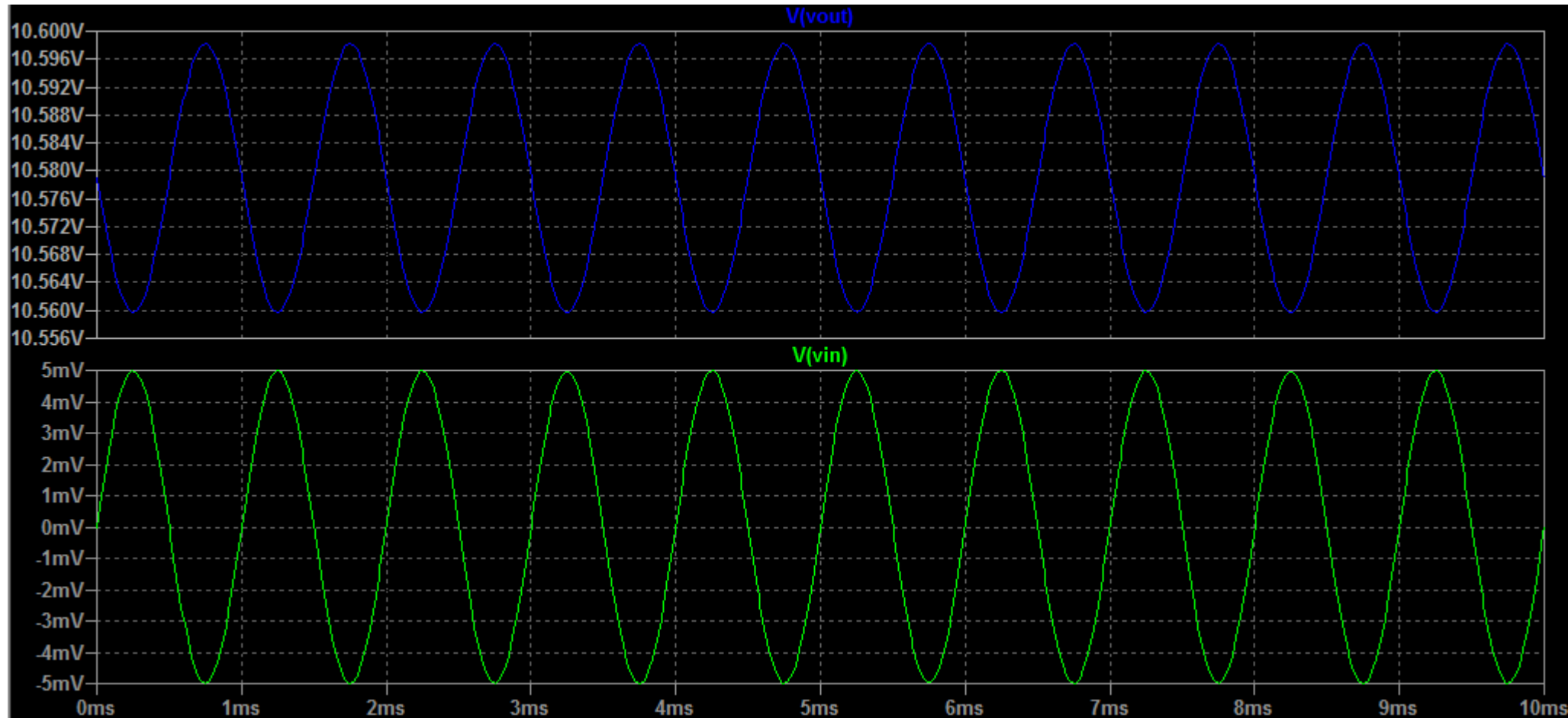
(Atividade – Configuração Emissor Comum – Polarização Do Emissor)

--- Operating Point ---

V(vc) :	10.58	voltage
V(vb) :	3.22964	voltage
V(ve) :	2.41779	voltage
V(n002) :	20	voltage
V(vin) :	0	voltage
V(vout) :	10.579	voltage
Ic(Q1) :	0.0042818	device_current
Ib(Q1) :	3.56816e-005	device_current
Ie(Q1) :	-0.00431748	device_current
I(C2) :	-1.0579e-020	device_current
I(C1) :	3.22964e-017	device_current
I(R4) :	0.00431748	device_current
I(R1) :	1.0579e-020	device_current
I(R1) :	3.56816e-005	device_current
I(R3) :	0.0042818	device_current
I(V1) :	3.22964e-017	device_current
I(Vcc) :	-0.00431748	device_current

Analise AC (TBJ)

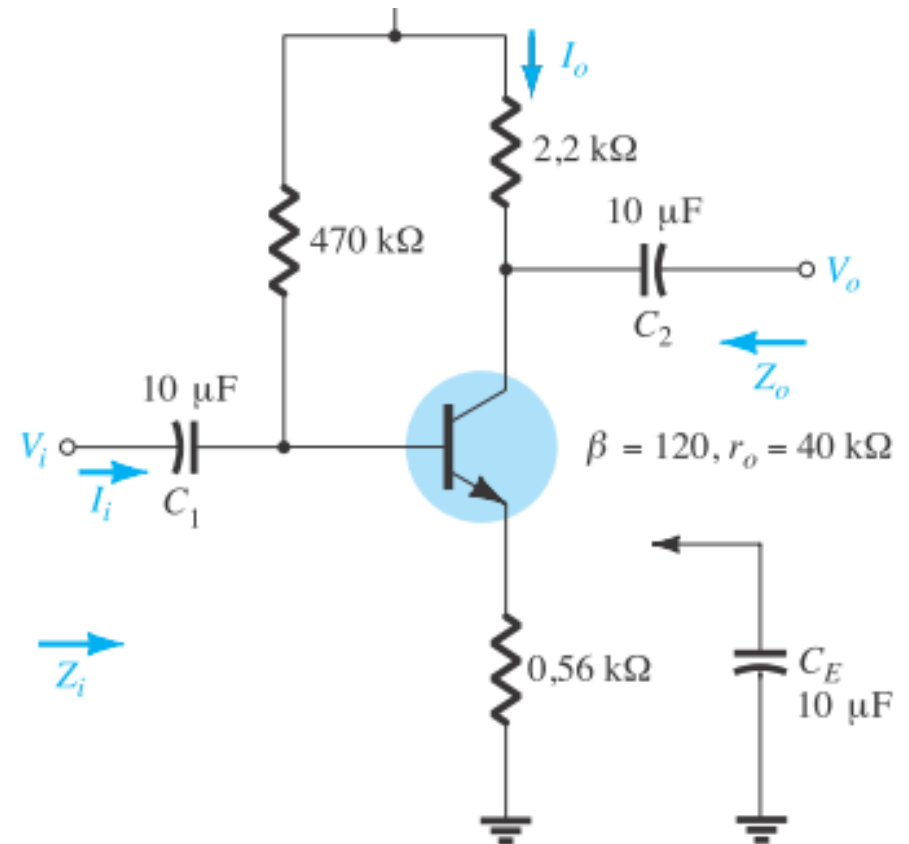
(Simulação Transiente – Configuração Emissor Comum –
Polarização Do Emissor)



Analise AC (TBJ)

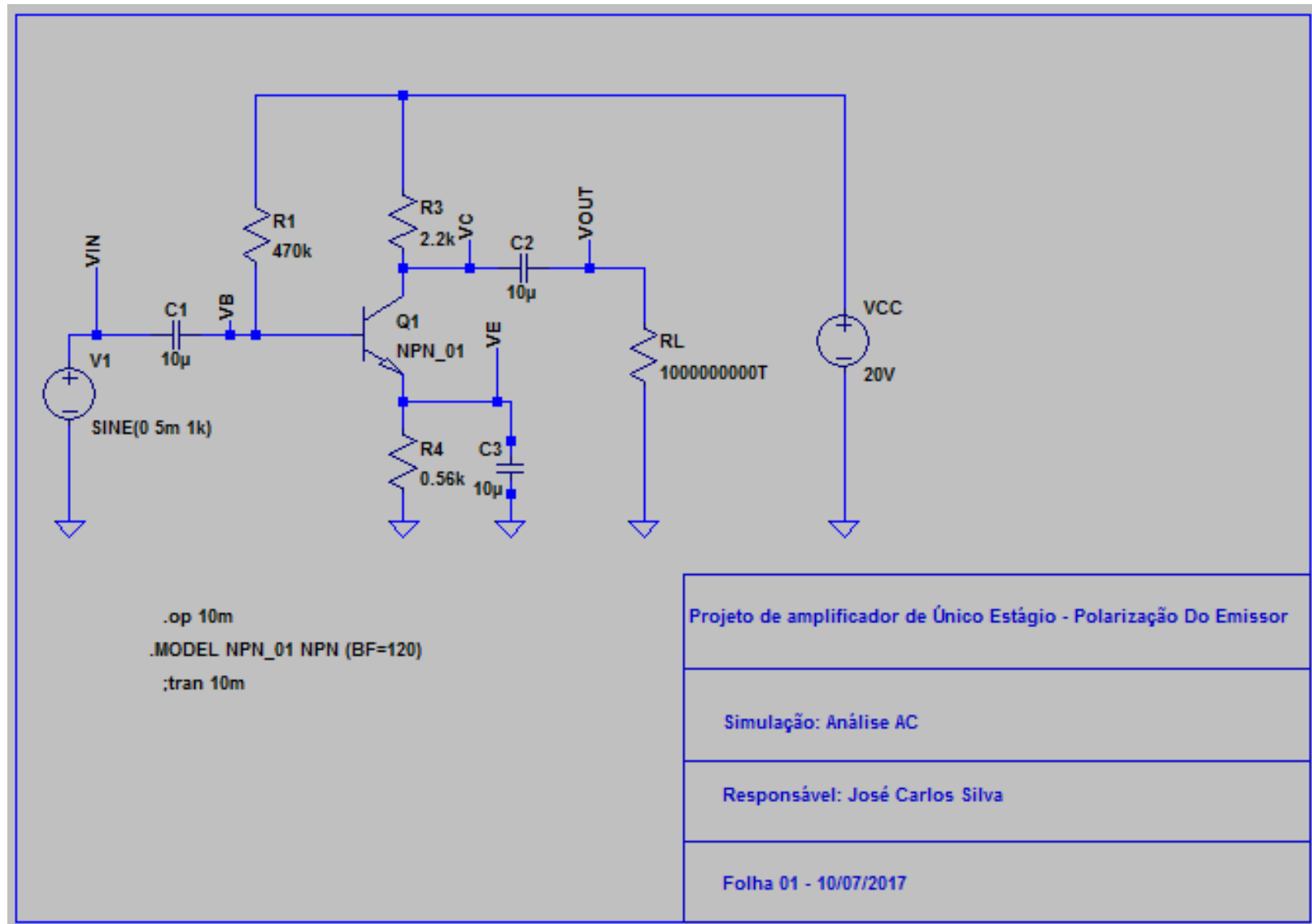
(Atividade – Configuração Emissor Comum – Polarização Do Emissor)

Renita a análise do Exemplo 5.3 com C_E no lugar indicado na Figura 5.32.



Analise AC (TBJ)

(Atividade – Configuração Emissor Comum – Polarização Do Emissor)



Analise AC (TBJ)

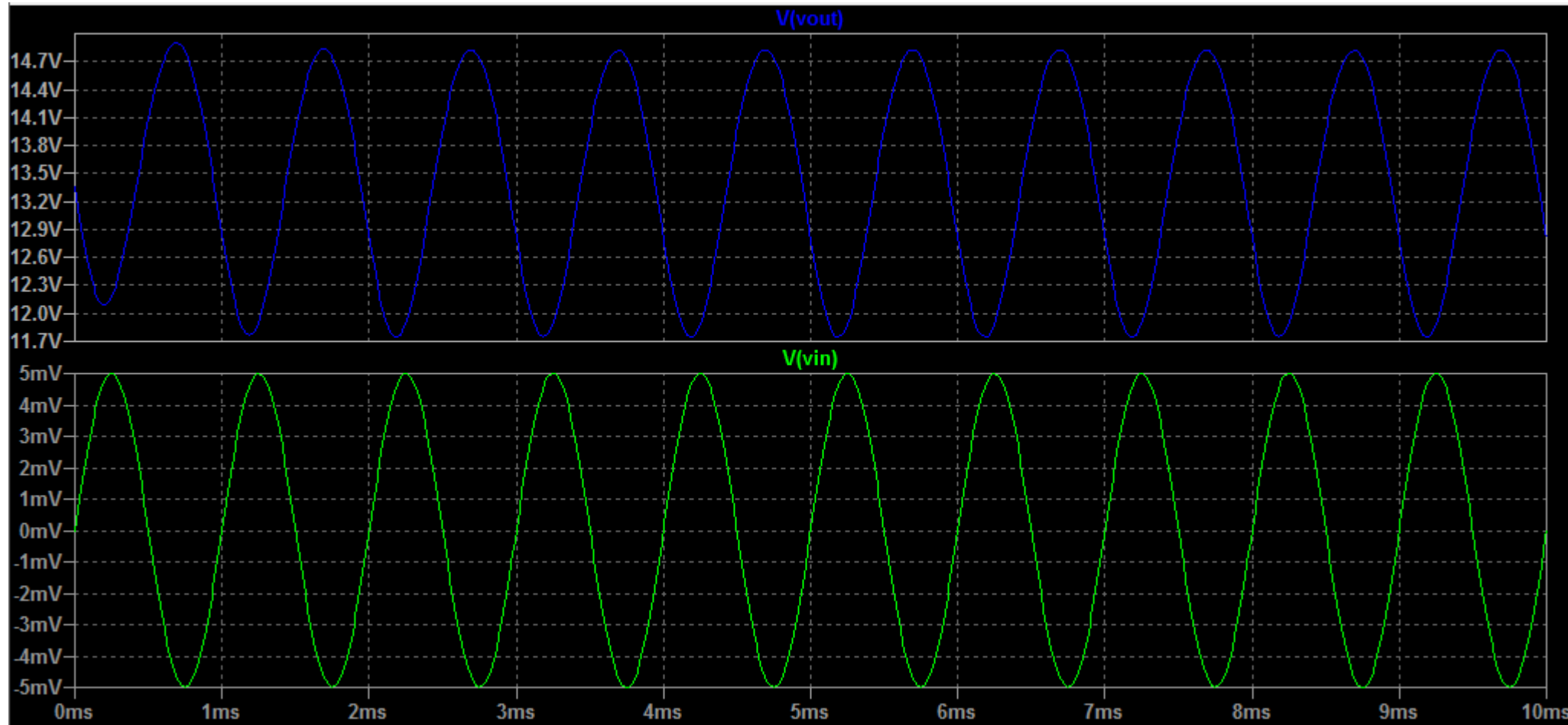
(Atividade – Configuração Emissor Comum – Polarização Do Emissor)

--- Operating Point ---

V(vc) :	10.58	voltage
V(vb) :	3.22964	voltage
V(ve) :	2.41779	voltage
V(n002) :	20	voltage
V(vin) :	0	voltage
V(vout) :	10.579	voltage
Ic(Q1) :	0.0042818	device_current
Ib(Q1) :	3.56816e-005	device_current
Ie(Q1) :	-0.00431748	device_current
I(C3) :	-2.41779e-017	device_current
I(C2) :	-1.0579e-020	device_current
I(C1) :	3.22964e-017	device_current
I(R4) :	0.00431748	device_current
I(Rl) :	1.0579e-020	device_current
I(R1) :	3.56816e-005	device_current
I(R3) :	0.0042818	device_current
I(V1) :	3.22964e-017	device_current
I(Vcc) :	-0.00431748	device_current

Analise AC (TBJ)

(Simulação Transiente – Configuração Emissor Comum –
Polarização Do Emissor)

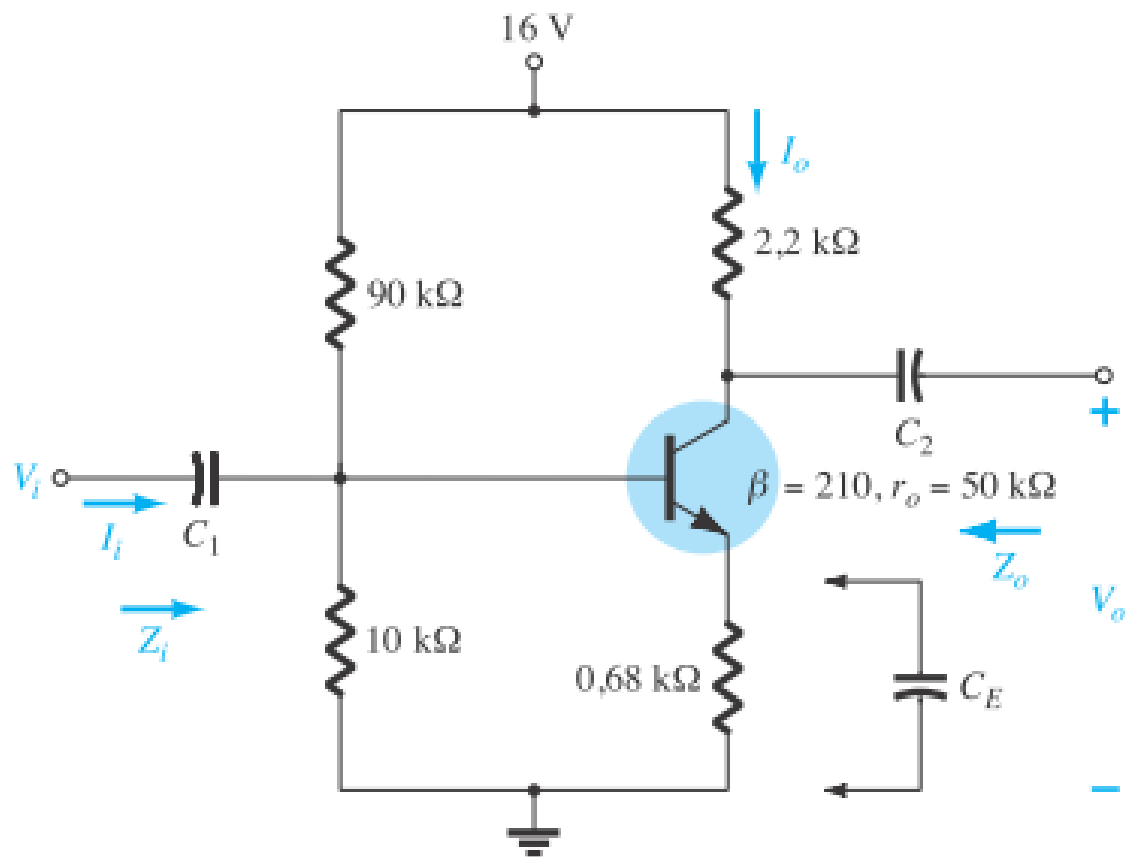


Analise AC (TBJ)

(Atividade – Configuração Emissor Comum – Polarização Do Divisor De Tensão)

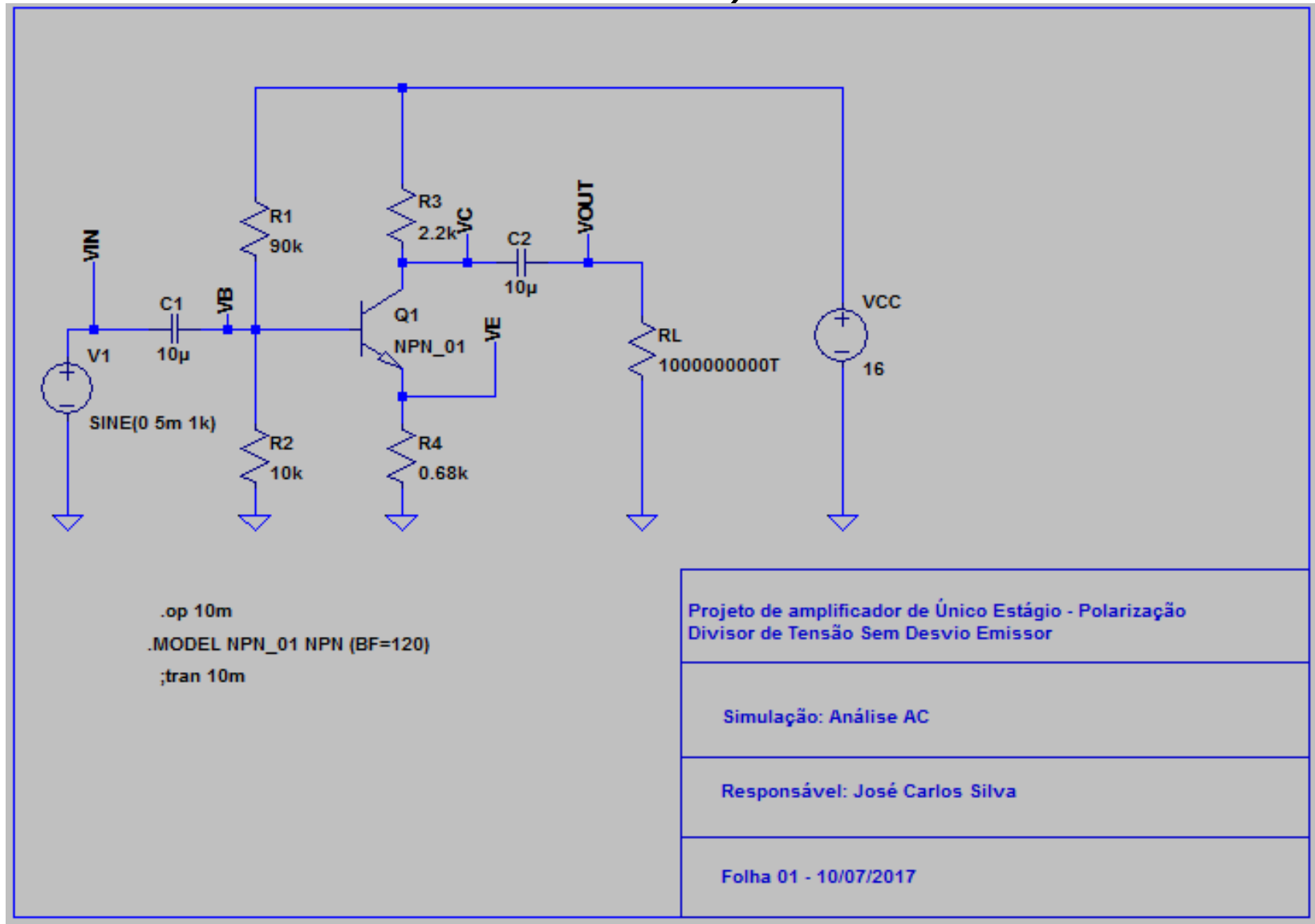
Para o circuito da Figura 5.33 (com C_E não conectado),
determine (usando as aproximações adequadas):

- a) r_e .
- b) Z_i .
- c) Z_o .
- d) A_v .



Analise AC (TBJ)

(Atividade – Configuração Emissor Comum – Polarização -Divisor de tensão)



Analise AC (TBJ)

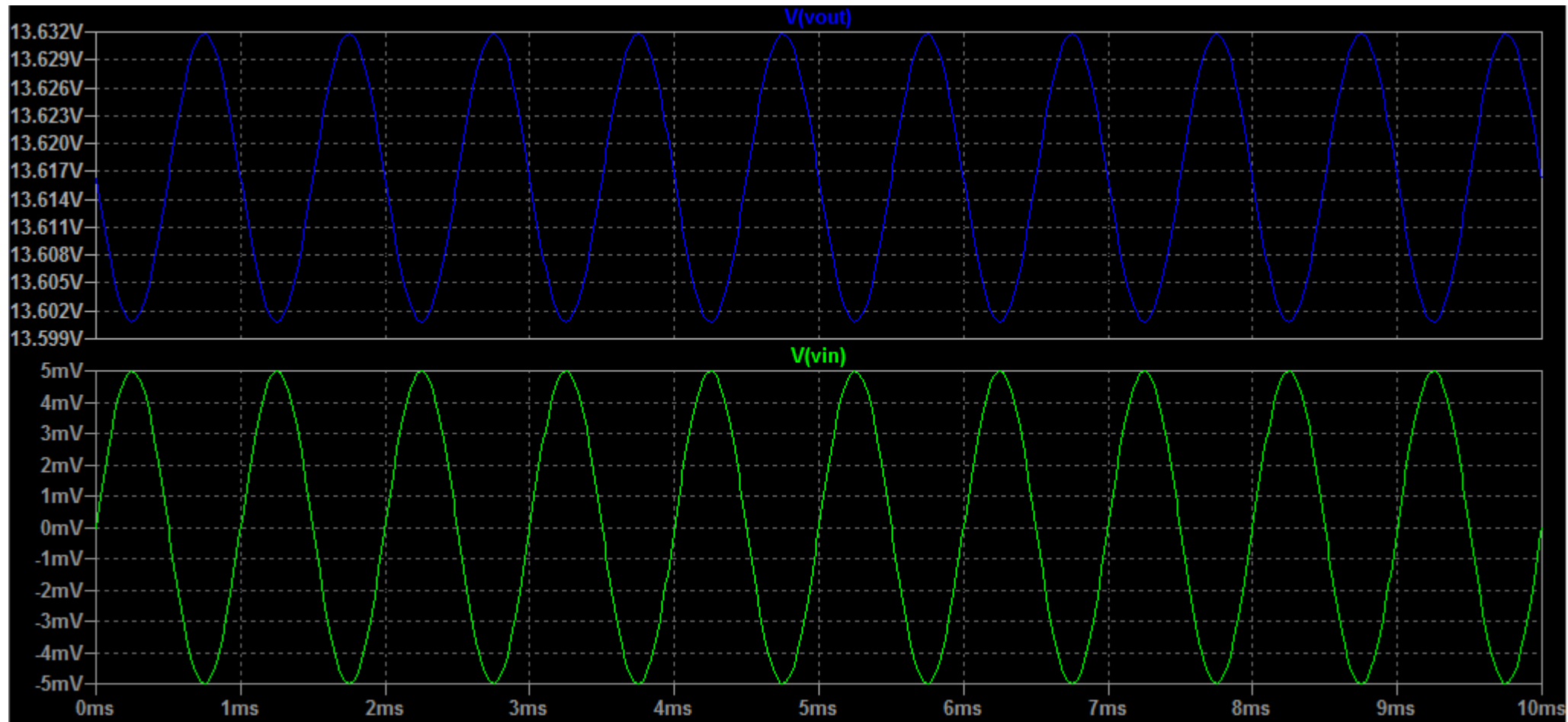
(Atividade – Configuração Emissor Comum – Polarização -Divisor de tensão)

--- Operating Point ---

V(vc) :	13.6177	voltage
V(vb) :	1.51878	voltage
V(ve) :	0.742493	voltage
V(n002) :	16	voltage
V(vin) :	0	voltage
V(vout) :	13.6163	voltage
Ic(Q1) :	0.00108288	device_current
Ib(Q1) :	9.02399e-006	device_current
Ie(Q1) :	-0.0010919	device_current
I(C2) :	-1.36163e-020	device_current
I(C1) :	1.51878e-017	device_current
I(R2) :	0.000151878	device_current
I(R4) :	0.0010919	device_current
I(R1) :	1.36163e-020	device_current
I(R1) :	0.000160902	device_current
I(R3) :	0.00108288	device_current
I(V1) :	1.51878e-017	device_current
I(Vcc) :	-0.00124378	device_current

Analise AC (TBJ)

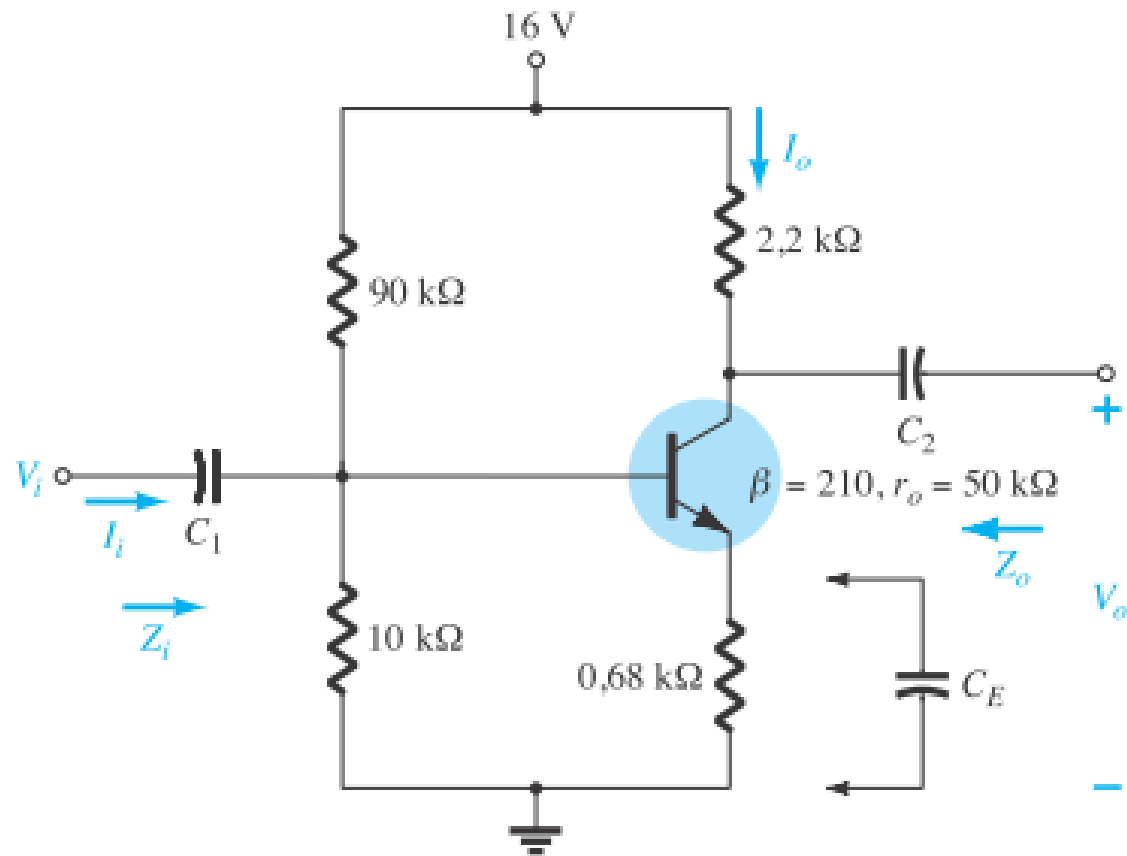
(Simulação Transiente – Configuração Emissor Comum –
Polarização -Divisor de tensão)



Analise AC (TBJ)

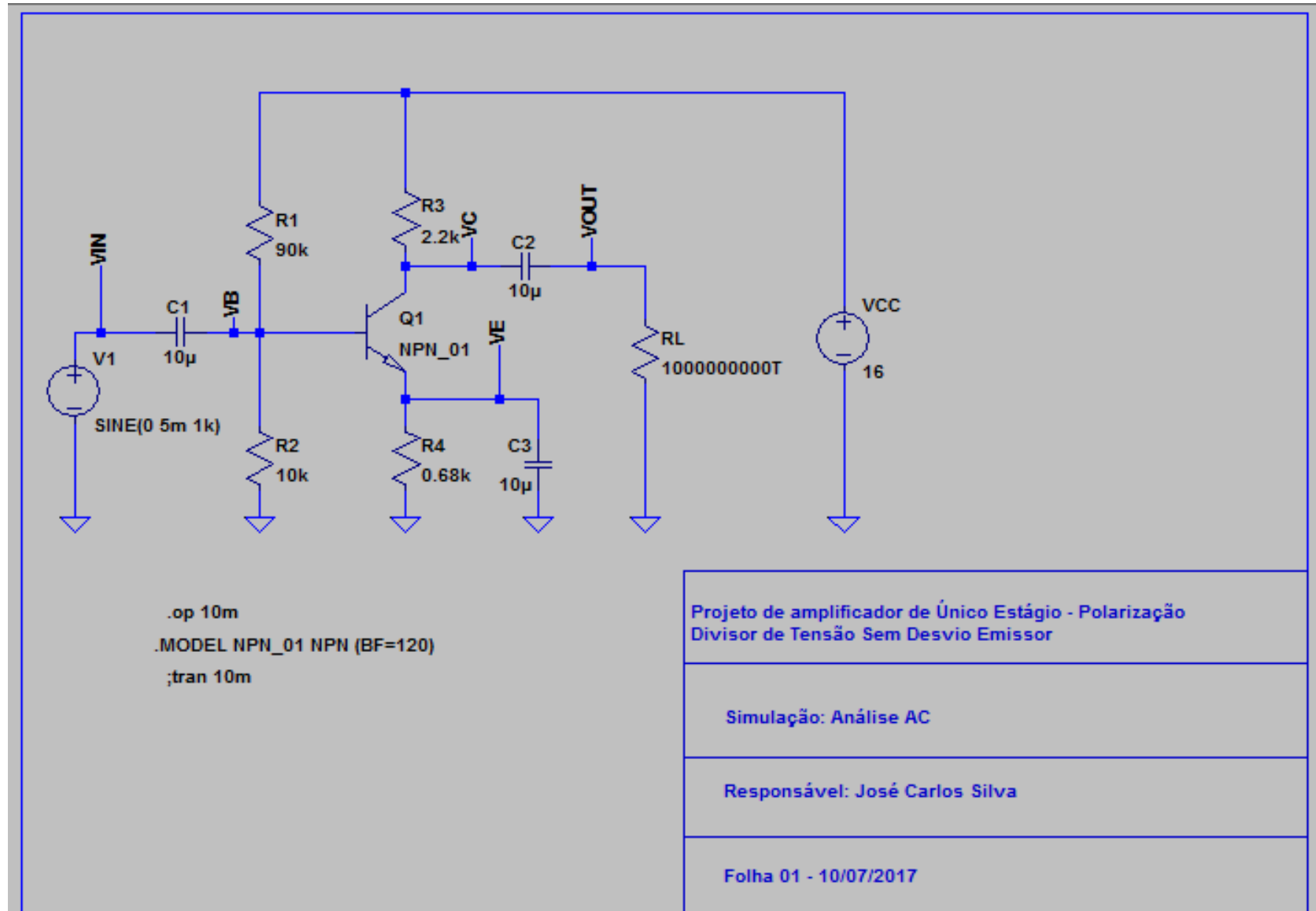
(Atividade – Configuração Emissor Comum – Polarização Do Emissor)

Repita o Exemplo 5.5 com C_E no lugar indicado na Figura 5.33.



Analise AC (TBJ)

(Atividade – Configuração Emissor Comum – Polarização -Divisor de tensão)



Analise AC (TBJ)

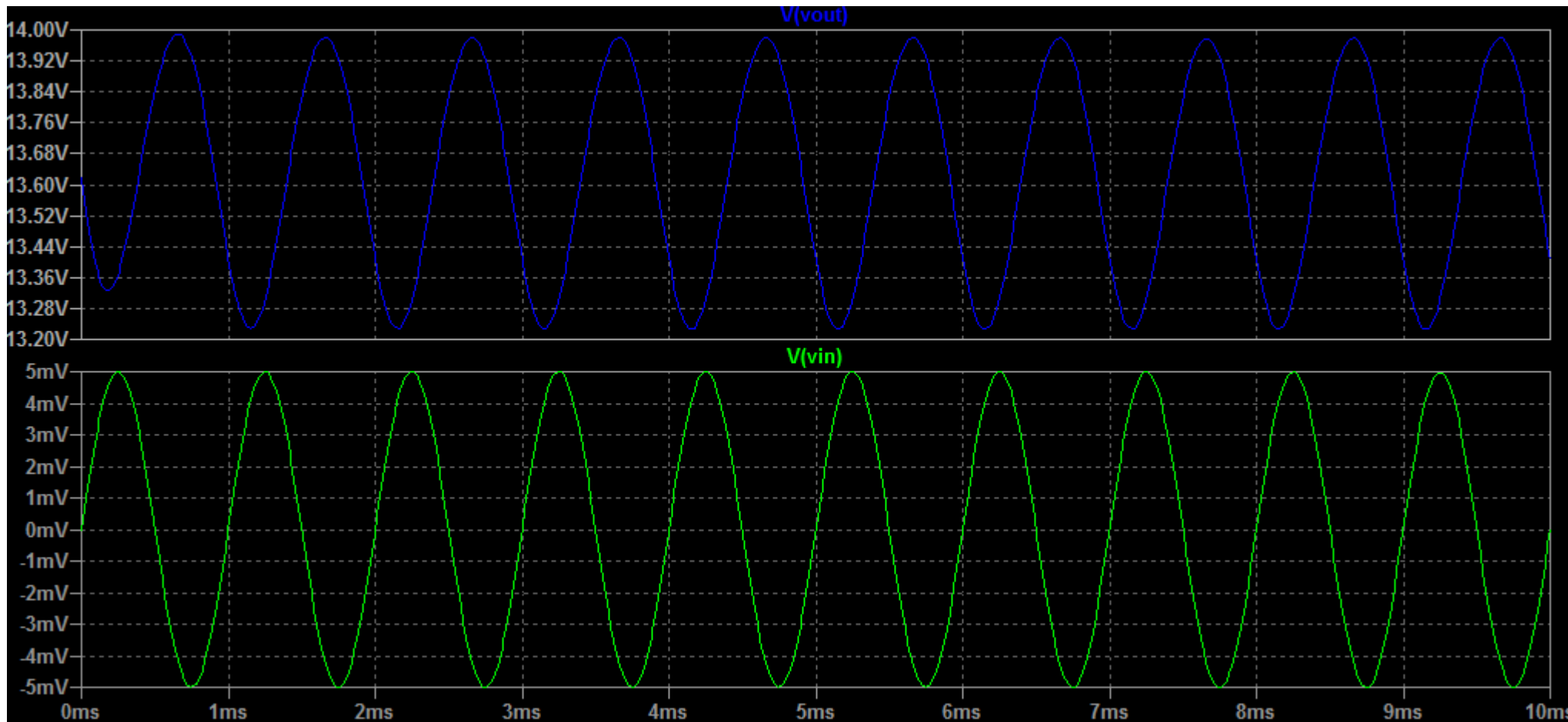
(Atividade – Configuração Emissor Comum – Polarização -Divisor de tensão)

--- Operating Point ---

V(vc) :	13.6177	voltage
V(vb) :	1.51878	voltage
V(ve) :	0.742493	voltage
V(n002) :	16	voltage
V(vin) :	0	voltage
V(vout) :	13.6163	voltage
Ic (Q1) :	0.00108288	device_current
Ib (Q1) :	9.02399e-006	device_current
Ie (Q1) :	-0.0010919	device_current
I (C3) :	-7.42493e-018	device_current
I (C2) :	-1.36163e-020	device_current
I (C1) :	1.51878e-017	device_current
I (R2) :	0.000151878	device_current
I (R4) :	0.0010919	device_current
I (R1) :	1.36163e-020	device_current
I (R1) :	0.000160902	device_current
I (R3) :	0.00108288	device_current
I (V1) :	1.51878e-017	device_current
I (Vcc) :	-0.00124378	device_current

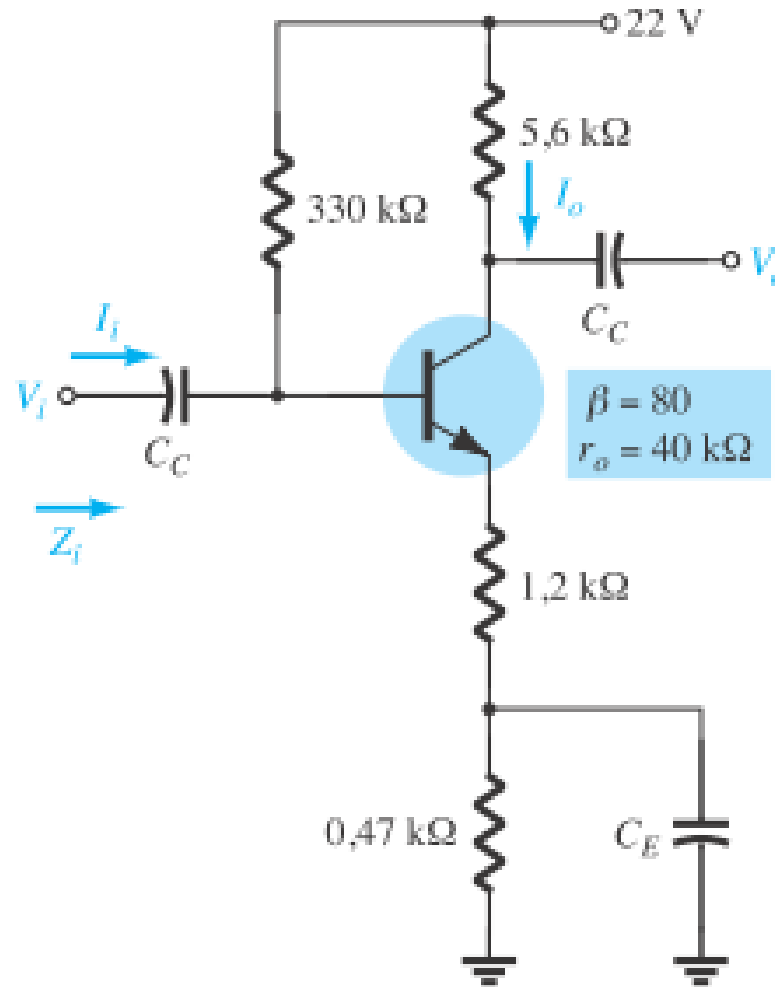
Analise AC (TBJ)

(Simulação Transiente – Configuração Emissor Comum –
Polarização -Divisor de tensão)



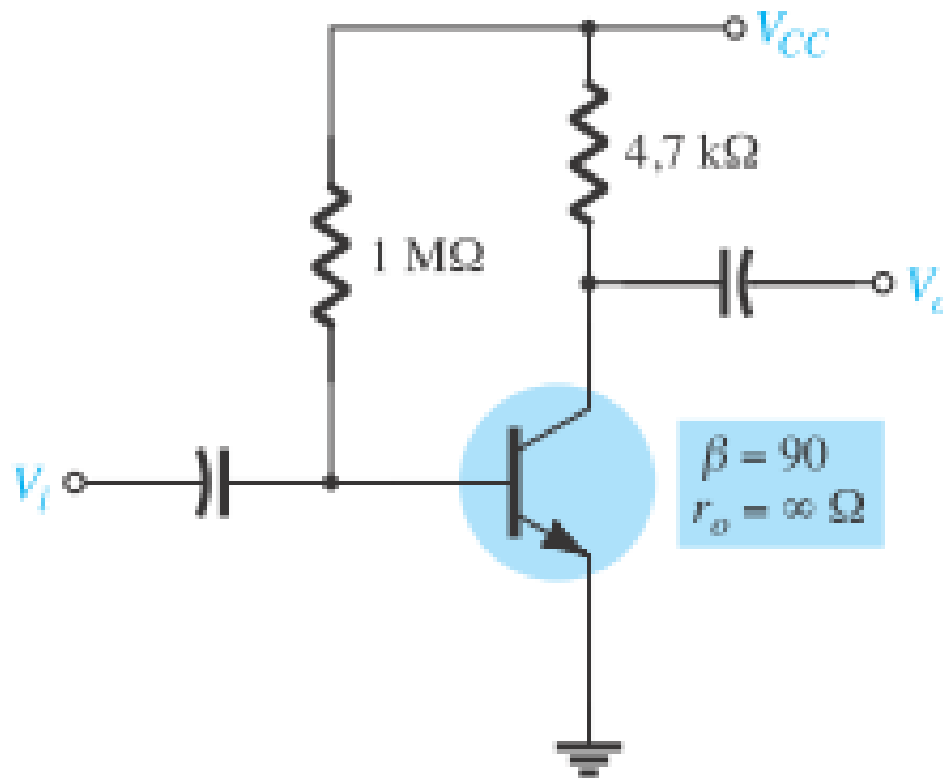
Analise DC/AC (TBJ)

Atividade 1 - Para o circuito abaixo: Determinar as grandezas elétricas aplicando as técnicas de análise DC e AC, realizar as devidas simulações e comparar os resultados.



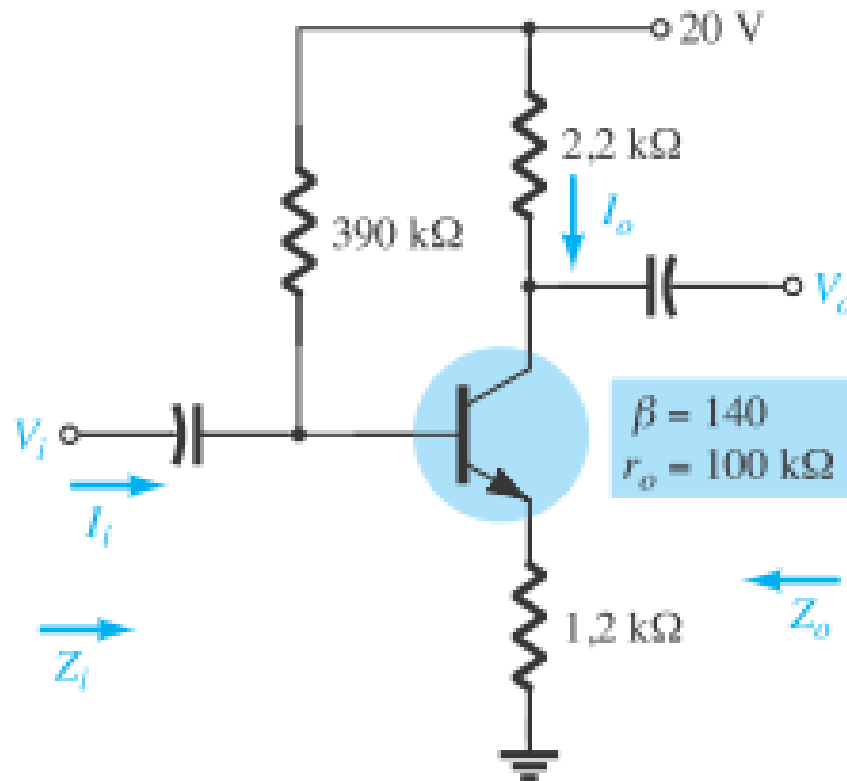
Analise DC/AC (TBJ)

Atividade 2 - Para o circuito abaixo: Considerando $A_v = -160$, determinar as grandezas elétricas aplicando as técnicas de análise DC e AC, realizar as devidas simulações e comparar os resultados.



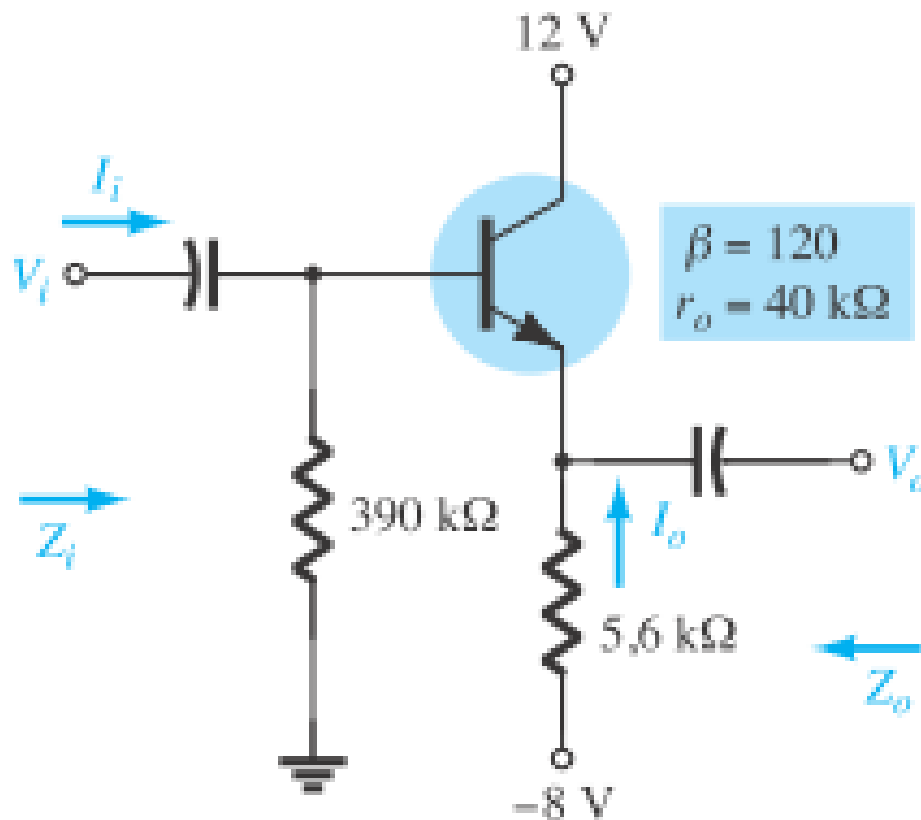
Analise DC/AC (TBJ)

Atividade 3 - Para o circuito abaixo: Determinar as grandezas elétricas aplicando as técnicas de análise DC e AC, realizar as devidas simulações e comparar os resultados. OBS: Substitua $r_o = 20\text{k}$ (ohms).



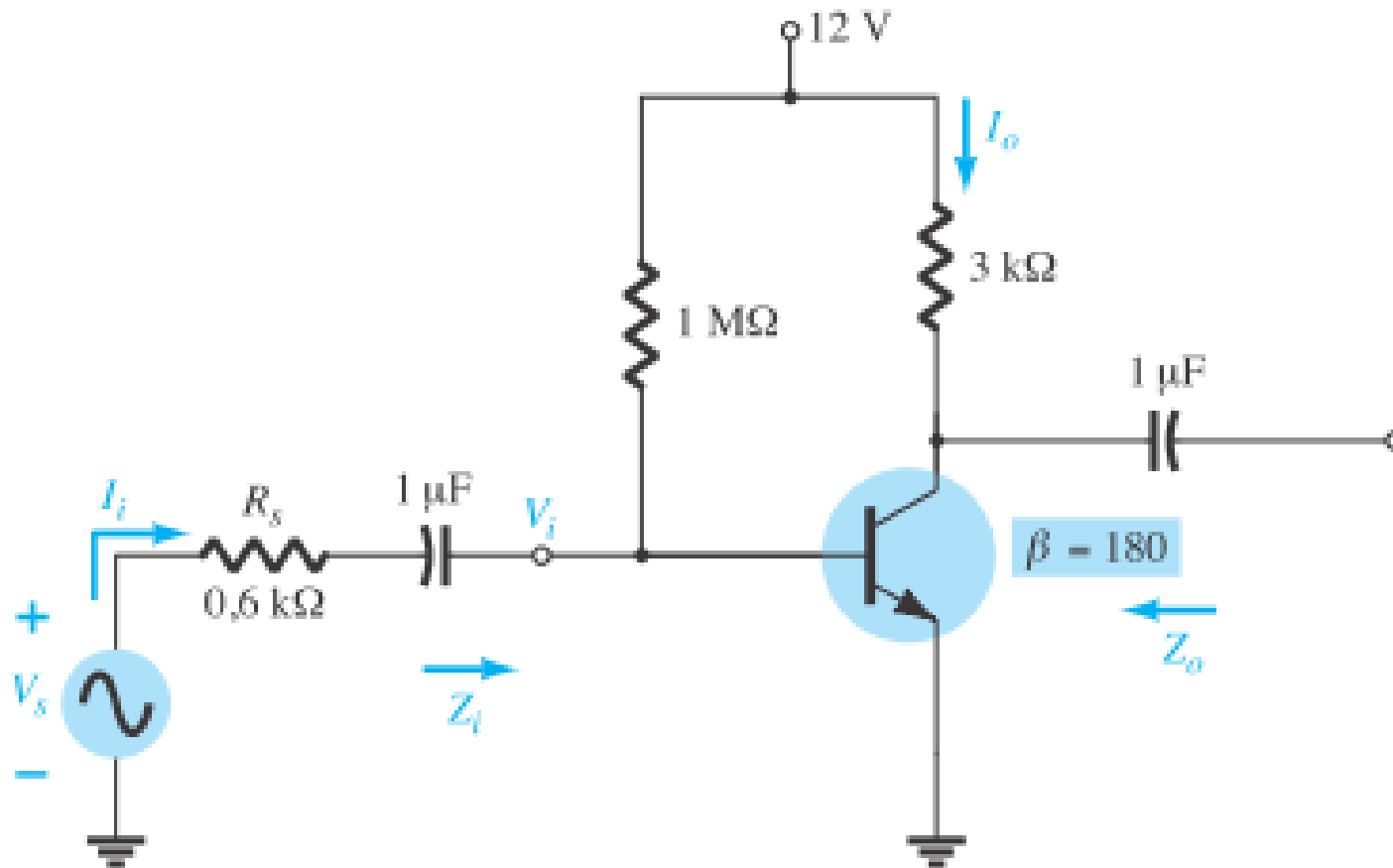
Analise DC/AC (TBJ)

Atividade 4 - Para o circuito abaixo: Determinar as grandezas elétricas aplicando as técnicas de análise DC e AC, realizar as devidas simulações e comparar os resultados.
OBS: Substitua $r_o = 160\text{ k}$ (ohms).



Analise DC/AC (TBJ)

Atividade 5 - Para o circuito abaixo: Determinar as grandezas elétricas aplicando as técnicas de análise DC e AC, realizar as devidas simulações e comparar os resultados.



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.