

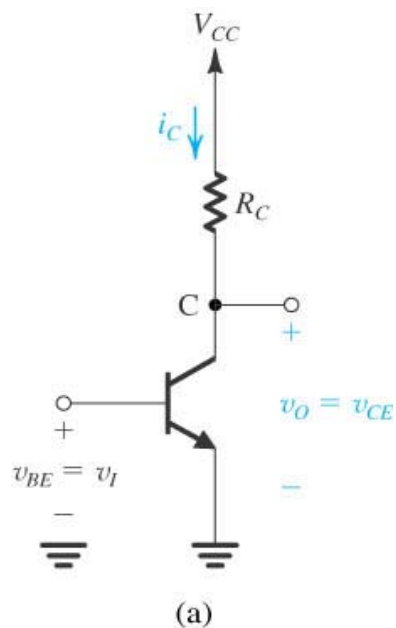


Modelos de pequenos sinais e análise CA - BJT

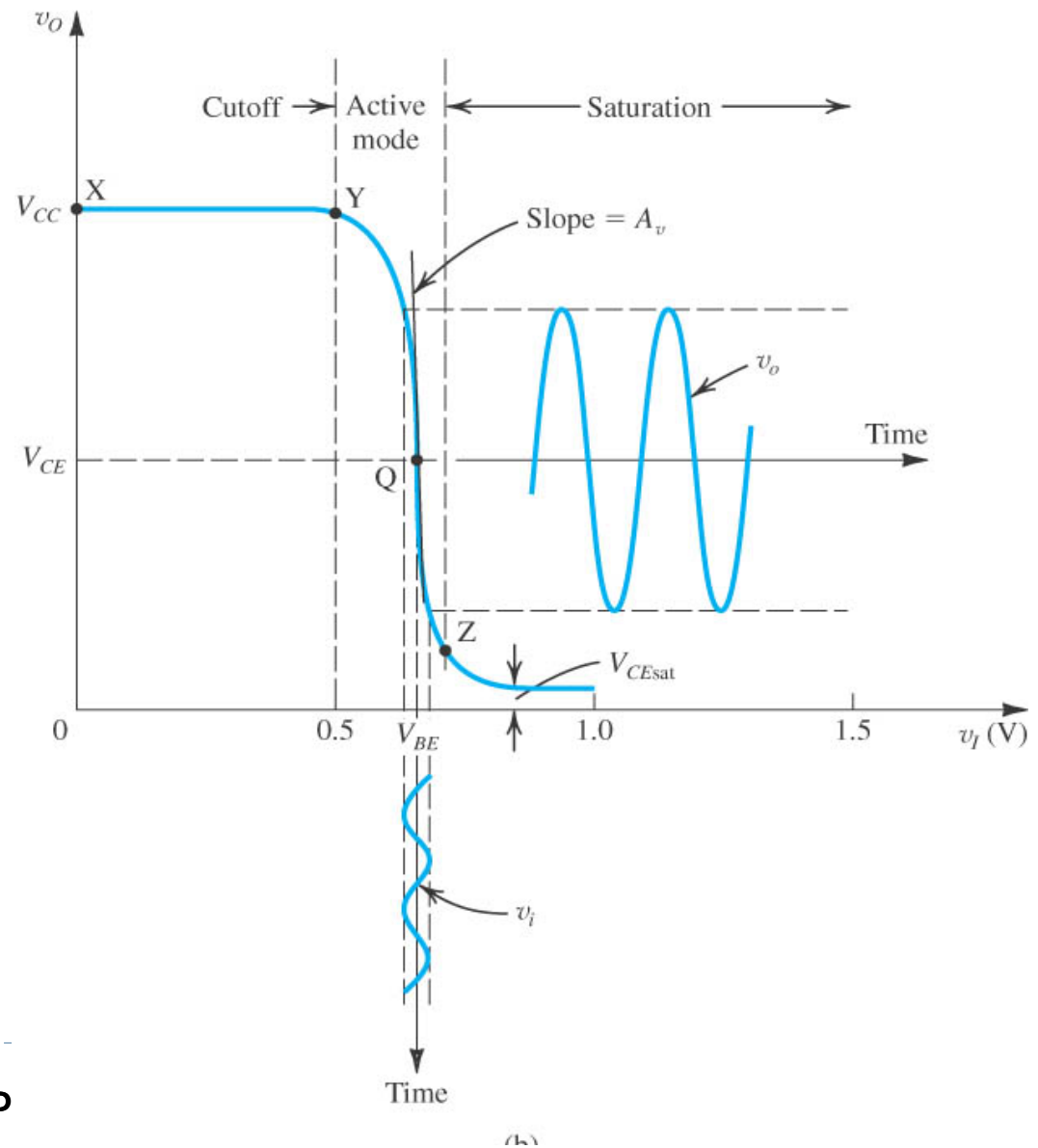
Prof. Alceu André Badin

Introdução

BJT operando como amplificador



Configuração emissor-comum



Introdução

BJT operando como amplificador

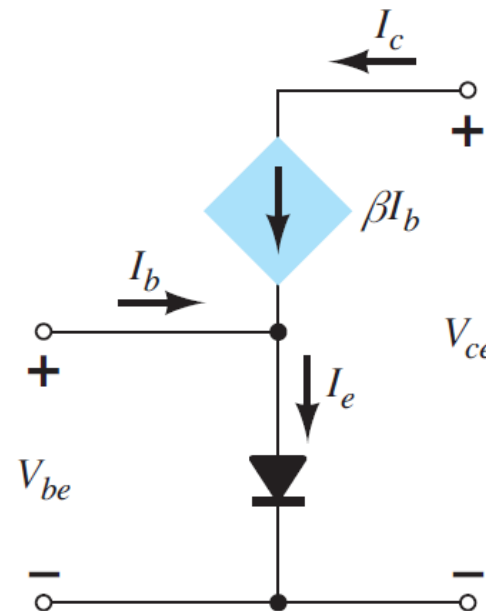
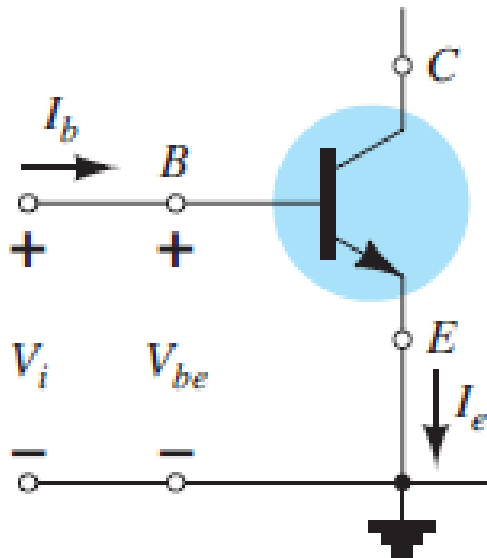
- A amplificação no domínio CA não pode ser obtida sem a aplicação de um nível de polarização CC. **Deve estar operando no modo ativo**
- O amplificador TBJ pode ser considerado linear para a maior parte das aplicações, permitindo o uso do teorema da superposição para separar as análises de projeto CC e CA.

Introdução

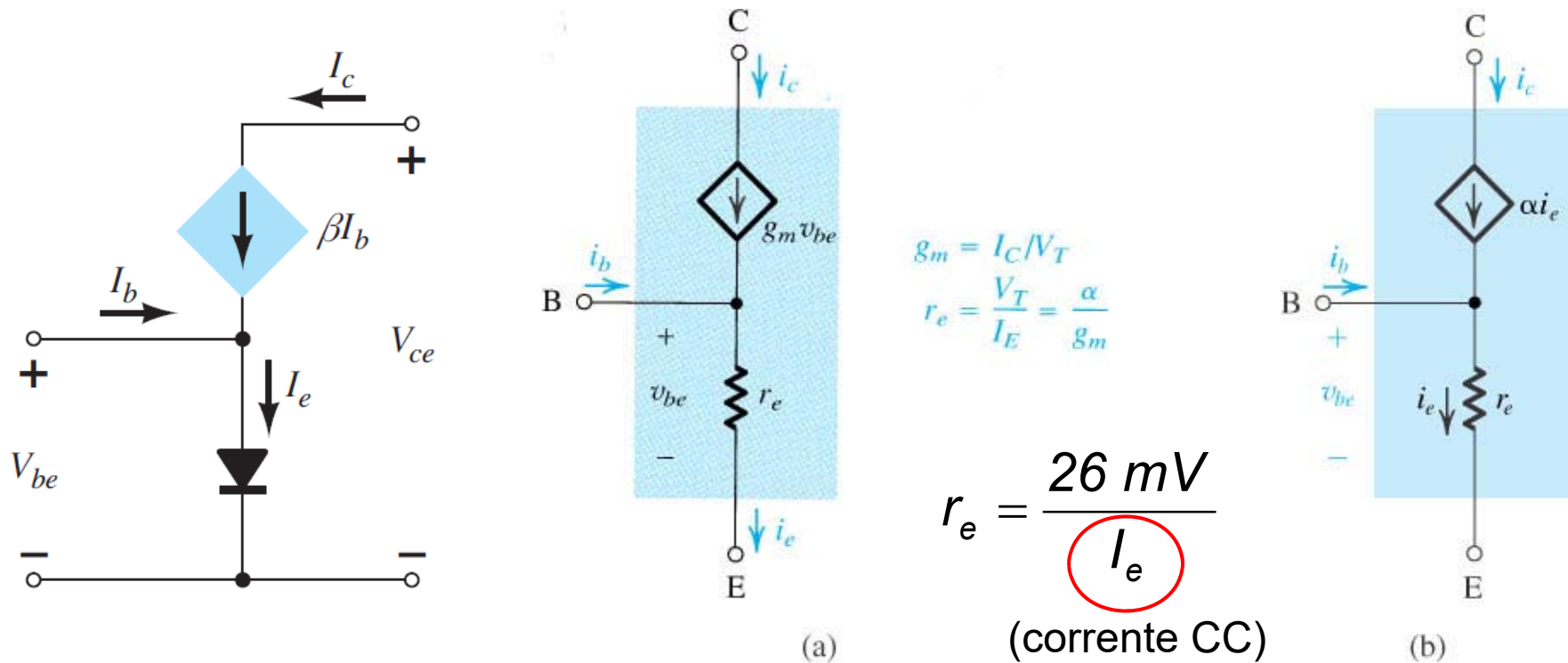
- O modelo CA é um circuito equivalente que representa as características CA do transistor.
- Um modelo utiliza elementos do circuito que se aproximam do comportamento do transistor.
- Há dois modelos comumente utilizados na análise CA para pequenos sinais de um transistor:
 - **Modelo r_e ou Modelo T**
 - **Modelo híbrido equivalente Ou modelo π -híbrido**

O r_e do modelo T do transistor

- Os TBJs são basicamente dispositivos controlados pela corrente; por esse motivo o modelo r_e utiliza um diodo e uma fonte de corrente para estimar o comportamento do transistor.

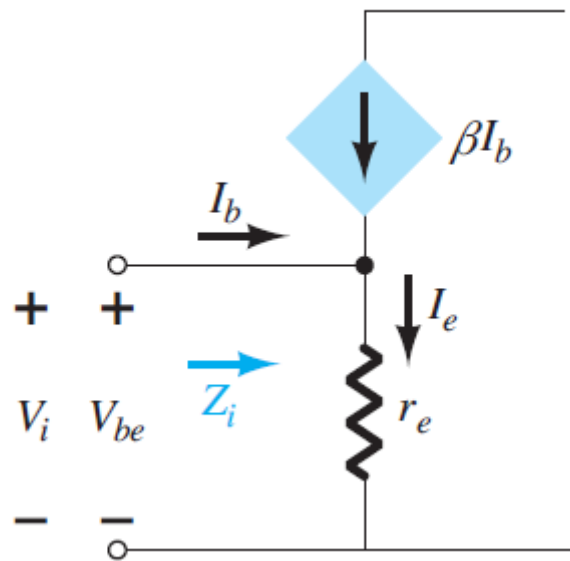


O modelo T do transistor



O modelo T do transistor

Impedância vista pela entrada (Z_i)



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

Solucionando:

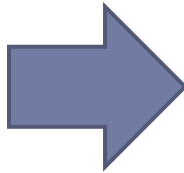
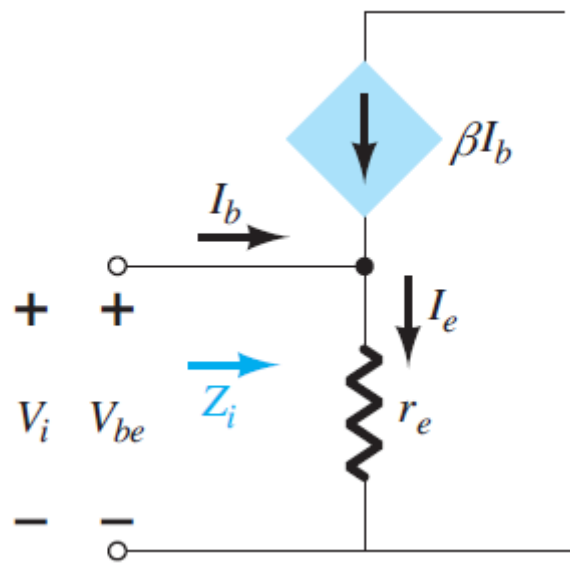
$$\begin{aligned} V_{be} &= I_e r_e = (I_c + I_b) r_e = (\beta I_b + I_b) r_e \\ &= (\beta + 1) I_b r_e \end{aligned}$$

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

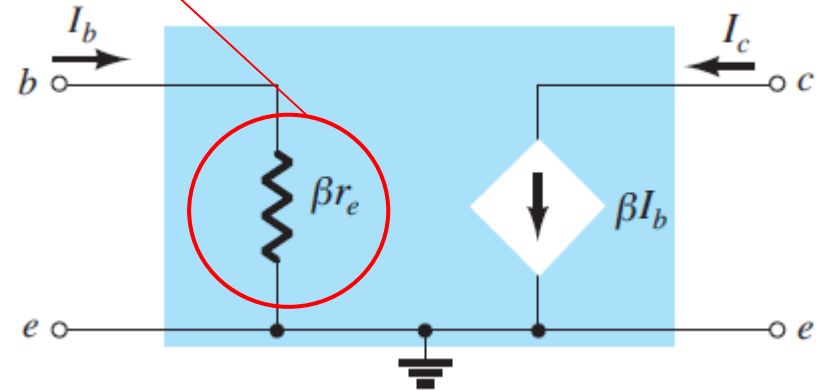
$$Z_i = (\beta + 1) r_e \cong \beta r_e$$

O modelo T e modelo π híbrido

Impedância vista pela entrada (Z_i)

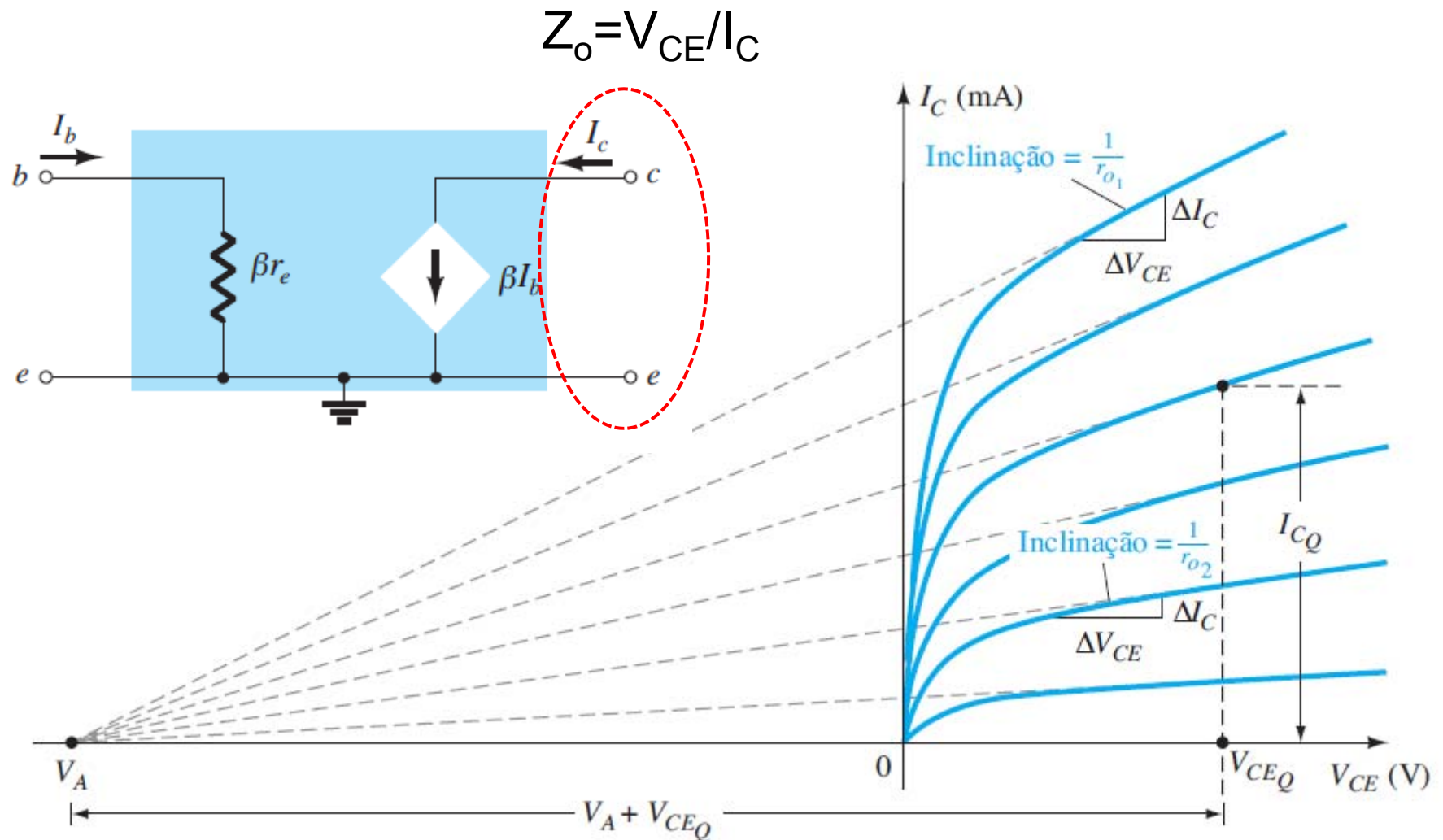


$$Z_i = (\beta + 1) r_e \cong \beta r_e$$



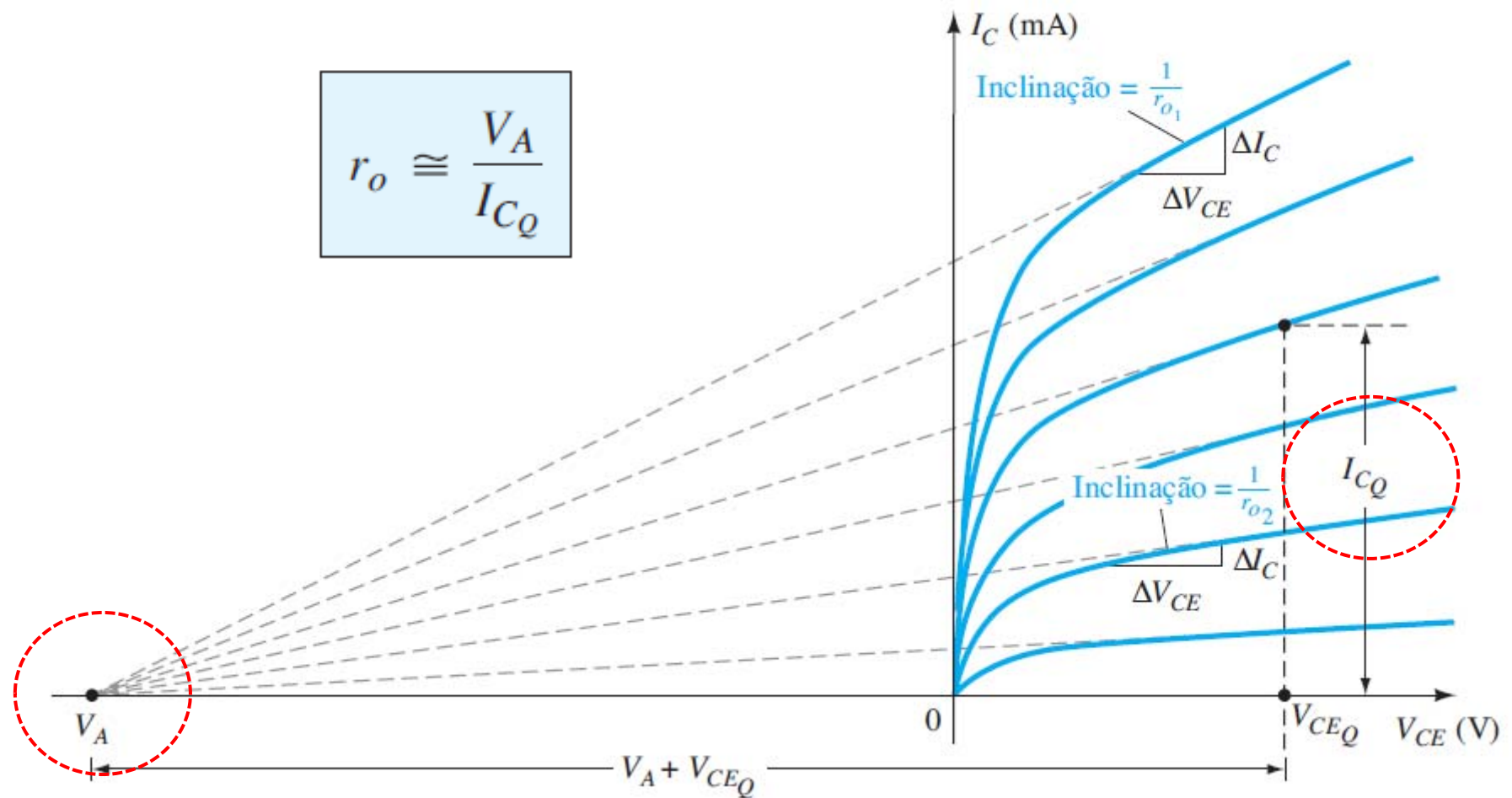
Impedância de saída do modelo π híbrido

Tensão de Early



O modelo r_e de transistor

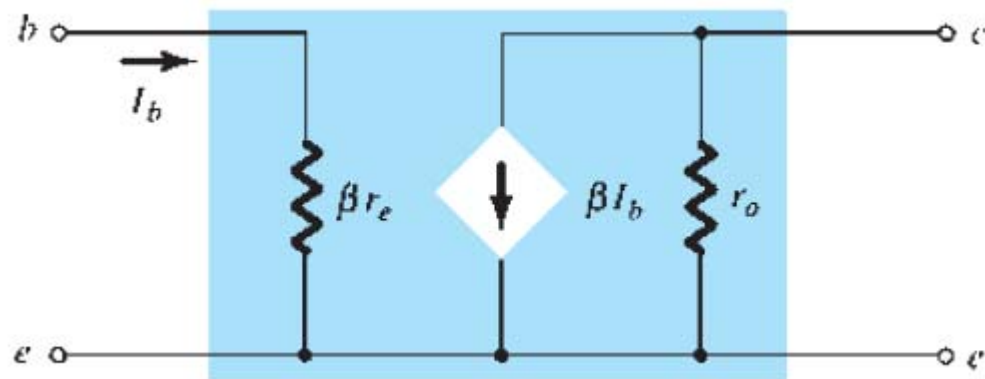
Tensão de Early



O modelo r_e de transistor

Tensão de Early

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



βr_e :centenas ohms até 7 k Ω .

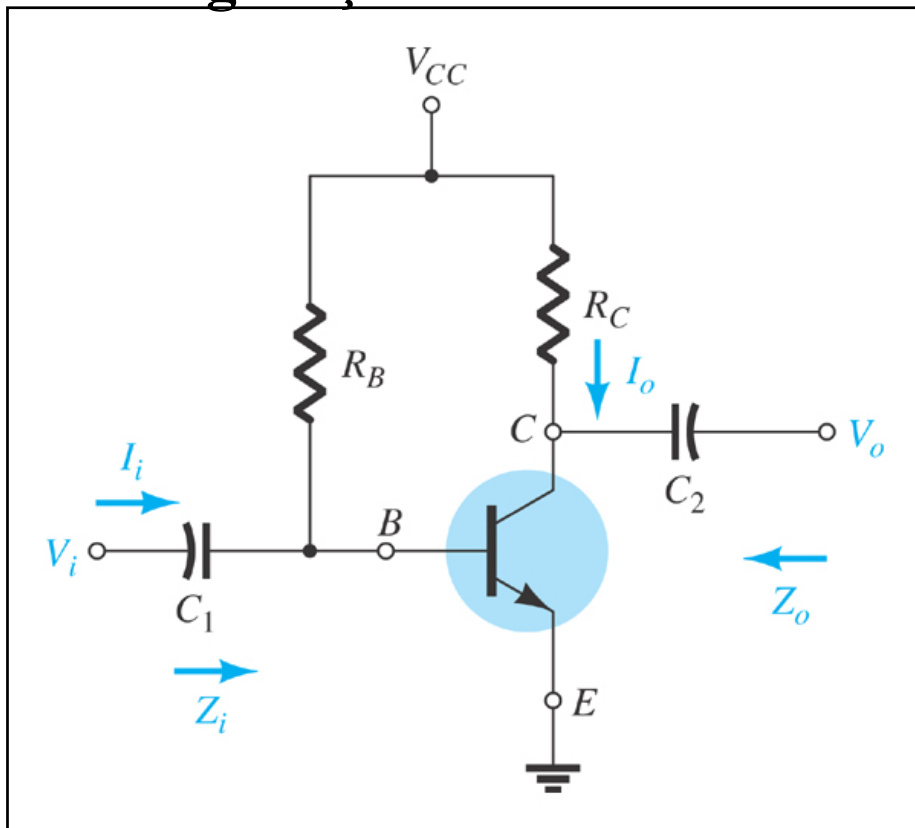
r_o tipicamente de 40 k Ω a 50 k Ω .

Análise CA com modelo de pequenos sinais

1. Todas as fontes CC são zeradas e substituídas por conexões de curto-circuito com o terra.
2. Todos os capacitores são substituídos pelo equivalente a um curto-circuito.
3. Todos os elementos em paralelo com um curto-circuito equivalente introduzido devem ser removidos do circuito.
4. O circuito deve ser redesenhado sempre que possível.

Análise CA com modelo de pequenos sinais

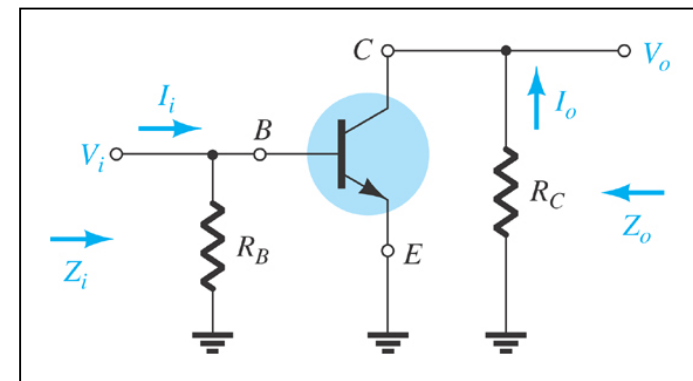
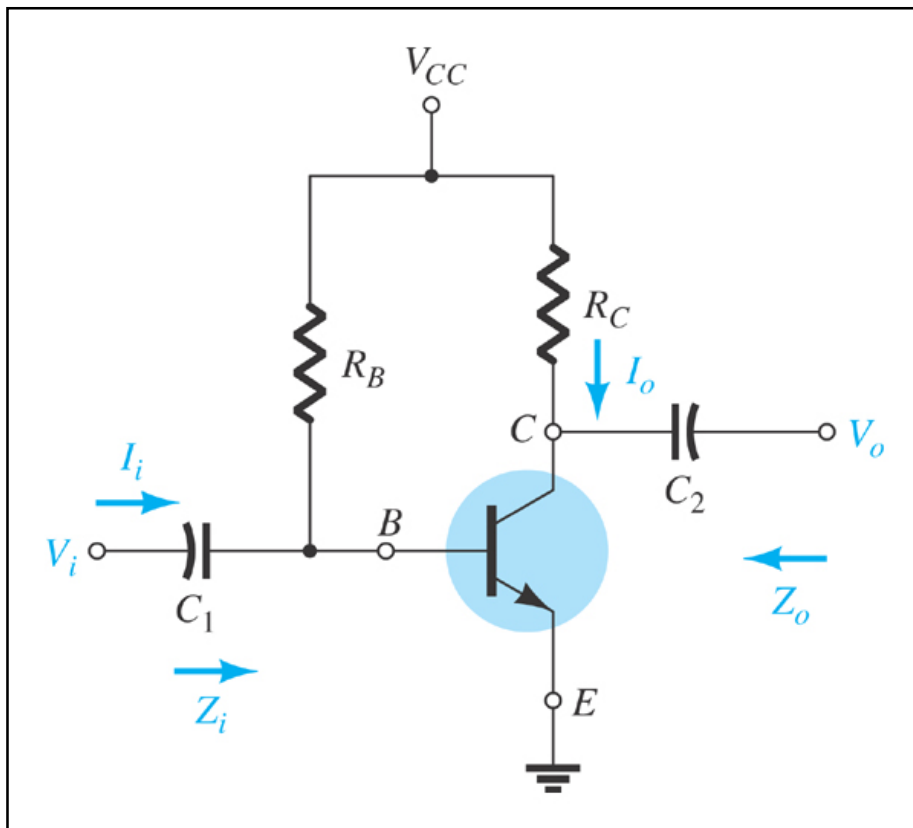
- Configuração 1:



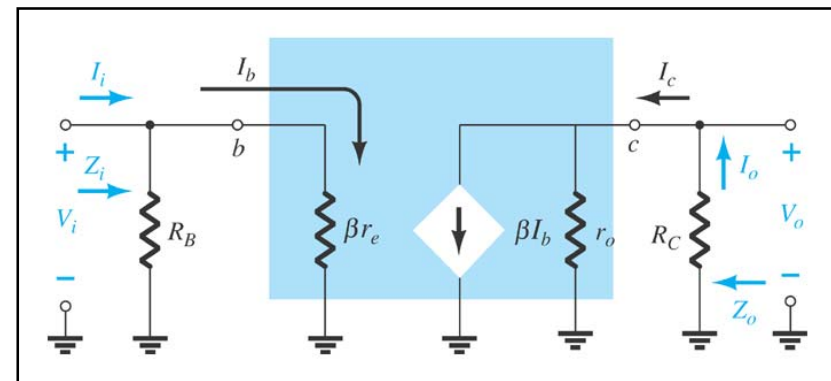
capacitores na fonte e na saída não afetam os valores de polarização CC e são vistos como curto-circuitos para análise CA

Análise CA com modelo de pequenos sinais

- Configuração 1:



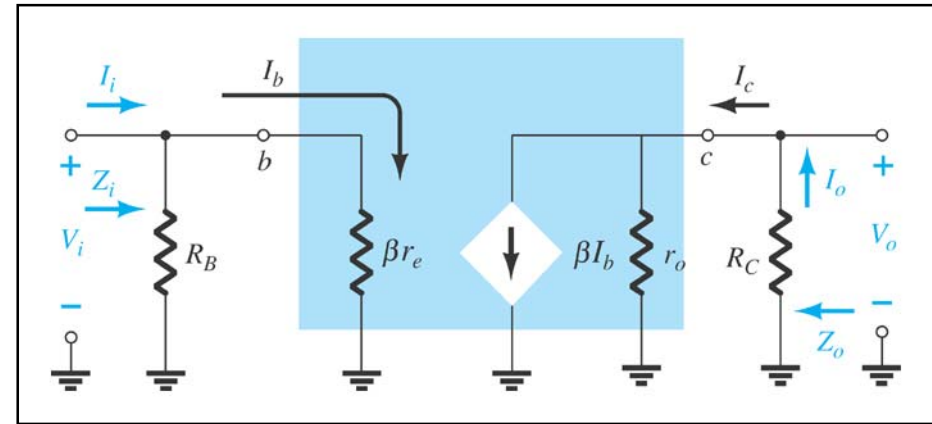
CA equivalente



Modelo

Análise CA com modelo de pequenos sinais

• Configuração 1:



Impedância de entrada: $Z_i = R_B || |\beta| r_e$
 $Z_i \cong \beta r_e \Big|_{R_B \geq 10 \beta r_e}$

Impedância de saída: $Z_o = R_C || r_o$
 $Z_o \cong R_C \Big|_{r_o \geq 10 R_C}$

F = Ganho de tensão: $A_v = \frac{V_o}{V_i} = -\frac{(R_C || r_o)}{r_e}$
 $A_v = -\frac{R_C}{r_e} \Big|_{r_o \geq 10 R_C}$

Ganho de corrente: $A_i = \frac{I_o}{I_i} = \frac{\beta R_B r_o}{(r_o + R_C)(R_B + \beta r_e)}$
 $A_i \cong \beta \Big|_{r_o \geq 10 R_C, R_B \geq 10 \beta r_e}$

Ganho de corrente do ganho de tensão: $A_i = -A_v \frac{Z_i}{R_C}$

Análise CA com modelo de pequenos sinais

• Configuração 1:

Ganho de tensão:

A_v Os resistores r_o e R_C estão em paralelo e

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

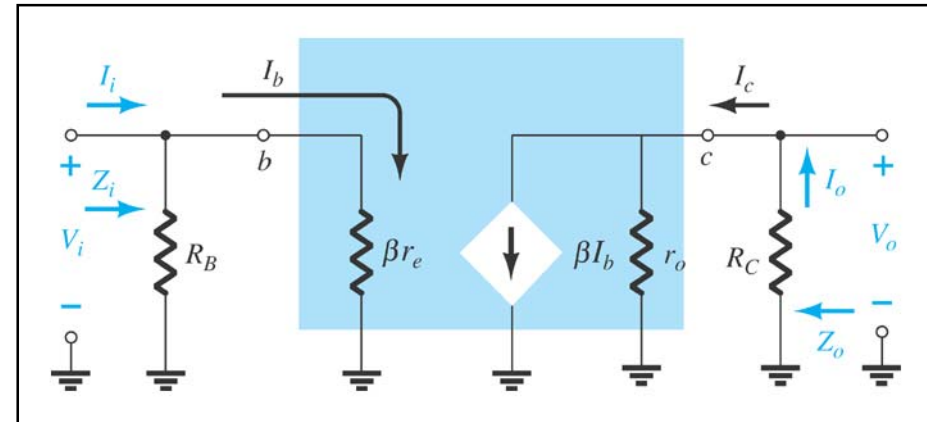
mas

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

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

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

$$A_v = -\frac{R_C}{r_e} \Big|_{r_o \geq 10 R_C}$$



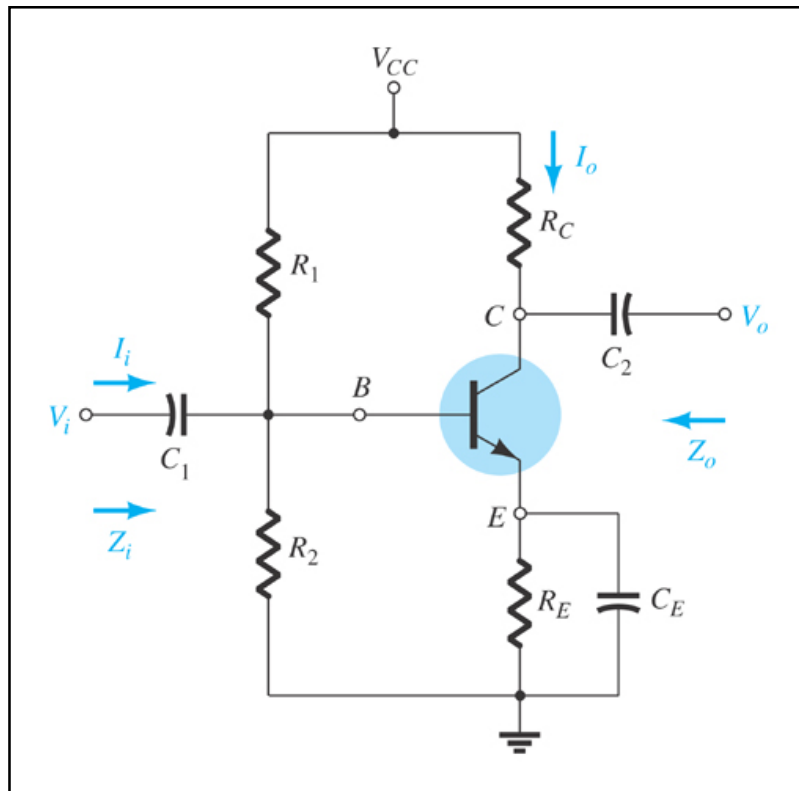
Ganho de corrente:

$$A_i = \frac{I_o}{I_i} = \frac{\beta R_B r_o}{(r_o + R_C)(R_B + \beta r_e)}$$

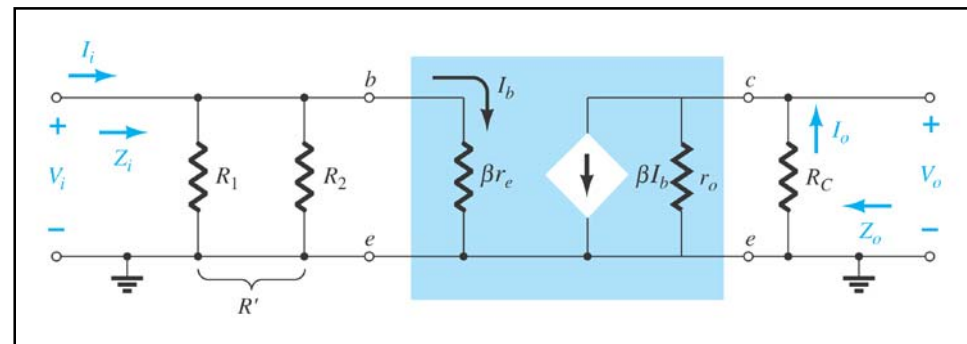
$$A_i \cong \beta \Big|_{r_o \geq 10 R_C, R_B \geq 10 \beta r_e}$$

Análise CA com modelo de pequenos sinais

- Configuração 2:



- O modelo r_e necessita que se determine β , r_e , e r_o .



Análise CA com modelo de pequenos sinais

• Configuração 2:

Ganho de corrente

$$A_i = \frac{I_o}{I_i} = \frac{\beta R' r_o}{(r_o + R_C)(R' + \beta r_e)}$$

$$A_i = \frac{I_o}{I_i} \cong \frac{\beta R'}{R' + \beta r_e} \Big|_{r_o \geq 10 R_C}$$

$$A_i = \frac{I_o}{I_i} \cong \beta \Big|_{r_o \geq 10 R_C, R' \geq 10 \beta r_e}$$

Impedância de entrada

$$R' = R_1 \parallel R_2$$

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

Impedância de saída

$$Z_o = R_C \parallel r_o$$

$$Z_o \cong R_C \Big|_{r_o \geq 10 R_C}$$

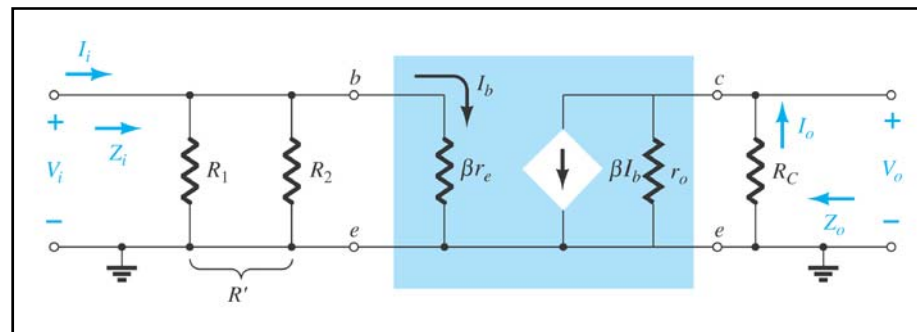
Ganho de corrente de A_v

$$A_i = -A_v \frac{Z_i}{R_C}$$

Ganho de tensão

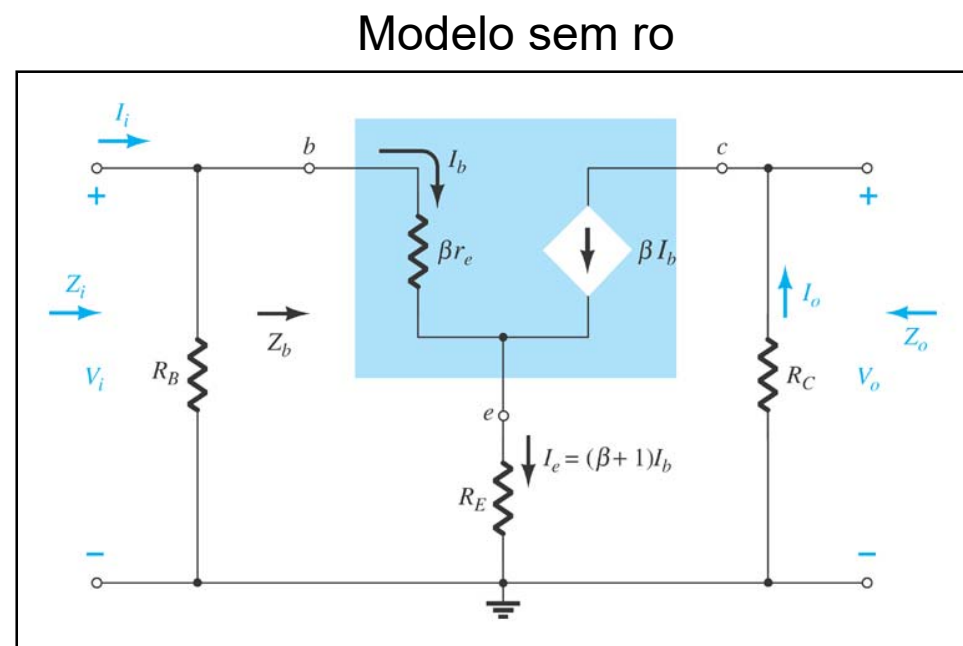
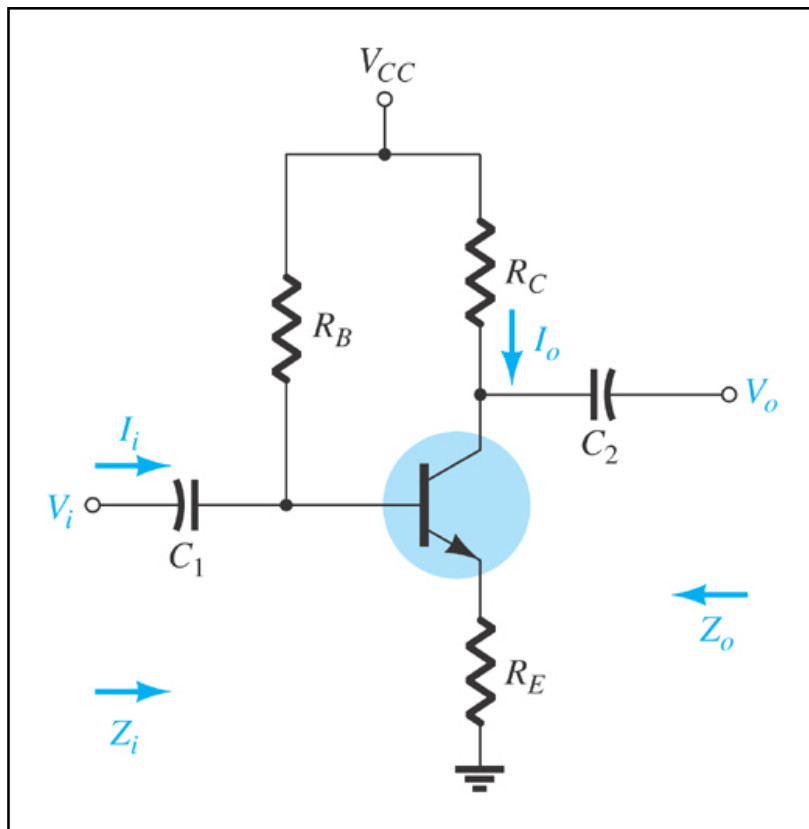
$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = \frac{-R_C \parallel r_o}{r_e}$$

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



Análise CA com modelo de pequenos sinais

- Configuração 3:



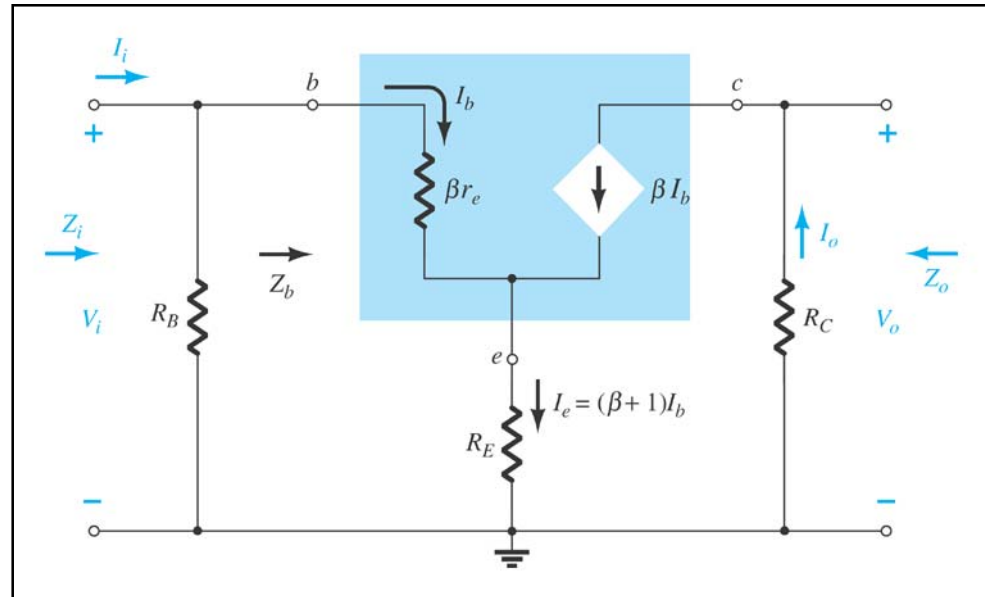
Cálculos das impedância

- Configuração 3:
- Impedância de entrada:

$$\begin{aligned}Z_i &= R_B \parallel Z_b \\Z_b &= \beta r_e + (\beta + 1)R_E \\Z_b &\cong \beta(r_e + R_E) \\Z_b &\cong \beta R_E\end{aligned}$$

- Impedância de saída:

$$Z_o = R_C$$



Cálculos de ganho

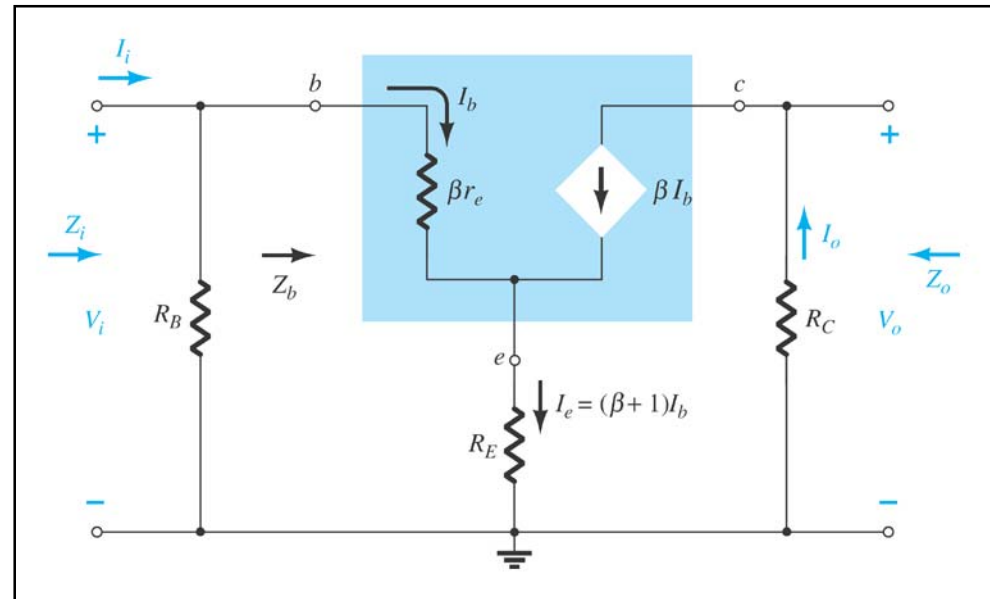
- Configuração 3:

- Ganho de tensão:

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

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_C}{r_e + R_E} \Big|_{Z_b = \beta(r_e + R_E)}$$

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} \cong -\frac{R_C}{R_E} \Big|_{Z_b \cong \beta R_E}$$



- Ganho de corrente:

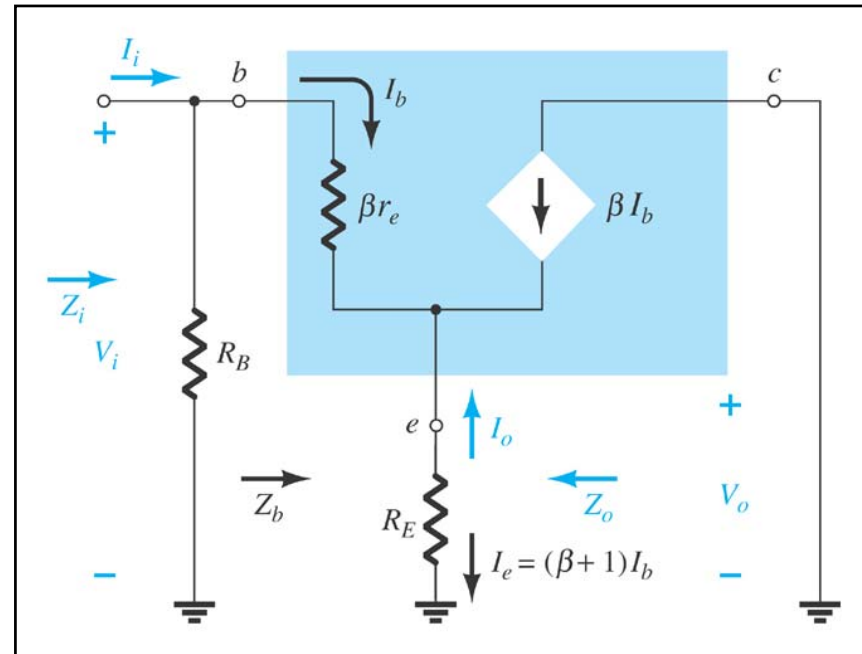
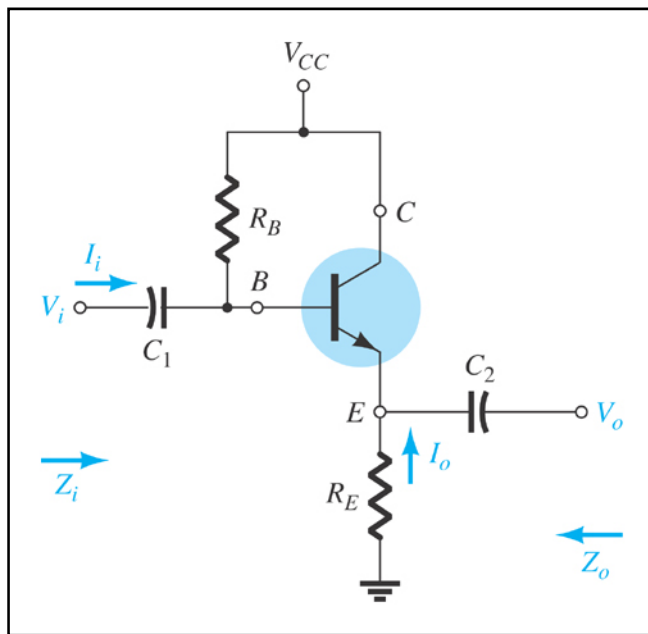
$$A_i = \frac{I_o}{I_i} = \frac{\beta R_B}{R_B + Z_b}$$

- Ganho de corrente de A_v :

$$A_i = -A_v \frac{Z_i}{R_C}$$

Análise CA com modelo de pequenos sinais

- Configuração 4:

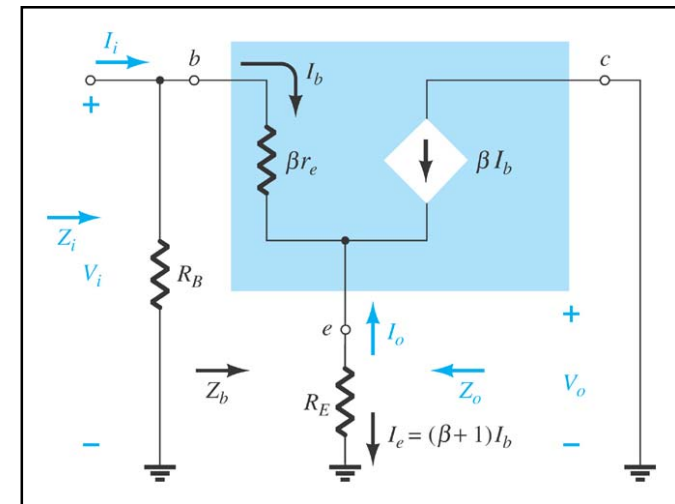


- Ela também é conhecida como configuração de *coletor-comum*.
- A entrada é aplicada à base e a saída é retirada do emissor.
- Não há troca de fase entre a entrada e a saída.

Cálculos de impedância

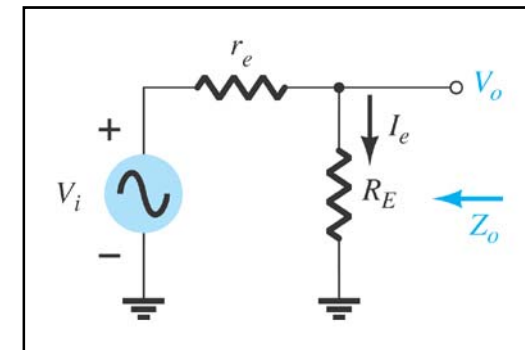
- Configuração 4:
- Impedância de entrada:

$$\begin{aligned}Z_i &= R_B \parallel Z_b \\Z_b &= \beta r_e + (\beta + 1)R_E \\Z_b &\cong \beta(r_e + R_E) \\Z_b &\cong \beta R_E\end{aligned}$$



- Impedância de saída:

$$\begin{aligned}Z_o &= R_E \parallel r_e \\Z_o &\cong r_e \mid R_E \gg r_e\end{aligned}$$



Cálculos de ganho

- Configuração 4:

- Ganho de tensão:

$$A_V = \frac{V_o}{V_i} = \frac{R_E}{R_E + r_e}$$

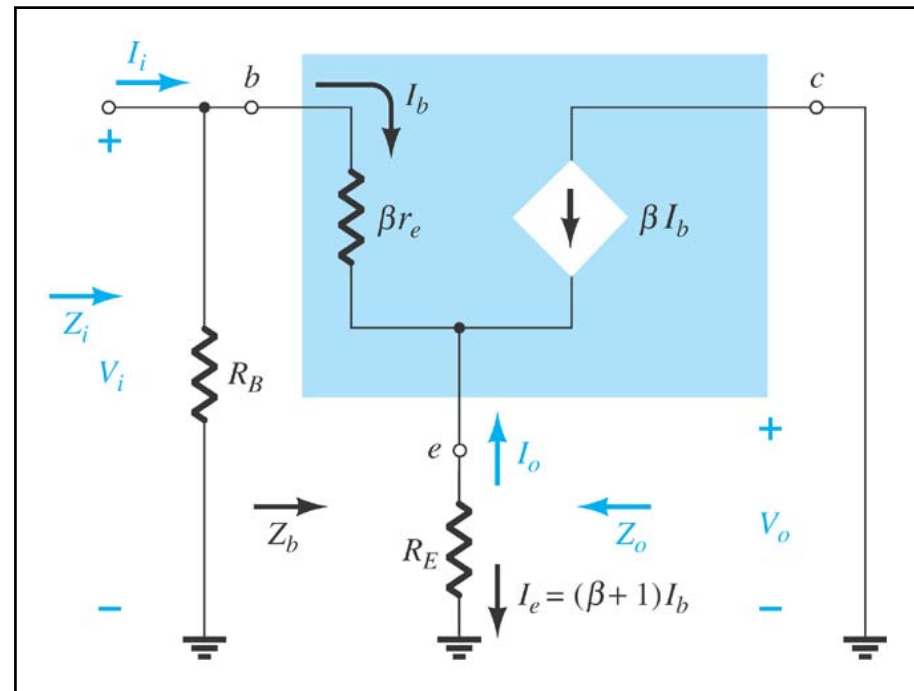
$$A_V = \frac{V_o}{V_i} \cong 1 \Big|_{R_E \gg r_e, R_E + r_e \cong R_E}$$

- Ganho de tensão:

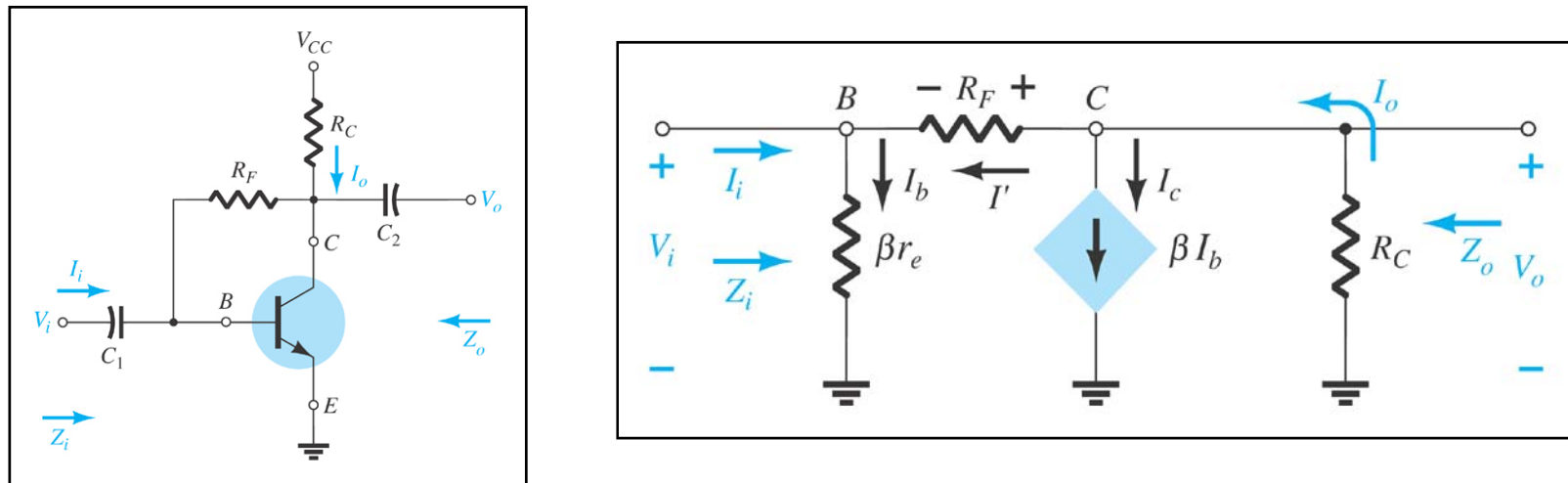
$$A_i \cong -\frac{\beta R_B}{R_B + Z_b}$$

Ganho de corrente do ganho de tensão:

$$A_i = -A_V \frac{Z_i}{R_E}$$



Configuração emissor-comum com realimentação do coletor



- A entrada é aplicada à base.
- A saída é retirada do coletor.
- Há um deslocamento de fase de 180° entre a entrada e a saída.

Cálculos

Impedância de entrada:

$$Z_i = \frac{r_e}{\frac{1}{\beta} + \frac{R_C}{R_F}}$$

Impedância de saída:

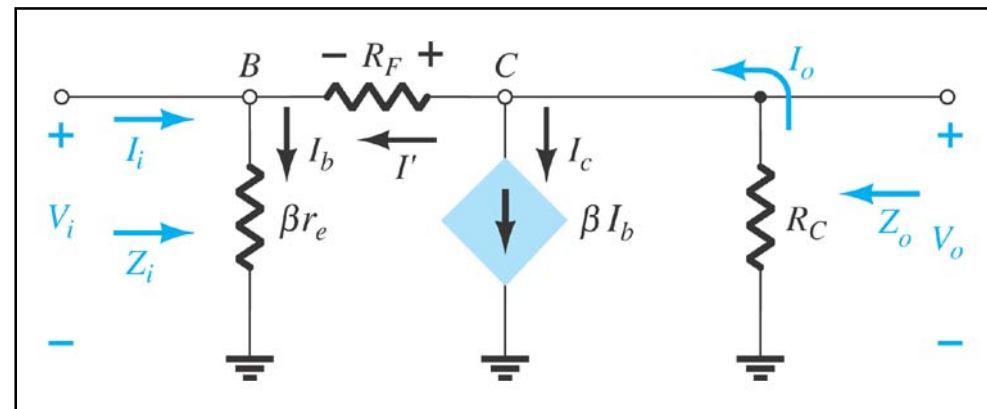
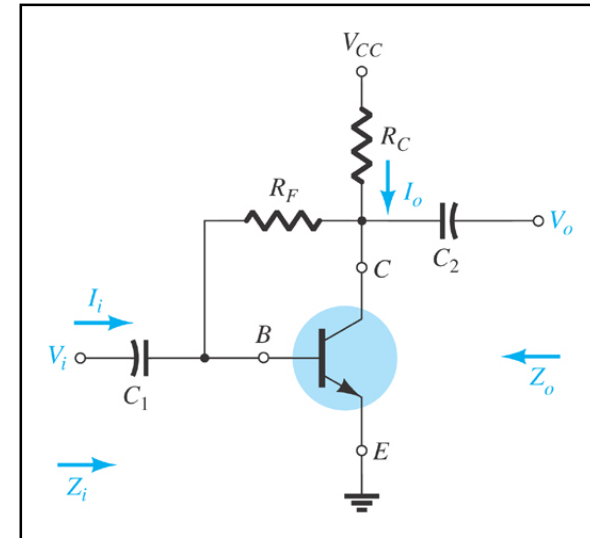
$$Z_o \cong R_C \parallel R_F$$

Ganho de tensão: $A_V = \frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_C}{r_e}$

Ganho de corrente:

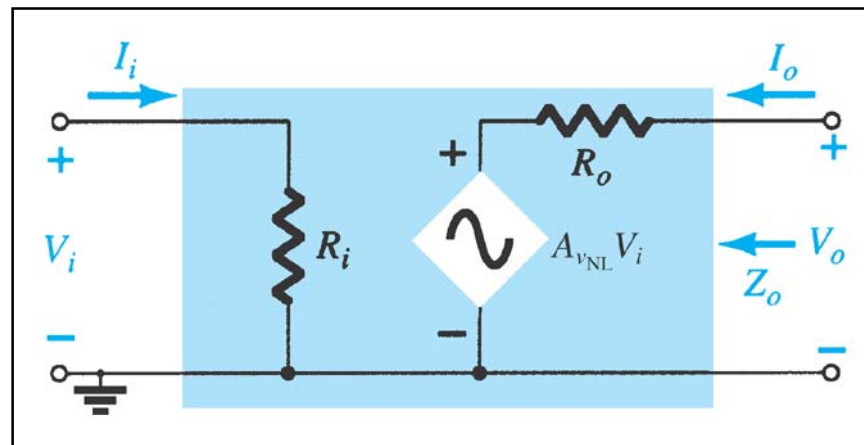
$$A_i = \frac{I_o}{I_i} = \frac{\beta R_F}{R_F + \beta R_C}$$

$$A_i = \frac{I_o}{I_i} \cong \frac{R_F}{R_C}$$



Efeito da impedância de carga no ganho

- Esse modelo pode ser aplicado a qualquer amplificador controlado por corrente ou por tensão.
- Adicionar uma carga reduz o ganho do amplificador:



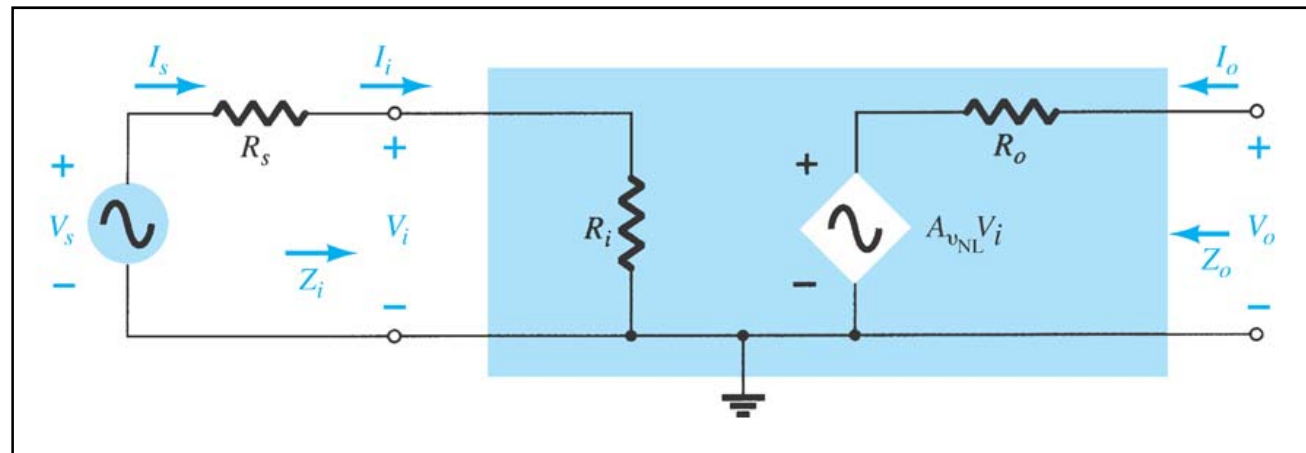
$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = \frac{R_L}{R_L + R_o} A_{vNL}$$

$$A_i = -A_v \frac{Z_i}{R_L}$$

Efeito da impedância de fonte no ganho

A amplitude do sinal aplicador que alcança a entrada do amplificador é:

$$V_i = \frac{R_i V_s}{R_i + R_s}$$



A resistência interna da fonte de sinal reduz o ganho geral:

$$A_{vs} = \frac{V_o}{V_s} = \frac{R_i}{R_i + R_s} A_{v_{NL}}$$

Sistemas em cascata

- A saída de um amplificador é a entrada para o próximo amplificador.
- O ganho geral de tensão é determinado pelo produto de ganhos dos estágios individuais.
- Os circuitos de polarização CC são isolados uns dos outros por capacitores de acoplamento.
- Os cálculos da CC são independentes da cascata.
- Os cálculos da CA para ganho e impedância são interdependentes.

Amplificadores TBJ em cascata

Ganho de tensão:

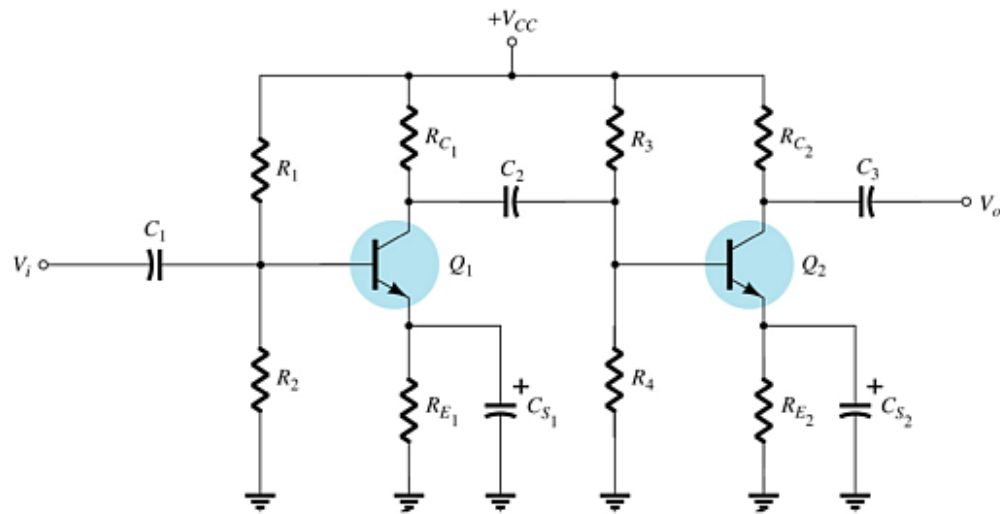
$$A_{v1} = \frac{R_C \parallel R_1 \parallel R_2 \parallel \beta R_e}{r_e}$$

$$A_{v2} = \frac{R_C}{r_e}$$

$$A_v = A_{v1} A_{v2}$$

**Impedância de entrada –
primeiro estágio:**

$$Z_i = R_1 \parallel R_2 \parallel \beta R_e$$



**Impedância de saída –
segundo estágio:**

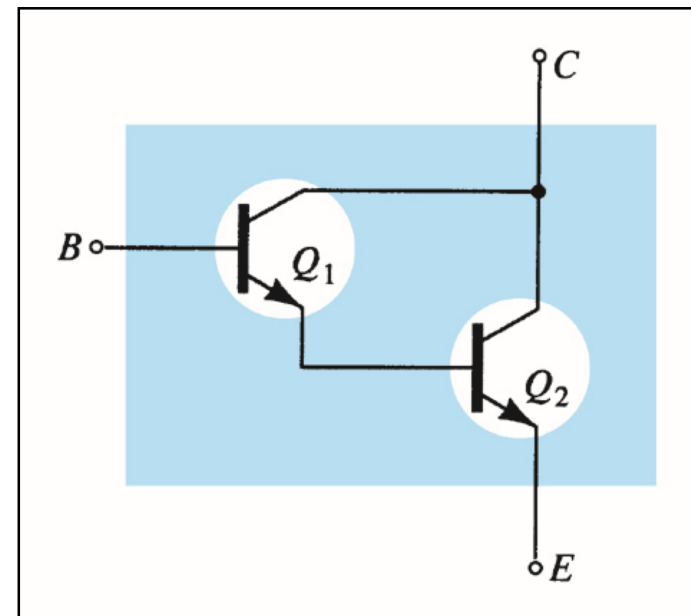
$$Z_o = R_C$$

Conexão Darlington

- O circuito Darlington fornece um ganho de corrente muito alto, igual ao produto dos ganhos individuais das correntes:

$$\beta_D = \beta_1 \beta_2$$

- A importância prática disso é que o circuito fornece uma impedância de entrada muito alta.



Polarizações CC de circuitos Darlington

- Corrente de base:

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

- Corrente de emissor:

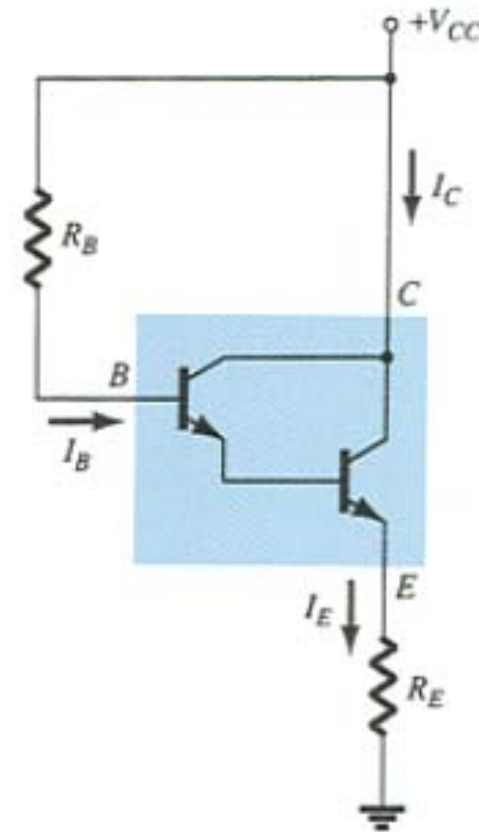
$$I_E = (\beta_D + 1)I_B \cong \beta_D I_B$$

- Tensão de emissor:

$$V_E = I_E R_E$$

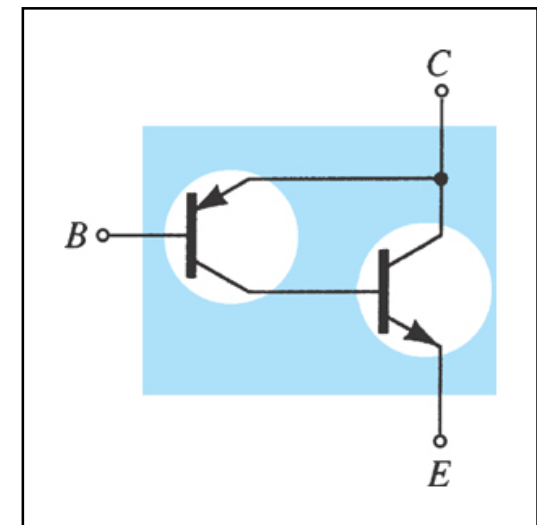
- Tensão de base:

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

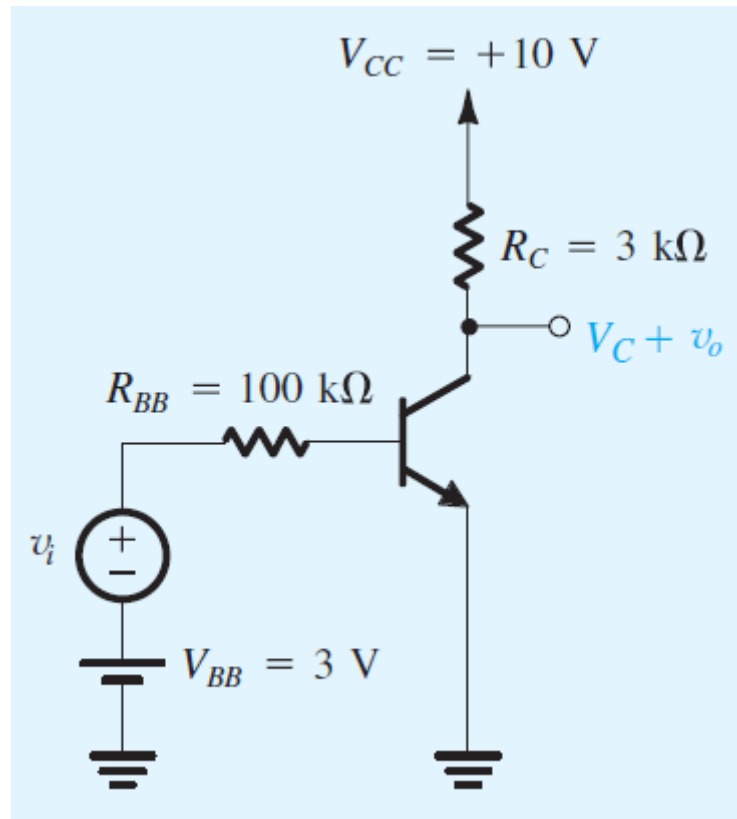


Par realimentado

- Este é um circuito de dois transistores que operam como um par Darlington, *mas não é um par Darlington*.
- Tem características similares:
 - Alto ganho de corrente
 - Ganho de tensão próximo da unidade
 - Baixa impedância de saída
 - Alta impedância de entrada
- A diferença é que um Darlington usa um par de transistors iguais, enquanto um par realimentado usa transistores complementares.

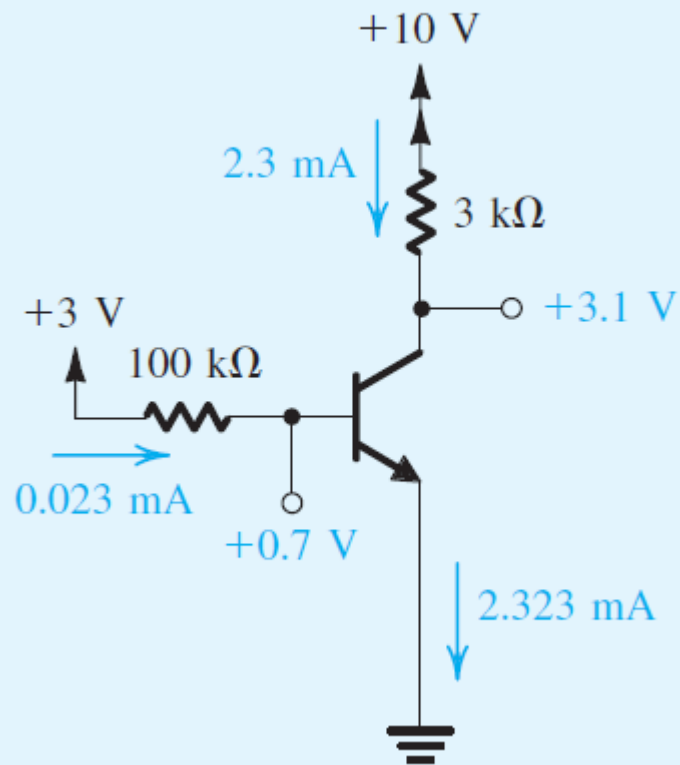


Exemplo numérico (última aula)



Exemplo numérico (última aula)

Análise CC



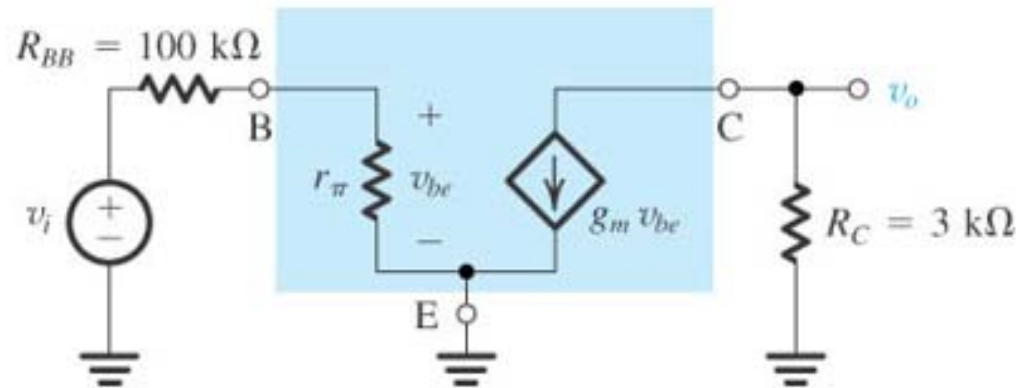
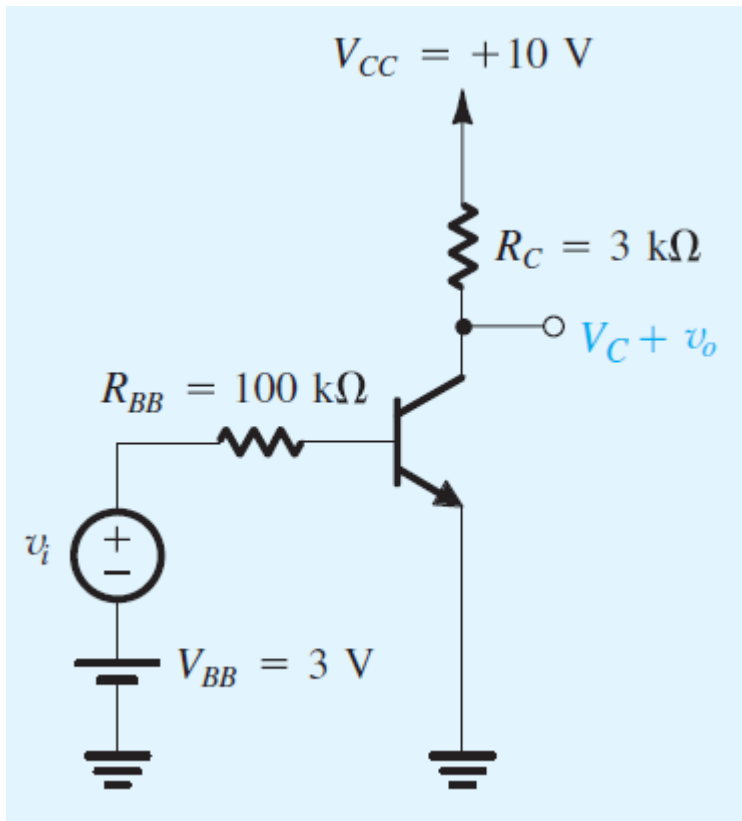
$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_{BB}} \\ \simeq \frac{3 - 0.7}{100} = 0.023 \text{ mA}$$

$$I_C = \beta I_B = 100 \times 0.023 = 2.3 \text{ mA}$$

$$V_C = V_{CC} - I_C R_C \\ = +10 - 2.3 \times 3 = +3.1 \text{ V}$$

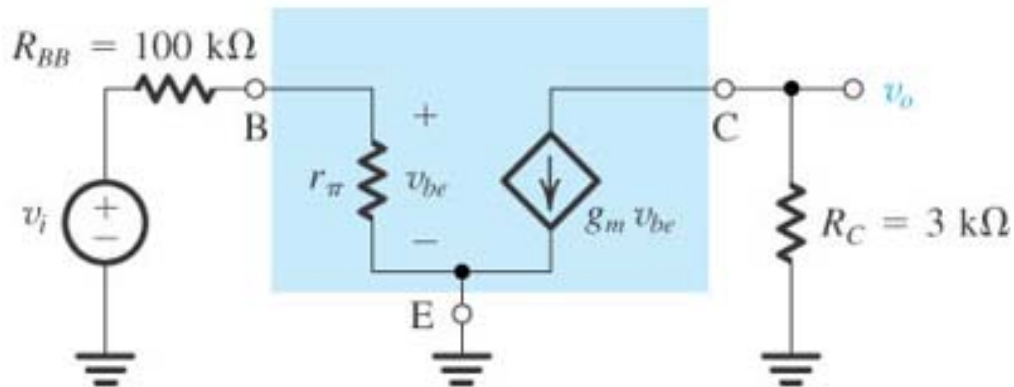
Exemplo numérico (última aula)

Análise CA



Exemplo numérico (última aula)

Análise CA



$$r_e = \frac{V_T}{I_E} = \frac{25 \text{ mV}}{(2.3/0.99) \text{ mA}} = 10.8 \Omega$$

$$g_m = \frac{I_C}{V_T} = \frac{2.3 \text{ mA}}{25 \text{ mV}} = 92 \text{ mA/V}$$

$$r_\pi = \frac{\beta}{g_m} = \frac{100}{92} = 1.09 \text{ k}\Omega$$

$$v_{be} = v_i \frac{r_\pi}{r_\pi + R_{BB}}$$

$$= v_i \frac{1.09}{101.09} = 0.011 v_i$$

$$v_o = -g_m v_{be} R_C$$
$$= -92 \times 0.011 v_i \times 3 = -3.04 v_i$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = -3.04 \text{ V/V}$$

Exemplo numérico 2:

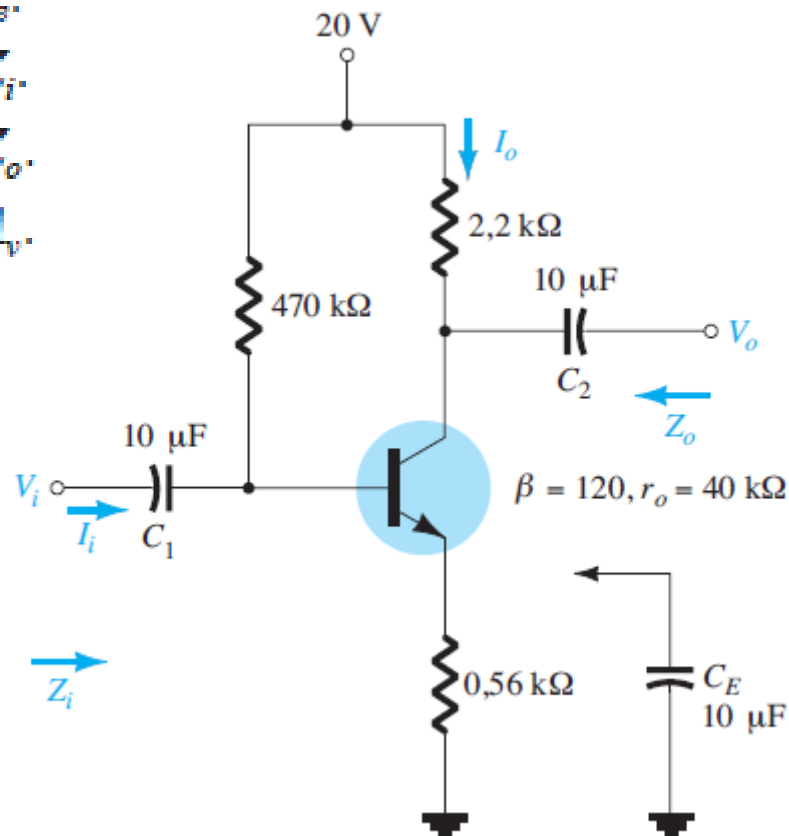
determine:

a) r_e .

b) Z_i .

c) Z_o .

d) A_v .



a) CC:

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

$$= \frac{20\text{ V} - 0,7\text{ V}}{470\text{ k}\Omega + (121)0,56\text{ k}\Omega} = 35,89\text{ }\mu\text{A}$$

$$I_E = (\beta + 1)I_B = (121)(35,89\text{ }\mu\text{A}) = 4,34\text{ mA}$$

e $r_e = \frac{26\text{ mV}}{I_E} = \frac{26\text{ mV}}{4,34\text{ mA}} = \mathbf{5,99\text{ }\Omega}$

Exemplo numérico 2:

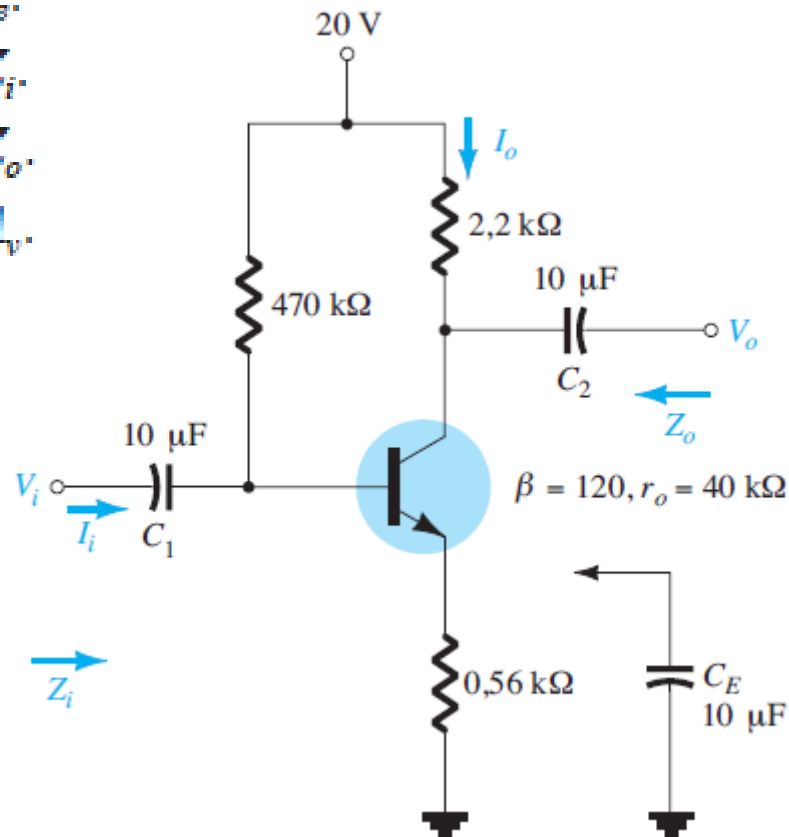
determine:

a) r_e .

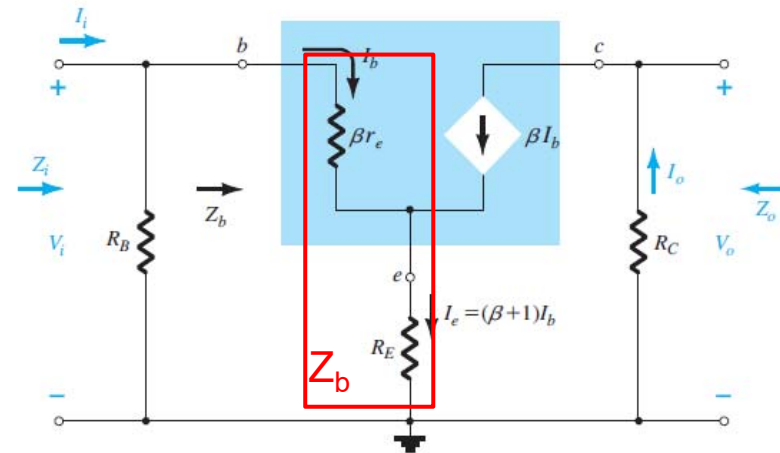
b) Z_i .

c) Z_o .

d) A_v .



Análise CA



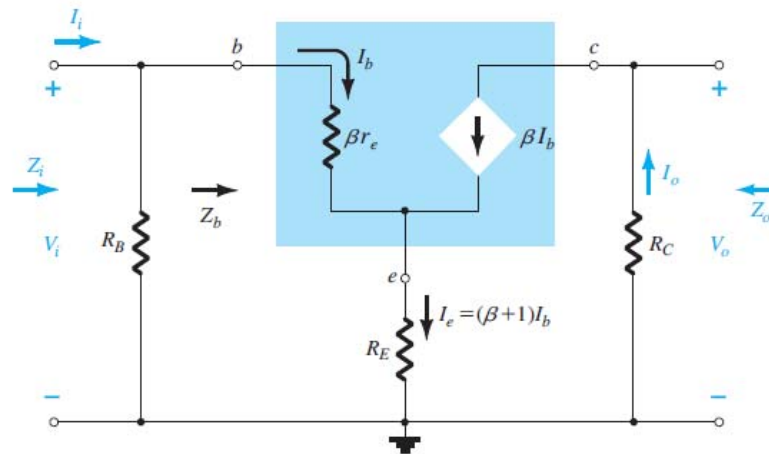
$$Z_b \cong \beta(r_e + R_E) = 120(5,99 \, \Omega + 560 \, \Omega) = 67,92 \, \text{k}\Omega$$

$$e \quad Z_i = R_B \parallel Z_b = 470 \, \text{k}\Omega \parallel 67,92 \, \text{k}\Omega = 59,34 \, \text{k}\Omega$$

Exemplo numérico 2:

determine:

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



Para $r_o \geq 10R_C$,

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

c) $Z_o = R_C = 2,2 \text{ k}\Omega$

d) $r_o \geq 10R_C$ é satisfeita. Logo,

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} \cong -\frac{\beta R_C}{Z_b} = -\frac{(120)(2,2 \text{ k}\Omega)}{67,92 \text{ k}\Omega} = -3,89$$