

LOM3206 – ELETRÔNICA

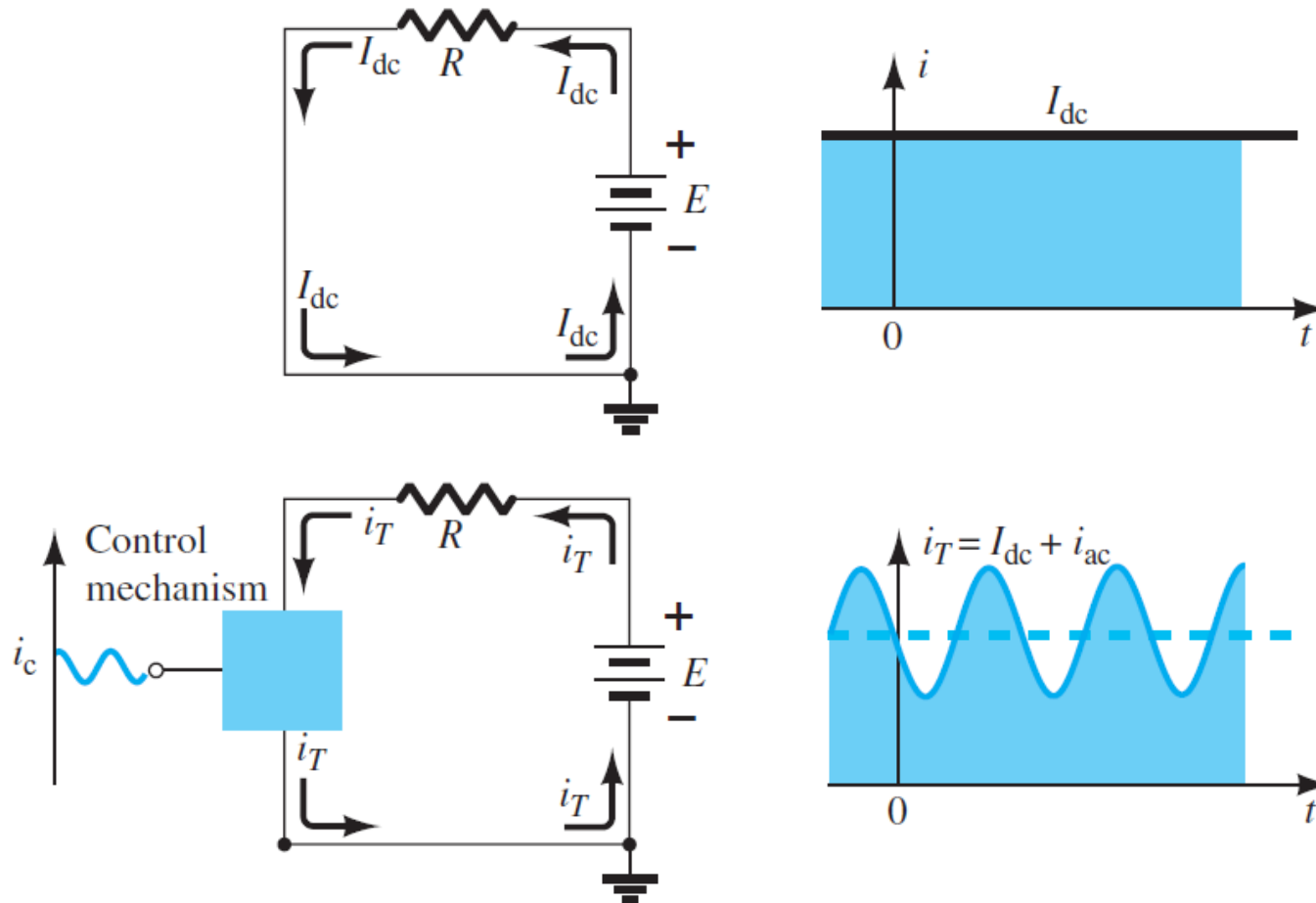
AULA 7

Prof. Dr. Emerson G. Melo

- ❑ Amplificação no Domínio AC;
- ❑ Modelo r_e ;
- ❑ Modelo Híbrido Equivalente;
- ❑ Modelo π -Híbrido;
- ❑ Resposta em Frequência;
- ❑ Exercícios.

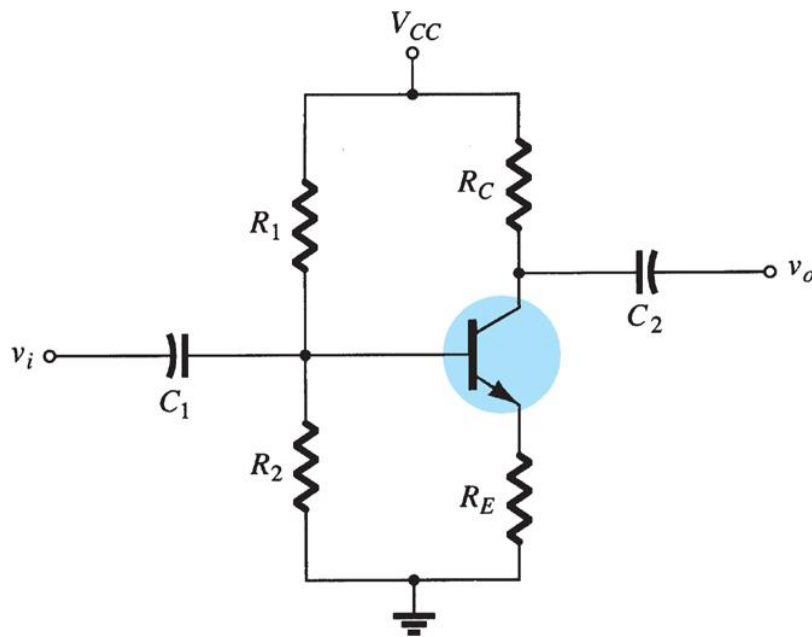
Amplificação no Domínio AC

- Em circuitos LINEARES o Teorema da Superposição permite separar as análises DC e AC;



Amplificação no Domínio AC

- ❑ O comportamento do circuito em corrente contínua é obtido através da análise do ponto de operação DC (Ponto Q);



Análise

$$V_b = \frac{R_2 V_{CC}}{R_1 + R_2}$$

$$I_C = \beta I_B$$

$$R_{Th} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

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

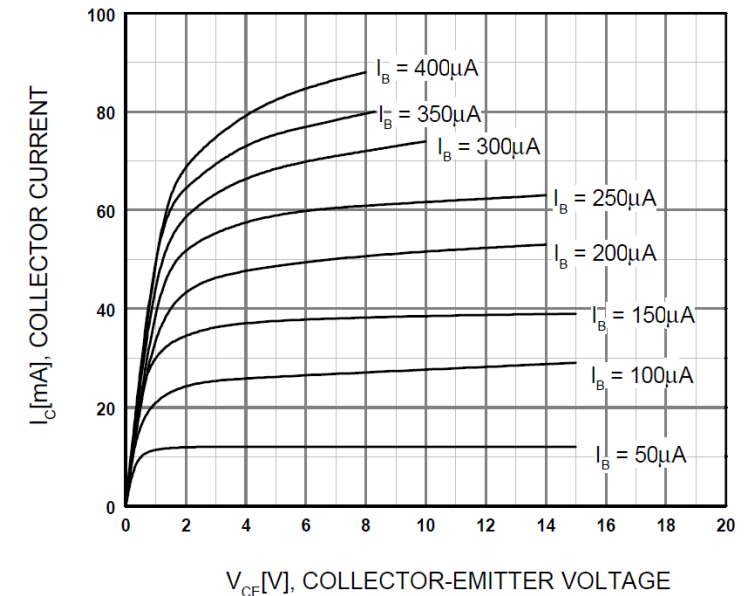
$$I_B = \frac{V_b - V_{BE}}{R_{Th} + (\beta + 1)R_E}$$

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

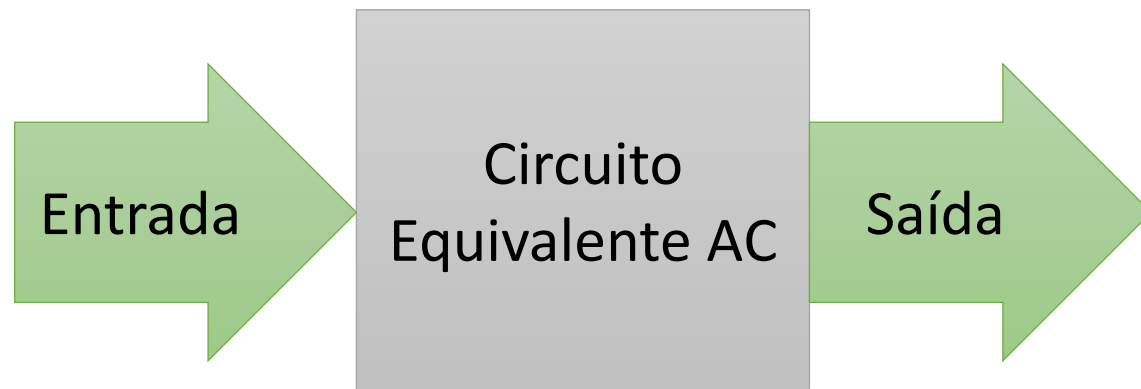
$$V_{RE} = \frac{1}{10} V_{CC}$$

Projeto

$$R_2 \leq \frac{1}{10} \beta R_E$$



- ❑ O comportamento do circuito em corrente alternada pode ser obtido através da utilização de circuitos equivalentes (modelos) que descrevem as características do circuito no domínio AC senoidal;
- ❑ Os modelos são válidos apenas para um dado ponto de operação e para sinais de entrada e saída suficientemente **pequenos**.

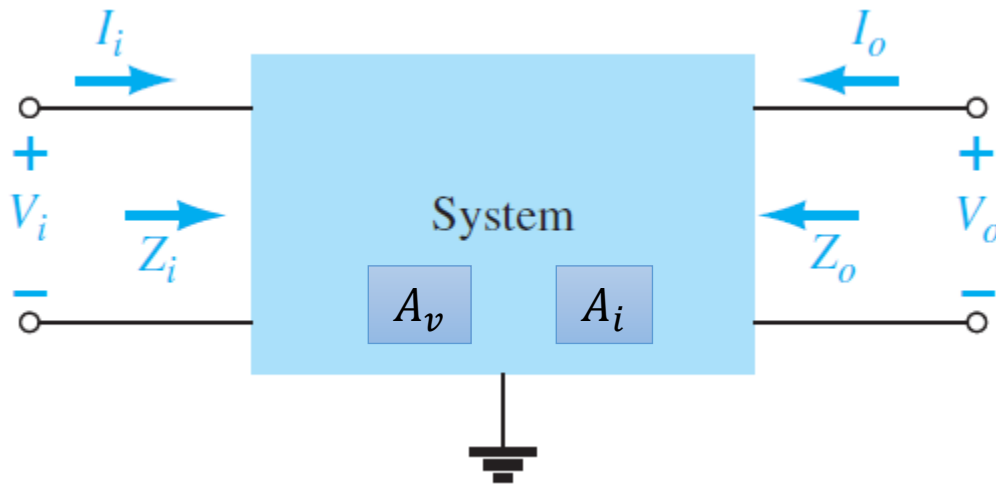


Alguns Modelos Comuns

- Modelo r_e
- Modelo Híbrido Equivalente (h)
- Modelo π -híbrido

Amplificação no Domínio AC

❑ Parâmetros importantes de um amplificador de pequenos sinais.



$V_{i/o}$ – Tensão de entrada/saída (V).

$I_{i/o}$ – Corrente de entrada/saída (A).

$Z_{i/o}$ – Impedância de entrada/saída (Ω).

A_v – Ganho de tensão sem carga (dB ou dBm).

A_i – Ganho de corrente sem carga (dB ou dBm).

$$Z_i = \frac{V_i}{I_i}$$

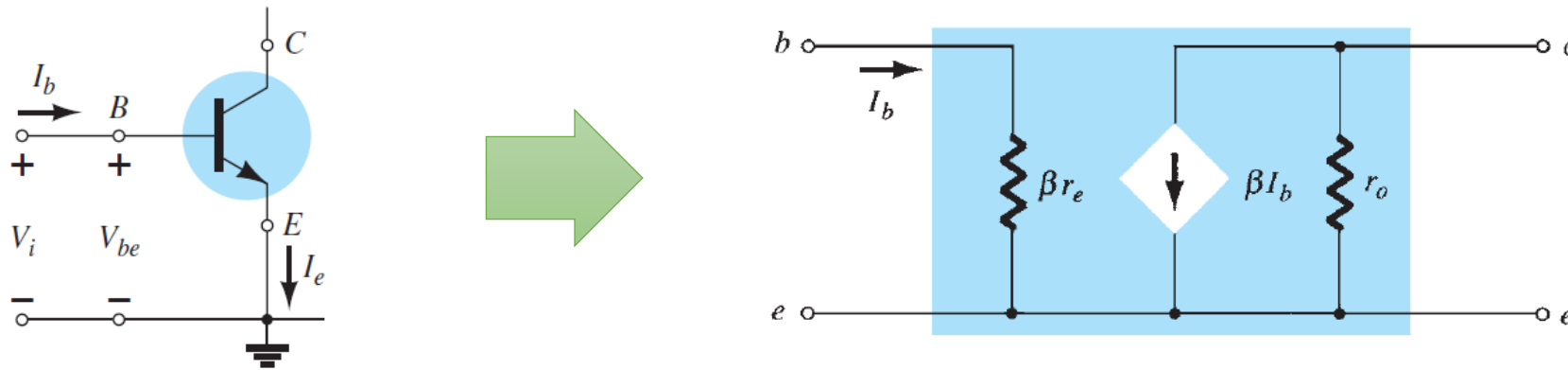
$$Z_o = \frac{V_o}{I_o}$$

$$A_v = \frac{V_o}{V_i}$$

$$A_i = \frac{I_o}{I_i}$$

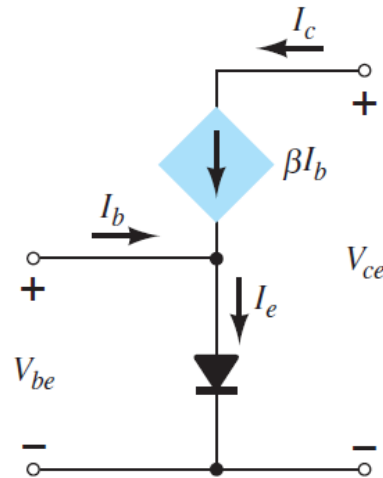
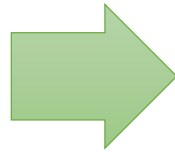
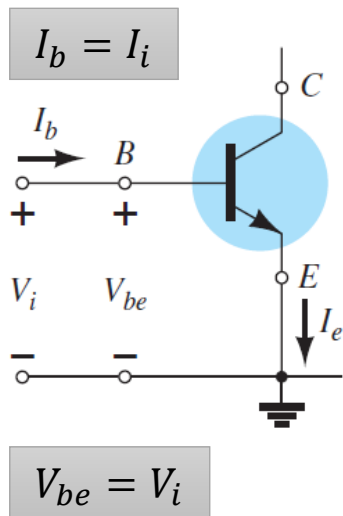
Modelo r_e

- ❑ O circuito equivalente AC pode ser obtido diretamente dos componentes do circuito para qualquer ponto de operação.
- ❑ Não fornece informações sobre elementos de realimentação.
- ❑ Mais adequado para análise de circuitos em baixas e médias frequências.



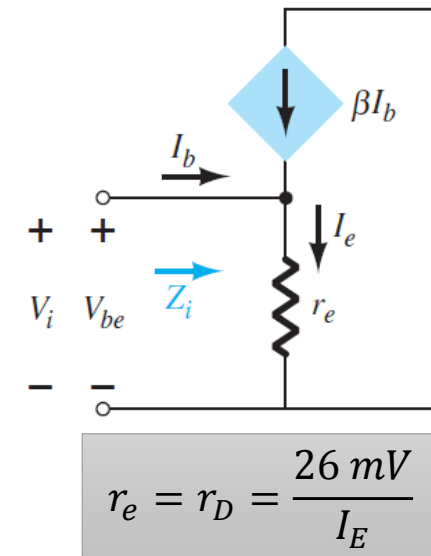
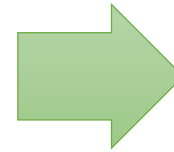
Modelo r_e

Parâmetros do modelo: r_e



Diodo: Resistência AC

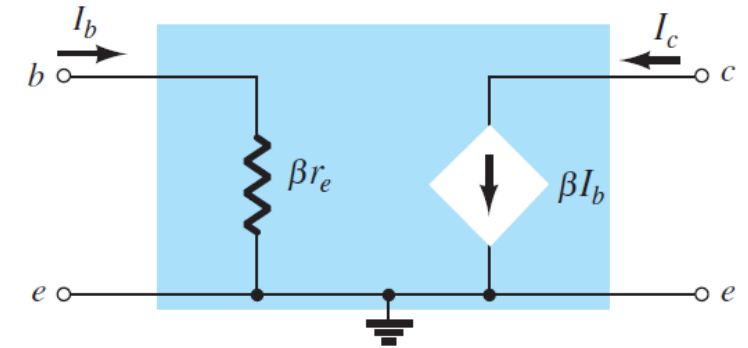
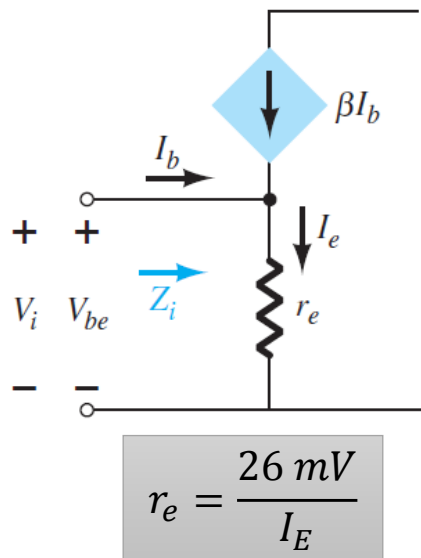
$$r_D = \frac{26 \text{ mV}}{I_D}$$



Resistência de Entrada do BJT

Modelo r_e

Parâmetros do modelo: r_e



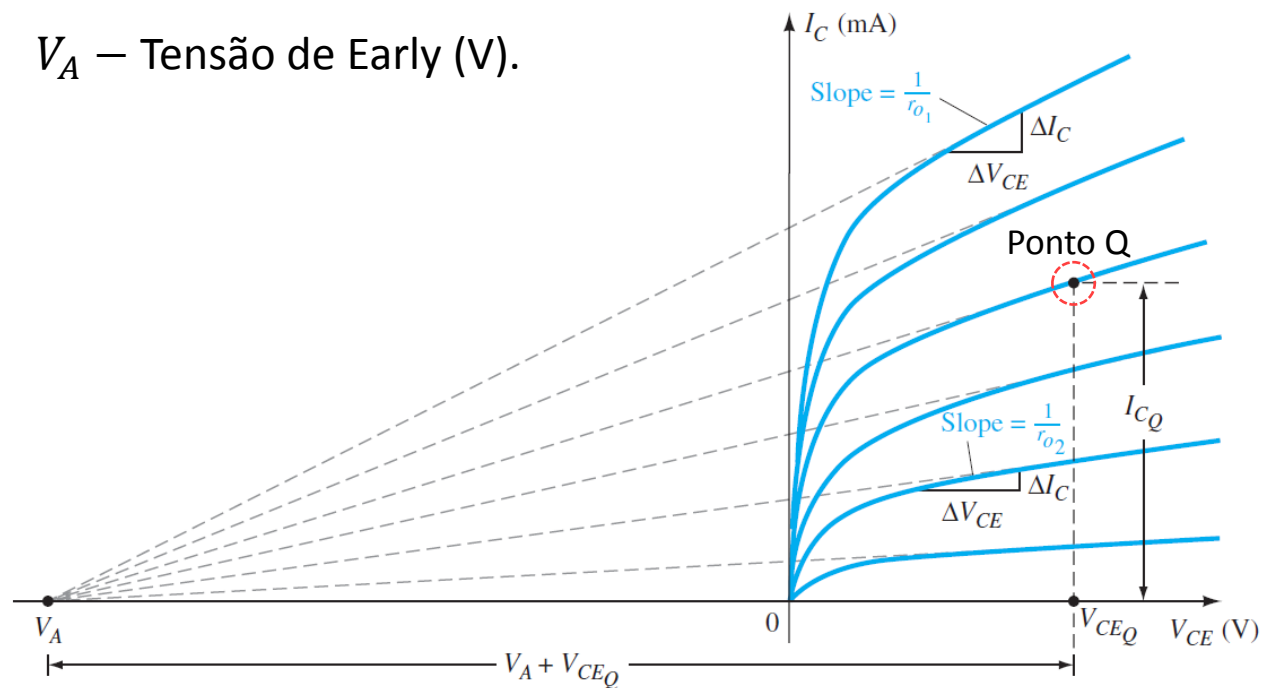
$$V_{be} = I_e r_e = (I_c + I_b) r_e = (\beta I_b + I_b) r_e = (\beta + 1) I_b r_e$$

$$R_i = \frac{V_i}{I_i} = \frac{V_{be}}{I_b} = \frac{(\beta + 1) I_b r_e}{I_b}$$

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

Parâmetros do modelo: r_o

V_A — Tensão de Early (V).



Quando V_A é especificado:

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

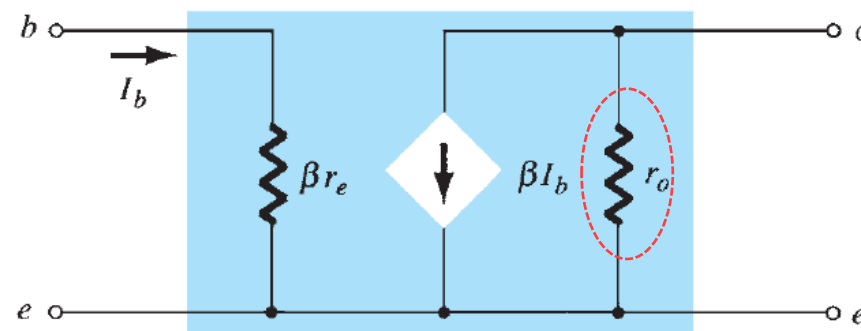
Como $V_A \gg V_{CEQ}$:

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

Resistência de Saída do BJT

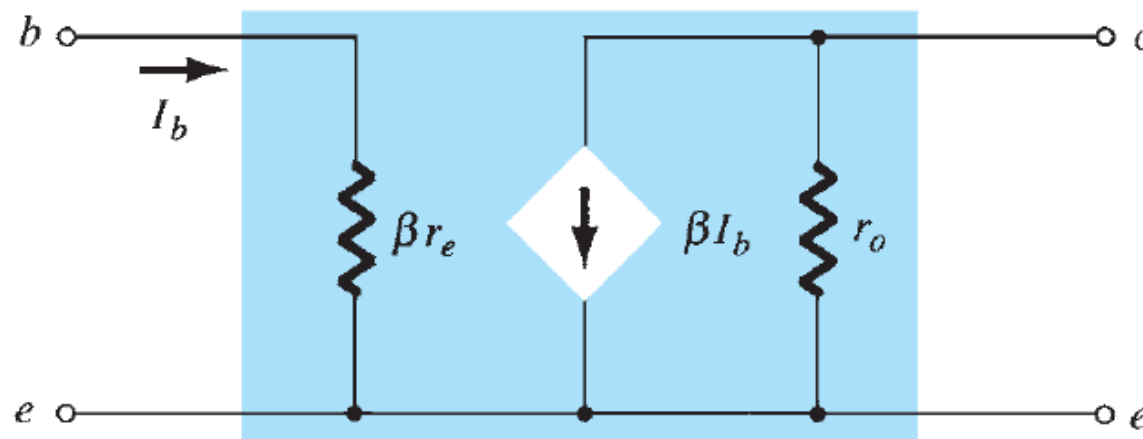
Se V_A não for especificado:

$$r_o = \frac{\Delta V_{CEQ}}{\Delta I_{CQ}}$$



Modelo completo

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



Quando V_A é especificado:

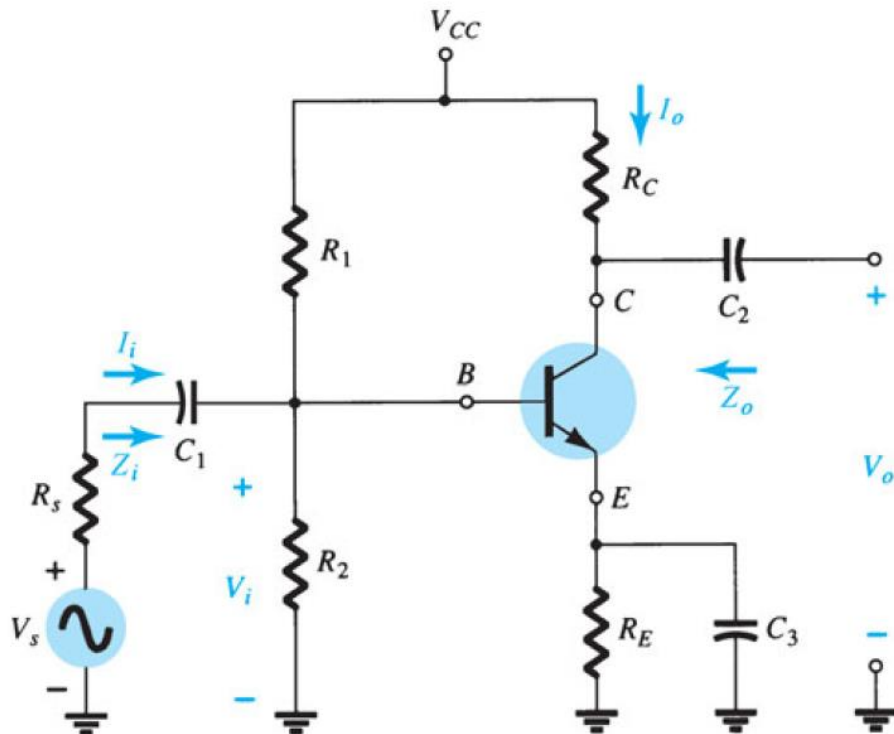
$$r_o \cong \frac{V_A}{I_{CQ}}$$

Se V_A não for especificado:

$$r_o = \frac{\Delta V_{CEQ}}{\Delta I_{CQ}} \quad \text{ou} \quad r_o = \frac{1}{h_o}$$

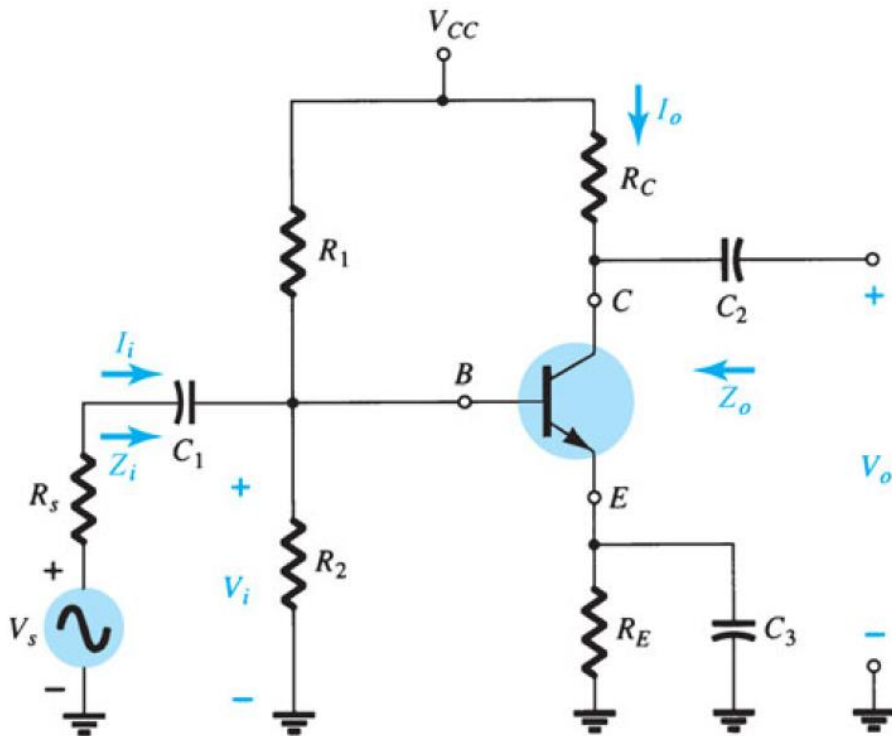
Modelo r_e

□ Circuito AC Equivalente: polarização por divisor de tensão emissor-comum.



□ Circuito AC Equivalente: polarização por divisor de tensão emissor-comum.

1 – Obter os parâmetros do ponto de operação DC do circuito.



$$V_B = \frac{R_2 V_{CC}}{R_1 + R_2}$$

$$I_C = \beta I_B$$

$$R_{Th} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

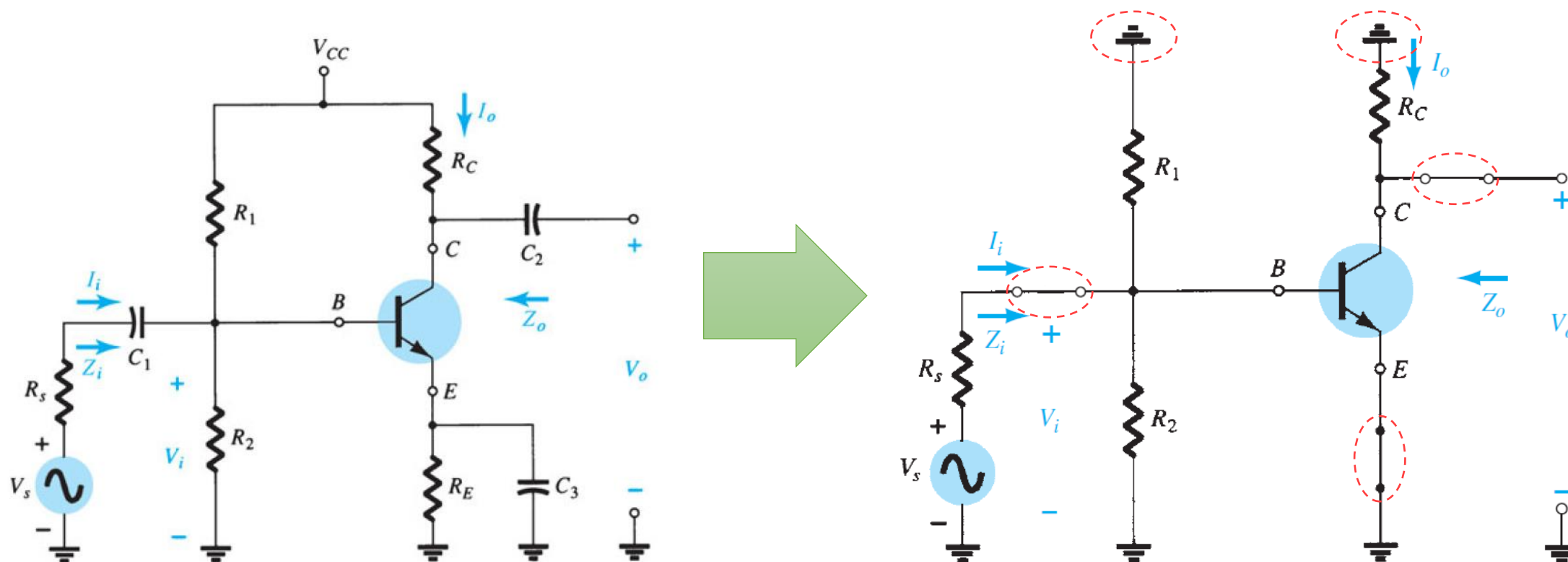
$$V_{CE} = V_{CC} - I_C(R_C + R_E)$$

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

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

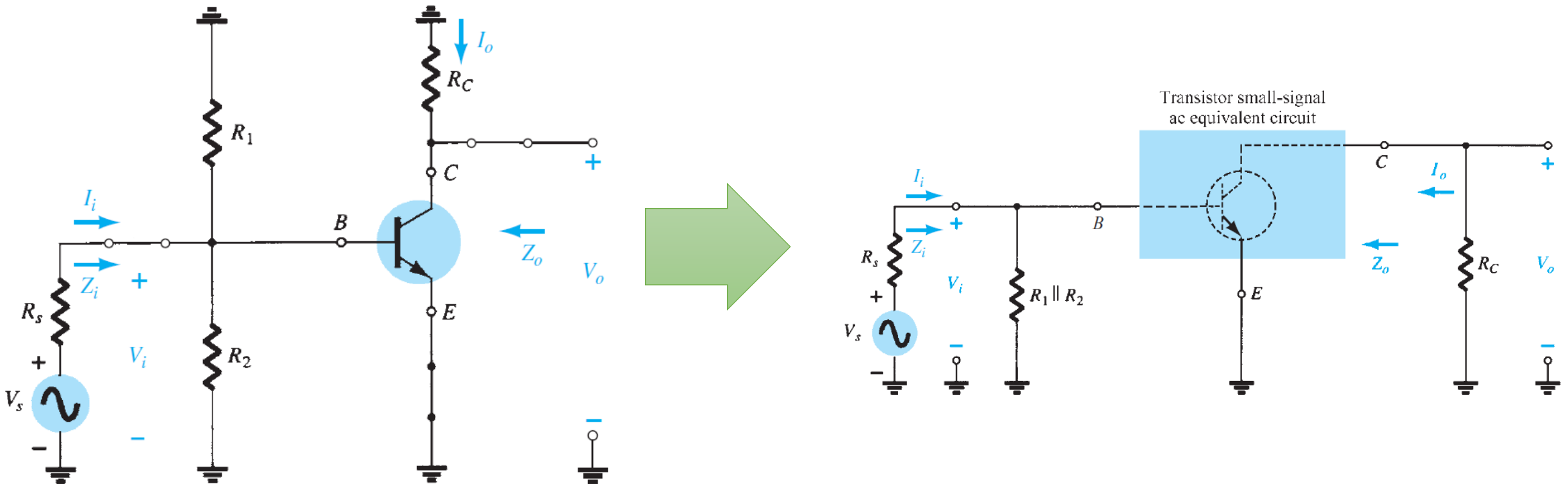
□ Circuito AC Equivalente: polarização por divisor de tensão emissor-comum.

2 – Desconsiderar os efeitos DC das fontes de tensão e elementos reativos.



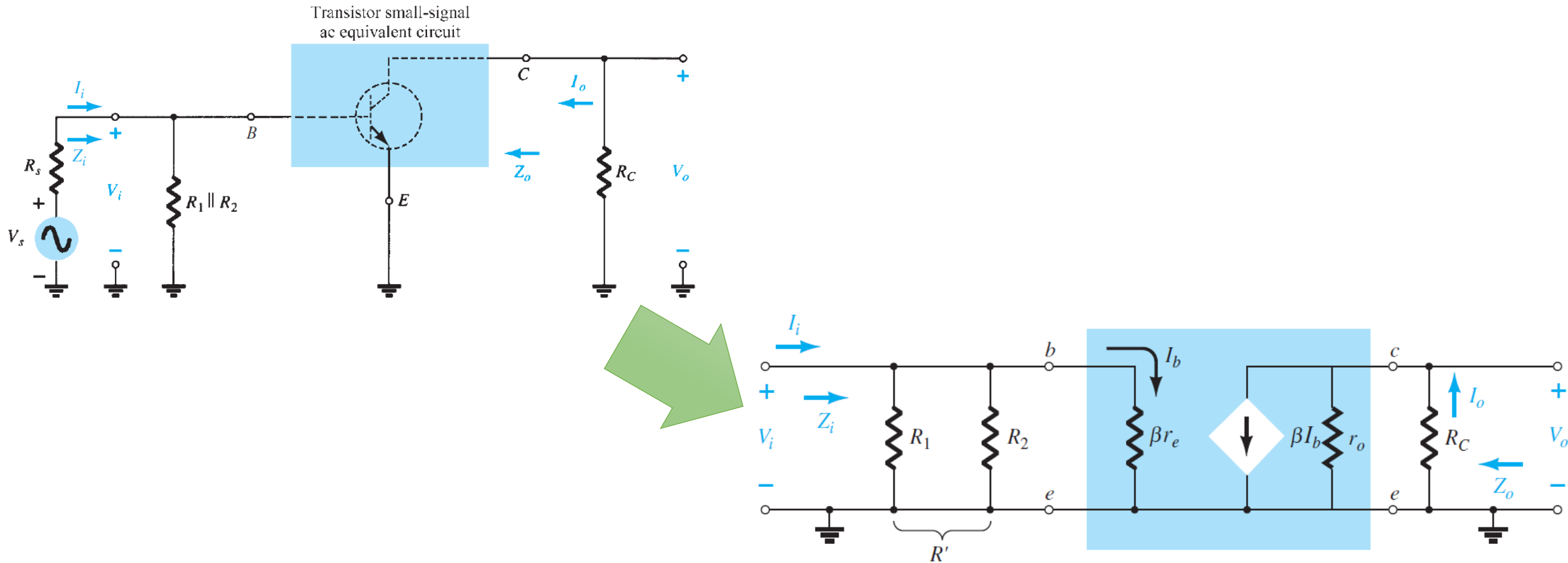
❑ Circuito AC Equivalente: polarização por divisor de tensão emissor-comum.

3 – Redesenhar o circuito.



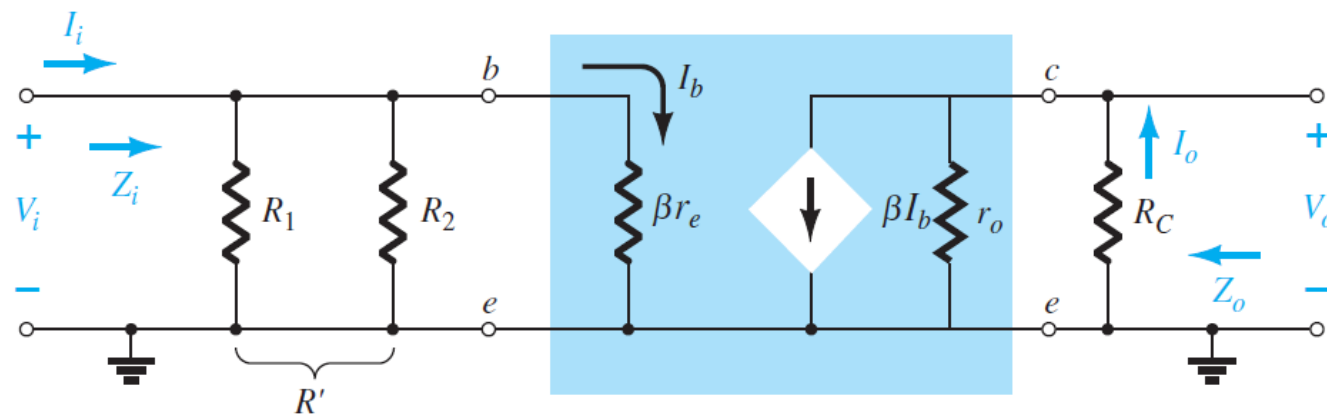
❑ Circuito AC Equivalente: polarização por divisor de tensão emissor-comum.

4 – Substituir o transistor pelo modelo.



❑ Circuito AC Equivalente: polarização por divisor de tensão emissor-comum.

5 – Calcular os parâmetros do modelo.



$$R' = R_1 \parallel R_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

$$r_e = \frac{26 \text{ mV}}{I_e}$$

$$r_o \cong \frac{V_A}{I_{CQ}} \quad \text{ou} \quad r_o = \frac{\Delta V_{CEQ}}{\Delta I_{CQ}}$$

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

$$Z_i = R' \parallel \beta r_e = \frac{R' \beta r_e}{R' + \beta r_e}$$

$$Z_o = R_C \parallel r_o = \frac{R_C r_o}{R_C + r_o}$$

$$V_o = -\beta I_b Z_o = -\beta \frac{V_i}{\beta r_e} Z_o = -V_i \frac{Z_o}{r_e}$$

Se $R' \geq 10\beta r_e$:

$$Z_i \cong \beta r_e$$

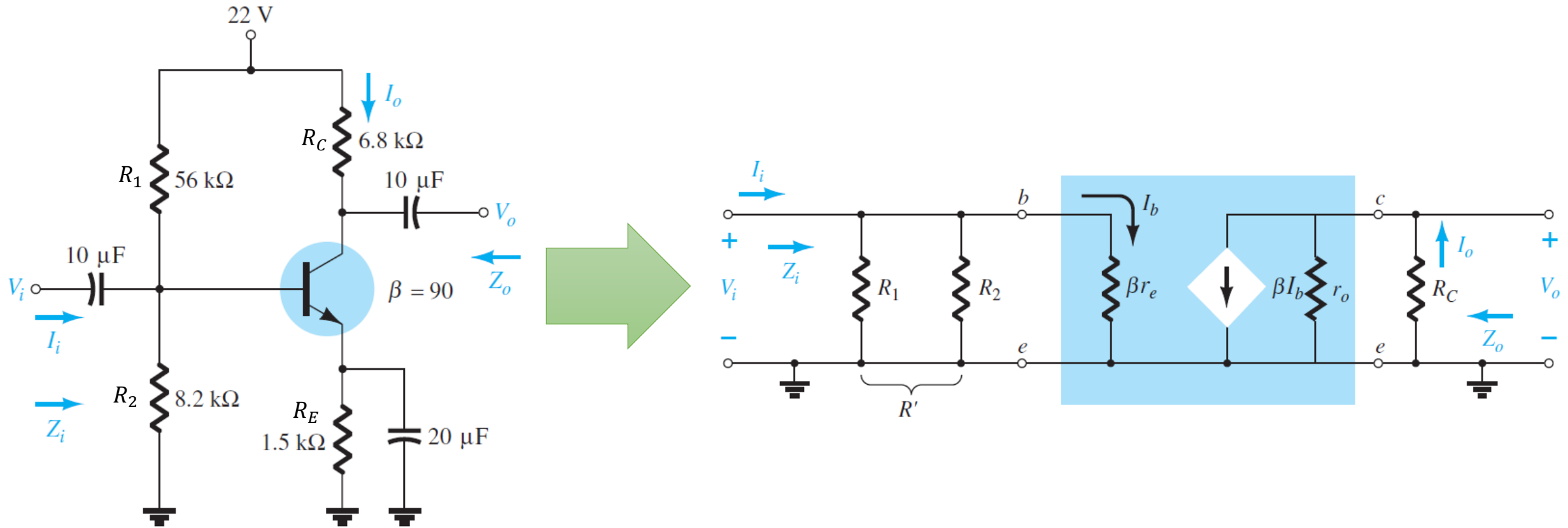
Se $r_o \geq 10R_C$:

$$Z_o \cong R_C$$

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = -\frac{Z_o}{r_e}$$

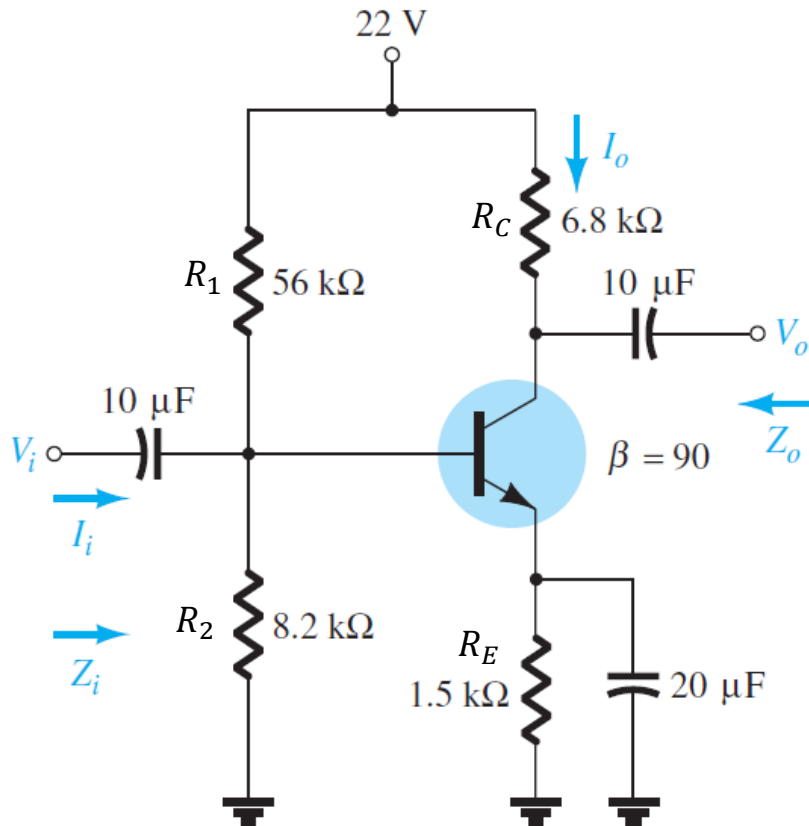
Modelo r_e

Exemplo: Obter o modelo r_e do circuito abaixo considerando $V_A = 70\text{ V}$.



Exemplo: Obter o modelo r_e do circuito abaixo considerando $V_A = 70\text{ V}$.

1 – Obter os parâmetros do ponto de operação DC do circuito.



$$V_B = \frac{R_2 V_{CC}}{R_1 + R_2} = \frac{8,2\text{ k}\Omega \times 22\text{ V}}{56\text{ k}\Omega + 7,74\text{ k}\Omega} = 2,81\text{ V}$$

$$V_E = V_B - V_{BE} = 2,81\text{ V} - 0,7\text{ V} = 2,11\text{ V}$$

$$R_{Th} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{56\text{ k}\Omega \times 8,2\text{ k}\Omega}{56\text{ k}\Omega + 8,2\text{ k}\Omega} = 7,15\text{ k}\Omega$$

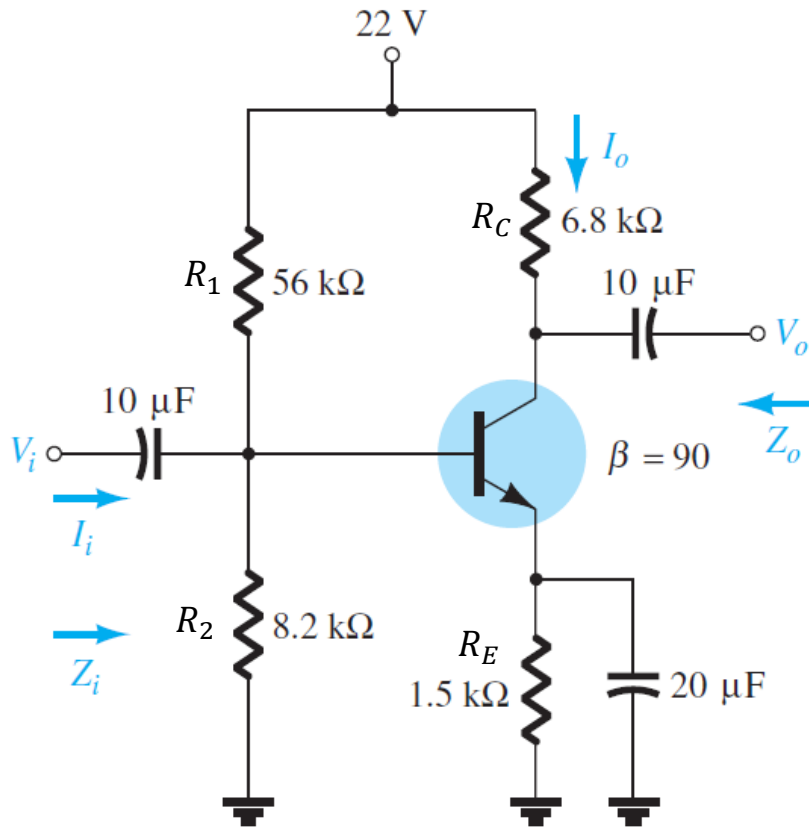
$$I_B = \frac{V_B - V_{BE}}{R_{Th} + (\beta + 1)R_E} = \frac{2,81\text{ V} - 0,7\text{ V}}{7,15\text{ k}\Omega + (90 + 1)1,5\text{ k}\Omega} = 14,7\text{ }\mu\text{A}$$

$$I_{CQ} = \beta I_B = 90 \times 14,7\text{ }\mu\text{A} = 1,323\text{ mA}$$

$$V_{CEQ} = V_{CC} - I_C(R_C - R_E) = 22 - 1,323\text{ mA}(6,8\text{ k}\Omega - 1,5\text{ k}\Omega) = 14,98\text{ V}$$

$$I_E = I_{CQ} + I_B = 1,323\text{ mA} + 14,7\text{ }\mu\text{A} = 1,337\text{ mA}$$

Exemplo: Obter o modelo r_e do circuito abaixo considerando $V_A = 70\text{ V}$.



2 – Calcular os parâmetros do modelo

$$I_{CQ} = 1,323\text{ mA} \quad I_E = 1,337\text{ mA}$$

$$r_e = \frac{26\text{ mV}}{I_E} = \frac{26\text{ mV}}{1,337\text{ mA}} = 19,44\text{ }\Omega$$

$$R' = R_1 \parallel R_2 = R_{Th} = 7,15\text{ k}\Omega$$

$$Z_i = R' \parallel \beta r_e = \frac{R' \beta r_e}{R' + \beta r_e} = \frac{7,15\text{ k}\Omega \times 90 \times 19,44\text{ }\Omega}{7,15\text{ k}\Omega + 90 \times 19,44\text{ }\Omega} = 1,4\text{ k}\Omega$$

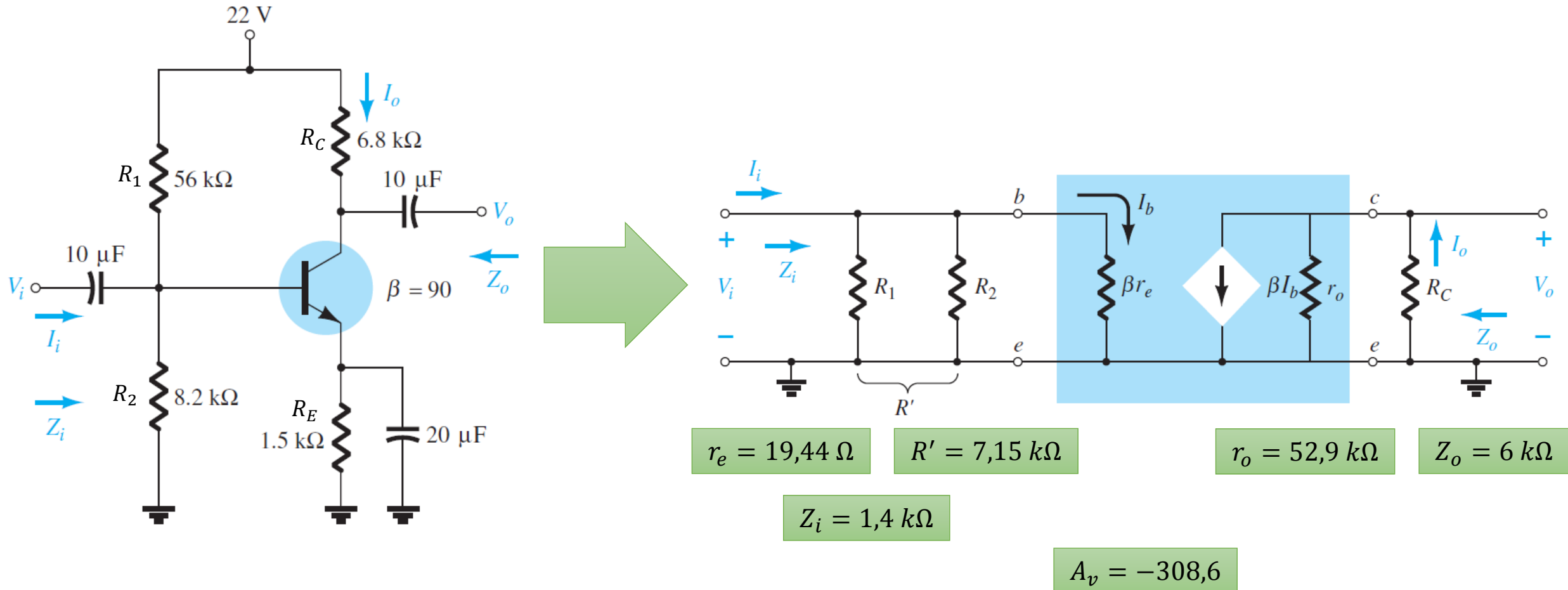
$$r_o \cong \frac{V_A}{I_{CQ}} = \frac{70\text{ V}}{1,323\text{ mA}} = 52,9\text{ k}\Omega$$

$$Z_o = R_C \parallel r_o = \frac{R_C r_o}{R_C + r_o} = \frac{6,8\text{ k}\Omega \times 52,9\text{ k}\Omega}{6,8\text{ k}\Omega + 52,9\text{ k}\Omega} = 6\text{ k}\Omega$$

$$A_v = -\frac{Z_o}{r_e} = -\frac{6\text{ k}\Omega}{19,44\text{ }\Omega} = -308,6$$

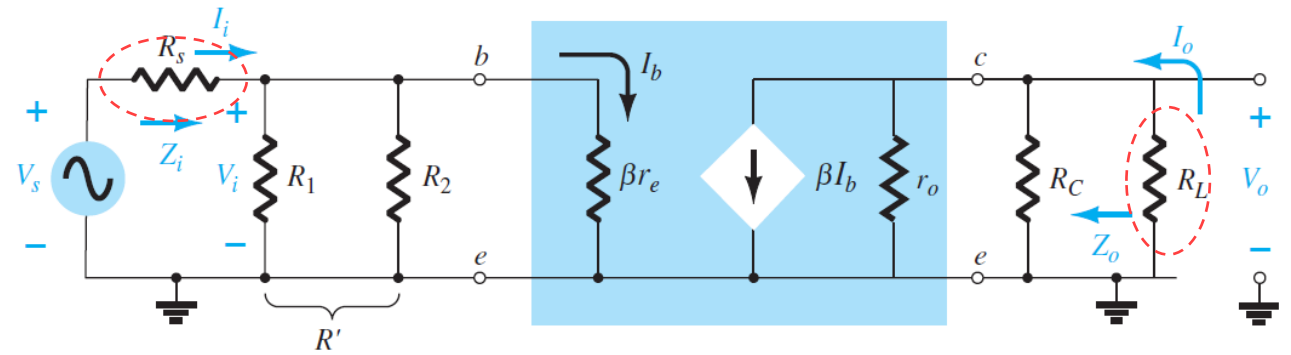
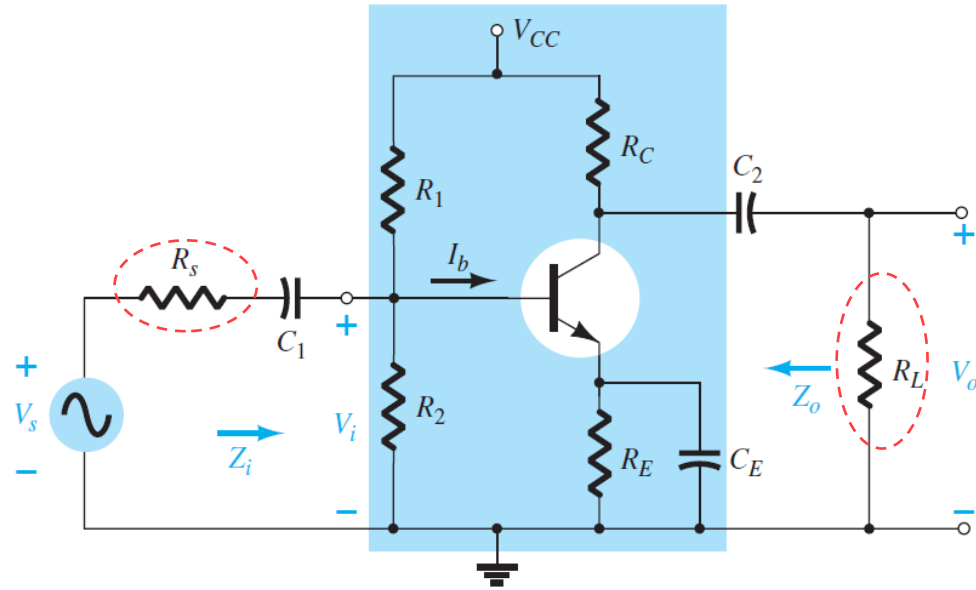
Modelo r_e

Exemplo: Obter o modelo r_e do circuito abaixo considerando $V_A = 70\text{ V}$.

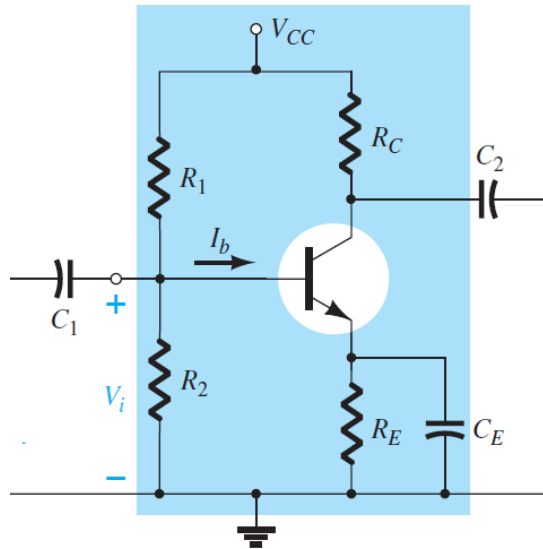


Modelo r_e

□ Efeitos das resistências de entrada (R_S) e saída (R_L).

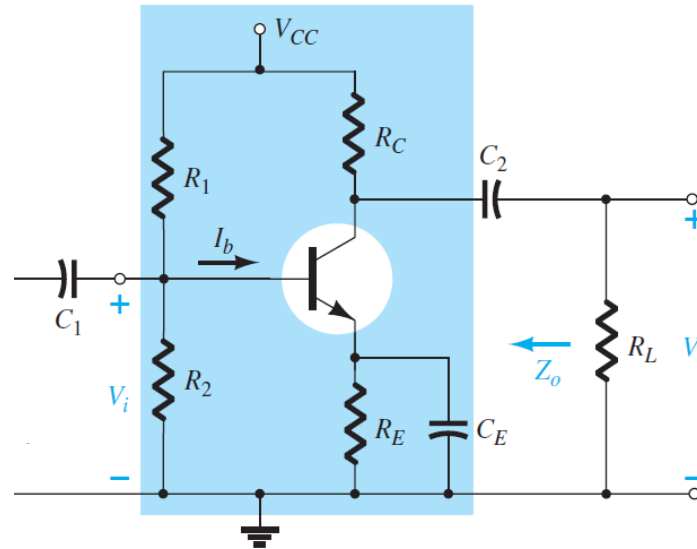


□ Efeitos das resistências de entrada (R_S) e saída (R_L).



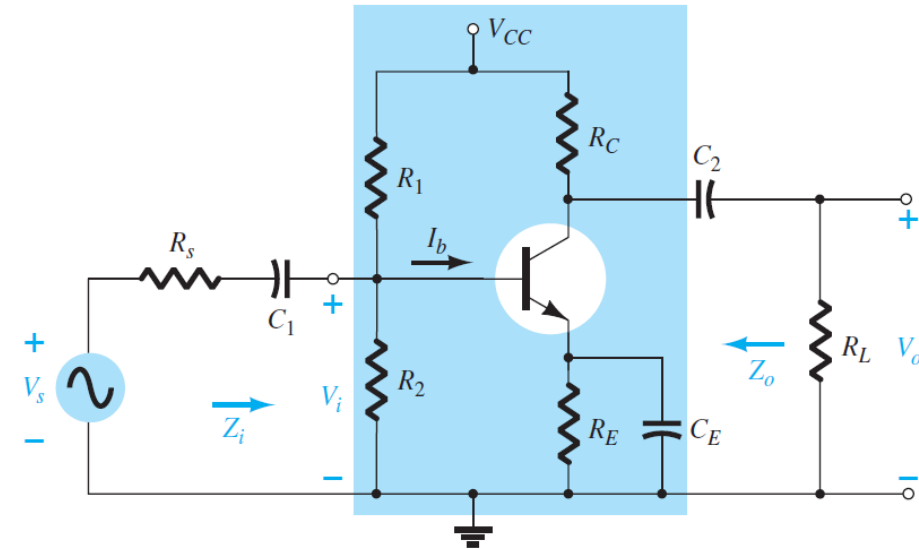
A_v – Ganho de tensão sem carga

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = -\frac{Z_o}{r_e}$$



A_{vL} – Ganho de tensão com carga

$$A_{vL} = \frac{V_o}{V_i}$$



A_{vS} – Ganho de tensão com carga e resistência de fonte

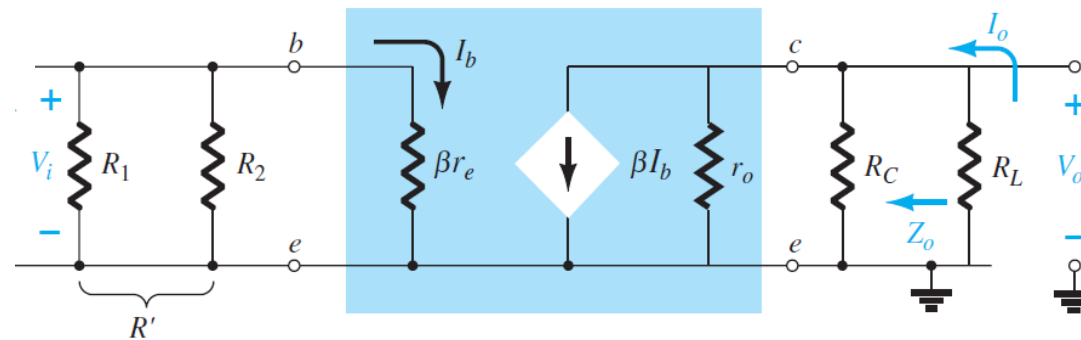
$$A_{vS} = \frac{V_o}{V_s}$$

A introdução de resistências de entrada e saída diminuem o ganho de tensão obtido em relação ao ganho de tensão sem carga!!

$$A_{vS} > A_{vL} > A_v$$

□ Efeitos das resistências de entrada (R_S) e saída (R_L).

A_{v_L} – Ganho de tensão com carga



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

$$Z_o = R_L \parallel R_C \parallel r_o = \frac{R_L R_C r_o}{R_L R_C + R_L r_o + R_C r_o}$$

Se $r_o \geq 10(R_L \parallel R_C)$:

$$Z_o \cong R_L \parallel R_C$$

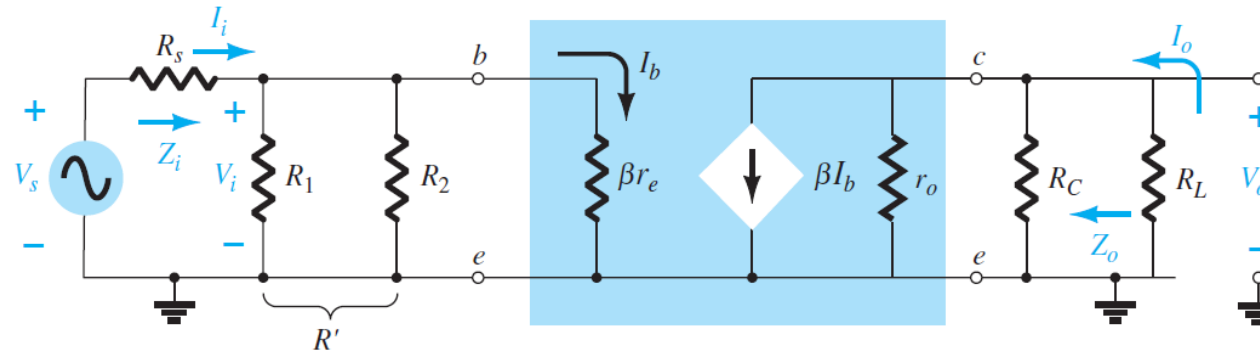
$$I_b = \frac{V_i}{\beta r_e}$$

$$V_o = -\beta I_b Z_o = -\beta \frac{V_i}{\beta r_e} Z_o = -V_i \frac{Z_o}{r_e}$$

$$A_{v_L} = \frac{V_o}{V_i} = -\frac{Z_o}{r_e}$$

□ Efeitos das resistências de entrada (R_S) e saída (R_L).

A_{v_S} – Ganho de tensão com carga e resistência de entrada



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

$$Z_o = R_L \parallel R_C \parallel r_o = \frac{R_L R_C r_o}{R_L R_C + R_L r_o + R_C r_o}$$

Se $r_o \geq 10(R_L \parallel R_C)$:

$$Z_o \cong R_L \parallel R_C$$

$$Z_i = R' \parallel \beta r_e = \frac{R' \beta r_e}{R' + \beta r_e}$$

$$V_i = \frac{Z_i V_S}{Z_i + R_S}$$

$$\frac{V_i}{V_S} = \frac{Z_i}{Z_i + R_S}$$

$$A_{v_S} = \frac{V_o}{V_S}$$

$$A_{v_S} = \frac{V_o}{V_i} \frac{V_i}{V_S}$$

$$A_{v_S} = A_{v_L} \frac{Z_i}{Z_i + R_S}$$

Modelo Híbrido Equivalente

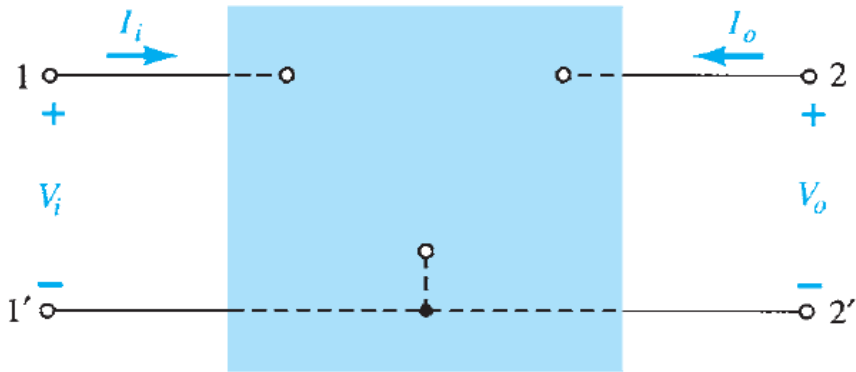
- ❑ O circuito equivalente AC pode ser obtido diretamente das especificações da folha de dados para um ponto de operação específico.
- ❑ Permite realizar uma comparação rápida entre dispositivos diferentes.

		Min.	Max.	
Input impedance ($I_C = 1 \text{ mA dc}$, $V_{CE} = 10 \text{ V dc}$, $f = 1 \text{ kHz}$)	h_{ie}	0.5	7.5	$\text{k}\Omega$
Voltage feedback ratio ($I_C = 1 \text{ mA dc}$, $V_{CE} = 10 \text{ V dc}$, $f = 1 \text{ kHz}$)	h_{re}	0.1	8.0	$\times 10^{-4}$
Small-signal current gain ($I_C = 1 \text{ mA dc}$, $V_{CE} = 10 \text{ V dc}$, $f = 1 \text{ kHz}$)	h_{fe}	20	250	—
Output admittance ($I_C = 1 \text{ mA dc}$, $V_{CE} = 10 \text{ V dc}$, $f = 1 \text{ kHz}$)	h_{oe}	1.0	30	$1\mu\text{S}$

Parâmetros híbridos do transistor 2N4400

Modelo Híbrido Equivalente

Parâmetros do modelo.



$$V_i = h_{11}I_i + h_{12}V_o$$

$$I_o = h_{21}I_i + h_{22}V_o$$

PARÂMETROS HÍBRIDOS (h)

Resistência de entrada

$$h_i = h_{11} = \left. \frac{V_i}{I_i} \right|_{V_o=0} \Omega$$

Razão de transferência de tensão reversa

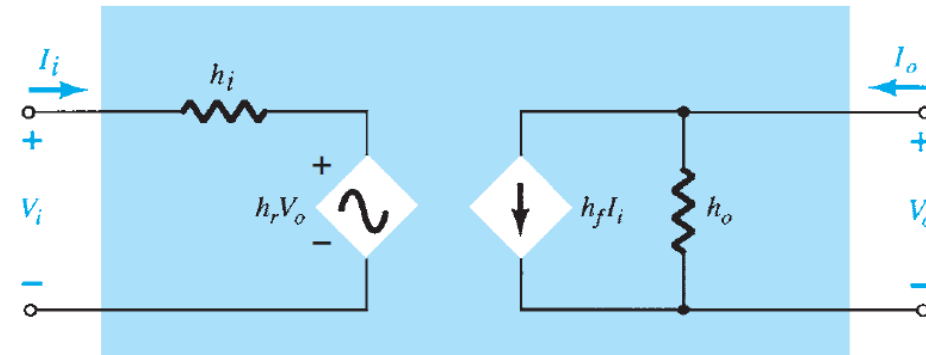
$$h_r = h_{12} = \left. \frac{V_i}{V_o} \right|_{I_i=0}$$

Razão de transferência direta de corrente

$$h_f = h_{21} = \left. \frac{I_o}{I_i} \right|_{V_o=0}$$

Condutância de saída

$$h_o = h_{22} = \left. \frac{I_o}{V_o} \right|_{I_i=0} S$$



Modelo Híbrido Equivalente

Parâmetros do modelo.

PARÂMETROS HÍBRIDOS (h)

Resistência de entrada

$$h_i = h_{11} = \left. \frac{V_i}{I_i} \right|_{V_o=0} \Omega$$

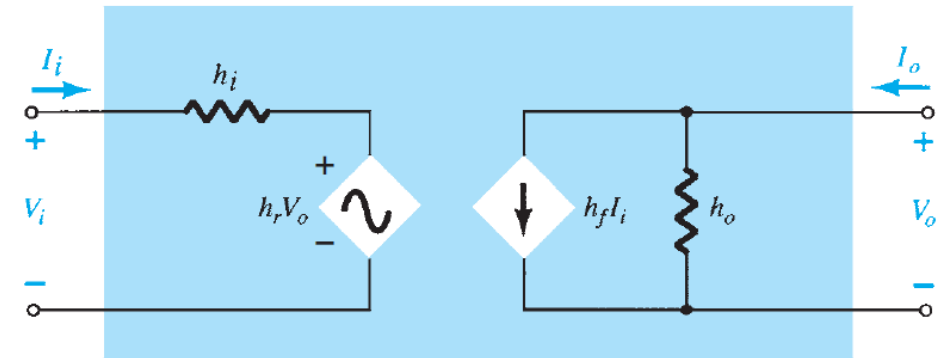
Razão de transferência direta de corrente

$$h_f = h_{21} = \left. \frac{I_o}{I_i} \right|_{V_o=0}$$

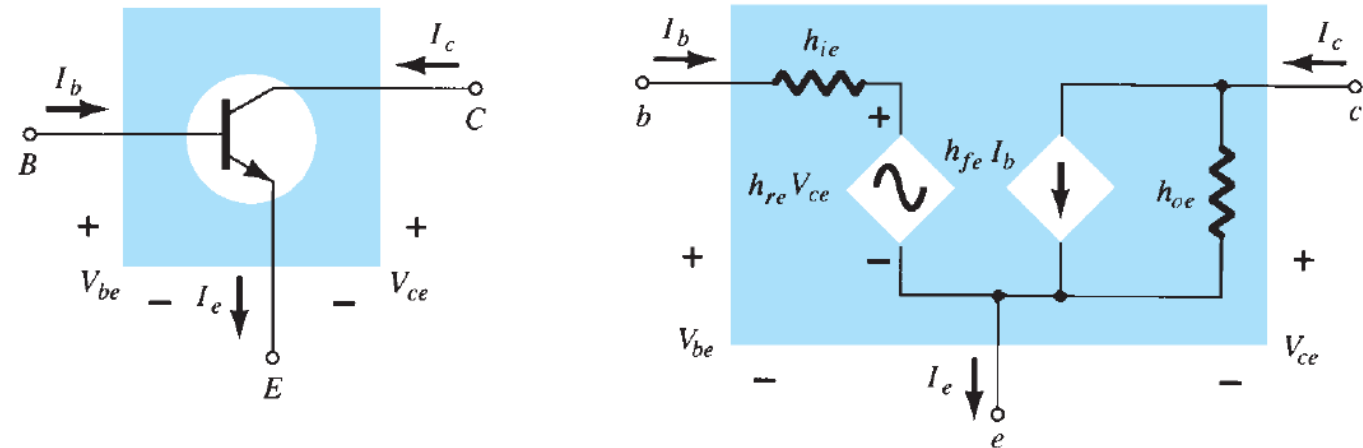
Razão de transferência de tensão reversa

$$h_r = h_{12} = \left. \frac{V_i}{V_o} \right|_{I_i=0}$$

$$h_o = h_{22} = \left. \frac{I_o}{V_o} \right|_{I_i=0} S$$



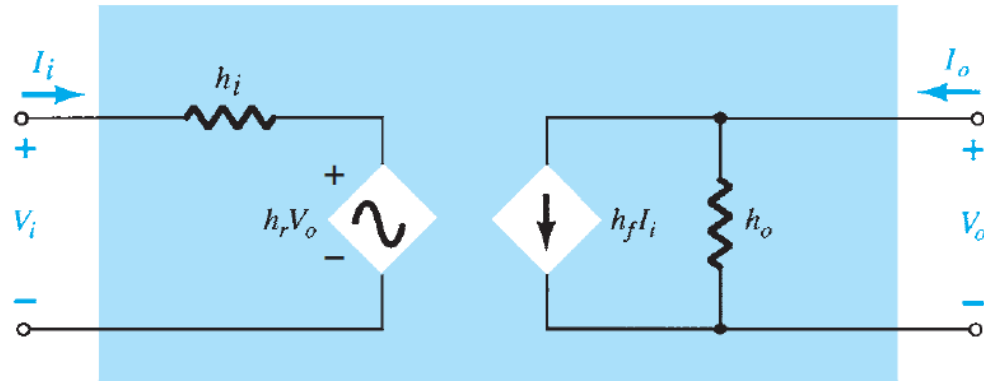
Configuração Emissor-Comum



Modelo Híbrido Equivalente

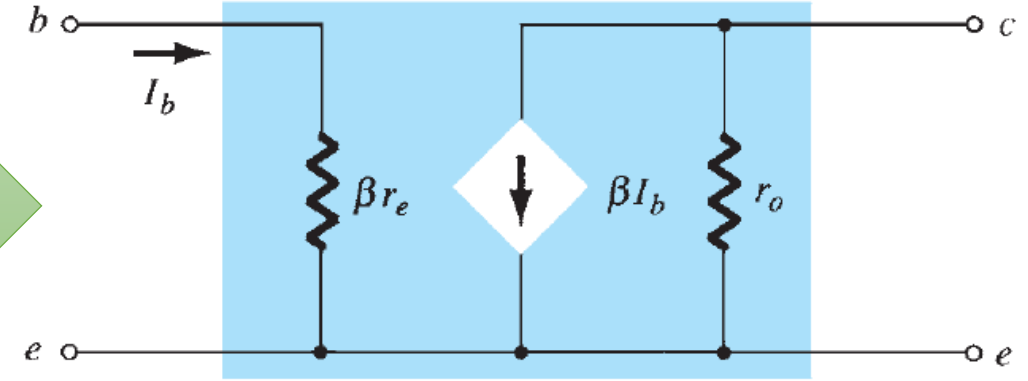
Equivalência entre o modelo híbrido equivalente e o modelo r_e

Modelo híbrido equivalente



$$h_r \approx 0$$

Modelo r_e



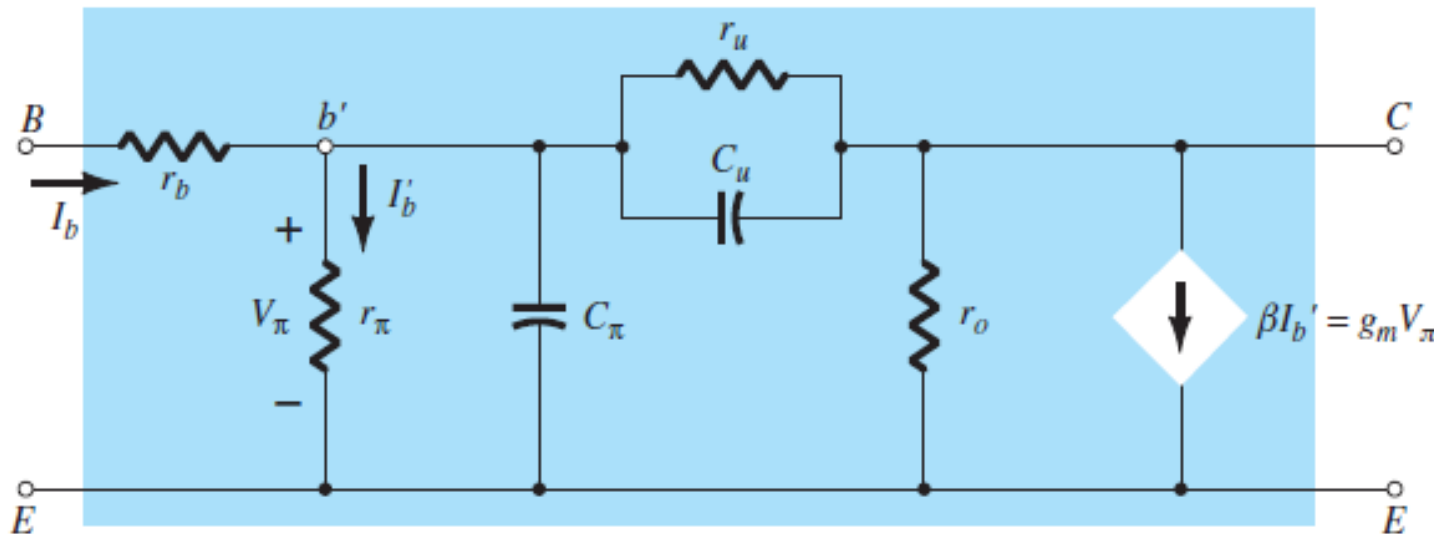
$$h_{ie} = \beta r_e$$

$$h_{fe} = \beta$$

$$\frac{1}{h_{oe}} = r_o$$

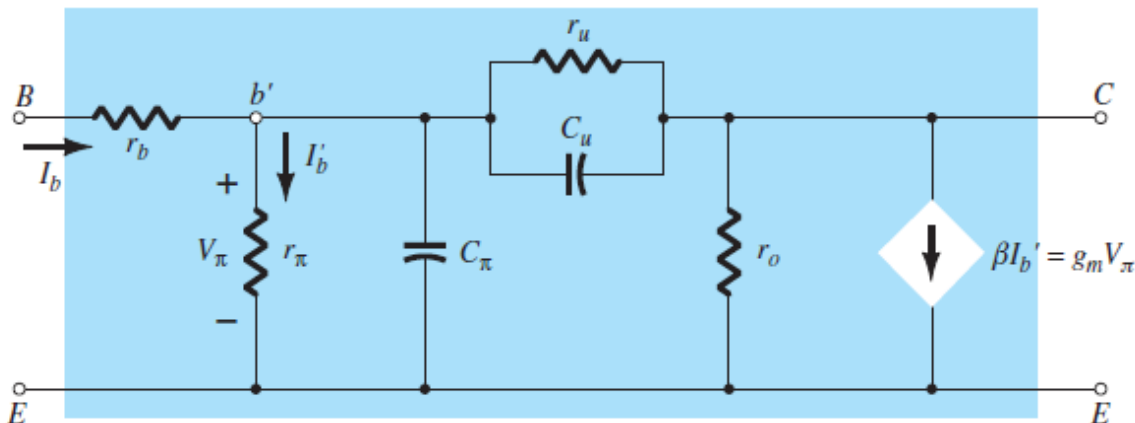
Modelo π -Híbrido

- Permite realizar uma análise mais precisa de efeitos que ocorrem em altas frequências.



Modelo π -Híbrido

Parâmetros do modelo.



r_π e r_o possuem relação direta com o modelo r_e ou h

$$r_\pi = \beta r_e \quad \text{ou} \quad r_\pi = \frac{h_{fe}}{g_m}$$

$$r_o \cong \frac{V_A}{I_{CQ}} \quad \text{ou} \quad r_o = \frac{1}{h_{oe}}$$

Transcondutância

$$g_m = \frac{1}{r_e}$$

Fonte de Corrente
Controlada por Corrente

$$\beta I_b'$$

Fonte de Corrente
Controlada por Tensão

$$g_m V_\pi$$

$$\beta I_b' = \frac{1}{r_e} r_e \beta I_b' = g_m I_b' \beta r_e = g_m I_b' r_\pi = g_m V_\pi$$

r_b inclui a resistência entre o terminal externo da base e a região interna do transistor que funciona como base

$$r_b = h_{ie} - r_\pi$$

$$50 \, \Omega \leq r_b \leq 1 \, k\Omega$$

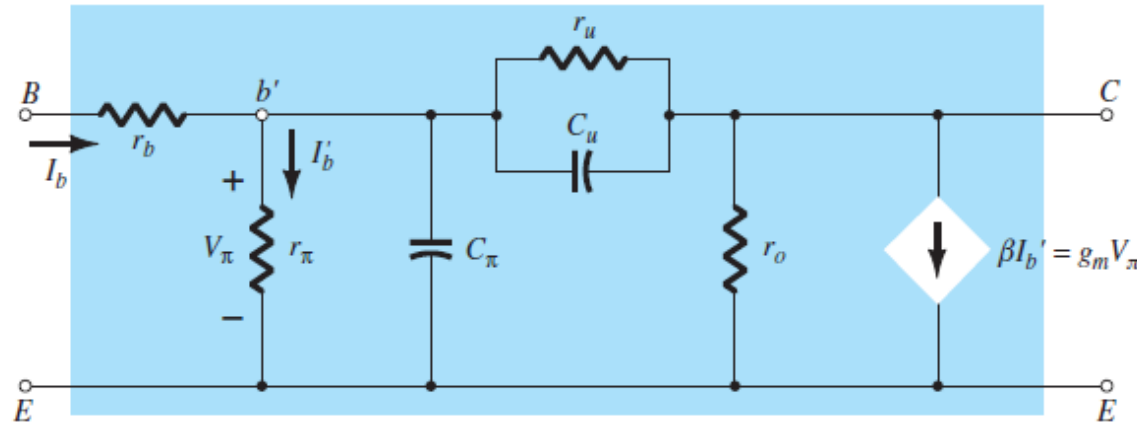
r_u inclui a resistência parasitária entre o coletor e a base. Representa um mecanismo de realimentação.

$$r_u = \frac{r_\pi}{h_{re}}$$

$$r_u \rightarrow M\Omega$$

Modelo π -Híbrido

□ Parâmetros do modelo.



C_π e C_u incluem o efeito de capacitâncias parasitárias entre base-emissor e coletor-base, respectivamente. São da ordem de alguns pF.

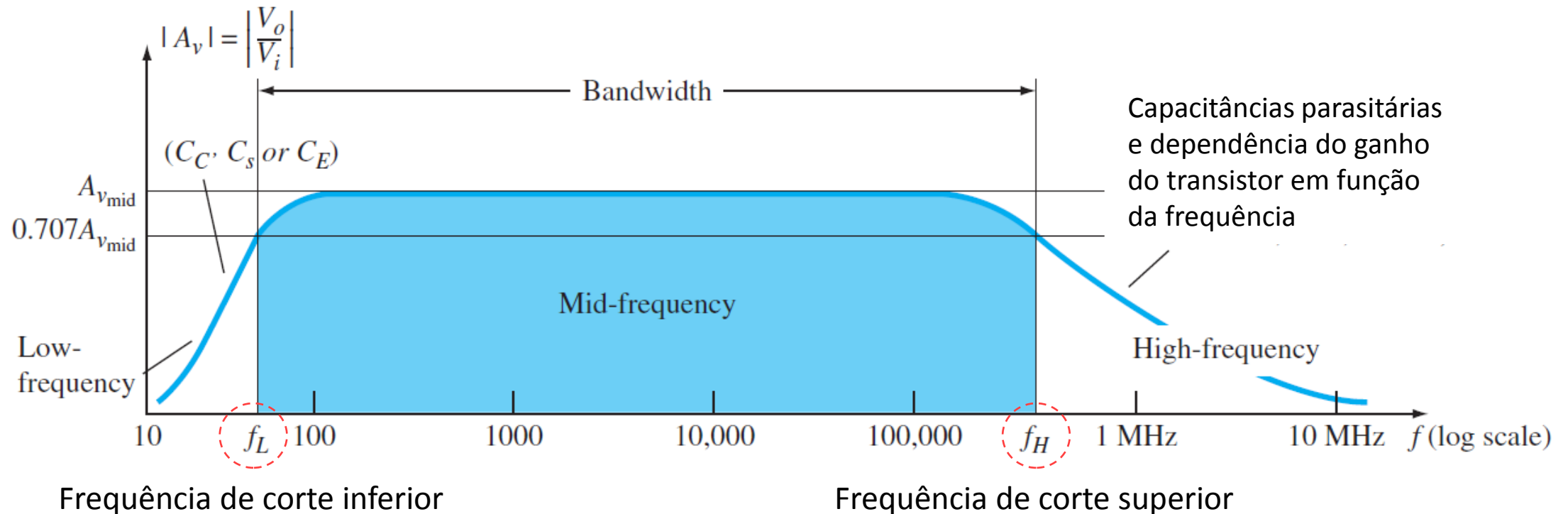
Em baixas e médias frequências podem ser substituídos por circuitos abertos desde que:

$$\frac{1}{\omega C_\pi} \gg r_\pi$$

$$\frac{1}{\omega C_u} \gg r_u$$

Resposta em Frequência

Curva representativa da resposta em frequência de um amplificador com BJT.

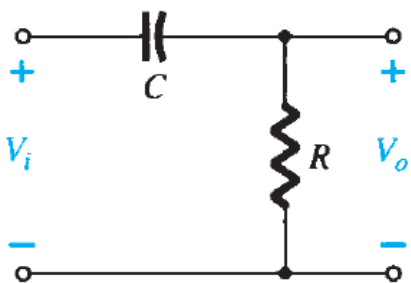


$$\text{Largura de Banda: } B = f_H - f_L$$

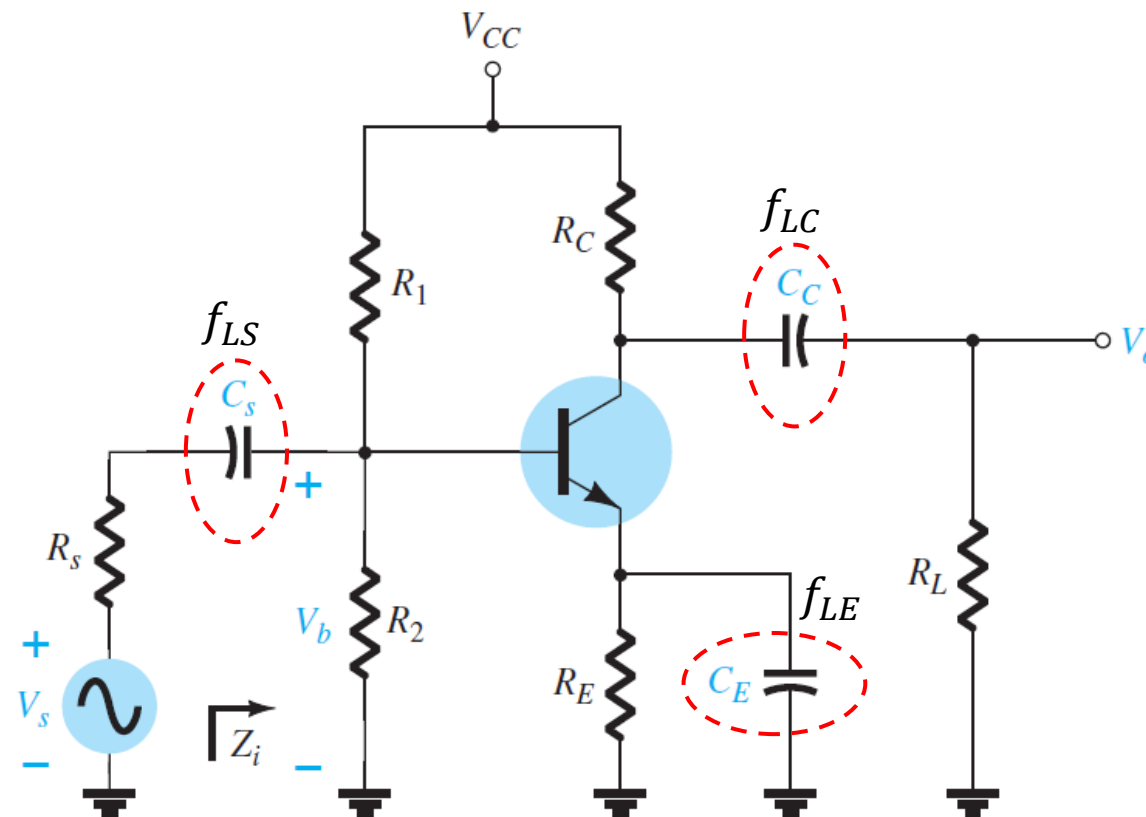
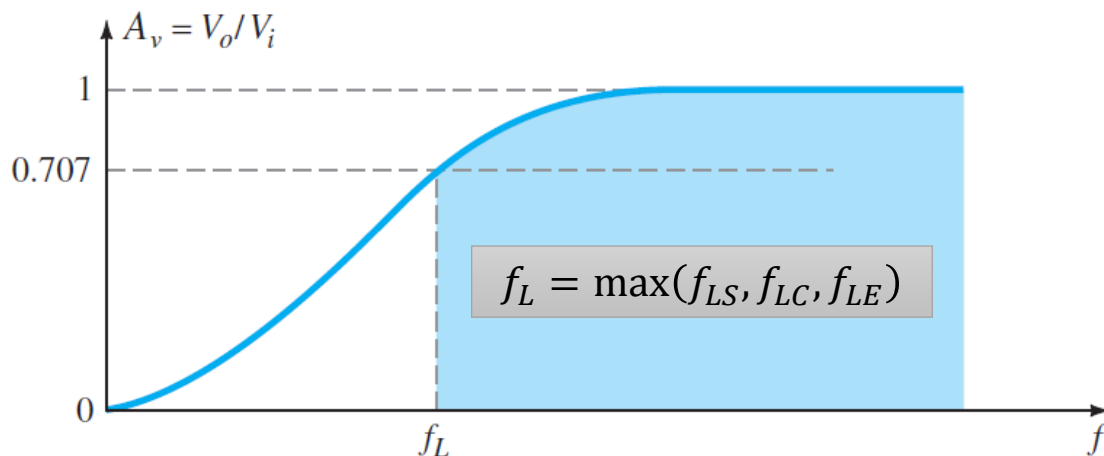
Resposta em Frequência

Resposta em baixas frequências.

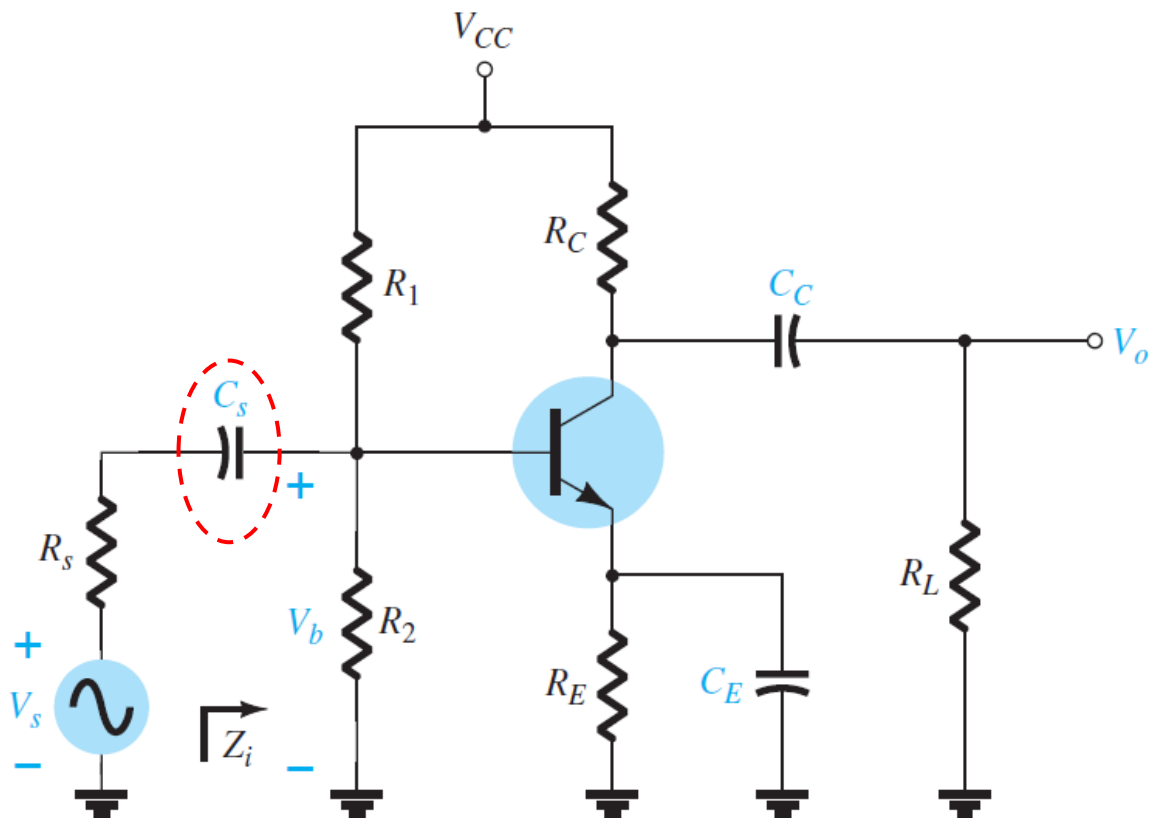
Filtro Passa-Altas



$$f_L = \frac{1}{2\pi RC}$$

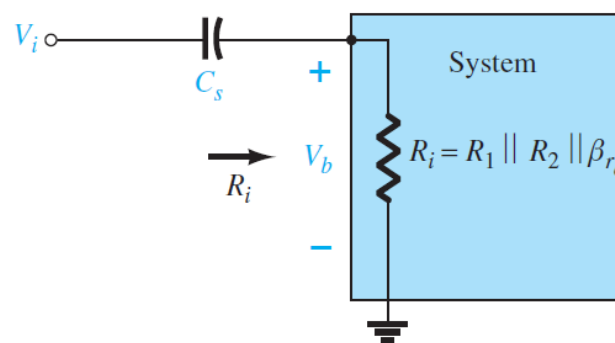


Resposta em baixas frequências.



Efeito de C_S

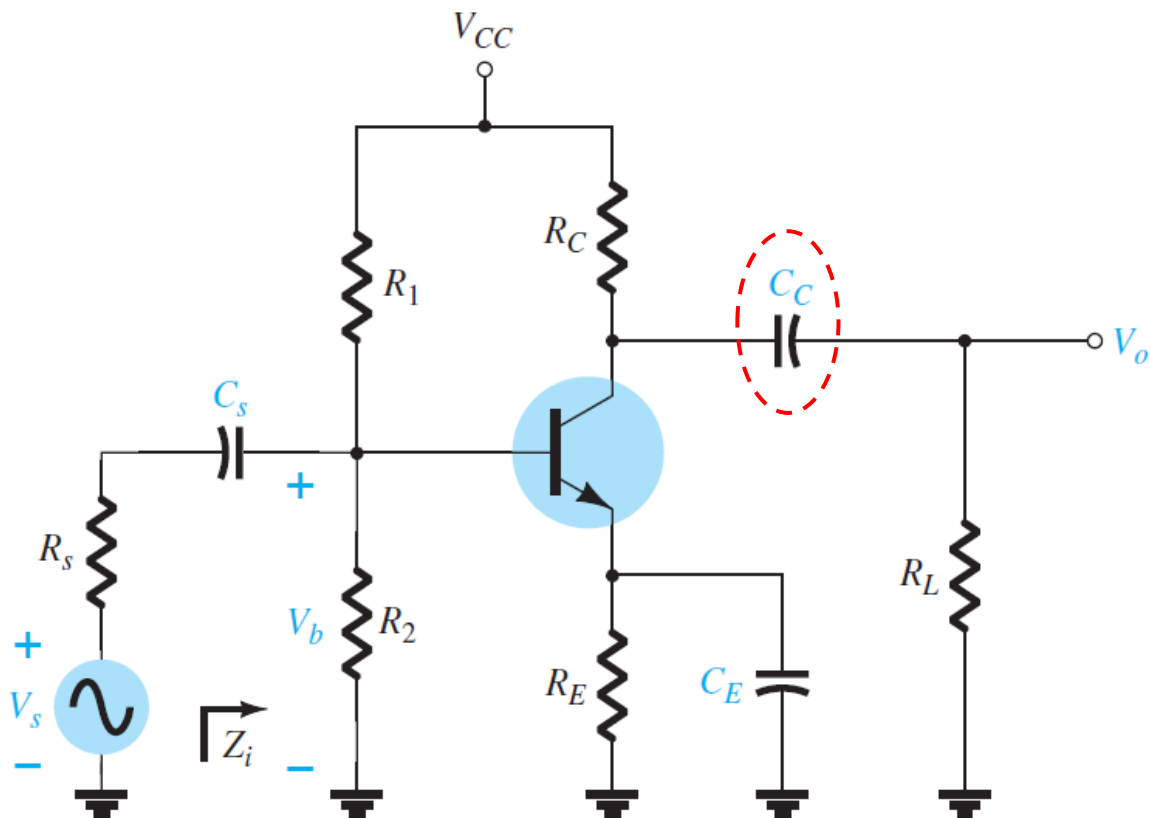
$$f_{LS} = \frac{1}{2\pi(Z_i + R_S)C_S}$$



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

$$Z_i = \frac{R_1 R_2 \beta r_e}{R_1 R_2 + R_1 \beta r_e + R_2 \beta r_e}$$

Resposta em baixas frequências.

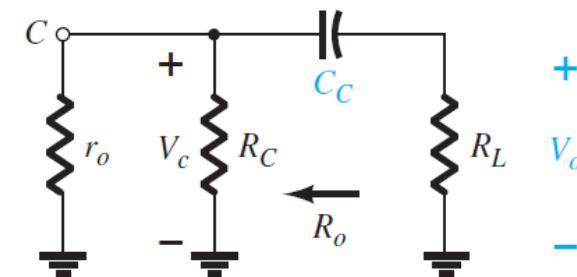


Efeito de C_C

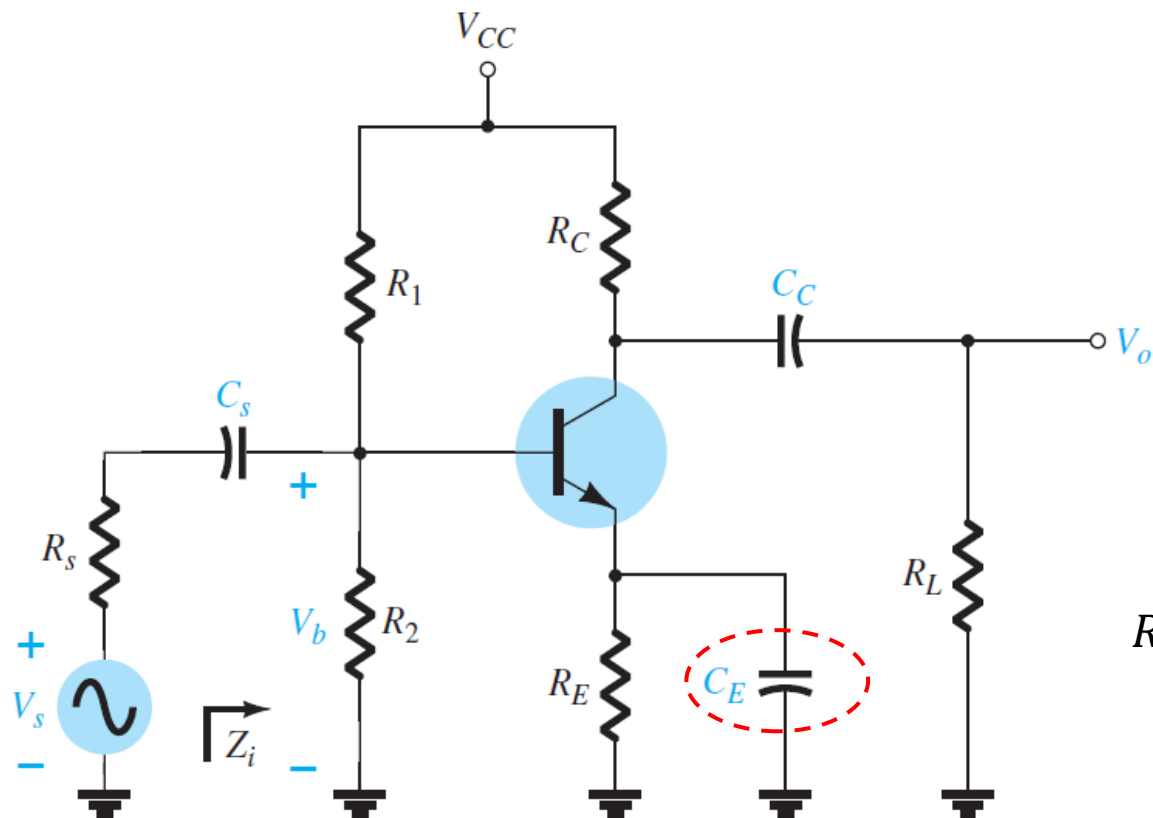
$$f_{LC} = \frac{1}{2\pi(R_o + R_L)C_C}$$

$$R_o = R_C \parallel r_o$$

$$R_o = \frac{R_C r_o}{R_C + r_o}$$



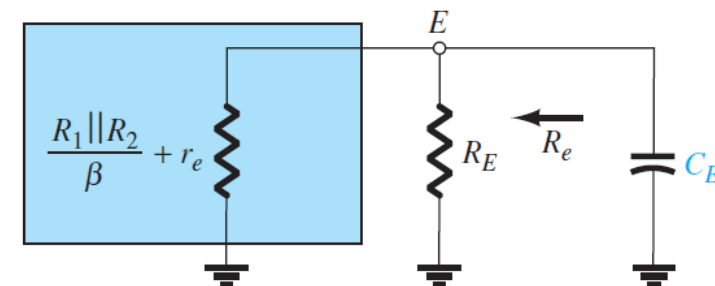
Resposta em baixas frequências.



Efeito de C_E

$$f_{LE} = \frac{1}{2\pi R_e C_E}$$

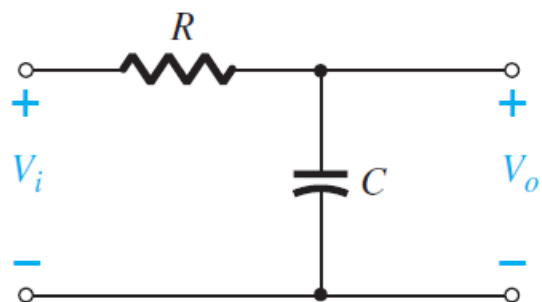
$$R_e = R_E \parallel \left(\frac{R_S \parallel R_1 \parallel R_2}{\beta} + r_e \right)$$



Resposta em Frequência

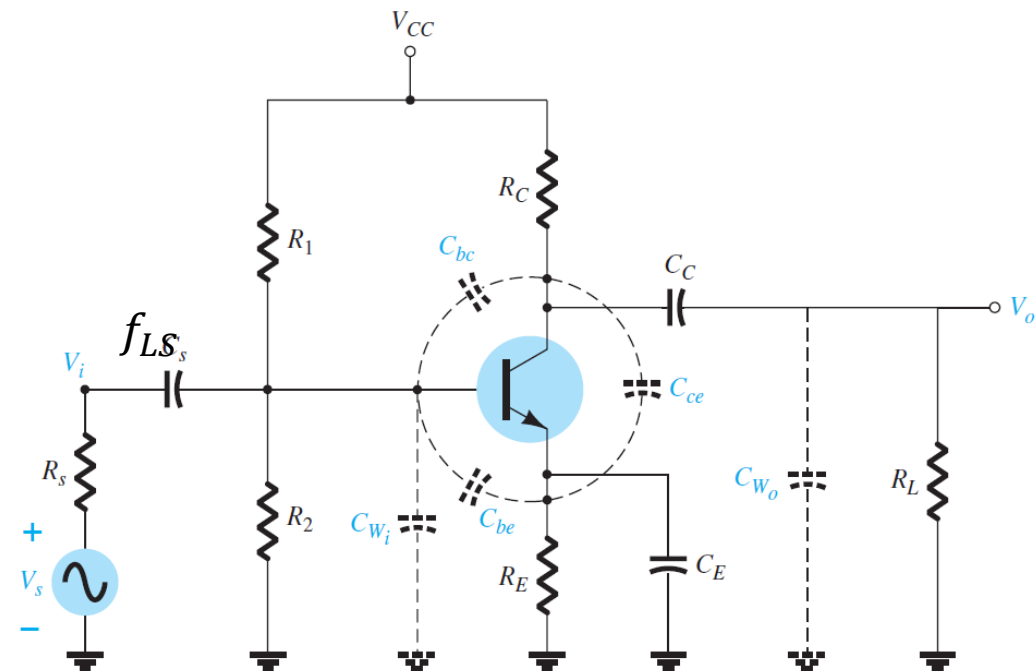
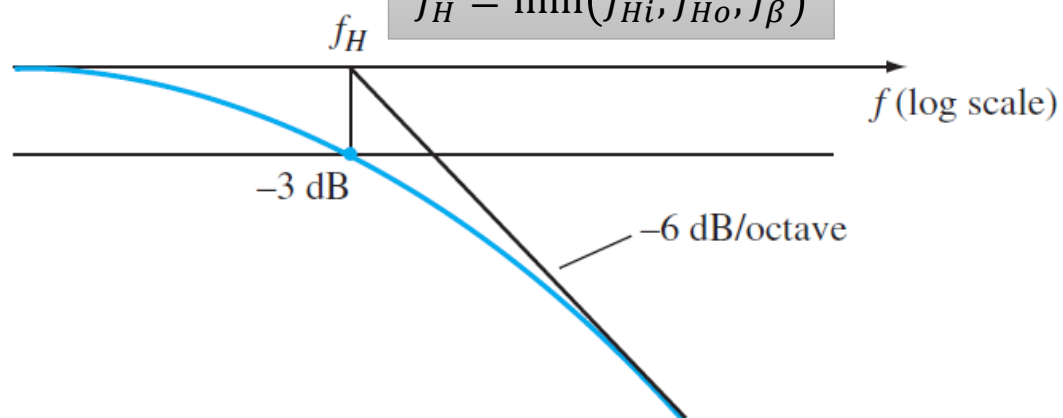
Resposta em altas frequências.

Filtro Passa-Baixas



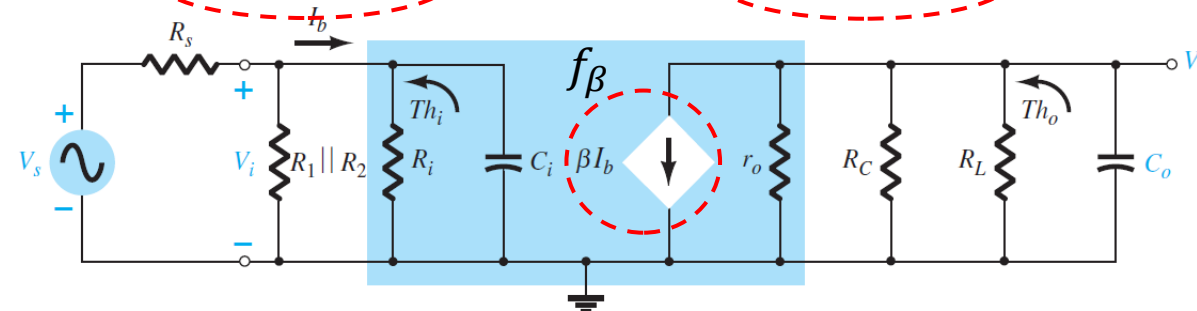
$$f_H = \frac{1}{2\pi RC}$$

$$f_H = \min(f_{Hi}, f_{Ho}, f_\beta)$$

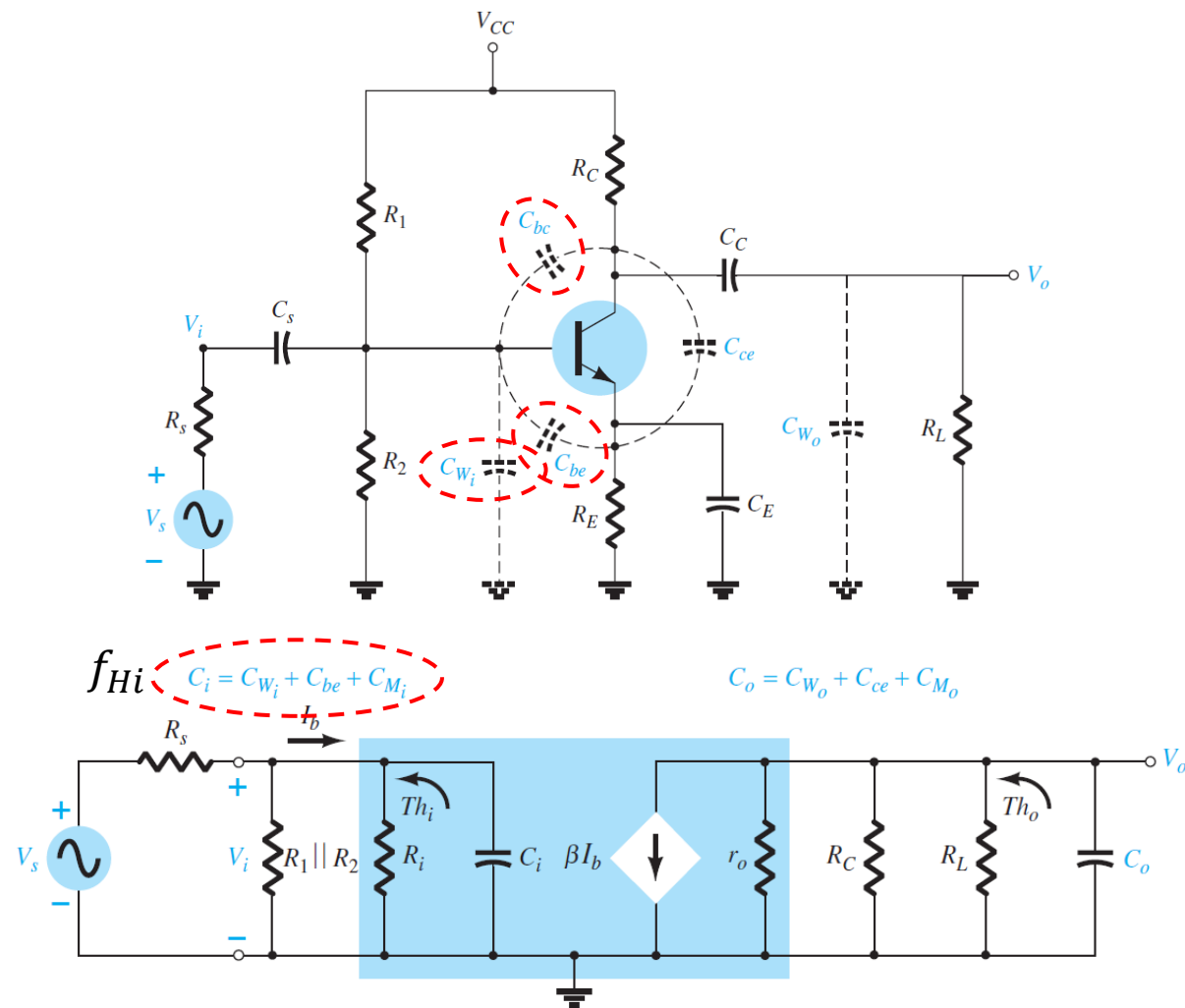


$$f_{Hi} \quad C_i = C_{wi} + C_{be} + C_{Mi}$$

$$f_{Ho} \quad C_o = C_{wo} + C_{ce} + C_{Mo}$$



Resposta em altas frequências.

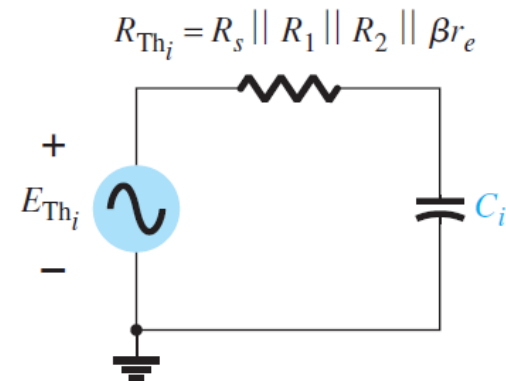


Efeito da malha de entrada

$$f_{Hi} = \frac{1}{2\pi R_{Thi} C_i}$$

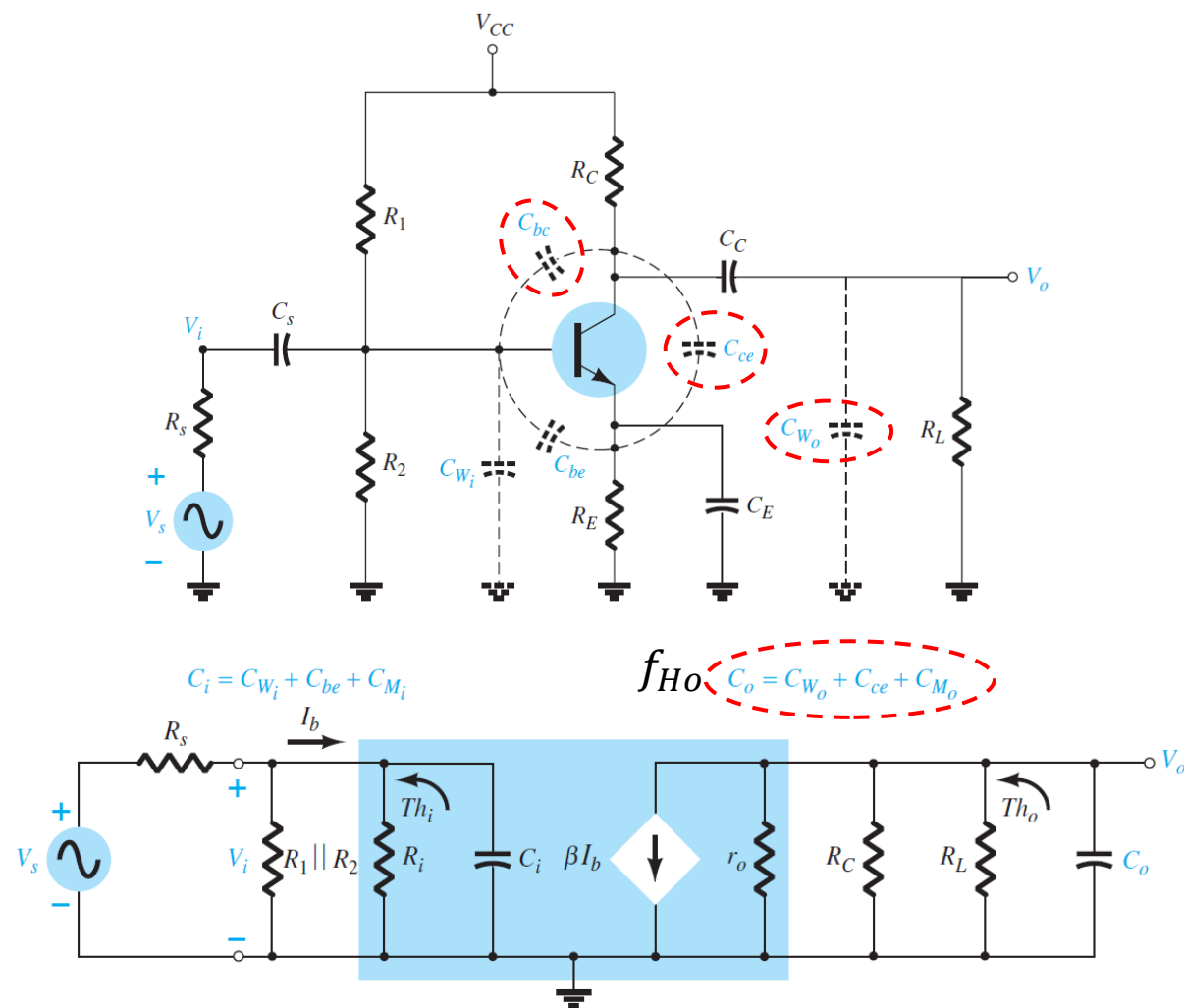
$$R_{Thi} = R_s \parallel R_1 \parallel R_2 \parallel \beta r_e$$

$$C_i = C_{Wi} + C_{be} + C_{Mi} = C_{Wi} + C_{be} + (1 - A_{vL})C_{bc}$$



Resposta em Frequência

Resposta em altas frequências.

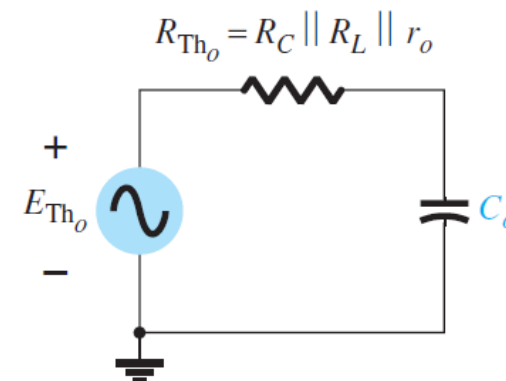


Efeito da malha de saída

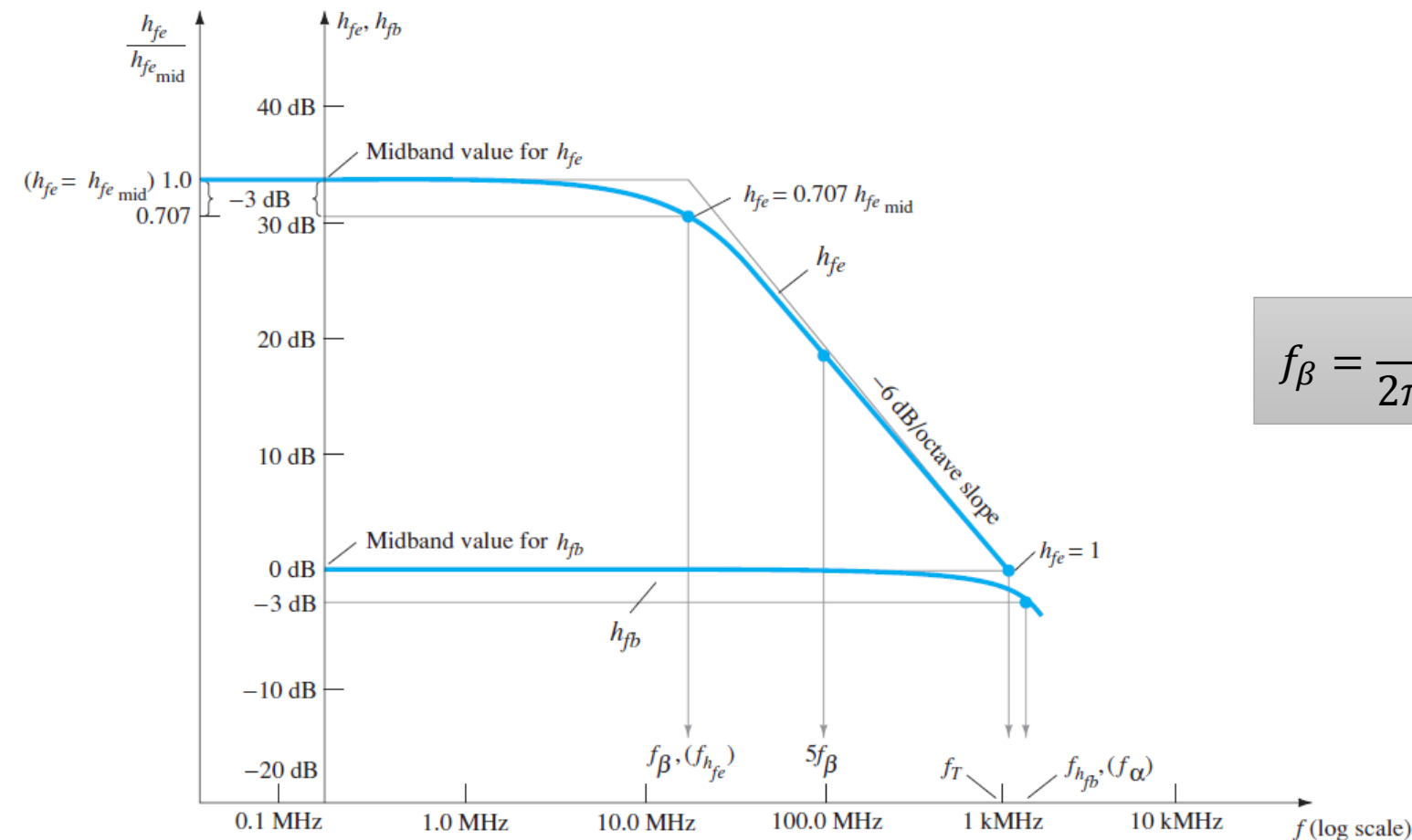
$$f_{Ho} = \frac{1}{2\pi R_{Tho} C_o}$$

$$R_{Tho} = R_C \parallel R_L \parallel r_o$$

$$C_o = C_{wo} + C_{ce} + C_{Mo} = C_{wo} + C_{ce} + \left(1 - \frac{1}{A_{vL}}\right) C_{bc}$$



Resposta em altas frequências.



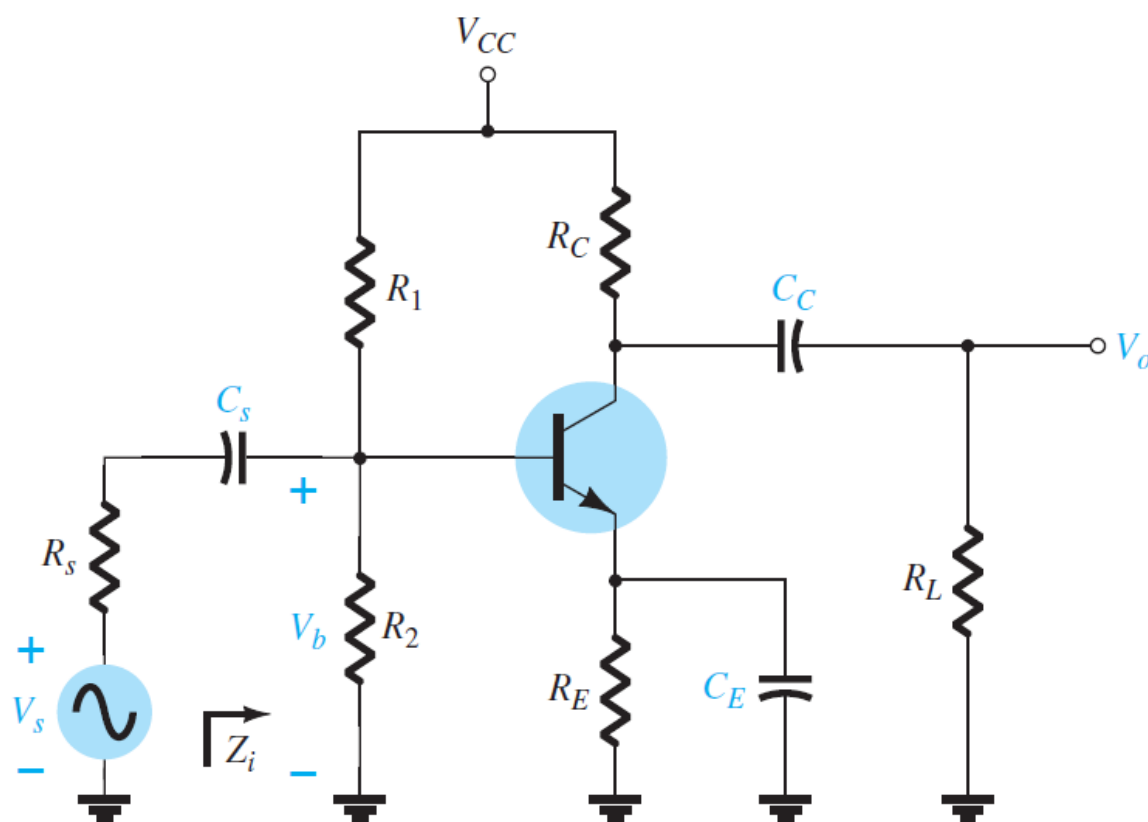
Efeito de β

$$f_{\beta} = \frac{1}{2\pi\beta r_e (C_{be} + C_{bc})} \quad \text{ou} \quad f_{\beta} = \frac{1}{2\pi r_{\pi} (C_{\pi} + C_u)}$$

$$r_{\pi} = \beta r_e = \frac{h_{fe}}{g_m}$$

Resposta em Frequência

Exemplo: Determinar o ganho com carga A_{v_L} , o ganho com carga e resistência de entrada A_{v_S} e as frequências de corte do circuito abaixo, considerando os seguintes parâmetros:



$$C_S = 10 \mu F$$

$$R_S = 1 k\Omega$$

$$R_E = 2 k\Omega$$

$$r_o = \infty \Omega$$

$$C_{be} = 36 \text{ pF}$$

$$C_E = 20 \mu F$$

$$R_1 = 40 k\Omega$$

$$R_C = 4 k\Omega$$

$$\beta = 100$$

$$C_{bc} = 4 \text{ pF}$$

$$C_{Wi} = 6 \text{ pF}$$

$$C_C = 1 \mu F$$

$$R_2 = 10 k\Omega$$

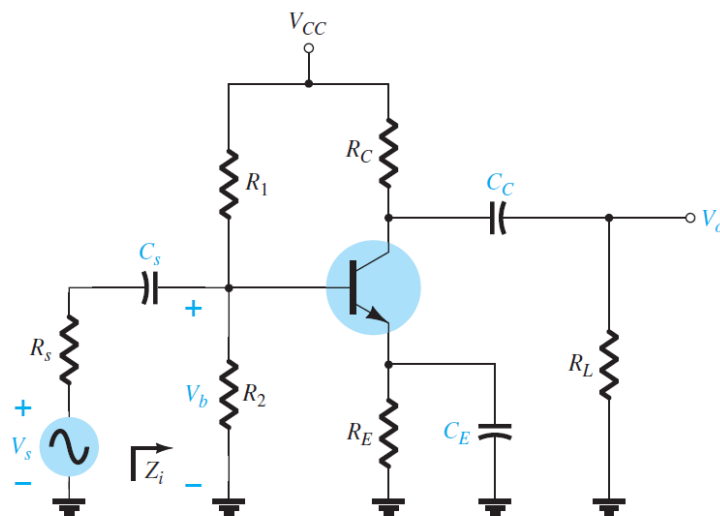
$$R_L = 2,2 k\Omega$$

$$V_{CC} = 20 V$$

$$C_{ce} = 1 \text{ pF}$$

$$C_{Wo} = 8 \text{ pF}$$

Exemplo: Determinar o ganho com carga A_{v_L} , o ganho com carga e resistência de entrada A_{v_S} e as frequências de corte do circuito abaixo, considerando os seguintes parâmetros:



$$C_S = 10 \mu F \quad C_E = 20 \mu F \quad C_C = 1 \mu F$$

$$R_S = 1 k\Omega \quad R_1 = 40 k\Omega \quad R_L = 2,2 k\Omega$$

$$R_E = 2 k\Omega \quad R_C = 4 k\Omega \quad R_2 = 10 k\Omega$$

$$r_o = \infty \Omega \quad \beta = 100 \quad V_{CC} = 20 V$$

$$C_{be} = 36 \text{ pF} \quad C_{bc} = 4 \text{ pF} \quad C_{ce} = 1 \text{ pF}$$

$$C_{Wi} = 6 \text{ pF} \quad C_{Wo} = 8 \text{ pF}$$

1 – Obter os parâmetros do ponto de operação DC do circuito.

$$\beta R_E = (100)(2 k\Omega) = 200 k\Omega \gg 10 R_2 = 100 k\Omega$$

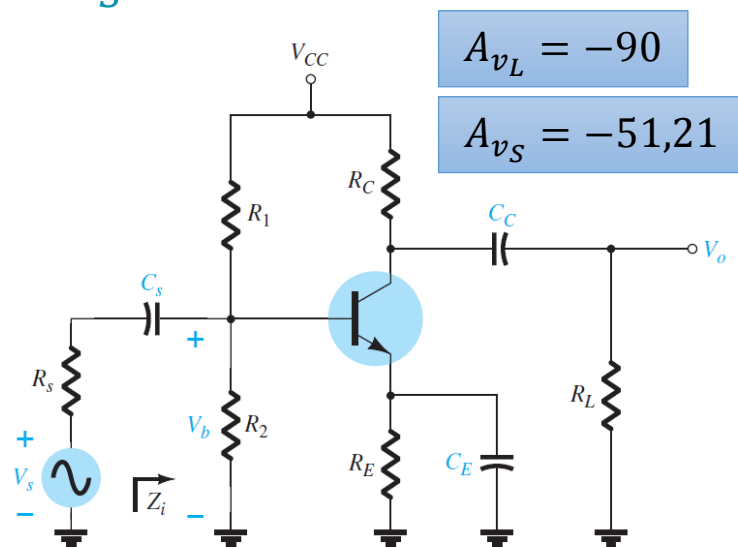
Análise Aproximada

$$V_B \cong \frac{R_2 V_{CC}}{R_2 + R_1} = \frac{10 k\Omega (20 V)}{10 k\Omega + 40 k\Omega} = \frac{200 V}{50} = 4 V$$

$$I_E = \frac{V_E}{R_E} = \frac{4 V - 0.7 V}{2 k\Omega} = \frac{3.3 V}{2 k\Omega} = 1.65 \text{ mA}$$

Resposta em Frequência

Exemplo: Determinar o ganho com carga A_{v_L} , o ganho com carga e resistência de entrada A_{v_s} e as frequências de corte do circuito abaixo, considerando os seguintes parâmetros:



$$A_{v_L} = -90$$

$$A_{v_s} = -51,21$$

$$V_B = 4 \text{ V}$$

$$I_E = 1,65 \text{ mA}$$

2 – Calcular os parâmetros do modelo

$$r_e = \frac{26 \text{ mV}}{1.65 \text{ mA}} \cong \mathbf{15.76 \Omega}$$

$$\beta r_e = 100(15.76 \Omega) = 1576 \Omega = \mathbf{1.576 \text{ k}\Omega}$$

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = \frac{-R_C \parallel R_L}{r_e} = -\frac{(4 \text{ k}\Omega) \parallel (2.2 \text{ k}\Omega)}{15.76 \Omega} \cong -90$$

$$R_i = R_1 \parallel R_2 \parallel \beta r_e = 40 \text{ k}\Omega \parallel 10 \text{ k}\Omega \parallel 1.576 \text{ k}\Omega \cong 1.32 \text{ k}\Omega$$

$$\frac{V_b}{V_s} = \frac{R_i}{R_i + R_s} = \frac{1.32 \text{ k}\Omega}{1.32 \text{ k}\Omega + 1 \text{ k}\Omega} = 0.569$$

$$A_{v_s} = \frac{V_o}{V_s} = \frac{V_o}{V_i} \cdot \frac{V_b}{V_s} = (-90)(0.569) = \mathbf{-51.21}$$

$$C_S = 10 \mu\text{F} \quad C_E = 20 \mu\text{F} \quad C_C = 1 \mu\text{F}$$

$$R_S = 1 \text{ k}\Omega \quad R_1 = 40 \text{ k}\Omega \quad R_L = 2,2 \text{ k}\Omega$$

$$R_E = 2 \text{ k}\Omega \quad R_C = 4 \text{ k}\Omega \quad R_2 = 10 \text{ k}\Omega$$

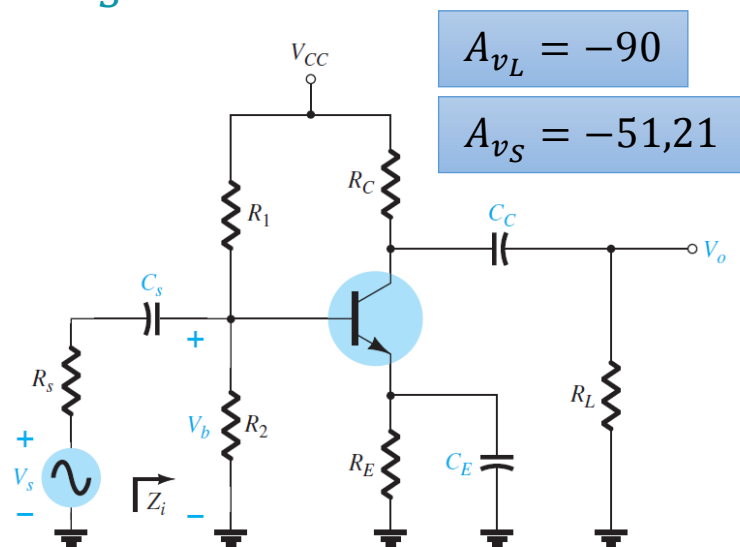
$$r_o = \infty \Omega \quad \beta = 100 \quad V_{CC} = 20 \text{ V}$$

$$C_{be} = 36 \text{ pF} \quad C_{bc} = 4 \text{ pF} \quad C_{ce} = 1 \text{ pF}$$

$$C_{Wi} = 6 \text{ pF} \quad C_{Wo} = 8 \text{ pF}$$

Resposta em Frequência

Exemplo: Determinar o ganho com carga A_{v_L} , o ganho com carga e resistência de entrada A_{v_S} e as frequências de corte do circuito abaixo, considerando os seguintes parâmetros:



$$A_{v_L} = -90$$

$$A_{v_S} = -51,21$$

$$V_B = 4 \text{ V}$$

$$I_E = 1,65 \text{ mA}$$

$$r_e = 15,76 \Omega$$

$$\beta r_e = 1576 \Omega$$

$$R_i = 1,32 \text{ k}\Omega$$

3 – Frequências de corte inferiores

$$f_{L_S} = \frac{1}{2\pi(R_S + R_i)C_S} = \frac{1}{(6.28)(1 \text{ k}\Omega + 1.32 \text{ k}\Omega)(10 \mu\text{F})} \cong 6.86 \text{ Hz}$$

$$f_{L_C} = \frac{1}{2\pi(R_C + R_L)C_C} = \frac{1}{(6.28)(4 \text{ k}\Omega + 2.2 \text{ k}\Omega)(1 \mu\text{F})} \cong 25.68 \text{ Hz}$$

$$C_S = 10 \mu\text{F} \quad C_E = 20 \mu\text{F} \quad C_C = 1 \mu\text{F}$$

$$R_S = 1 \text{ k}\Omega \quad R_1 = 40 \text{ k}\Omega \quad R_L = 2,2 \text{ k}\Omega$$

$$R_E = 2 \text{ k}\Omega \quad R_C = 4 \text{ k}\Omega \quad R_2 = 10 \text{ k}\Omega$$

$$r_o = \infty \Omega \quad \beta = 100 \quad V_{CC} = 20 \text{ V}$$

$$C_{be} = 36 \text{ pF} \quad C_{bc} = 4 \text{ pF} \quad C_{ce} = 1 \text{ pF}$$

$$C_{Wi} = 6 \text{ pF} \quad C_{Wo} = 8 \text{ pF}$$

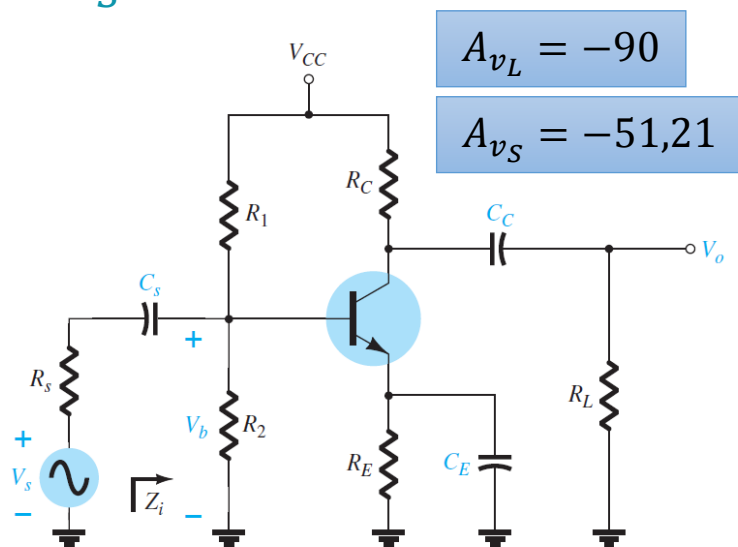
$$R'_s = R_s \parallel R_1 \parallel R_2 = 1 \text{ k}\Omega \parallel 40 \text{ k}\Omega \parallel 10 \text{ k}\Omega \cong 0.889 \text{ k}\Omega$$

$$R_e = R_E \parallel \left(\frac{R'_s}{\beta} + r_e \right) = 2 \text{ k}\Omega \parallel \left(\frac{0.889 \text{ k}\Omega}{100} + 15.76 \Omega \right) \cong 24.35 \Omega$$

$$f_{L_E} = \frac{1}{2\pi R_e C_E} = \frac{1}{(6.28)(24.35 \Omega)(20 \mu\text{F})} = \frac{10^6}{3058.36} \cong 327 \text{ Hz}$$

Resposta em Frequência

Exemplo: Determinar o ganho com carga A_{v_L} , o ganho com carga e resistência de entrada A_{v_S} e as frequências de corte do circuito abaixo, considerando os seguintes parâmetros:



$$A_{v_L} = -90$$

$$A_{v_S} = -51,21$$

$$V_B = 4 \text{ V}$$

$$I_E = 1,65 \text{ mA}$$

$$r_e = 15,76 \Omega$$

$$\beta r_e = 1576 \Omega$$

$$R_i = 1,32 \text{ k}\Omega$$

3 – Frequências de corte inferiores

$$f_{L_S} = 6,86 \text{ Hz}$$

$$f_{L_C} = 25,68 \text{ Hz}$$

$$f_{L_E} = 327 \text{ Hz}$$

$$f_L = \max(f_{L_S}, f_{L_C}, f_{L_E})$$

$$f_L = f_{L_E} = 327 \text{ Hz}$$

$$C_S = 10 \mu\text{F} \quad C_E = 20 \mu\text{F} \quad C_C = 1 \mu\text{F}$$

$$R_S = 1 \text{ k}\Omega \quad R_1 = 40 \text{ k}\Omega \quad R_L = 2,2 \text{ k}\Omega$$

$$R_E = 2 \text{ k}\Omega \quad R_C = 4 \text{ k}\Omega \quad R_2 = 10 \text{ k}\Omega$$

$$r_o = \infty \Omega \quad \beta = 100 \quad V_{CC} = 20 \text{ V}$$

$$C_{be} = 36 \text{ pF} \quad C_{bc} = 4 \text{ pF} \quad C_{ce} = 1 \text{ pF}$$

$$C_{Wi} = 6 \text{ pF} \quad C_{Wo} = 8 \text{ pF}$$

Resposta em Frequência

Exemplo: Determinar o ganho com carga A_{v_L} , o ganho com carga e resistência de entrada A_{v_S} e as frequências de corte do circuito abaixo, considerando os seguintes parâmetros:

$$f_L = 327 \text{ Hz}$$

$$A_{v_L} = -90$$

$$A_{v_S} = -51,21$$

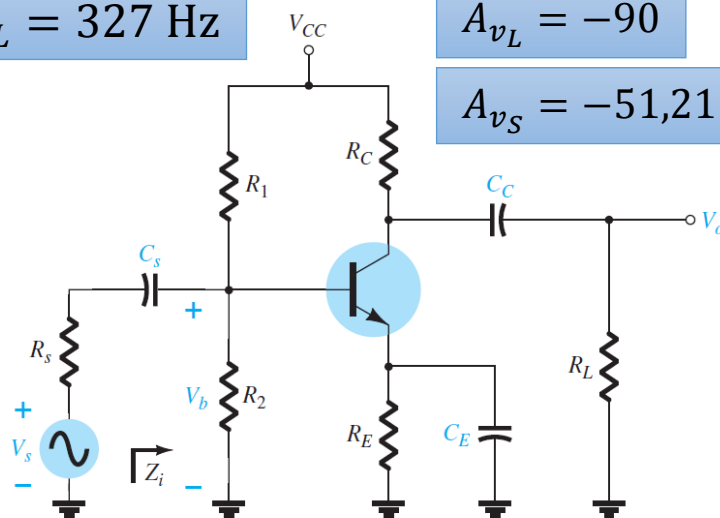
$$V_B = 4 \text{ V}$$

$$I_E = 1,65 \text{ mA}$$

$$r_e = 15,76 \Omega$$

$$\beta r_e = 1576 \Omega$$

$$R_i = 1,32 \text{ k}\Omega$$



$$C_S = 10 \mu\text{F} \quad C_E = 20 \mu\text{F} \quad C_C = 1 \mu\text{F}$$

$$R_S = 1 \text{ k}\Omega \quad R_1 = 40 \text{ k}\Omega \quad R_L = 2,2 \text{ k}\Omega$$

$$R_E = 2 \text{ k}\Omega \quad R_C = 4 \text{ k}\Omega \quad R_2 = 10 \text{ k}\Omega$$

$$r_o = \infty \Omega \quad \beta = 100 \quad V_{CC} = 20 \text{ V}$$

$$C_{be} = 36 \text{ pF} \quad C_{bc} = 4 \text{ pF} \quad C_{ce} = 1 \text{ pF}$$

$$C_{Wi} = 6 \text{ pF} \quad C_{Wo} = 8 \text{ pF}$$

4 – Frequências de corte superiores

$$R_{Th_i} = R_S \parallel R_1 \parallel R_2 \parallel \beta r_e = 1 \text{ k}\Omega \parallel 40 \text{ k}\Omega \parallel 10 \text{ k}\Omega \parallel 1.576 \text{ k}\Omega \cong 0.57 \text{ k}\Omega$$

$$C_i = C_{Wi} + C_{be} + (1 - A_v)C_{bc} = 6 \text{ pF} + 36 \text{ pF} + [1 - (-90)]4 \text{ pF} = 406 \text{ pF}$$

$$f_{H_i} = \frac{1}{2\pi R_{Th_i} C_i} = \frac{1}{2\pi (0.57 \text{ k}\Omega)(406 \text{ pF})} = \mathbf{687.73 \text{ kHz}}$$

$$R_{Th_o} = R_C \parallel R_L = 4 \text{ k}\Omega \parallel 2.2 \text{ k}\Omega = 1.419 \text{ k}\Omega$$

$$C_o = C_{Wo} + C_{ce} + C_{M_o} = 8 \text{ pF} + 1 \text{ pF} + \left(1 - \frac{1}{-90}\right)4 \text{ pF} = 13.04 \text{ pF}$$

$$f_{H_o} = \frac{1}{2\pi R_{Th_o} C_o} = \frac{1}{2\pi (1.419 \text{ k}\Omega)(13.04 \text{ pF})} = \mathbf{8.6 \text{ MHz}}$$

Resposta em Frequência

Exemplo: Determinar o ganho com carga A_{v_L} , o ganho com carga e resistência de entrada A_{v_S} e as frequências de corte do circuito abaixo, considerando os seguintes parâmetros:

$$f_L = 327 \text{ Hz}$$

$$A_{v_L} = -90$$

$$A_{v_S} = -51,21$$

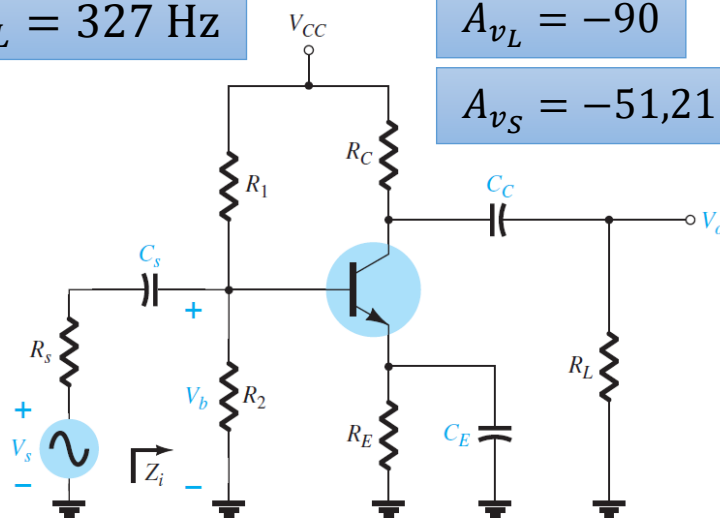
$$V_B = 4 \text{ V}$$

$$I_E = 1,65 \text{ mA}$$

$$r_e = 15,76 \Omega$$

$$\beta r_e = 1576 \Omega$$

$$R_i = 1,32 \text{ k}\Omega$$



$$C_S = 10 \mu\text{F} \quad C_E = 20 \mu\text{F} \quad C_C = 1 \mu\text{F}$$

$$R_S = 1 \text{ k}\Omega \quad R_1 = 40 \text{ k}\Omega \quad R_L = 2,2 \text{ k}\Omega$$

$$R_E = 2 \text{ k}\Omega \quad R_C = 4 \text{ k}\Omega \quad R_2 = 10 \text{ k}\Omega$$

$$r_o = \infty \Omega \quad \beta = 100 \quad V_{CC} = 20 \text{ V}$$

$$C_{be} = 36 \text{ pF} \quad C_{bc} = 4 \text{ pF} \quad C_{ce} = 1 \text{ pF}$$

$$C_{Wi} = 6 \text{ pF} \quad C_{Wo} = 8 \text{ pF}$$

4 – Frequências de corte superiores

$$f_{Hi} = 687,73 \text{ kHz}$$

$$f_{Hi} = 8,6 \text{ MHz}$$

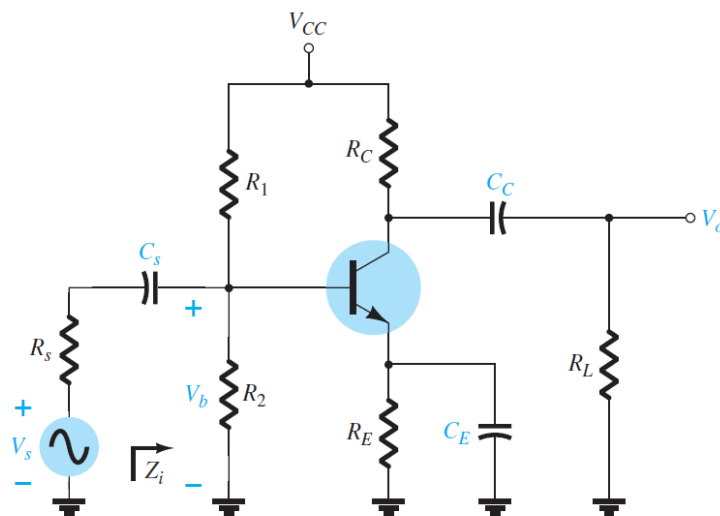
$$f_\beta = \frac{1}{2\pi h_{fe_{mid}} r_e (C_{be} + C_{bc})} = \frac{1}{2\pi (100) (15.76 \Omega) (36 \text{ pF} + 4 \text{ pF})} = 2.52 \text{ MHz}$$

$$f_H = \min(f_{Hi}, f_{Ho}, f_\beta)$$

$$f_H = f_{Hi} = 687,73 \text{ kHz}$$

Resposta em Frequência

Exemplo: Determinar o ganho com carga A_{v_L} , o ganho com carga e resistência de entrada A_{v_S} e as frequências de corte do circuito abaixo, considerando os seguintes parâmetros:



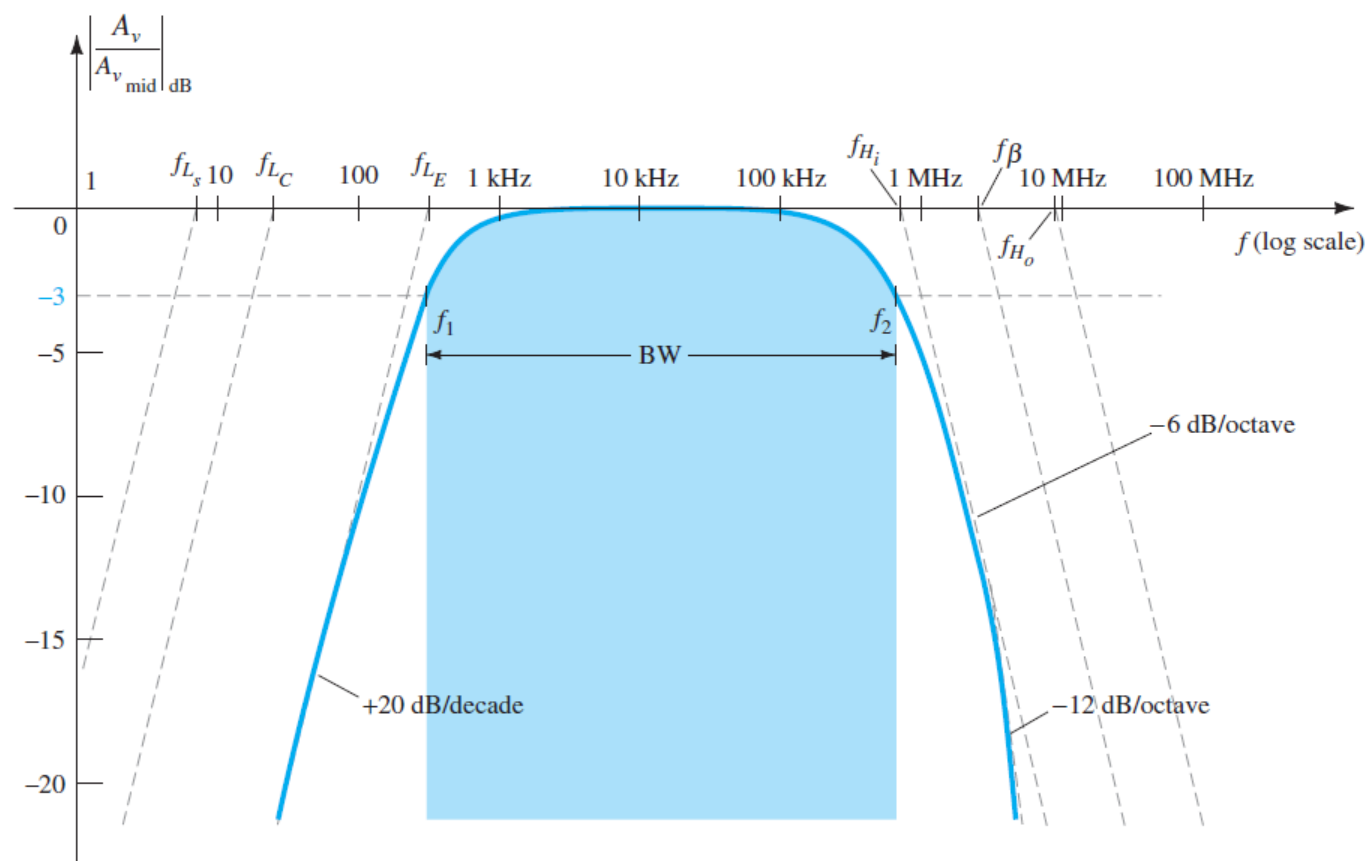
$C_S = 10 \mu F$	$C_E = 20 \mu F$	$C_C = 1 \mu F$
$R_S = 1 k\Omega$	$R_1 = 40 k\Omega$	$R_L = 2,2 k\Omega$
$R_E = 2 k\Omega$	$R_C = 4 k\Omega$	$R_2 = 10 k\Omega$
$r_o = \infty \Omega$	$\beta = 100$	$V_{CC} = 20 V$
$C_{be} = 36 pF$	$C_{bc} = 4 pF$	$C_{ce} = 1 pF$
$C_{Wi} = 6 pF$	$C_{Wo} = 8 pF$	

$$A_{v_L} = -90$$

$$A_{v_S} = -51,21$$

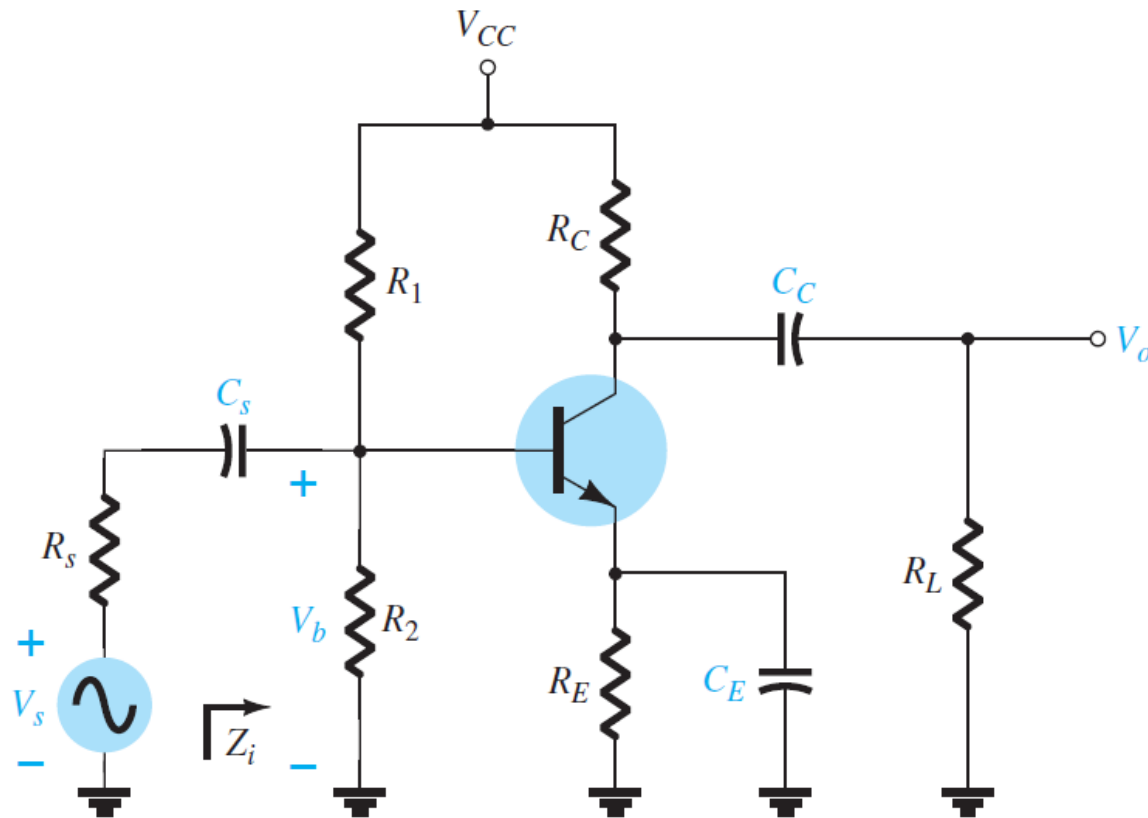
$$f_L = 327 \text{ Hz}$$

$$f_H = 687,73 \text{ kHz}$$



Exercícios

1 - Determinar o modelo r_e e o ganho com carga e resistência de entrada para o circuito abaixo, considerando os seguintes parâmetros:



$$R_S = 1 \text{ k}\Omega$$

$$R_1 = 68 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 10 \text{ k}\Omega$$

$$R_E = 1 \text{ k}\Omega$$

$$R_C = 5 \text{ k}\Omega$$

$$R_L = 2 \text{ k}\Omega$$

$$h_{oe} = 10 \text{ }\mu\text{S}$$

$$h_{fe} = 150$$

$$V_{CC} = 20 \text{ V}$$

$$r_e = 13,95 \text{ }\Omega$$

$$r_o = 100 \text{ k}\Omega$$

$$\beta r_e = 2092 \text{ }\Omega$$

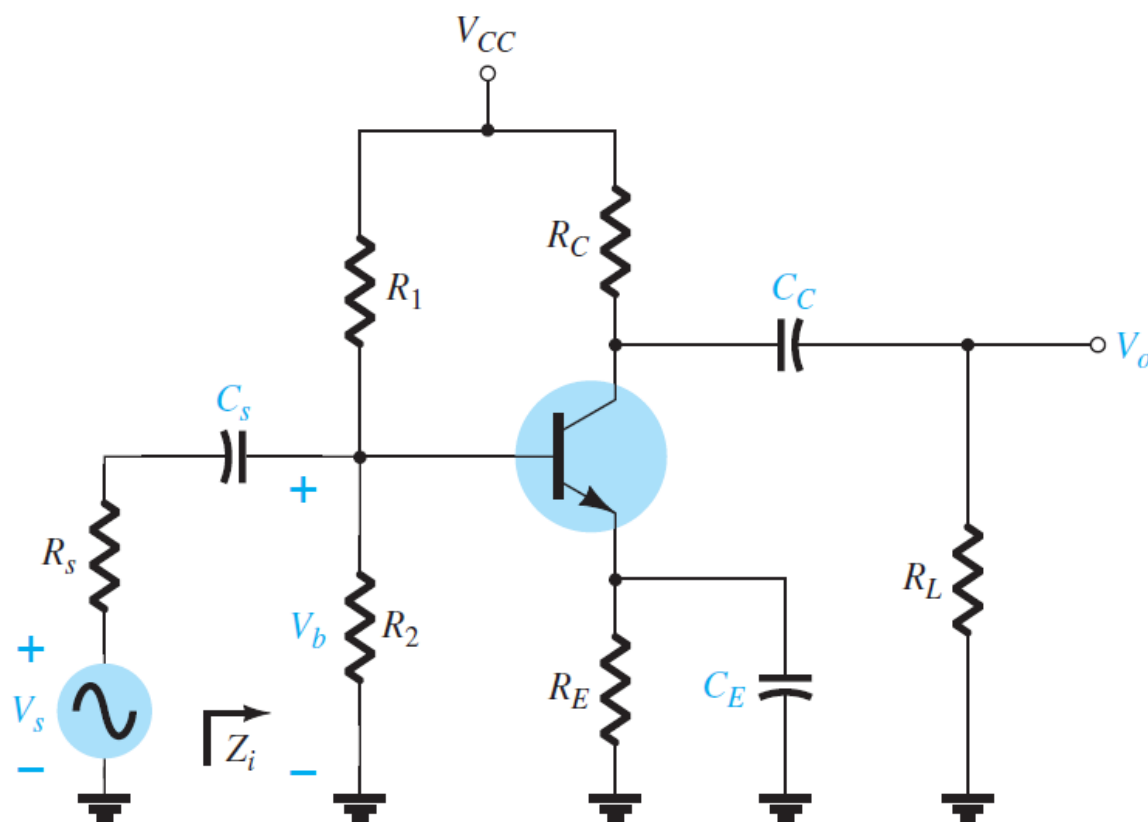
$$Z_o = 1,40 \text{ k}\Omega$$

$$Z_i = 1,69 \text{ k}\Omega$$

$$A_{v_L} = -101$$

$$A_{v_S} = -63,4$$

2 - Determinar as frequências de corte do circuito abaixo.



$$C_S = 10 \mu F$$

$$R_S = 1 k\Omega$$

$$R_E = 1 k\Omega$$

$$h_{oe} = 10 \mu S$$

$$C_{be} = 36 \text{ pF}$$

$$C_E = 20 \mu F$$

$$R_1 = 68 k\Omega$$

$$R_C = 5 k\Omega$$

$$h_{fe} = 150$$

$$C_{bc} = 4 \text{ pF}$$

$$C_{Wi} = 6 \text{ pF}$$

$$C_C = 1 \mu F$$

$$R_2 = 10 k\Omega$$

$$R_L = 2 k\Omega$$

$$V_{CC} = 20 \text{ V}$$

$$C_{ce} = 1 \text{ pF}$$

$$C_{Wo} = 8 \text{ pF}$$

$$f_L = 407 \text{ Hz}$$

$$f_H = 563,4 \text{ kHz}$$

- ❑ Boylestad, Robert L.; Nashelsky, Louis “Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos”, 6 ed., Rio de Janeiro, LTC (1998).
- ❑ Boylestad, Robert L.; Nashelsky, Louis “Electronic Devices and Circuit Theory”, 11 ed., Boston, Pearson (2013).
- ❑ C. K. Alexander, e M. N. O. Sadiku, “Fundamentos de Circuitos Elétricos”, 5 ed., Porto Alegre, AMGH (2013).