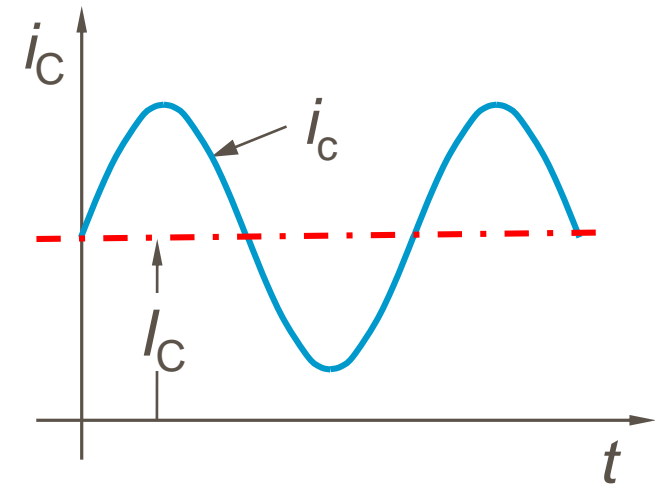


AMPLIFICADOR COM TRANSÍSTORES

■ Lembra-se da notação ...?

- Quantidades em corrente contínua (cc):
Letras maiúsculas para a variável e para o índice (I_B , I_C , V_{CE})
- Quantidades em corrente alternada (ca):
Letras minúsculas para a variável e para o índice (i_b , i_c , v_{ce})
- Quantidades totais (cc + ca):
Letras minúsculas para a variável e maiúscula para o índice (i_B , i_C , v_{CE})



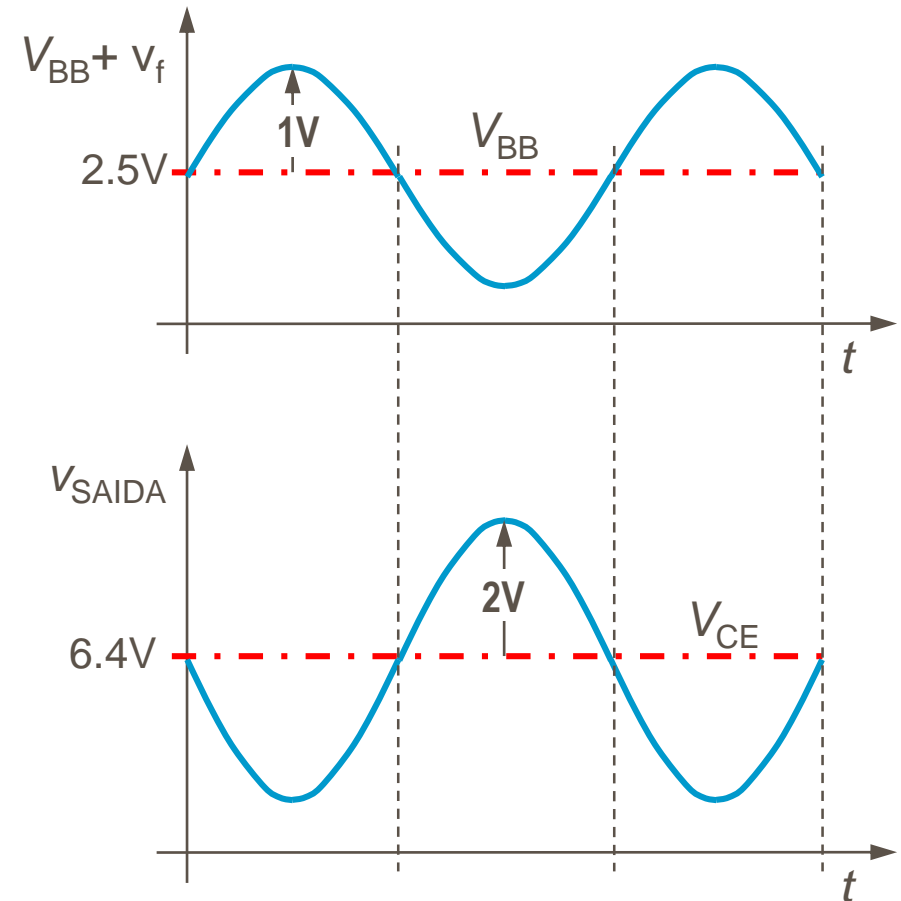
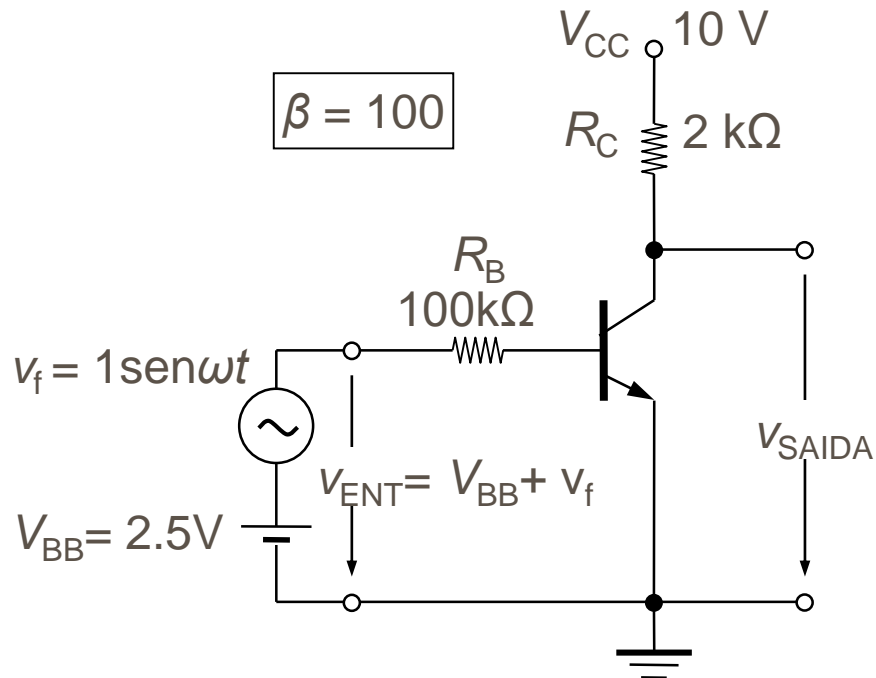
$$i_C = I_C + i_c$$

- Existem basicamente dois tipos de amplificadores: os **de pequenos sinais** e os de potência.
- **Amplificadores de pequenos sinais:**
 - Normalmente denominados de **pré-amplificadores** e a sua função é aumentar a amplitude de um sinal na ordem dos mV fornecido por uma fonte com por exemplo um microfone ou um leitor de CDs;
 - Esses amplificadores operam na região linear das curvas características e, portanto, a distorção do sinal é minimizada;
 - Estes sinais, depois de amplificados não possuem potência suficiente para fazer por exemplo uma coluna funcionar;

Os amplificadores de potência têm como finalidade ampliar o sinal fornecido pelos pré-amplificadores para por exemplo colocar uma coluna em funcionamento.

Amplificadores com Transístores

■ Introdução



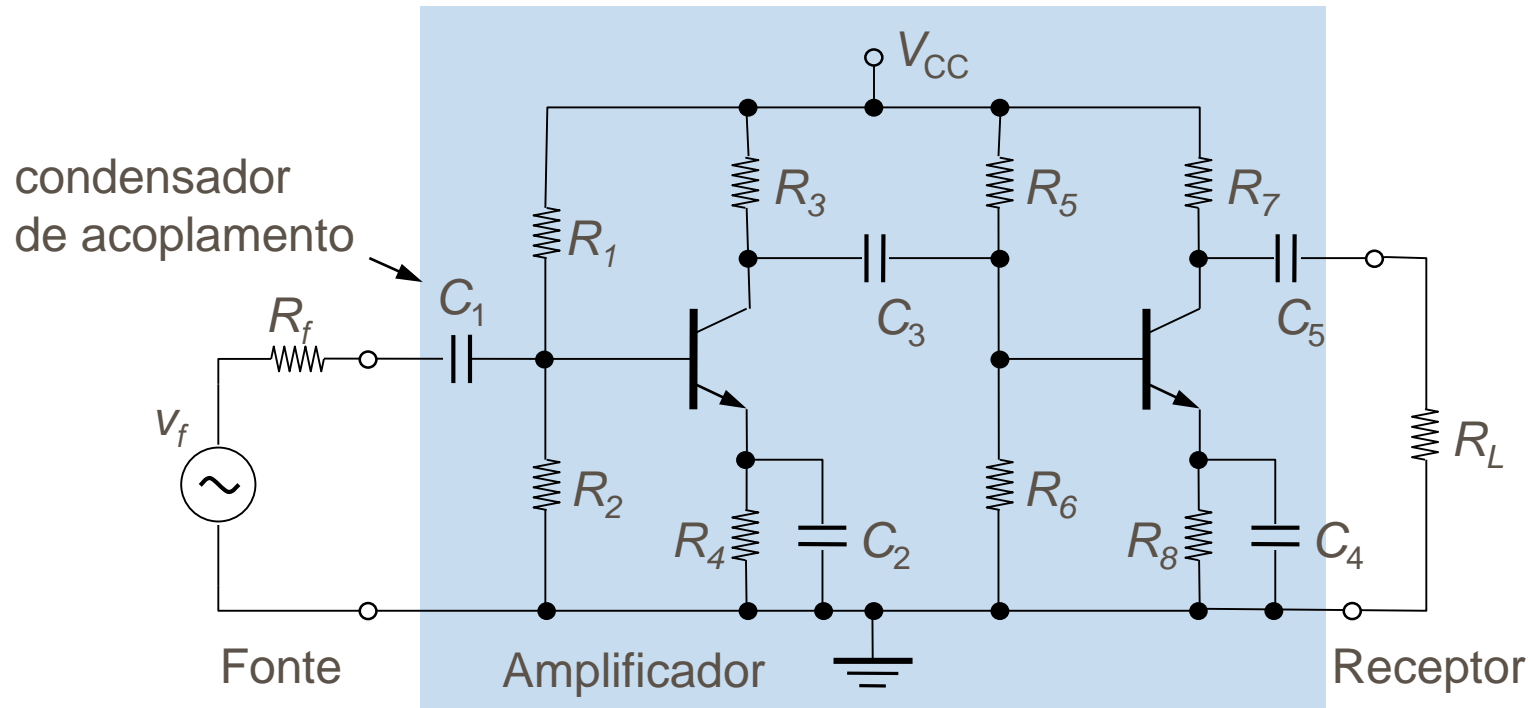
Amplificadores com Transístores

■ Tipos de Acoplamento de Sinal

- R-C
- Impedância (bobina de RF)
- Transformador
- Directo

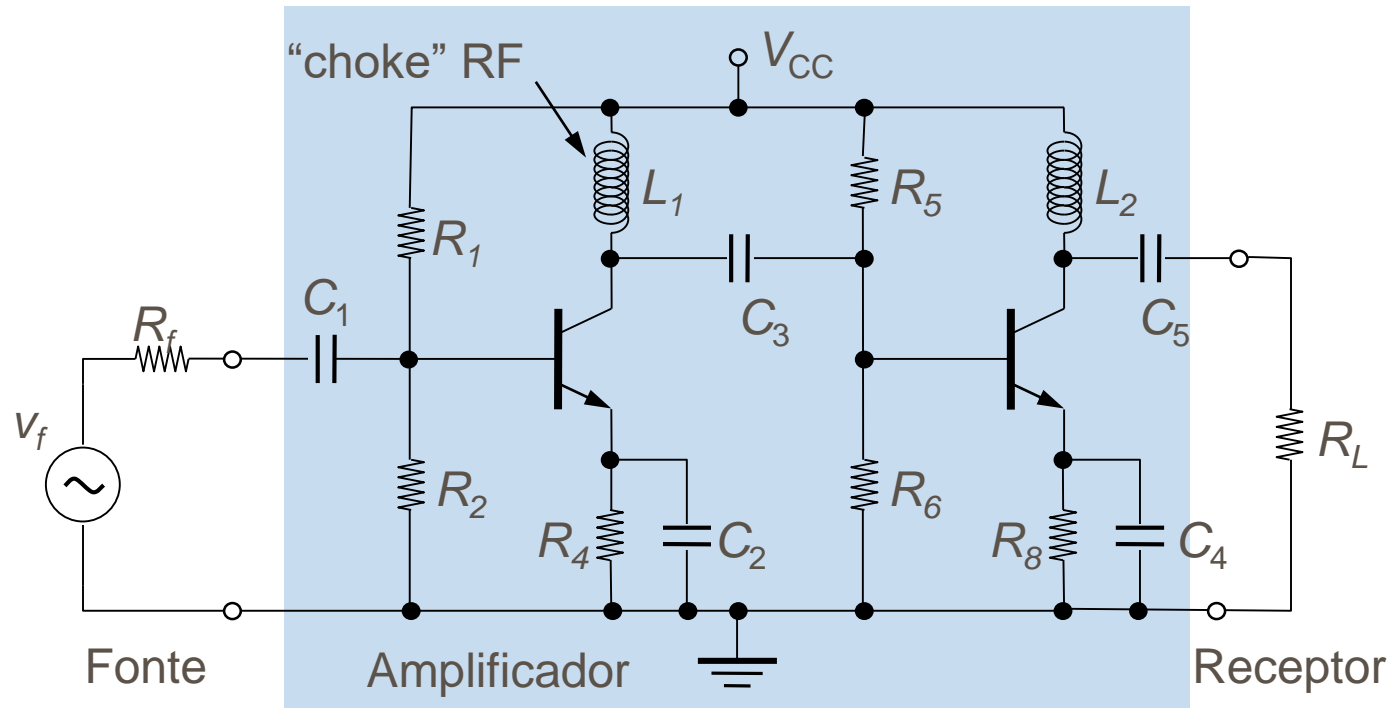
Amplificadores com Transístores

■ Acoplamento R-C (solução mais comum)

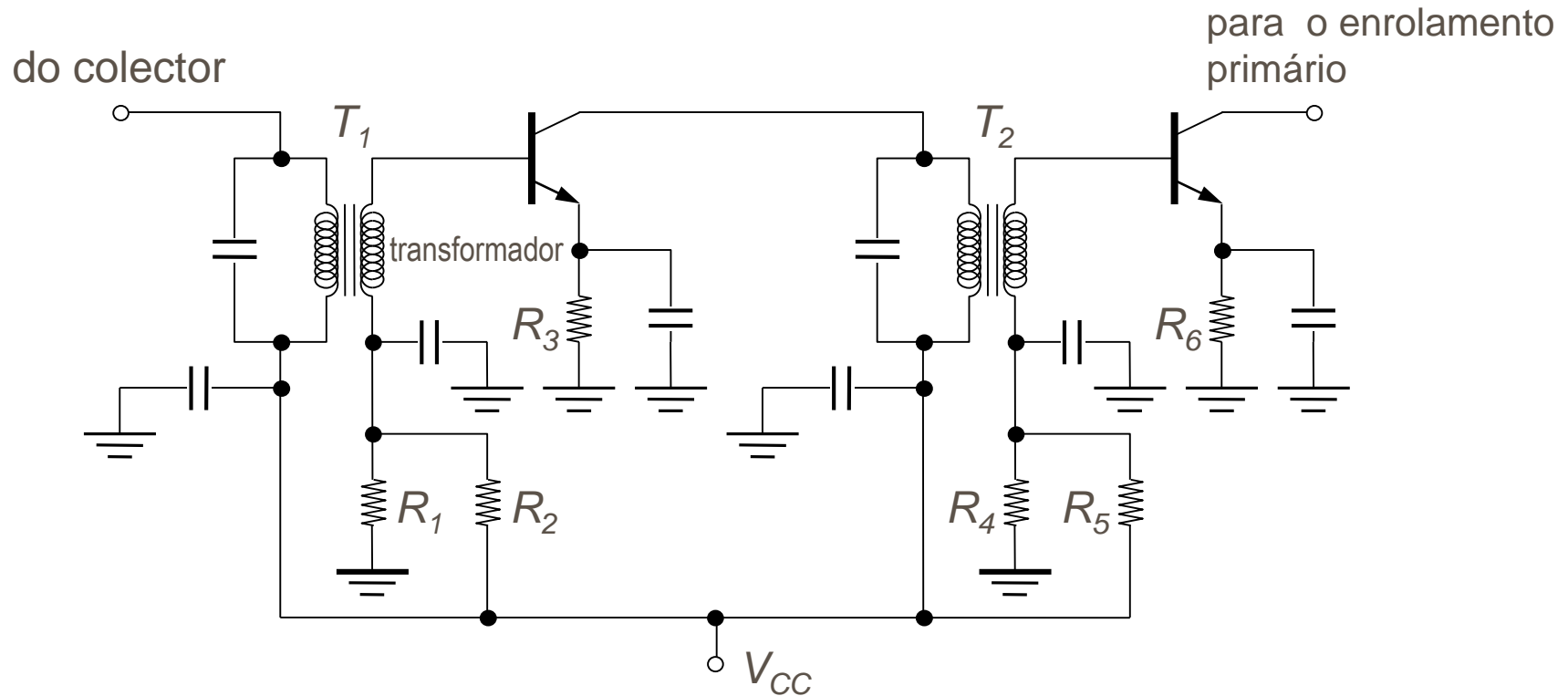


Amplificadores com Transístores

■ Acoplamento por Impedância

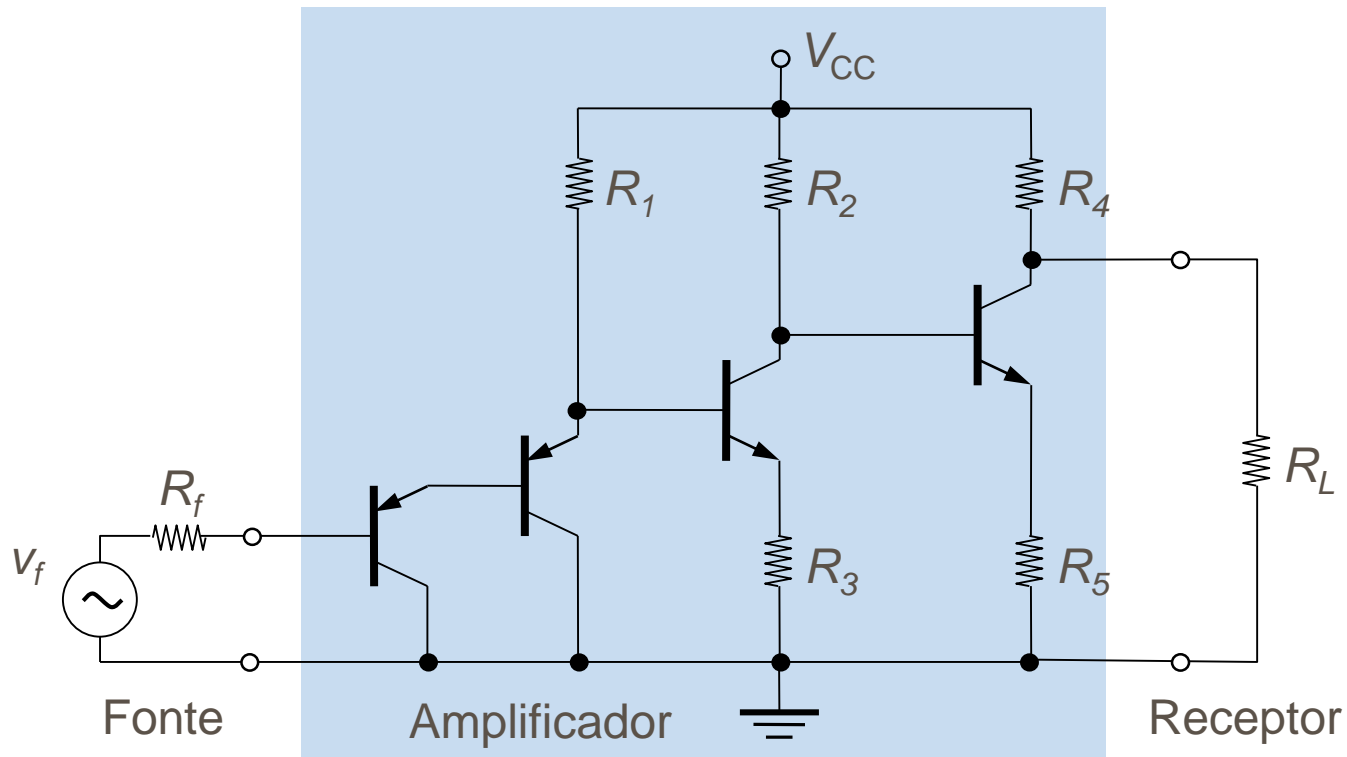


■ Acoplamento por Transformador



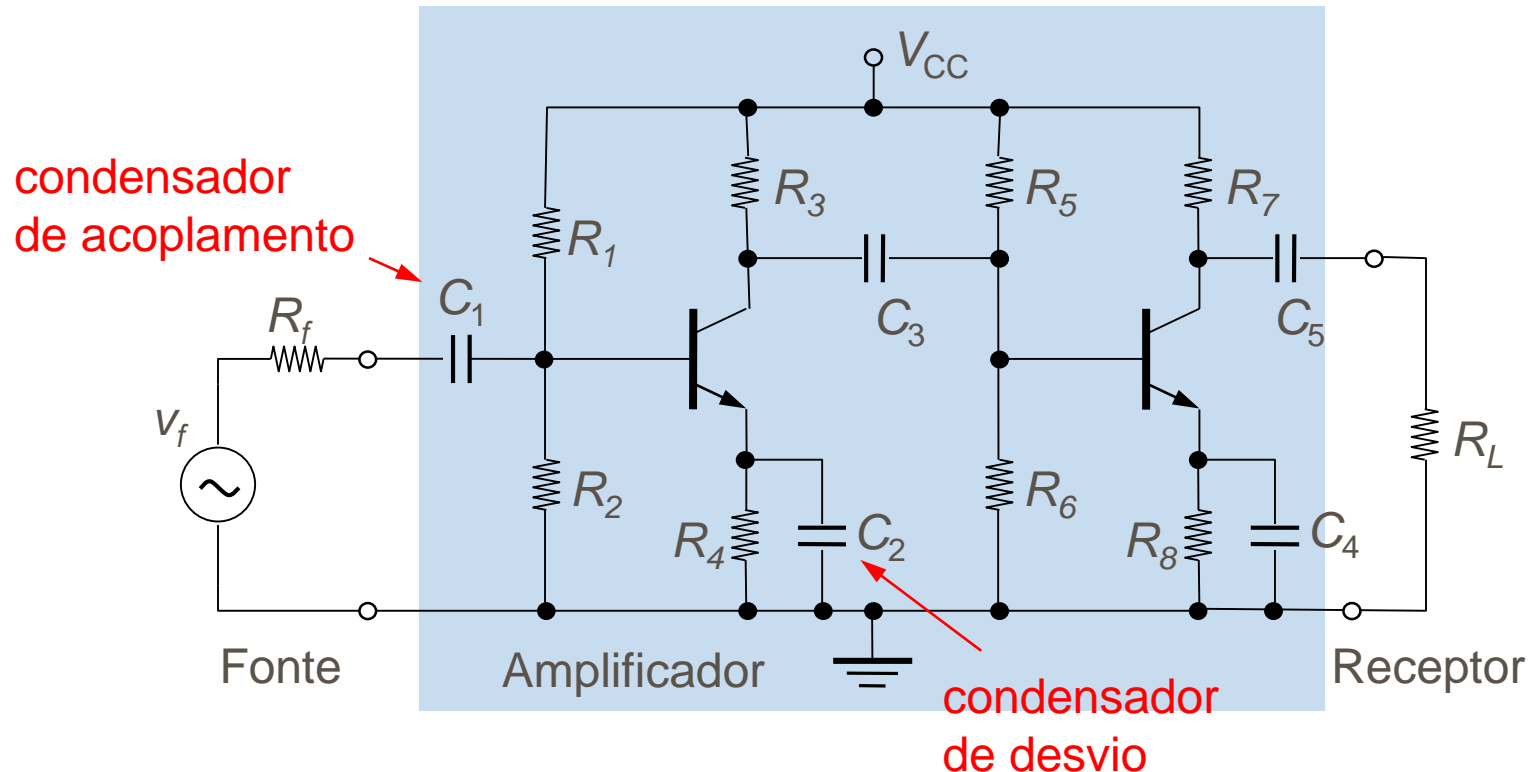
Amplificadores com Transístores

■ Acoplamento Directo

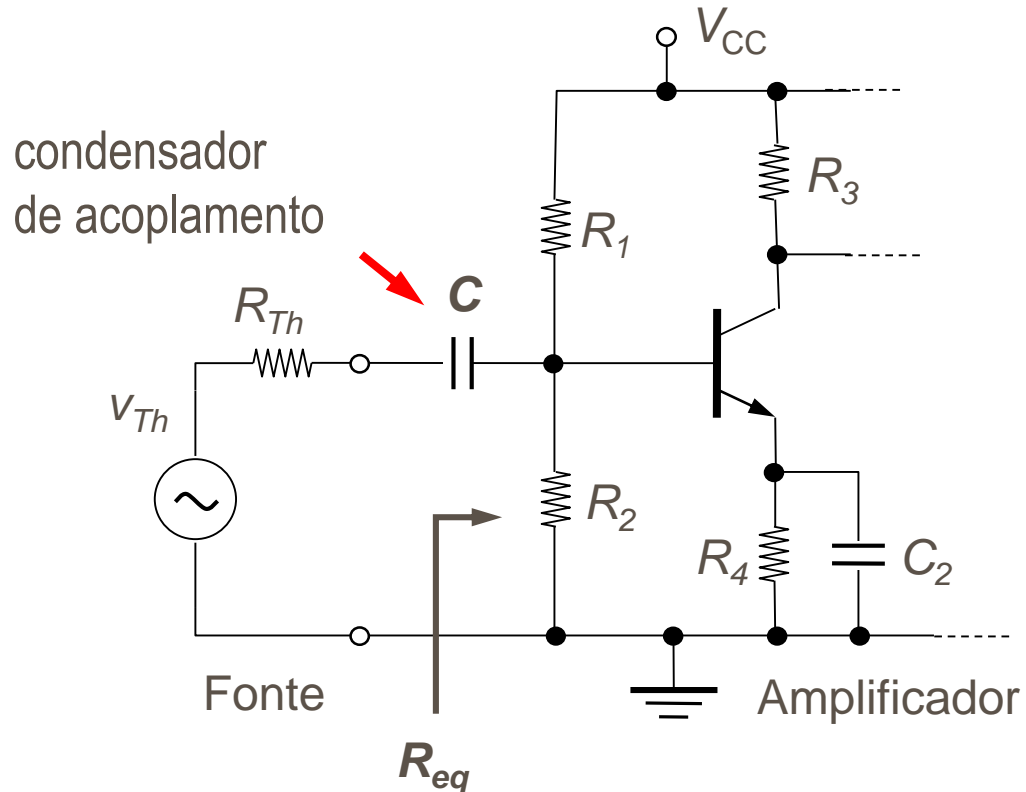


Amplificadores com Transístores

- **Acoplamento R-C:** condensadores de acoplamento e de desvio (ou derivação)

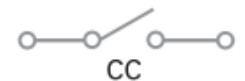
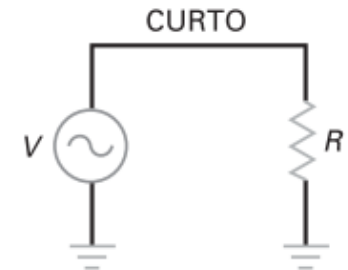
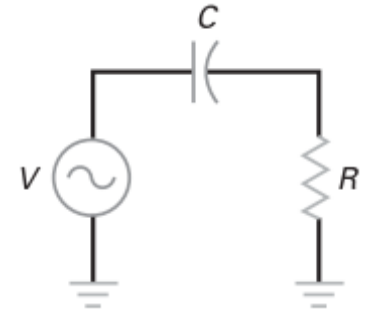


■ Condensadores de Acoplamento

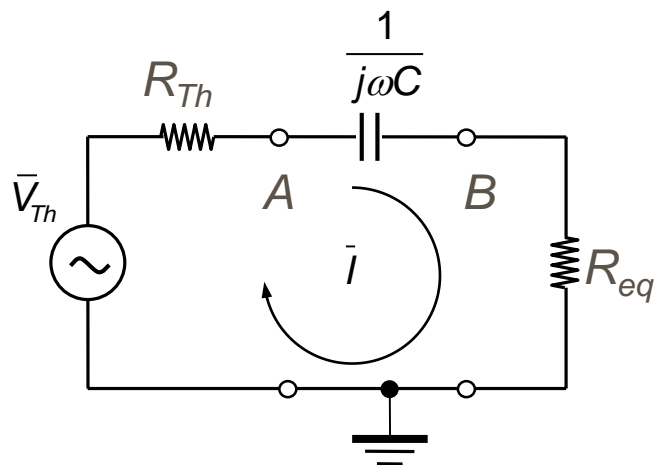


■ Condensadores de Acoplamento

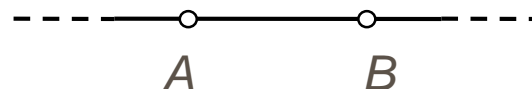
- A figura mostra uma fonte de tensão CA ligada a um condensador e a uma resistência. Como a impedância do condensador é inversamente proporcional à frequência, este efetivamente bloqueia o sinal CC e transmite o sinal CA.
- Quando a frequência for suficientemente alta, a reatância capacitiva será muito menor que a resistência. Nesse caso, quase toda a tensão CA chega à resistência.
- Quando usado desse modo, o condensador é chamado de **condensador de acoplamento** porque ele acopla ou transmite o sinal CA para a resistência.
- Para uma análise CC, o condensador é como uma chave aberta;
- Para uma análise CA, o condensador é como uma chave fechada.



■ Condensadores de Acoplamento



circuito aberto em corrente contínua



Curto circuito em corrente alternada
(para a frequência do sinal)

Com $R = R_{Th} + R_{eq}$ e $X_C = \left| \frac{1}{j\omega C} \right|$,

$$\rightarrow I = \frac{V_{Th}}{\sqrt{R^2 + X_C^2}}$$

Se $X_C \leq 0.1R \rightarrow I \geq \frac{V_{Th}}{\sqrt{R^2 + (0.1R)^2}} \approx \frac{V_{Th}}{1.005R} \approx 0.995 \frac{V_{Th}}{R}$

Acoplamento quase-ideal $\rightarrow \frac{1}{\omega C} = 0.1R \rightarrow C = \frac{1}{2\pi f \times 0.1 \times R}$

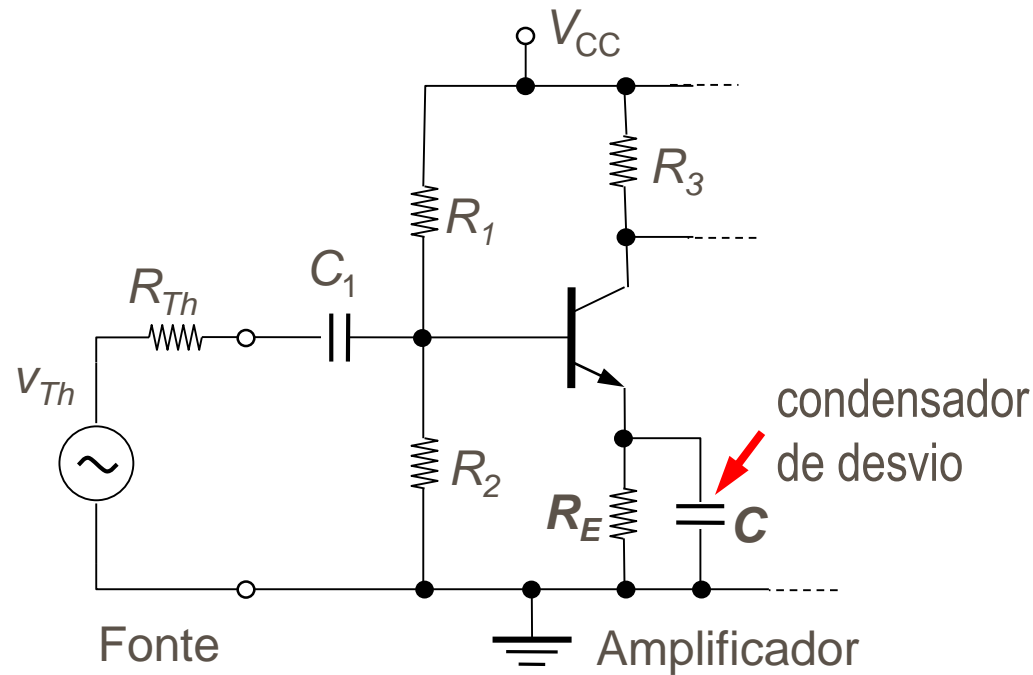
■ Condensadores de Acoplamento - resumo

- Para um condensador funcionar corretamente, ele deve agir como curto-circuito na menor frequência do gerador. Por exemplo, se a frequência do gerador variar de 20 Hz até 20 kHz, a frequência mais baixa é a de 20 Hz. Essa frequência é o pior caso com o qual o projetista deve se preocupar quando estiver dimensionando o valor do condensador. Isto é escolherá um condensador cuja reatância a 20 Hz seja muito menor que a resistência.
- Quanto menor? Como definição:

Para um acoplamento bem projetado como vimos anteriormente:

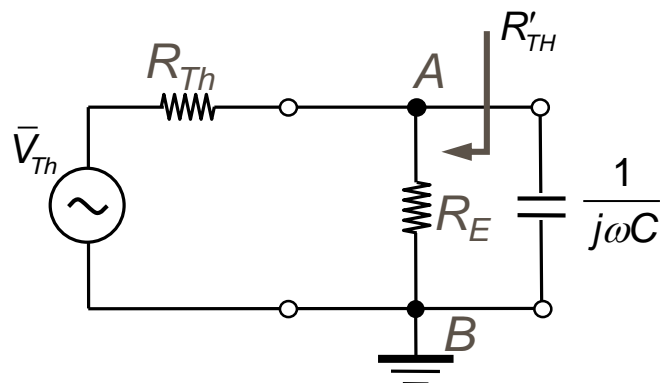
$$X_C < 0,1 * R_{eq}$$

■ Condensadores de Desvio

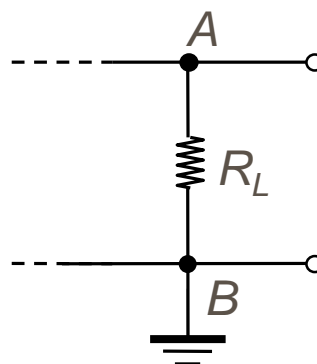


Amplificadores com Transístores

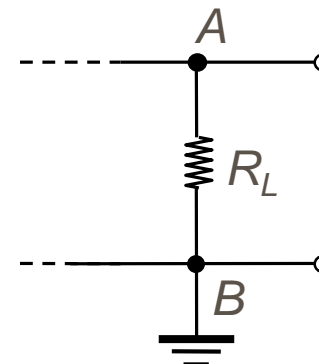
■ Condensadores de Desvio (ou Derivação)



em corrente contínua

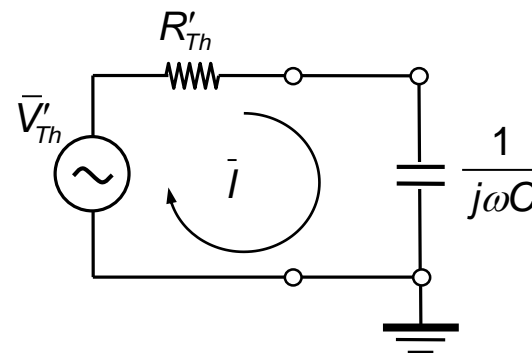


em corrente alternada

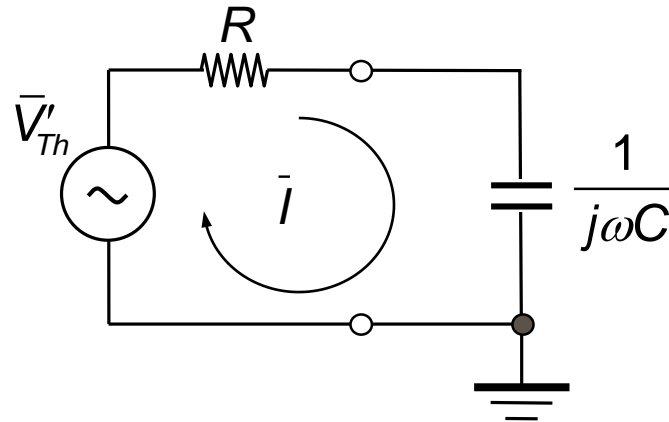


Com

$$\begin{cases} R'_{TH} = R_{Th} // R_e = R \\ V'_{TH} = V_{Th} \frac{R_e}{R_e + R_{Th}} \rightarrow I = \frac{V'_{Th}}{\sqrt{R^2 + X_C^2}} \\ X_C = \left| \frac{1}{j\omega C} \right| \end{cases}$$



■ Condensadores de Desvio (ou Derivação)

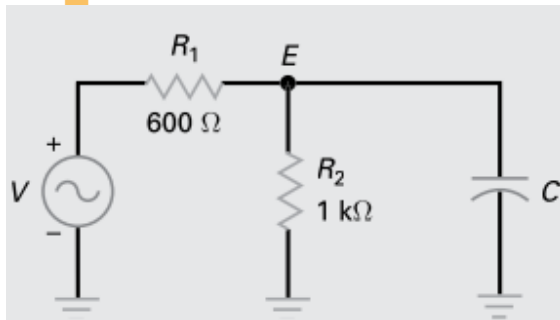


$$\text{Com } X_C \leq 0.1R \rightarrow I \geq \frac{V_{Th}}{\sqrt{R^2 + (0.1R)^2}} \approx \frac{V_{Th}}{1.005R} \approx 0.995 \frac{V_{Th}}{R}$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = 0.1R \rightarrow C = \frac{1}{2\pi f \times 0.1 \times R} \quad (\text{desvio quase-ideal})$$

■ Condensadores de Desvio (ou Derivação) – Exemplo

- Na Figura, a frequência de entrada de V é de 1 kHz. Qual é o valor necessário para C curto-circuitar o ponto E com o terra?



Primeiro, calcule a resistência de Thevenin quando vista pelo condensador C .

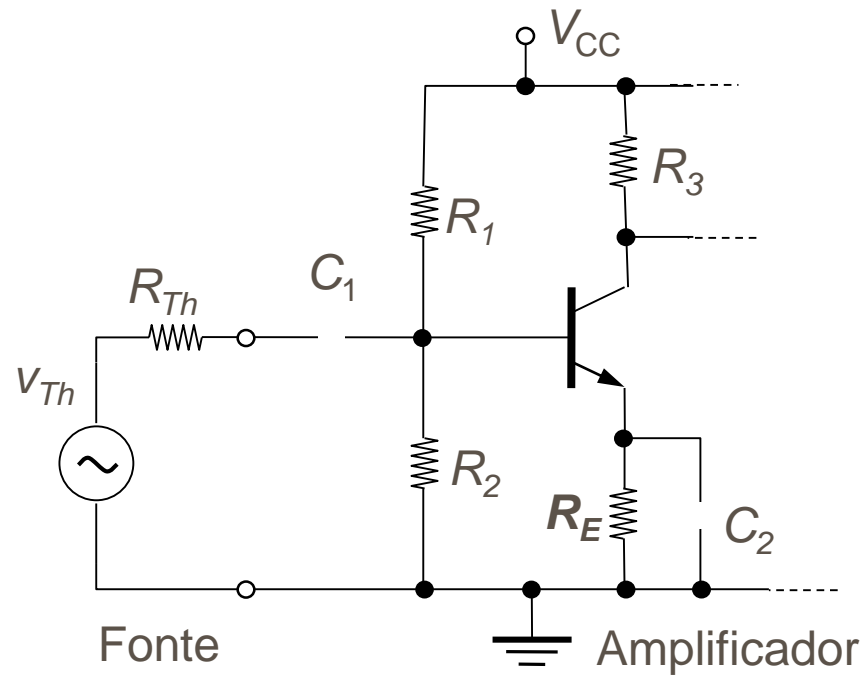
$$R_{TH} = R_1 \parallel R_2$$
$$R_{TH} = 600 \, \Omega \parallel 1 \, \text{k}\Omega = 375 \, \Omega$$

A seguir, X_C deve ser dez vezes menor que R_{TH} . Portanto, $X_C < 37,5 \, \Omega$ na frequência de 1 kHz. Agora calculamos C por

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C} = \frac{1}{(2\pi)(1 \, \text{kHz})(37,5 \, \Omega)}$$
$$C = 4,2 \, \mu\text{F}$$

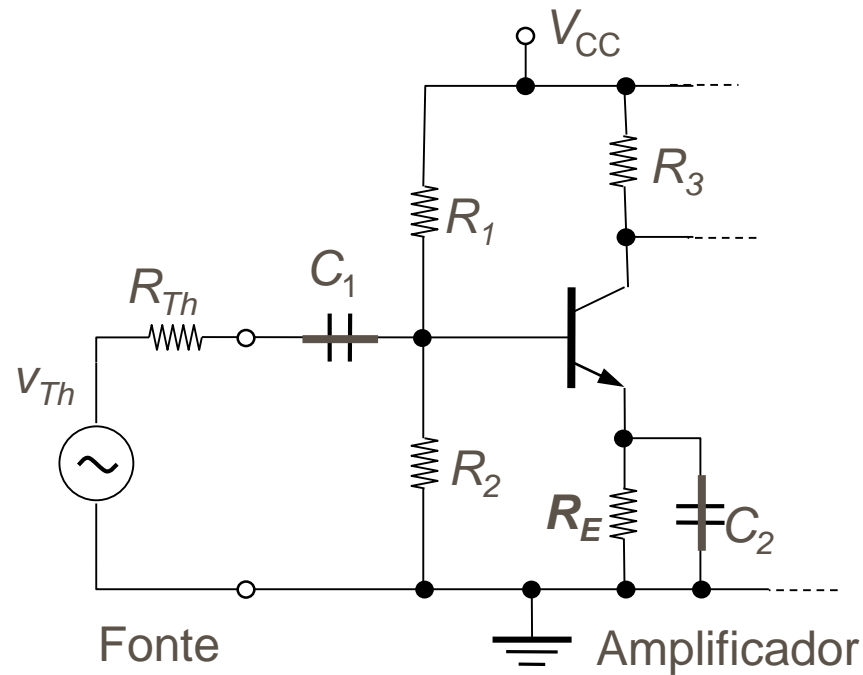
Amplificadores com Transístores

■ Circuito para Análise em CC (polarização)

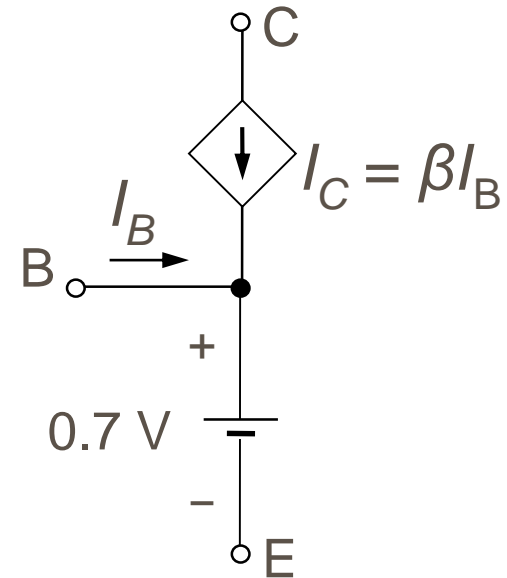
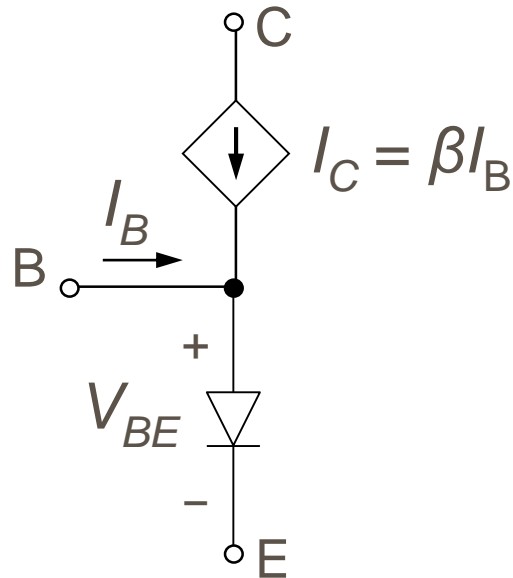
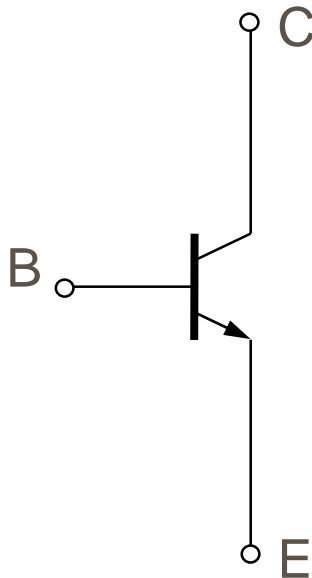


Amplificadores com Transístores

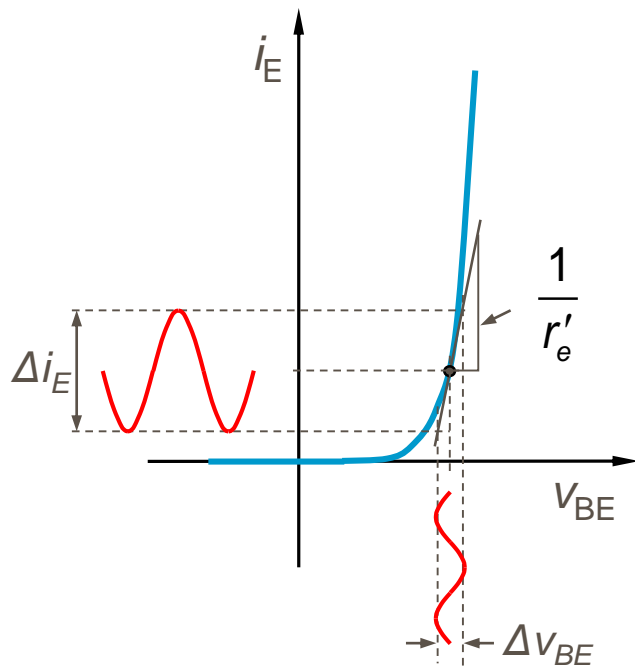
■ Circuito para Análise em CA (sinal)



■ Modelo do Transístor Bipolar (BJT) para CC



■ Modelo do BJT para pequenos sinais

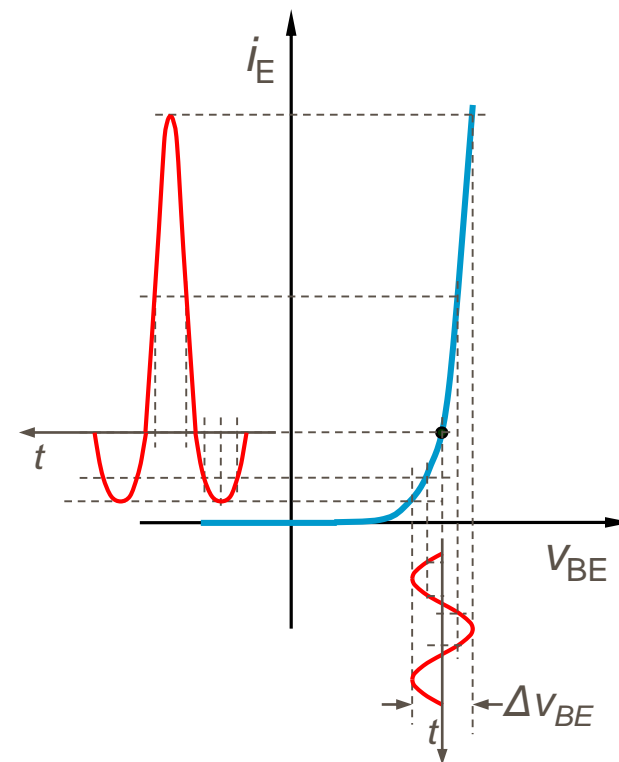


Uma forma de reduzir a distorção na Figura é mantendo a tensão CA na base com um valor baixo. Quando se reduz o valor de pico da tensão na base, reduz-se o movimento do ponto de operação instantâneo. Quanto menor for a excursão ou a variação, menor será a curvatura que aparece no gráfico. Se o sinal for suficientemente baixo, o gráfico terá uma aparência linear.

Pequenos sinais

$$\Delta i_E = i_e \approx \frac{V_{be}}{r'_e}$$

Resistência CA do emissor do díodo emissor



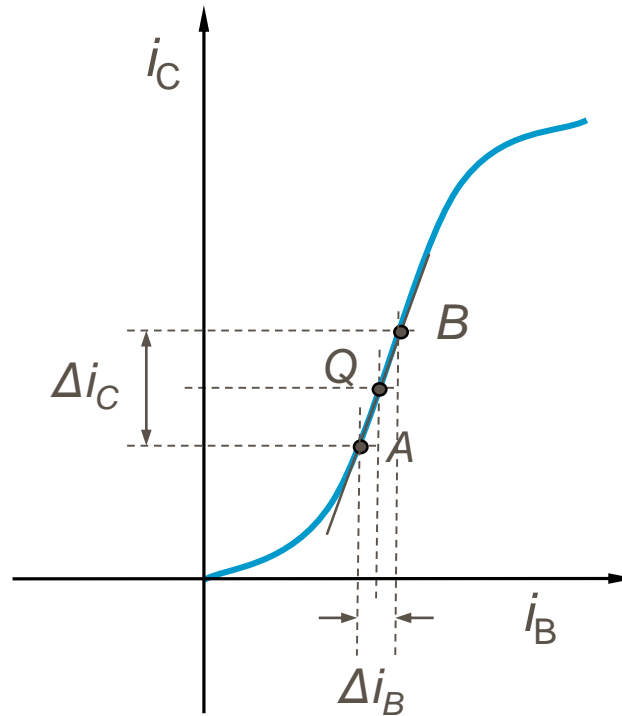
Grandes sinais

Amplificadores com Transístores

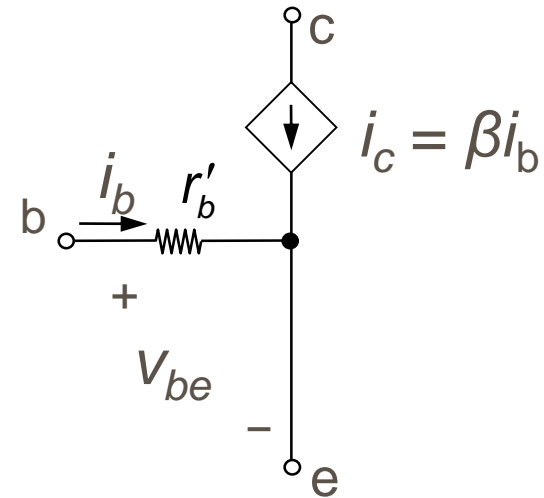
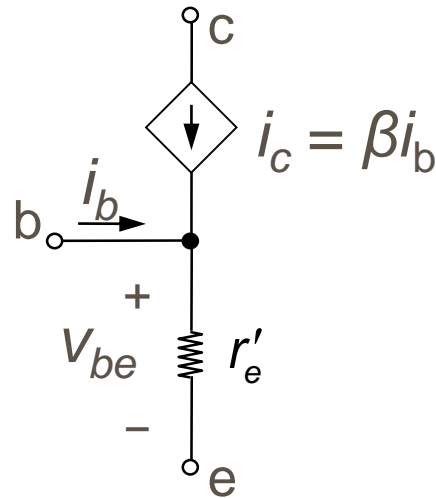
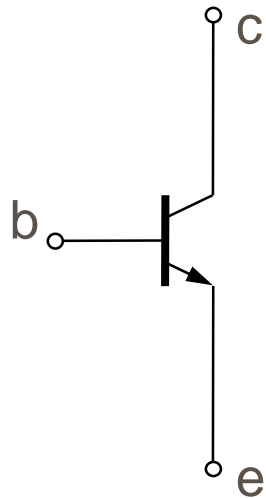
■ Ganho do transístor em CA (β para pequenos sinais)

$$\beta = \beta_{CA} = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B}$$

$$\beta_{CA} = \frac{i_c}{i_b}$$



■ Modelo do BJT para pequenos sinais



$$V_{be} = r'_e i_e = r'_e (\beta + 1) i_b$$

$$\text{Fazendo } r'_b = (\beta + 1) r'_e$$

$$V_{be} = r'_b i_b$$

■ Valor de r'_e

Para uma junção PN:

$$I = I_S \left(e^{\frac{Vq}{kT}} - 1 \right)$$

$I \rightarrow$ Corrente na junção

$V \rightarrow$ Tensão na zona de depleção

$I_S \rightarrow$ Corrente inversa de saturação

$q \rightarrow$ carga do electrão

$k \rightarrow$ constante de *Boltzmann*

$T \rightarrow$ Temperatura absoluta ($^{\circ}\text{C} + 273$)

À temperatura de 25°C , $\frac{q}{kT} \approx 40$

$$\rightarrow I = I_S (e^{40V} - 1)$$

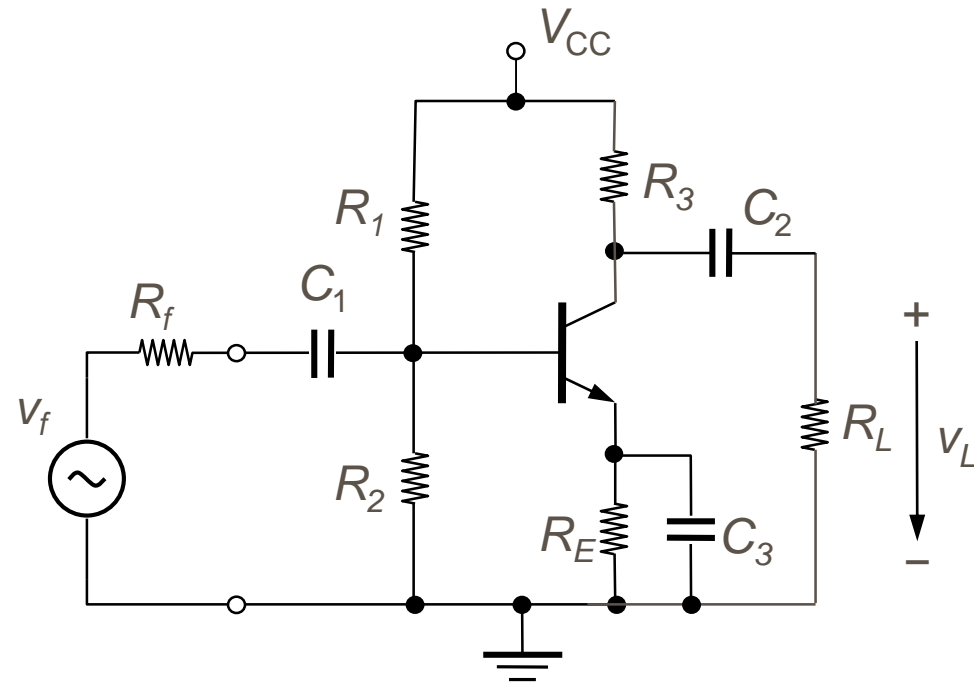
$$\rightarrow \frac{dI}{dV} = 40I_S e^{40V} \approx 40(I + I_S)$$

$$r'_e = \frac{dv_{BE}}{di_E} = \frac{1}{40(I_E + I_{ES})}$$

$$\rightarrow r'_e \approx \frac{25\text{mV}}{I_E}, \quad r'_b \approx \frac{25\text{mV}}{I_E/(\beta + 1)} \approx \beta r'_e$$

Aumenta 1% por cada 3°C
de aumento de temperatura

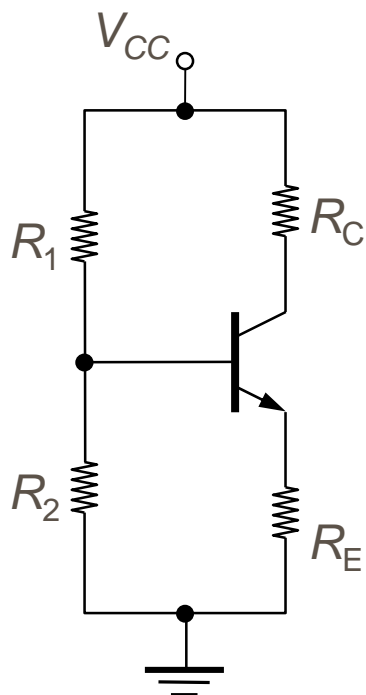
■ Montagem Emissor Comum



Circuito real
(completo)

■ Montagem Emissor Comum – Análise em cc

- Reduzir as fontes de **ca** a zero
- Condensadores em circuito aberto
- Analisar o circuito equivalente em cc



$$R_{TH} = R_1 // R_2 \quad V_{TH} = V_{CC} \frac{R_2}{R_2 + R_1}$$

$$V_{TH} = I_B * R_{TH} + 0,7 + I_E * R_E$$

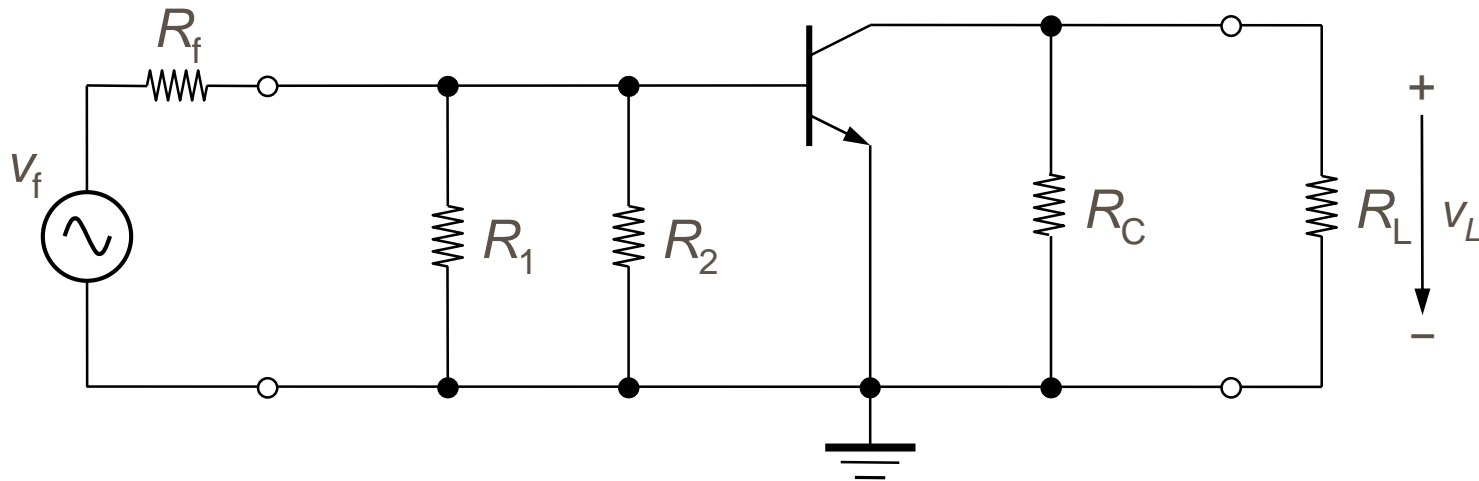
$$V_{CC} = I_C * R_C + V_{CE} + I_E * R_E$$

$$\beta = \frac{I_C}{I_B}$$

$$I_E = I_C + I_B$$

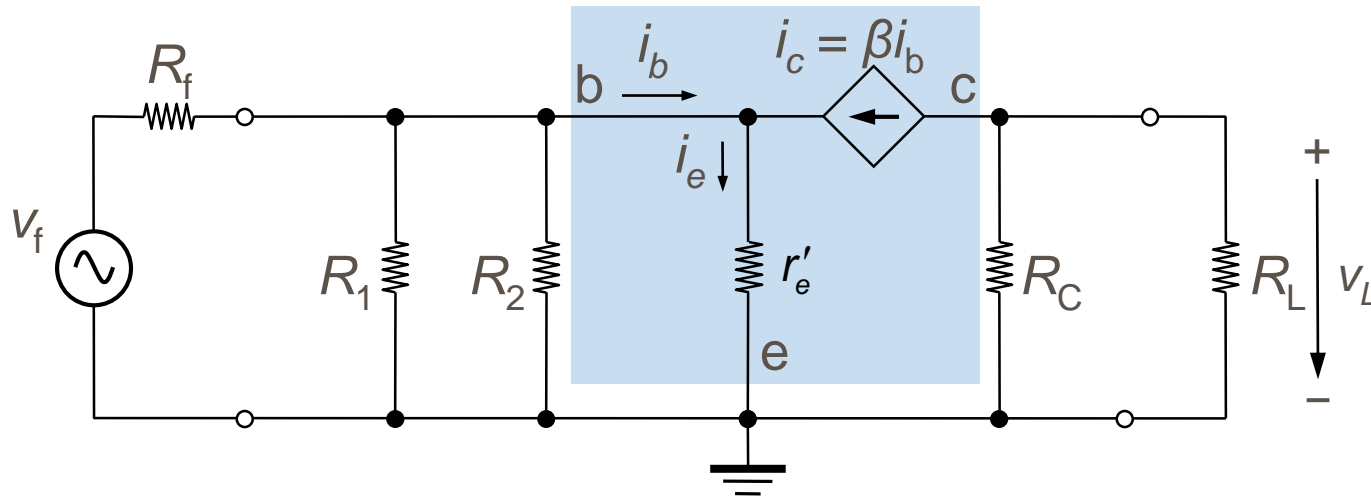
■ Montagem Emissor Comum – Análise em ca

- No circuito original reduzimos todas as fontes cc a zero
- Condensadores em curto circuito
- Analisar o circuito equivalente em ca



Circuito equivalente para análise em CA (os condensadores comportam-se como curto-circuitos para a frequência do sinal amplificado)

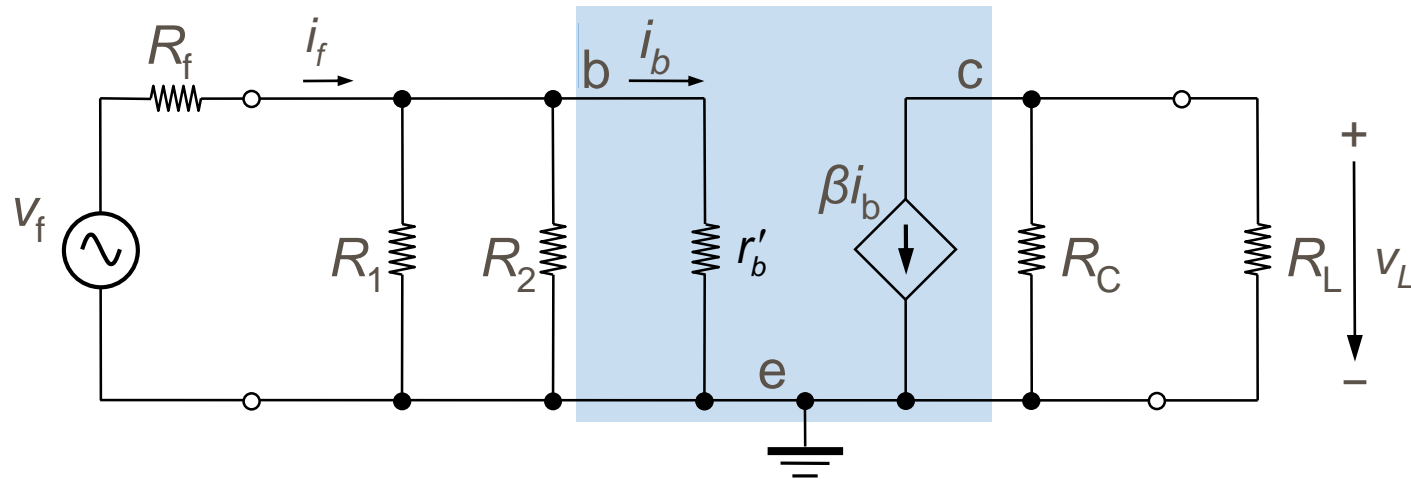
■ Montagem Emissor Comum



Circuito equivalente para análise em CA substituindo o transístor pelo seu modelo para pequenos sinais

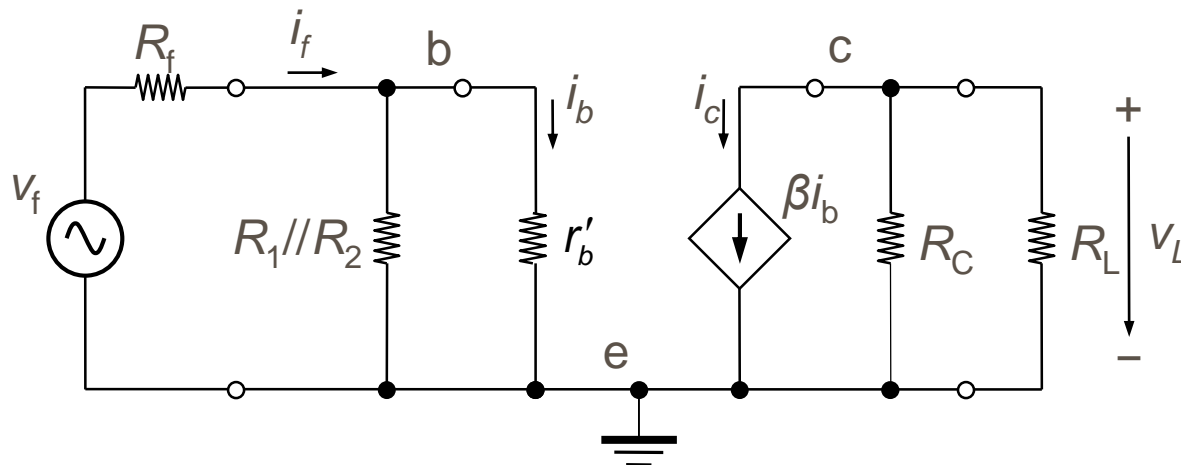
ou...

■ Montagem Emissor Comum



Circuito equivalente para análise em CA substituindo o transístor pelo seu modelo para pequenos sinais

■ Montagem Emissor Comum



$$i_f = \frac{V_f}{R_f + R_1 // R_2 // r'_b} \quad (1)$$

$$i_b = i_f \frac{R_1 // R_2}{r'_b + R_1 // R_2} \quad (2)$$

(divisor de corrente)

$$V_L = -i_c R_C // R_L = -\beta i_b R_C // R_L \quad (3)$$

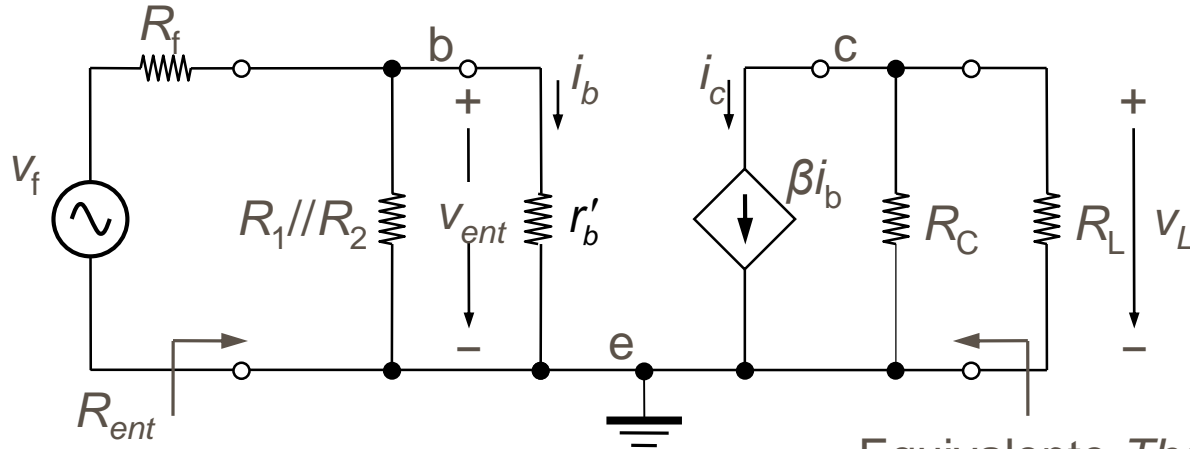
Combinando (1), (2) e (3):

$$\rightarrow \frac{V_L}{V_f} = - \frac{1}{R_f + R_1 // R_2 // r'_b} \cdot \frac{R_1 // R_2}{r'_b + R_1 // R_2} \cdot \beta \cdot R_C // R_L$$

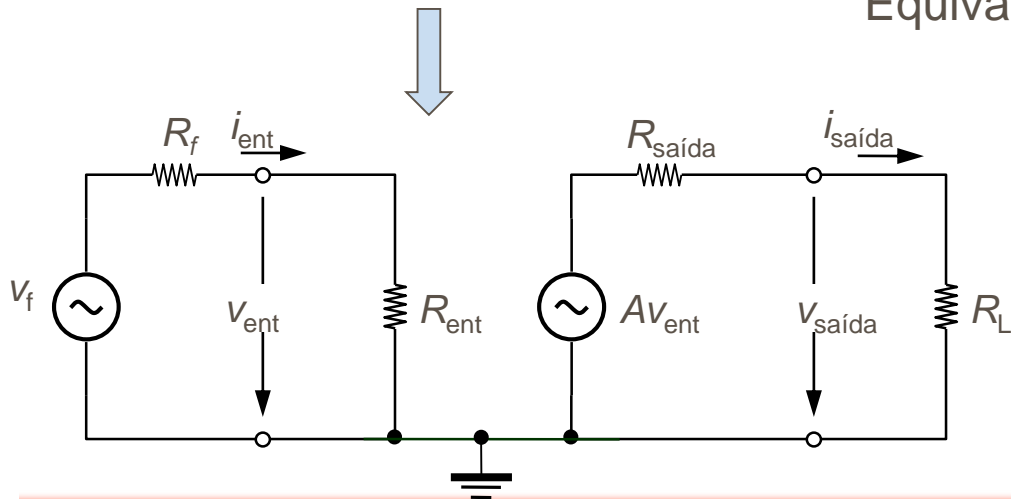
Amplificadores com Transístores

■ Montagem Emissor Comum

O circuito pode ser simplificado...



Equivalente *Thevenin*



$$R_{ent} = R_1 // R_2 // r'_b$$

$$i_b = \frac{v_{ent}}{r'_b}$$

$$R_{Th} = R_C = R_{saída}$$

$$V_{Th} = -\beta i_B R_C = -\beta \underbrace{\frac{R_C}{r'_b}}_A v_{ent}$$

$$\begin{cases} R_{ent} = R_1 // R_2 // r'_b \\ A = -\beta \frac{R_C}{r'_b} \\ R_{saída} = R_C \end{cases}$$

$$v_{saída} = v_f \frac{R_{ent}}{R_f + R_{ent}} \cdot A \cdot \frac{R_L}{R_{saída} + R_L}$$

Amplificadores com Transístores

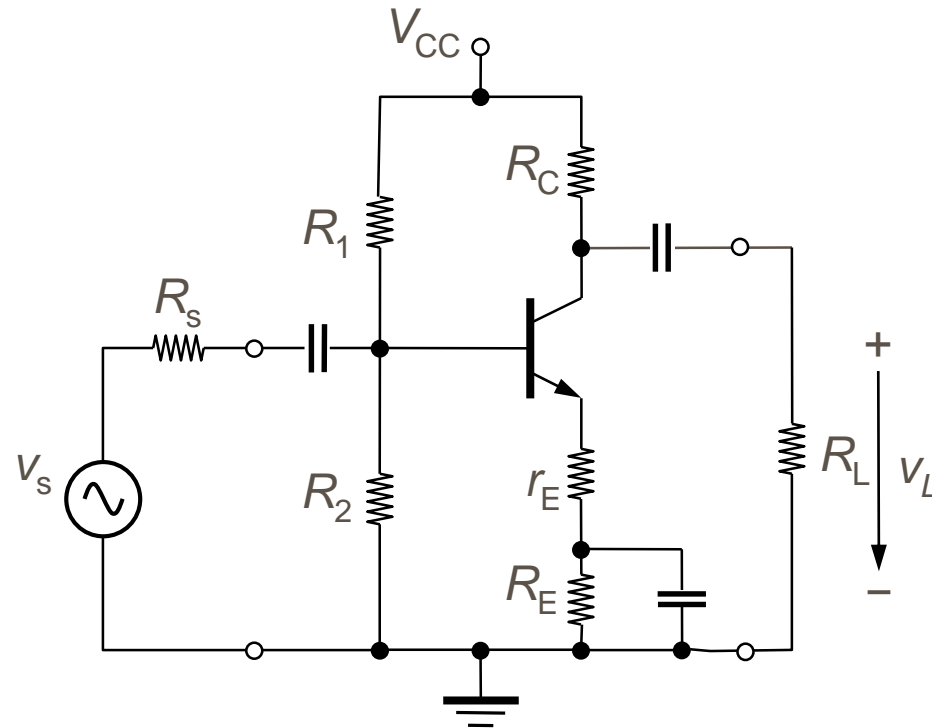
■ Comparativo

	Emissor Comum	Emissor Comum c/ R_E	Colector comum	Base Comum
Impedância de Entrada	$R_{ent} = R_1 // R_2 // r'_b$	$R_{ent} \approx R_1 // R_2 // (r'_b + \beta r'_e)$	$R_{ent} \approx R_1 // R_2 // \beta R_E$	$R_{ent} = r'_e$
Ganho de Tensão em c.a.	$A = -\beta \frac{R_C}{r'_b}$	$A = -\beta \frac{R_C}{r'_b + \beta r'_e}$ $= -\frac{R_C}{r'_e + r_E} \approx -\frac{R_C}{r_E}$	$A \approx 1$	$A = \frac{R_C}{r'_e}$
Impedância de Saída	$R_{saída} = R_C$	$R_{saída} = R_C$	$R_E // (r'_e + \frac{R_1 // R_2 // R_f}{(\beta + 1)})$	$R_{saída} = R_C$

$$\rightarrow r'_e \approx \frac{25\text{mV}}{I_E}, \quad r'_b \approx \frac{25\text{mV}}{I_E / (\beta + 1)} \approx \beta r'_e$$

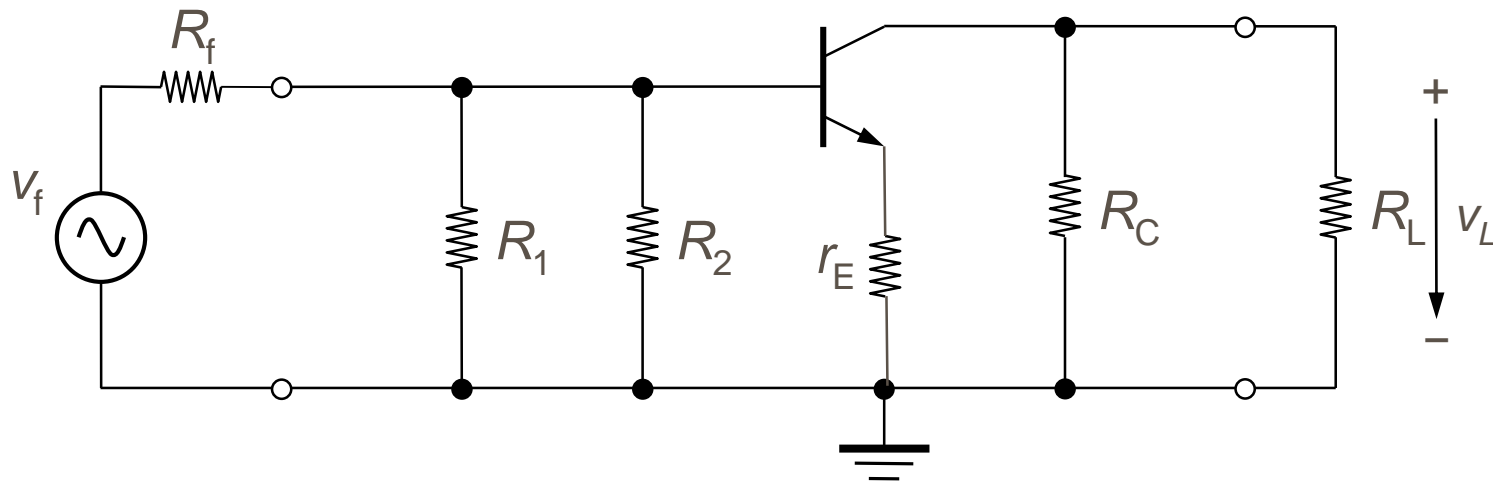
Amplificadores com Transístores

■ Montagem Emissor Comum com Ganho Estabilizado



Amplificadores com Transístores

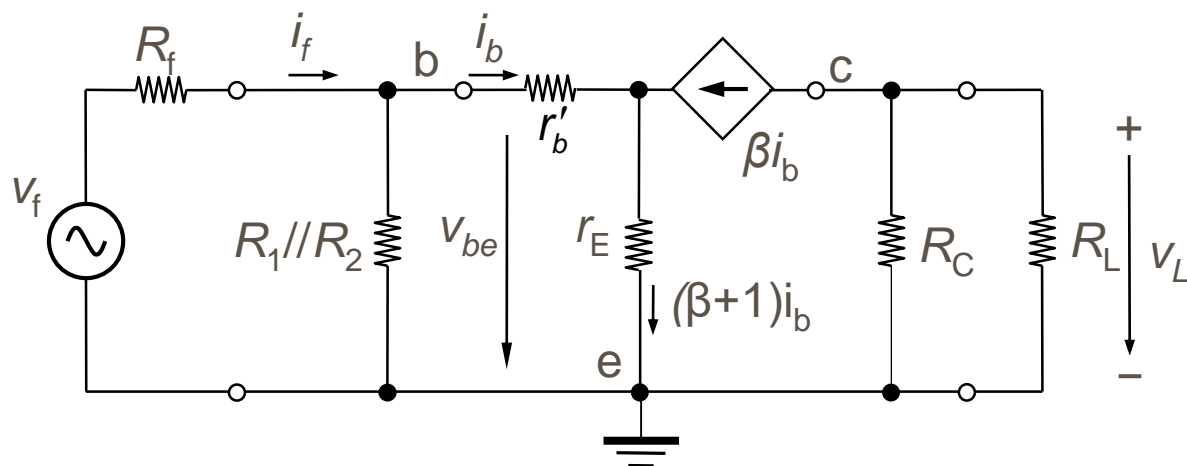
■ Montagem Emissor Comum com Ganho Estabilizado



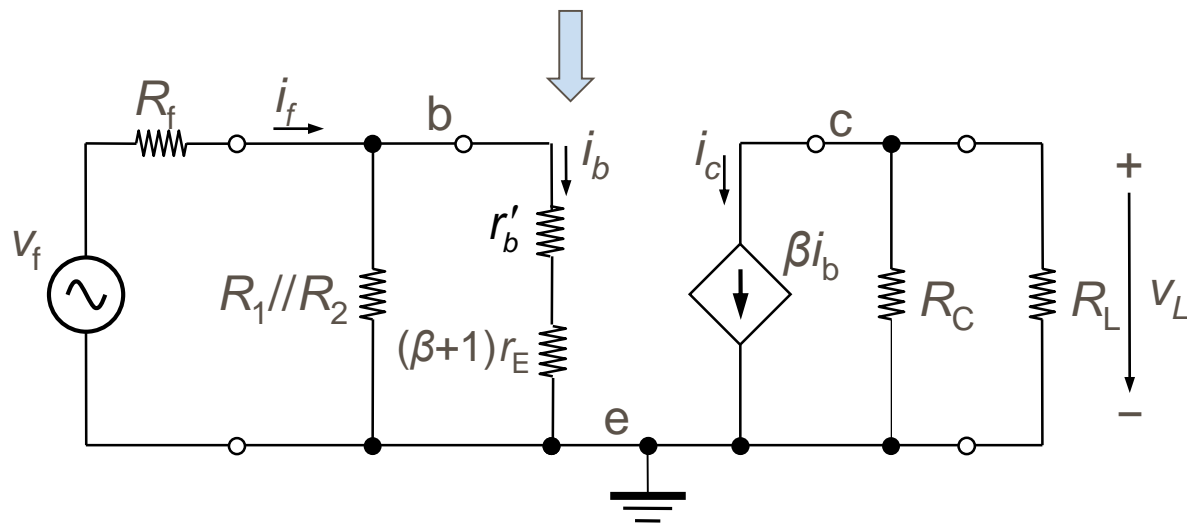
Circuito equivalente para análise em CA

Amplificadores com Transístores

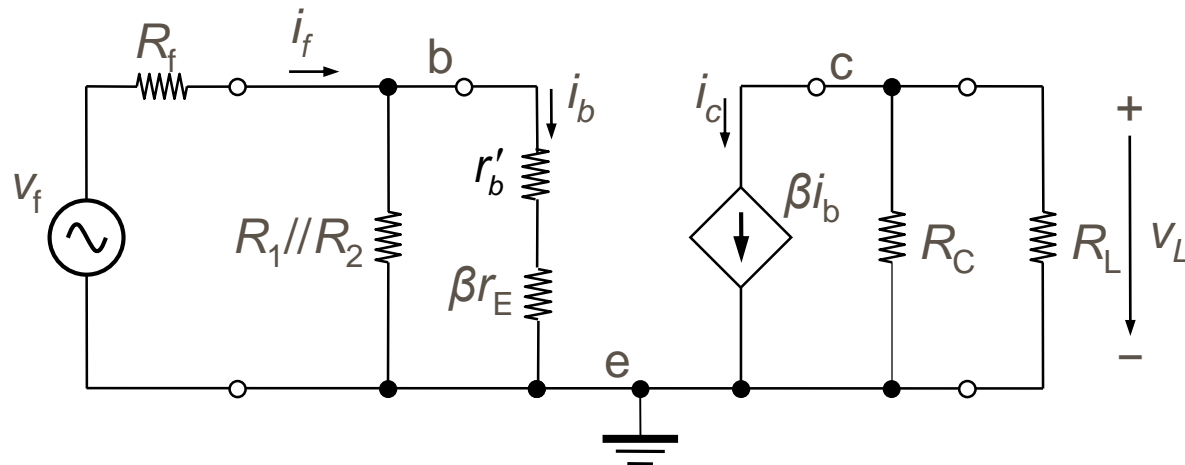
■ Montagem Emissor Comum com Ganho Estabilizado



$$\begin{aligned} V_{be} &= r'_b \cdot i_b + R_E \cdot (\beta + 1)i_b \\ &= r'_b \cdot i_b + (\beta + 1)R_E \cdot i_b \\ &\approx r'_b \cdot i_b + \beta R_E \cdot i_b \end{aligned}$$



■ Montagem Emissor Comum com Ganho Estabilizado



$$i_f = \frac{V_f}{R_S + R_1 // R_2 // (r'_b + \beta R_E)} \quad (1)$$

$$i_b = i_f \frac{R_1 // R_2}{r'_b + \beta R_E + R_1 // R_2} \quad (2)$$

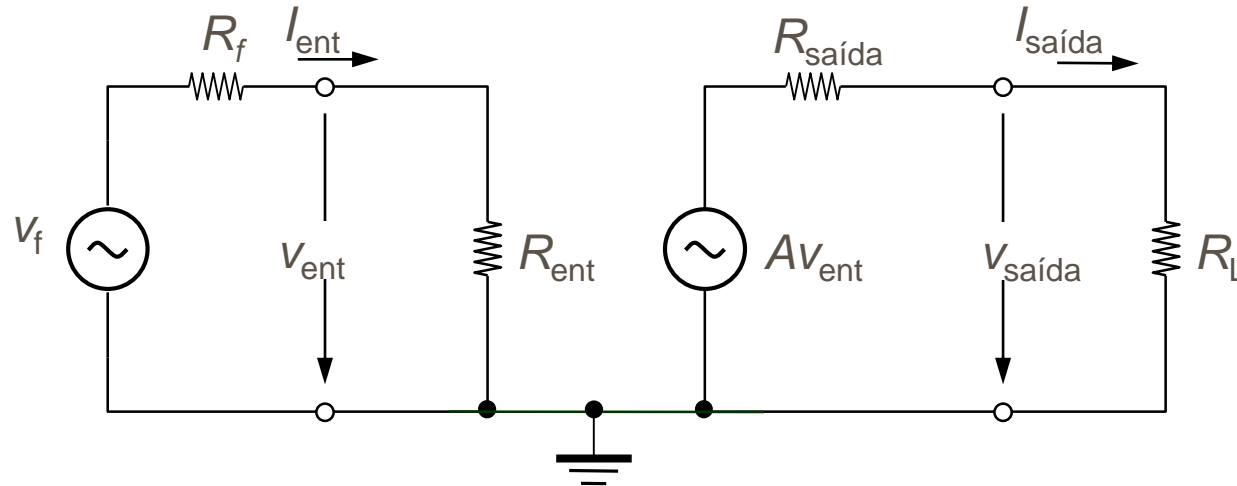
(divisor de corrente)

$$v_L = -i_C R_C // R_L = -\beta i_B R_C // R_L \quad (3)$$

Combinando (1), (2) e (3):

$$\rightarrow \frac{v_L}{V_f} = - \frac{1}{R_S + R_1 // R_2 // (r'_b + \beta R_E)} \cdot \frac{R_1 // R_2}{r'_b + \beta R_E + R_1 // R_2} \cdot \beta \cdot R_C // R_L$$

■ Montagem Emissor Comum com Ganho Estabilizado



$$\begin{cases} R_{ent} = R_1 // R_2 // (r'_b + \beta r_E) \\ A = -\beta \frac{R_C}{r'_b + \beta r_E} = \frac{R_C}{r'_e + r_E} \approx -\frac{R_C}{r_E} \quad (\text{para } \beta r_E \gg r'_b) \\ R_{saída} = R_C \end{cases}$$

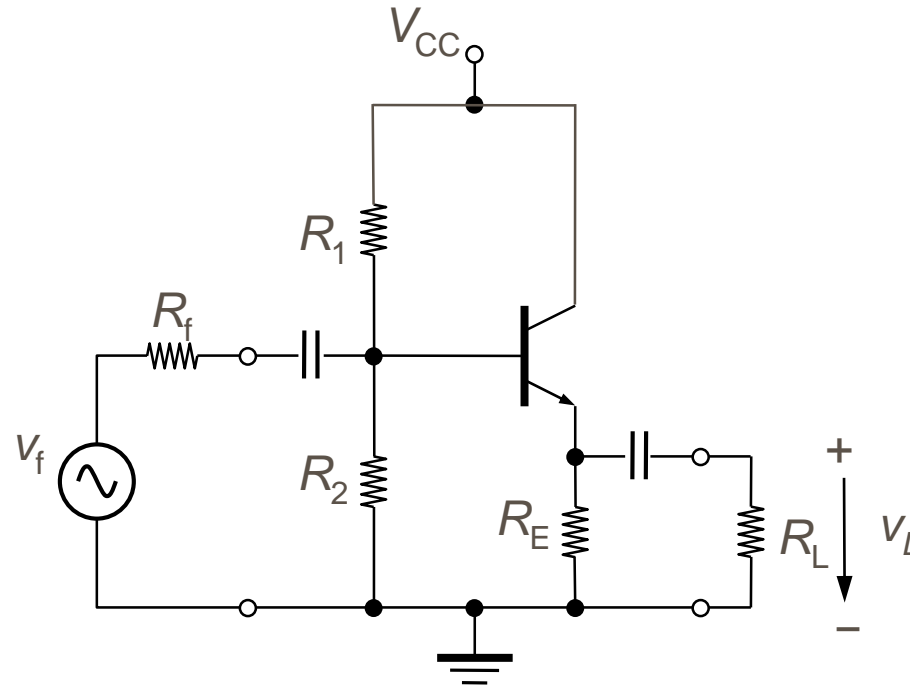
Amplificadores com Transístores

■ Comparativo

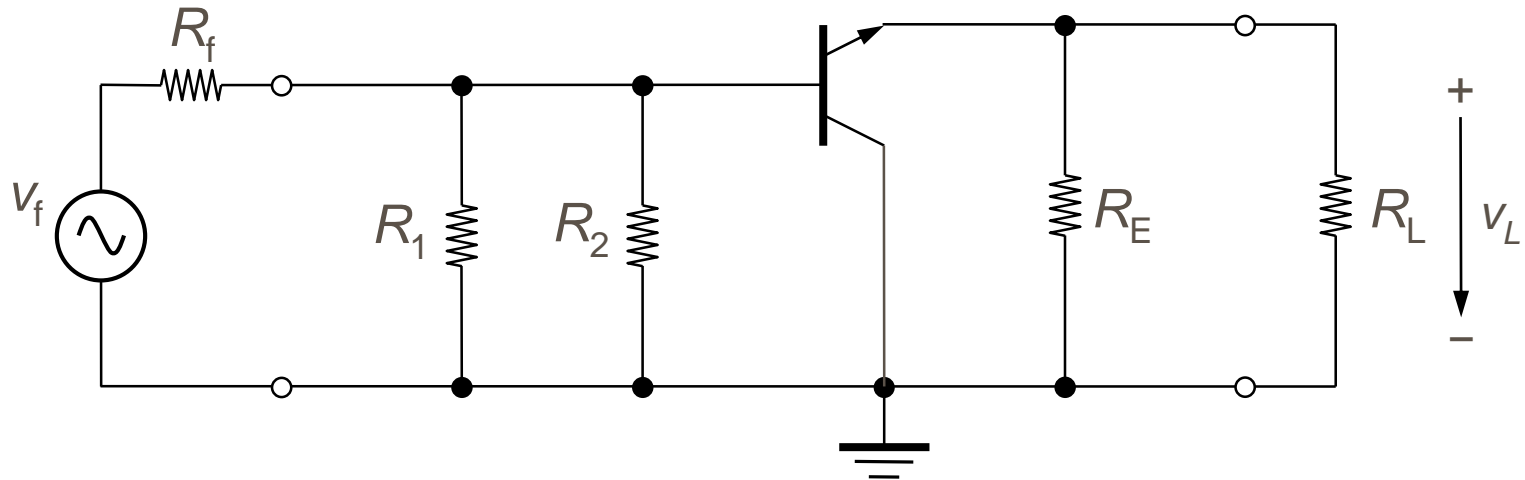
	Emissor Comum	Emissor Comum c/ R_E	Colector comum	Base Comum
Impedância de Entrada	$R_{ent} = R_1 // R_2 // r'_b$	$R_{ent} \approx R_1 // R_2 // (r'_b + \beta r'_e)$	$R_{ent} \approx R_1 // R_2 // \beta R_E$	$R_{ent} = r'_e$
Ganho de Tensão em c.a.	$A = -\beta \frac{R_C}{r'_b}$	$A = -\beta \frac{R_C}{r'_b + \beta r'_e}$ $= -\frac{R_C}{r'_e + r_E} \approx -\frac{R_C}{r_E}$	$A \approx 1$	$A = \frac{R_C}{r'_e}$
Impedância de Saída	$R_{saída} = R_C$	$R_{saída} = R_C$	$R_E // (r'_e + \frac{R_1 // R_2 // R_f}{(\beta + 1)})$	$R_{saída} = R_C$

$$\rightarrow r'_e \approx \frac{25\text{mV}}{I_E}, \quad r'_b \approx \frac{25\text{mV}}{I_E / (\beta + 1)} \approx \beta r'_e$$

■ Montagem Colector Comum

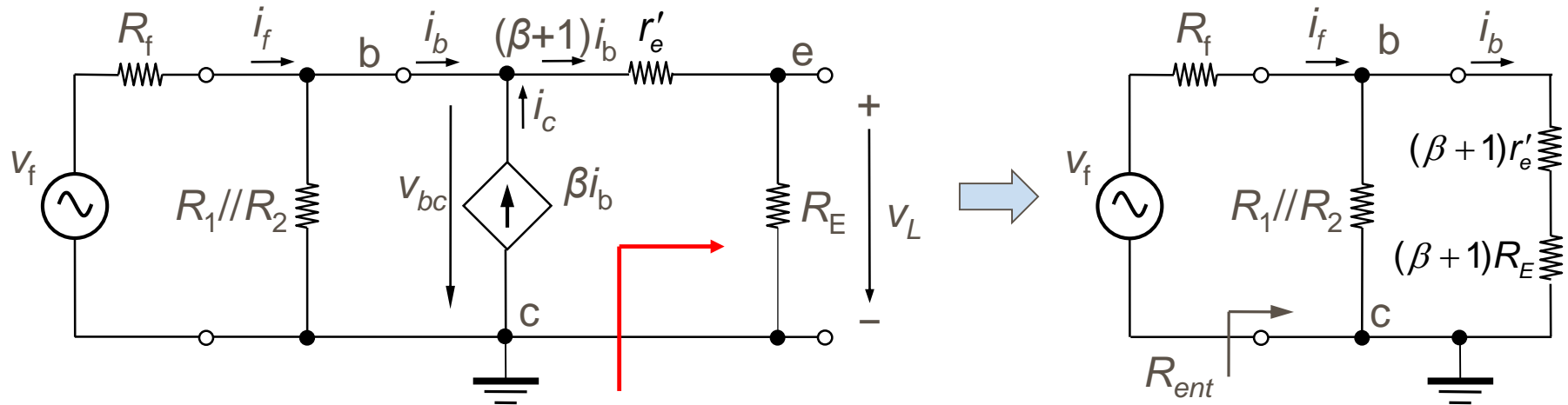


■ Montagem Colector Comum



Circuito equivalente para análise em CA

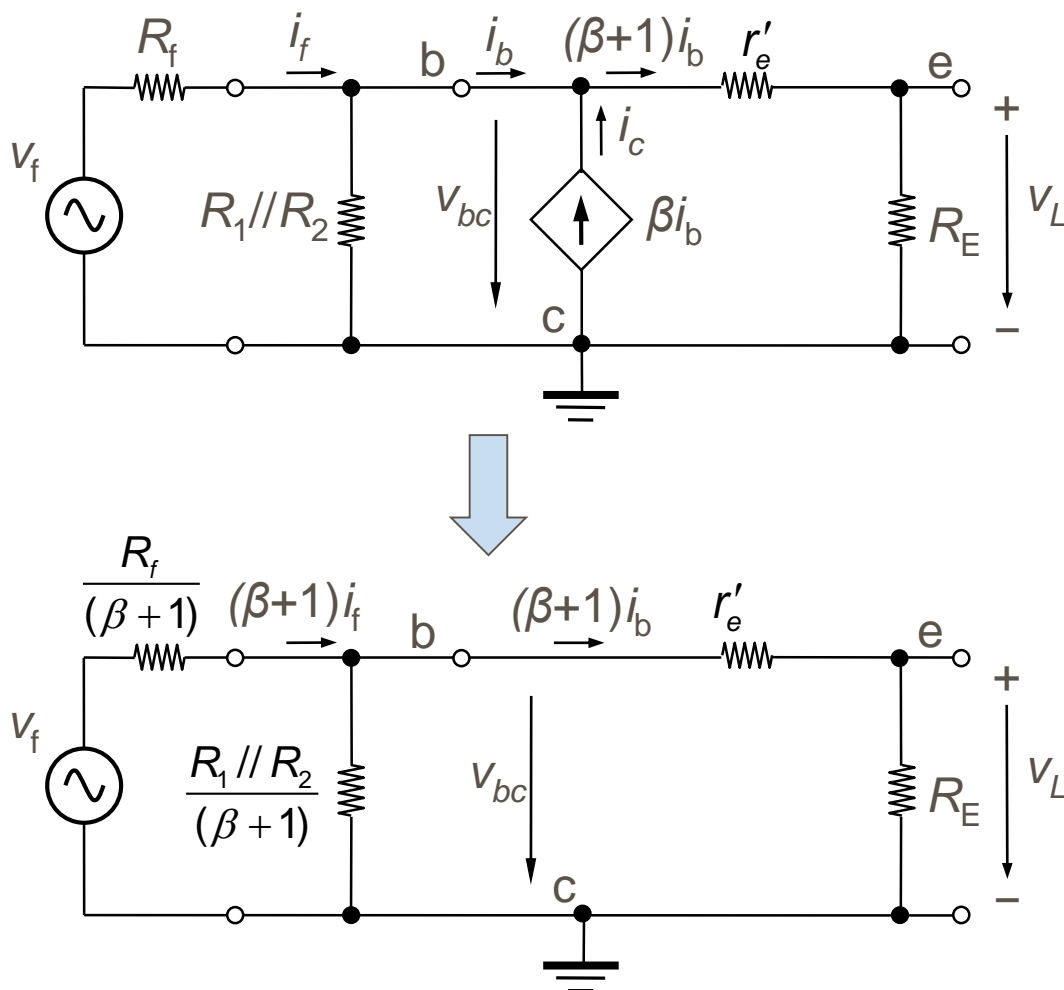
■ Montagem Colector Comum



$$v_{bc} = (\beta + 1)i_b \cdot (r'_e + R_E) = (\beta + 1)r'_e \cdot i_b + (\beta + 1)R_E \cdot i_b$$

$$R_{ent} = R_1 // R_2 // (\beta + 1)(r'_e + R_E) \approx R_1 // R_2 // \beta R_E$$

■ Montagem Colector Comum



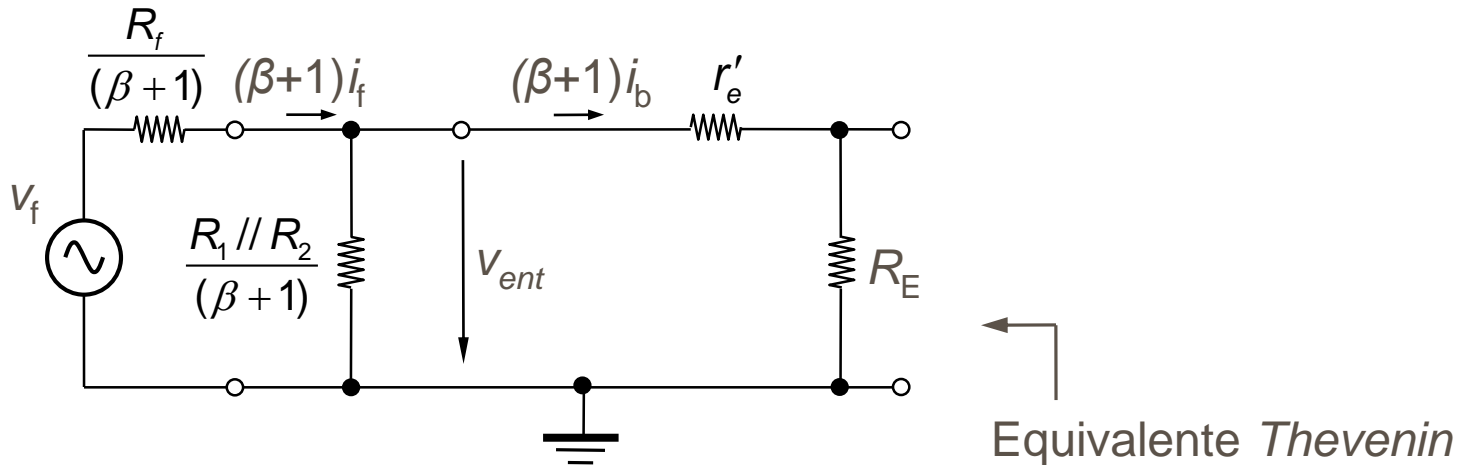
$$v_f = R_f \cdot i_f + v_{bc}$$

$$\rightarrow v_f = \frac{R_f}{\beta+1} \cdot (\beta+1)i_f + v_{bc}$$

Do mesmo modo:

$$\frac{R_1 // R_2}{\beta+1} \cdot (\beta+1)(i_f - i_b) = v_{bc}$$

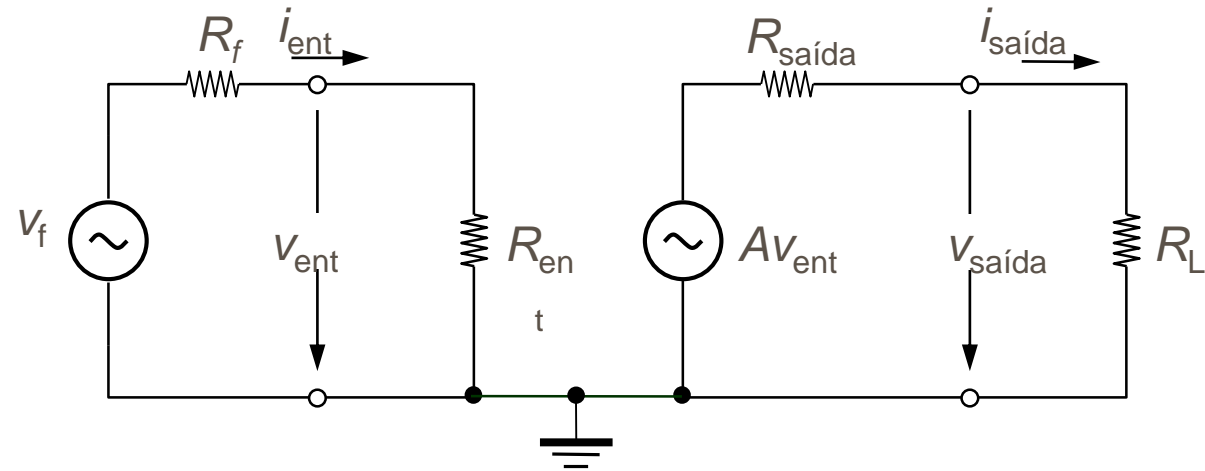
■ Montagem Colector Comum



$$R_{Th} = R_E // \left(r'_e + \frac{R_f // R_1 // R_2}{(\beta+1)} \right) \quad (= R_{saída})$$

$$V_{Th} = V_{ent} \frac{R_E}{r'_e + R_E} \quad (= A \cdot v_{ent})$$

■ Montagem Colector Comum



$$\left\{ \begin{array}{l} R_{ent} \approx R_1 // R_2 // \beta R_E \\ A = \frac{R_E}{r'_e + R_E} \quad (A \approx 1 \text{ para } R_E \gg r'_e) \\ R_{saída} = R_{TH} = R_E // \left(r'_e + \frac{R_f // R_1 // R_2}{(\beta + 1)} \right) \end{array} \right.$$

■ Características da Montagem Colector Comum

- Elevada impedância de entrada
- Baixa impedância de saída
- Ganho de tensão ≈ 1

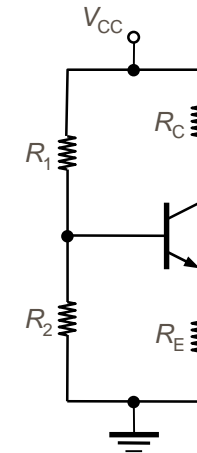
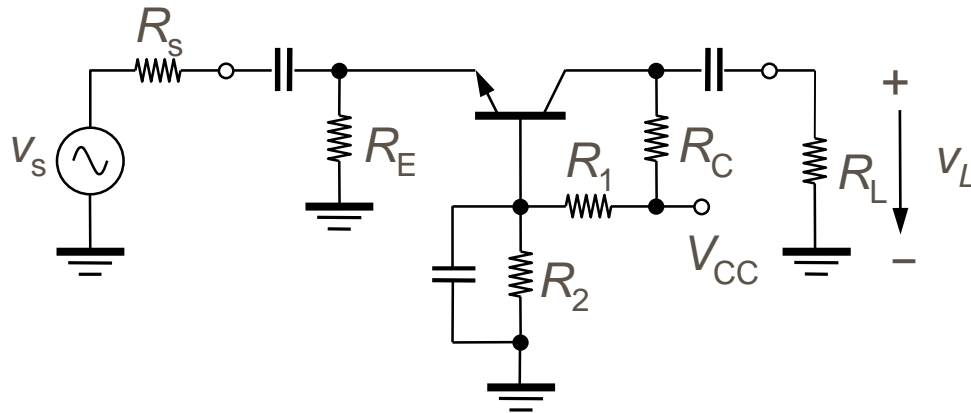
■ Utilização

- Para isolar fontes de alta impedância de cargas com baixa impedância

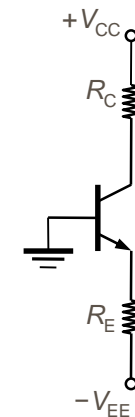
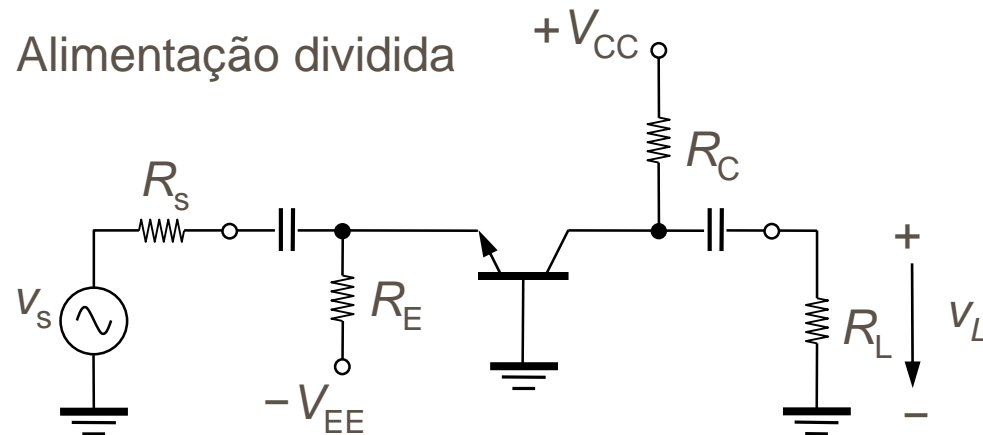
Amplificadores com Transístores

■ Montagem Base Comum

Alimentação simples



Equivalente CC



Amplificadores com Transístores

■ Comparativo

	Emissor Comum	Emissor Comum c/ R_E	Colector comum	Base Comum
Impedância de Entrada	$R_{ent} = R_1 // R_2 // r'_b$	$R_{ent} \approx R_1 // R_2 // (r'_b + \beta r'_e)$	$R_{ent} \approx R_1 // R_2 // \beta R_E$	$R_{ent} = r'_e$
Ganho de Tensão em c.a.	$A = -\beta \frac{R_C}{r'_b}$	$A = -\beta \frac{R_C}{r'_b + \beta r'_e}$ $= -\frac{R_C}{r'_e + r_E} \approx -\frac{R_C}{r_E}$	$A \approx 1$	$A = \frac{R_C}{r'_e}$
Impedância de Saída	$R_{saída} = R_C$	$R_{saída} = R_C$	$R_E // (r'_e + \frac{R_1 // R_2 // R_f}{(\beta + 1)})$	$R_{saída} = R_C$

$$\rightarrow r'_e \approx \frac{25\text{mV}}{I_E}, \quad r'_b \approx \frac{25\text{mV}}{I_E / (\beta + 1)} \approx \beta r'_e$$