

SEL-EESC-USP

Amplificadores Básicos com BJT

Equações Básicas

veronese
2018

Amplificadores Básicos Construídos com BJT

1.) Emissor-Comum:

Análise do amplificador EC genérico:

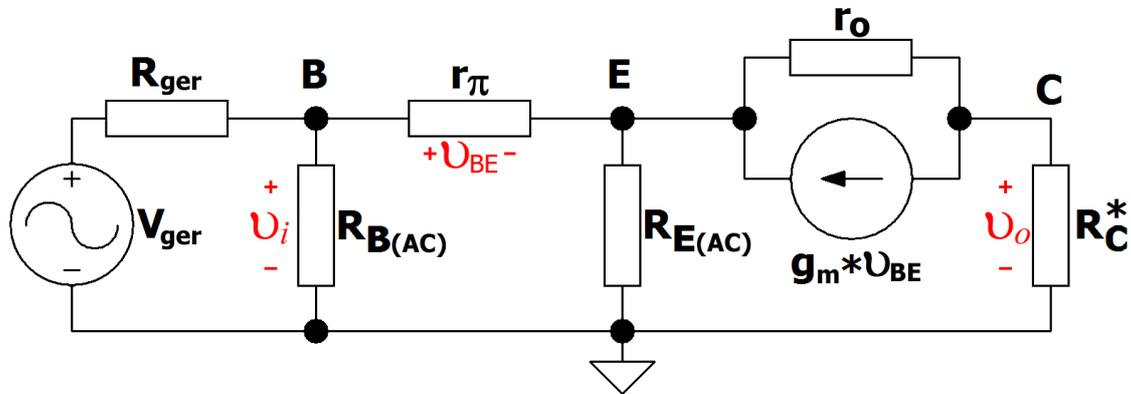


Figura 1 - Modelo Linearizado do Amplificador EC Genérico.

A Figura 1 apresenta o modelo linearizado de um amplificador EC genérico, com o resistor R_E não desacoplado. Aplicando-se os Teoremas de Norton e de Thévenin ao circuito da Figura 1, pode-se, a partir da saída, reduzir o circuito a uma malha apenas, como mostra a Figura 2.

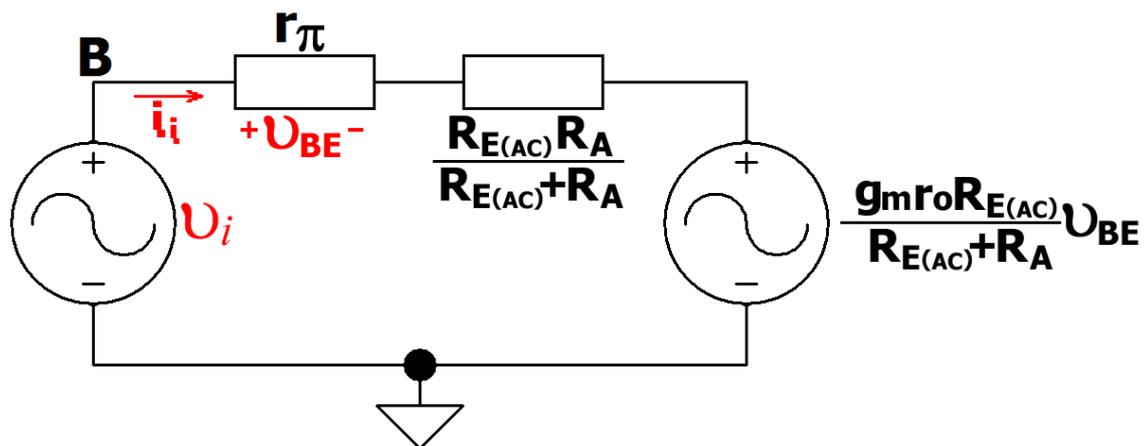


Figura 2 - Amplificador EC com Modelo Compactado a Partir da Saída.

Sendo:

$$R_A = r_o + R_C^* \quad \text{e} \quad R_C^* = \frac{R_C R_L}{R_C + R_L}$$

A corrente de malha do circuito da Figura 2 vale:

$$i_i = \frac{[R_{E(AC)} + R_A] \vartheta_i}{R_{E(AC)} R_A + r_\pi [R_A + (1 + g_m r_o) R_{E(AC)}]}$$

→

$$\vartheta_{BE} = \frac{[R_{E(AC)} + R_A] r_\pi}{R_{E(AC)} R_A + r_\pi [R_A + (1 + g_m r_o) R_{E(AC)}]} \vartheta_i$$

Como ϑ_i / i_i é igual à resistência de entrada (R_i^*), vista na base do BJT, então:

$$R_i^* = r_\pi + \frac{R_C^* + (1 + g_m r_\pi) r_o}{R_C^* + r_o + R_{E(AC)}} \times R_{E(AC)} \tag{1}$$

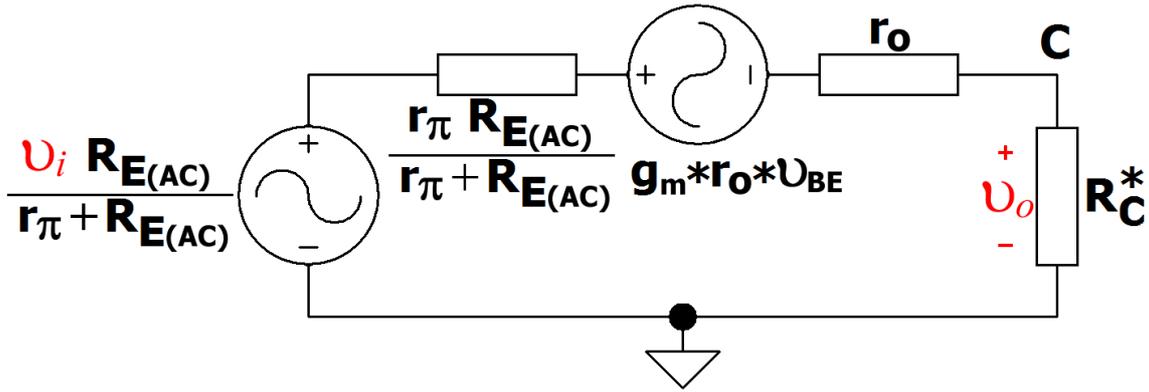


Figura 3 - Amplificador EC com Modelo Compactado a Partir da Entrada.

Usando-se novamente os Teoremas de Thévenin e de Norton, o circuito da Figura 1 pode ser reduzido, a partir da entrada, como mostra a Figura 3. A tensão de saída do circuito, calculada através da corrente da malha, vale, portanto:

$$\vartheta_o = \frac{[R_{E(AC)} - g_m r_\pi r_o] R_C^*}{[R_{E(AC)} + r_o + R_C^*] r_\pi + [R_C^* + (1 + g_m r_\pi) r_o] R_{E(AC)}} \times \vartheta_i \quad (2)$$

A grandeza ϑ_o é a tensão de saída e R_C^* é a carga total do circuito, que vale:

$$R_C^* = \frac{R_C R_L}{R_C + R_L}$$

Se o circuito estiver em vazio, isto é, se $R_L \rightarrow \infty$, então $R_C^* = R_C$ e $\vartheta_o = \vartheta_{o(vazio)}$. Assim:

$$\vartheta_{o(vazio)} = \frac{[R_{E(AC)} - g_m r_\pi r_o] R_C}{[R_{E(AC)} + r_o + R_C] r_\pi + [R_C + (1 + g_m r_\pi) r_o] R_{E(AC)}} \times \vartheta_i \quad (3)$$

Se, no entanto, o circuito estiver com a saída em curto-circuito, então $R_L = 0$, $R_C^* = 0$, $\vartheta_o = 0$ e, consequentemente:

$$i_{o(curto)} = \frac{R_{E(AC)} - g_m r_\pi r_o}{[R_{E(AC)} + r_o] r_\pi + (1 + g_m r_\pi) r_o R_{E(AC)}} \times \vartheta_i \quad (4)$$

A resistência de saída de um circuito qualquer vale $R_o = \vartheta_{o(vazio)} / i_{o(curto)}$. Então, dividindo-se a Equação 3 pela Equação 4, conclui-se que:

$$R_o = \frac{[(R_{E(AC)} + r_o) r_\pi' + (1 + g_m r_\pi) r_o R_{E(AC)}] R_C}{[R_{E(AC)} + r_o + R_C] r_\pi' + [R_C + (1 + g_m r_\pi) r_o] R_{E(AC)}} \quad [\Omega] \quad (5)$$

A grandeza r_π' , como mostra o circuito da Figura 1, agrega todas as resistências que estão ligadas na entrada do amplificador (r_π ; $R_{B(AC)}$ e R_{ger}), que não foram computadas até agora. Vale, portanto, para $\vartheta_i = 0$:

$$r_\pi' = r_\pi + \frac{R_{ger} R_{B(AC)}}{R_{ger} + R_{B(AC)}}$$

Como a resistência de entrada também engloba a resistência de base, vista pelo sinal AC, ela vale $R_i = R_i^* // R_{B(AC)}$. Então a resistência de entrada do amplificador vale:

$$R_i = \frac{R_i^* R_{B(AC)}}{R_i^* + R_{B(AC)}} \quad [\Omega] \quad (6)$$

O ganho de tensão do amplificador, dado pela relação $\vartheta_o / \vartheta_i$, segundo a Equação 2, vale:

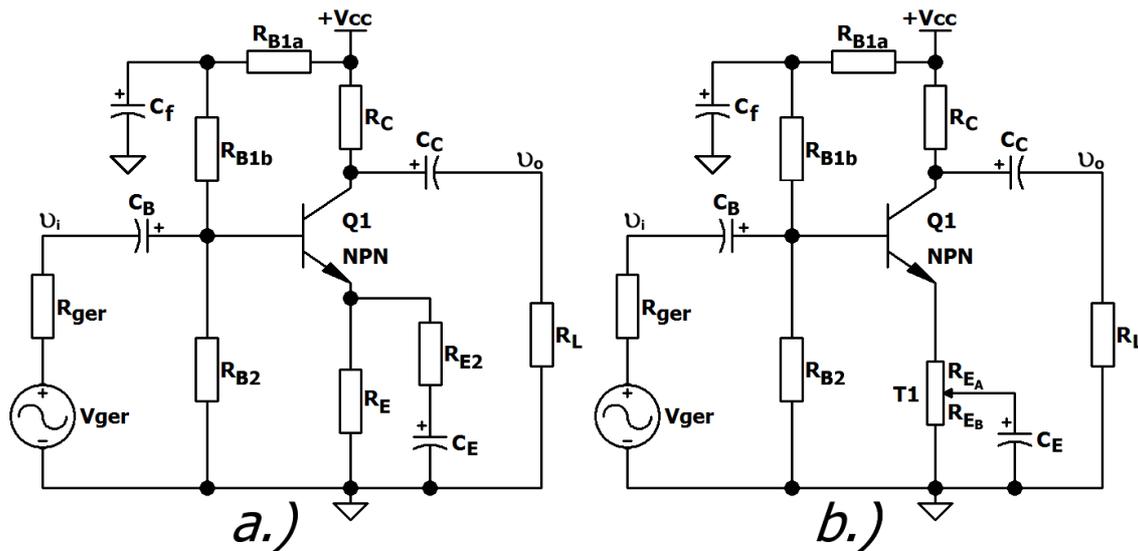


Figura 4 - Amplificadores EC Genéricos. a.) Com Ganho de Tensão Fixo. b.) Com Ganho de Tensão Ajustável.

$$A_{\vartheta} = \frac{[R_{E(AC)} - g_m r_{\pi} r_o] R_C^*}{[R_{E(AC)} + r_o + R_C^*] r_{\pi} + [R_C^* + (1 + g_m r_{\pi}) r_o] R_{E(AC)}} \quad [V/V] \quad (7)$$

Em relação ao gerador, o ganho de tensão do amplificador vale:

$$A_{\vartheta g} = \frac{R_i}{R_{ger} + R_i} \times A_{\vartheta}$$

A Figura 4 mostra dois exemplos de amplificadores genéricos, do tipo emissor-comum. Nesses amplificadores, a diferenciação entre os comportamentos em DC e AC é feita pelas seguintes relações:

- Em DC:

$$I_{Cq} = \frac{\left(\frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_{B1} + R_B}\right) \beta R_B}{R_B + (\beta + 1) R_E} \quad \text{e} \quad V_{CEq} = V_{CC} - \left[R_C + \frac{\beta + 1}{\beta} R_E\right] I_{Cq}$$

$$R_B = \frac{R_{B1} R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} ; \quad R_{B1} = R_{B1a} + R_{B1b} ; \quad R_E = R_E \quad \text{ou} \quad R_E = R_{EA} + R_{EB}$$

- Em AC:

$$R_{B(AC)} = \frac{R_{B2} R_{B1b}}{R_{B2} + R_{B1b}} ; \quad R_{E(AC)} = \frac{R_E R_{E2}}{R_E + R_{E2}} \quad \text{ou} \quad R_{E(AC)} = R_{EA}$$

Pelo teorema da superposição, em análise AC, a fonte V_{CC} deve ser anulada e os capacitores C_B , C_C , C_E e C_f , por possuírem forçosamente reatâncias baixas na faixa de frequências de interesse, devem ser considerados como curtos-circuitos, para a análise em AC.

- Exemplo 1:

O circuito da Figura 4a foi polarizado com as seguintes grandezas: $V_{CC} = +30 \text{ V}$, $R_{B1a} = 20 \text{ k}\Omega$, $R_{B1b} = 180 \text{ k}\Omega$, $R_{B2} = 33 \text{ k}\Omega$, $R_C = 6,8 \text{ k}\Omega$ e $R_E = 1,5 \text{ k}\Omega$. O resistor R_{E2} teve seu valor ajustado para $1,08 \text{ k}\Omega$ e $R_{ger} = 1,0 \text{ k}\Omega$. Assim:

- Sabendo-se que o transistor, tipo Q_{sed} , possui $\beta_{AC} = \beta = 102,2$; $V_{BE} = 0,7 \text{ V}$ e $V_{AF} = \infty$, calcular para o amplificador: R_i , R_o , A_{ϑ} e $A_{\vartheta g}$, em vazio, para pequenos sinais e baixas frequências. Considerar todos os capacitores como curtos-circuitos em AC.
- Dizer se o circuito foi bem polarizado e se o fator de estabilidade (S) do ponto quiescente está adequado.

- c.) Calcular também as porcentagens dos erros obtidos se as grandezas AC do amplificador, em vazio, forem calculadas pelas atrativas e supercompactas equações:

$$A_{\vartheta} = -\frac{R_C}{R_{E(AC)}} ; R_i^* = r_{\pi} + (\beta + 1)R_{E(AC)} \text{ e } R_o = R_C$$

- Resolução:

- a.) Cálculo das grandezas DC e AC:

- Em DC:

$$R_{B1} = 20k + 180k = 200k; R_B = \frac{200k \times 33k}{200k + 33k} = 28,3262k ; R_E = 1,5k$$

$$I_{Cq} = \frac{\left(\frac{30}{200k} - \frac{0,7}{28,3262k}\right) 102,2 \times 28,3262k}{28,3262k + 103,2 \times 1,5k} = 1,9806 \text{ mA}$$

$$V_{CEq} = 30 - \left[6,8k + \frac{102,2 + 1}{102,2} \times 1,5k\right] \times 1,9806 \text{ mA} = 13,532 \text{ V}$$

$$g_m = \frac{1,9806 \text{ mA}}{25,865 \text{ mV}} = 76,5748 \text{ mA/V} ; r_{\pi} = \frac{102,2}{76,5748 \text{ mA/V}} = 1,3346 \text{ k}\Omega ; r_o = \infty$$

- Em AC:

$$R_{B(AC)} = \frac{180k \times 33k}{180k + 33k} = 27,8873 \text{ k}\Omega ; R_{E(AC)} = \frac{1,5k \times 1,08k}{1,5k + 1,08k} = 627,907 \Omega$$

$$A_{\vartheta} = \frac{-102,2 \times 6,8k}{[627,907 + 6,8k] 1,3346k + 103,2 \times 627,907} \rightarrow \boxed{A_{\vartheta} = -10,5083 \text{ V/V}}$$

$$R_i^* = 1,3346k + 103,2 \times 1,5k = 66,1346 \text{ k}\Omega$$

$$R_i = \frac{66,1346k \times 27,8873k}{66,1346k + 27,8873k} \rightarrow \boxed{R_i = 19,6158 \text{ k}\Omega}$$

$$A_{\vartheta g} = \frac{R_i}{R_i + R_{ger}} \times A_{\vartheta} = -\frac{19,6158k}{20,6158k} \times 10,50826 = -9,9985 \text{ V/V}$$

$$\boxed{R_o = R_C = 6,8 \text{ k}\Omega}$$

b.) O circuito foi razoavelmente bem polarizado porque o fator de estabilização do ponto quiescente, $S = 1 + 28,3262k/1,5k = 19,88$, possui um valor adequado e deixa o ponto de polarização estável. Além disso, foi providenciado um filtro contra ruídos na polarização de base (R_{b1a} e C_f), que melhora o desempenho do circuito.

- d.) Pelas equações compactas de cálculo:

$$A_{\vartheta} = -\frac{6,8k}{627,907} = -10,83 \text{ V/V} ; R_i^* = 1,3346 \text{ k} + 103,2 \times 627,907 = 66,1346 \text{ k}\Omega$$

e

$$R_o = 6,8 \text{ k}\Omega$$

Apenas o valor do ganho de tensão acusou um erro de 3,06 % em relação ao valor calculado com exatidão. As resistências, de entrada e a de saída, coincidiram com as calculadas, porque $V_{AF} = \infty$.

2.) Base-Comum:

Análise do amplificador BC genérico:

A Figura 5 apresenta o modelo linearizado, para pequenos sinais e baixas frequências, de um amplificador BC genérico, com o resistor R_B não desacoplado.

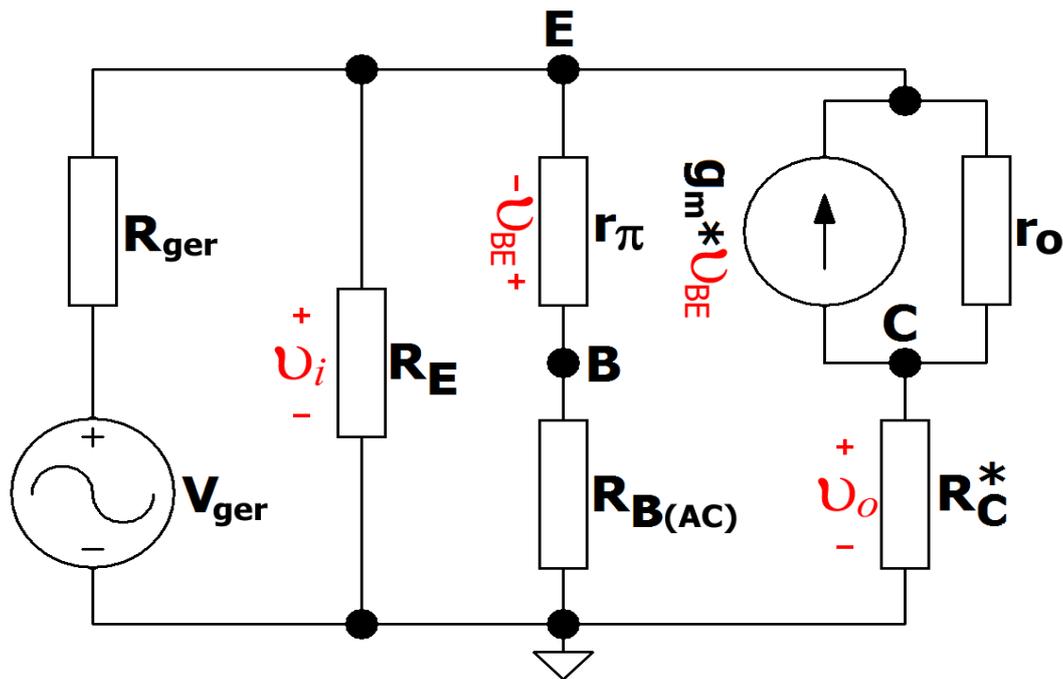


Figura 5 - Modelo Linearizado do Amplificador BC Genérico.

Aplicando-se os Teoremas de Norton e de Thévenin ao circuito da Figura 5, pode-se, a partir da saída, reduzir o circuito a uma malha apenas, como mostra a Figura 6.

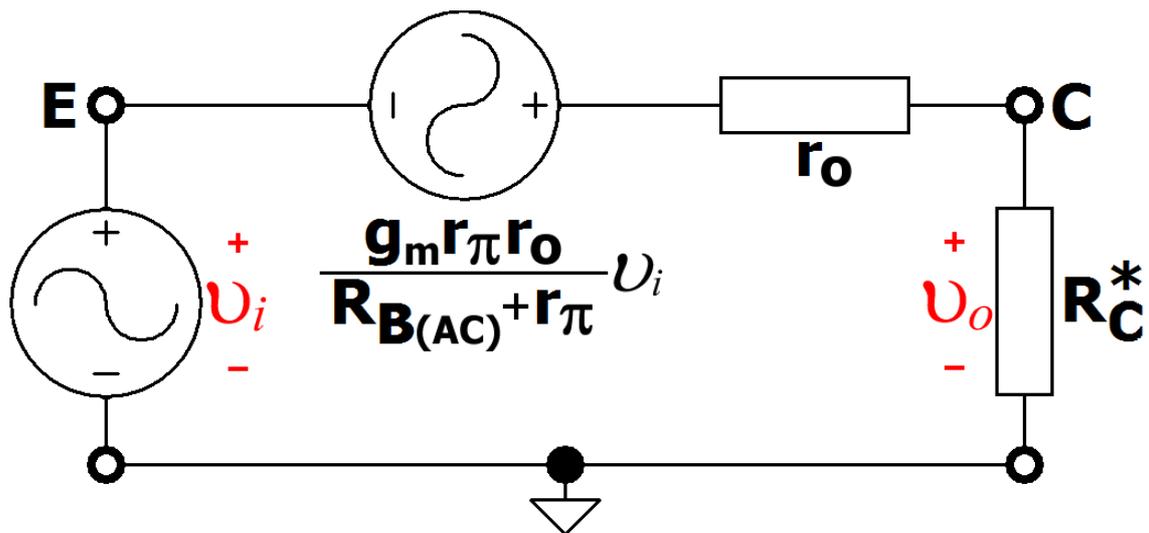


Figura 6 - Amplificador BC com Modelo Compactado a Partir da Saída.

Pelo circuito da Figura 5 tem-se que:

$$\vartheta_{BE} = -\frac{r_{\pi}}{R_{B(AC)} + r_{\pi}} \times \vartheta_i$$

Usando-se esse valor e equacionando-se o circuito da Figura 6, calcula-se a corrente da malha (i_o), que vale:

$$i_o = \frac{\left(1 + \frac{g_m r_{\pi} r_o}{R_{B(AC)} + r_{\pi}}\right)}{r_o + R_C^*} \times \vartheta_i$$

Então:

$$\vartheta_o = \frac{[R_{B(AC)} + r_{\pi} + g_m r_{\pi} r_o] R_C^*}{[R_{B(AC)} + r_{\pi}](r_o + R_C^*)} \times \vartheta_i$$

Assim, o ganho de tensão vale:

$$A_{\vartheta} = \frac{[R_{B(AC)} + r_{\pi} + g_m r_{\pi} r_o] R_C}{[R_{B(AC)} + r_{\pi}](r_o + R_C^*)} \quad (1)$$

Pela Figura 5, a corrente de entrada, inserida no emissor, vale:

$$i_i = \frac{\vartheta_i}{r_{\pi} + R_{B(AC)}} + i_o = \frac{\vartheta_i}{r_{\pi} + R_{B(AC)}} + \frac{R_{B(AC)} + r_{\pi} + g_m r_{\pi} r_o}{(R_{B(AC)} + r_{\pi})(r_o + R_C^*)} \times \vartheta_i$$

→

$$i_i = \frac{r_o + R_C^* + R_{B(AC)} + r_{\pi} + g_m r_{\pi} r_o}{(R_{B(AC)} + r_{\pi})(r_o + R_C^*)} \times \vartheta_i$$

A resistência de entrada, vista no emissor ($R_i^* = \vartheta_i / i_i$), vale, portanto:

$$R_i^* = \frac{(R_{B(AC)} + r_{\pi})(r_o + R_C^*)}{R_C^* + R_{B(AC)} + r_{\pi} + (1 + g_m r_{\pi}) r_o}$$

A resistência de entrada do amplificador vale, portanto:

$$R_i = \frac{R_i^* \times R_E}{R_i^* + R_E} \quad (2)$$

Pela Equação 1, a tensão de saída em vazio, vale:

$$\vartheta_{o(\text{vazio})} = \frac{[R_{B(AC)} + r_{\pi} + g_m r_{\pi} r_o] R_C}{[R_{B(AC)} + r_{\pi}](r_o + R_C)} \times \vartheta_i$$

Por outro lado, a corrente de saída em curto-circuito vale:

$$i_{o(\text{curto})} = \frac{[R_{B(AC)} + r_{\pi} + g_m r_{\pi} r_o]}{[R_{B(AC)} + r_{\pi}] r_o} \times \vartheta_i$$

Então a resistência de saída, $R_o = \vartheta_{o(\text{vazio})} / i_{o(\text{curto})}$, vale:

$$R_o = \frac{r_o \times R_C}{r_o + R_C} \quad (3)$$

A Equação 3, embora razoavelmente precisa, não é exata, pois não leva em conta a influência dos componentes ligados na entrada. Essa equação, no entanto, é usada pela maioria dos textos de eletrônica. A equação exata pode ser obtida na Apostila “BJT, Epítome” [1]. Como no caso do amplificador EC, em relação ao gerador, o ganho de tensão do amplificador BC vale:

$$A_{\vartheta g} = \frac{R_i}{R_i + R_{ger}} \times A_{\vartheta}$$

Em linhas gerais, se polarizados no mesmo ponto quiescente, os amplificadores EC e BC possuem o mesmo ganho de tensão, em módulo. O EC é, no entanto, um amplificador inversor e o BC não. A resistência de entrada do amplificador BC é muito baixa, enquanto que a resistência de entrada do EC é média ou alta. As resistências de saída dos dois amplificadores possuem amplitudes muito próximas e altas, sendo que a do BC é, geralmente, levemente superior. A Figura 7b mostra um amplificador base-comum, com resistência de base desacoplada, contrapondo-se com um amplificador emissor comum, com resistência de emissor desacoplada, mostrado na Figura 7a. É interessante comparar o desempenho dos dois amplificadores, polarizados no mesmo ponto quiescente.

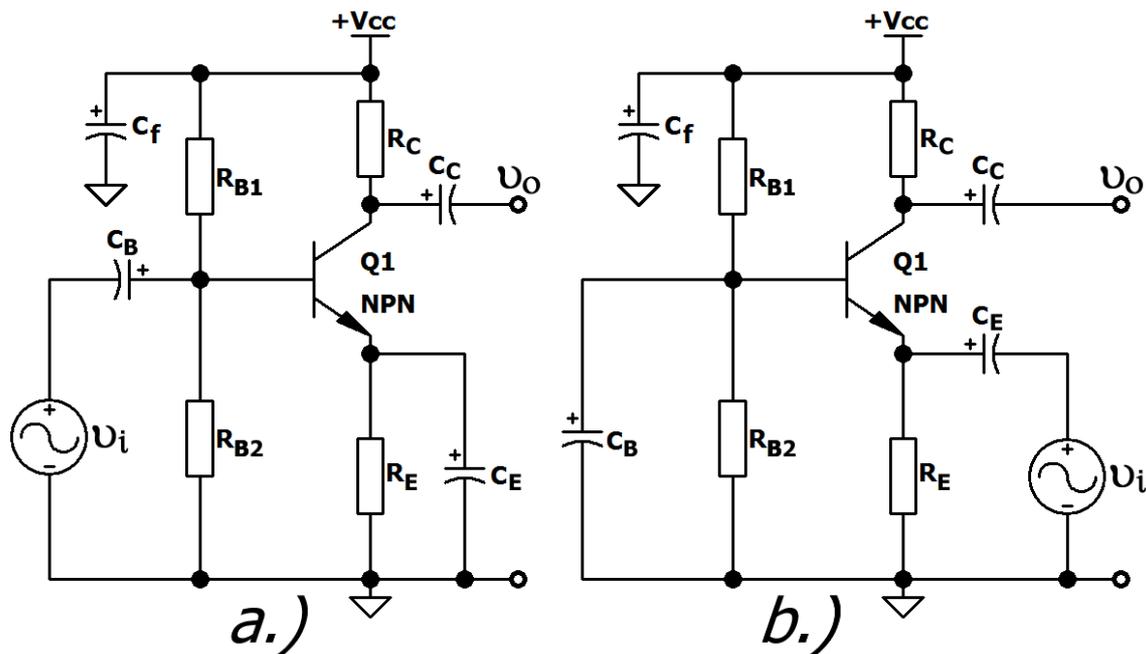


Figura 7 - Amplificadores Básicos. a.) Amplificador EC com R_E Desacoplado. b.) Amplificador BC com R_E Desacoplado.

- Exemplo 2:

Comparar os valores das grandezas elétricas de pequenos sinais e baixas frequências (R_i ; R_o e A_{θ}) fornecidas pelos dois amplificadores da Figura 7. As resistências de polarização valem: $R_{B1} = 200 \text{ k}\Omega$, $R_{B2} = 33 \text{ k}\Omega$, $R_C = 6,8 \text{ k}\Omega$ e $R_E = 1,5 \text{ k}\Omega$. A fonte de alimentação vale: $V_{CC} = +30 \text{ V}$ e o transistor, tipo Q_{sed} , possui $\beta_{AC} = \beta = 102,2$; $V_{BE} = 0,7 \text{ V}$ e $VAF = \infty$. Considerar todos os capacitores como curtos-circuitos em AC.

- Resolução:

Os pontos de polarização dos dois transistores são idênticos e iguais ao do transistor do Exemplo 1. Portanto: $I_{Cq} = 1,9806 \text{ mA}$ e $V_{CEq} = 13,532 \text{ V}$. Os parâmetros incrementais também são iguais e valem: $g_m = 76,5748 \text{ mA/V}$; $r_{\pi} = 1,3346 \text{ k}\Omega$ e $r_o = \infty$. Então:

- Para o EC:

$$R_{B(AC)} = \frac{200k \times 33k}{200k + 33k} = 28,3262 \text{ k}\Omega \quad ; \quad R_{E(AC)} = 0 \Omega$$

$$A_{\theta(EC)} = -g_m R_C = 76,5748 \text{ mA/V} \times 6,8 \text{ k}\Omega \rightarrow \boxed{A_{\theta(EC)} = -520,7086 \text{ V/V}}$$

$$R_i^* = 1,3346 \text{ k}\Omega$$

$$R_i = \frac{1,3346k \times 28,3262k}{1,3346k + 28,3262k} = 1,2746 \text{ k}\Omega \quad \text{e} \quad R_o = R_C = 6,8 \text{ k}\Omega$$

- Para o BC:

$$A_{\theta(BC)} = g_m R_C = 76,5748 \text{ mA/V} \times 6,8 \text{ k}\Omega \rightarrow \boxed{A_{\theta(BC)} = 520,7086 \text{ V/V}}$$

$$R_i^* = \frac{r_{\pi}}{(1 + g_m r_{\pi})} = \frac{1,3346k}{103,2} = 12,9326 \Omega$$

$$R_i = \frac{R_i^* \times R_E}{R_i^* + R_E} = \frac{12,9326 \times 1,5k}{12,9326 + 1,5k} = 12,822 \Omega \quad \text{e} \quad R_o = R_C = 6,8 \text{ k}\Omega$$

Os amplificadores possuem resistências de saída idênticas e ganhos de tensão idênticos, em módulo. As resistências de entrada, no entanto, são bem diferentes, sendo da faixa média/alta para o EC e muito baixa para o BC.

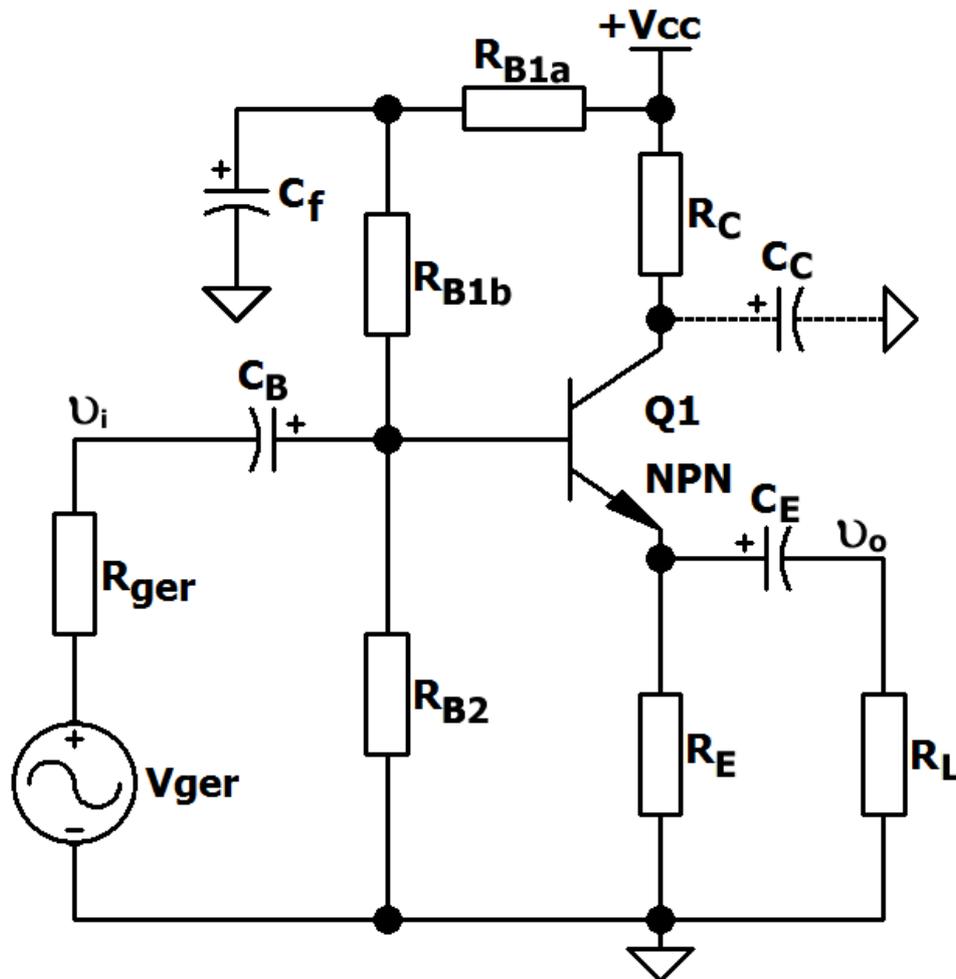


Figura 8 - Amplificador Coletor-Comum Genérico.

3.) Coletor-Comum:

A Figura 8 apresenta o esquemático de um amplificador coletor-comum, também conhecido como seguidor de emissor pelo fato de possuir ganho de tensão muito próximo da unidade e de ter sua saída no emissor. O resistor R_C foi deixado no circuito para torná-lo o mais genérico possível. Se $C_C = 0$, então $R_{C(AC)} = R_C$. Se, no entanto, $C_C \gg 0$, então $R_{C(AC)} = 0$. Normalmente, $R_C = 0$, tanto para AC, quanto para DC. Para pequenos sinais e baixas frequências, o circuito linearizado equivalente ao circuito da Figura 8 é igual ao da Figura 9, apresentado mais compactado na Figura 10.

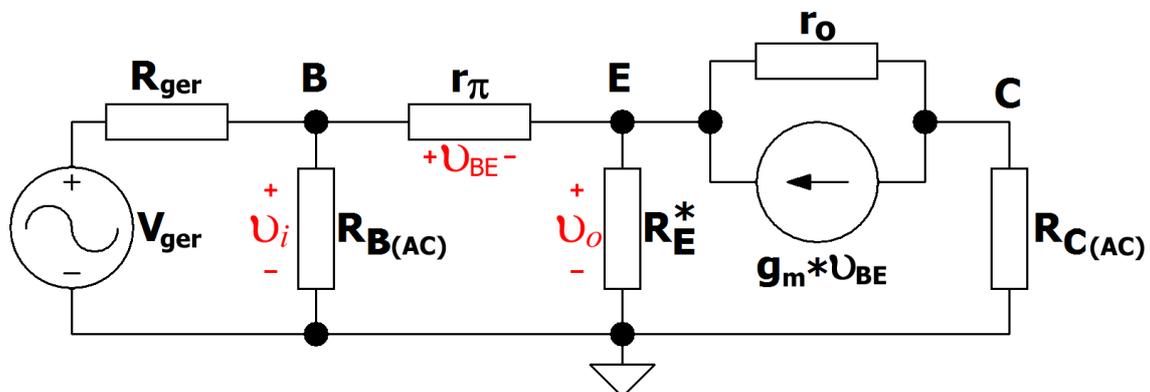


Figura 9 - Modelo Linearizado para Pequenos Sinais e Baixas Frequências do Amplificador Coletor-Comum.

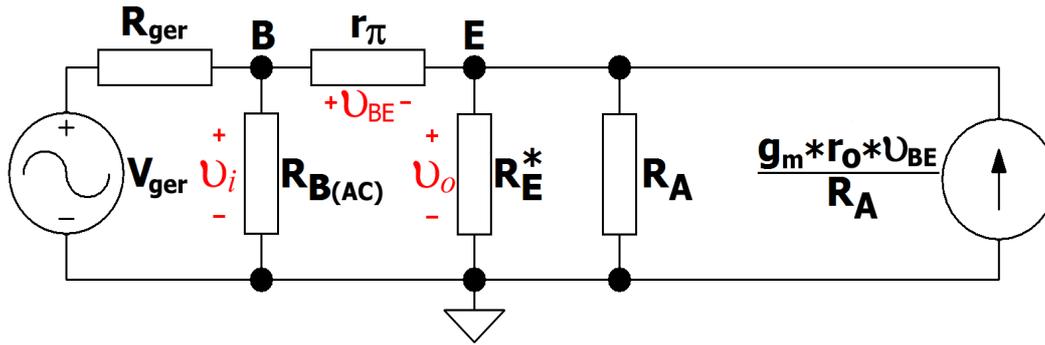


Figura 10 - Circuito da Figura 9 com a Malha de Coletor Compactada.

No circuito da Figura 10, tem-se que: $R_A = r_o + R_{C(AC)}$ e $\vartheta_{BE} = \vartheta_i - \vartheta_o$. Equacionando-se o circuito por cálculo de tensões de nós, tem-se que:

$$\vartheta_o = \frac{\frac{\vartheta_i}{r_\pi} + \frac{g_m r_o \vartheta_{BE}}{R_A}}{\frac{1}{r_\pi} + \frac{1}{R_E^*} + \frac{1}{R_A}} = \frac{\frac{\vartheta_i}{r_\pi} + \frac{g_m r_o \vartheta_i}{r_o + R_{C(AC)}} + \frac{g_m r_o \vartheta_o}{r_o + R_{C(AC)}}}{\frac{1}{r_\pi} + \frac{1}{R_E^*} + \frac{1}{r_o + R_{C(AC)}}$$

Portanto:

$$\vartheta_o = \frac{\left(\frac{r_o + R_{C(AC)}}{r_o} + g_m r_\pi\right) r_o R_E^*}{\left(\frac{r_o + R_{C(AC)}}{r_o} + g_m r_\pi\right) r_o R_E^* + (r_o + R_{C(AC)} + R_E^*)} \times \vartheta_i$$

Então:

$$\vartheta_{o(vazio)} = \frac{\left(\frac{r_o + R_{C(AC)}}{r_o} + g_m r_\pi\right) r_o R_E}{\left(\frac{r_o + R_{C(AC)}}{r_o} + g_m r_\pi\right) r_o R_E + (r_o + R_{C(AC)} + R_E)} \times \vartheta_i$$

e

$$i_{o(curto)} = \frac{[R_{C(AC)} + (1 + g_m r_\pi) r_o]}{[r_o + R_{C(AC)}] r_\pi} \times \vartheta_i$$

Assim, sabendo-se que $R_o = \vartheta_{o(vazio)} / i_{o(curto)}$, e agregando-se todas as resistências que estão ligadas na entrada do amplificador, tem-se que a resistência de saída vale:

$$R_o = \frac{[r_o + R_{C(AC)}] R_E r'_\pi}{[R_{C(AC)} + (1 + g_m r_\pi) r_o] R_E + (r_o + R_{C(AC)} + R_E) r'_\pi}$$

Onde:

$$r'_\pi = r_\pi + \frac{R_{ger} \times R_{B(AC)}}{R_{ger} + R_{B(AC)}}$$

O ganho de tensão $A_\vartheta = \vartheta_o / \vartheta_i$, como já foi calculado, vale:

$$A_\vartheta = \frac{[R_{C(AC)} + (1 + g_m r_\pi) r_o] R_E^*}{[R_{C(AC)} + (1 + g_m r_\pi) r_o] R_E^* + (r_o + R_{C(AC)} + R_E^*) r_\pi}$$

A resistência de entrada, vista na base do transistor, é calculada de maneira idêntica a do amplificador EC com R_E não desacoplado, tal como na Equação 1. Vale, portanto:

$$R_i^* = r_\pi + \frac{R_{C(AC)} + (1 + g_m r_\pi) r_o}{R_E^* + r_o + R_{C(AC)}} \times R_E^*$$

Então, a resistência de entrada do amplificador vale:

$$R_i = \frac{R_{B(AC)} \times R_i^*}{R_{B(AC)} + R_i^*}$$

Em relação ao gerador, o ganho de tensão do amplificador CC vale:

$$A_{vg} = \frac{R_i}{R_{ger} + R_i} \times A_{\theta}$$

- Exemplo 3:

Calcular os valores das grandezas elétricas AC, de pequenos sinais e baixas frequências, (R_i ; R_o e A_{θ}) do amplificador da Figura 8, em vazio. As grandezas de polarização valem: $V_{CC} = +30$ V, $R_{B1a} = 20$ k Ω , $R_{B1b} = 180$ k Ω , $R_{B2} = 33$ k Ω , $R_C = 6,8$ k Ω , $R_E = 1,5$ k Ω e $R_{ger} = 1,0$ k Ω . O transistor, tipo Q_{sed} , possui $\beta_{AC} = \beta = 102,2$; $V_{BE} = 0,7$ V e $V_{AF} = \infty$. Considerar todos os capacitores, inclusive C_C , como curtos-circuitos em AC.

- Resolução:

- Em DC:

$$R_{B1} = 20k + 180k = 200k; \quad R_B = \frac{200k \times 33k}{200k + 33k} = 28,3262k; \quad R_E = 1,5k$$

$$I_{Cq} = \frac{\left(\frac{30}{200k} - \frac{0,7}{28,3262k}\right) 102,2 \times 28,3262k}{28,3262k + 103,2 \times 1,5k} = 1,9806 \text{ mA}$$

$$V_{CEq} = 30 - [6,8k + 1,0098 \times 1,5k] \times 1,9806m = 13,532 \text{ V}$$

$$g_m = \frac{1,9806m}{25,865m} = 76,5748 \text{ mA/V}; \quad r_{\pi} = \frac{102,2}{76,5748m} = 1,3346 \text{ k}\Omega; \quad r_o = \infty$$

- Em AC:

$$R_{B(AC)} = \frac{180k \times 33k}{180k + 33k} = 27,8873 \text{ k}\Omega; \quad R_{C(AC)} = 0 \Omega; \quad R_E^* = R_E = 1,5 \text{ k}\Omega$$

$$A_{\theta} = \frac{(1 + g_m r_{\pi}) R_E}{r_{\pi} + (1 + g_m r_{\pi}) R_E} = \frac{103,2 \times 1,5k}{1,3346k + 103,2 \times 1,5k} \rightarrow \boxed{A_{\theta} = 0,99145 \text{ V/V}}$$

$$R_i^* = 1,3346k + 103,2 \times 1,5k = 156,1346 \text{ k}\Omega$$

$$R_i = \frac{136,1346k \times 27,8873k}{136,1346k + 27,8873k} \rightarrow \boxed{R_i = 23,6612 \text{ k}\Omega}$$

$$r_{\pi}' = r_{\pi} + \frac{R_{ger} \times R_{B(AC)}}{R_{ger} + R_{B(AC)}} = 1,3346k + \frac{1k \times 27,8873k}{1k + 27,8873k} = 2,3k$$

$$R_o = \frac{R_E r_{\pi}'}{r_{\pi}' + (1 + g_m r_{\pi}) R_E} = \frac{1,5k \times 2,3k}{2,3k + 103,2 \times 1,5k} \rightarrow \boxed{R_o = 21,96 \Omega}$$

$$A_{vg} = \frac{R_i}{R_i + R_{ger}} \times A_{\theta} = -\frac{19,6158k}{20,6158k} \times 0,9915 = 0,95125 \text{ V/V}$$

- Observação:

O comportamento dinâmico desses três tipos de amplificadores básicos, isto é, a resposta em frequências nas baixas e nas altas, não foi calculada neste texto. As equações que calculam esses valores estão listadas na Apostila "BJT – Resumo da Teoria" [1].

Para simular os circuitos no LTspice usar: **.model Qsed npn(Is=3.49232874f Bf=102.2)**

- Referência:

1. P. R. Veronese, *BJT-Resumo da Teoria*, SEL-EESC-USP, pags. 10, 12, 15 - 2015.