

---

---



[www.eletricatotal.net](http://www.eletricatotal.net)

## Estudo Analítico de um Amplificador de Dois Estágios

---

by Prof. Claudir Barbieri

---

### 1 Problema

Para o circuito mostrado na Figura 1, pede-se os valores de  $R_{c1}$  e  $R_{c2}$  que satisfaça as seguintes condições:

$$A_v = 12 \quad e \quad V_o = 8 \text{ V(DC)}$$

São dados os seguintes valores dos componentes do circuito:

$$R_a = 10K\Omega \quad R_g = 1K\Omega \quad r_i = 10\Omega$$

$$R_{E1} = 100\Omega \quad R_{E2} = 100\Omega \quad V_{cc} = 18 \text{ V}$$

Os parâmetros dos transistores são:

$$\beta \approx 100 \quad h_{fe} \approx 200$$

$$h_{ie} \approx 100\Omega \quad 1/h_{oe} \approx 10K\Omega$$

$$V_{ce_{sat}} \approx 0,8 \text{ V} \quad V_D \approx 0,65 \text{ V}$$

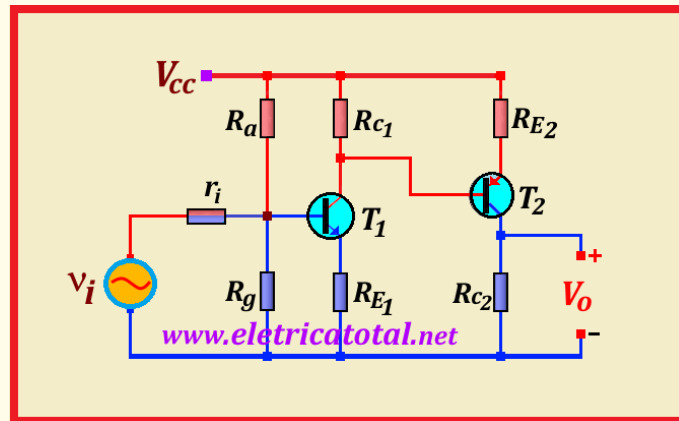


Figura 1: Circuito a ser estudado

## 2 Introdução

Para a resolução deste problema vamos desconsiderar a resistência ( $r_i$ ) em série com  $v_i$  por ser um valor muito pequeno quando comparado aos valores dos demais resistores do circuito. Também vamos desconsiderar o valor de  $1/h_{oe}$  por ser um valor bem acima dos resistores e parâmetros dos transistores.

## 3 Análise AC

Para solucionar este problema vamos começar fazendo uma análise do amplificador para pequenos sinais AC. Então, na Figura 2 vemos o modelo para pequenos sinais do primeiro estágio, sem considerar o circuito de coletor.

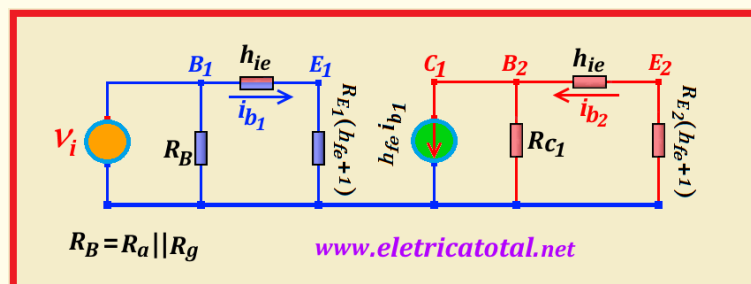


Figura 2: Modelo para pequenos sinais

A partir do circuito da Figura 2, podemos escrever:

$$ib_1 = v_i \frac{1}{hie_1 + R_{E1}(h_{fe} + 1)}$$

Porém, sabemos que:  $R_{E1}(h_{fe} + 1) \gg hie_1$ . Logo, podemos simplificar, encontrando:

$$ib_1 \approx v_i \frac{1}{R_{E1}(h_{fe} + 1)} \quad (1)$$

Agora, prestando atenção ao lado direito da figura, vamos expressar o valor de  $ib_2$  em função de  $ib_1$  fazendo um divisor de corrente, ou seja:

$$ib_2 = h_{fe} ib_1 \frac{Rc_1}{hie_2 + R_{E2}(h_{fe} + 1) + Rc_1}$$

Aqui também podemos fazer uma simplificação, sabendo que  $R_{E2}(h_{fe} + 1) \gg hie_2 + Rc_1$

Desta forma, podemos escrever que:

$$ib_2 \approx h_{fe} ib_1 \frac{Rc_1}{R_{E2}(h_{fe} + 1)} \quad (2)$$

Substituindo (1) em (2), obtemos:

$$ib_2 = v_i \frac{h_{fe} Rc_1}{[R_{E1}(h_{fe} + 1)] [R_{E2}(h_{fe} + 1)]} \quad (3)$$

Porém, no nosso caso, temos  $R_E = R_{E1} = R_{E2}$ . Assim, é possível escrever:

$$ib_2 = v_i \frac{h_{fe} Rc_1}{[R_E(h_{fe} + 1)]^2} \quad (4)$$

Por outro lado, na figura abaixo vemos o modelo para pequenos sinais do coletor do segundo transistor. Facilmente encontramos a relação:

$$v_o = h_{fe} Rc_2 ib_2 \quad (5)$$

Substituindo (4) em (5), obtemos:

$$v_o = v_i \frac{(h_{fe})^2 Rc_1 Rc_2}{[R_E(h_{fe} + 1)]^2} \quad (6)$$

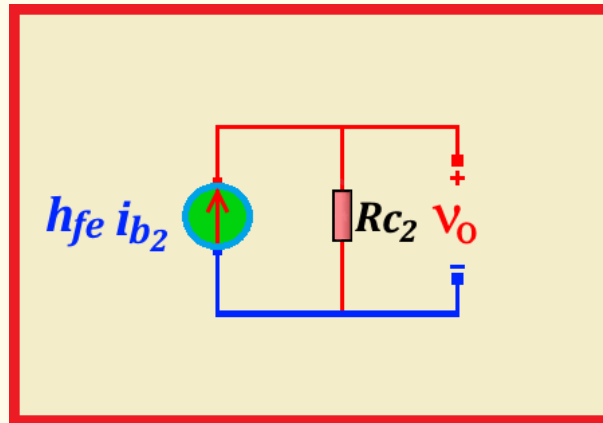


Figura 3: Modelo coletor do segundo transistor

Podemos reescrever a equação acima, da seguinte forma:

$$v_o = v_i \frac{Rc_1 Rc_2}{(R_E)^2 \frac{(h_{fe}+1)^2}{(h_{fe})^2}} \quad (7)$$

Como  $h_{fe} \gg 1$  então podemos fazer a aproximação  $\frac{h_{fe}}{h_{fe}+1} \approx 1$ . Assim, conseguimos a relação final, ou:

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} \approx \frac{Rc_1 Rc_2}{(R_E)^2} \quad (8)$$

Para o nosso problema sabemos que  $R_E = 100\Omega$  e  $A_v = 12$ . Substituindo esses valores em (8), obtemos uma relação entre  $Rc_1$  e  $Rc_2$ , ou seja:

$$Rc_1 Rc_2 = A_v (R_E)^2 = 120.000$$

Vamos reescrever, de tal forma que:

$$Rc_2 = \frac{120.000}{Rc_1} \quad (9)$$

Vamos guardar essa relação enquanto fazemos uma análise DC para o circuito.

## 4 Análise DC

Como  $\beta \gg 1$  vamos desconsiderar as correntes de base dos transistores e, portanto podemos escrever que:

$$I_C \approx I_E$$

Usando um divisor resistivo de tensão podemos calcular a tensão na base ( $V_{B1}$ ) do primeiro transistor, ou:

$$V_{B1} = V_{cc} \frac{R_g}{R_g + R_a}$$

Como  $V_{cc} = 18 V$ ,  $R_a = 10K\Omega$  e  $R_g = 1K\Omega$ , obtemos:

$$V_{B1} = 1,65 V$$

Com o valor de  $V_{B1}$  conseguimos calcular o valor de  $V_{E1}$ , ou:

$$V_{E1} = V_{B1} - V_D = 1,65 - 0,65 = 1V$$

Com este valor calculamos a corrente de emissor do primeiro transistor, ou:

$$I_{E1} = \frac{V_{E1}}{R_{E1}} = \frac{1}{100} = 0,01A = 10 mA$$

Agora prestando atenção no circuito do segundo transistor, conforme mostra a Figura 4, podemos escrever a seguinte relação:

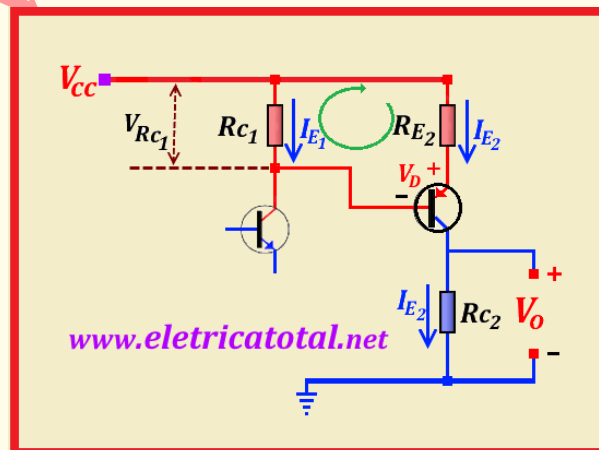


Figura 4: Circuito do segundo transistor

$$V_o = R_{c2} I_{E2} \quad (10)$$

Note que fazendo a malha indicada pela seta verde na Figura 4, temos:

$$R_{E2} I_{E2} + V_D - R_{c1} I_{E1} = 0$$

Dessa forma, podemos encontrar o valor de  $I_{E2}$ , dado por:

$$I_{E2} = \frac{R_{c1} I_{E1} - V_D}{R_{E2}} \quad (11)$$

Substituindo (11) em (10), obtemos:

$$V_o = \frac{R_{c2}}{R_{E2}} (R_{c1} I_{E1} - V_D) \quad (12)$$

Vamos relembrar a equação (9), que relaciona  $R_{c1}$  e  $R_{c2}$ , e substituir na equação acima, encontrando:

$$V_o = \frac{120.000}{R_{c1} R_{E2}} (R_{c1} I_{E1} - V_D) \quad (13)$$

Conhecemos os seguintes valores:  $V_o = 8 V$ ,  $R_{E2} = 100 \Omega$ ,  $I_{E1} = 0,01 A$  e  $V_D = 0,65 V$ . Fazendo a substituição desses valores na equação acima, encontramos o valor de  $R_{c1}$ , ou:

$$R_{c1} = 195 \Omega \quad (14)$$

Ora, recorrendo mais uma vez a equação (9), facilmente encontramos o valor de  $R_{c2}$ , ou:

$$R_{c2} = \frac{120.000}{195} = 615 \Omega \quad (15)$$

## 5 Verificação dos Valores Encontrados

Devemos salientar que o valor de  $I_{E1}$  independe de  $R_{c1}$  e  $R_{c2}$ . Portanto,  $I_{E1} = 10 mA$ . Dessa forma, a queda de tensão sobre o resistor  $R_{c1}$  será:

$$V_{R_{c1}} = R_{c1} I_{E1} = 195 \cdot 0,01 = 1,95 V$$

Conhecendo o valor de  $V_{R_{c1}}$ , podemos calcular o valor de  $I_{E2}$ , desde que:

$$I_{E_2} = \frac{V_{R_{c_1}} - V_D}{R_{E_2}} = \frac{1,3}{100} = 13 \text{ mA}$$

Como fizemos a suposição de que  $I_{C_2} \approx I_{E_2}$ , podemos calcular o valor de  $V_o$ , ou:

$$V_o = R_{c_2} \cdot I_{E_2} = 0,013 \cdot 615 = 7,995 \text{ V}$$

Valor perfeitamente compatível com o exigido no enunciado do problema. Agora, com este dado podemos calcular o valor de  $V_{ce_2}$ , sabendo que  $V_{E_1} = 1,3 \text{ V}$  e  $V_o \approx 8 \text{ V}$ , obtemos:

$$V_{ce_2} = 18 - 1,3 - 8,0 = 8,7 \text{ V}$$

Usando esse dado, podemos determinar a máxima excursão do sinal de entrada. Como  $V_{ce_2} < V_{cc}/2$  então devemos subtrair a tensão de saturação, assim:

$$v_{imax} = \frac{V_{ce_2} - V_{ce_{sat}}}{A_v} = \frac{8,7 - 0,8}{12} = 0,66 \text{ V}$$

Este valor é o da tensão de pico. Caso queira a tensão eficaz, ou RMS, devemos dividir esse valor por  $\sqrt{2}$ . Assim:

$$v_{imax}(rms) = 0,47 \text{ V}_{rms}$$

## 6 Adendo

Pode-se conjecturar que o estágio limitante da excursão máxima do sinal de entrada seja o primeiro estágio. Para calcular o valor de  $V_{ce_1}$  e lembrando que  $V_{E_1} = 1 \text{ V}$  e  $V_{R_{c_1}} = 1,95 \text{ V}$ , então temos:

$$V_{ce_1} = 18 - 1,95 - 1,0 = 15,05 \text{ V}$$

Portanto, o máximo valor de variação que teremos no coletor do primeiro transistor será de:

$$v_p = 18 - 15,05 = 2,95 \text{ V}$$

Para encontrarmos a máxima variação possível no sinal de entrada  $v_i$ , devemos calcular qual é o ganho do primeiro transistor, haja vista que ele, por suposição, é o limitante da excursão máxima. Para isso, vamos nos basear na Figura 5.

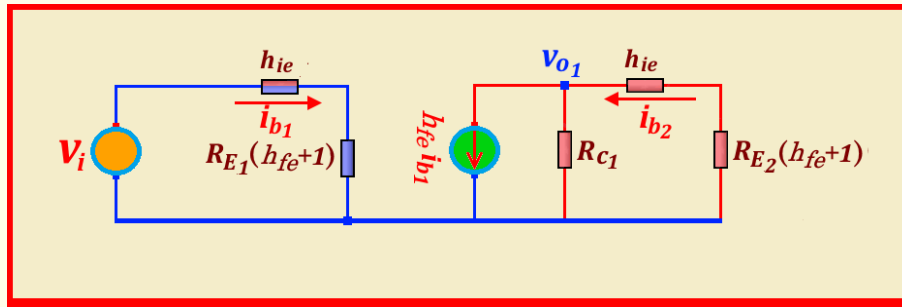


Figura 5: Cálculo do Ganho do primeiro transistor

Baseado no circuito, podemos escrever:

$$|v_{o1}| = [h_{ie} + R_{E2}(h_{fe} + 1)] i_{b2}$$

Como anteriormente, devido à  $h_{ie} \ll R_{E2}(h_{fe} + 1)$  podemos escrever:

$$|v_{o1}| = R_{E2}(h_{fe} + 1) i_{b2}$$

Porém, pela equação (4), é possível escrever:

$$A_{v1} = \frac{|v_{o1}|}{|v_i|} = \frac{h_{fe} R_{C1}}{R_E (h_{fe} + 1)}$$

Valendo-nos da aproximação  $(h_{fe} + 1) \approx h_{fe}$ , temos que:

$$A_{v1} = \frac{|v_{o1}|}{|v_i|} = \frac{R_{C1}}{R_E} = \frac{195}{100} = 1,95$$

Conhecendo o valor do ganho do primeiro estágio, podemos determinar a máxima excursão de  $v_i$ , ou seja:

$$v_{imax} = \frac{v_p}{A_{v1}} = \frac{2,95}{1,95} = 1,51 \text{ V}$$

Porém, perceba que ao aplicarmos na entrada um sinal com este valor, vamos obter na saída do segundo estágio o seguinte valor:

$$V_o = A_v \cdot v_{imax} = 12 \cdot 1,51 = 18,12 \text{ V}$$

Ou seja, um valor maior que  $V_{cc}$ , o que torna esta suposição inviável.