

# **Ánalise DC em Amplificadores com BJT**

**Obs: A apostila “Eletrônica Básica - Amplificadores Analógicos BJT” (Veronese PR, 2014) descreve cálculos sobre análise DC e análise AC de diversos circuitos com BJT.**

**Os exercícios a seguir descrevem apenas a análise DC !**

**Observe:**

**1) O exercício a seguir descreve o cálculo da polarização em um **amplificador cascata com realimentação DC****

**(exercício 9 - resolvido na apostila “BJT - Eletrônica Básica - Amplificadores Analógicos BJT- Exercícios - v. 2014 Rev. 06” (pgs. 35 – 38)**

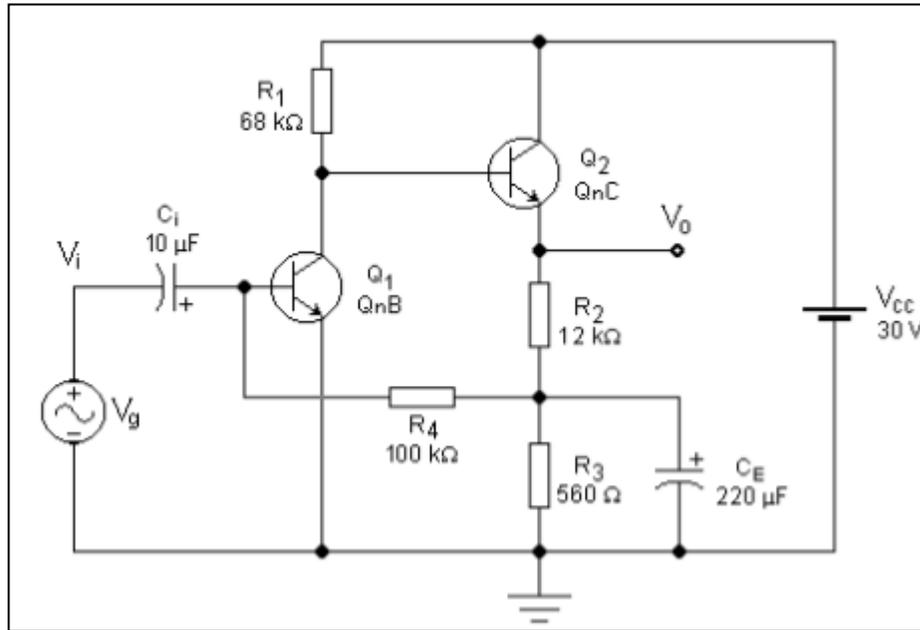
**A análise AC deste exercício (pg. 38 – 41)  
será analisada posteriormente !**

**2) A polarização não é por divisor de tensão (a mais utilizada devido a estabilidade)**

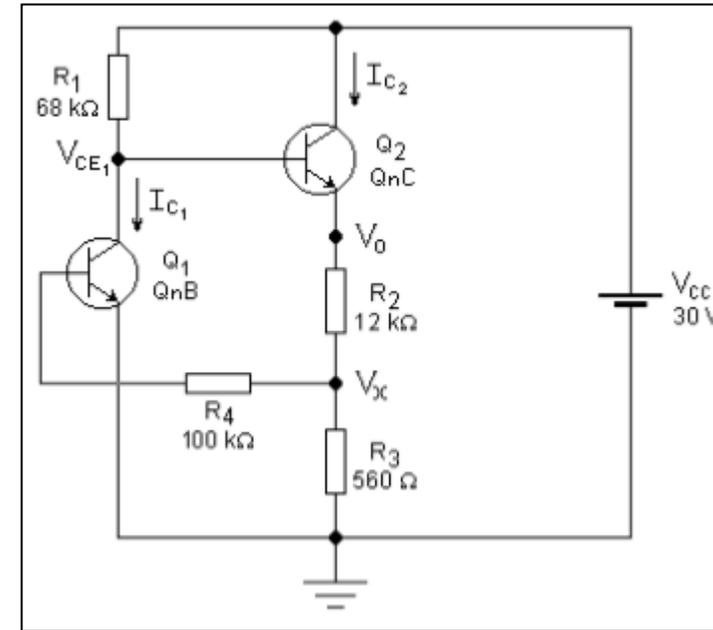
# **Amplificadores em Cascata com Realimentação DC**

1

O circuito da Figura abaixo é um **amplificador em cascata com realimentação DC** que executa a mesma função eletrônica de um amplificador com acoplamento direto (ou sem acoplamento DC), isto é, tem **alto ganho de amplificação**.



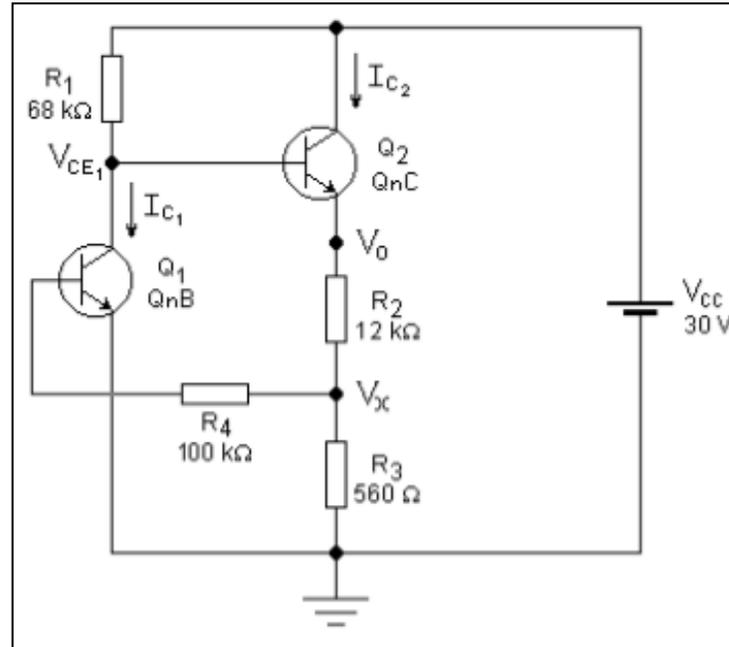
Amplificador em Cascata com Realimentação DC



Equivalente DC

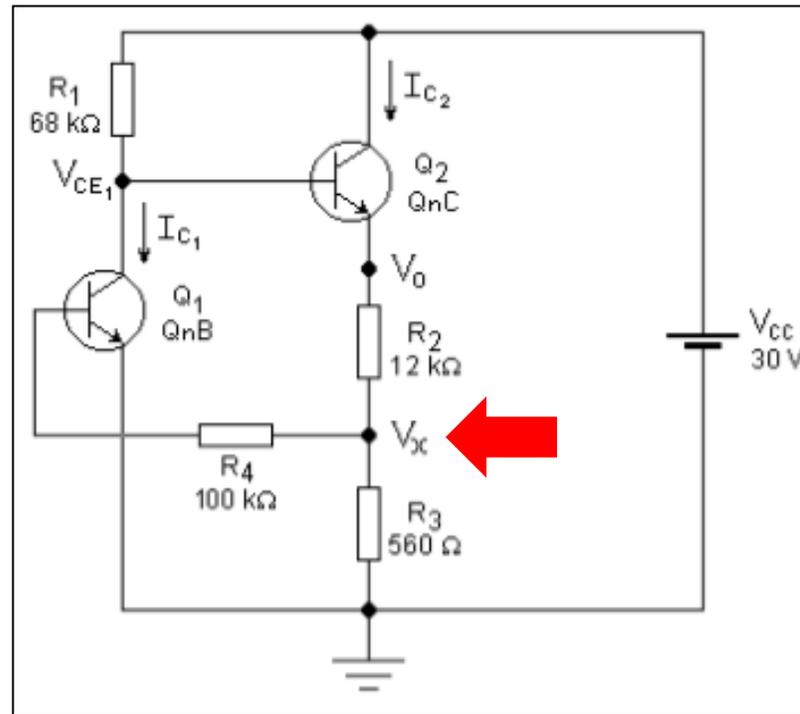
2

A polarização do primeiro transistor ( $Q_1$ ) não é obtida pelo tradicional divisor de tensão de base, mas através de uma realimentação negativa em corrente contínua que tem por **objetivo dar maior estabilidade ao ponto quiescente global do circuito.**



3

Se  $I_{C(Q2)}$  ↑

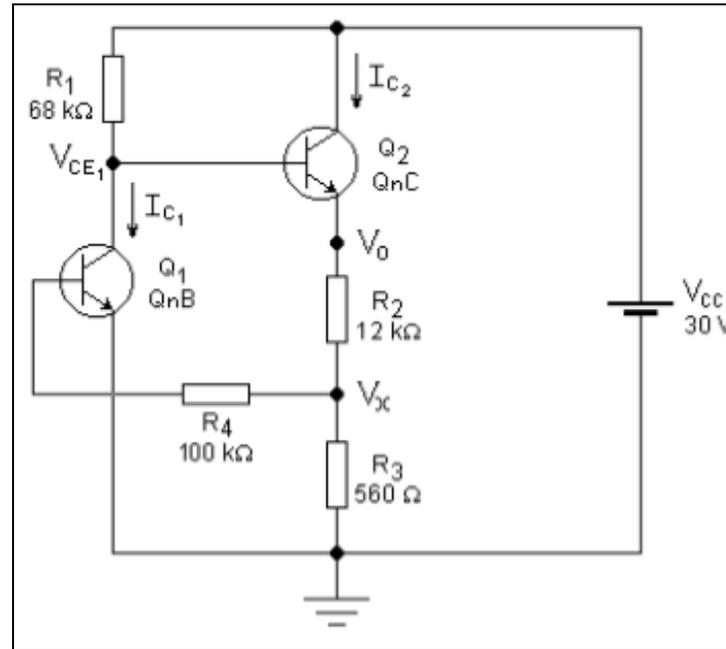


Se, por algum motivo,  $I_{C(Q2)}$  aumenta, a tensão  $V_x$  também aumentará, injetando mais corrente na base de  $Q_1$ , fazendo, portanto,  $I_{C(Q1)}$  aumentar.

O aumento de  $I_{C(Q1)}$ , no entanto, faz a tensão  $V_{CE1}$  cair (pois a corrente em  $R_1$  tem que aumentar), fazendo, portanto, com que  $I_{B(Q2)}$  diminua e, conseqüentemente, fazendo com que  $I_{C(Q2)}$  diminua.

O aumento de  $I_{C(Q2)}$  causa, necessariamente, uma contrarreação que tende a deixar o circuito estável em DC.

Se  $I_{C(Q2)}$  ↓



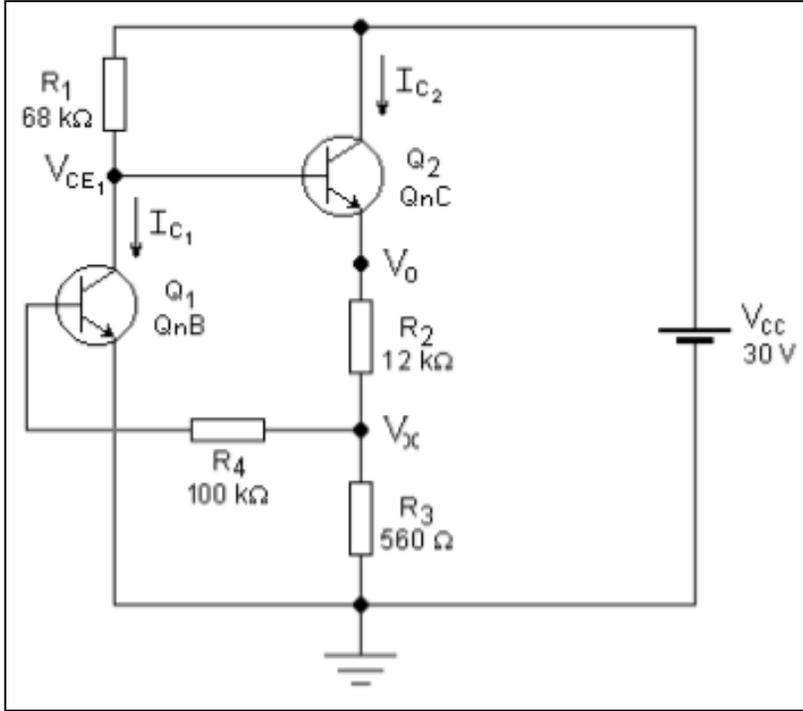
Se, por algum motivo,  $I_{C(Q2)}$  **diminui**, a tensão  $V_x$  também diminuirá, injetando menos corrente na base de  $Q_1$ , fazendo, portanto,  $I_{C(Q1)}$  diminuir.

A diminuição de  $I_{C(Q1)}$ , no entanto, faz a tensão  $V_{CE1}$  crescer (pois a corrente em  $R_1$  tem que diminuir), fazendo, portanto, com que  $I_{B(Q2)}$  aumente e, conseqüentemente, fazendo com que  $I_{C(Q2)}$  **aumente**.

**A diminuição de  $I_{C(Q2)}$  causa, necessariamente, uma contrarreação que tende a deixar o circuito estável em DC.**

Esse elo amarrado, conhecido como **REALIMENTAÇÃO NEGATIVA**, estabelece grande estabilidade ao ponto quiescente.

5

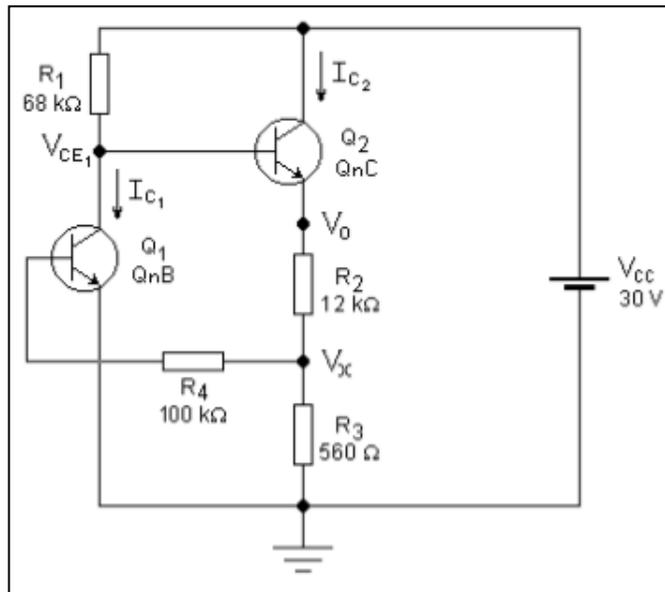


As grandezas  $V_{CC}$ ;  $\beta_1$ ;  $V_{BE1}$ ;  $\beta_2$  e  $V_{BE2}$ , assim como os resistores  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  e  $R_4$ , são consideradas conhecidas.

As incógnitas do circuito são:  $I_{C(Q1)}$ ,  $I_{C(Q2)}$ ,  $V_{CE1}$ ,  $V_{CE2}$  e  $V_o$ .

Equacionando-se o circuito, tem-se que:

6



$$\underbrace{\frac{V_{CC} - V_o - V_{BE_2}}{R_1}}_{I_{R1}} = I_{C(Q1)} + \underbrace{\frac{I_{C(Q2)}}{\beta_2}}_{I_{B2}}$$

$$I_{E2} = (\beta_2 + 1)I_{B2} \rightarrow \frac{V_o - V_x}{R_2} = \frac{\beta_2 + 1}{\beta_2} \times I_{C(Q2)}$$

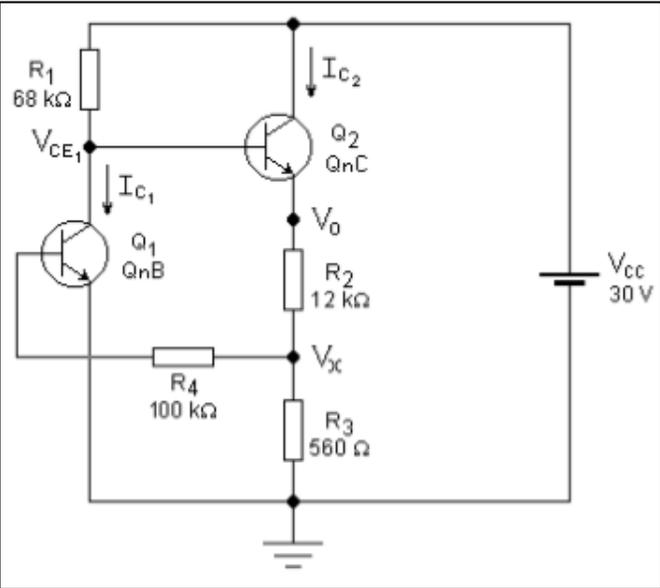
$$\frac{V_x - V_{BE_1}}{R_4} = \underbrace{\frac{I_{C(Q1)}}{\beta_1}}_{I_{B1}}$$

$$I_{R3} = I_{E2} - I_{B1} \rightarrow \frac{V_x}{R_3} = \frac{\beta_2 + 1}{\beta_2} \times I_{C(Q2)} - \frac{I_{C(Q1)}}{\beta_1}$$

Isolando-se as variáveis do sistema de quatro equações e quatro incógnitas acima, obtém-se:

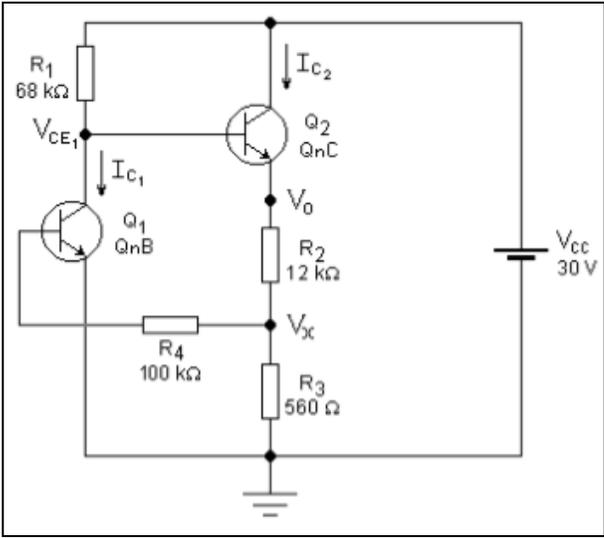
$$I_{C(Q2)} = \frac{V_{BE_1} \times (\beta_1 R_1 - R_3) + (V_{CC} - V_{BE_2}) \times (R_3 + R_4)}{R_1 \times (R_3 + R_4) + (\beta_2 + 1) \times [R_2 \times (R_3 + R_4) + R_3 \times (\beta_1 R_1 + R_4)]} \times \beta_2$$

$$I_{C(Q1)} = \frac{V_{CC} - V_{BE_2} - \frac{I_{C(Q2)}}{\beta_2} \times [(\beta_2 + 1) \times (R_2 + R_3) + R_1]}{\beta_1 R_1 - R_3} \times \beta_1$$



Sabendo-se que:

$$\begin{aligned}
 V_{CE_1} &= V_o + V_{BE_2} \\
 V_{CE_2} &= V_{CC} - V_o \\
 V_x &= V_B + V_{R4} = V_{BE_1} + V_{R4}
 \end{aligned}
 \left. \vphantom{\begin{aligned} V_{CE_1} \\ V_{CE_2} \\ V_x \end{aligned}} \right\} \rightarrow \begin{aligned}
 & V_{CE_1} = V_{BE_1} + V_{BE_2} + \frac{I_{C(Q1)}}{\beta_1} \times R_4 + \overbrace{\frac{\beta_2 + 1}{\beta_2} \times R_2 \times I_{C(Q2)}}^{V_{R2}} \\
 & V_{CE_2} = V_{CC} - V_{BE_1} - \frac{I_{C(Q1)}}{\beta_1} \times R_4 - \frac{\beta_2 + 1}{\beta_2} \times R_2 \times I_{C(Q2)}
 \end{aligned}$$



Para transistores modernos de Si, que possuem  $\beta \gg 100$ , as equações anteriores podem ser simplificadas, com um erro inferior a  $\pm 10\%$ , para:

$$I_{C(Q2)} = \frac{V_{BE1} \times (\beta_1 R_1 - R_3) + (V_{CC} - V_{BE2}) \times (R_3 + R_4)}{R_1 \times (R_3 + R_4) + (\beta_2 + 1) \times [R_2 \times (R_3 + R_4) + R_3 \times (\beta_1 R_1 + R_4)]} \times \beta_2 \rightarrow I_{C(Q2)} \approx \frac{V_{BE1}}{R_3}$$

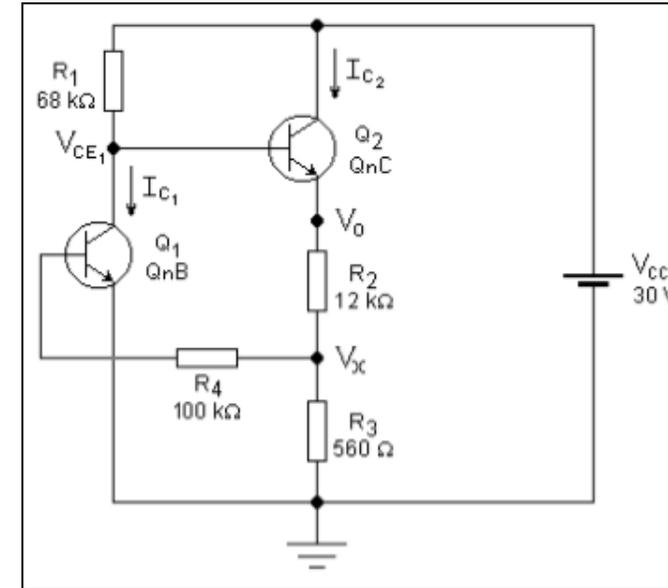
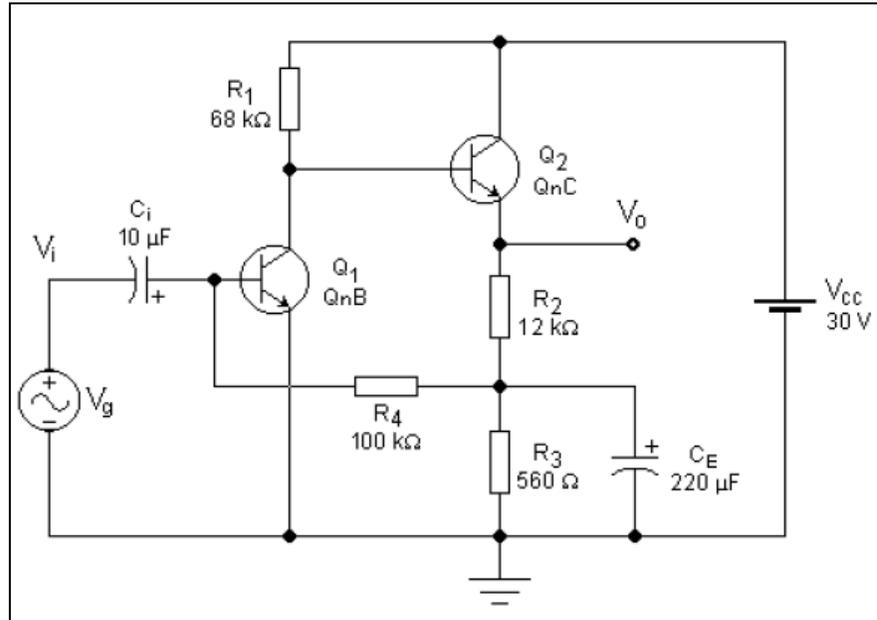
$$I_{C(Q1)} = \frac{V_{CC} - V_{BE2} - \frac{I_{C(Q2)}}{\beta_2} \times [(\beta_2 + 1) \times (R_2 + R_3) + R_1]}{\beta_1 R_1 - R_3} \times \beta_1 \rightarrow I_{C(Q1)} \approx \frac{V_{CC} - V_{BE2} - \frac{R_2 + R_3}{R_3} \times V_{BE1}}{R_1}$$

$$V_o \approx (R_2 + R_3) \times I_{C(Q2)}$$

## Exercício

Determine o ponto de polarização do amplificador em cascata abaixo com realimentação DC.

Dados @ 25 °C:  $Q_1 \equiv \beta = 333,284$ ;  $V_{BE} = 0,5986$  V  
 $Q_2 \equiv \beta = 660,108$ ;  $V_{BE} = 0,6403$  V;



Equivalente DC

1

$$I_{C(Q2)} = \frac{V_{BE1} \times (\beta_1 R_1 - R_3) + (V_{CC} - V_{BE2}) \times (R_3 + R_4)}{R_1 \times (R_3 + R_4) + (\beta_2 + 1) \times [R_2 \times (R_3 + R_4) + R_3 \times (\beta_1 R_1 + R_4)]} \times \beta_2$$

$$\rightarrow I_{C(Q2)} = \frac{0,5986 \times (333,284 \times 68k - 560) + (30 - 0,6403) \times 12,56k}{68k \times 12,56k + 661,108 \times [12k \times 12,56k + 560 \times (333,284 \times 68k + 100k)]} \times 660,108$$

$$\rightarrow \boxed{I_{C(Q2)} = 1,18108 \text{ mA}}$$

$$I_{C(Q1)} = \frac{V_{CC} - V_{BE2} - \frac{I_{C(Q2)}}{\beta_2} \times [(\beta_2 + 1) \times (R_2 + R_3) + R_1]}{\beta_1 R_1 - R_3} \times \beta_1$$

$$I_{C(Q1)} = \frac{30 - 0,6403 - \frac{1,18108m}{660,108} \times [661,108 \times 12,56k + 68k]}{333,284 \times 68k - 560} \times 333,284$$

$$\rightarrow \boxed{I_{C(Q1)} = 211,494 \mu\text{A}}$$

1

$$V_{CE_1} = V_{BE_1} + V_{BE_2} + \frac{I_{C(Q1)}}{\beta_1} \times R_4 + \frac{\beta_2 + 1}{\beta_2} \times R_2 \times I_{C(Q2)}$$

$$\rightarrow V_{CE_1} = 0,5986 + 0,6403 + \frac{211,494\mu}{333,284} \times 100k + \frac{661,108}{660,108} \times 12k \times 1,18108m = 15,4967 \quad [V]$$

$$V_{CE_2} = V_{CC} - V_{BE_1} - \frac{I_{C(Q1)}}{\beta_1} \times R_4 - \frac{\beta_2 + 1}{\beta_2} \times R_2 \times I_{C(Q2)}$$

$$\rightarrow V_{CE_2} = 30 - 0,5986 - \frac{211,494\mu}{333,284} \times 100k - \frac{661,108}{660,108} \times 12k \times 1,18108m = 15,1436 \quad [V]$$

Se os transistores possuírem uma variação de  $\beta$  na faixa  $190 \leq \beta \leq 680$ , as correntes de coletor terão uma pequena variação nas faixas:

$$195 \mu A \leq I_{C(Q1)} \leq 220 \mu A$$

$$1,12 mA \leq I_{C(Q2)} \leq 1,25 mA$$

mostrando a estabilidade do ponto quiescente !

# Amplificadores em Cascata com Bootstrap

**Observe:**

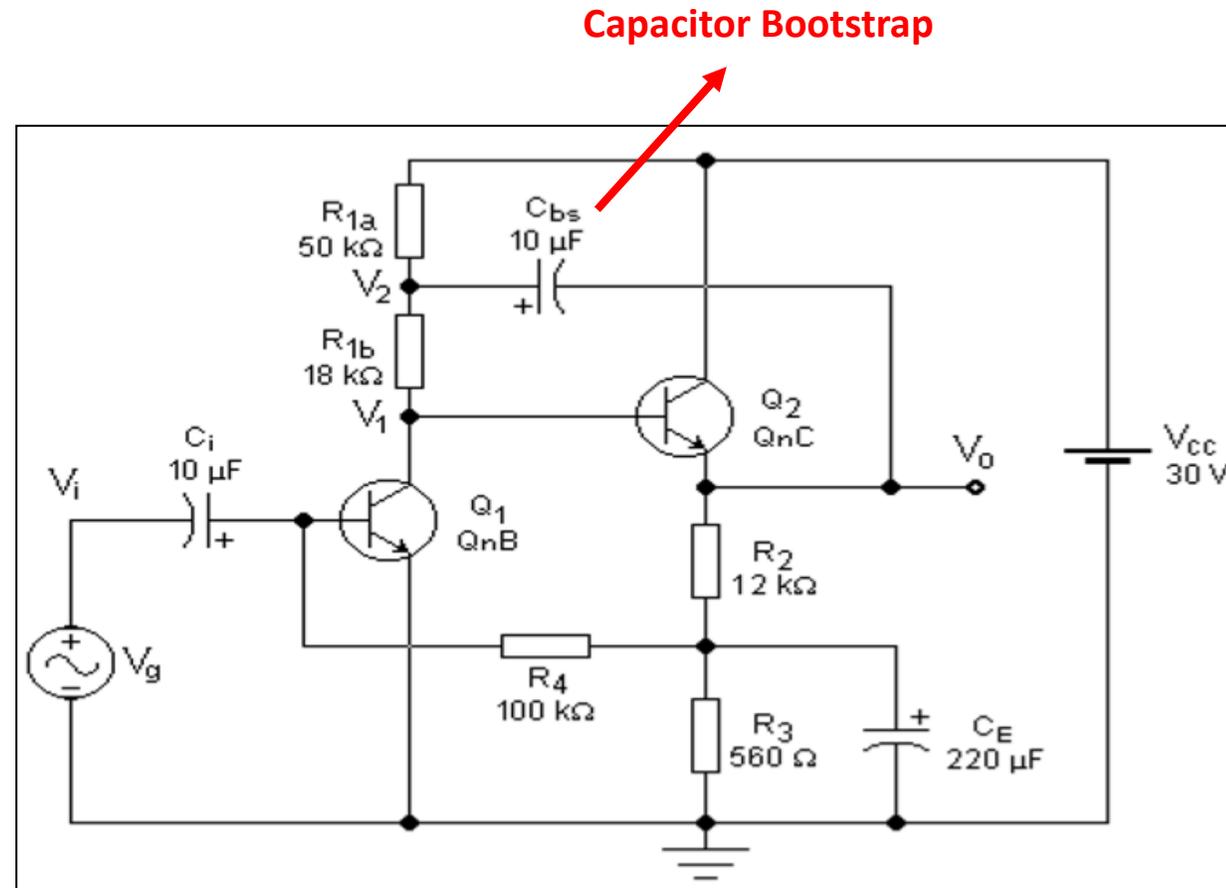
**1) O exercício a seguir descreve o cálculo da polarização em um **amplificador cascata com Bootstrap****

**(exercício 10 - resolvido na apostila “BJT - Eletrônica Básica - Amplificadores Analógicos BJT- Exercicios - v. 2014 Rev. 06” (pgs. 41 – 42)**

**A análise AC deste exercício (pg. 42 – 48)  
será analisada posteriormente !**

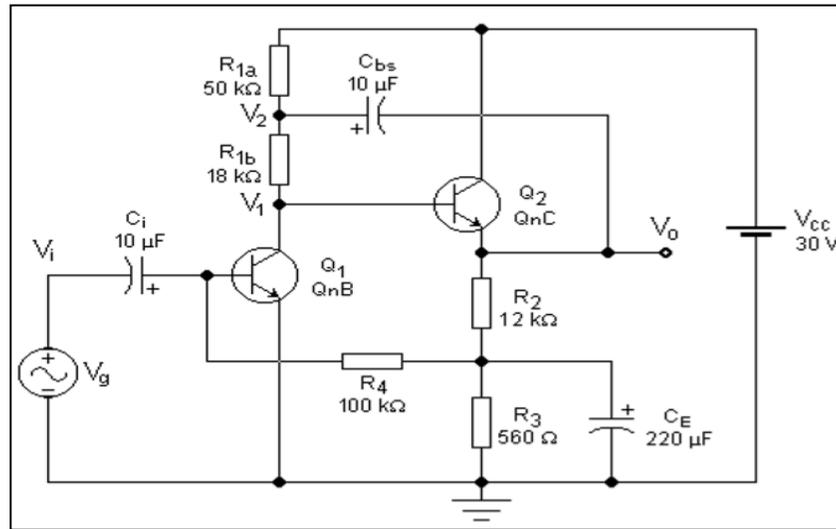
**2) A polarização não é por divisor de tensão (a mais utilizada devido a estabilidade)**

**Bootstrap** circuit is one where part of the output of an amplifier stage is applied to the input, so as to alter the input impedance of the amplifier.

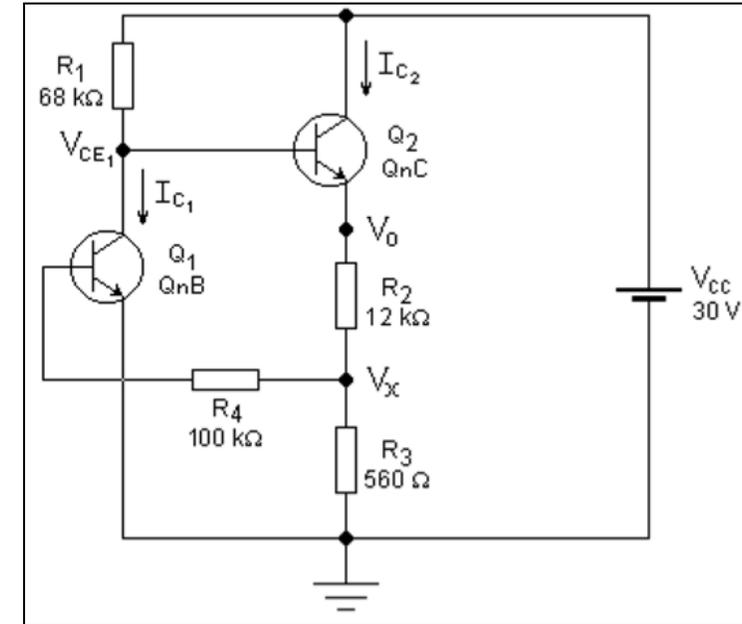


Esse artifício tem como **objetivo aumentar a impedância vista pelo coletor de  $Q_1$  e, conseqüentemente, aumentar o ganho do primeiro estágio**. O estudo teórico desse efeito é conseguido através da aplicação do Teorema de Miller.

Como em DC o circuito é idêntico ao equivalente DC do amplificador em cascata com realimentação DC, o ponto quiescente é o mesmo que foi calculado para esse circuito. Esse fato ocorre porque o capacitor  $C_{bs}$  é um circuito aberto para DC, em regime permanente, não afetando, assim, o ponto quiescente.

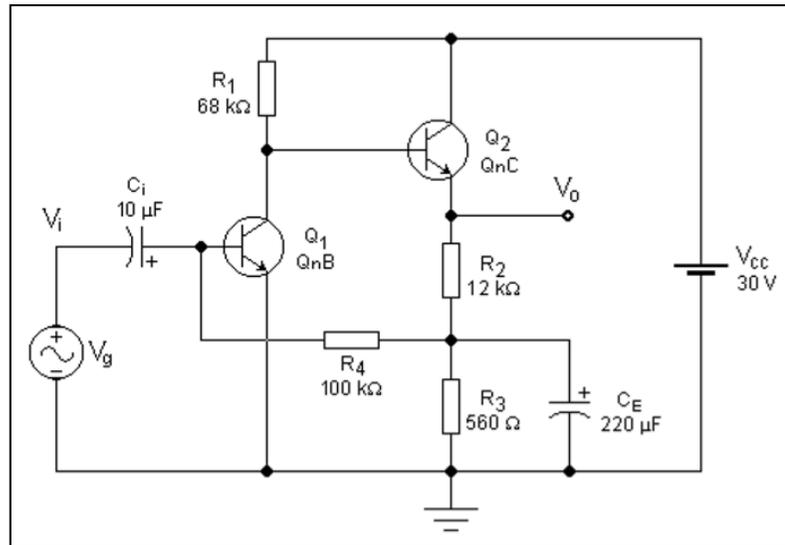


=  
(em DC)

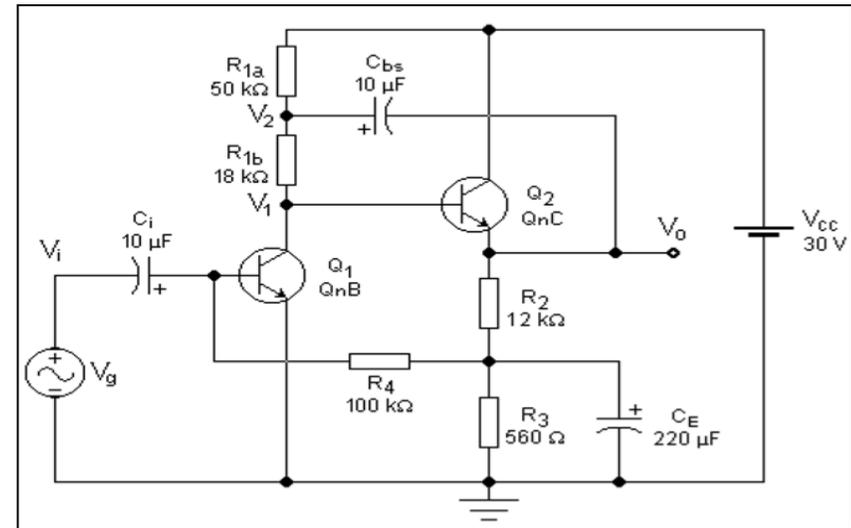


O resistor R1 do circuito equivalente DC foi substituído por dois resistores em série, cuja soma permanece igual ao valor original de R1, não causando, também, nenhuma alteração em DC.

**Em AC, no entanto, o comportamento dos circuitos são diferentes.**



**$\neq$**   
**(em AC)**



# **Amplificador Coletor Comum com Bootstrap**

**Observe:**

**1) O exercício a seguir descreve o cálculo da polarização em um **amplificador cascata com Bootstrap****

**(exercício 12 - resolvido na apostila “BJT - Eletrônica Básica - Amplificadores Analógicos BJT- Exercícios - v. 2014 Rev. 06” (pgs. 55 – 57)**

**A análise AC deste exercício (pg. 57 – 62)  
será analisada posteriormente !**

**2) A polarização não é por divisor de tensão (a mais utilizada devido a estabilidade)**

## Exercício

Determine o ponto de polarização do amplificador coletor comum com bootstrap da figura.

**Bootstrap** circuit is one where part of the output of an amplifier stage is applied to the input, so as to alter the input impedance of the amplifier.

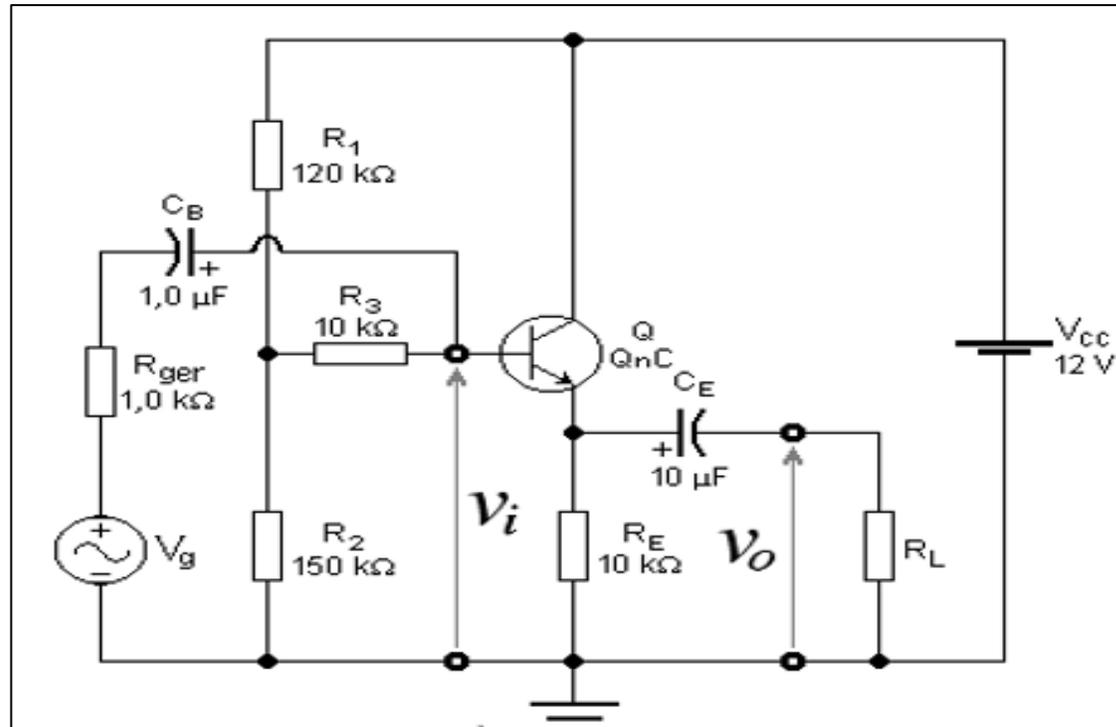


Fig. - Amplificador coletor comum com bootstrap

1 Grandezas quiescentes:

$$V_{BB} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times V_{CC} = \frac{150k}{120k + 150k} \times 12 = 6,667 \quad [\text{V}]$$

$$R_B = R_B' + R_3 = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2} + R_3 = \frac{120k \times 150k}{120k + 150k} + 10k = 76,667 \quad [\text{k}\Omega]$$

2 Corrente de coletor ( $I_{CQ}$ ), tensão de emissor ( $V_E$ ) e tensão coletor-emissor ( $V_{CEQ}$ )

$$I_{CQ} = \frac{(V_{BB} - V_{BE}) \times \beta}{R_B + (\beta + 1) \times R_E} = \frac{(6,667 - 0,624) \times 535,94}{76,667k + 536,94 \times 10k} = 594,6654 \quad [\mu\text{A}]$$

$$V_E = \frac{\beta + 1}{\beta} \times I_{CQ} \times R_E = \frac{536,94}{535,94} \times 594,6654 \mu \times 10k = 5,958 \quad [\text{V}]$$

$$V_{CEQ} = 12 - 5,958 = 6,042 \quad [\text{V}]$$