

## Referência

SEL-EESC-USP

# Eletrônica Básica - Amplificadores Analógicos BJT

Exercícios

P. R. Veronese  
2014

<b>Exercício</b>	<b>Assunto</b>	<b>Pg.</b>	<b>Análise DC</b>	<b>Pg.</b>	<b>Análise AC</b>	<b>Pg.</b>
1	Parâmetros de Modelagem	1-3	não		não	
2	Polarização por Divisor de Tensão	3-6	sim	3-6	não	
3	Amplificador Emissão Comum	6-9	sim	3-6	sim	7-9
4	Amplificador Base Comum	9-14	sim	9-12	sim	12-14
5	Amplificador Coletor Comum	14-18	sim	14-16	sim	16-18
6	Amplificador Separador de Fase	18-22	sim	19-20	sim	20-22
7	Amplificadores em Cascata com Acoplamento DC	22-28	sim	23-26	sim	26-28
8	Amplificadores em Cascata com Acoplamento DC	28-35	sim	29-32	sim	32-35
9	Amplificadores em Cascata com Realimentação DC	35-41	sim	35-38	sim	38-41
10	Amplificadores em Cascata com Bootstrap	41-48	sim	41-42	sim	42-48
11	Amplificadores em Cascata com Realimentação Negativa	48-56	sim	41-42	sim	48-56
12	Amplificador Coletor-Comum com Bootstrap	55-62	sim	56-57	sim	57-62
13	Amplificador Cascode	62-69	sim	62-66	sim	66-69
14	Amplificador Emissor-Comum com Alimentação Flutuante	69-73	sim	69-70	sim	70-73

<b>Exercício</b>	<b>Assunto</b>	<b>Pg.</b>	<b>Análise DC</b>	<b>Pg.</b>	<b>Análise AC</b>	<b>Pg.</b>
15	Estabilidade de Pontos Quiescentes (comparação)	75-81	sim	74-75	não	
	Topologia 1			75-76		
				77		
				79		
15	Estabilidade de Pontos Quiescentes (comparação)	75-81	sim	75	não	
	Topologia 2			76		
				77-78		
				79-80		
15	Estabilidade de Pontos Quiescentes (comparação)	75-81	sim	75	não	
	Topologia 3			76-77		
				78-79		
				80		
16	Amplificadores EC com Várias Topologias de Polarização	81-89	não		sim	82-85
	Topologia 1					
16	Amplificadores EC com Várias Topologias de Polarização	81-89	não		sim	82-85
	Topologia 3					
16	Amplificadores EC com Várias Topologias de Polarização	85-88	não		sim	88-89
	Topologia 1					

<b>Exercício</b>	<b>Assunto</b>	<b>Pg.</b>	<b>Análise DC</b>	<b>Pg.</b>	<b>Análise AC</b>	<b>Pg.</b>
17	Amplificador DC com Realimentação Negativa	89-93	não		não	
18	Amplificador EC Genérico	93-98	sim	94-95	sim	95-98
19	Amplificador EC com Carga Ativa e Realimentação de Coletor	98-102		99		99-101
20	Amplificador Isolador com Alto Desempenho	102-107	sim	102-103	sim	103-107
21	Amplificador Operacional Idealizado	107-114	sim	108-109	sim	109-114
22	Estabilizador de Tensão	114-121	não		não	
23	Amplificador Diferencial com Cargas Passivas	121-124	sim	122-123	sim	123-124

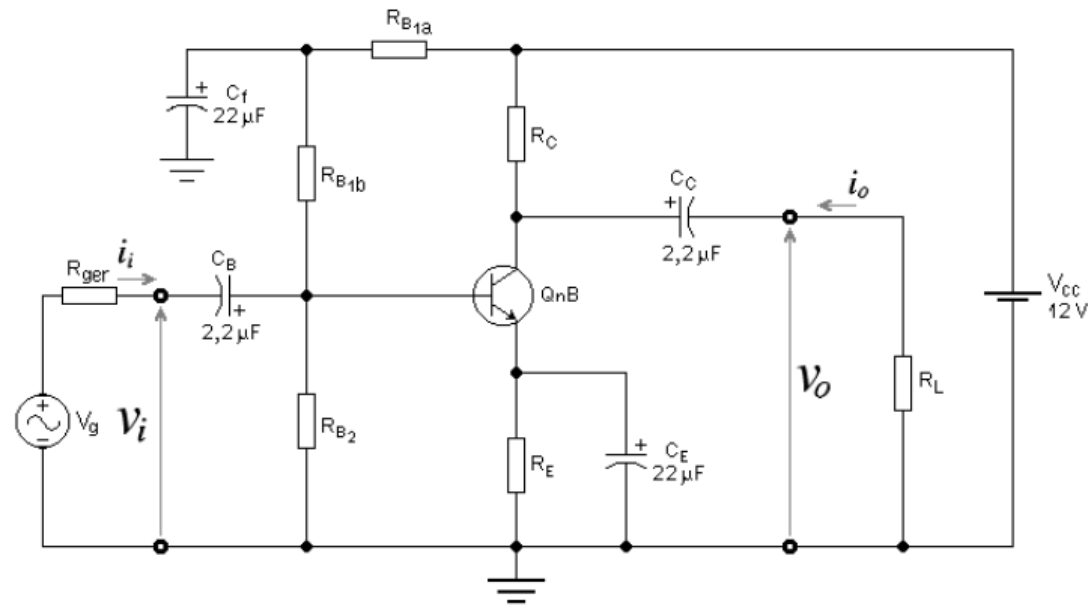
# 1. Parâmetros de Modelagem

## 1.1. Proposição:

Deseja-se polarizar um transistor do tipo  $QnB$  com  $I_{CQ}=100 \mu A$  e  $V_{CEQ}=5,4 V @ 25 ^\circ C$ .  
Calcular:

1.a - As grandezas estáticas  $\beta$  e  $V_{BE}$  do transistor para o ponto de polarização estipulado.

1.b - As grandezas incrementais  $g_m$ ,  $r_\pi$ ,  $r_o$ ,  $C_\mu$  e  $C_\pi$  do transistor, para esse ponto de polarização.



Exercício 2

## 2. Polarização

### 2.1. Proposição:

2.a - Polarizar o transistor do circuito da Figura 1 de modo que, para o caso típico, as seguintes condições sejam satisfeitas:  $I_{CQ} = 100 \mu A \pm 2\%$ ;  $V_{CEQ} = 5,4 V \pm 2\%$ ;  $S = 9,5 \pm 10\%$  e  $R_{B1a} \leq 0,2R_{B1}$  @  $25^\circ C$ .

2.b - Calcular o espalhamento do ponto quiescente calculado no item 2.a, sabendo-se que, na fabricação em série, o transistor *QnB* pode apresentar o seguinte espalhamento de parâmetros @  $25^\circ C$ :  $180 \leq \beta \leq 525$ ;  $0,57 V \leq V_{BE} \leq 0,59 V$  e  $33 V \leq V_{AF} \leq 110 V$ .

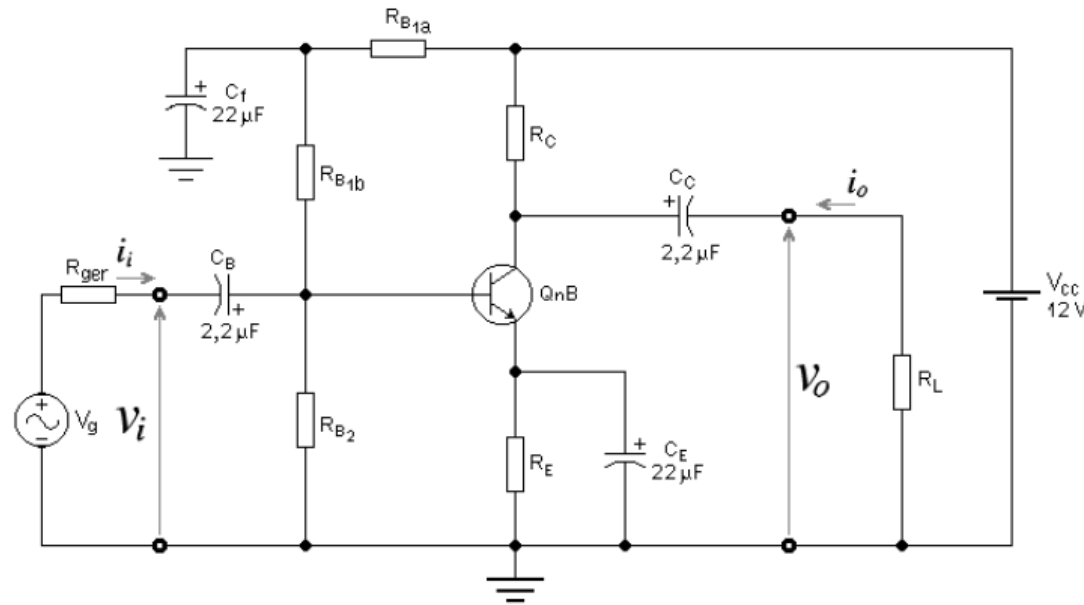


Figura 1- Amplificador Emissor-Comum, Usado nos Exercícios 2 e 3.

### 3. Amplificador Emissor-Comum

#### 3.1. Proposição:

Usando os resistores de polarização computados no Exercício 2, calcular em 25 °C:

**3.a.** - O ganho de tensão, a resistência de entrada e a resistência de saída do amplificador da Figura 1, em vazio.

**3.b.** - As frequências de corte, nas baixas e nas altas, da função de transferência do módulo do ganho de tensão do amplificador, para  $R_{ger} = 52 \text{ k}\Omega$  e  $R_L = 43 \text{ k}\Omega$ .

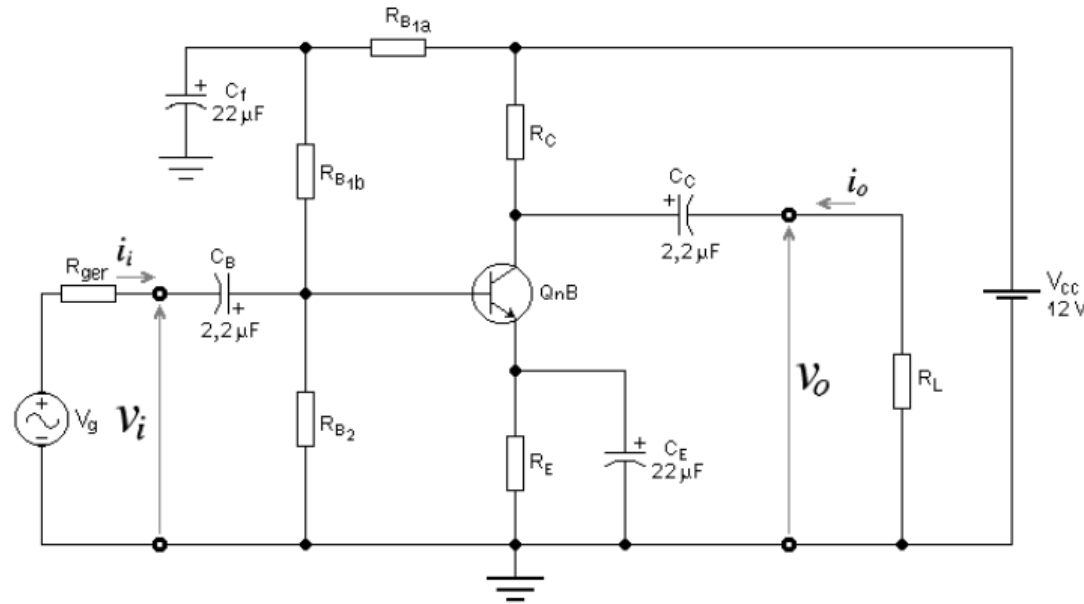


Figura 1- Amplificador Emissor-Comum, Usado nos Exercícios 2 e 3.

## 4. Amplificador Base-Comum

### 4.1. Proposição:

O amplificador da Figura 2 é do tipo base-comum. Calcular para esse circuito:

4.a. - Os resistores de polarização de modo que as seguintes condições sejam satisfeitas @ 25 °C:  $R_i = 75 \Omega \pm 5\%$  e  $S = 9,5 \pm 5\%$ .

4.b. - Os parâmetros elétricos do amplificador em vazio, isto é:  $A_v$ ;  $R_i$ ;  $R_o$ ;  $f_{CA}$  e  $f_{CB}$  @ 25 °C.

Dados:  $\beta = 291$ ;  $V_{BE} = 0,616 V$ ;  $C_\pi = 40,2 pF$  e  $C_\mu = 3,15 pF$ .

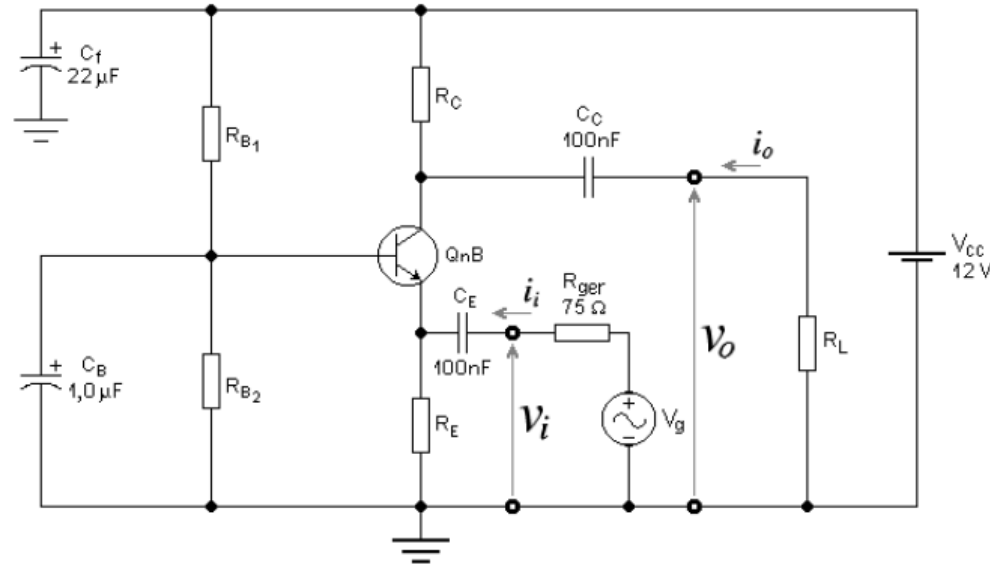


Figura 2 – Amplificador Base-Comum, Usado no Exercício 4.



## 5. Amplificador Coletor-Comum

### 5.1. Proposição:

Usando os resistores de polarização do circuito da Figura 3, calcular para esse amplificador @ 25 °C:

5.a. - O ganho de tensão, a resistência de entrada e a resistência de saída, em vazio e com  $R_{ger} = 0$ .

5.b. - As frequências de corte, nas baixas e nas altas, da função de transferência do módulo do ganho de tensão do amplificador, para  $R_{ger} = 52 \text{ k}\Omega$  e  $R_L = 1 \text{ k}\Omega$ .

Dados do transistor  $QnC$ :  $\beta = 534$ ;  $V_{BE} = 0,628 \text{ V}$ ;  $C_{\pi} = 48,3 \text{ pF}$  e  $C_{\mu} = 3,03 \text{ pF}$  @ 25 °C.

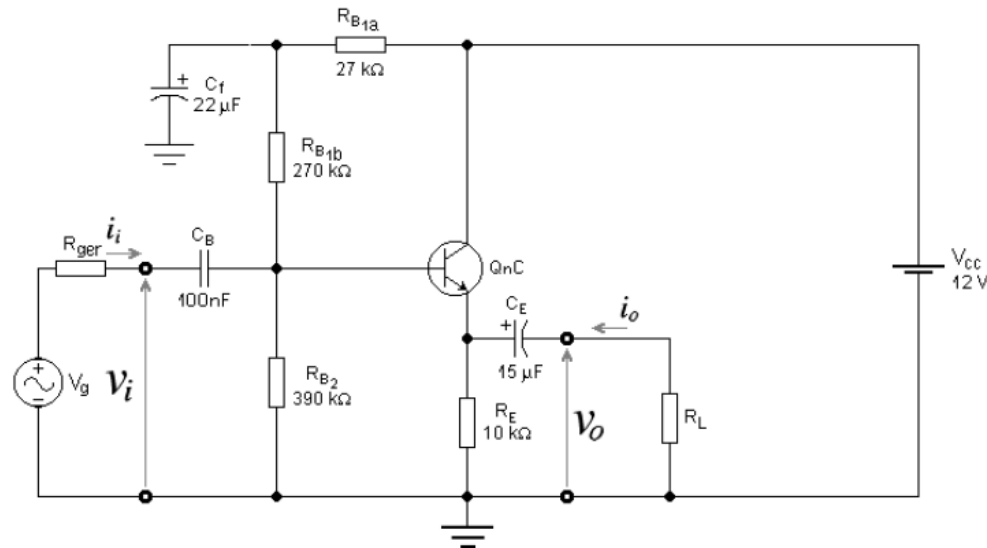


Figura 3 – Amplificador Coletor-Comum, Usado no Exercício 5.

## 6. Amplificador Separador de Fase

### 6.1. Proposição:

Amplificadores separadores de fase (*Phase-Splitter*) são circuitos constituídos de duas saídas que, teoricamente, apresentam ganhos de tensão idênticos e unitários em relação a uma entrada, mas com fases opostas entre si ( $180^\circ$ ). A principal utilidade desse circuito é trabalhar como excitador em contrafase de estágios de saída de potência na configuração *push-pull*. A Figura 4 apresenta um circuito desse tipo.

Para esse circuito, calcular, com  $R_{ger} = 600 \Omega$  e  $R_{L1} = R_{L2} = 10 \text{ k}\Omega @ 25^\circ \text{C}$ :

6.a. - O ganho de tensão, a resistência de entrada e a resistência de saída do amplificador EC:  $A_{v1} = v_{o1}/v_i$ ;  $R_i$  e  $R_{o1}$ .

6.b. - O ganho de tensão, a resistência de entrada e a resistência de saída do amplificador CC:  $A_{v2} = v_{o2}/v_i$ ;  $R_i$  e  $R_{o2}$ .

Dados do transistor QnC:  $\beta = 534$ ;  $V_{BE} = 0,670 \text{ V}$ ;  $C_\pi = 127 \text{ pF}$  e  $C_\mu = 3,04 \text{ pF} @ 25^\circ \text{C}$ .

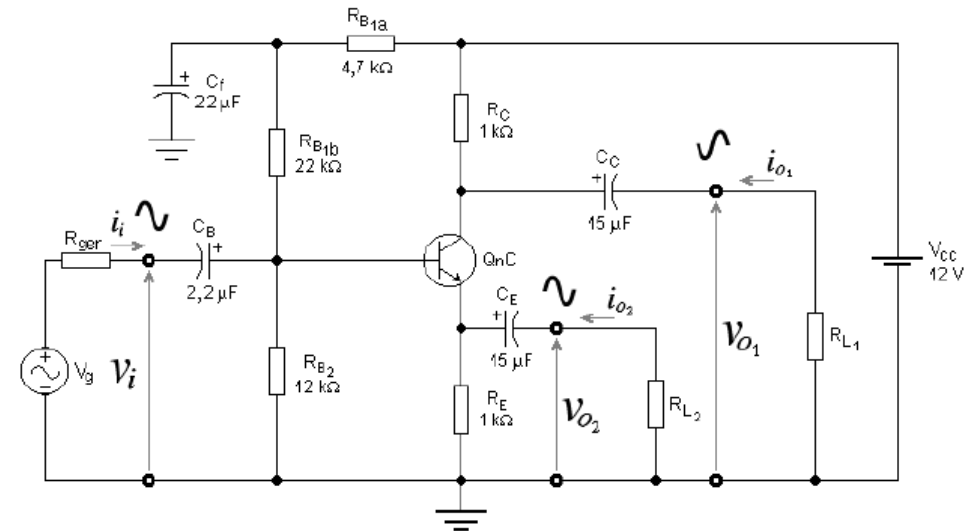


Figura 4 – Amplificador Separador de Fase Usado no Exercício 6.

## 7. Amplificadores em Cascata com Acoplamento DC

### 7.1. Proposição:

Para o circuito da Figura 5, calcular @ 25 °C, com  $R_{ger} = 600 \Omega$  e  $R_L \rightarrow \infty$ :

7.a. - O ponto de polarização.

7.b. - O ganho de tensão, a resistência de entrada e a resistência de saída do amplificador.

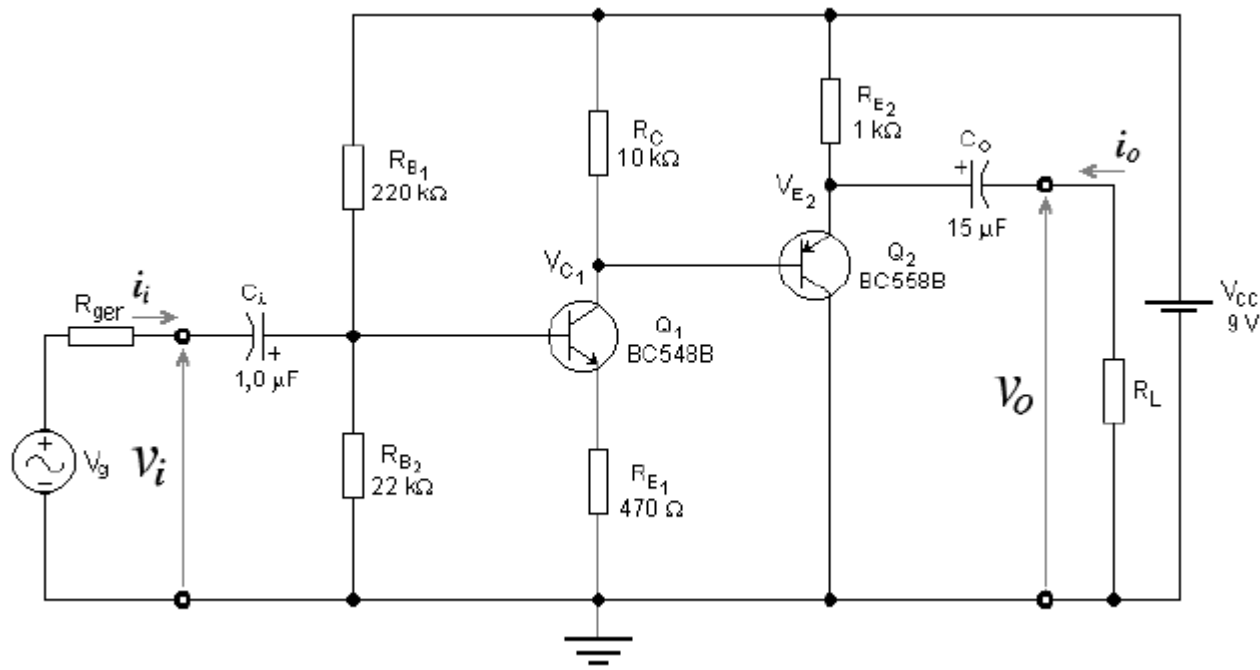


Figura 5 – Amplificadores em Cascata com Acoplamento DC.

## 8. Amplificadores em Cascata com Acoplamento DC

### 8.1. Proposição:

8.a. - O ponto de polarização.

8.b. - O ganho de tensão, a resistência de entrada e a resistência de saída do amplificador.

Dados: Os transistores são do tipo *BC548B* ( $N_F = 1,0022$  e  $V_{AF} = 66,4$  V).

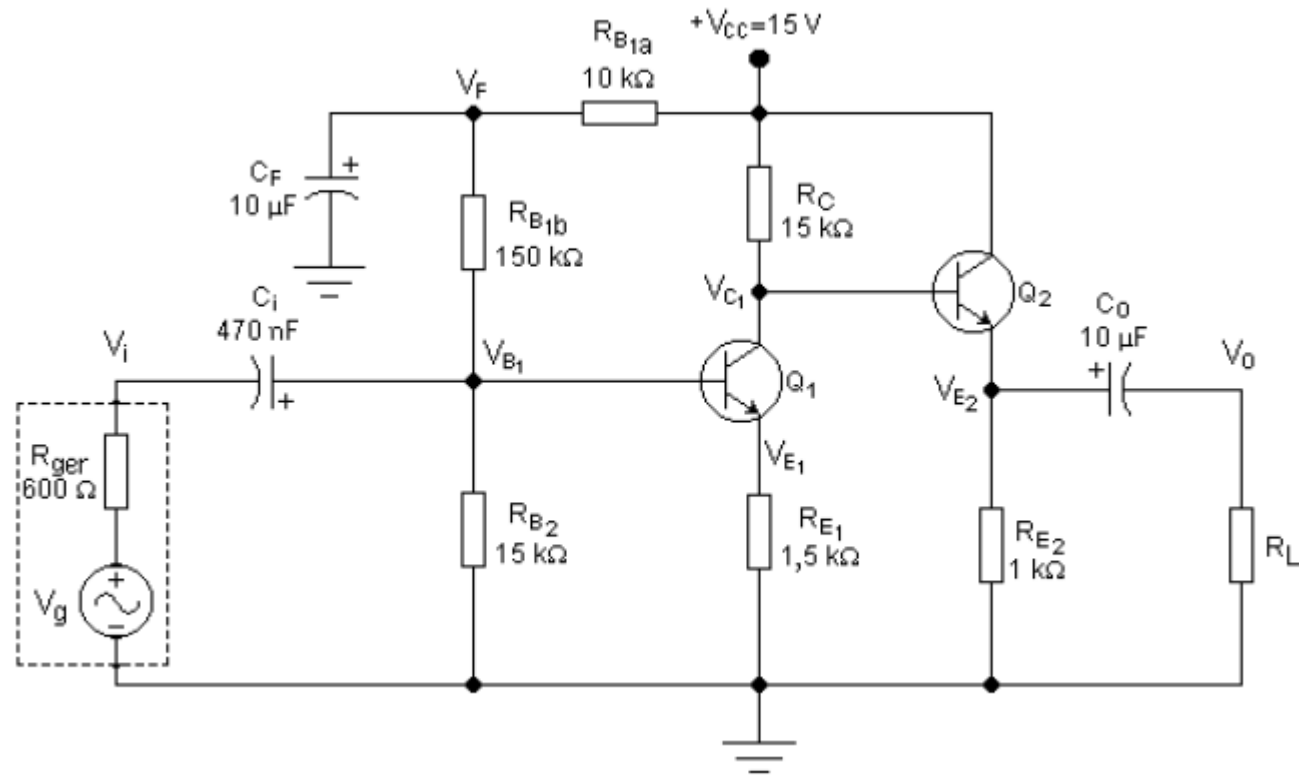


Figura 6 - Amplificadores em Cascata com Acoplamento DC.

## 9. Amplificadores em Cascata com Realimentação DC

### 9.1. Proposição:

Para o circuito da Figura 7, calcular @ 25 °C:

9.a. - O ponto de polarização.

9.b. - O ganho de tensão, a resistência de entrada e a resistência de saída do amplificador, para pequenos sinais e baixas frequências.

Dados @ 25 °C:  $Q_1 \equiv \beta = 333,284$ ;  $V_{BE} = 0,5986$  V;  $N_F = 1,0022$  e  $V_{AF} = 66,40$  V.  
 $Q_2 \equiv \beta = 660,108$ ;  $V_{BE} = 0,6403$  V;  $N_F = 1,0022$  e  $V_{AF} = 33,38$  V.

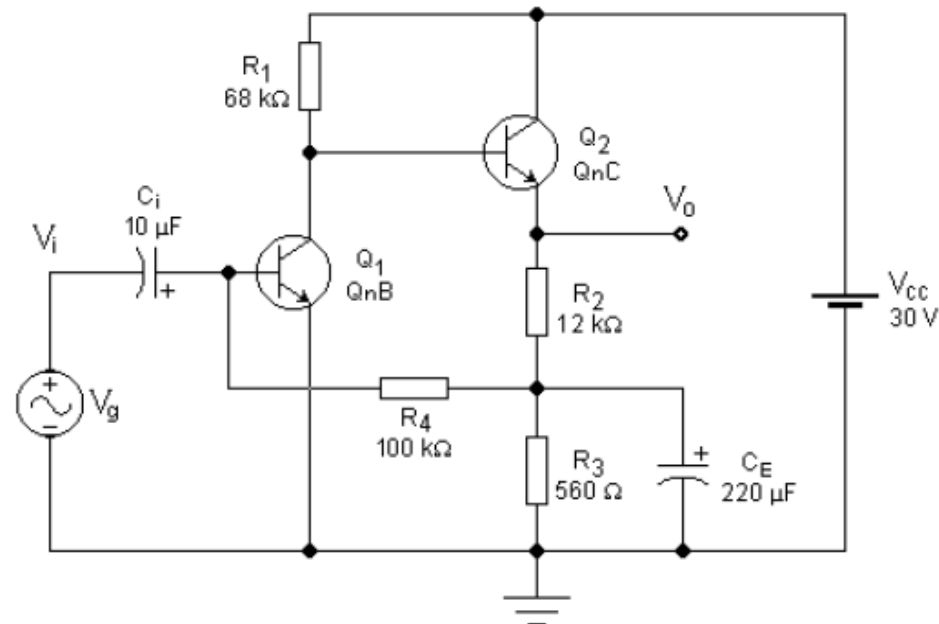


Figura 7 – Amplificador em Cascata com Realimentação DC.

## 10. Amplificadores em Cascata com *Bootstrap*

### 10.1. Proposição:

Para o circuito da Figura 10, calcular @ 25 °C:

10.a. - O ponto de polarização.

10.b. - O ganho de tensão, a resistência de entrada e a resistência de saída do amplificador, para pequenos sinais e baixas frequências.

Dados @ 25 °C:  $Q_1 \equiv \beta = 333,284$ ;  $V_{BE} = 0,5986$  V;  $N_F = 1,0022$  e  $V_{AF} = 66,40$  V.  
 $Q_2 \equiv \beta = 660,108$ ;  $V_{BE} = 0,6403$  V;  $N_F = 1,0022$  e  $V_{AF} = 33,38$  V.

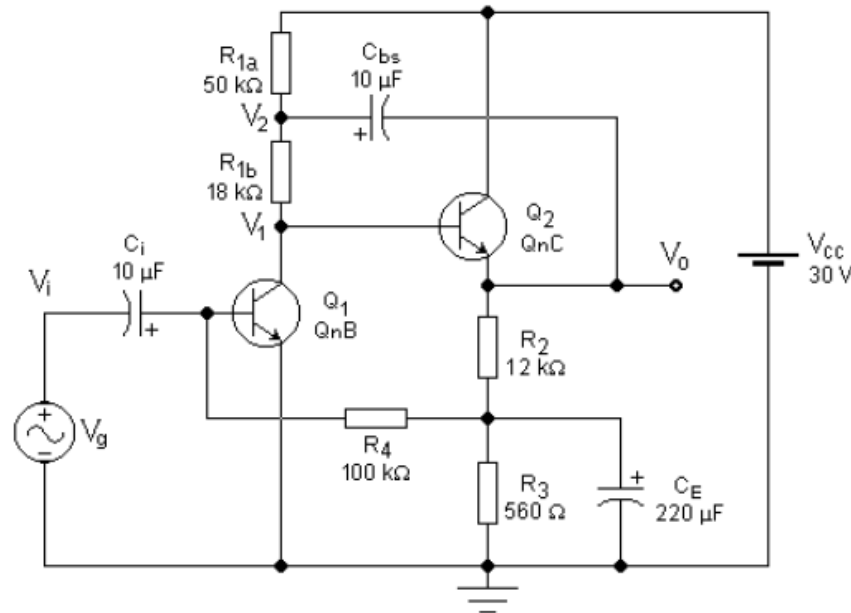


Figura 10 - Amplificador em Cascata com Realimentação DC e *Bootstrap*.

## 11. Amplificadores em Cascata com Realimentação Negativa

### 11.1. Proposição:

11.a. - Adicionar uma realimentação negativa ao circuito da Figura 10, como mostra a Figura 15, calcular o ganho de tensão, a resistência de entrada e a resistência de saída do amplificador, para pequenos sinais e baixas frequências.

Dados @ 25 °C:  $Q_1 \equiv \beta = 333,284$ ;  $V_{BE} = 0,5986$  V;  $N_F = 1,0022$  e  $V_{AF} = 66,40$  V.

$Q_2 \equiv \beta = 660,108$ ;  $V_{BE} = 0,6403$  V;  $N_F = 1,0022$  e  $V_{AF} = 33,38$  V.

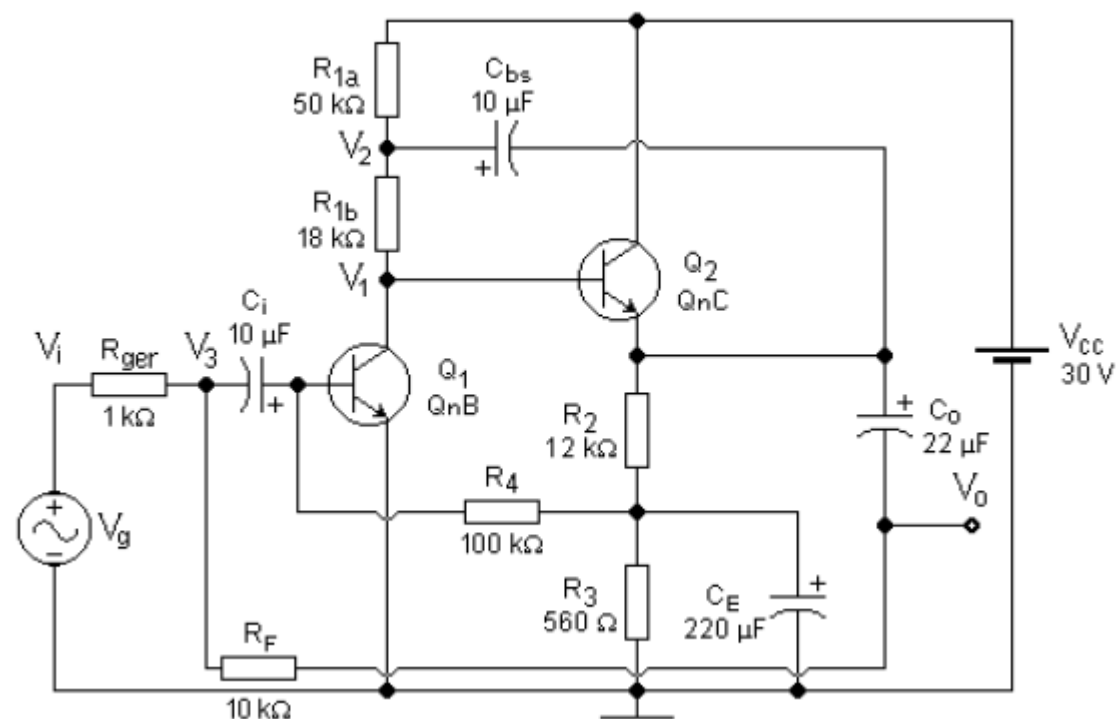


Figura 15 – Amplificador com Realimentação Negativa AC e DC e com *Bootstrap*.

## 12. Amplificador Coletor-Comum com *Bootstrap*

### 12.1. Proposição:

Para o amplificador da Figura 17a, calcular @ 25 °C:

12.a. - O ponto de polarização.

12.b. - O ganho de tensão, a resistência de entrada e a resistência de saída do amplificador, para pequenos sinais e baixas frequências, em vazio.

Para o amplificador da Figura 19a, calcular @ 25 °C:

12.c. - O ponto de polarização.

12.d. - O ganho de tensão, a resistência de entrada e a resistência de saída do amplificador, para pequenos sinais e baixas frequências, em vazio.

Dados @ 25 °C:  $Q \equiv \beta = 535,94243$ ;  $V_{BE} = 0,62385$  V;  $N_F = 1,0022$  e  $V_{AF} = 33,38$  V.

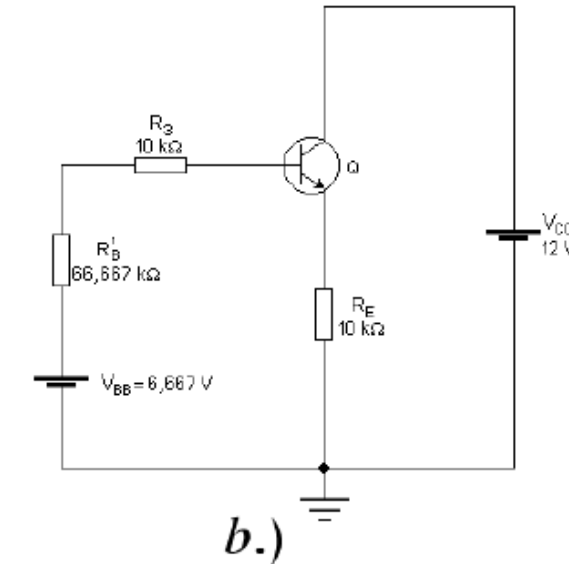
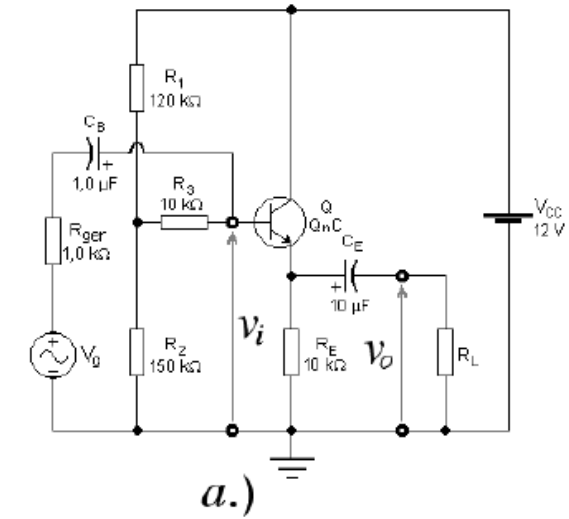


Figura 17 – Amplificador Coletor-Comum. a.) Circuito. b.) Circuito Equivalente DC.



## 13. Amplificador *Cascode*

### 13.1. Proposição:

Para o amplificador da Figura 21, @ 25 °C:

13.a. - Deduzir as equações de cálculo do ponto de polarização do circuito da Figura 21.



**Importante !**

13.b. - Calcular o ponto de polarização se:  $V_{CC} = 24\text{ V}$ ;  $R_{B1a} = 390\text{ k}\Omega$ ;  $R_{B1b} = 220\text{ k}\Omega$ ;  $R_{B2a} = R_{B2b} = 33\text{ k}\Omega$ ;  $R_C = 22\text{ k}\Omega$  e  $R_E = 2,2\text{ k}\Omega$ .

13.c. - Calcular o ganho de tensão, a resistência de entrada e a resistência de saída do amplificador, para pequenos sinais e baixas frequências, em vazio.

Dados @ 25 °C:

$\beta_1 = 174$ ;  $V_{BE1} = 0,626\text{ V}$ ;  $N_{F1} = 1,0022$ ;  $V_{AF1} = 110,4\text{ V}$ ;  $C_{\pi 1} = 45,4\text{ pF}$  e  $C_{\mu 1} = 5,11\text{ pF}$ .

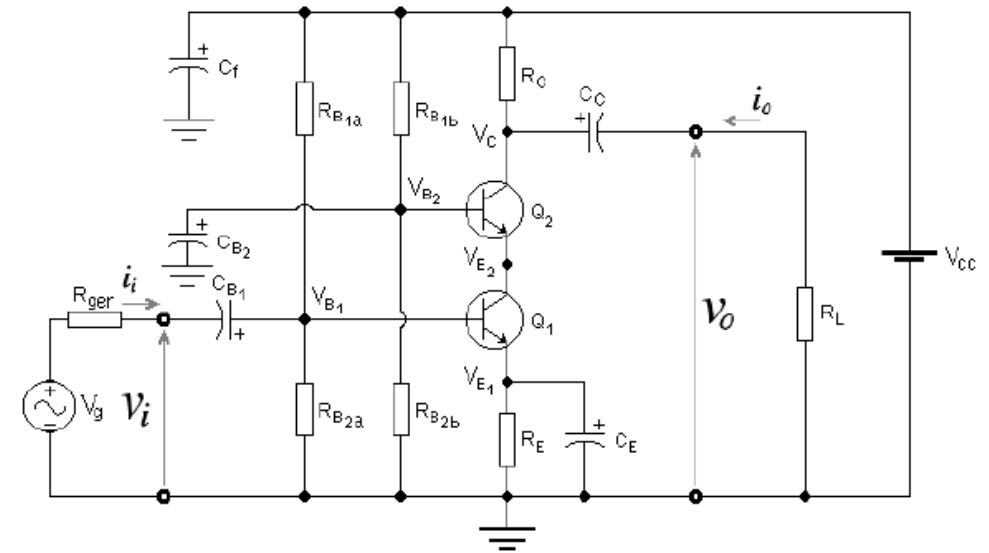


Figura 21 – Amplificador *Cascode*.

## 14. Amplificador Emissor-Comum com Alimentação Flutuante

### 14.1. Proposição:

Dado o circuito da Figura 23, calcular @ 27 °C:

14.a. - O ponto de polarização.

14.b. - O ganho de tensão, a resistência de entrada e a resistência de saída, em pequenos sinais e baixas frequências.

Dados dos transistores @ 27 °C:

- *QnB*:  $\beta_1 = 291$ ;  $V_{BE1} = 0,583$  V;  $N_{F1} = 1,0022$  e  $V_{AF1} = 66,4$  V.
- *QpB*:  $\beta_2 = 292$ ;  $|V_{BE2}| = 0,573$  V;  $N_{F2} = 1,000$  e  $V_{AF2} = 30,9$  V.

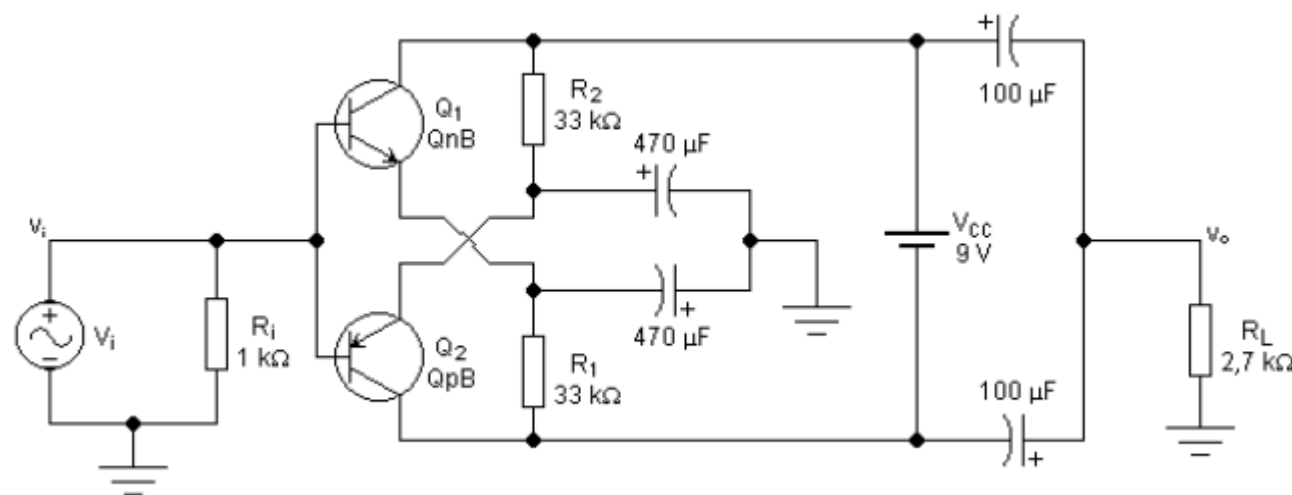


Figura 23 – Amplificador Emissor-Comum com Alimentação Flutuante.

## 15. Estabilidade de Pontos Quiescentes

### 15.1. Proposição:

Os transistores da Figura 26 foram polarizados no mesmo ponto quiescente e, por isso, alguns resistores foram colocados com valores quebrados e com precisão de seis casas decimais. Estudar a estabilidade desses pontos quiescentes em três situações:

15.a. - Variações de  $I_{CQ}$  em função dos ganhos de corrente dos transistores ( $\Delta I_{CQ}/\Delta\beta$ ).

15.b. - Variações de  $I_{CQ}$  em função da temperatura ( $\Delta I_{CQ}/\Delta\theta$ ).

15.c. - Variações de  $I_{CQ}$  em função das tensões de alimentação ( $\Delta I_{CQ}/\Delta V_{CC}$ ).

15.d. - Concluir qual dos três circuitos é, em linhas gerais, mais estável estaticamente.

Considerar  $\Delta\theta = 50\text{ }^\circ\text{C}$  ( $0 \sim 50\text{ }^\circ\text{C}$ ),  $\Delta V_{CC} = \pm 0,5\text{ V}$  e  $\Delta\beta = \beta_{max} - \beta_{min}$ .

Dados:

Transistor **QnB**  $\equiv \beta_{tip} = 310,2984$  e  $V_{BEtip} = 0,63685\text{ V}$  @  $27\text{ }^\circ\text{C}$ .

- Espalhamento de fabricação  $\equiv \beta_{min} = 188,554$  c/  $V_{BEmax} = 0,637\text{ V}$  e  $\beta_{max} = 583,85$  c/  $V_{BEmin} = 0,63615\text{ V}$  @  $27\text{ }^\circ\text{C}$ .
- Espalhamento térmico:  $\beta_{(50^\circ\text{C})} = 316,7076$ ;  $\beta_{(0^\circ\text{C})} = 302,243$ ;  $V_{BE(50^\circ\text{C})} = 0,58848\text{ V}$ ;  $V_{BE(0^\circ\text{C})} = 0,69254\text{ V}$ .

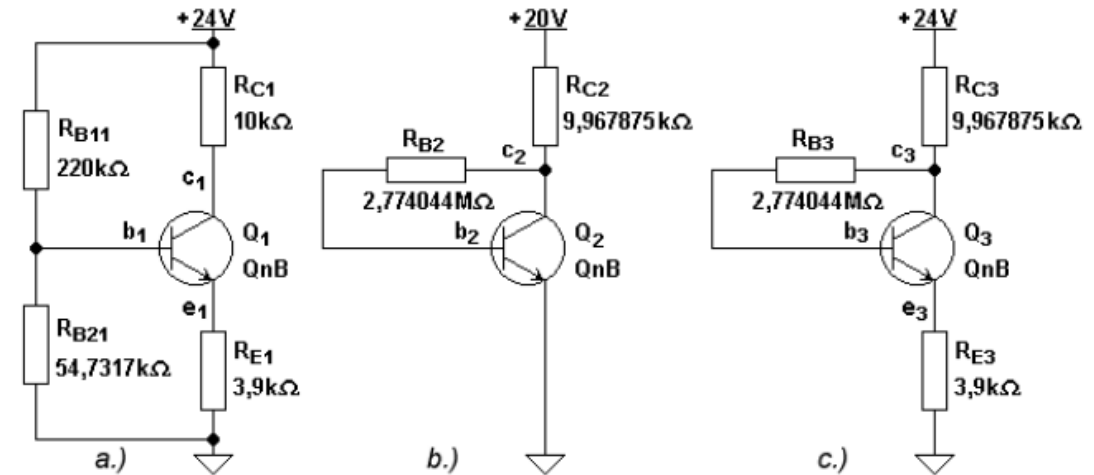


Figura 26 - Três Transistores *npn* Polarizados no Mesmo Ponto Quiescente. a.) Com Divisor de Base e Com Realimentação Negativa de Emissor. b.) Com Realimentação Negativa de Coletor. c.) Com Realimentação Negativa de Coletor e de Emissor.

## 16. Amplificadores *EC* com Várias Topologias de Polarização

### 16.1. Proposição:

16.a. - Estudar o comportamento do circuito da Figura 26a em AC, na configuração *EC*, com  $R_E$  desacoplado e não desacoplado.

16.b. - Estudar o comportamento do circuito da Figura 26c em AC, na configuração *EC*, com  $R_E$  desacoplado e não desacoplado.

16.c. - Estudar o comportamento do circuito da Figura 26b em AC, na configuração *EC*.

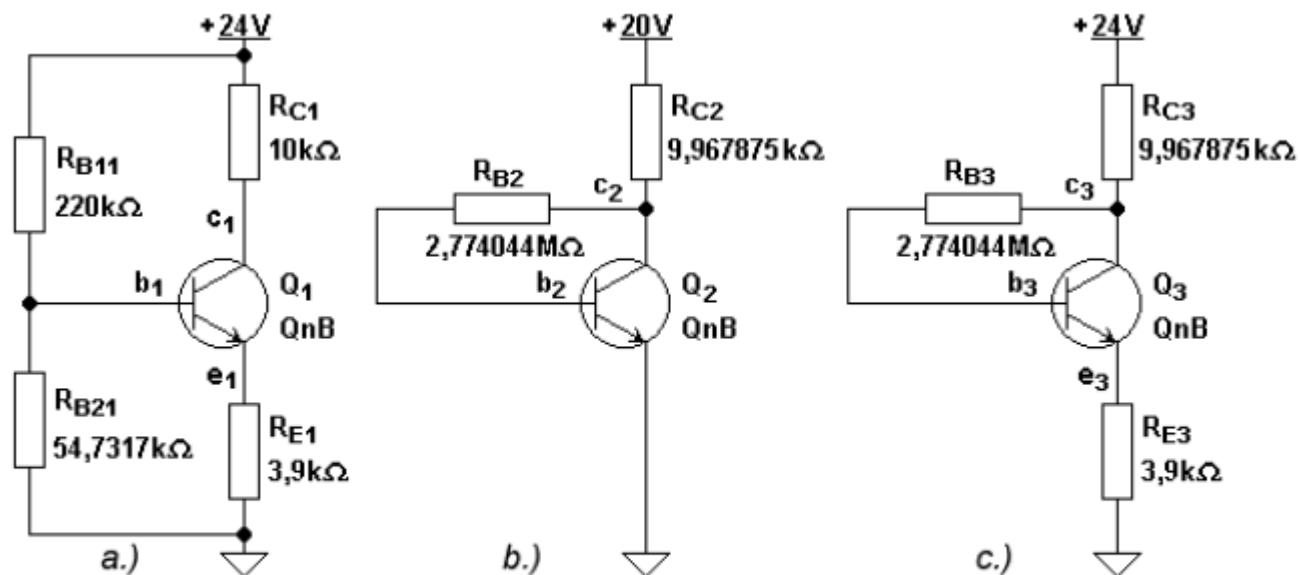


Figura 26 - Três Transistores *nnp* Polarizados no Mesmo Ponto Quiescente. a.) Com Divisor de Base e Com Realimentação Negativa de Emissor. b.) Com Realimentação Negativa de Coletor. c.) Com Realimentação Negativa de Coletor e de Emissor.

## 17. Amplificador DC com Realimentação Negativa

### 17.1. Proposição:

Dado o circuito da Figura 32, calcular @ 27 °C:

17.a. - A equação de  $V_o$  em função de todos os parâmetros elétricos do circuito.

17.b. - O valor numérico de  $V_o$  no caso típico e nos casos extremos.

Dados @ 27 °C:

- $V_{CC(típ)} = 17\text{ V}; 15\text{ V} \leq V_{CC} \leq 19\text{ V}.$
- $V_{Z(típ)} = 5,556\text{ V}; 5,455\text{ V} \leq V_Z \leq 5,598\text{ V}.$
- $R_{L(típ)} = 24\ \Omega; 12\ \Omega \leq R_L \leq \infty.$
- $\beta_{2(típ)} = 1500; 750 \leq \beta_2 \leq 1200.$
- $\beta_{1(típ)} = 400; 300 \leq \beta_1 \leq 380.$
- $V_{BE2(típ)} = 1,382\text{ V}; 1,224\text{ V} \leq V_{BE2} \leq 1,40\text{ V}.$
- $V_{BE1(típ)} = 0,5915\text{ V}; 0,5587\text{ V} \leq V_{BE1} \leq 0,606\text{ V}.$

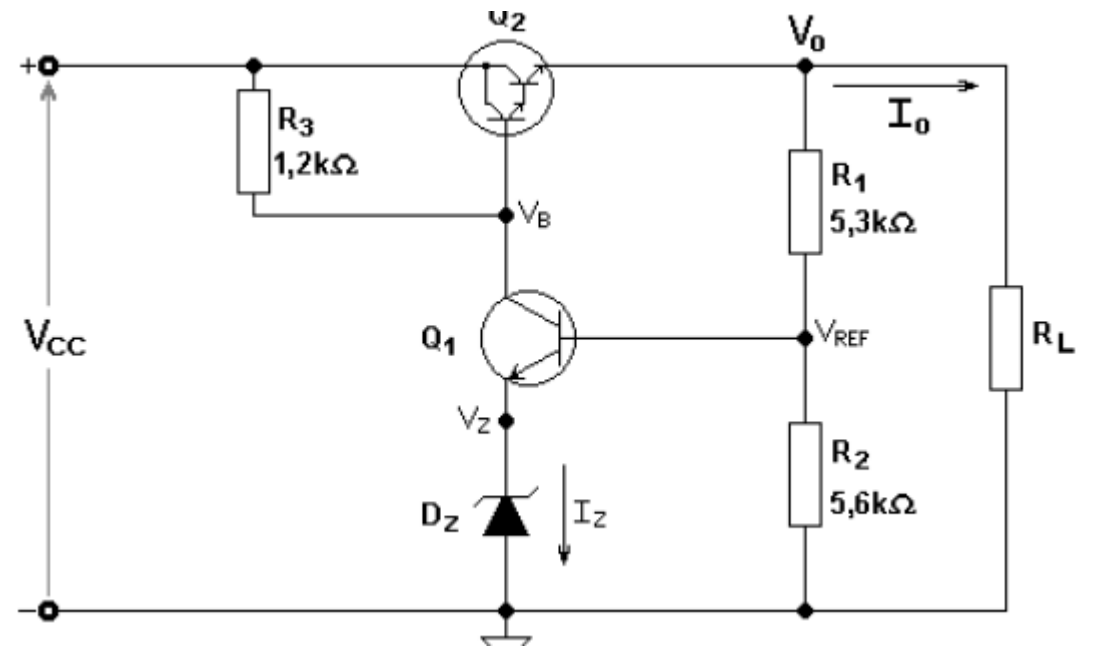


Figura 32 - Circuito Estabilizador de Tensão.

## 18. Amplificador *EC* Genérico

### 18.1. Proposição:

Para o circuito da Figura 33, calcular:

- O ponto de polarização.
- As grandezas elétricas ( $A_v$ ;  $R_i$  e  $R_o$ ) do amplificador em vazio e com  $R_X = 0$ .
- O valor comercial do resistor  $R_X$  para que o ganho de tensão do amplificador torne-se igual a  $10 \text{ V/V} \pm 1\%$ , em módulo, com  $R_L = 69,23 \text{ k}\Omega$ .
- As grandezas elétricas ( $A_v$ ;  $R_i$  e  $R_o$ ) do amplificador em vazio, com  $R_X$  igual ao calculado no item c.

Obs:  $\beta = 524,373$ ;  $V_{BE} = 637,81 \text{ mV}$ ;  $V_{AF} = 33,38 \text{ V}$ ;  $N_F = 1,0022$  e  $V_t = 25,86495247 \text{ mV}$ .

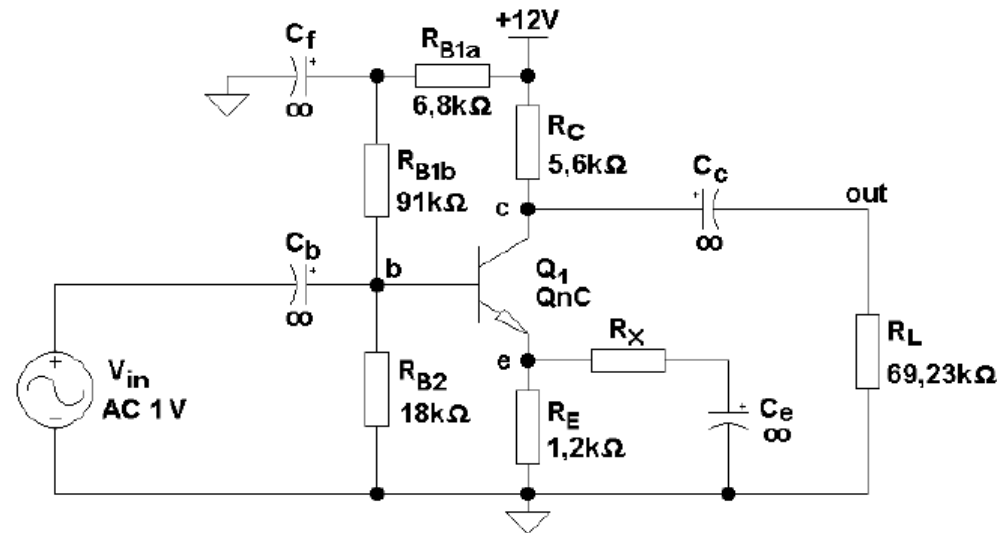


Figura 33 - Amplificador *EC* Genérico.

## 19. Amplificador *EC* com Carga Ativa e Realimentação de Coletor.

### 19.1. Proposição:

Para o circuito da Figura 34, calcular:

- O ponto de polarização.
- As grandezas elétricas ( $A_v$ ;  $R_i$  e  $R_o$ ) do amplificador em vazio.

Obs:  $\beta = 297,52$ ;  $V_{BE} = 637,28 \text{ mV}$ ;  $V_{AF} = 66,4 \text{ V}$ ;  $N_F = 1,0022$  e  $V_i = 25,86495247 \text{ mV}$ .  
A fonte de corrente  $I_1$  deve ser considerada ideal, isto é,  $R_{f(interna)} \rightarrow \infty$  para AC.

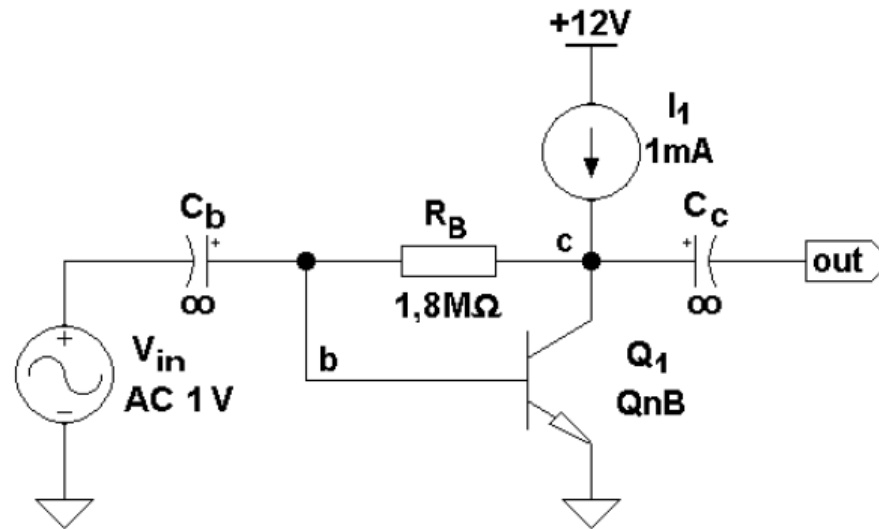


Figura 34 - Amplificador *EC* com Carga Ativa e Realimentação de Coletor.

## 20. Amplificador Isolador com Alto Desempenho.

### 20.1. Proposição:

Para o circuito da Figura 36, calcular @ 27 °C:

- O ponto quiescente e os parâmetros incrementais dos transistores.
- O ganho de tensão,  $A_v = v_{out} / v_{in}$ .
- Dizer qual é o nome técnico desse circuito.

Dados:

	Q <sub>1</sub>	Q <sub>2</sub>
$\beta$	349,00	321,66
$V_{BE}$ [V]	-0,4979	0,5933
$V_{AF}$ [V]	30,9	66,4
$N_F$	1,0	1,0022

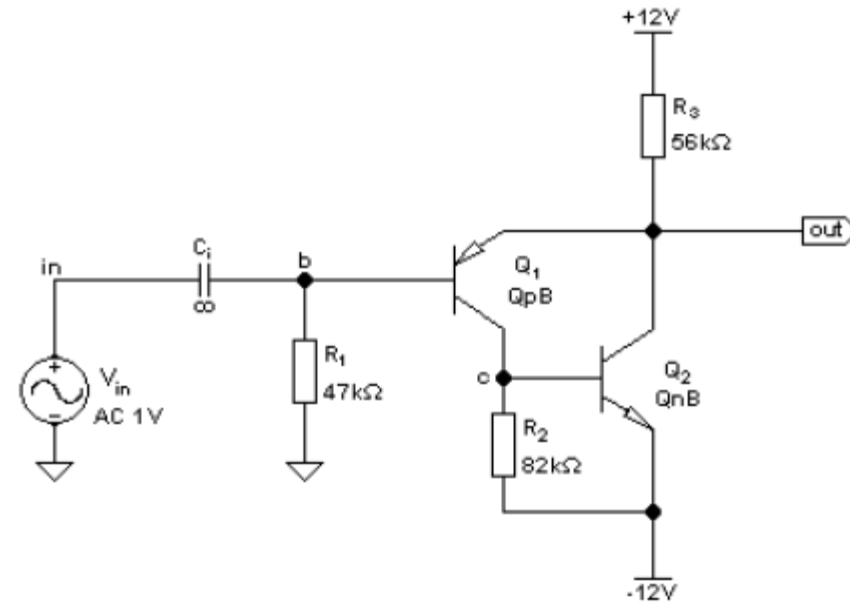


Figura 36 - Amplificador Isolador com Alto Desempenho.



## 21. Amplificador Operacional Idealizado.

### 21.1. Proposição:

O circuito da Figura 39 teve suas fontes de corrente otimizadas para que  $V_{out(DC)} = 0\text{ V} \pm 10\ \mu\text{V}$  @  $27\ ^\circ\text{C}$ . Calcular:

- As grandezas quiescentes e os parâmetros incrementais dos transistores:  $I_{CQ}$ ;  $V_{CEQ}$ ;  $g_m$ ;  $r_\pi$  e  $r_o$ .
- Os parâmetros elétricos do amplificador, para pequenos sinais e baixas frequências:  $A_v$  ( $v_{out}/v_{in}$ );  $R_i$  e  $R_o$ .
- Avaliar o valor da máxima excursão do sinal de saída, para  $R_L = 28\ \text{k}\Omega$ .

Dados:

	Q1a	Q1b	Q2	Q3
$\beta$	332	334,370	701,692	659,815
$V_{BE}$ (V)	0,5567	0,5567	-0,5783	0,6139
$V_{AF}$ (V)	66,40	66,40	23,00	33,38
$N_F$	1,0022	1,0022	1,010	1,0022

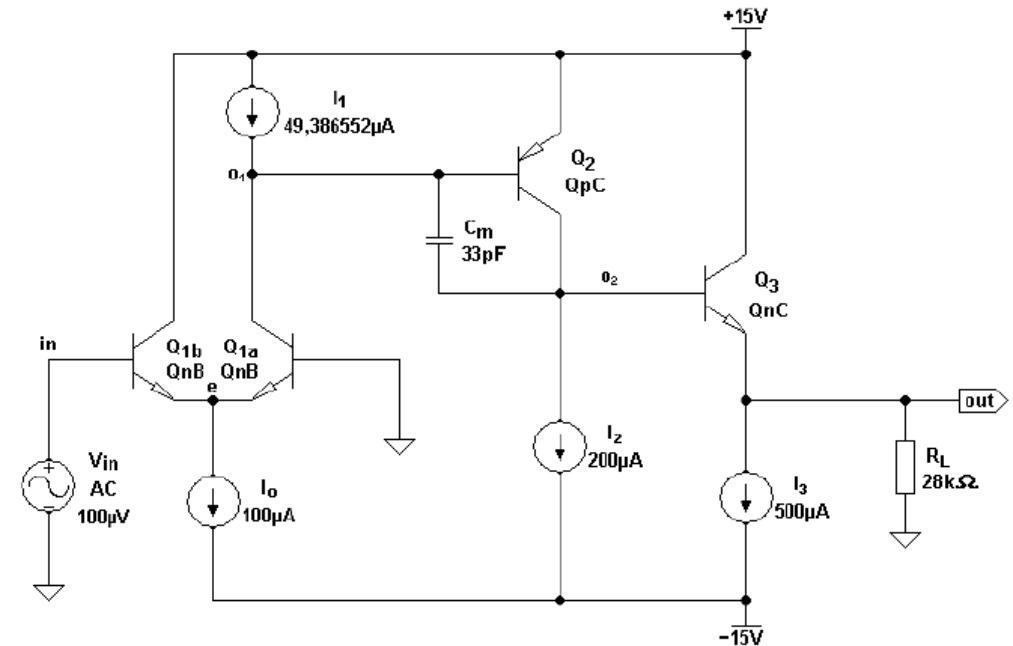


Figura 39 – Amplificador Operacional Idealizado.

## 22. Estabilizador de Tensão.

### 22.1. Proposição:

Usando as leis de Ohm e de Kirchhoff, deduzir as equações que calculam os valores da tensão de saída ( $V_o$ ) e da corrente no diodo Zener ( $I_Z$ ), no circuito da Figura 41. Usar, para o diodo Zener, um modelo linearizado com os parâmetros  $V_{rev}$  e  $R_{rev}$  e considerar:  $I_Z \gg I_{B1}$ .

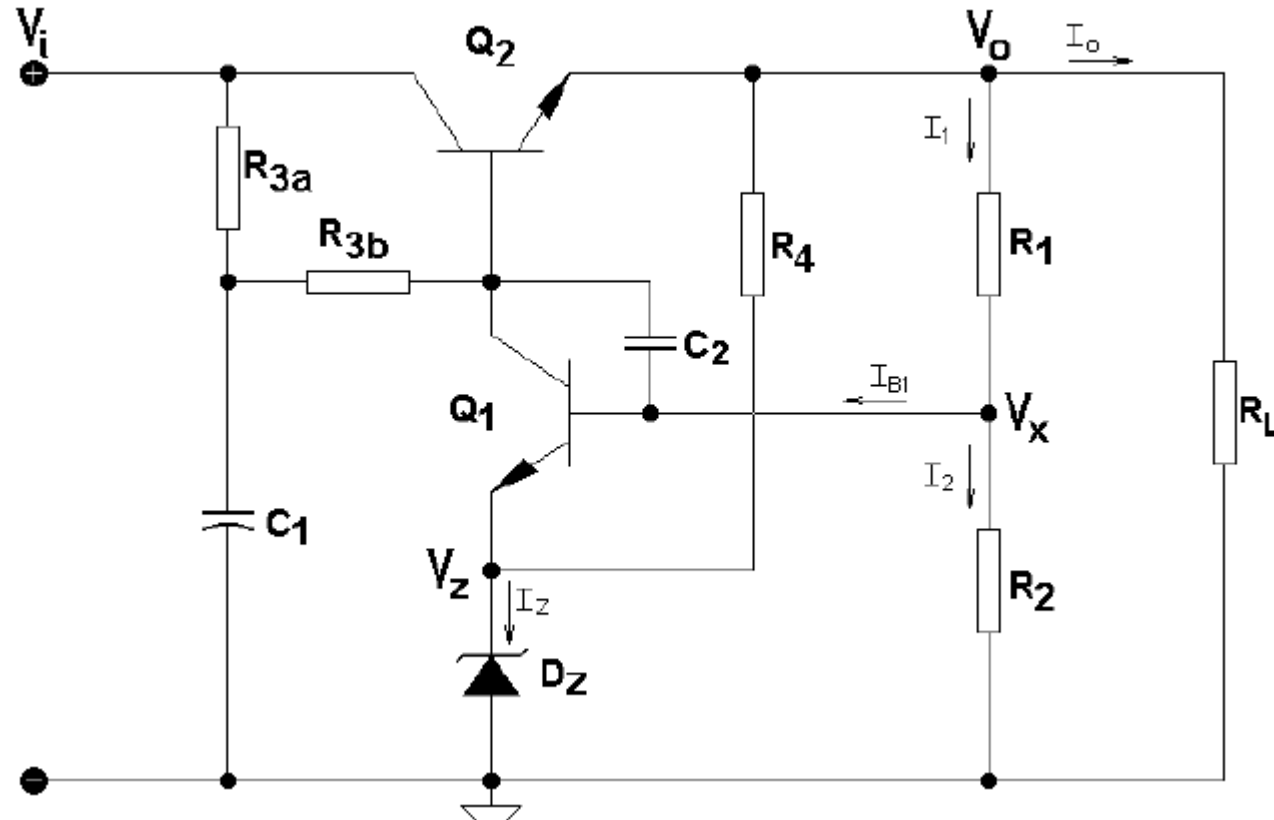


Figura 41 – Estabilizador de Tensão.

## 23. Amplificador Diferencial com Cargas Passivas

### 23.1. Proposição:

O circuito da Figura 44 é um amplificador diferencial básico, carregado com cargas passivas. Calcular, em  $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ , o ponto quiescente do circuito da Figura 44 e, posteriormente, calcular os parâmetros AC do amplificador, isto é:  $A_{v1} = v_o / v_{i1}$  e  $A_{v2} = v_o / v_{i2}$ . O circuito está alimentado com  $V_{CC} = \pm 30\text{ V}$ .

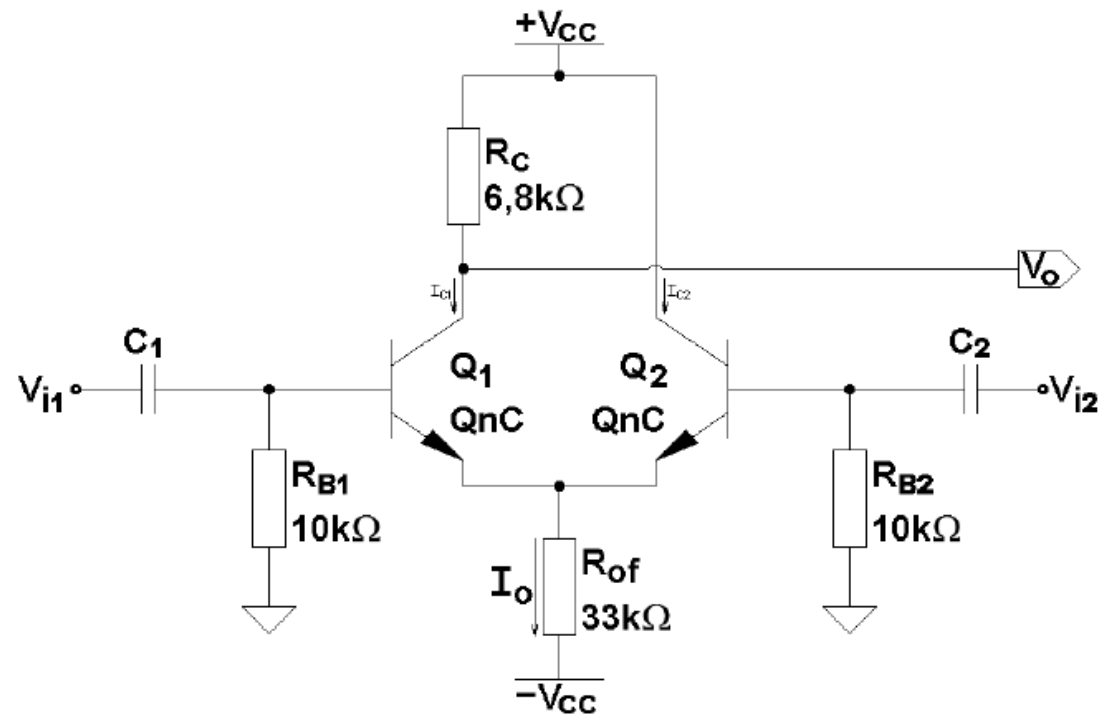


Figura 44 – Amplificador Diferencial Básico.