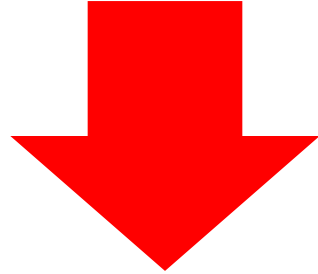


Análise DC de Circuitos com BJT



Análise AC de Circuitos com BJT

Referência Bibliográfica

SEL-EESC-USP

Eletrônica Básica - Amplificadores Analógicos BJT

Exercícios

P. R. Veronese
2014

| Exercício | Assunto | Pg. | Análise DC | Pg. | Análise AC | Pg. |
|------------------|--|------------|-------------------|------------|-------------------|------------|
| 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 |

| Exercício | Assunto | Pg. | Análise DC | Pg. | Análise AC | Pg. |
|------------------|--|------------|-------------------|------------|-------------------|------------|
| 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 | | | | | |

| Exercício | Assunto | Pg. | Análise DC | Pg. | Análise AC | Pg. |
|------------------|--|------------|-------------------|------------|-------------------|------------|
| 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 |

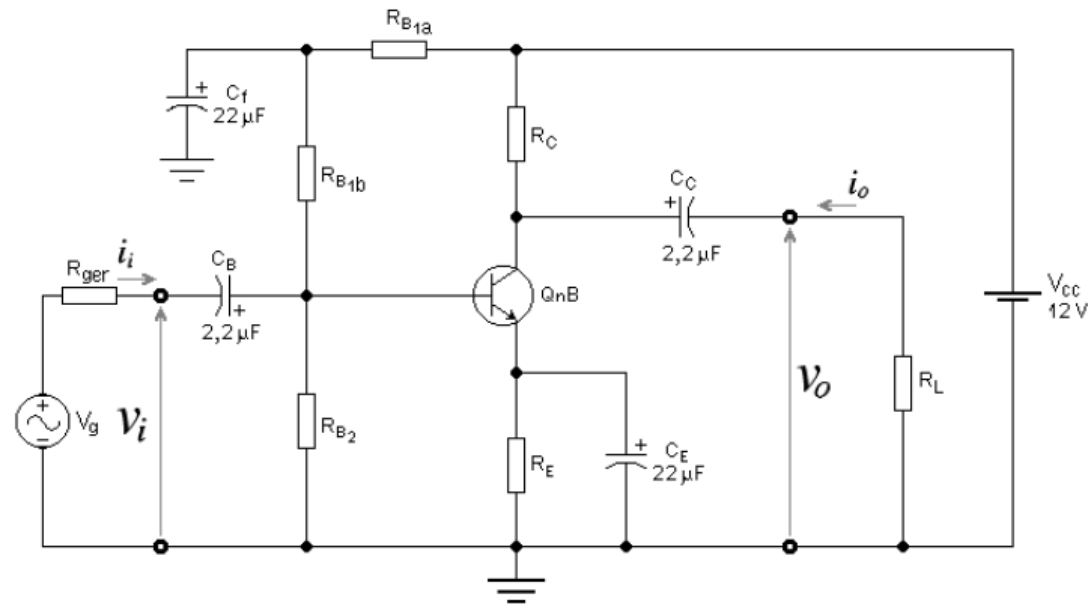
1. Parâmetros de Modelagem

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 β e V_{BE} do transistor para o ponto de polarização estipulado.

1.b - As grandezas incrementais g_m , r_π , r_o , C_μ e C_π 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 $33 V \leq V_{AF} \leq 110 V$.

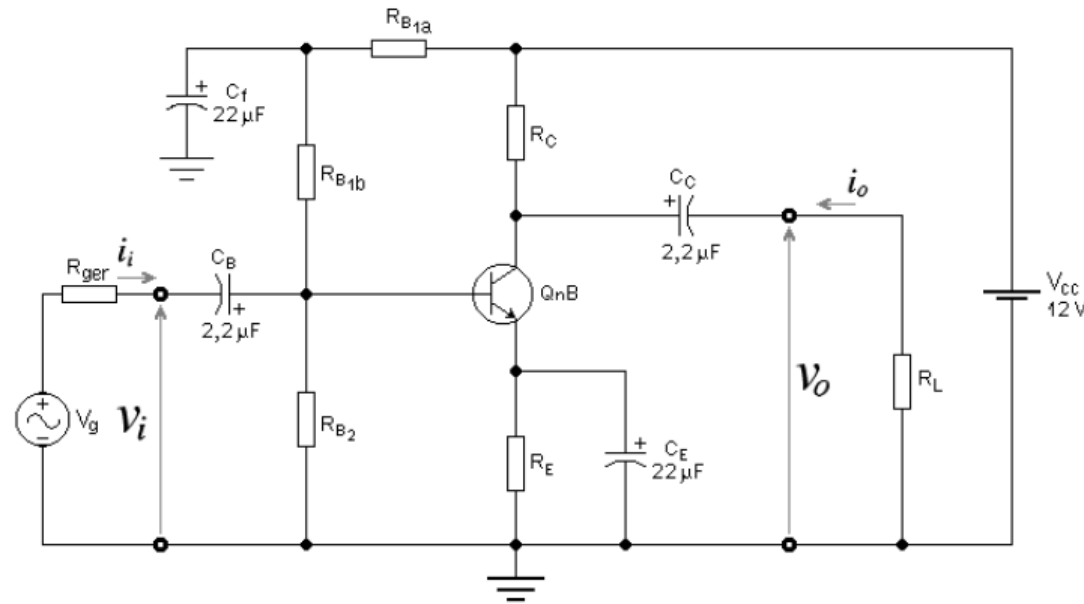


Figura 1- Amplificador Emissor-Comum, Usado nos Exercícios 2 e 3.

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 $R_L = 43 \text{ k}\Omega$.

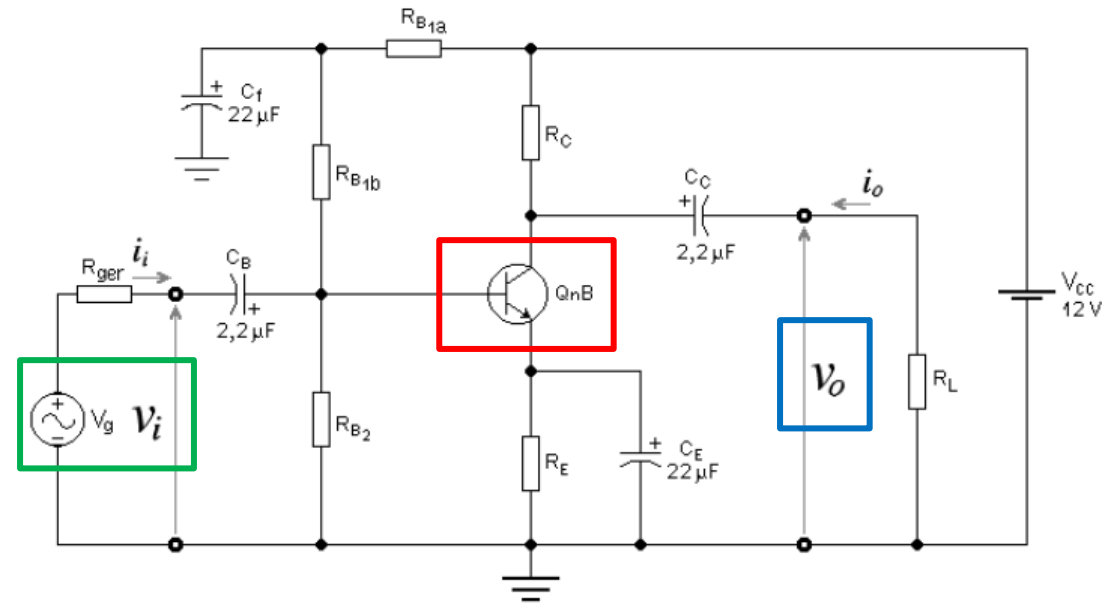


Figura 1- Amplificador Emissor-Comum, Usado nos Exercícios 2 e 3.

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 $C_\mu = 3,15 pF$.

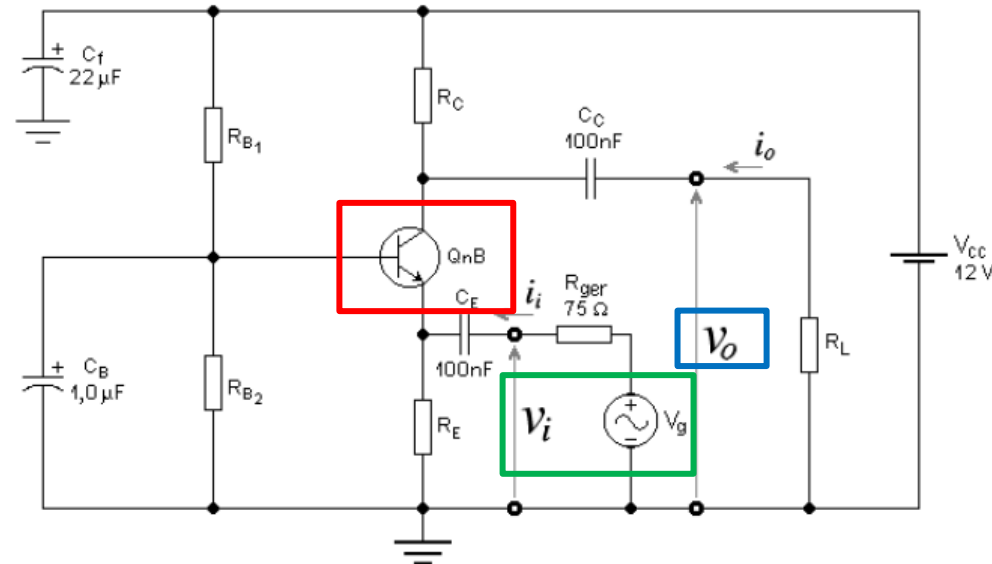


Figura 2 – Amplificador Base-Comum, Usado no Exercício 4.

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.

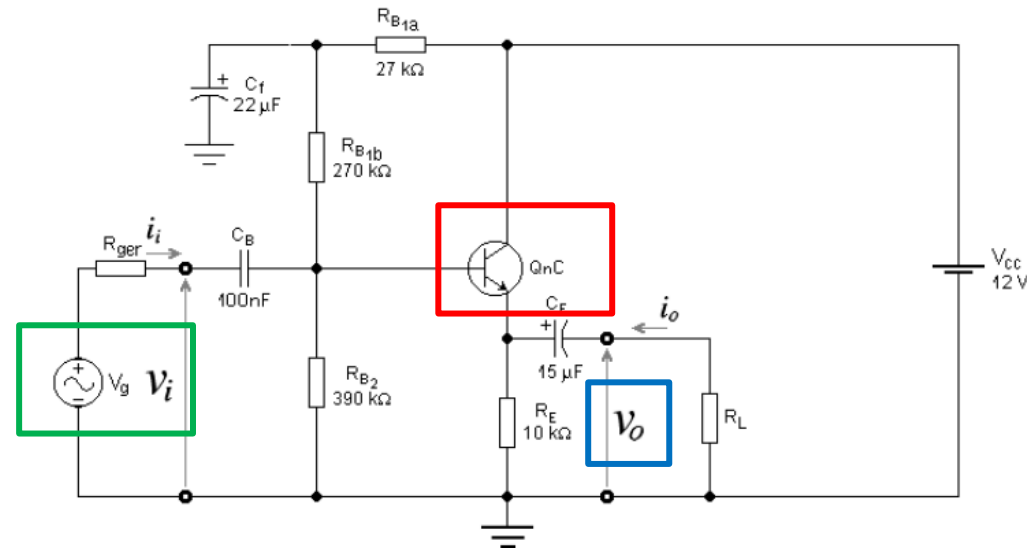


Figura 3 – Amplificador Coletor-Comum, Usado no Exercício 5.

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°). 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 $C_\mu = 3,04 \text{ pF} @ 25^\circ \text{C}$.

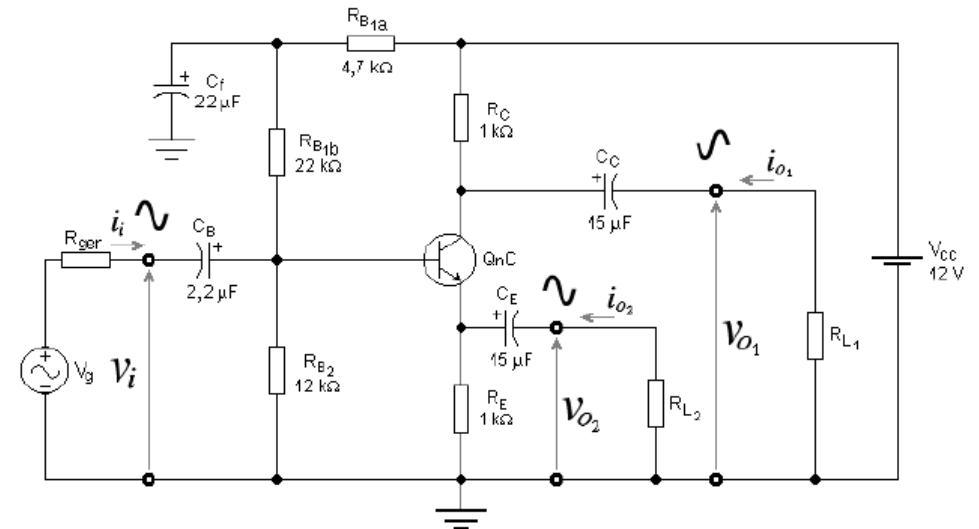


Figura 4 – Amplificador Separador de Fase Usado no Exercício 6.

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.

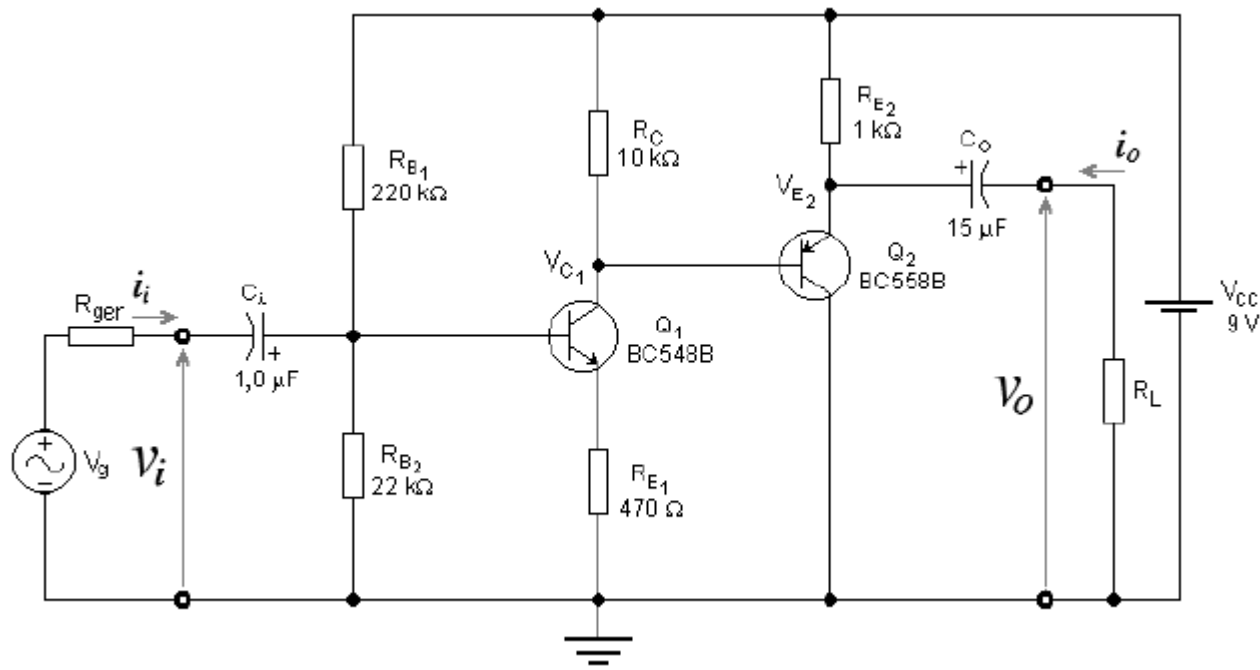


Figura 5 – Amplificadores em Cascata com Acoplamento DC.

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).

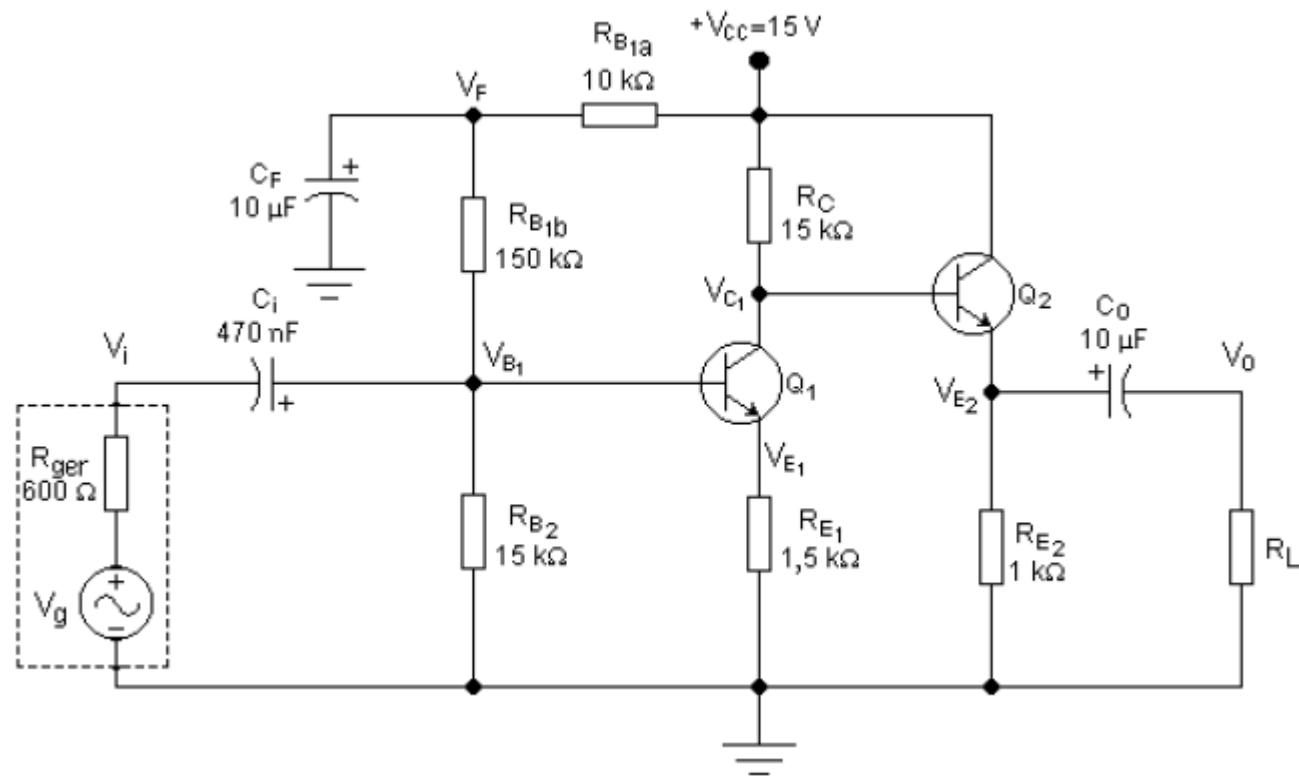


Figura 6 - Amplificadores em Cascata com Acoplamento DC.

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.

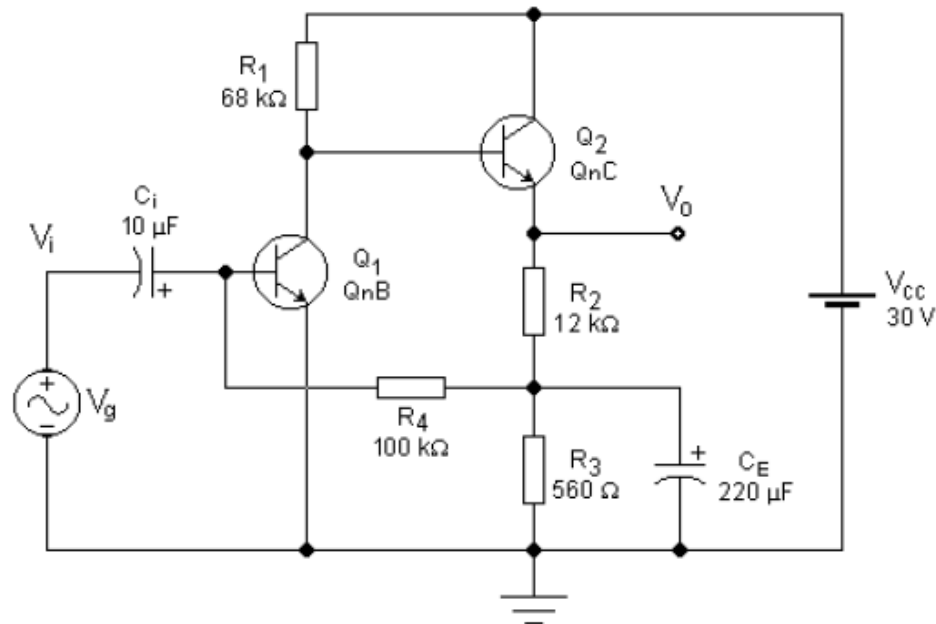


Figura 7 – Amplificador em Cascata com Realimentação DC.

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.

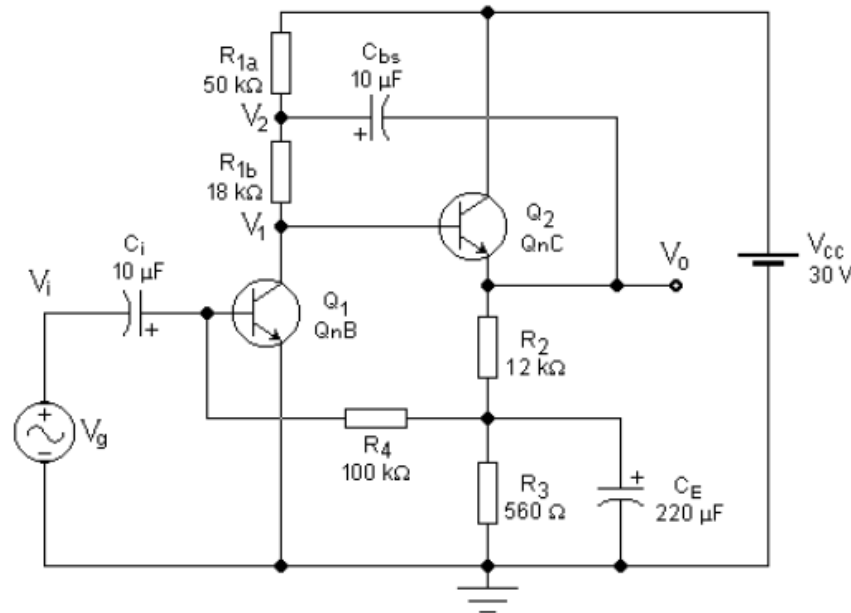


Figura 10 - Amplificador em Cascata com Realimentação DC e *Bootstrap*.

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.

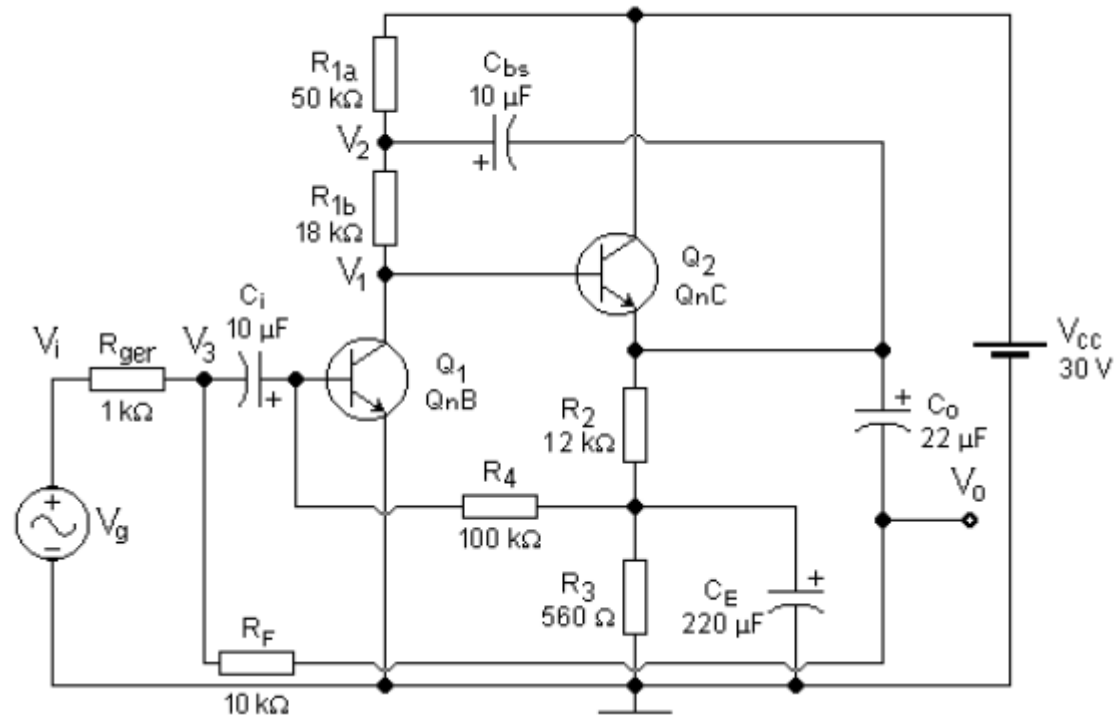


Figura 15 – Amplificador com Realimentação Negativa AC e DC e com *Bootstrap*.

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.

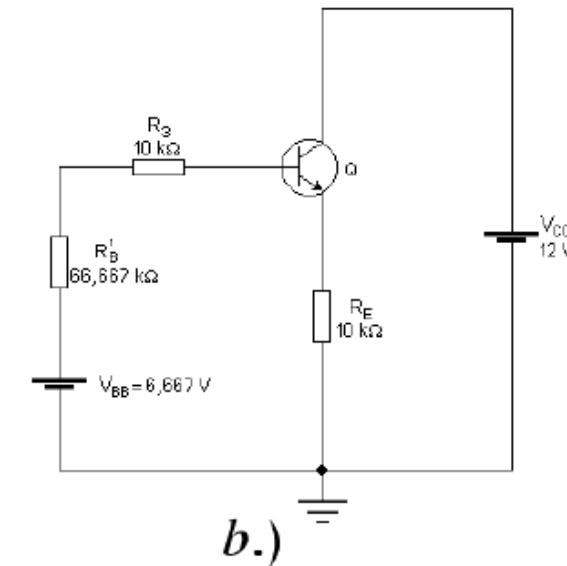
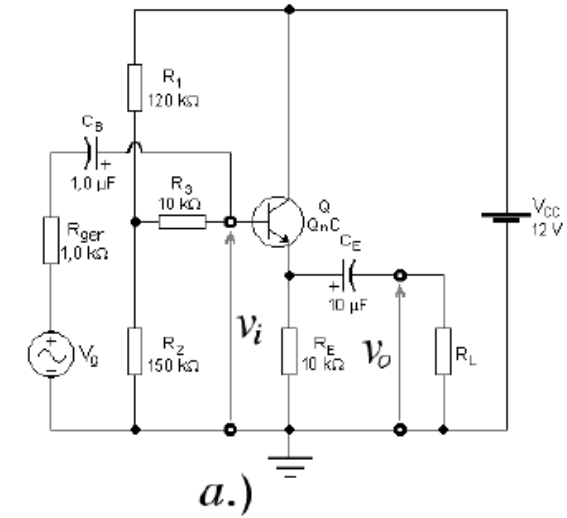


Figura 17 – Amplificador Coletor-Comum. a.) Circuito. b.) Circuito Equivalente DC.

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 $C_{\mu 1} = 5,11\text{ pF}$.

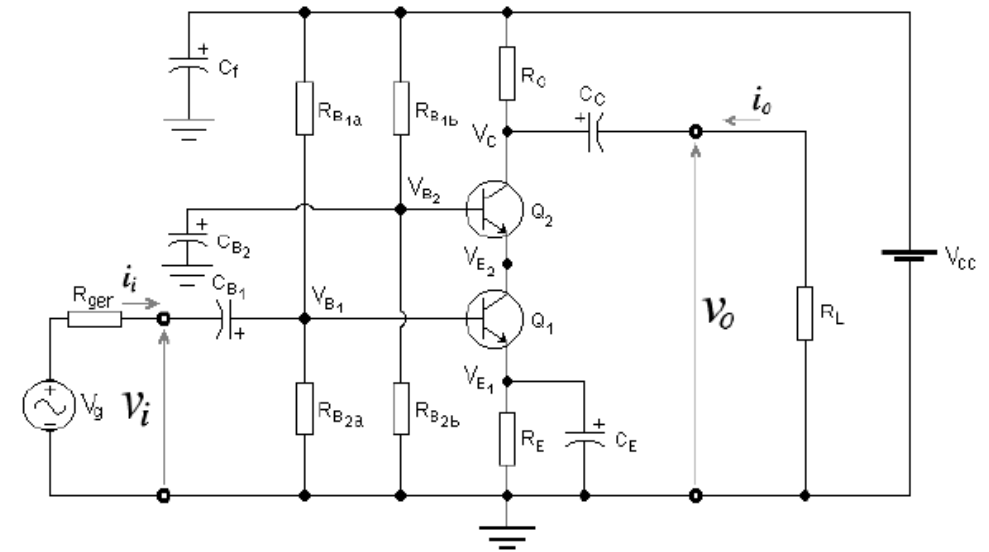


Figura 21 – Amplificador *Cascode*.

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.

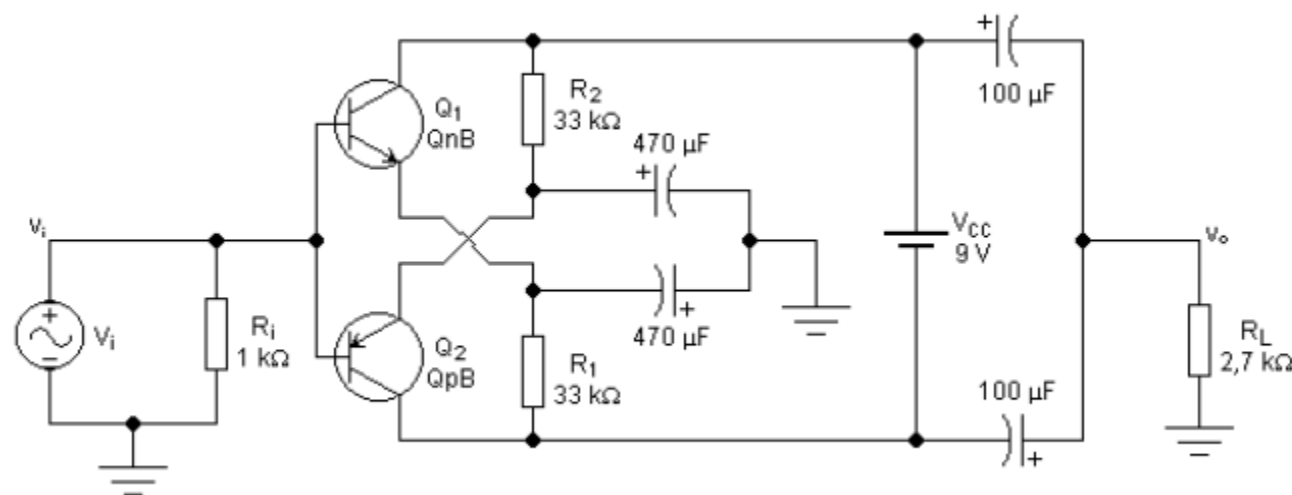


Figura 23 – Amplificador Emissor-Comum com Alimentação Flutuante.

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

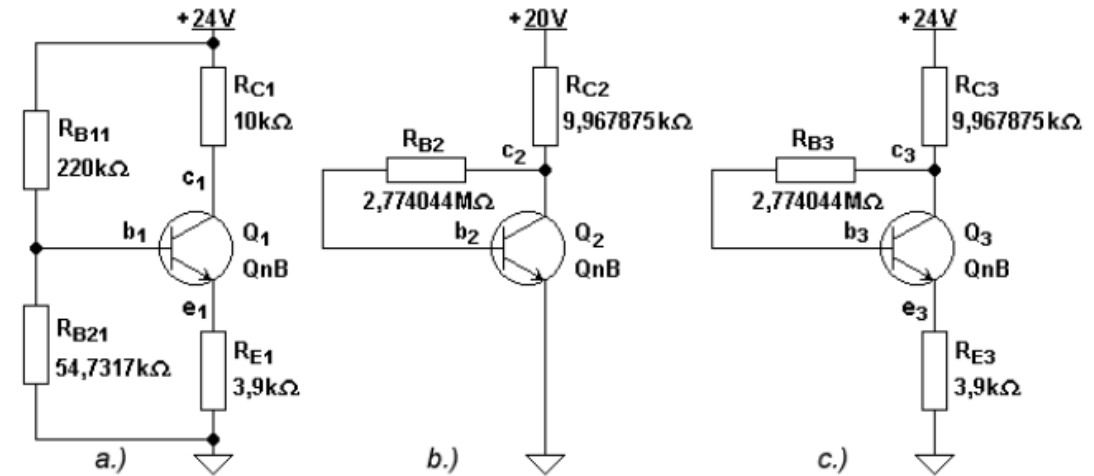


Figura 26 - Três Transistores *npn* Polarizados no Mesmo Ponto Quiescente. a.) Com Divisor de Base e Com Realimentação Negativa de Emissor. b.) Com Realimentação Negativa de Coletor. c.) Com Realimentação Negativa de Coletor e de Emissor.

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*.

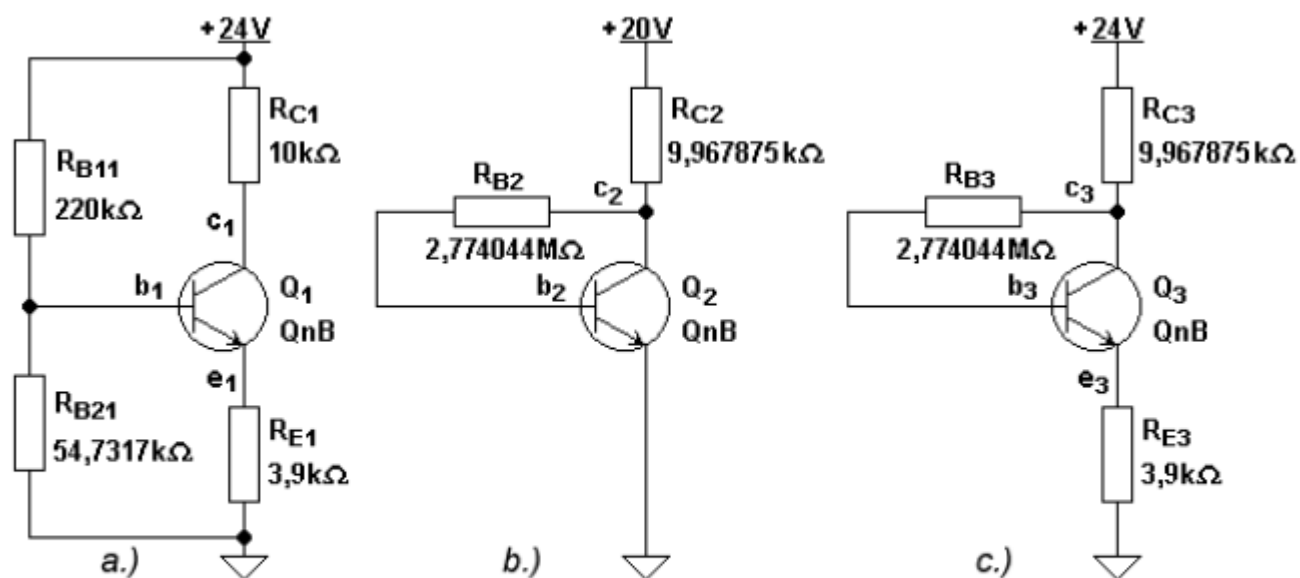


Figura 26 - Três Transistores *nnp* Polarizados no Mesmo Ponto Quiescente. a.) Com Divisor de Base e Com Realimentação Negativa de Emissor. b.) Com Realimentação Negativa de Coletor. c.) Com Realimentação Negativa de Coletor e de Emissor.

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:

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

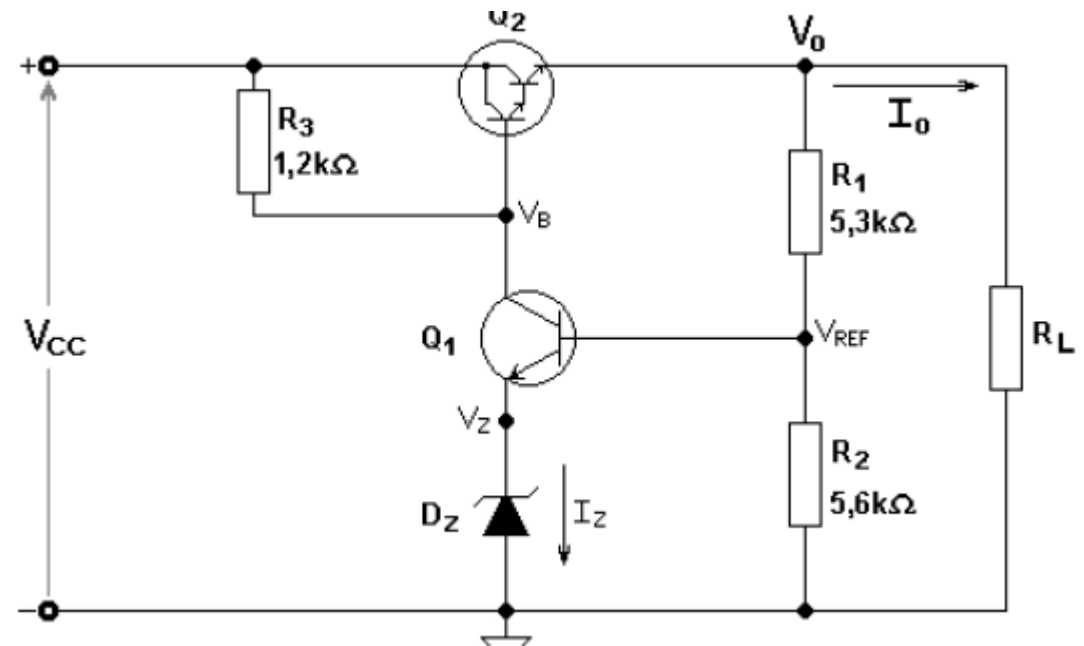


Figura 32 - Circuito Estabilizador de Tensão.

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 $V_t = 25,86495247 \text{ mV}$.

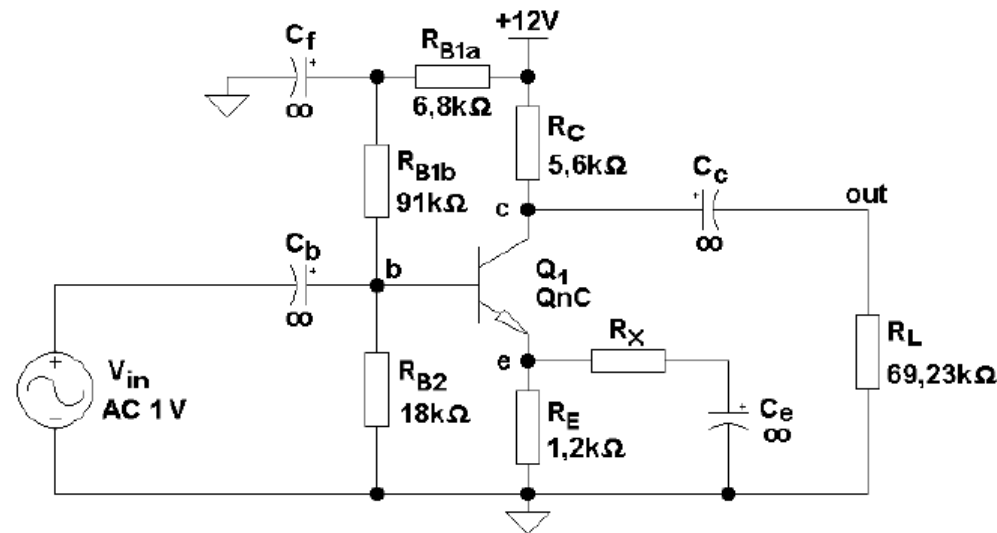


Figura 33 - Amplificador *EC* Genérico.

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.

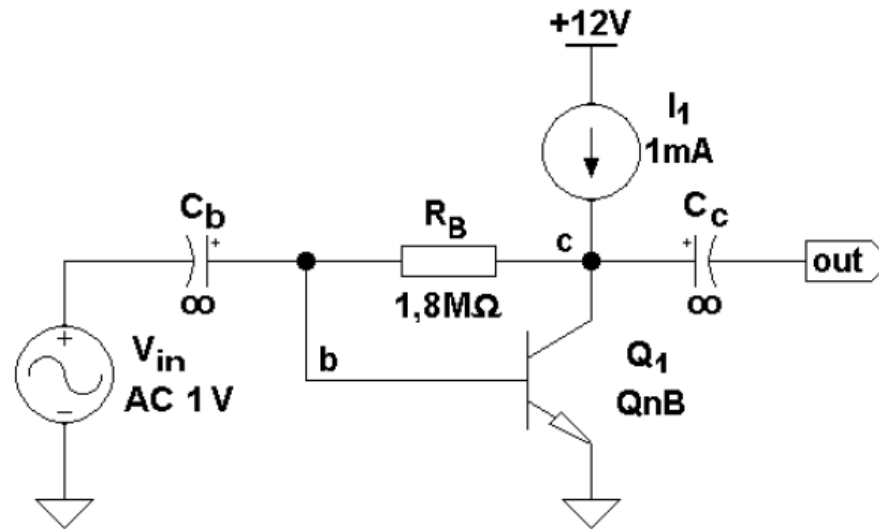


Figura 34 - Amplificador *EC* com Carga Ativa e Realimentação de Coletor.

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 ₁ | Q ₂ |
|--------------|----------------|----------------|
| β | 349,00 | 321,66 |
| V_{BE} [V] | -0,4979 | 0,5933 |
| V_{AF} [V] | 30,9 | 66,4 |
| N_F | 1,0 | 1,0022 |

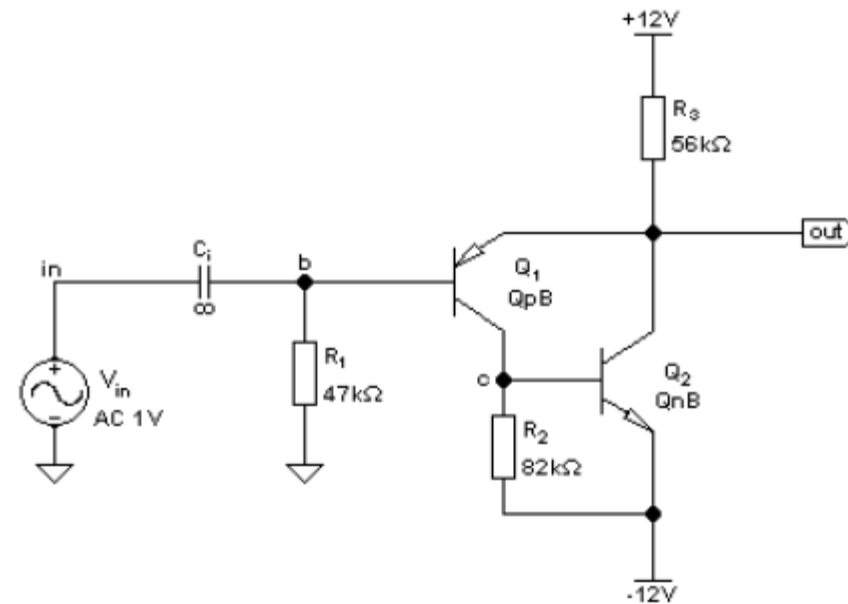


Figura 36 - Amplificador Isolador com Alto Desempenho.

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_π 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 |
|--------------|--------|---------|---------|---------|
| β | 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 |

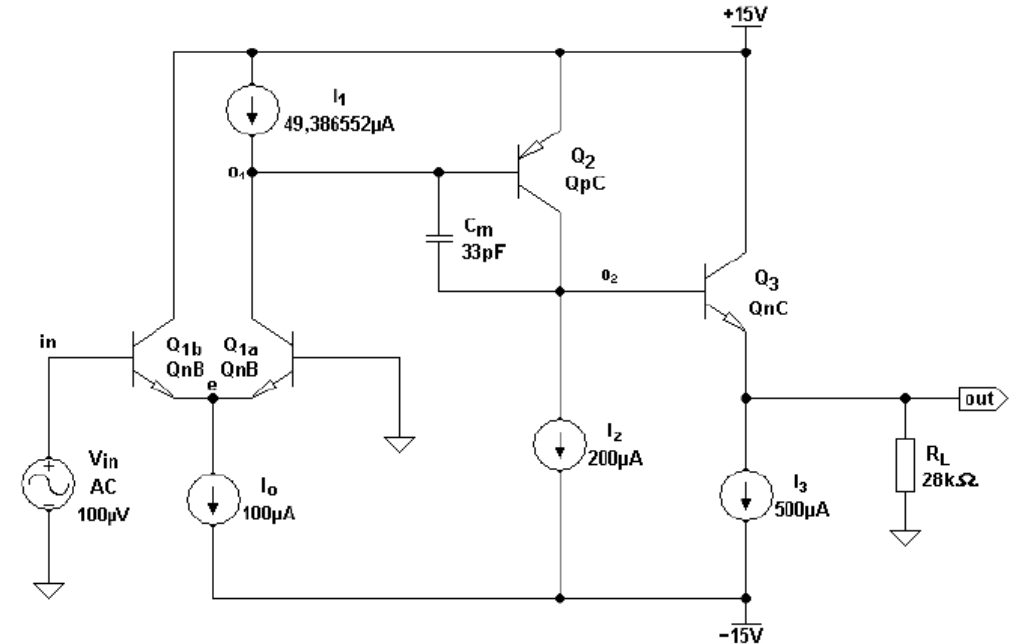


Figura 39 – Amplificador Operacional Idealizado.

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: $I_Z \gg I_{B1}$.

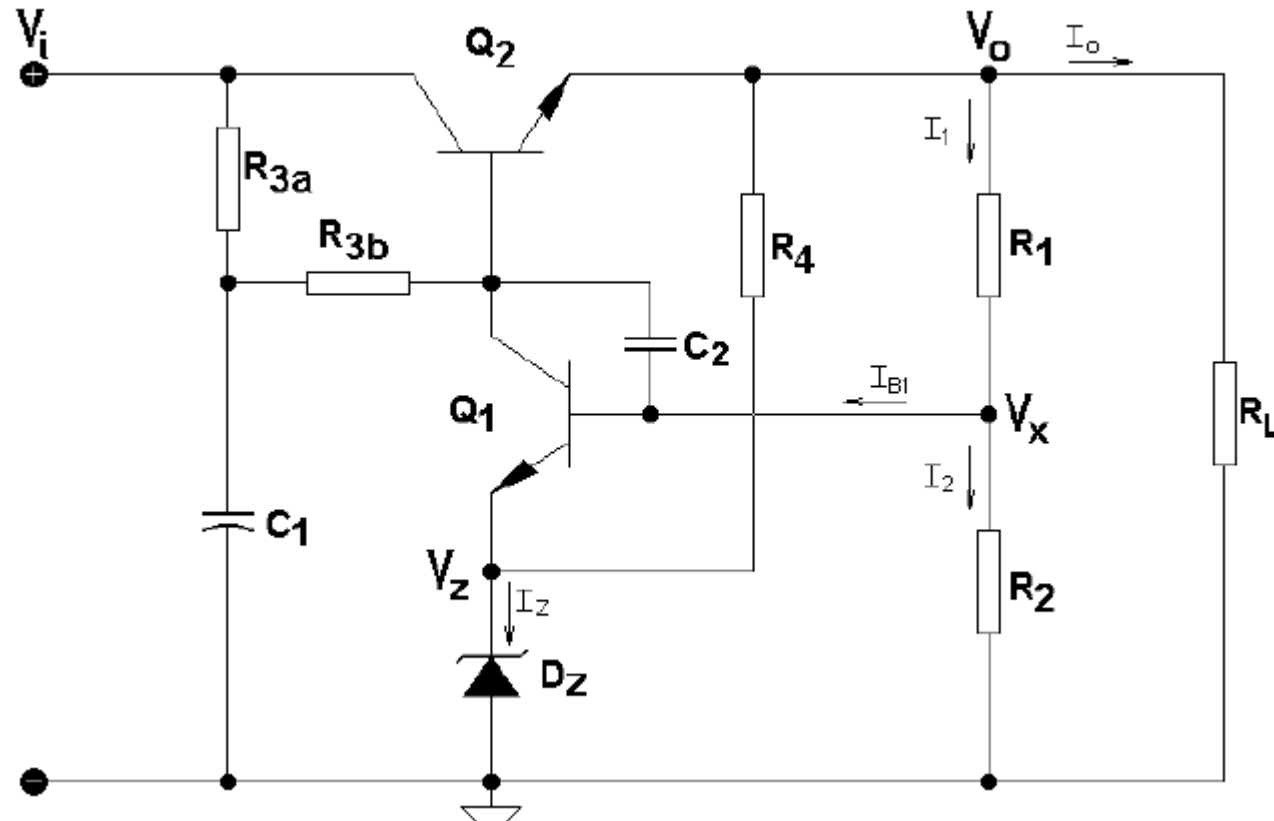


Figura 41 – Estabilizador de Tensão.

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 $V_{CC} = \pm 30\text{ V}$.

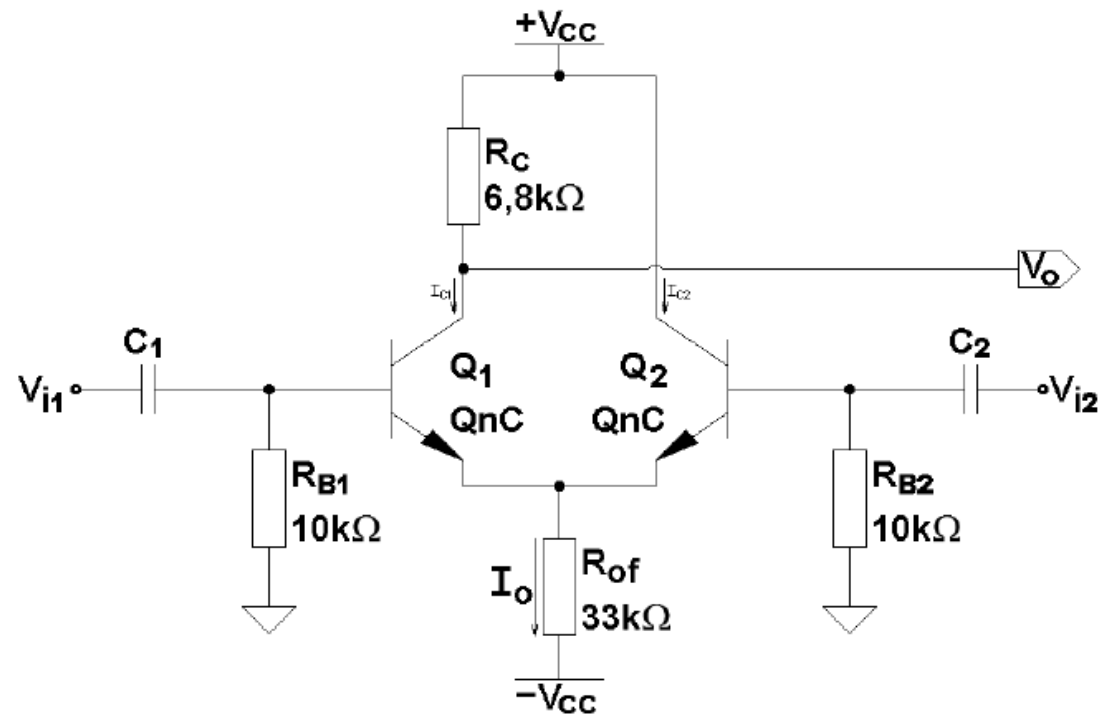


Figura 44 – Amplificador Diferencial Básico.

**Comparação de Resultados
Teóricos
e
de Simulação no LTSPce**