

PRÁTICA #1 – RESPOSTA EM FREQUÊNCIA

I) Objetivos

- Projetar o amplificador da fig.1, na configuração EMISSOR COMUM (EC), para atender às características especificadas.
- Estimar as respostas de amplificadores, em baixas e altas frequências.
- Comparar o desempenho das configurações EMISSOR COMUM (EC) e CASCODE.

II) Projeto

- Projetar o circuito da fig.1, na configuração EMISSOR COMUM (EC), atendendo aos seguintes requisitos:

- $V_{CC}=12\text{ V}$
- *Transistores:* $Q_1=Q_2=BC546B / 547B / 548B$
- $I_{CQ}=1,5\text{ mA} \pm 5\%$
- $V_{CEQ2}=1,0\text{ V}$
- $R_S=1\text{ k}\Omega$ e $R_L=27\text{ k}\Omega$
- $C_3=C_4=10\text{ pF}$ (capacitores cerâmicos)
- Módulo do ganho de tensão:
- $Z_{IN} \geq 10\text{ k}\Omega$, para as configurações EC e CASCODE
- Calcular a frequência de corte inferior entre 30 e 100 Hz;
- Estimar a frequência de corte superior;
- Temperatura ambiente (T_{amb}) entre $-15\text{ }^\circ\text{C}$ e $+55\text{ }^\circ\text{C}$;
- Variação percentual de I_{CQ} :

devido à V_{BE} :

devido à h_{FE} :

$$|A_v| \triangleq \left| \frac{v_o}{v_s} \right| 10 \frac{\text{V}}{\text{V}} \pm 10\%$$

$$\left| \frac{\Delta I_{CQ}}{I_{CQ}} \right|_{V_{BE}} \leq 6\%$$

$$\left| \frac{\Delta I_{CQ}}{I_{CQ}} \right|_{h_{FE}} \leq 7\%$$

- Excursão de sinal na saída (amplitude da senoide): $v_{op} \geq 1,5\text{ V de pico}$

• Manuais para consulta das especificações do transistor:

Principal: MOTOROLA: https://pdf.datasheetcatalog.com/datasheets/150/128424_DS.pdf

Complementares: VISHAY: <https://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/vishay/85113.pdf>

PHILIPS: https://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/philips/BC546_547_3.pdf

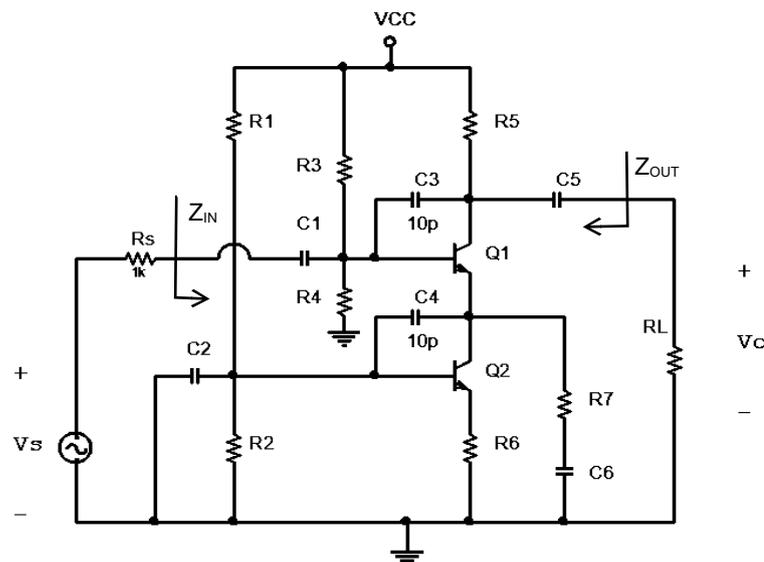


fig 1: Configuração Emissor Comum (EC)

Observações:

- Projetar o amplificador EC da fig. 1 atendendo às especificações e escolhendo valores comerciais para os componentes;
- Utilize os manuais do transistor para verificar valores de h_{FE} e capacitâncias parasitas (C_{BC}).
- Sugestão: utilizar o $h_{FE\text{ proj}}$, indicado na memória de cálculo, para que o valor da variação percentual de I_{CQ2} seja simétrica com a variação de h_{FE} para o máximo e para o mínimo.
- As colunas “projetado”, nas tabelas anexas (EC e CASCODE) devem ser preenchidas com os valores obtidos nas verificações de cada configuração, respectivamente, itens 6 a 9 (EC) e 10 a 11 (CASCODE) da memória de cálculo.

III) Orientações para as simulações

TODAS as simulações devem conter TÍTULO e indicação dos VALORES importantes (Plot/Label/Mark), que serão anotados nas colunas “SIMULADO” da Tabela.

Realizar as simulações na seguinte ordem:

1. Determinação de BF

No simulador, o h_{FE} do transistor é controlado pelo parâmetro **BF**.

Para fazer as simulações com $h_{FE\text{ max}}$, $h_{FE\text{ proj}}$ e $h_{FE\text{ min}}$ será preciso determinar os valores de **BF_{max}**, **BF_{proj}** e **BF_{min}** correspondentes. Procedimento para encontrar o BF correspondente ao h_{FE} desejado, **(usar o circuito projetado)**:

- Perfil de simulação: “**DC Sweep**”

No perfil de simulação, selecionar: análise do tipo “DC Sweep”, opção “model parameter”, “model type (NPN)”, “Model name (transistor usado: p.ex. BC546B)”, “Parameter name (BF)”. Selecionar ainda o tipo de varredura: “linear” na faixa desejada (valor inicial / valor final / incremento).

Mandar plotar $I_C(Q2)/I_B(Q2)$ e verificar quais valores de BF correspondem aos valores de h_{FE} desejados e usar estes valores de BF para fazer as simulações desejadas.

Após plotar o gráfico, coloque o BF equivalente ao h_{FE} de projeto como parâmetro para as próximas simulações.

2. Polarização e excursão de sinal

- Perfil de simulação: “**Transient**”

Com o valor de BF ajustado, faça uma simulação transiente do circuito em questão. Ao realizá-la, o SPICE fará a simulação de polarização do seu circuito. Uma cópia do esquemático, com as tensões e correntes indicadas, deverá ser apresentada junto dos outros gráficos simulados.

Ajuste a amplitude do sinal de entrada, para que o sinal de saída apresente ambos os semiciclos ceifados, indicando o limite de excursão linear.

3. Ganho, resposta em frequência e impedâncias (R_{ac} , Z_{in} , Z_{out} e R_o)

- Perfil de simulação: “**AC Sweep**”

Para as simulações de R_{ac} , Z_{in} , Z_{out} e R_o , escolher a opção “AC Sweep/Noise”. Marque a opção “Logarithmic”. Indique as frequências (inicial e final) desejadas. Em “pontos por década” coloque 100.

No circuito, ajustar o parâmetro AC da fonte de sinal de entrada para 1.

Plotar, num único gráfico, o ganho e as frequências de corte do amplificador. Em seguida, fazer o gráfico das impedâncias na seguinte ordem: R_{ac} , Z_{in} , Z_{out} e R_o

4. Variação de temperatura e h_{FE} .

- Perfil de simulação: “**Transient**”

Para realizar essas simulações, você deve marcar a opção “Temperature” e colocar SÓ UMA TEMPERATURA. Após ajustar a temperatura desejada, você deve marcar a opção “Parametric Sweep” e ajustar o valor de BF desejado. Após isso, você deve plotar o gráfico de v_{opmax} e anotar o valor de $I_{cQ(Q2)}$ na tabela.

IV) Medidas

- Montagens:

Observar que as diferenças entre os circuitos das fig.1 e fig.2 estão apenas nas ligações de R_s aos capacitores C1 ou C2 e nas ligações de R7 ao coletor ou emissor de Q2.

Desenhar as montagens utilizadas para as medidas das impedâncias de entrada e de saída, justificando o método.

- Para o circuito da fig. 1:

Ajustar a corrente de polarização (I_{CQ2}) permitindo variação máxima de $\pm 5\%$ em relação ao valor adotado no projeto. Se necessário, varie somente o valor de R1, podendo fazer associações de resistores comerciais para obter o valor desejado. Observe que R1 da montagem pode ser diferente do usado no projeto e na simulação. O importante é deixar as correntes de polarização aproximadamente iguais, nas três situações: projeto, simulação e montagem para facilitar as comparações.

- Repetir as medidas para o circuito da fig. 2.

V) Escala de valores comerciais de componentes disponíveis no laboratório:

- **Resistores Filme metalizado 10%:**

$(1,0 - 1,2 - 1,5 - 1,8 - 2,2 - 2,7 - 3,3 - 3,9 - 4,7 - 5,6 - 6,8 - 8,2 - 10,0) \times 10^0$ a $10^6 \Omega$

- **Capacitores Eletrolíticos:**

$(1,0 - 2,2 - 4,7) \times 10^0$ a $10^3 \mu F$, exceto 4700 μF

- **Poliéster metalizado:**

$(1,0 - 1,2 - 1,5 - 1,8 - 2,2 - 2,7 - 3,3 - 3,9 - 4,7 - 5,6 - 6,8 - 8,2 - 10,0) \times 10^0$ a $10^2 nF$

- **Cerâmicos:**

$(1,0 - \text{-----} - 1,8 - \text{-----} - 2,7 - \text{-----} - \text{-----} - 4,7 - \text{-----} - \text{-----} - \text{-----} - \text{-----}) \times 10^0 pF$

$(1,0 - 1,2 - 1,8 - 2,2 - 2,7 - 3,3 - 3,9 - 4,7 - 5,6 - 6,8 - 8,2 - 10,0) \times 10^1 pF$

$(\text{-----} - 1,2 - 1,8 - 2,2 - \text{-----} - 3,3 - 3,9 - 4,7 - \text{-----} - \text{-----} - \text{-----} - \text{-----}) \times 10^2 pF$

VI) Observações

Na apostila “Projeto de amplificador monoestágio” é apresentado um método de projeto mais completo onde, além do resistor de coletor, a corrente de polarização é otimizada para o menor valor que atenda às especificações. O método consiste, basicamente, de um sistema de três inequações onde cada uma delas garante o cumprimento de um ou mais itens da especificação.

Prática #1 - RESPOSTA EM FREQUÊNCIA

GRUPO:



Data: _____

MEMÓRIA DE CÁLCULO (PARTE 1: EMISSOR COMUM)

1. Especificações:

- | | | |
|---|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • $I_{CQ} = 1,5\text{mA}$ • $V_{CC} = \text{_____ V}$ • $V_{CEQ2} = \text{_____ V}$ • $C_3 = C_4 = \text{_____ pF}$ • Módulo do ganho de tensão:
 $A_v \triangleq \left \frac{v_o}{v_s} \right = \begin{cases} \text{_____ V/V} \\ \text{_____ V/V} \end{cases}$ • Excursão de sinal na saída:
 $v_{op} \geq \text{_____ } V_{pico}$ | <ul style="list-style-type: none"> • Impedância de entrada EC e CASCODE:
 $Z_{IN} \geq \text{_____ } k\Omega$ • Frequência de corte inferior:
 $\text{_____ Hz} \leq f_L \leq \text{_____ Hz}$ • Variação percentual da corrente de polarização I_{CQ} :
 $\left \frac{\Delta I_{CQ}}{I_{CQ}} \right _{V_{BE}} \leq \text{_____}$
 $\left \frac{\Delta I_{CQ}}{I_{CQ}} \right _{h_{FE}} \leq \text{_____}$ | <ul style="list-style-type: none"> • Temperatura de operação:
 $\text{_____ } ^\circ\text{C} \leq T_{amb} \leq \text{_____ } ^\circ\text{C}$
 $T_{proj} = \text{_____ } ^\circ\text{C}$ • $\Delta T _{max} = \max \begin{cases} (T_{min} - T_{proj}) \\ (T_{max} - T_{proj}) \end{cases} =$
 $= \max \begin{cases} (\text{_____} - \text{_____}) = \text{_____} \\ (\text{_____} - \text{_____}) = \text{_____} \end{cases}$
 $\Delta T _{max} = \text{_____ } ^\circ\text{C}$ |
|---|--|--|

• **Manuais para consulta das especificações do transistor:**

- Principal:** MOTOROLA: https://pdf.datasheetcatalog.com/datasheets/150/128424_DS.pdf
- Complementares:** VISHAY: <https://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/vishay/85113.pdf>
- PHILIPS: https://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/philips/BC546_547_3.pdf

Do manual do transistor selecione as características relacionadas a seguir:

Tipo: BC_____ $h_{FEmin} = \text{_____}$ $h_{FEmax} = \text{_____}$ $h_{fe\ proj} \cong h_{FE\ proj} = 2 \cdot \frac{h_{FEmin} \cdot h_{FEmax}}{h_{FEmin} + h_{FEmax}} = \text{_____}$

$r_\pi = h_{ie} \cong h_{fe\ proj} \frac{25\text{mV}}{I_{CQ}} \Rightarrow r_\pi = h_{ie} = \text{_____ } k\Omega$ $r_o = 1/h_{oe} = 20\text{ k}\Omega$ Capacitância de coletor máxima (junção)
 $C_c = C_\mu = \text{_____ } pF$

Considere:

$$\frac{\Delta V_{BE}}{\Delta T} \cong -2,5 \frac{\text{mV}}{^\circ\text{C}}$$

2. Polarização da malha de coletor

Para a polarização da malha de coletor, será necessário estimar a distribuição das quedas de tensão DC sobre os resistores (V_{R5} e V_{R6}) e, também, as tensões entre coletor e emissor dos transistores (V_{CEQ1} e V_{CEQ2}), de forma a atender, simultaneamente, à equação da malha de saída e às especificações do projeto:

$$VCC = V_{R5} + V_{CEQ1} + V_{CEQ2} + V_{R6}$$

2.1 Cálculo de V_{R6}

A corrente de polarização I_{CQ} será definida pela polarização de base do transistor Q_2 e deverá ser ajustada para o valor especificado.

A variação de I_{CQ} em função de V_{BE} pode ser prevista e controlada. Para isso, é preciso estimar a variação de V_{BE} em função da temperatura utilizando $|\Delta T|_{max}$:

$$\frac{|\Delta V_{BE}|}{|\Delta T|} \cong \frac{2,5 \text{ mV}}{^{\circ}\text{C}} \quad |\Delta T|_{max} = \text{_____}^{\circ}\text{C} \quad |\Delta V_{BE}|_{max} = \text{_____} \text{ mV}$$

A variação percentual de I_{CQ} devido à V_{BE} pode ser controlada pela escolha correta de V_{R6} , pela expressão:

$$\left| \frac{\Delta I_{CQ}}{I_{CQ}} \right|_{V_{BE}} = \frac{|\Delta V_{BE}|_{max}}{V_{R6}} \leq \text{_____} \quad V_{R6} \geq \text{_____} \text{ V}$$

Escolher um **valor comercial** para R_6 , considerando $R_6 > \frac{V_{R6min}}{I_{CQ2}}$ $R_6 = \text{_____} \text{ k}\Omega$

$$V_{R6} = \text{_____} \text{ V}$$

Calcular V_{R6} para o R_6 escolhido

2.2 Cálculo de $V_{CEQ1min}$

Para que não ocorra distorção do sinal de saída por efeito da saturação do transistor Q_1 , é preciso garantir uma tensão mínima para V_{CEQ1} em função do valor especificado para a amplitude do sinal (v_{op}).

$$V_{CEQ1min} \geq v_{op} + 0,5 \text{ V} \quad V_{CEQ1min} = \text{_____} \text{ V}$$

2.3 Cálculo de R_5

Para garantir a polarização correta da malha DC de saída e atender à especificação da excursão máxima do sinal de saída sem distorção, é possível determinar uma faixa de valores de R_5 que permita atender às especificações.

2.3.1. Estimativa do limite inferior de R_5

Para que não ocorra distorção do sinal de saída por efeito do corte do transistor Q_1 , é preciso garantir que a excursão de sinal máxima ($v_{opmax} = I_{CQ} \cdot R_{ac}$) seja maior do que a amplitude do sinal especificada (v_{op}), ou seja:

$$I_{CQ} \cdot R_{ac} \geq v_{op} + 0,5 \text{ V}, \text{ onde } R_{ac} = R_5 // R_L \text{ é a resistência equivalente AC, vista pelo coletor do transistor } Q_1.$$

$$R_5 \geq \text{_____} \text{ k}\Omega$$

2.3.2. Estimativa do limite superior de R_5

Para a polarização adequada, R_5 ficará limitado ao valor definido pela equação da malha DC, do coletor.

Considerando que as variações de I_{CQ} devido a V_{BE} (6%) e devido a h_{FE} (7%) são cumulativas, no pior caso, a corrente de polarização poderá ser até 13% maior, isto é, ($I_{CQmax} = 1,13 \cdot I_{CQ}$) e o amplificador ainda deverá funcionar, normalmente, atendendo às especificações.

Desta forma, lembrando que R_6 já foi escolhido anteriormente, a equação da malha de coletor pode ser reescrita para definir o limite superior de R_5 . Assim:

$$R_5 \leq \frac{V_{CC} - V_{CEQ1min} - V_{CEQ2}}{I_{CQmax}} - R_6$$

$$R_5 \leq \text{_____ } k\Omega$$

Escolher um **valor comercial** para R_5 , dentro da faixa obtida.

$$R_5 = \text{_____ } k\Omega$$

$$\text{_____ } k\Omega \leq R_5 \leq \text{_____ } k\Omega$$

Com R_5 escolhido, calcular $R_{ac} = R_5 // R_L$

$$R_{ac} = \text{_____ } k\Omega$$

3. Determinação da resistência R_7

O valor de R_7 influencia diretamente no ganho $|A| = |v_o/v_i|$.

A partir da especificação de Z_{in} , R_5 e os limites de $|A_v| = |v_o/v_s|$ podemos estimar os limites de variação de $|A|$ pela relação:

$$|A_v| \triangleq \left| \frac{v_o}{v_s} \right| = \left| \frac{v_i}{v_s} \right| \cdot \left| \frac{v_o}{v_i} \right| = \left| \frac{v_i}{v_s} \right| \cdot |A| \Rightarrow |A| = \frac{|A_v|}{|v_i/v_s|} = \frac{R_5 + Z_{in}}{Z_{in}} \cdot |A_v|$$

$$\text{_____ } \frac{V}{V} \leq |A| \leq \text{_____ } \frac{V}{V}$$

Como são conhecidos R_{ac} , I_{CQ} e os limites de $|A|$, então podemos determinar os limites de R_7 pela expressão:

$$|A| = \left| \frac{v_o}{v_i} \right| \cong \frac{h_{fe} R_{ac}}{r_{\pi} + (h_{fe} + 1) R_7} \cong \frac{R_{ac}}{\left(\frac{25mV}{I_{CQ}} + R_7 \right)} \Rightarrow R_7 = \frac{R_{ac}}{|A|} - \frac{25mV}{I_{CQ}} \Rightarrow \begin{cases} R_{7min} = \text{_____ } \Omega \\ R_{7max} = \text{_____ } \Omega \end{cases}$$

Escolher um **valor comercial** para R_7 , dentro da faixa obtida.

$$R_7 = \text{_____ } \Omega$$

4. Cálculo das polarizações das bases de Q1 e Q2

4.1 Cálculo de R_{Bmax}

A polarização de base de Q_2 é responsável pela definição da corrente $I_{CQ2} = I_{CQ1} = I_{CQ}$. A variação percentual de I_{CQ} em relação a h_{FE} depende da relação entre e o valor de $R_B = (R_1 // R_2)$ e o resistor R_6 , de polarização do emissor de Q_2 .

Para garantir a estabilidade de I_{CQ} , calcular o maior valor de R_B que atenda à expressão:

$$\left| \frac{\Delta I_{CQ}}{I_{CQ}} \right|_{h_{FE}} = \left(1 + \frac{R_B}{R_6} \right) \cdot \frac{\Delta h_{FE}}{(1 + h_{FEmax}) \cdot h_{FEproj}} \leq \text{_____}, \text{ onde: } \Delta h_{FE} = h_{FEmax} - h_{FEproj}$$

$R_{Bmax} = \text{_____ } k\Omega$

4.2 Cálculo de R_{Bmin}

A impedância de entrada Z_{IN} do EC depende da polarização de base de Q_1 , onde $R_B = (R_3 // R_4)$

Para atender à especificação da impedância de entrada do EC, na pior condição ($h_{fe} = h_{fe min}$), calcular o menor valor de R_B que atenda à expressão:

$$Z_{IN} = R_B // \left[r_{\pi} + (h_{fe min} + 1) R_7 \right] \cong R_B // \left[h_{fe min} \left(\frac{25mV}{I_{CQ}} + R_7 \right) \right] \geq \text{_____ } k\Omega$$

$R_{Bmin} = \text{_____ } k\Omega$

4.3 Cálculo de R_1 , R_2 e R_{BQ2}

Para que as impedâncias de entrada Z_{IN} sejam semelhantes nas duas configurações (EC e CASCODE), devemos escolher o mesmo R_B para os dois casos. Usar as expressões abaixo para calcular R_2 :

OBS: Para simplificar, estas expressões são obtidas desprezando as correntes de base dos transistores.

$$V_{BQ2} = I_{CQ2} R_6 + V_{BE}$$

$$R_2 \leq \frac{R_{Bmax}}{\left(1 - \frac{V_{BQ2}}{V_{CC}} \right)}$$

$R_2 \leq \text{_____ } k\Omega$

$$R_2 \geq \frac{R_{Bmin}}{\left(1 - \frac{V_{BQ2}}{V_{CC}} \right)}$$

$R_2 \geq \text{_____ } k\Omega$

Escolher um **valor comercial** para R_2

$R_2 = \text{_____ } k\Omega$

Calcular R_1 usando a expressão:

$$R_1 = R_2 \left(\frac{V_{CC}}{V_{BQ2}} - 1 \right)$$

$R_1 = \text{_____ } k\Omega$

OBS: Usar o valor calculado para R_1 , mesmo não sendo comercial.

Calcular R_{BQ2} e verificar se $R_{Bmin} \leq R_{BQ2} \leq R_{Bmax}$

$$R_{BQ2} = \text{_____ } k\Omega$$

4.4 Cálculo de R_3 , R_4 e R_{BQ1}

Para que as impedâncias de entrada do EC e CASCODE (parte 2) fiquem aproximadamente iguais, considerar $R_4 = R_2$.

$$R_4 = R_2 = \text{_____ } k\Omega$$

Calcular R_3 usando as expressões a seguir e escolher um **valor comercial**.

$$R_3 = R_4 \left(\frac{V_{CC}}{V_{BQ1}} - 1 \right), \quad e \quad V_{BQ1} = I_{CQ2} R_6 + V_{CEQ2} + V_{BE}$$

$$R_3 = \text{_____ } k\Omega$$

Calcular R_{BQ1} e verificar se $R_{Bmin} \leq R_{BQ1} \leq R_{Bmax}$

$$R_{BQ1} = \text{_____ } k\Omega$$

5. Resumo

R_s	1 k Ω
$R1^*$	
$R2$	
$R3$	
$R4$	
$R5$	
$R6$	
$R7$	
R_L	27 k Ω

*valor não comercial (ajustar)

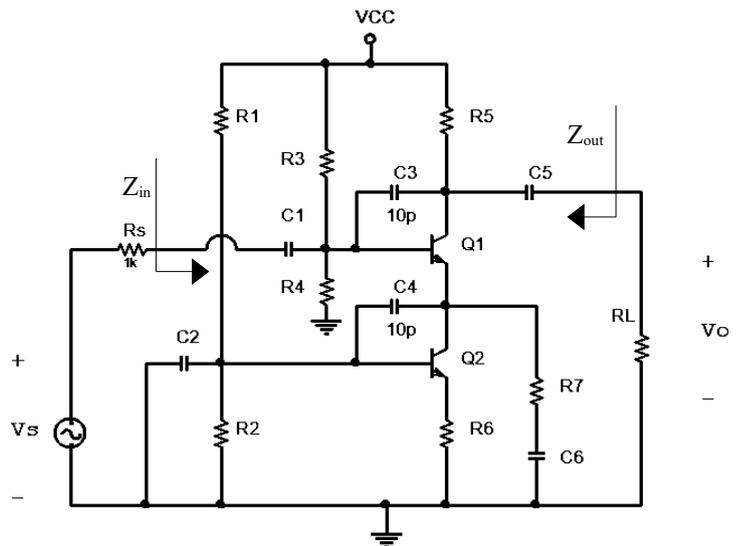


Fig 2: Configuração Emissor Comum

OBS.: Neste projeto, o valor de R_1 deve ser ajustado para que a corrente I_{CQ2} fique dentro de $\pm 5\%$ do valor nominal especificado. É provável que o valor ajustado para o projeto, simulação e montagem sejam diferentes.

6. Verificação (CONFIGURAÇÃO EMISSOR COMUM)

Com os valores de todos os resistores já definidos, faça análise do circuito para verificar se todas as especificações na banda média e polarização e foram atendidas:

6.1 Cálculo de I_{CQ2}

Se necessário, altere o valor de R_1 (pode ser valor não comercial) para que a corrente I_{CQ2} fique igual ao valor nominal adotado no projeto. Despreze I_{BQ2}

$$I_{CQ2} = \text{_____ } mA$$

6.2) Cálculo de V_{CEQ2}

$$V_{CEQ2} = \text{_____} V$$

6.3) Cálculo de V_{CEQ1}

$$V_{CEQ1} = \text{_____} V$$

6.4) Cálculo da impedância equivalente de coletor ($R_{ac} \approx R_5 // R_L$)

$$R_{ac} = \text{_____} k\Omega$$

6.5) Cálculo da excursão máxima do sinal de saída (v_{op}) sem corte e sem saturação

$$\text{Excursão máxima sem corte } v_{op \text{ sem corte}} = I_{CQ} \cdot R_{ac} - 0,5:$$

$$\text{Excursão máxima sem saturação } v_{op \text{ sem saturação}} = V_{CEQ1} - 0,5:$$

$$v_{op} = \min(v_{op \text{ sem corte}}, v_{op \text{ sem saturação}})$$

$$v_{op} = \text{_____} V$$

6.6) Cálculo da impedância de entrada $Z_{IN}(EC)$

$$Z_{IN}(EC) = \text{_____} k\Omega$$

6.7) Cálculo do ganho de tensão ($A_V = v_o / v_s$)

$$A_V = \text{_____} V/V$$

6.8) Cálculo da impedância de saída do coletor de Q1 (R_{O1})

Utilizar a expressão: $R_o = \left(\frac{h_{fe}}{k+1} + 1 \right) r_o$ onde $k = \frac{R_b + r_\pi}{R_{Eq}}$

$$R_{o1} = \text{_____ } k\Omega$$

6.9) Cálculo da impedância de saída $Z_{out}(EC)$

$$Z_{out}(EC) = \text{_____ } k\Omega$$

7. Cálculo da variação percentual de I_{CQ2} devido às variações de T e h_{FE}

$$\frac{\Delta I_{CQ}}{I_{CQ}} = \frac{\Delta I_{CQ}}{I_{CQ}} \Big|_{V_{BE}} + \frac{\Delta I_{CQ}}{I_{CQ}} \Big|_{h_{FE}} \quad \text{onde: } \left\{ \begin{array}{l} \frac{\Delta V_{BE}}{\Delta T} \cong -2,5 \frac{mV}{^\circ C} \\ \frac{\Delta I_{CQ}}{I_{CQ}} \Big|_{V_{BE}} = - \frac{\Delta V_{BE}}{V_{R_6}} \\ \frac{\Delta I_{CQ}}{I_{CQ}} \Big|_{h_{FE}} = \left(1 + \frac{R_B}{R_6} \right) \cdot \frac{\Delta h_{FE}}{(1 + h_{FElimite}) \cdot h_{FEproj}} \\ \Delta h_{FE} = h_{FElimite} - h_{FEproj} \end{array} \right.$$

7.1) Variação percentual de I_{CQ2} considerando T_{max} e h_{FEmax}

Considere:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta T = T_{max} - T_{proj} = \text{_____} \\ \Delta V_{BE} = \text{_____} \\ h_{FElimite} = h_{FEmax}; R_{BQ2} = \text{_____ } k\Omega \\ \Delta h_{FE} = h_{FEmax} - h_{FEproj} = \text{_____} \end{array} \right.$$

$$\frac{\Delta I_{CQ}}{I_{CQ}} = \text{_____ } \%$$

$$I_{CQmax} = \text{_____ } mA$$

7.2 Variação percentual de I_{CQ2} considerando T_{min} e h_{FEmin}

Considere:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta T = T_{min} - T_{proj} = \underline{\hspace{2cm}} \\ \Delta V_{BE} = \underline{\hspace{2cm}} \\ h_{FElimite} = h_{FEmin}; R_{BQ2} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ k}\Omega \\ \Delta h_{FE} = h_{FEmin} - h_{FEproj} = \underline{\hspace{2cm}} \end{array} \right.$$

$$\frac{\Delta I_{CQ}}{I_{CQ}} = \underline{\hspace{2cm}} \%$$

$$I_{CQmin} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ mA}$$

8. Cálculo dos capacitores responsáveis pela frequência de corte inferior

Calcule todos os capacitores considerando cada um deles como sendo responsável pela frequência de corte inferior e os demais em curto.

Organize os capacitores em ordem decrescente e escolha um valor comercial para o de maior valor, que será o responsável pela frequência de corte do amplificador. Multiplique os demais capacitores, em ordem decrescente de valor, respectivamente, por 10 e 50 e 250 e escolha valores comerciais

$$C_1 = \underline{\hspace{2cm}} \mu F$$

$$C_2 = \underline{\hspace{2cm}} \mu F$$

$$C_5 = \underline{\hspace{2cm}} \mu F$$

$$C_6 = \underline{\hspace{2cm}} \mu F$$

9. Verificação das frequências de corte

9.1 Frequência de corte inferior

$$f_L = \underline{\hspace{2cm}} \text{ Hz}$$

9.2 Frequência de corte superior

$$f_H = \underline{\hspace{2cm}} \text{ Hz}$$

MEMÓRIA DE CÁLCULO (PARTE 2: CASCODE)

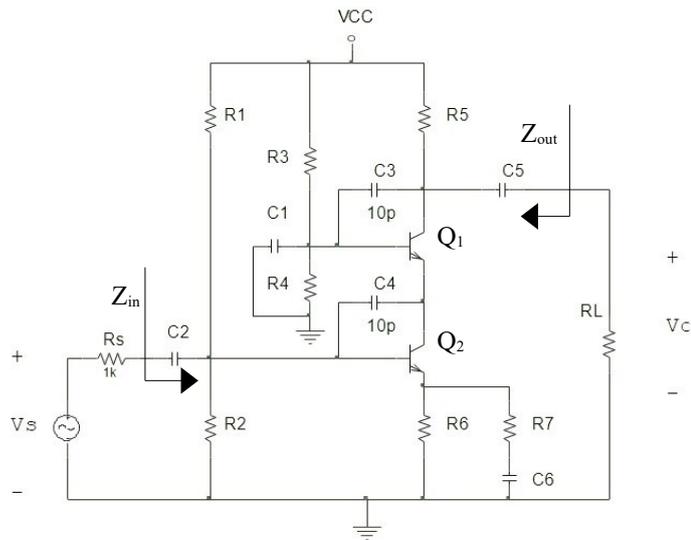


Fig 3: Configuração Cascode

10. Verificação (CONFIGURAÇÃO CASCODE)

Fazer a análise do circuito para verificar o comportamento AC do amplificador CASCODE e se as especificações na banda média foram atendidas:

10.1 Cálculo da excursão máxima do sinal de saída (v_{op}) sem corte e sem saturação

Excursão máxima sem corte $v_{op\text{ sem corte}}$:

Excursão máxima sem saturação $v_{op\text{ sem saturação}}$:

$$v_{op} = \min(v_{op\text{ sem corte}}, v_{op\text{ sem saturação}})$$

$v_{op} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ V}$

10.2 Cálculo da impedância de entrada $Z_{IN}(CASCODE)$

$Z_{IN}(CASCODE) = \underline{\hspace{2cm}} \text{ k}\Omega$

10.3 Cálculo do ganho de tensão ($A_V = v_o/v_s$)

$A_V = \underline{\hspace{2cm}} \text{ V/V}$

10.4 Cálculo da impedância de saída do coletor de Q1 (R_{O1})

Utilizar a expressão: $R_O = \left(\frac{h_{fe}}{k+1} + 1 \right) r_o$, onde $k = \frac{R_b + r_\pi}{R_{Eeq}}$

$$R_{o1} = \text{_____ } k\Omega$$

10.5 Cálculo da impedância de saída $Z_{out}(CASCODE)$

$$Z_{out}(CASCODE) = \text{_____ } k\Omega$$

11. Verificação das frequências de corte

11.1 Frequência de corte inferior

$$f_L = \text{_____ } Hz$$

11.2 Frequência de corte superior

$$f_H = \text{_____ } Hz$$

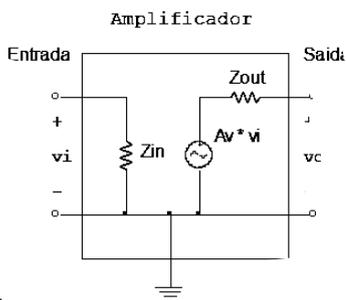
PARTE 1: Configuração emissor comum (EC)

Parâmetros do circuito		Unid	Projetado	Simulado	Medido	OBS
T=25 °C $h_{FEproj} =$ _____ $BF_{proj} =$ _____						
Polarização	Ajustar $I_{CQ2} (I_{nom} \pm 5\%)$	mA				
	V_{EQ2}	V				
	V_{CEQ1}	V				
	V_{CEQ2}	V				
Impedância equivalente de coletor ($R_{ac}=R_C//R_L$)		k Ω		X	X	
Excursão máxima de sinal na saída (V_{opmax})		V				
Ganho ($A_v=V_o/V_s$)		V/V				
Frequência de corte	inferior (f_L)	Hz				
	superior (f_H)	kHz				
Impedância de entrada (Z_{IN})		k Ω				
Impedância de saída (Z_{out})		k Ω				
Impedância de saída do coletor de Q_1 (R_{o1})		k Ω			X	

PARTE 2: Configuração CASCODE

Parâmetros do circuito		Unid	Projetado	Simulado	Medido	OBS
Excursão máxima de sinal na saída (V_{opmax})						
Ganho ($A_v=V_o/V_s$)		V/V				
Frequência de corte	inferior (f_L)	Hz				
	superior (f_H)	kHz				
Impedância de entrada (Z_{IN})		k Ω				
Impedância de saída (Z_{out})		k Ω				
Impedância de saída vista para dentro do coletor de Q_1 (R_{o1})		k Ω			X	

Montagem:

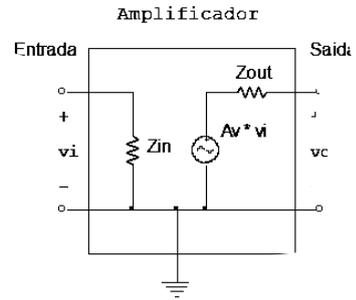


Procedimento:

- 1- Com R_D em curto ajustar $v_o \approx 1 V_{pico} \Rightarrow v_{o1}$
- 2- Aumentar R_D , gradativamente, até que $v_o = \frac{v_{o1}}{2}$
- 3- Como A_v é constante $\Rightarrow Z_{IN} = R_D$

Medida de impedância de entrada

Montagem:



Procedimento:

- 1- Com R_D em aberto ajustar $v_o \approx 1 V_{pico} \Rightarrow v_{o1}$
- 2- Diminuir R_D , gradativamente, até que $v_o = \frac{v_{o1}}{2}$
- 3- Como A_v é constante $\Rightarrow Z_{out} = R_D$

Medida de impedância de saída

Comparação: EC x CASCODE

Parâmetros do circuito	Unid	Simulado		Medido		OBS
		EC	CASCODE	EC	CASCODE	
Excursão máxima de sinal na saída (V_{opmax})	V					
Ganho ($A_v = V_o/V_s$)	V/V					
Frequência de corte	inferior (f_L)	Hz				
	superior (f_H)	kHz				
Impedância de entrada (Z_{in})	k Ω					
Impedância de saída (Z_{out})	k Ω					
Impedância de saída vista para dentro do coletor de Q_1 (R_{o1})	k Ω			X	X	

Variação de I_{CQ2} com Temperatura e h_{FE}

Parâmetros do circuito		Unid	Projetado	Simulado	Medido	OBS
$I_{CQ} @ T_{proj}$		mA			X	
$T_{max} = \underline{\hspace{2cm}}$ °C	$V_{op\ max} @ T_{max}, h_{FE\ max}$	V	X		X	
$h_{FE\ max} = \underline{\hspace{2cm}}$	$I_{CQ2} @ T_{max}, h_{FE\ max}$	mA			X	
$BF_{max} = \underline{\hspace{2cm}}$	Variação percentual de I_{CQ2}	%			X	
$T_{min} = \underline{\hspace{2cm}}$ °C	$V_{op\ max} @ T_{min}, h_{FE\ min}$	V	X		X	
$h_{FE\ min} = \underline{\hspace{2cm}}$	$I_{CQ2} @ T_{min}, h_{FE\ min}$	mA			X	
$BF_{min} = \underline{\hspace{2cm}}$	Variação percentual de I_{CQ2}	%			X	

