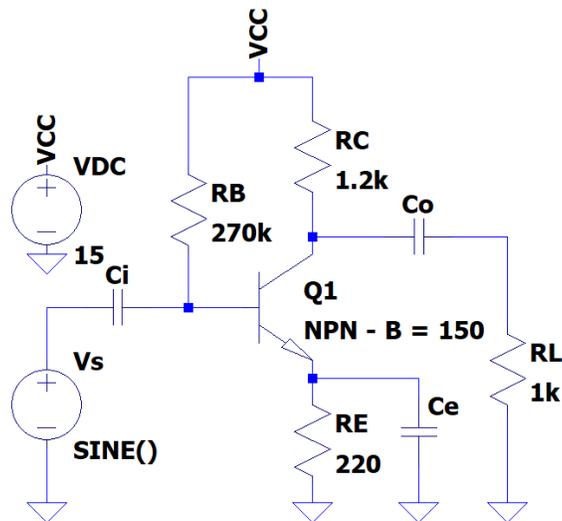


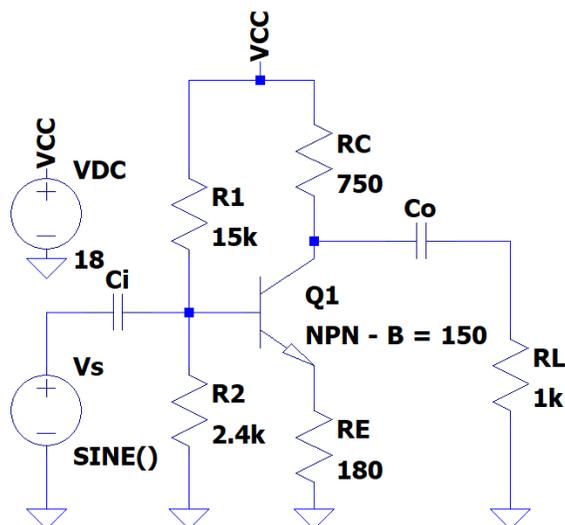
4° Lista de Exercícios – ELTA01A

Questão 1) Faça a análise DC e AC dos circuitos abaixo e responda se é CC ou EC.

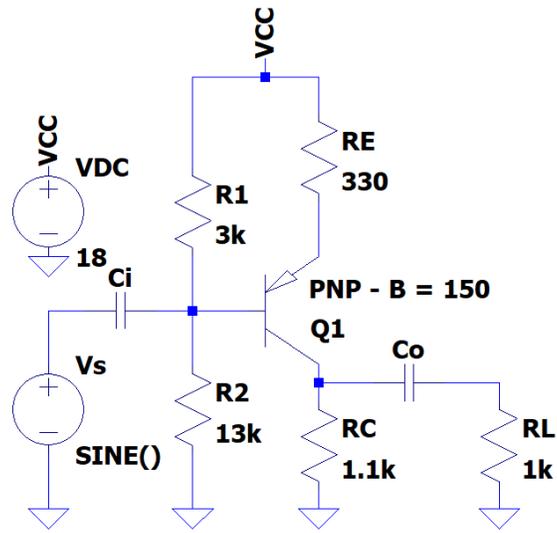
a)



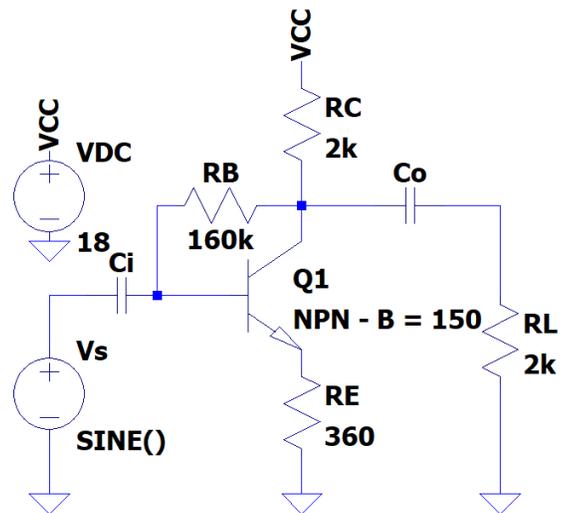
b)



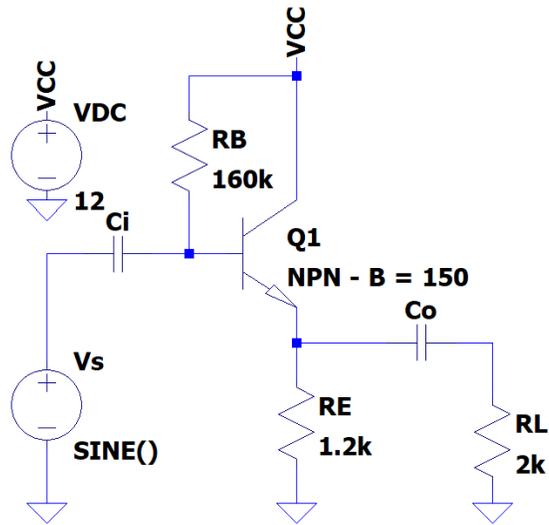
c)



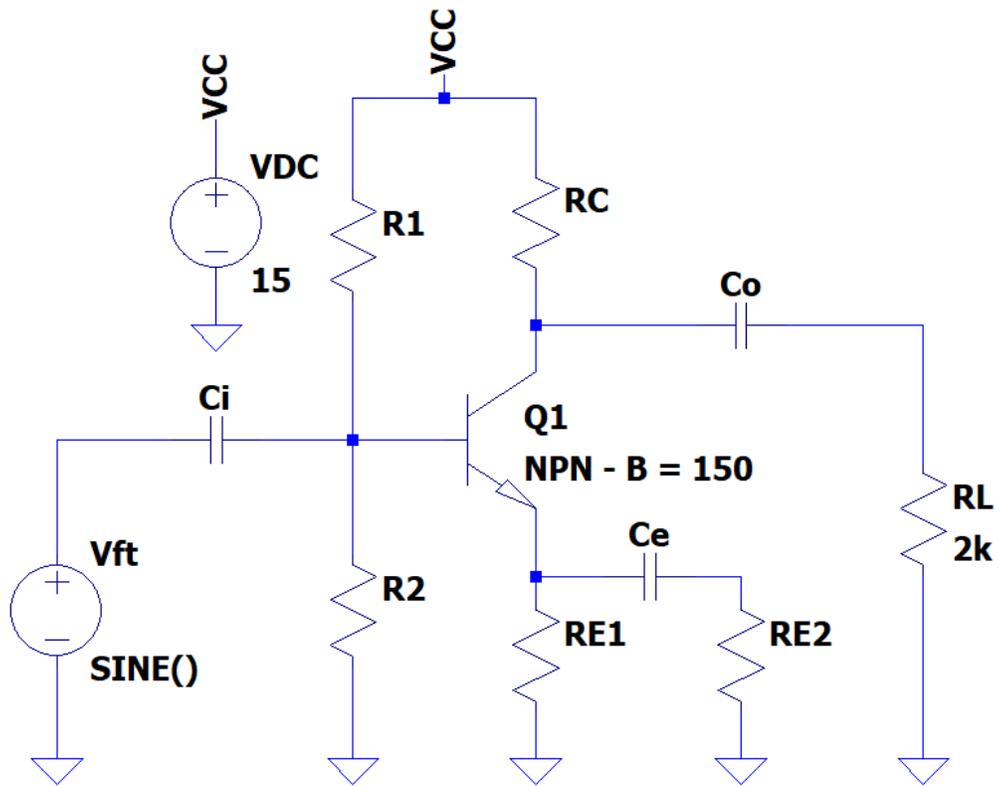
d)



e)



Questão 2) Projete o circuito abaixo para um ganho com carga de $|5|$. Considere $I_{CQ} = 5 \text{ mA}$.



Questão 3) Projete os capacitores do circuito do exercício 2 para que o circuito consiga amplificar em frequências maiores ou iguais a 300 Hz.

Questão 4) Determine os circuitos equivalentes de cada frequência de corte, e determine as frequências dominantes de baixa e alta para o circuito da atividade 2. Considere:

$$C_{be} = 40 \text{ pF}$$

$$C_{bc} = 10 \text{ pF}$$

$$C_{ce} = 2 \text{ pF}$$

$$C_{wi} = 8 \text{ pF}$$

$$C_{wo} = 6 \text{ pF}$$

Resoluções

Questão 1)

a) Análise CC:

Malha B-E:

$$V_{CC} - R_B I_B - V_{BE} - I_E R_E = 0, \text{ considerando } I_{CQ} \cong I_E \cong \beta I_B$$

$$15 - 270k\Omega I_B - 0,7 - 150 \times I_B \times 220 = 0$$

$$I_B = 47,19 \mu A$$

$$V_B = V_{CC} - R_B I_B = 2,26 \text{ V}$$

$$I_E \cong I_{CQ} = \beta I_B = 7,08 \text{ mA}$$

Malha C-E:

$$V_C = V_{CC} - I_{CQ} R_C = 6,5 \text{ V}$$

$$V_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} (R_C + R_E) = 4,95 \text{ V, já que temos } R_E.$$

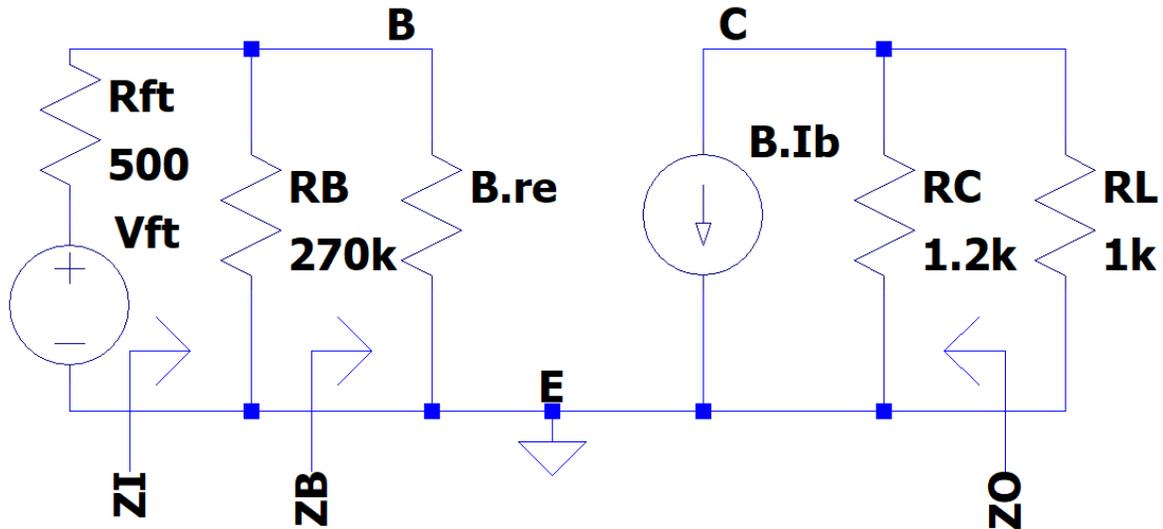
$$V_E = V_C - V_{CEQ} = 1,55 \text{ V}$$

Análise CA:

O circuito, é um amplificador emissor-comum(EC), já que a entrada está conectada à base e a saída ao coletor.

Calculando r_e :

$$r_e = \frac{26 \text{ mV}}{I_E} = 3,67 \Omega$$



Analisando o modelo CA, temos:

$$Z_B = \beta(r_e + R_{EAC})$$

Como temos um capacitor de desvio no emissor:

$$Z_B = \beta(r_e) = 550,84 \Omega$$

A impedância de entrada de entrada será:

$$Z_I = R_B \parallel Z_B = 270k\Omega \parallel 550,84 = 549,72 \Omega$$

A impedância de saída:

$$Z_O \cong R_C = 1,2 \text{ k}\Omega$$

O ganho sem carga é:

$$A_{VNL} = -\frac{R_C}{r_e + R_{EAC}}$$

Como o emissor está desviado:

$$A_{VNL} = -\frac{R_C}{r_e} = -326,97 \frac{V}{V}$$

Considerando a carga, temos:

$$A_V = -\frac{R_C \parallel R_L}{r_e} = -\frac{545,45}{3,67} = -148,62 \frac{V}{V}$$

b) Análise CC:

Verificação se pode ser usado o método aproximado: $10R_2 \leq \beta R_E \rightarrow ok$

$$V_B = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC} = 2,48 V$$

$$V_E = V_B - V_{BE} = 1,78 V$$

$$I_{CQ} \cong I_E = \frac{V_E}{R_E} = 9,9 mA$$

$$V_C = V_{CC} - I_{CQ} R_C = 10,57 V$$

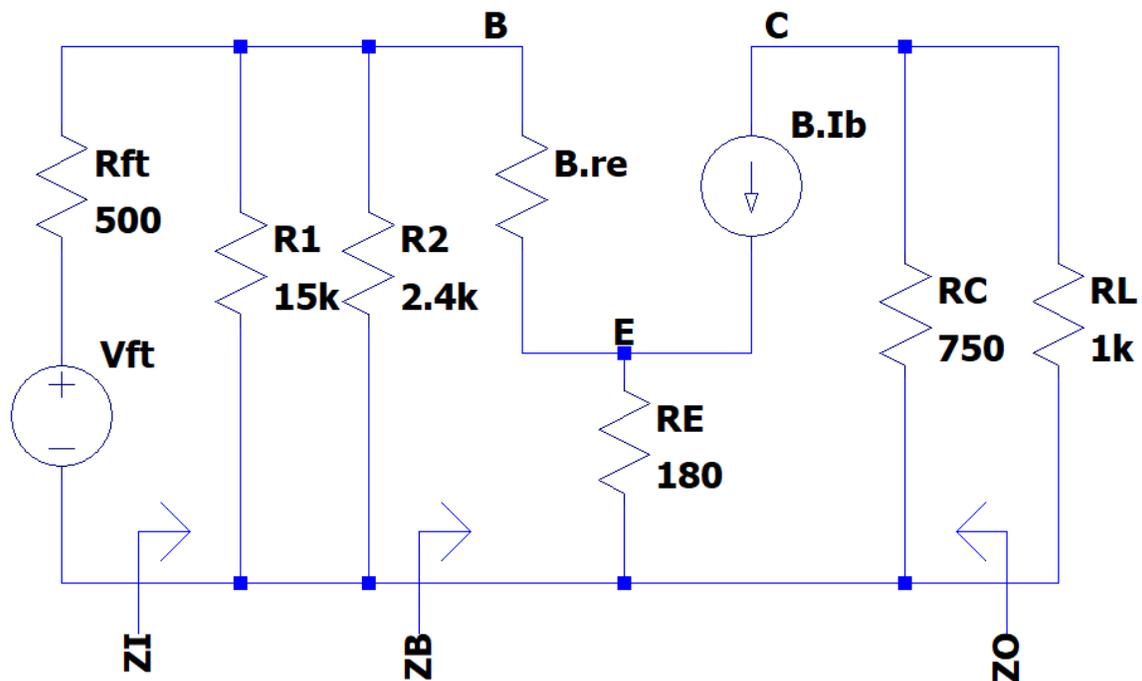
$$V_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} (R_C + R_E) = 8,79 V$$

Análise CA:

O circuito, é um amplificador emissor-comum(EC), já que a entrada está conectada à base e a saída ao coletor.

Calculando r_e :

$$r_e = \frac{26 mV}{I_E} = 2,63 \Omega$$



A partir do circuito acima, temos:

$$Z_B = \beta(r_e + R_{EAC}) = 150 \times (2,63 + 180) = 27393,94 \Omega$$

$$Z_I = R_1 \parallel R_2 \parallel Z_B = 1923,68 \Omega$$

$$Z_O \cong R_C = 750 \Omega$$

$$A_{VNL} = -\frac{R_C}{r_e + R_{EAC}} = -\frac{750}{2,63 + 180} = -4,11 \frac{V}{V}$$

$$A_V = -\frac{R_C \parallel R_L}{r_e + R_{EAC}} = -\frac{428,57}{182,63} = -2,35 \frac{V}{V}$$

c) Análise CC:

Verificação para usar o método aproximado: $10R_1 \leq \beta R_E \rightarrow ok$

Para V_B :

$$V_B = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC} = 14,625V$$

$$V_E = V_B + V_{EB} = 15,325 V$$

Determinando I_E :

$$I_E = \frac{V_{CC} - V_E}{R_E} = 8,11 mA$$

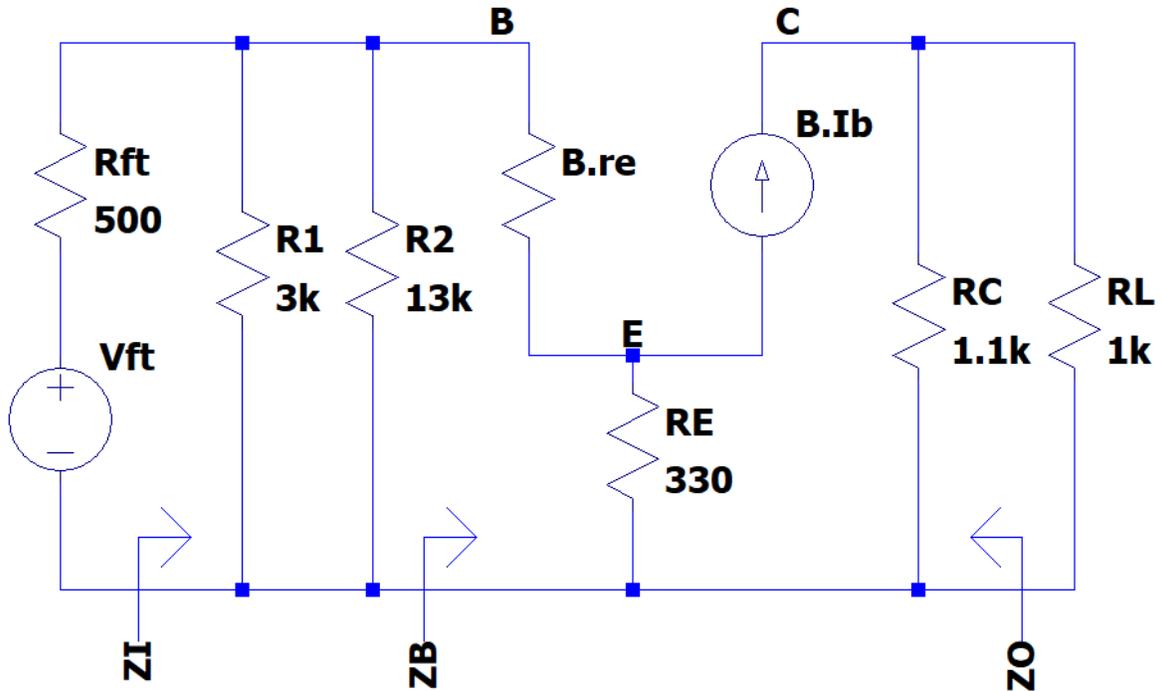
$$I_{CQ} \cong I_E = 8,11 mA$$

$$V_C = R_C I_{CQ} = 8,92 V$$

$$V_{ECQ} = V_{CC} - I_{CQ}(R_C + R_E) = 6,41 V$$

Análise CA:

Temos um transistor PNP com a carga conectada no coletor, então temos um amplificador emissor-comum.



A partir da figura acima, temos:

$$r_e = \frac{26 \text{ mV}}{I_E} = 3,21 \Omega$$

$$Z_B = \beta(r_e + R_{EAC}) = 49980,89 \Omega$$

$$Z_I = R_1 \parallel R_2 \parallel Z_B = 2324,15 \Omega$$

$$Z_O \cong R_C = 1,1 \text{ k}\Omega$$

$$A_{VNL} = -\frac{R_C}{r_e + R_{EAC}} = -3,3 \frac{V}{V}$$

$$A_V = -\frac{R_C \parallel R_L}{r_e + R_{EAC}} = -1,57 \frac{V}{V}$$

d) Análise CC:

Análise da malha B-E:

Considerando a corrente que percorre o RC igual à corrente de coletor.

$$V_{CC} - R_C I_{CQ} - R_B I_B - V_{BE} - R_E I_E = 0$$

$$\text{Com } I_{CQ} \cong I_E = \beta I_B$$

$$V_{CC} - R_C \beta I_B - R_B I_B - V_{BE} - R_E \beta I_B = 0$$

Para I_B :

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + \beta(R_C + R_E)} = 33,66 \mu A$$

Então:

$$I_{CQ} \cong I_E = \beta I_B = 5,05 \text{ mA}$$

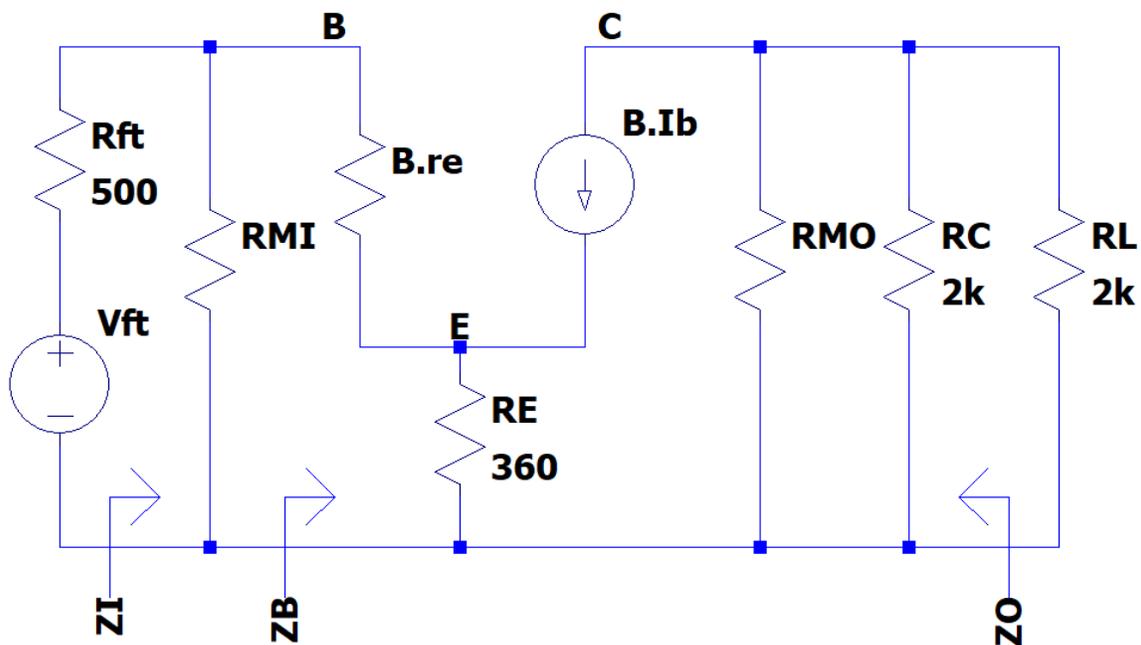
$$V_C = V_{CC} - R_C I_{CQ} = 7,90 \text{ V}$$

$$V_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ}(R_C + R_E) = 6,09 \text{ V}$$

$$V_E = V_C - V_{CEQ} = 1,81 \text{ V}$$

Análise CA:

O circuito acima é um amplificador com realimentação de coletor e como temos a entrada conectada à base e a saída ao coletor, temos um emissor-comum.



A partir da figura acima, temos:

$$r_e = \frac{26 \text{ mV}}{I_E} = 5,15 \Omega$$

Como o circuito conta com uma realimentação, observamos o efeito Miller. Assim vamos determinar o ganho do amplificador:

$$A_{VNL} = -\frac{R_C}{r_e + R_{EAC}} = -5,48 \frac{V}{V}$$

$$A_V = -\frac{R_C \parallel R_L}{r_e + R_{EAC}} = -2,74 \frac{V}{V}$$

Utilizando o ganho com carga para calcular as resistências Miller de entrada e saída, temos:

$$R_{MI} = \frac{R_B}{1 - A_V} = 42796,76 \Omega$$

$$R_{MO} = \frac{R_B}{1 - \frac{1}{A_V}} = 117203,24 \Omega$$

Calculando as impedâncias, então:

$$Z_B = \beta(r_e + R_{EAC}) = 54772,5 \Omega$$

$$Z_I = R_{MI} \parallel Z_B = 24024,84 \Omega$$

$$Z_O = R_{MO} \parallel R_C = 1966,44 \Omega$$

e) Análise CC:

Malha B-E:

$$V_{CC} - R_B I_B - V_{BE} - I_E R_E = 0$$

$$12 - 160k\Omega I_B - 0,7 - 150 \times I_B \times 1200 = 0$$

$$I_B = 33,23 \mu A$$

$$V_B = V_{CC} - R_B I_B = 6,68 V$$

$$I_{CQ} = \beta I_B = 4,985 mA$$

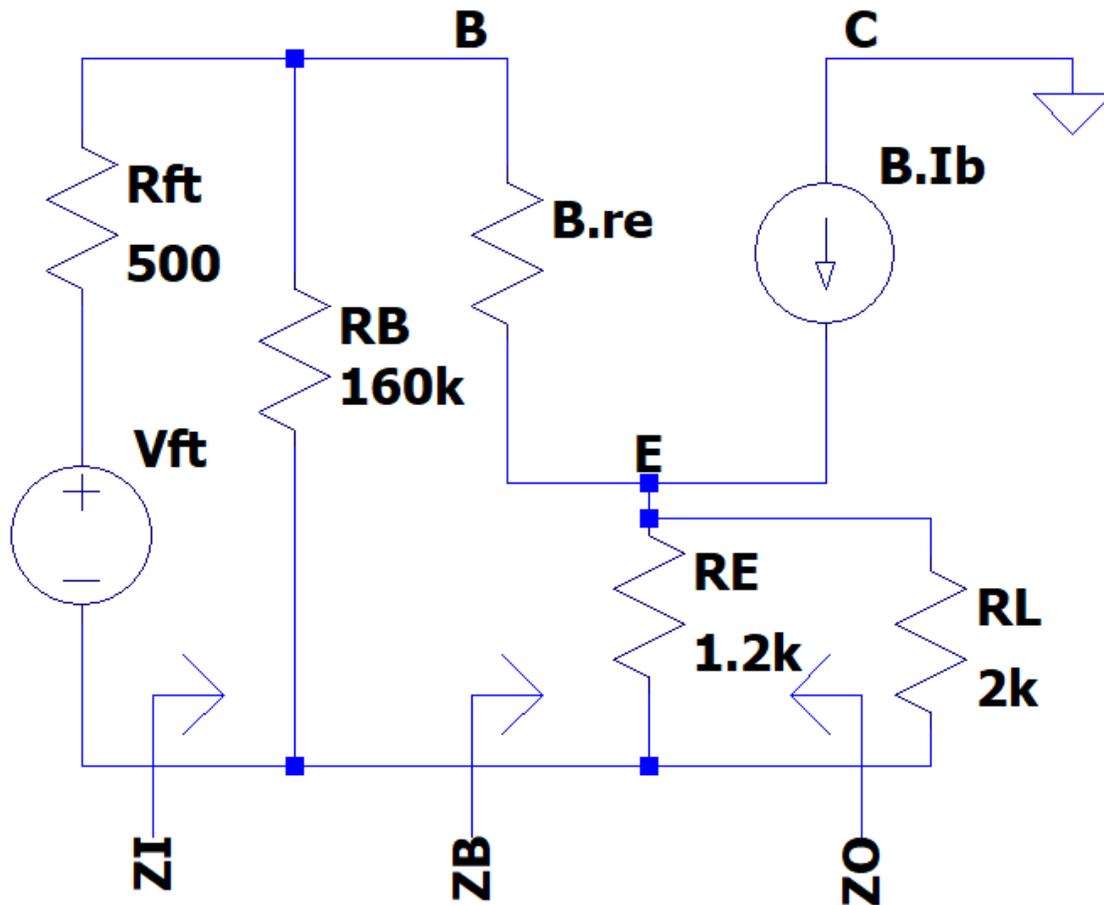
Malha C-E:

$$V_C = 12 V$$

$$V_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ}(R_E) = 6,01 V$$

$$V_E = V_C - V_{CEQ} = 5,98 V$$

Análise AC:



A partir do circuito acima, temos:

$$r_e = \frac{26 \text{ mV}}{I_E} = 5,21 \Omega$$

$$Z_B = \beta(r_e + R_{EAC})$$

Como este circuito é um amplificador coletor-comum(CE), ou seja, a sua saída está conectada ao emissor e a entrada à base. Este circuito também é chamado de seguidor de emissor, um buffer analógico simples. Então:

$$R_{EAC} = R_E \parallel R_L = 750 \Omega$$

$$Z_B = \beta(r_e + R_{EAC}) = 150 \times (5,21 + 750) = 113281,5 \Omega$$

$$Z_I = R_B \parallel Z_B = 66323,7 \Omega$$

Considerando a resistência série da fonte de 500 Ω , temos:

$$Z_O = R_E \parallel \left(\frac{R_{FT} \parallel R_B}{\beta} + r_e \right) = 8,47 \Omega$$

Para o ganho, temos:

$$A_{VNL} = \frac{R_E}{(r_e + R_E)} = \frac{1200}{5,21 + 1200} = 0,996 \frac{V}{V}$$
$$A_V = \frac{R_E \parallel R_L}{r_e + R_E \parallel R_L} = \frac{1200 \parallel 2000}{5,21 + 1200 \parallel 2000} = 0,993 \frac{V}{V}$$

Para este amplificador, o ganho é positivo, ou seja, não há inversão de 180° como nos exercícios anteriores, o que caracteriza o mesmo como um seguidor de emissor.

Questão 2)

Iniciando pelo projeto de polarização:

$$I_{CQ} = 5 \text{ mA}$$

Utilizando as diretivas de projeto, temos:

$$R_C = \frac{0,55V_{CC}}{I_{CQ}} = 1650 \Omega$$

$$R_{C\text{escolhido}} = 1,6 \text{ k}\Omega$$

Como no comportamento CC, o capacitor C_e é um circuito aberto, portanto R_{E2} não é tratado na análise CC.

$$R_{E1} = \frac{0,1V_{CC}}{I_{CQ}} = 300 \Omega$$

$$R_{E1\text{escolhido}} = 300 \Omega$$

Utilizando a condição para um divisor de estável:

$$10R_2 \leq \beta R_E$$

$$R_2 \leq \frac{\beta R_E}{10}$$

$$R_2 \leq \frac{150 \times 300}{10}$$

$$R_2 \leq 4,5 \text{ k}\Omega$$

$$R_{2\text{escolhido}} = 4,3 \text{ k}\Omega$$

Calculando V_B :

$$V_B = V_E + V_{BE}$$

Com $V_E = 0,1V_{CC} = 1,5 \text{ V}$, temos:

$$V_B = 1,5 + 0,7 = 2,2 V$$

Da fórmula do divisor de tensão, temos:

$$R_1 = \left[\frac{V_{CC}}{V_B} - 1 \right] R_2 = 25018,18 \Omega$$

$$R_{1\text{escolhido}} = 24 k\Omega$$

Verificando:

$$10R_2 \leq \beta R_E \rightarrow ok$$

$$V_B = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC} = 2,28 V$$

$$V_E = V_B - V_{BE} = 1,58 V \rightarrow \text{próximo de } 0,1V_{CC}$$

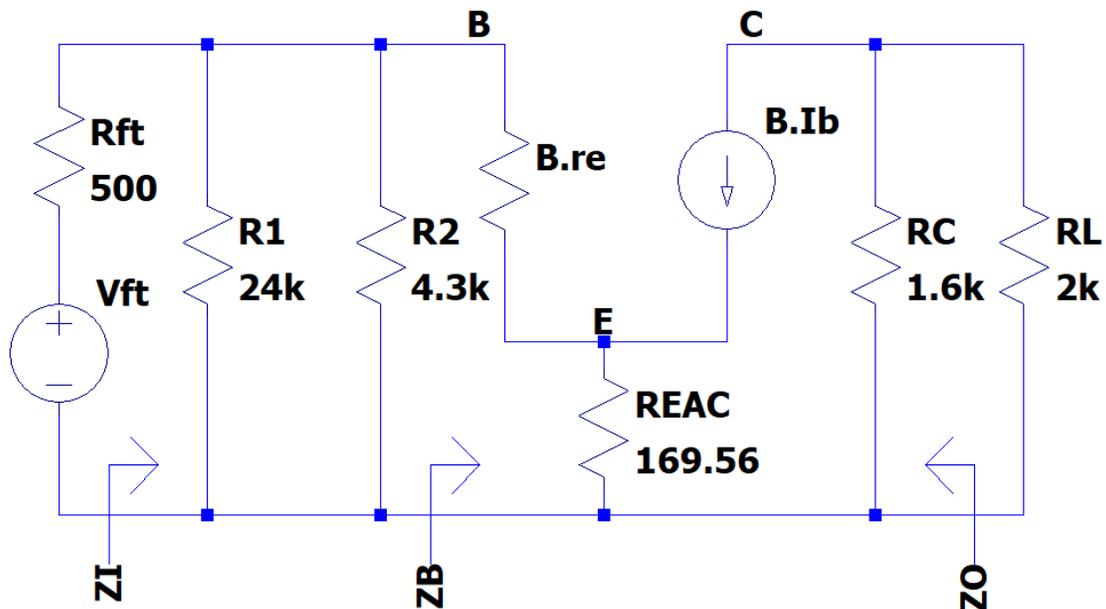
$$I_{CQ} \cong I_E = \frac{V_E}{R_E} = 5,26 mA$$

$$V_{RC} = R_C I_{CQ} = 1600 \Omega \times 5,26 mA = 8,42 V \rightarrow \text{próximo de } 0,55V_{CC}$$

$$V_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ}(R_C + R_E) = 15 - 5,26 mA(1600 + 300)$$

$$V_{CEQ} \cong 5 V \rightarrow \text{próximo de } 0,35V_{CC}$$

Com a polarização feita, parte-se para a análise CA para determinar o ganho do amplificador. Temos o seguinte circuito para a análise CA:



A partir da figura, temos:

Calculando r_e :

$$r_e = \frac{26 \text{ mV}}{I_E} = 4,94 \Omega$$

Deseja-se um ganho em módulo de 5, ou seja, já que temos um circuito amplificador emissor comum, este ganho deve ser de -5. Para o circuito temos a seguinte equação para o ganho com carga:

$$A_V = -\frac{R_C \parallel R_L}{r_e + R_{EAC}}$$

Para o controle do ganho, então podemos modificar R_{EAC} , assim:

$$R_{EAC} = -\frac{R_C \parallel R_L}{A_V} - r_e$$

Então:

$$R_{EAC} = -\frac{1600 \parallel 2000}{-5} - 4,94 = 172,83 \Omega$$

Sabe-se assim, que a resistência na análise CA do amplificador deve ser o valor calculado acima, portanto, para R_2 :

$$R_{EAC} = \frac{1}{R_{E1}^{-1} + R_{E2}^{-1}}$$

$$R_{E2} = \frac{1}{R_{EAC}^{-1} - R_{E1}^{-1}} = 407,76 \Omega$$

$$R_{E2\text{escolhido}} = 390 \Omega$$

Teste:

$$A_V = -\frac{R_C \parallel R_L}{r_e + R_{EAC}} = -5,09 \frac{V}{V} \rightarrow ok$$

Por fim:

$$R_{EAC} = R_{E1} \parallel R_{E2} = 169,56 \Omega$$

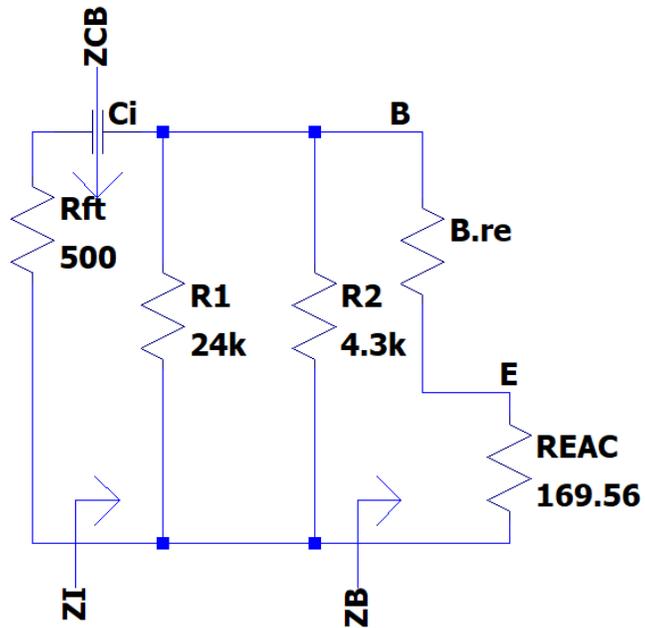
$$Z_B = \beta(r_e + R_{EAC}) = 150 \times (4,94 + 169,56) = 26175,78 \Omega$$

$$Z_I = R_1 \parallel R_2 \parallel Z_B = 3200,74 \Omega$$

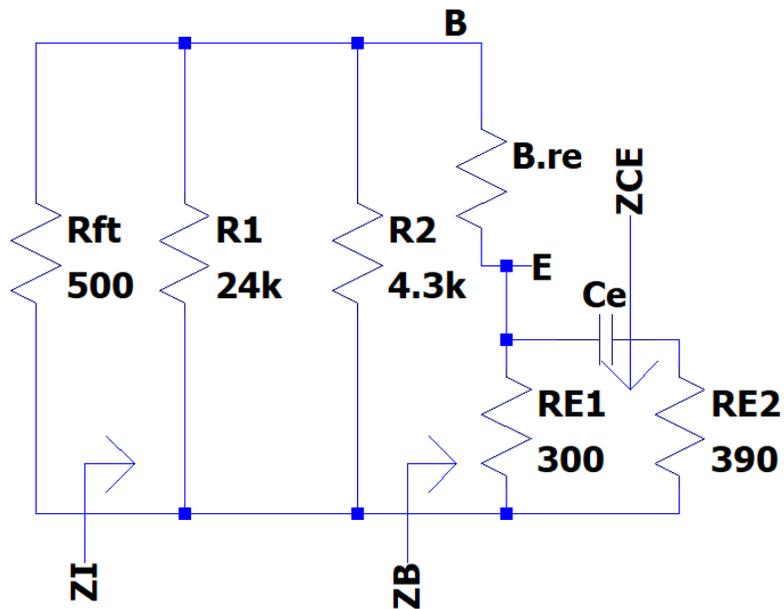
$$Z_O \cong R_C = 1,6 \text{ k}\Omega$$

Questão 3)

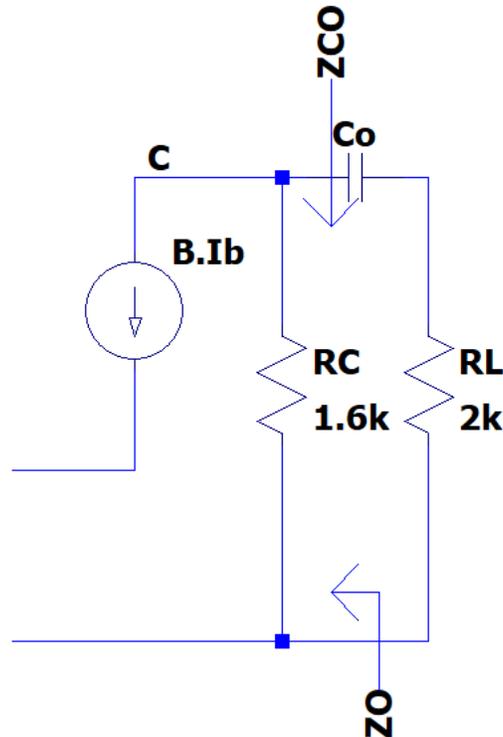
Primeiramente temos que analisar as impedâncias relacionadas à cada capacitor:



$$Z_{Ci} = R_{ft} + Z_I = 500 + 3200,74 = 3700,24 \Omega$$



$$Z_{CE} = R_{E2} + \left[\left(\frac{(R_{ft} \parallel R_1 \parallel R_2)}{\beta} + r_e \right) \parallel R_{E1} \right] = 390 + 7,67 = 397,67 \Omega$$



$$Z_{CO} = Z_O + R_L = 1600 + 2000 = 3600 \Omega$$

Então, começando pela menor impedância, a qual determina a maior frequência de corte, temos:

$$f_{LCE} = \frac{300}{5} = 60 \text{ Hz}$$

$$C_E = \frac{1}{2\pi Z_{CE} f_{LCE}} = 6,67 \mu F$$

$$C_{E\text{escolhido}} = 6,8 \mu F$$

$$f_{LCO} = \frac{60}{5} = 12 \text{ Hz}$$

$$C_O = \frac{1}{2\pi Z_{CO} f_{LCO}} = 3,68 \mu F$$

$$C_{O\text{escolhido}} = 4,7 \mu F$$

$$f_{LCI} = \frac{12}{5} = 2,4 \text{ Hz}$$

$$C_I = \frac{1}{2\pi Z_{CI} f_{LCI}} = 17,92 \mu F$$

$$C_{I\text{escolhido}} = 18 \mu F$$

Recalculando as frequências:

$$f_{LCE} = \frac{1}{2\pi Z_{CE} C_E} = 58,85 \text{ Hz} \rightarrow \times 5 = 294,28 \text{ Hz}$$

$$f_{LCO} = \frac{1}{2\pi Z_{CO} C_O} = 9,4 \text{ Hz} \rightarrow \times 5 = 47,03 \text{ Hz}$$

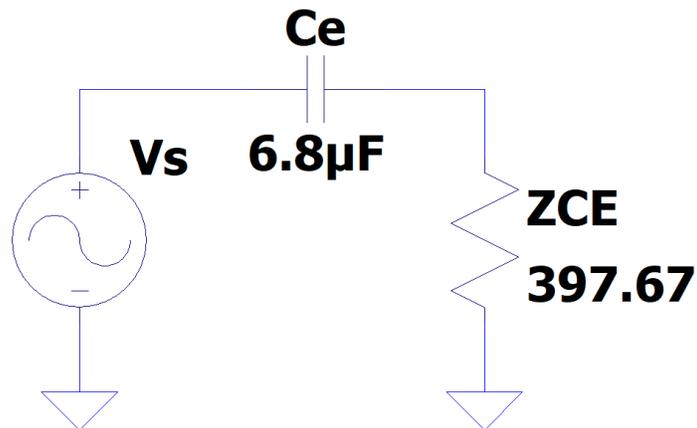
$$f_{LCI} = \frac{1}{2\pi Z_{CI} C_I} = 2,39 \text{ Hz} \rightarrow \times 5 = 11,95 \text{ Hz}$$

Questão 4)

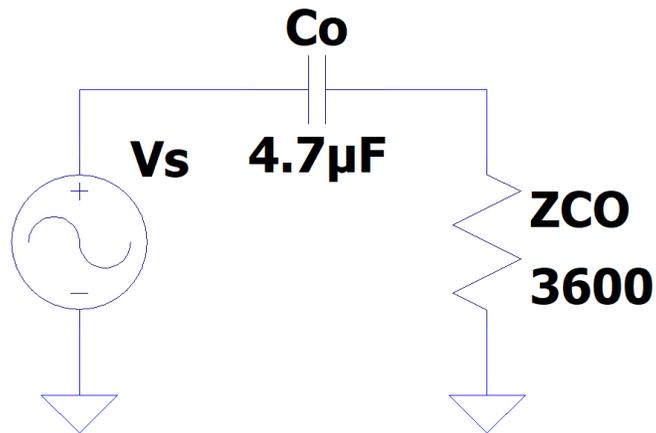
Para as frequências de corte de baixa, temos:

As frequências de baixa são representadas por filtros passa-alta, visto que é a partir dessas frequências que o circuito opera de maneira correta com relação aos parâmetros para que foi projetado.

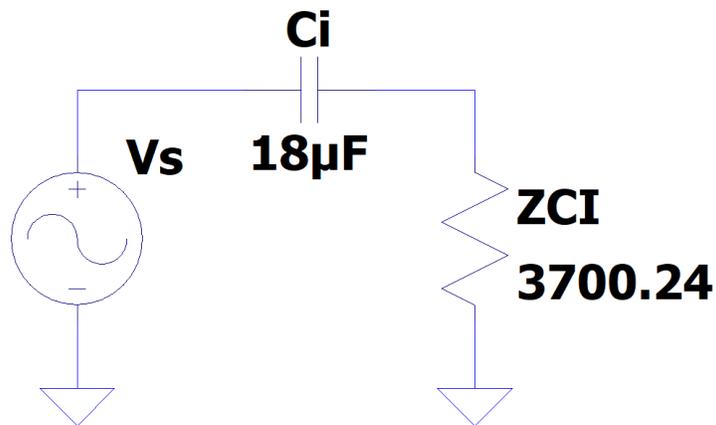
$$f_{LCE} = 58,85 \text{ Hz} \rightarrow \times 5 = 294,28 \text{ Hz}$$



$$f_{LCO} = 9,40 \text{ Hz} \rightarrow \times 5 = 47,03 \text{ Hz}$$



$$f_{LCI} = 2,39 \text{ Hz} \rightarrow \times 5 = 11,95 \text{ Hz}$$



Determinando as frequências de corte de alta:

As frequências de corte de alta, são representadas por filtros passa-baixa, visto que limitam a frequência de operação do circuito.

Resistência de Thévenin de entrada:

$$R_{thi} = R_{ft} \parallel R_1 \parallel R_2 \parallel \beta r_e = 275,96 \Omega$$

Capacitor Miller de entrada:

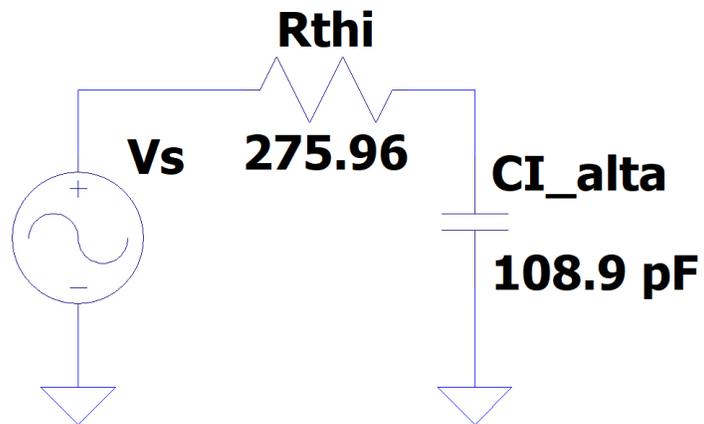
$$C_{MI} = (1 - A_V)C_{bc} = 60,9 \text{ pF}$$

Capacitor de entrada:

$$C_I = C_{wi} + C_{be} + C_{MI} = 108,9 \text{ pF}$$

Frequência de corte de alta de entrada:

$$f_{HI} = \frac{1}{2\pi R_{thi} C_I} = 5,3 \text{ MHz}$$



Resistência de Thévenin de saída:

$$R_{tho} = R_C \parallel R_L = 888,89 \Omega$$

Capacitor Miller de saída:

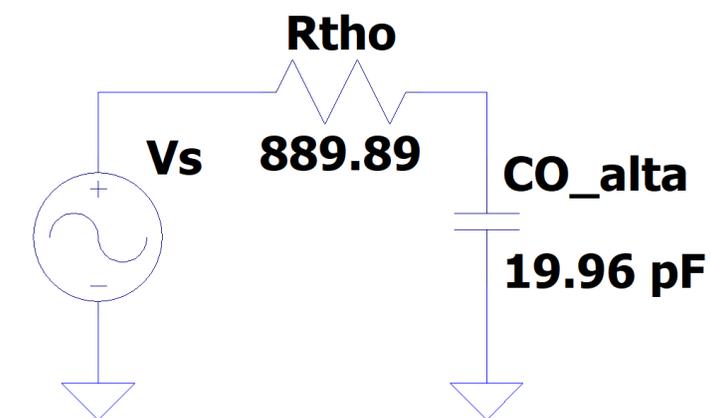
$$C_{MO} = \left(1 - \frac{1}{A_V}\right) C_{bc} = 11,96 \text{ pF}$$

Capacitor de saída:

$$C_O = C_{wo} + C_{ce} + C_{MO} = 19,96 \text{ pF}$$

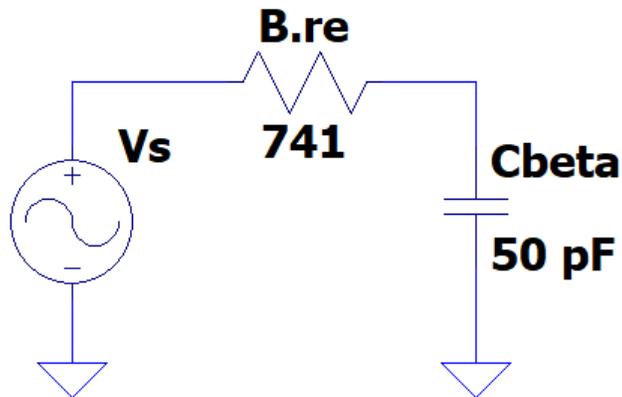
Frequência de corte de alta de saída:

$$f_{Ho} = \frac{1}{2\pi R_{tho} C_O} = 8,97 \text{ MHz}$$



Frequência devido a degeneração do beta:

$$f_{\beta} = \frac{1}{2\pi\beta r_e(C_{be} + C_{bc})} = 4,29 \text{ MHz}$$



Para as frequências dominantes, temos:

$$f_L = f_{LCE} = 294,25 \text{ Hz} \rightarrow \text{já multiplicado por 5}$$

Visto que para as frequências de corte de alta, nenhuma delas atende à uma relação de 4x com relação às outras, deve-se aplicar o fator de correção:

$$f'_H = \frac{(f_{HI} + f_{HO} + f_{\beta})}{3} = 6,18 \text{ MHz}$$

f'_H é a média das frequências que não correspondem à relação de 4x.

O fator de correção então é:

$$f_H = f'_H \sqrt{2^{\frac{1}{n}} - 1}$$

$$f_H = 6,18 \text{ MHz} \times \sqrt{2^{\frac{1}{3}} - 1} = 3,15 \text{ MHz}$$

Assim, as frequências dominantes para o circuito são:

$$f_L = 294,25 \text{ Hz}$$

$$f_H = 3,15 \text{ MHz}$$

A banda de amplificação do amplificador é:

$$BW = 294,25 \text{ Hz até } 3,15 \text{ MHz}$$

$$BW \cong 3,15 \text{ MHz}$$