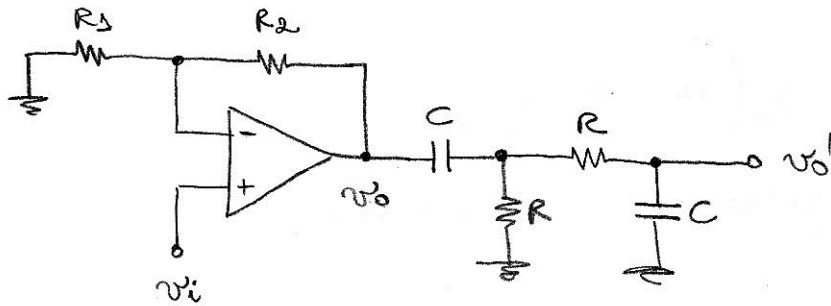


① (a) Obtendo a Transfêrência de malha:



$$v_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) v_s$$

$$v_o' = \frac{\frac{1}{sC}}{R + \frac{1}{sC}} \cdot \frac{1}{\frac{1}{R} + \frac{1}{R + \frac{1}{sC}}} \cdot v_o$$

$$v_o' = \frac{1}{1 + sRC} \cdot \frac{\frac{1}{R} + \frac{sC}{1 + sRC}}{\frac{1}{R + \frac{1}{sC}} + \frac{1}{sC}} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) v_s$$

$$\frac{v_o'}{v_s} = \frac{1}{1 + sRC} \cdot \frac{\frac{R(1 + sRC)}{1 + sRC} + \frac{1}{sC}}{\frac{R(1 + sRC)}{1 + sRC} + \frac{1}{sC}} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

$$\frac{v_o'}{v_s} = \frac{1}{1 + sRC} \cdot \frac{sRC(1 + sRC)}{sRC(1 + sRC) + 1 + s2RC} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

$$\frac{v_o'}{v_s} = \frac{sRC}{1 + 3sRC + R^2C^2s^2} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

$$B(s)A(s) = \frac{\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)}{\frac{1}{sRC} + 3 + RCs}$$

Aplicando o Critério de Backhausen:

$$B(j\omega_0)A(j\omega_0) = 1$$

$$\frac{\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)}{\frac{1}{j\omega_0 RC} + 3 + RCj\omega_0} = 1$$

$$\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) = 3 + j \left(RC\omega_0 - \frac{1}{\omega_0 RC} \right)$$

Resolvendo a equação complexa igualando as partes real e imaginária:

$$1 + \frac{R_2}{R_1} = 3$$

$$\frac{R_2}{R_1} = 2$$

CONDIÇÃO DE OSCILAÇÃO

$$RC\omega_0 - \frac{1}{\omega_0 RC} = 0$$

$$\omega_0^2 = \frac{1}{R^2 C^2}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{RC}$$

FREQUÊNCIA DE OSCILAÇÃO

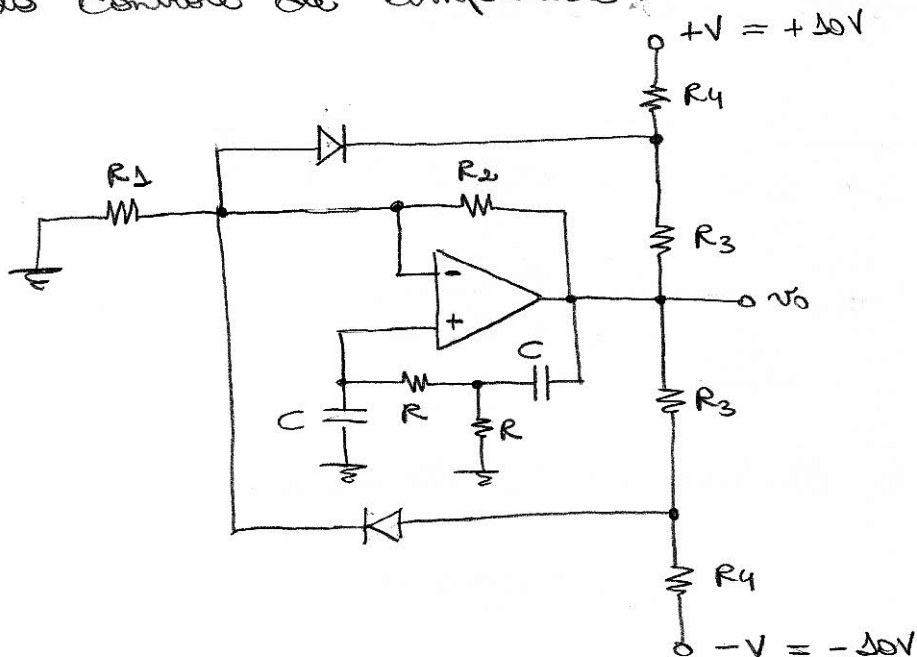
(b) Para $f_0 = 10 \text{ kHz}$:

$$\frac{1}{RC} = 2\pi \cdot 10^4$$

Arbitrando $R = 10 \text{ k}\Omega$, teremos:

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot 10^4 \cdot 10^4} = 1,59 \text{ nF}$$

(c) Incluindo controle de amplitude:



Projeto do sistema de controle de amplitude

Para garantir o início das oscilações:

$$\frac{R_2}{R_1} > 2 \rightarrow \text{Arbitrando } R_1 = 10k\Omega \\ \text{então, usaremos } R_2 = 22k\Omega.$$

A amplitude do sinal na saída do oscilador será aproximadamente igual a:

$$L_+ = \frac{A}{A(1-K)-1} (KV_+ + V_D)$$

$$\text{onde } A = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) = 3,2 \text{ V/V}, \quad K = \frac{R_3}{R_3+R_4} \text{ e } V_D = 0,6 \text{ V}$$

é a queda de tensão nos diodos em condução.
Devo especificações do projeto: $L_+ = 5 \text{ V}$. Então:

$$5 = \frac{3,2}{3,2(1-K)-1} (10K + 0,6)$$

$$16(1-K) - 5 = 32K + 1,92$$

$$16 - 5 - 1,92 = 32K + 16K$$

$$K = 0,189$$

$$\frac{R_3}{R_3+R_4} = 0,189 \quad \therefore R_3 = 0,233 R_4$$

Além disso, para não haver distorção:

$$\frac{R_2 // R_3}{R_1 // R_4} < 2 \quad \therefore \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} \cdot \frac{R_1 + R_4}{R_1 R_4} < 2$$

$$\frac{0,233 R_4 R_2}{R_2 + 0,233 R_4} \cdot \frac{R_1 + R_4}{R_1 R_4} < 2$$

$$\frac{5,13 R_4}{22 + 0,233 R_4} \cdot \frac{10 + R_4}{10 R_4} < 2$$

$$10 + R_4 < 3,89 (22 + 0,233 R_4)$$

$$50 + R_4 < 85,73 + 0,93 R_4$$

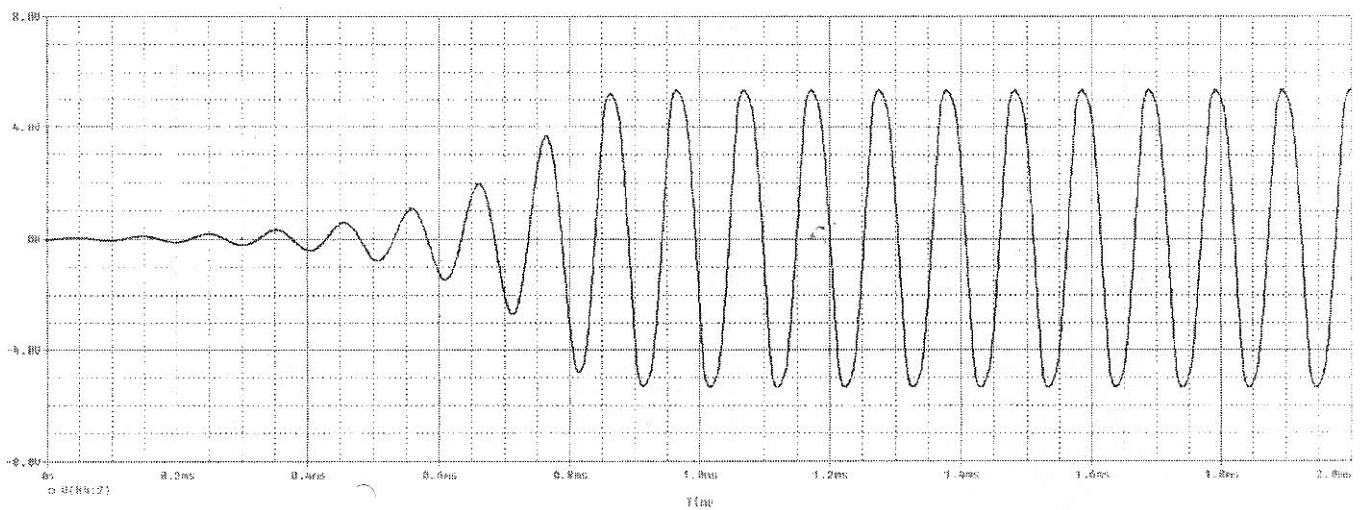
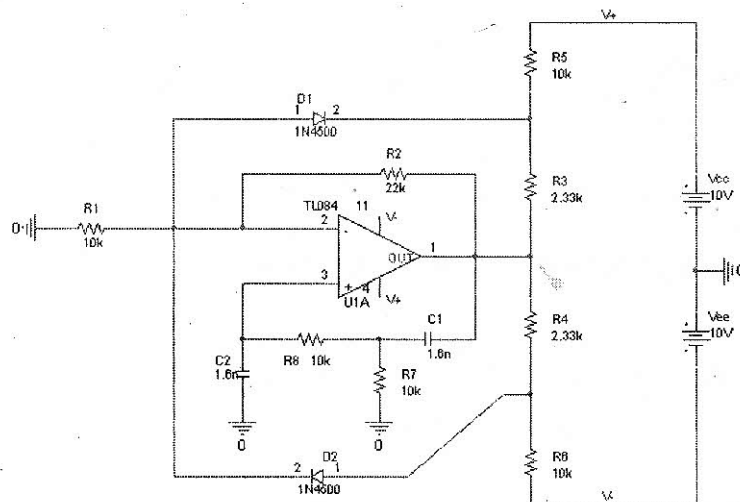
$$0,09 R_4 < 35,73$$

$$R_4 < 833 \text{ k}\Omega$$

Arbitrando $R_4 = 50 \text{ k}\Omega$, teremos:

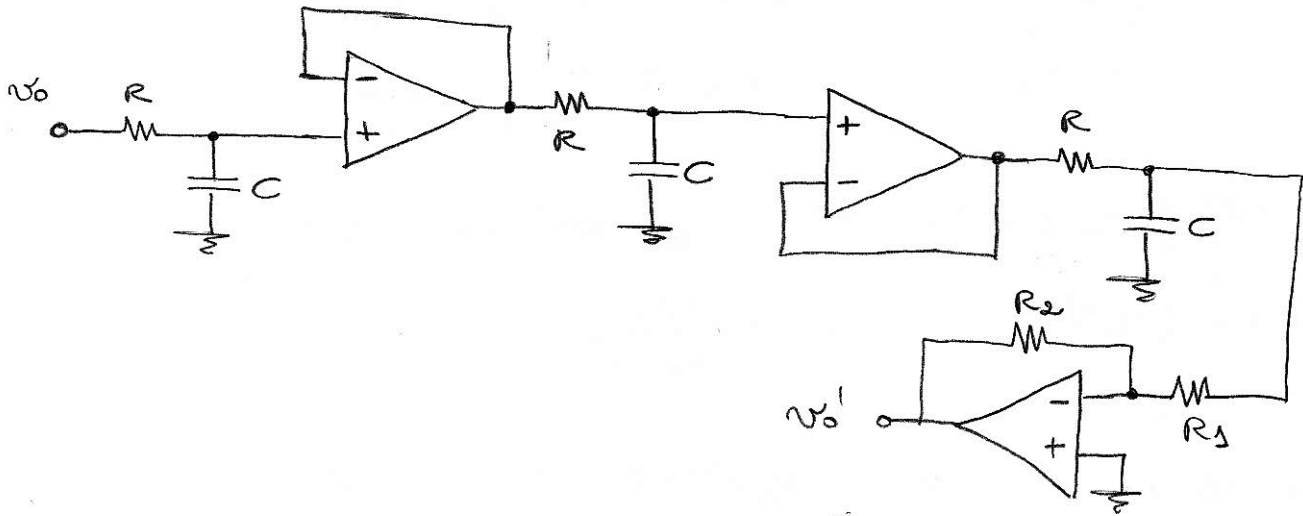
$$R_3 = 0,233 R_4 = 2,33 \text{ k}\Omega$$

(d) Simulando o circuito projetado com o ORCAD:



de acordo com os resultados obtidos, temos a frequência e a amplitude de oscilação desejadas.

- ② (a) O oscilador Bulba é do tipo deslocamento de fase. Sua transferência de malha é dada por:



$$v_0' = \left(-\frac{R_2}{R_1} \right) \cdot \frac{\frac{1}{\frac{1}{R_1} + sC}}{\frac{1}{\frac{1}{R_1} + sC} + R} \cdot \frac{\frac{1}{sC}}{R + \frac{1}{sC}} \cdot \frac{1}{R + \frac{1}{sC}} \cdot v_0$$

$$\frac{v_0'}{v_0} = \left(-\frac{R_2}{R_1} \right) \cdot \frac{\frac{R_1}{1 + sR_1C}}{\frac{R_1}{1 + sR_1C} + R} \cdot \frac{1}{(1 + sRC)^2}$$

$$\frac{v_0'}{v_0} = \left(-\frac{R_2}{R_1} \right) \frac{R_1}{R_1 + R + sR_1RC} \cdot \frac{1}{(1 + sRC)^2}$$

$$\frac{v_0'}{v_0} = \left(-\frac{R_2}{R_1} \right) \left(\frac{R_1}{R_1 + R} \right) \cdot \frac{1}{1 + sR_1//RC} \cdot \frac{1}{(1 + sRC)^2}$$

$$\frac{v_0'}{v_0} = \left(-\frac{R_2}{R_1 + R} \right) \cdot \frac{1}{(1 + s(R_1//R)C) (1 + s2RC + s^2R^2C^2)}$$

$$\frac{v_0'}{v_0} = \left(-\frac{R_2}{R_1 + R} \right) \cdot \frac{1}{1 + s(R_1//RC + 2RC) + s^2(2R \cdot R_1//R \cdot C^2 + R^2C^2) + s^3(R_1//R)R^2C^3}$$

Aplicando o Critério de Barkhausen:

$$\left(-\frac{R_2}{R_1+R}\right) \cdot \frac{1}{\left[1 - \omega_0^2 (2R(R_1//R)C^2 + R^2C^2)\right] + j \left[\omega_0 (2RC + (R_1//R)C) - \omega_0^3 (R_1//R)R^2C^3\right]} = 1$$

$$\left[1 - \omega_0^2 (2R(R_1//R)C^2 + R^2C^2)\right] + j \left[\omega_0 (2RC + (R_1//R)C) - \omega_0^3 (R_1//R)R^2C^3\right] = -\frac{R_2}{R_1+R}$$

Resolvendo a equação igualando as partes real e imaginária:

$$\omega_0 (2RC + (R_1//R)C) - \omega_0^3 (R_1//R)R^2C^3 = 0$$

$$\omega_0^2 = \frac{2RC + R_1//RC}{(R_1//R)R^2C^3} = \frac{2R + R_1//R}{(R_1//R)R^2C^2}$$

$$\omega_0^2 = \frac{1}{R^2C^2} \cdot \left(1 + \frac{2R}{R_1//R}\right)$$

$$\omega_0 = \frac{1}{RC} \sqrt{1 + \frac{2R}{R_1//R}}$$

$$1 - \omega_0^2 (2R(R_1//R)C^2 + R^2C^2) = -\frac{R_2}{R_1+R}$$

$$1 + \frac{R_2}{R_1+R} = \frac{1}{R^2C^2} \left(1 + \frac{2R}{R_1//R}\right) (2R(R_1//R)C^2 + R^2C^2)$$

$$1 + \frac{R_2}{R_1+R} = \left(1 + \frac{2R}{R_1//R}\right) \left(\frac{2(R_1//R)}{R} + 1\right)$$

$$\cancel{1} + \frac{R_2}{R_1+R} = \cancel{1} + \frac{2(R_1//R)}{R} + 4 + \frac{2R}{R_1//R}$$

$$\frac{R_2}{R_1+R} = 4 + \frac{2(R_1//R)}{R} + 2 \frac{R}{(R_1//R)}$$

(b) Para esse projeto, é conveniente fazer $R_3 = R$.
Assim:

$$\omega_0 = \frac{1}{RC} \sqrt{1 + \frac{2R}{R_3 \parallel R}} = \frac{1}{RC} \sqrt{1 + 4} = \frac{\sqrt{5}}{RC}$$

Para que $f_0 = 50 \text{ kHz}$, teremos que:

$$\omega_0 = \frac{\sqrt{5}}{RC} \therefore C = \frac{\sqrt{5}}{\omega_0 R}$$

Se escolhermos $R = 1 \text{ k}\Omega$ então: $C = 36 \text{ nF}$.

(c) Para satisfazer à condição de oscilação:

$$\frac{R_2}{R_3 + R} > 4 + \frac{2R_3 \parallel R}{R} + 2 \frac{R}{R_3 \parallel R}$$

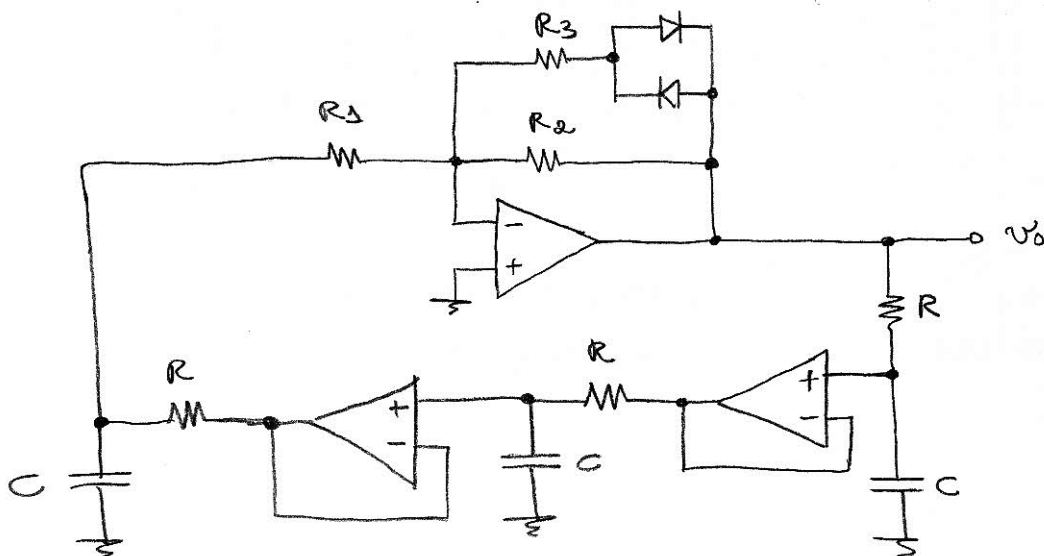
Como $R_3 = R = 1 \text{ k}\Omega$ neste projeto:

$$\frac{R_2}{2R} > 4 + 1 + 4 = 9$$

$$R_2 > 18R = 18 \text{ k}\Omega$$

Assim, usaremos $R_2 = 20 \text{ k}\Omega$.

Na realização prática, usaremos o seguinte esquema de controle de amplitude:

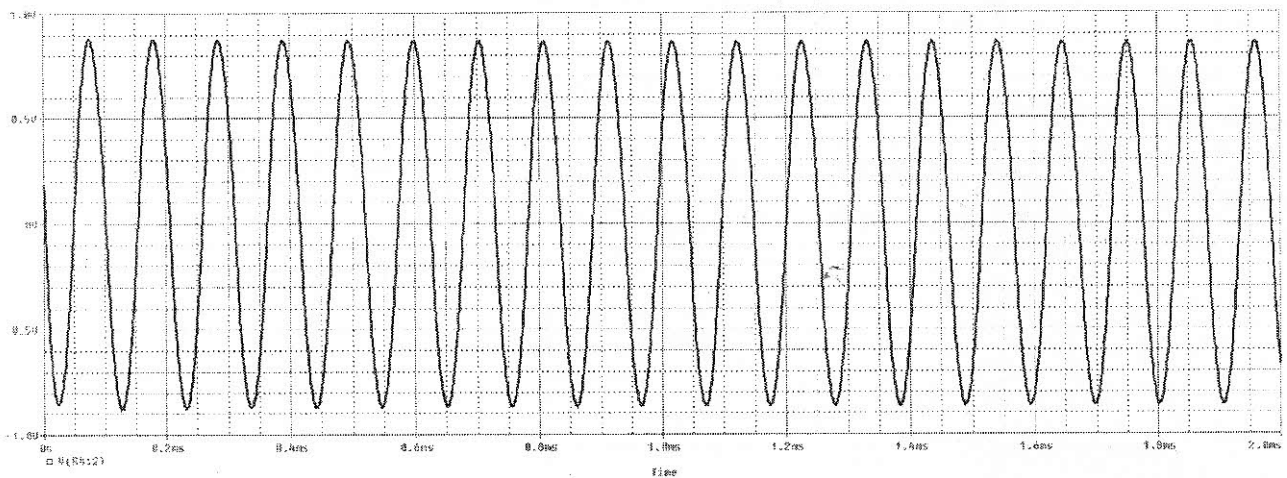
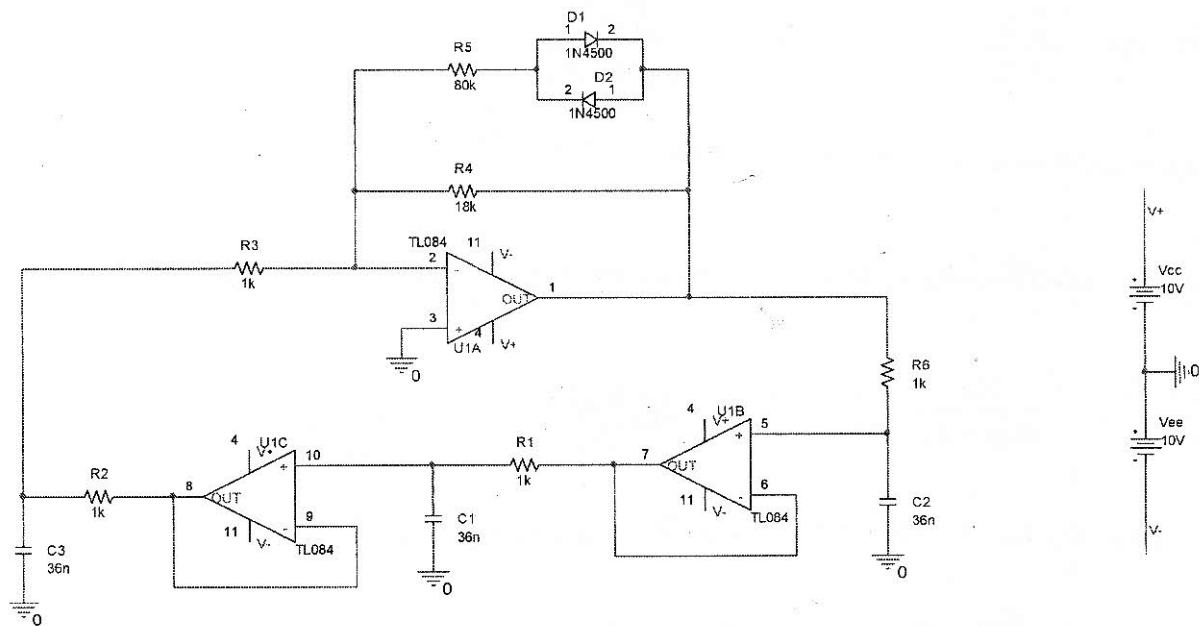


Para que o circuito seja estável para amplitudes altas na saída:

$$R_2 // R_3 < 18R = 18k\Omega$$

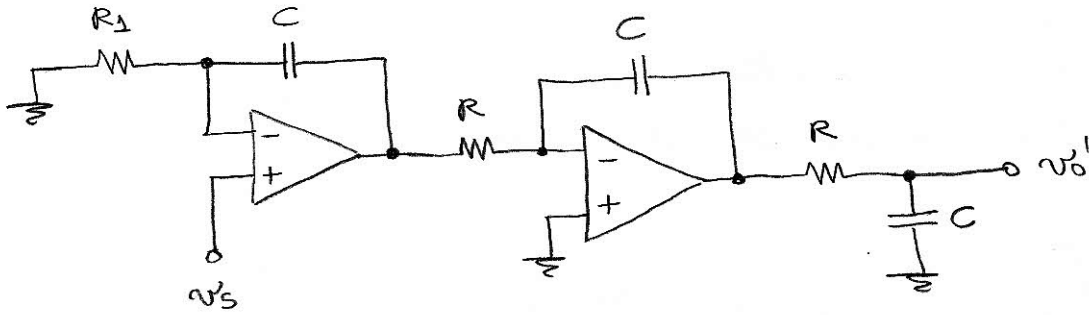
Arbitrando $R_2 // R_3 = 16k\Omega$, temos $R_3 = 80k\Omega$.

Simulando o circuito com o Arcad:



Obtemos uma frequência de oscilação de aproximadamente 10 kHz, como especificado.

③ Obtendo a transferência de malha:



$$v_o' = \frac{\frac{1}{sC}}{R + \frac{1}{sC}} \cdot \left(-\frac{1}{sRC} \right) \cdot \left(1 + \frac{1}{sC R_1} \right) v_s$$

$$\frac{v_o'}{v_s} = \frac{1}{1 + sRC} \cdot \left(-\frac{1}{sRC} \right) \cdot \left(1 + \frac{1}{sR_1 C} \right)$$

$$\frac{v_o'}{v_s} = \frac{-(1 + sR_1 C)}{(1 + sRC) sRC (sR_1 C)} = \frac{-(1 + sR_1 C)}{(1 + sRC) s^2 R R_1 C^2}$$

Aplicando o Critério de Barkhausen:

$$B(j\omega) A(j\omega) = \frac{-(1 + j\omega R_1 C)}{(1 + j\omega RC) (-\omega^2 R R_1 C^2)} = 1$$

$$\frac{(1 + j\omega R_1 C)}{(1 + j\omega RC) \omega^2 R R_1 C^2} \cdot \frac{(1 - j\omega R_1 C)}{(1 - j\omega R_1 C)} = 1$$

$$\frac{1 + \omega^2 R_1^2 C^2}{\omega^2 R R_1 C^2 [1 + \omega^2 R R_1 C^2 + j(\omega RC - \omega R_1 C)]} = 1$$

$$(1 + \omega^2 R R_1 C^2) + j(\omega RC - \omega R_1 C) = \frac{1 + \omega^2 R_1^2 C^2}{\omega^2 R R_1 C^2}$$

Resolvendo a equação complexa acima, igualando as partes real e imaginária:

$$\omega_0 RC - \omega_0 R_1 C = 0$$

$$\omega_0 RC = \omega_0 R_1 C$$

$$R_1 = R$$

(CONDIÇÃO DE OSCILAÇÃO)

$$1 + \omega_0^2 R R_1 C^2 = \frac{1 + \omega_0^2 R_1^2 C^2}{\omega_0^2 R R_1 C^2}$$

$$1 + \omega_0^2 R R_1 C^2 = \frac{1}{\omega_0^2 R R_1 C^2} + \frac{R_1}{R}$$

Pela condição de oscilação: $R_1/R = 1$. Assim:

$$\omega_0^2 R R_1 C^2 = \frac{1}{\omega_0^2 R R_1 C^2}$$

$$\omega_0^4 = \frac{1}{R^2 R_1^2 C^4}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{R R_1} C} = \frac{1}{RC}$$

(FREQÜÊNCIA DE OSCILAÇÃO)

De acordo com o circuito, a tensão V_B é produzida a partir de V_A através do emprego de um integrador de Miller. Assim:

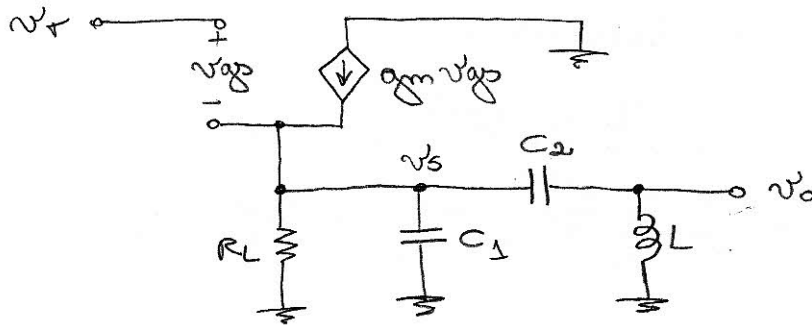
$$V_B(s) = -\frac{1}{sRC} V_A(s)$$

$$V_B(j\omega) = j \frac{1}{\omega RC} V_A(j\omega)$$

Portanto, a resposta $\frac{V_B(j\omega)}{V_A(j\omega)} = j \frac{1}{\omega RC} = \frac{1}{\omega RC} \angle 90^\circ$ indica

que V_B está deslocada de 90° em relação a V_A . Ou seja, V_B e V_A estão em quadratura.

- ④ Como a impedância de entrada de um MOSFET polarizado na configuração de fonte comum é infinita, o nó de gate é bastante adequado para abrir a malha do circuito. Assim, podemos obter a transferência de malha da seguinte forma:



Escrevendo a equação do nó de saída:

$$\frac{v_o}{sL} + (v_o - v_s) sC_2 = 0$$

$$v_o \left(\frac{1}{sL} + sC_2 \right) = sC_2 v_s$$

$$v_s = \left(\frac{1}{s^2 LC_2} + 1 \right) v_o$$

Escrevendo, também a equação do nó de fonte:

$$-g_m(v_r - v_s) + \frac{v_s}{R_L} + v_s sC_1 + (v_s - v_o) sC_2 = 0$$

$$v_s \left(g_m + \frac{1}{R_L} + s(C_1 + C_2) \right) = g_m v_r + sC_2 v_o$$

$$\left(g_m + \frac{1}{R_L} + s(C_1 + C_2) \right) \left(\frac{1}{s^2 LC_2} + 1 \right) v_o = g_m v_r + sC_2 v_o$$

$$v_o \left[\frac{g_m R_L + sR_L(C_1 + C_2) + 1}{R_L} \cdot \frac{1 + s^2 LC_2}{s^2 LC_2} \right] = g_m v_r + sC_2 v_o$$

$$v_o \left[\frac{g_m R_L + 1 + sR_L(C_1 + C_2) + s^2 LC_2(g_m R_L + 1) + s^3 LC_2(C_1 + C_2)R_L}{s^2 LC_2 R_L} - sC_2 \right] = g_m v_r$$

$$\frac{v_o}{v_i} = \frac{\omega^2 L C_2 R_L a_{gm}}{\omega^3 L C_1 C_2 R_L + \omega^2 L C_2 (a_{gm} R_L + 1) + \omega R_L (C_1 + C_2) + (a_{gm} R_L + 1)}$$

$$\frac{v_o}{v_i} = \frac{L C_2 a_{gm} R_L}{\omega L C_1 C_2 R_L + \frac{R_L (C_1 + C_2)}{\omega} + L C_2 (a_{gm} R_L + 1) + \frac{(a_{gm} R_L + 1)}{\omega^2}}$$

Aplicando o critério de Barkhausen:

$$B(j\omega) A(j\omega) = \frac{L C_2 a_{gm} R_L}{j \left[\omega L C_1 C_2 R_L - \frac{R_L (C_1 + C_2)}{\omega_0} \right] + \left[L C_2 (a_{gm} R_L + 1) - \frac{(a_{gm} R_L + 1)}{\omega_0^2} \right]} = 1$$

$$j \left[\omega_0 L C_1 C_2 R_L - \frac{R_L (C_1 + C_2)}{\omega_0} \right] + \left[L C_2 (a_{gm} R_L + 1) - \frac{(a_{gm} R_L + 1)}{\omega_0^2} \right] = L C_2 a_{gm} R_L$$

Resolvendo a equação complexa, igualando as partes real e imaginária:

$$\omega_0 L C_1 C_2 R_L - \frac{R_L (C_1 + C_2)}{\omega_0} = 0$$

$$\omega_0^2 = \frac{1}{L \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}}$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{L \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}}} \quad (\text{FREQUÊNCIA DE OSCILAÇÃO})$$

$$L C_2 (a_{gm} R_L + 1) - \frac{(a_{gm} R_L + 1)}{\omega_0^2} = L C_2 a_{gm} R_L$$

$$\cancel{L C_2} (a_{gm} R_L + 1) - \frac{\cancel{L C_2} (a_{gm} R_L + 1)}{C_1 + C_2} = \cancel{L C_2} a_{gm} R_L$$

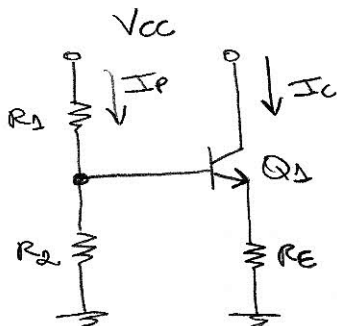
$$1 = \frac{C_1}{C_1 + C_2} (a_{gm} R_L + 1)$$

$$\frac{C_1 + C_2}{C_1} = g_m R_L + 1$$

$$g_m R_L = \frac{C_2}{C_1}$$

$$g_m = \frac{C_2}{C_1} \cdot \frac{1}{R_L} \quad (\text{CONDIÇÃO DE OSCILAÇÃO})$$

- ⑤ Iniciando o projeto pela polarização, consideramos todos os capacitores como circuitos abertos e o indutor L como um curto-circuito. Assim, teremos que:



$$R_E = \frac{V_E}{I_E} \approx \frac{V_E}{I_C} = \frac{3}{0,2} = 15 \text{ k}\Omega$$

Para dimensionar R_1 e R_2 , consideraremos $I_P = 0,1 I_C$. Assim:

$$R_1 = \frac{V_{CC} - (V_E + 0,6)}{0,1 I_C} = \frac{10 - 3,6}{0,2}$$

$$R_1 = 32 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 \approx \frac{V_E + 0,6}{0,1 I_C} = \frac{3,6}{0,2} \rightarrow R_2 = 18 \text{ k}\Omega$$

Para que o oscilador oscile em 100 kHz, devemos ter que:

$$\omega f_0 = \sqrt{\frac{1}{L \left(\frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \right)}}$$

Arbitrando, neste projeto, $C_1 = C_2 = C$, teremos:

$$(\omega f_0)^2 = \frac{2}{LC} \quad \therefore \quad C = \frac{2}{(\omega f_0)^2 L}$$

$$C = 5,01 \text{ nF}$$

Finalmente, devemos descobrir se $C_1 = C_2$ satisfaz a condição de oscilação:

$$g_m > \frac{\left(1 + \frac{C_2}{C_1}\right)}{R_L} + \frac{1}{R_i \left(1 + \frac{C_2}{C_1}\right)}$$

$$\frac{I_C}{V_T} > \frac{2}{R_L} + \frac{1}{R_E // V_E \cdot 2}$$

$$80 \text{ mA/V} > 40,9 \text{ mA/V} \rightarrow \text{OK!}$$

obs.: Caso a condição de oscilação não fosse satisfeita, o projetista deveria calcular uma relação C_1/C_2 que fosse capaz de satisfazê-la.

No que se refere aos capacitores de acoplamento C_B e C_C , estes deverão operar como curto-circuitos na frequência de oscilação de 100 kHz. Portanto, suas constantes de tempo de curto-circuito devem ser:

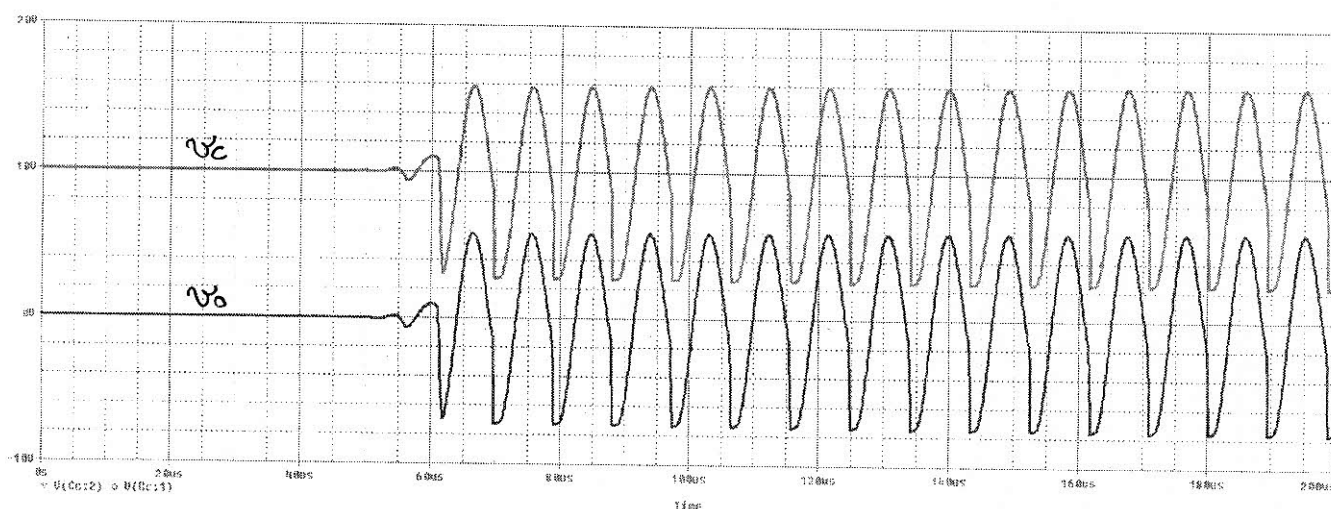
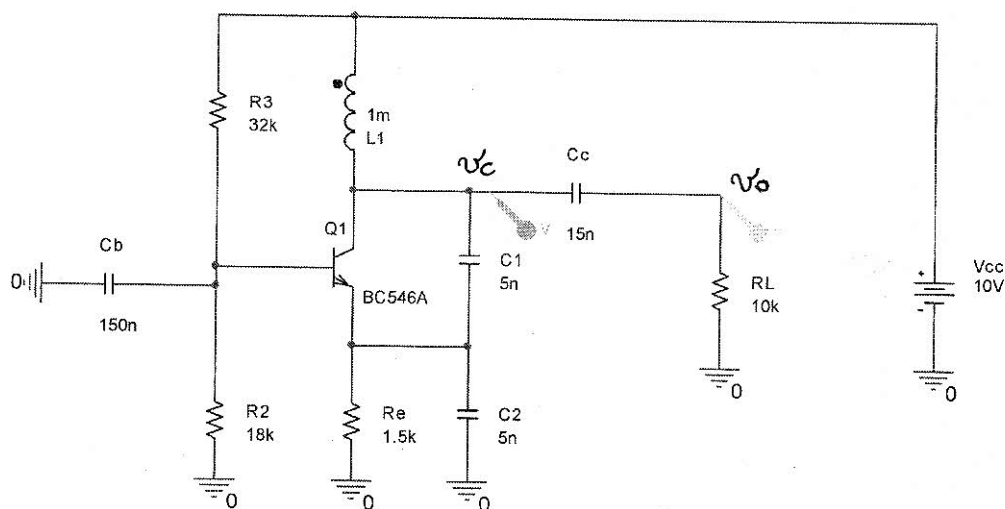
$$\frac{1}{C_B \cdot R_D // R_E // V_T} \ll 2\pi f_0$$

$$C_B \gg \frac{1}{2\pi f_0 \cdot R_D // R_E // V_T} = 1,27 \text{ mF}$$

$$\frac{1}{C_C R_L} \ll 2\pi f_0 \quad \therefore C_C \gg \frac{1}{2\pi f_0 R_L} = 0,159 \text{ mF}$$

Assim, escolhemos: $C_B = 150 \text{ mF}$ e $C_C = 15 \text{ mF}$, cerca de 100 vezes maiores.

Simulando o circuito projetado com o Orcad, obtemos os seguintes gráficos:



A partir dos resultados acima, verificamos que o circuito oscilador apresentou, na saída, oscilações em 100kHz, conforme desejado.

Comparando a forma de onda da tensão na saída V_o com a da tensão no coletor V_c , nota-se que esta última oscila em torno da tensão de polarização de coletor $V_{cc} = 10V$. Assim, em metade do ciclo, a tensão no coletor V_c supera a tensão de alimentação V_{cc} . Isso só é possível porque o indutor é um elemento armazenador de energia. Em parte do ciclo ele armazena energia e, na outra parte, devolve essa energia ao circuito, fazendo V_c superar V_{cc} .