



Universidade Federal de Campina Grande - UFCG  
Centro de Engenharia Elétrica e Informática – CEEI  
Circuitos Elétricos II

Projeto de filtros ativos  
Duplo T Rejeita-Banda

Aluno: Carlos Renan Correia Fidelis

Aluno: José Ívines Matos Silva

Aluno: Lucas Martins Bezerra

Aluno: Lucila Maria Orestino Pereira

Aluno: Lucivaldo Barbosa de Aguiar Júnior

Professor: Dr. Luiz Augusto Medeiros Martins Nóbrega

Matrícula: 121110703

Matrícula: 123211061

Matrícula: 120110422

Matrícula: 119111041

Matrícula: 119210605

Turma: 01

Campina Grande, 2024.

## **Sumário**

<b>1</b>	<b>Função de transferência</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Transiente</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Diagrama de Bode</b>	<b>5</b>
<b>4</b>	<b>Montagem</b>	<b>9</b>
<b>5</b>	<b>Testes</b>	<b>10</b>
<b>6</b>	<b>Conclusões</b>	<b>13</b>

# 1 Função de transferência

Conforme ZUMBAHLEN, podemos analisar o circuito presente na Figura 1 utilizando o seguinte conjunto de equações e determinar a função de transferência mostrada pela Equação 7.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC} \quad (1)$$

$$R1 = R2 = R \quad (2)$$

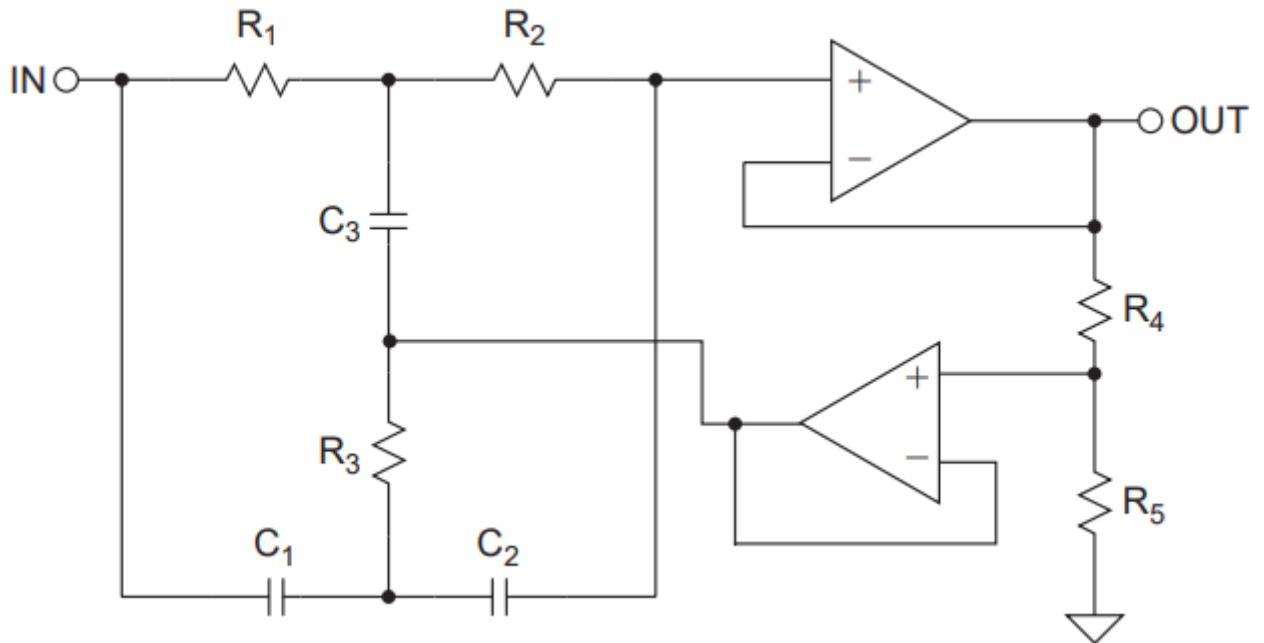
$$R3 = \frac{R}{2} \quad (3)$$

$$C1 = C2 = C \quad (4)$$

$$C3 = 2C \quad (5)$$

$$Q = \frac{1 + \frac{R_5}{R_4}}{4} \quad (6)$$

Figura 1: Twin-T Notch Filter



Fonte: Hank Zumbahlen - Analog Devices

$$H(S) = \frac{V_0}{V_{in}} = \frac{S^2 + \omega_0^2}{S^2 + \beta S + \omega_0^2} \quad (7)$$

Onde  $\beta = \frac{\omega_0}{Q}$  e  $\omega_0^2 = \frac{1}{RC}$  sendo  $Q$  o fator de qualidade do filtro.

Observando a Equação 7, fica claro que o circuito apresentado na Figura 1 não apresenta ganho na sua saída. Isso é dito por ZUMBAHLEN p.640 que o circuito com amplificadores operacionais surge para resolver o problema de um baixo fator de qualidade  $Q$  igual a 0,25. Com o uso dos dois amplificadores podemos alterar o valor do fator de qualidade do circuito a partir da razão  $\frac{R_4}{R_5}$ .

Dado que nosso objetivo é projetar um filtro com frequência central  $\omega_0 = 6KHz$ , fator de qualidade  $Q = 5$ , e um ganho na faixa de passagem de  $6,4V/V$ . Foram utilizadas as Equações 1, 2, 3, 4, 5 e 6 para escrever o código 1 escrito em Python, o qual foi feito para testar diversos valores comerciais de capacitores a fim de obter valores diferentes de resistências, facilitando a escolha de valores mais próximos dos disponíveis no mercado.

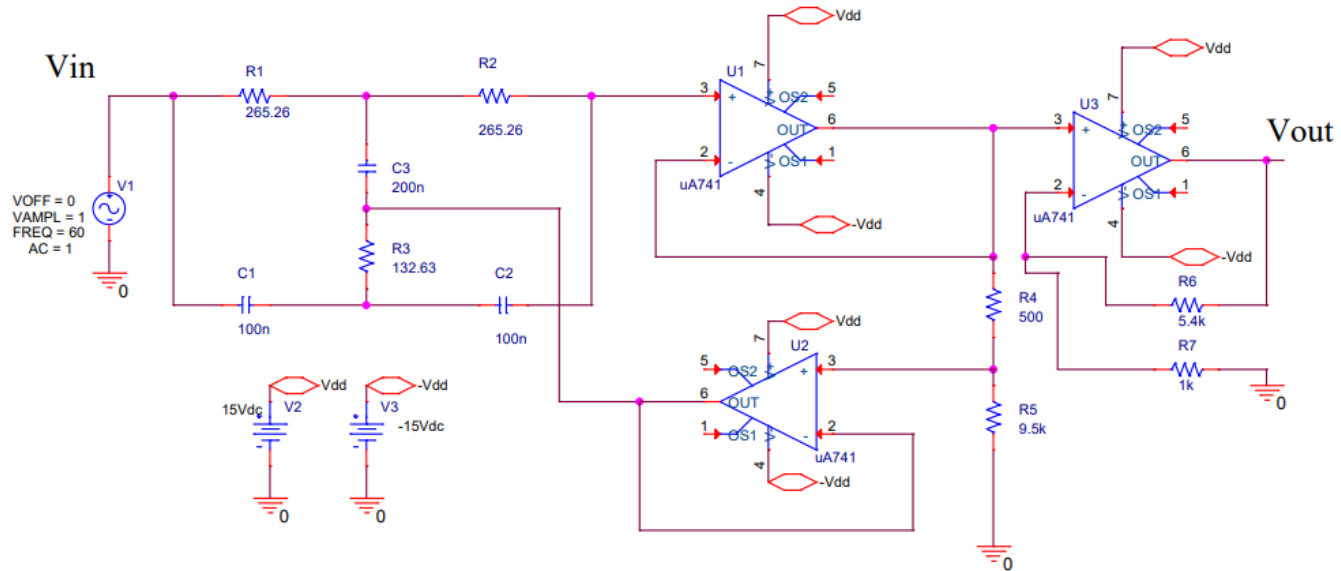
Para obter os valores necessários para os componentes foi estimado um valor de capacitor  $C$  e os outros componentes tiveram seus valores baseados neste.

```
1 # atividade 3o estagio circuitos 2
2 #@author: Lucivaldo Barbosa
3 import numpy as np
4
5 Q = 5
6
7 f0 = 6e3 #frequencia central
8
9 B = (2*np.pi*f0) / Q
10
11 C = float(input('C = '))
12
13 r = 1/(2*np.pi*C*f0)
14
15 r1, r2, r3 = r, r, r/2 #resistores
16
17 y = (4*Q) - 1 # R5/R4
18
19 r4 = 500
20
21 r5 = r4*y
22 # capacitores
23 c1, c2, c3 = C, C, 2*C
24
25 print(f' Q = {Q};\n C = {C};\n R1 = {r1};\n R2 = {r2};\n R3 = {r3};'+
26       f'\n R4 = {r4};\n R5 = {r5}; \n C1 = {c1};\n C2 = {c2};\n C3 = {c3};'+
27       f'\n f_0= {f0};\n B = {B/(2*np.pi)};\n Rf = 5.4k;\n Ri = 1k;')
```

Source Code 1: Cálculo dos parâmetros com Python

Sabendo que não é possível obter ganho na saída apenas com o circuito mostrado na Figura 1, adicionamos um estágio amplificador na saída do filtro.

Figura 2: Filtro rejeita faixa amplificador duplo T



Fonte: Capture Cis Lite

A função de transferência de um circuito amplificador com entrada não inversora é dada por:

$$H(S) = 1 + \frac{R_f}{R_i} \quad (8)$$

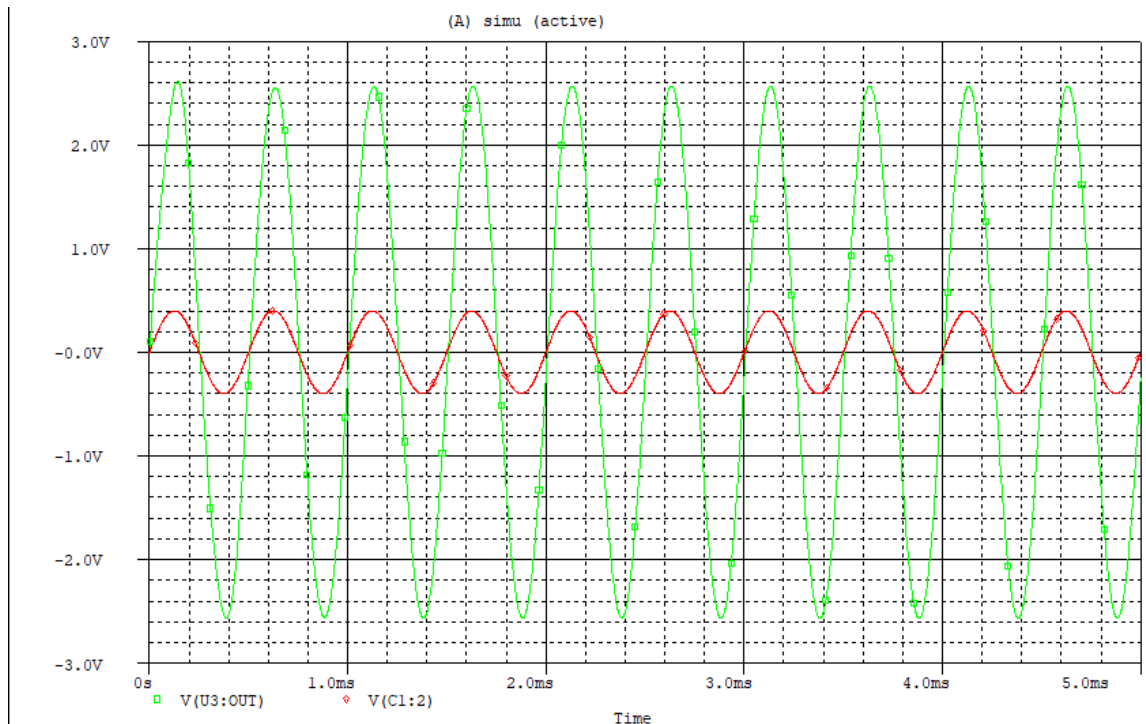
Ora, o circuito amplificador foi ligado em série com a saída do filtro, o que implica na função de transferência final do circuito mostrado na Figura 2 ser:

$$H(S) = \left(1 + \frac{R_6}{R_7}\right) \cdot \left(\frac{S^2 + \omega_0^2}{S^2 + \beta S + \omega_0^2}\right) \quad (9)$$

## 2 Transiente

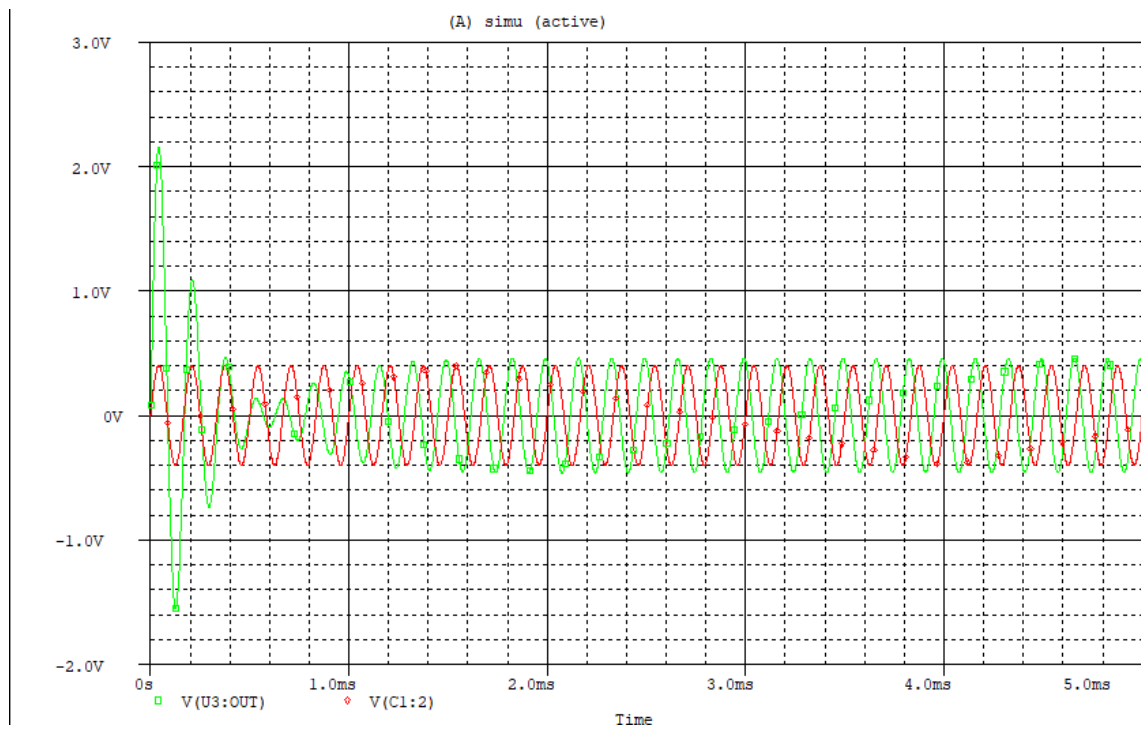
Observando a Figura 3 podemos ver o resultado da resposta no tempo observada no simulador PSpice com o circuito operando na faixa de passagem. Observando a Figura 4 podemos observar a resposta no tempo quando o circuito opera na frequência de ressonância, sendo em ambos os casos o traço de cor verde o sinal de saída e o traço vermelho o sinal de entrada.

Figura 3: Saída do circuito operando na faixa de passagem



Fonte: PSpice

Figura 4: Saída do circuito operando na frequência de ressonância



Fonte: PSpice

### 3 Diagrama de Bode

A fim de atender os requisitos cobrados, utilizando um capacitor  $C = 100nF$  na entrada do Código 1, a saída para esta entrada serviu como entrada para o código escrito utilizando Octave para plotar a função de transferência do circuito apresentado na Figura 2 além da resposta em frequência de um filtro passivo que atende os mesmos requisitos do filtro ativo.

```

1 %respostas em frequencia
2 %@autor = Lucivaldo Barbosa
3 pkg load control
4 Q = 5;
5 C = 1e-07;
6 R1 = 265.25823848649225;
7 R2 = 265.25823848649225;
8 R3 = 132.62911924324612;
9 Rf = 5.4e3;
10 Ri = 1e3;
11 R4 = 9500.0;
12 R5 = 500.0;
13 C1 = 1e-07;
14 C2 = 1e-07;
15 C3 = 2e-07;
16 f_0= 6000.0;
17 B = 1200.0;

```

```

18
19 s = tf ('s');
20
21 w0 = 1 / (R1 * C);
22
23 Filtro = (s^2 + (w0^2) ) / (s^2 + s* (w0/Q) + w0^2); %estagio passivo
24
25 estagio_amplificador = 1 + (Rf /Ri);
26
27 H = Filtro * estagio_amplificador %funcao de transferencia final
28
29 disp(['Ganho em 1kHz (faixa de passagem): ' num2str(bode(H, 1e3*2*pi))]);
30
31 bode(H, Filtro, {10e3,10e4});
32
33 legend('Filtro ativo', 'Filtro passivo');

```

Source Code 2: Resposta em frequência com Octave



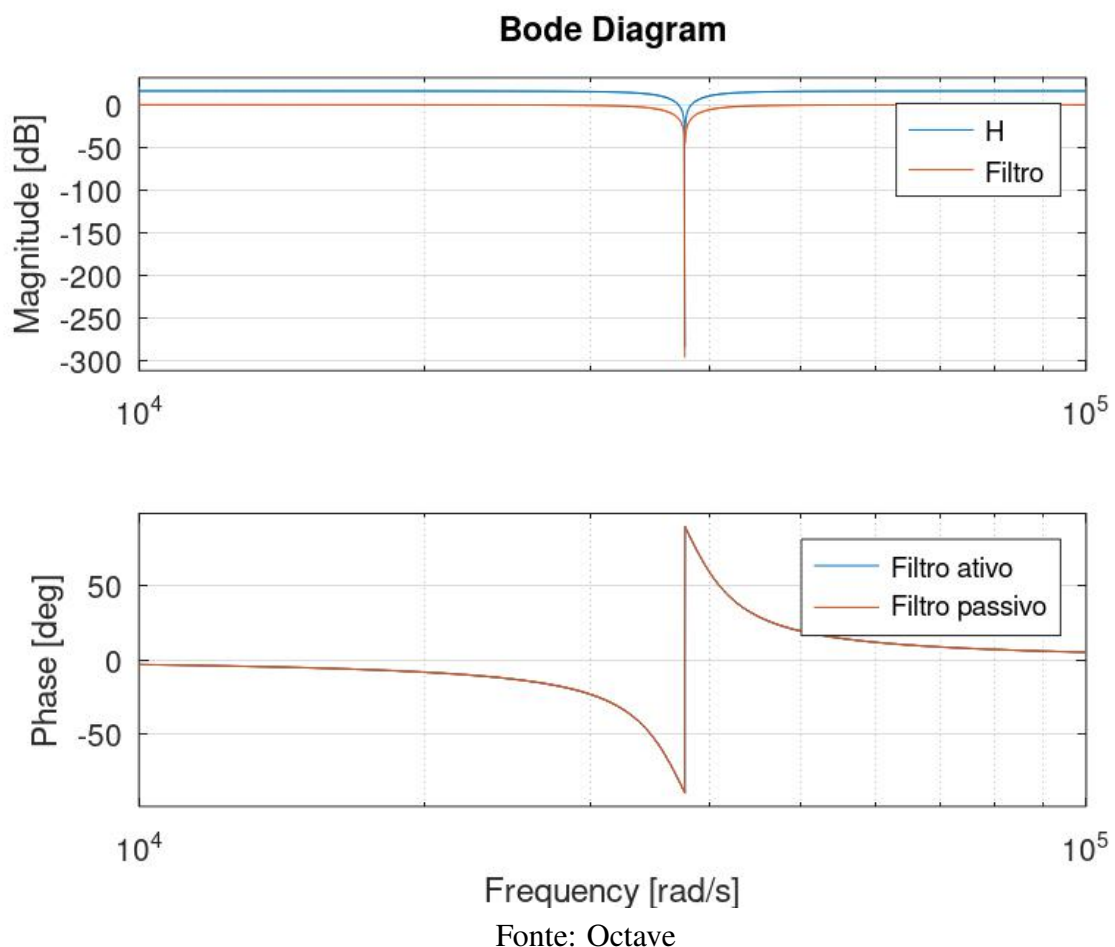
O Código 2 tem as seguintes saídas:

```
1 >>atividade2
2 Transfer function 'H' from input 'u1' to output ...
3
4      6.4 s^2 + 9.096e+09
5 y1:  -----
6      s^2 + 7540 s + 1.421e+09
7
8 Continuous-time model.
9 Ganho em 1kHz (faixa de passagem): 6.3962
10 >>
```

Source Code 3: Saída no terminal

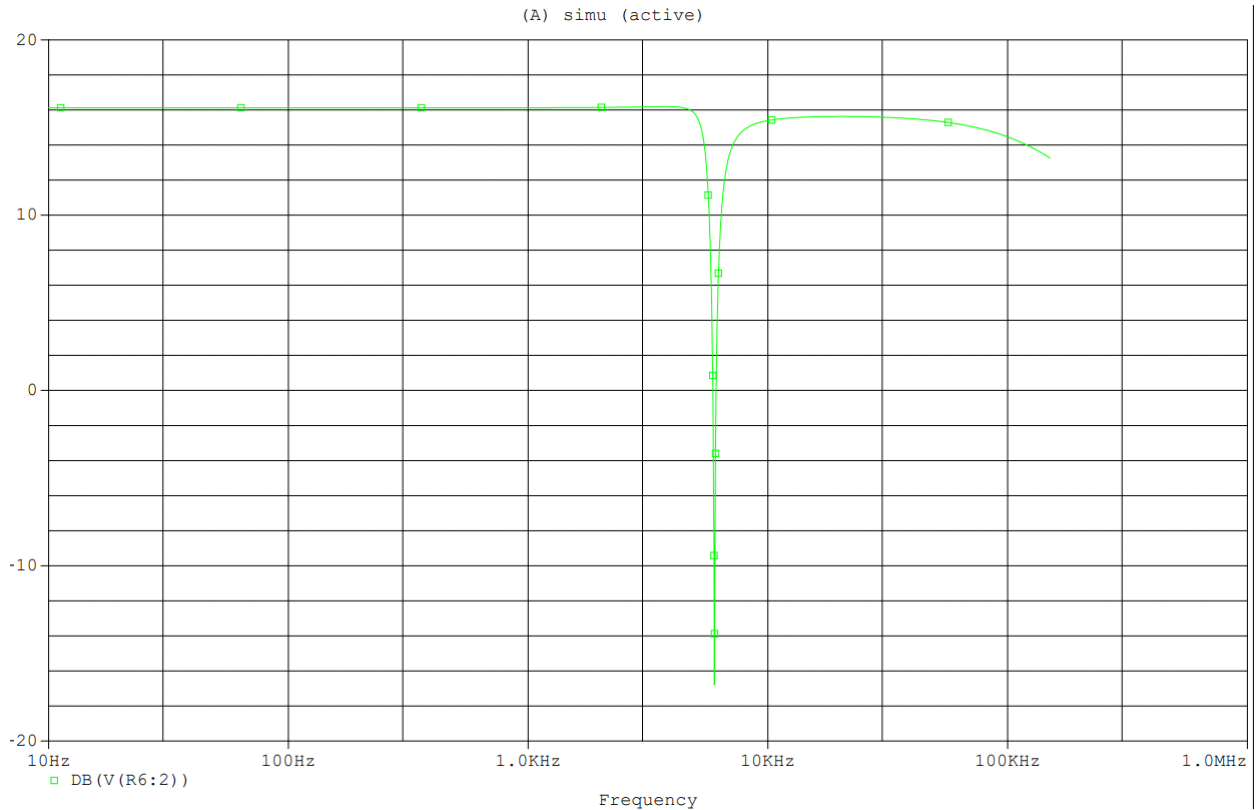
Em que y1 é a função de transferência do circuito apresentado na Figura 2 e o ganho na faixa de passagem é 6,3962 V/V. Além disso, o Código 2 também tem como saída o diagrama de Bode, ou seja, magnitude e fase das funções de transferência (filtro ativo e passivo) apresentadas no corpo do código conforme Figura 5 onde as funções azul e vermelho representam, respectivamente, o filtro ativo e o passivo.

Figura 5: Diagrama de Bode



A resposta em frequência obtida pelo Octave pode ser comparada com o gráfico apresentado pelo simulador PSpice mostrado na Figura 6.

Figura 6: Resultado obtido no simulador



Fonte: PSpice

Fazendo um certo arredondamento nos valores de resistência e utilizando um ua741 (amplificador operacional não ideal) para simular o circuito foi obtida uma largura de banda igual a  $1,2429\text{kHz}$ , assim o erro percentual na largura de banda é dado por:

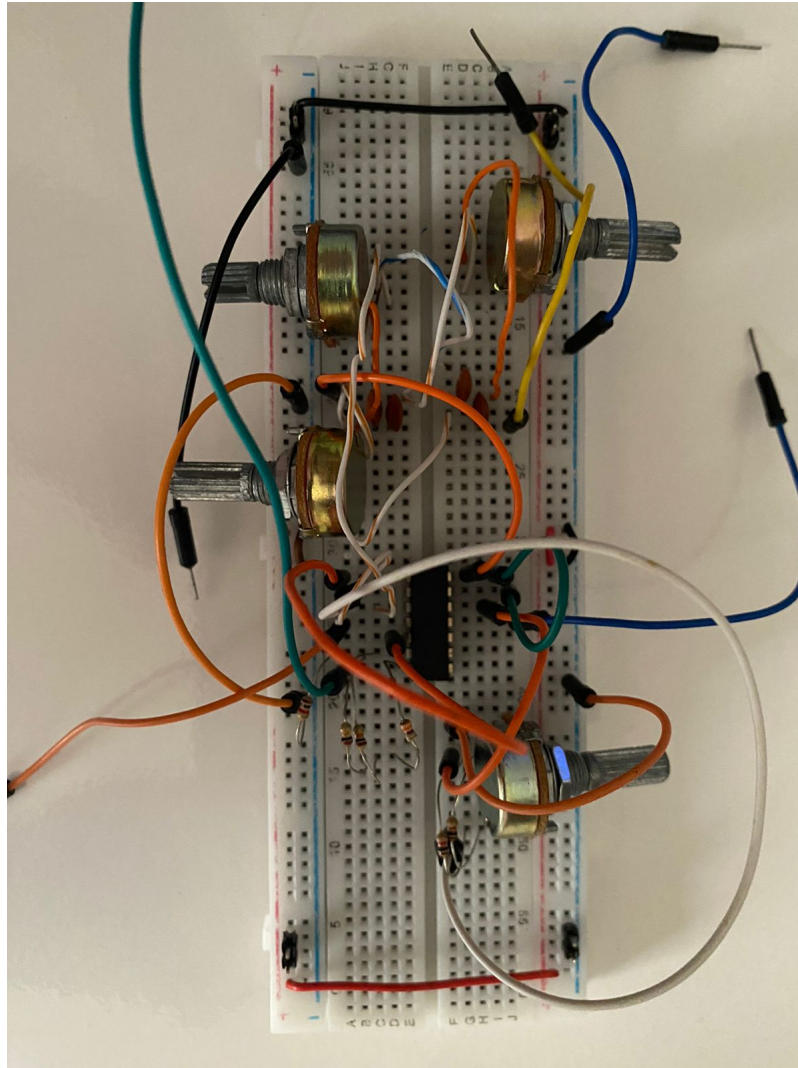
$$\epsilon(\%) = \left( \frac{1,2429\text{k}}{1,2\text{k}} - 1 \right) \cdot 100\%$$

$$\epsilon(\%) = 3,575\%$$

## 4 Montagem

O circuito mostrado na Figura 7 é o equivalente ao circuito apresentado na Figura 2

Figura 7: Montagem



Fonte: Autoria própria

Percebe-se observando a Figura 7 que foram utilizados quatro potenciômetros, eles representam os resistores:  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  e  $R_5$ .  $R_4$  foi obtido associando dois resistores de  $1k\Omega$  em paralelo,  $R_6$  foi obtido com a associação em paralelo de dois resistores de  $10k\Omega$  em série com um resistor de  $330\Omega$  que ao ler o valor com um multímetro obtivemos  $5,39k\Omega$ . Além disso, ao invés de utilizarmos um ci ua741 (utilizado no simulador) foi utilizado um tl074cn.

## 5 Testes

Foram utilizados um gerador de funções e uma fonte simétrica para alimentar o circuito, além disso, foi utilizado um osciloscópio para visualizar a saída do circuito, um multímetro para ajustar os potenciômetros e realizar testes de continuidade. A Figura 8 mostra todos os equipamentos utilizados no laboratório LIMC.

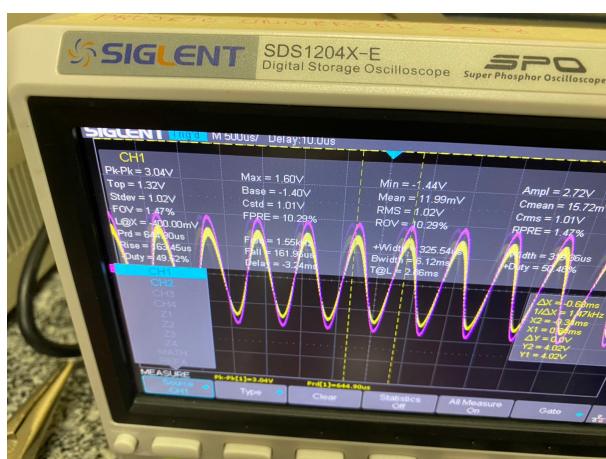
Figura 8: Equipamentos utilizados



Fonte: Autoria própria

As Figuras 9 e 10 mostram, respectivamente, a tela do osciloscópio com as medidas de entrada e saída.

Figura 9: Medidas da entrada



Fonte: Autoria própria

Figura 10: Medidas da saída



Fonte: Autoria própria

Temos então uma entrada com 3,04V<sub>pp</sub> e uma saída com 19V<sub>pp</sub> ambas com uma frequência



de  $1,5\text{kHz}$ , o que nos permite dizer que o ganho de tensão na saída foi de:

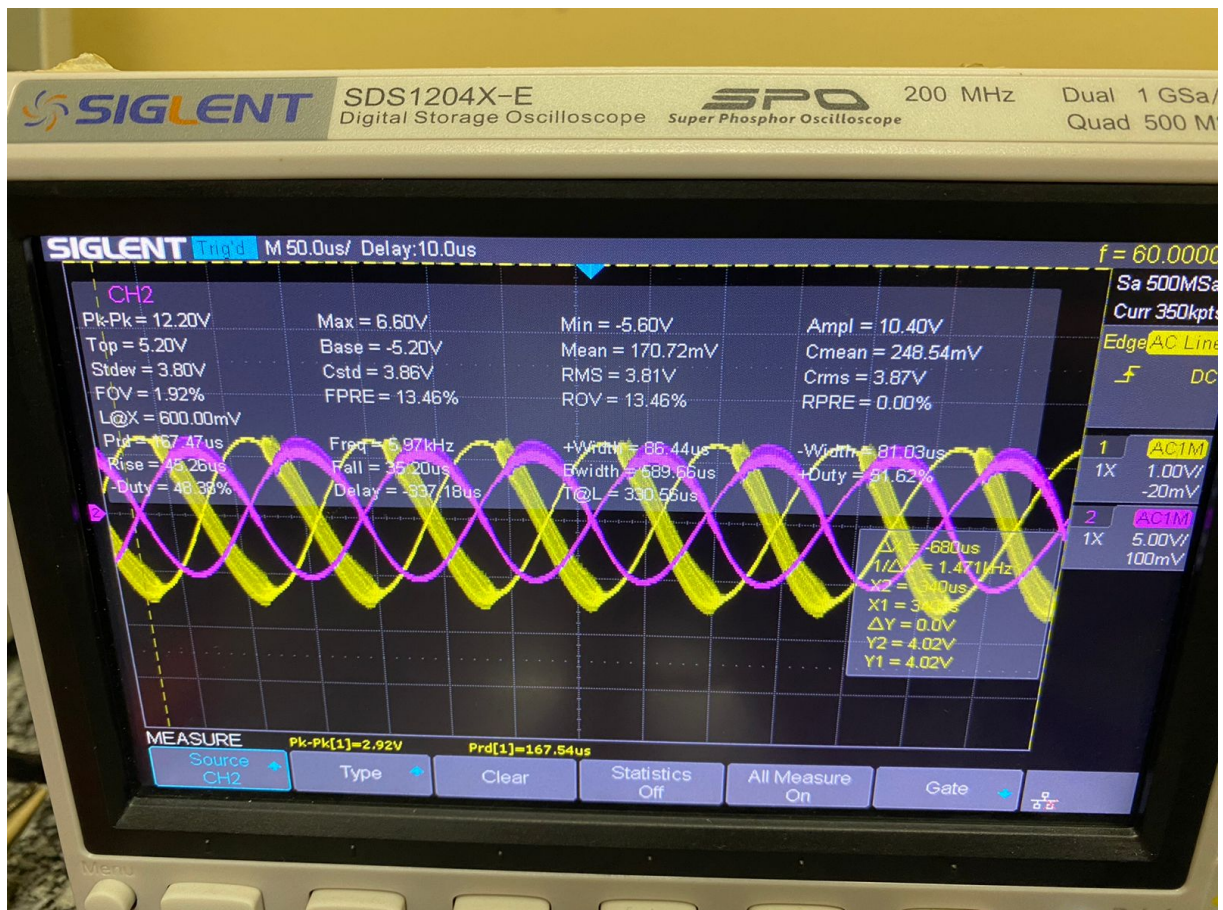
$$\frac{19}{3,04} = 6,25\text{V/V}$$

Sabendo que o objetivo era termos um ganho de  $6,4\text{V/V}$ , podemos dizer que o erro experimental no ganho foi de:

$$\epsilon(\%) = \left( \frac{6,25}{6,4} - 1 \right) \cdot 100\% = -2,34\%$$

Em seguida atualizamos a frequência do gerador de funções para  $6\text{kHz}$  que é justamente a nossa frequência de ressonância. A saída sob tais condições pode ser observada na Figura 11

Figura 11: Montagem



Fonte: Autoria própria

Observamos que o sinal está claramente sendo atenuado. Conforme ZUMBAHLEN, o "notch" com componentes típicos tem um ganho que varia entre 40 e 50 dB. Tomando 40dB que é o equivalente a 100 na escala decimal, deveríamos ter uma saída igual a  $1,9\text{V}$ , temos na verdade, um "notch" de aproximadamente 4dB em  $6\text{kHz}$ . Ou seja, apesar do sinal estar sendo atenuado, a frequência de ressonância foi deslocada de  $6\text{kHz}$  para outro valor. Temos no ga-

nho do circuito se compararmos o ganho na faixa de passagem 16,  $12dB$  com o ganho em  $6kHz$  que é  $12dB$ , ou seja, uma queda de  $4dB$ .

## 6 Conclusões

Ao finalizar a montagem e analisar as saídas, podemos concluir que o nosso projeto cumpre muito bem a parte de ganho, além disso, podemos concluir que apesar de atenuar o sinal de entrada na frequência de ressonância, o ganho previsto pela bibliografia utilizada. Isso pode ser explicado pela flutuação estatística dos valores dos dispositivos utilizados, como, por exemplo, os capacitores C1 e C2, foram testados e apresentaram uma capacitância de, respectivamente, 85 e 87 Farads.

Para melhorar os resultados obtidos o que pode ser feito é utilizar dispositivos novos que não tenham sido acometidos pela variabilidade no tempo, trimpots de precisão para alcançarmos valores de resistência iguais aos calculados.

Vale salientar que os erros experimentais foram calculados com apenas uma função amostra levando em consideração que sinais senoidais são WSS e ergódicos na média.