

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS - CCT
ELETRÔNICA APLICADA - EAP

THALIA GODINHO CAZARIN
LORENZO AUGUSTO RODRIGUES ALGAYER

FILTROS ATIVOS

JOINVILLE
2022

THALIA GODINHO CAZARIN
LORENZO AUGUSTO RODRIGUES ALGAYER

FILTROS ATIVOS

Relatório apresentado como requisito parcial
para aprovação na disciplina de Eletrônica Apli-
cada do curso de Engenharia Elétrica da Univer-
sidade do Estado de Santa Catarina.

Orientador: Sérgio Vidal Garcia Oliveira

JOINVILLE
2022

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Diagrama representando um filtro com entrada V_i e saída V_o	7
Figura 2 – Tipos de Filtros	9
Figura 3 – Topologia Filtro Passa Baixa 1ª Ordem	9
Figura 4 – Topologia Filtro Passa Alta 1ª Ordem	10
Figura 5 – Topologia Filtro Passa Banda 1ª Ordem	10
Figura 6 – Topologia Filtro Rejeita Banda 1ª Ordem	11
Figura 7 – Topologia Filtro Passa Baixa 2ª Ordem	12
Figura 8 – Topologia Filtro Passa Alta 2ª Ordem	13
Figura 9 – Topologia Filtro Passa Faixa 2ª Ordem	15
Figura 10 – Topologia Filtro Rejeita Faixa 2ª Ordem	16
Figura 11 – Passa Baixa 1ª Ordem	20
Figura 12 – Passa Baixa 1ª Ordem	21
Figura 13 – Passa Baixa 1ª Ordem	21
Figura 14 – Passa Baixa 1ª Ordem	22
Figura 15 – Passa Baixa 1ª Ordem	22
Figura 16 – Passa Alta 1ª Ordem	23
Figura 17 – Passa Alta 1ª Ordem	23
Figura 18 – Passa Alta 1ª Ordem	24
Figura 19 – Passa Alta 1ª Ordem	24
Figura 20 – Passa Banda 1ª Ordem	25
Figura 21 – Passa Banda 1ª Ordem	25
Figura 22 – Passa Banda 1ª Ordem	26
Figura 23 – Passa Banda 1ª Ordem	26
Figura 24 – Passa Banda 1ª Ordem	26
Figura 25 – Passa Banda 1ª Ordem	27
Figura 26 – Rejeita Faixa 1ª Ordem	27
Figura 27 – Rejeita Faixa 1ª Ordem	28
Figura 28 – Rejeita Faixa 1ª Ordem	28
Figura 29 – Rejeita Faixa 1ª Ordem	29
Figura 30 – Rejeita Faixa 1ª Ordem	29
Figura 31 – Rejeita Faixa 1ª Ordem	30
Figura 32 – Passa Baixa 2ª Ordem	30
Figura 33 – Passa Baixa 2ª Ordem	31
Figura 34 – Passa Baixa 2ª Ordem	31
Figura 35 – Passa Baixa 2ª Ordem	32
Figura 36 – Passa Baixa 2ª Ordem	32
Figura 37 – Passa Alta 2ª Ordem	33

Figura 38 – Passa Alta 2ª Ordem	33
Figura 39 – Passa Alta 2ª Ordem	34
Figura 40 – Passa Alta 2ª Ordem	34
Figura 41 – Passa Alta 2ª Ordem	35
Figura 42 – Passa Banda 2ª Ordem	35
Figura 43 – Passa Banda 2ª Ordem	36
Figura 44 – Passa Banda 2ª Ordem	36
Figura 45 – Passa Banda 2ª Ordem	37
Figura 46 – Rejeita Faixa 2ª Ordem	37
Figura 47 – Rejeita Faixa 2ª Ordem	38
Figura 48 – Passa Faixa 2ª Ordem	38
Figura 49 – Passa Faixa 2ª Ordem	39
Figura 50 – Reconstrução do sinal	40
Figura 51 – Reconstrução do sinal	40
Figura 52 – Reconstrução do sinal	41
Figura 53 – Reconstrução do sinal	41
Figura 54 – Reconstrução do sinal	41

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	6
2	TEORIA	7
2.1	TIPOS DE FILTROS	7
2.1.1	Filtros Passivos	7
2.1.2	Filtros Ativos	7
2.2	FILTROS QUANTO AO ESPECTRO DE PASSAGEM	8
2.2.1	Filtro Passa Baixa 1ª Ordem	8
2.2.2	Filtro Passa Alta 1ª Ordem	9
2.2.3	Filtro Passa Banda 1ª Ordem	10
2.2.4	Filtro Rejeita Banda 1ª Ordem	11
2.2.5	Filtro Passa Baixa 2ª Ordem	12
2.2.6	Filtro Passa Alta 2ª Ordem	13
2.2.7	Filtro Passa Faixa 2ª Ordem	15
2.2.8	Filtro Rejeita Faixa 2ª Ordem	15
3	PROJETO	17
3.1	FILTROS DE 1ª ORDEM	17
3.1.1	Passa Baixa	17
3.1.2	Passa Alta	17
3.2	FILTROS DE 2ª ORDEM	18
3.2.1	Passa Baixa	18
3.2.2	Passa Alta	18
3.2.3	Passa Baixa para PWM	18
4	RESULTADOS PRÁTICOS E SIMULADOS	20
4.1	FILTROS 1ª ORDEM	20
4.1.1	Passa Baixa	20
4.1.2	Passa Alta	23
4.1.3	Passa Banda	25
4.1.4	Rejeita Faixa	27
4.2	FILTROS 2ª ORDEM	30
4.2.1	Passa Baixa	30
4.2.2	Passa Alta	32
4.2.3	Passa Banda	35
4.2.4	Rejeita Faixa	37
4.3	SENOIDE RECONSTRUÍDA POR PWM	39
5	CONCLUSÃO	42

REFERÊNCIAS	43
--------------------	-----------

1 INTRODUÇÃO

Filtros são circuitos lineares projetados para deixar passar determinadas frequências e atenuar outras, são compostos em geral por resistores, capacitores e indutores. Filtros ativos têm, como elemento central, o amplificador operacional, que é combinado com elementos resistivos e capacitivos. É possível a implementação de filtros somente com elementos passivos, porém, com o amplificador, economiza-se no custo e tamanho dos componentes passivos, além do comportamento do filtro ser independente do circuito eletrônico acoplado à saída do filtro. Finalmente, o uso do amplificador possibilita uma amplificação do sinal na saída.

De modo geral, os filtros podem ser usados para extrair o conteúdo de informação fundamental de um sinal e então selecionar as frequências de interesse que compõe o sinal. Sua resposta em frequência é caracterizada por uma faixa de passagem, por uma faixa de rejeição, as quais estão separadas por uma faixa de transição.

Sinais com frequência dentro da faixa de passagem são recuperados com pouca ou nenhuma distorção, ao passo que aqueles sinais que têm frequências dentro da faixa de rejeição são efetivamente atenuados. Desta forma, os filtros podem ser do tipo passa baixas, passa altas, passa faixa ou rejeita faixa.

2 TEORIA

Os primeiros filtros construídos eram circuitos LC passivos. Estes filtros funcionam bem em altas frequências mas em baixas frequências (de DC a 100KHz) as bobinas são grandes, tem características não ideais e são impossíveis de fabricar em circuito integrado e pouco compatíveis a montagem de circuitos impressos modernos. Os filtros RC ativos utilizam amplificadores operacionais juntamente com resistores e capacitores e são fabricados na forma discreta.

2.1 TIPOS DE FILTROS

Filtros são circuitos eletrônicos desenvolvidos para permitir, ou não, a passagem de um sinal eletrônico dentro de um espectro de frequência pré-estabelecido pelo projetista. Ou seja, extrair sinais indesejáveis ao processamento, entre eles, os ruídos.

2.1.1 Filtros Passivos

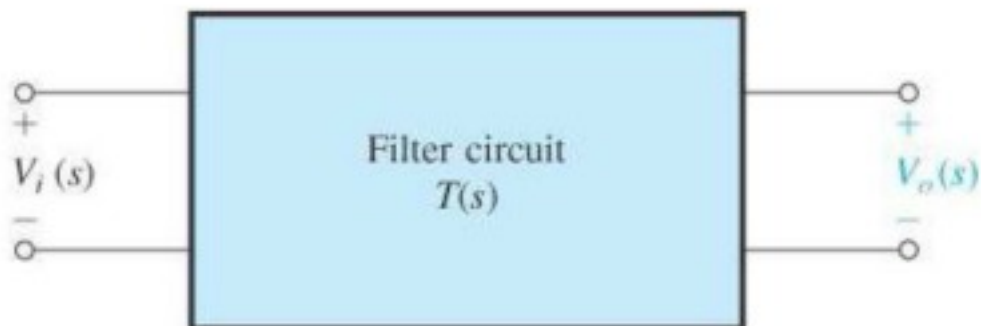
São filtros constituídos de elementos passivos, tais como: capacitores, resistores e indutores. Funcionam bem em altas frequências. Para baixas frequências (até 100KHz), bobinas volumosas, as quais não podem ser produzidas em circuitos integrados. Não apresentam ganho em potência e são relativamente difíceis de sintonizar.

2.1.2 Filtros Ativos

São filtros construídos a partir de elementos ativos, tais como: resistores, capacitores e amplificadores operacionais. São compatíveis com as técnicas de fabricação de CI's. São úteis para frequências abaixo de 1Mhz e possuem ganho em potência associado a uma facilidade de sintonizar.

A função de transferência do filtro é dada por:

Figura 1 – Diagrama representando um filtro com entrada V_i e saída V_o



Fonte: (VINCENCE,)

$$T(j\omega) = \frac{V_o(j\omega)}{V_i(j\omega)} \quad (1)$$

Representando a equação (1) em termos de módulo e fase, teremos:

$$T(j\omega) = \left| \frac{V_o(j\omega)}{V_i(j\omega)} \right| e^{j\phi(\omega)} \quad (2)$$

A amplitude da transmissão geralmente é expressa em decibéis.

A função ganho se dá por:

$$G(\omega) = 20 \log |T(j\omega)| \quad (3)$$

Já a função atenuação é dada por:

$$G(\omega) = -20 \log |T(j\omega)| \quad (4)$$

2.2 FILTROS QUANTO AO ESPECTRO DE PASSAGEM

2.2.1 Filtro Passa Baixa 1ª Ordem

Equacionando o nó 1 e aplicando Laplace, teremos:

$$\frac{V_i - V_o}{R} = \frac{V_o - 0}{\frac{1}{sC}} \quad (5)$$

$$\frac{V_i}{sC} - \frac{V_o}{sC} = V_o R \quad (6)$$

$$V_o \left(R + \frac{1}{sC} \right) = \frac{V_i}{sC} \Rightarrow V_o \left(\frac{sRC + 1}{sC} \right) = \frac{V_i}{sC} \Rightarrow V_o (sRC + 1) = V_i \Rightarrow V_o = \frac{V_i}{sRC + 1} \quad (7)$$

Logo, a função de transferência será:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{sRC + 1} \quad (8)$$

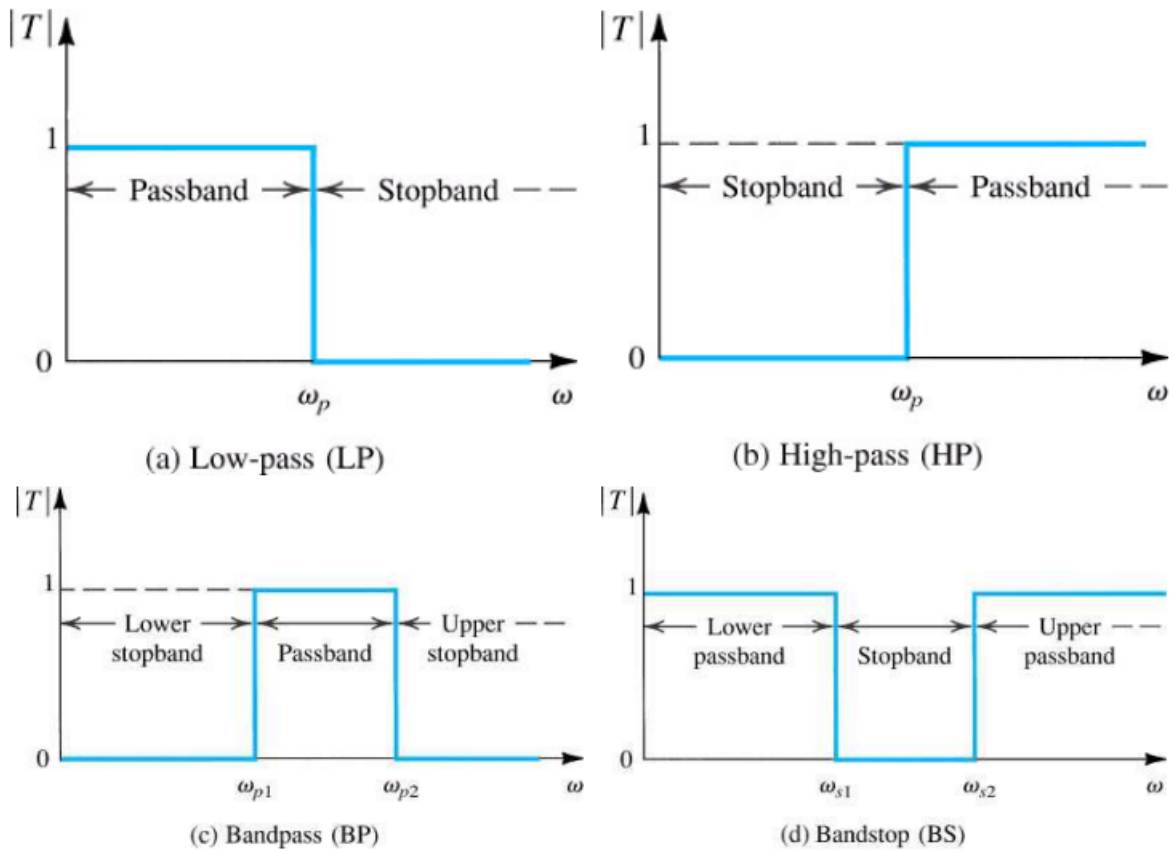
Assim, teremos:

$$R_{max} = \frac{0,1 \times V_{BE}}{I_{Bmax}} \quad (9)$$

Sabemos que $s = j\omega = j2\pi f$, logo:

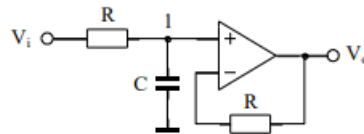
$$C = \frac{1}{2\pi f_c R} \quad (10)$$

Figura 2 – Tipos de Filtros



Fonte: (CEE, 2019)

Figura 3 – Topologia Filtro Passa Baixa 1ª Ordem



Fonte: (BERNARDO, a)

2.2.2 Filtro Passa Alta 1ª Ordem

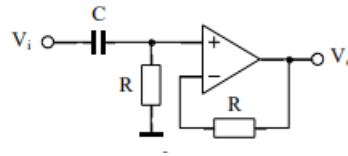
Equacionando o nó 1 e aplicando Laplace, teremos:

$$\frac{V_i - V_o}{\frac{1}{sC}} = \frac{V_o - 0}{R} \quad (11)$$

$$V_i R - V_o R = \frac{V_o}{sC} \quad (12)$$

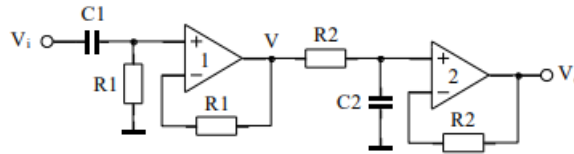
$$V_o \left(R + \frac{1}{sC} \right) = V_i R \Rightarrow V_o \left(\frac{sRC + 1}{sC} \right) = V_i R \Rightarrow V_o = V_i \frac{sRC}{sRC + 1} \quad (13)$$

Figura 4 – Topologia Filtro Passa Alta 1ª Ordem



Fonte: (BERNARDO, a)

Figura 5 – Topologia Filtro Passa Banda 1ª Ordem



Fonte: (BERNARDO, a)

Logo, a função de transferência será:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{sRC}{sRC + 1} \quad (14)$$

As equações (9) e (10) também se aplicam ao filtro passa alta.

2.2.3 Filtro Passa Banda 1ª Ordem

Acima, já foi equacionado os filtros passa baixa e passa alta, assim para o Passa faixa, serão feitas associações, da forma:

$$V = \frac{V_i s R_1 C_1}{s R_1 C_1 + 1} \quad (15)$$

$$V_o = \frac{V}{s R_2 C_2 + 1} \quad (16)$$

Substituindo V em V_o :

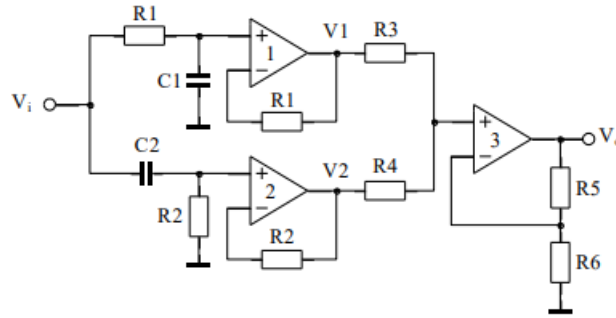
$$V_o = \frac{V_i s R_1 C_1}{s R_1 C_1 + 1} \times \frac{V}{s R_2 C_2 + 1} \Rightarrow V_o = \frac{V_i s R_1 C_1}{s^2 R_1 R_2 C_1 C_2 + s(R_1 C_1 + R_2 C_2) + 1} \quad (17)$$

Logo, a função de transferência será:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{s R_1 C_1}{s^2 R_1 R_2 C_1 C_2 + s(R_1 C_1 + R_2 C_2) + 1} \quad (18)$$

Assim, teremos:

Figura 6 – Topologia Filtro Rejeita Banda 1ª Ordem



Fonte: (BERNARDO, a)

$$R_{1max} = \frac{0,1 \times V_{BE}}{I_{Bmax}} \quad (19)$$

$$C_1 = \frac{1}{2\pi f_{c1} R_1} \quad (20)$$

$$R_{2max} = \frac{0,1 \times V_{BE}}{I_{Bmax}} \quad (21)$$

$$C_2 = \frac{1}{2\pi f_{c2} R_2} \quad (22)$$

2.2.4 Filtro Rejeita Banda 1ª Ordem

Acima, já foi equacionado os filtros passa baixa e passa alta, assim para o Passa faixa, serão feitas associações, da forma:

$$V_1 = \frac{V_i}{sR_1C_1 + 1} \quad (23)$$

$$V_2 = \frac{V_i s R_2 C_2}{sR_2C_2 + 1} \quad (24)$$

Se $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$, então:

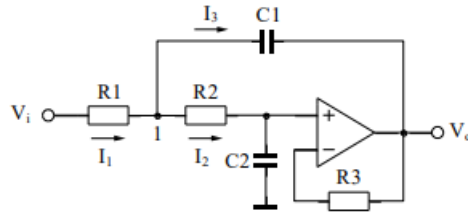
$$V_o = V_1 + V_2 = \frac{V_i}{sR_1C_1 + 1} + \frac{V_i s R_2 C_2}{sR_2C_2 + 1} = \frac{V_i (sR_2C_2 + 1) + (V_i s R_2 C_2)(sR_1C_1 + 1)}{(sR_1C_1 + 1)(sR_2C_2 + 1)} \quad (25)$$

Logo, a função de transferência será:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{s^2 R_1 R_2 C_1 C_2 + 2s R_2 C_2 + 1}{s^2 R_1 R_2 C_1 C_2 + s(R_1 C_1 + R_2 C_2) + 1} \quad (26)$$

As equações (19), (20), (21) e (22) do filtro Passa Banda também se aplicam ao filtro Rejeita Faixa.

Figura 7 – Topologia Filtro Passa Baixa 2ª Ordem



Fonte: (BERNARDO, b)

2.2.5 Filtro Passa Baixa 2ª Ordem

Equacionando o nó 1, temos que:

$$I_1 = I_2 + I_3 \quad (27)$$

$$V_0 = \frac{I_2}{sC_2} \Rightarrow I_2 = sC_2 V_0 \quad (28)$$

$$\frac{I_3}{sC_1} - I_2 R_2 = 0 \Rightarrow I_3 = sR_2 C_1 sC_2 V_0 = s^2 R_2 C_1 C_2 V_0 \quad (29)$$

Substituindo as equações (28) e (29) em (27):

$$I_1 = V_0 (sC_2 + s^2 R_2 C_1 C_2) \quad (30)$$

Pela Lei das Malhas:

$$-V_i + R_1 I_1 + \frac{I_3}{sC_1} + V_0 = 0 \Rightarrow V_i = R_1 I_1 + \frac{I_3}{sC_1} + V_0 \quad (31)$$

Substituindo I_1 e I_3 na equação (31), teremos:

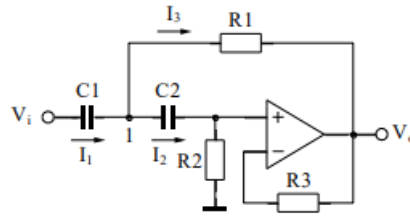
$$V_i = R_1 (sC_2 V_0 + s^2 R_2 C_1 C_2 V_0) + \frac{s^2 R_2 C_1 C_2 V_0}{sC_1} + V_0 \quad (32)$$

Logo, a função de transferência será:

$$\frac{V_0}{V_i} = \frac{1}{s^2 R_1 R_2 C_1 C_2 + sC_2 (R_1 + R_2) + 1} \quad (33)$$

Ainda, teremos:

Figura 8 – Topologia Filtro Passa Alta 2ª Ordem



Fonte: (BERNARDO, b)

$$\xi = \frac{(R_1 + R_2)}{2} \sqrt{\frac{C_2}{C_1 R_1 R_2}} \quad (34)$$

Para o projeto, podemos fazer:

$$R_{3max} = \frac{0,1 \times V_{BE}}{I_{BMAX}} \quad (35)$$

Quando $R_1 = R_2$, $R_3 = R_1 + R_2$. Assim:

$$C_1 = \frac{1}{\xi \omega_n R_1} \quad (36)$$

$$\xi = \sqrt{\frac{C_2}{C_1}} \quad (37)$$

$$C_2 = \xi^2 C_1 \quad (38)$$

2.2.6 Filtro Passa Alta 2ª Ordem

Equacionando o nó 1 e aplicando Laplace, teremos:

$$I_1 = I_2 + I_3 \quad (39)$$

$$V_0 = I_2 R_2 \Rightarrow I_2 = \frac{V_0}{R_2} \quad (40)$$

$$I_3 R_1 - \frac{I_2}{s C_2} = 0 \Rightarrow I_3 = \frac{V_0}{s R_1 R_2 C_2} \quad (41)$$

Substituindo (40) e (41) em (39):

$$I_1 = V_0 \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{sR_1R_2C_2} \right) \quad (42)$$

Pela Lei das Malhas:

$$-V_i + \frac{I_1}{sC_1} + I_3R_1 + V_0 = 0 \Rightarrow V_i = \frac{I_1}{sC_1} + I_3R_1 + V_0 \quad (43)$$

Substituindo I_1 e I_3 na equação (43), teremos:

$$V_i = \frac{V_0}{sR_2C_1} + \frac{V_0}{s^2R_1R_2C_1C_2} + \frac{V_0}{sR_2C_2} + V_0 \quad (44)$$

A função de transferência então será:

$$\frac{V_0}{V_i} = \frac{s^2R_1R_2C_1C_2}{s^2R_1R_2C_1C_2 + sR_1(C_1 + C_2) + 1} \quad (45)$$

Ainda, teremos:

$$\xi = \frac{(C_1 + C_2)}{2} \sqrt{\frac{R_1}{R_2C_1C_2}} \quad (46)$$

Para o projeto, podemos fazer:

$$R_{3max} = \frac{0,1 \times V_{BE}}{I_{BMAX}} \quad (47)$$

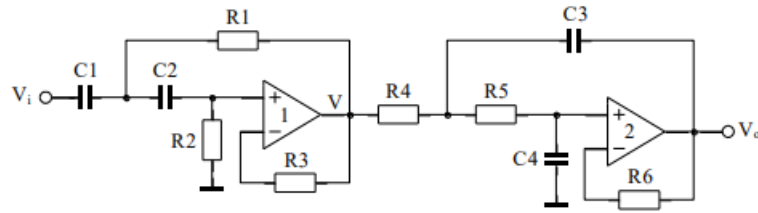
Assim, $R_2 = R_3$ e quando $C_1 = C_2$, teremos:

$$\xi = \sqrt{\frac{R_1}{R_2}} \quad (48)$$

$$R_1 = \xi^2 R_2 \quad (49)$$

$$C_1 = C_2 = \frac{1}{\xi \omega_n R_2} \quad (50)$$

Figura 9 – Topologia Filtro Passa Faixa 2ª Ordem



Fonte: (BERNARDO, b)

2.2.7 Filtro Passa Faixa 2ª Ordem

Acima, já foi equacionado os filtros passa baixa e passa alta, assim para o Passa faixa, serão feitas associações, da forma:

$$V = \frac{V_i s^2 R_1 R_2 C_1 C_2}{s^2 R_1 R_2 C_1 C_2 + s R_1 (C_1 + C_2) + 1} \quad (51)$$

$$V_0 = \frac{V}{s^2 R_4 R_5 C_3 C_4 + s C_4 (R_4 + R_5) + 1} \quad (52)$$

Para a seção do passa alta as equações (47), (48), (49) e (50), são válidas.

Para a seção do passa baixa, teremos:

$$R_{6max} = \frac{0,1 \times V_{BE}}{I_{BMAX}} \quad (53)$$

Nesse caso, $R_4 = R_5$, $R_6 = R_4 + R_5$. Assim:

$$C_3 = \frac{1}{\xi \omega_n R_4} \quad (54)$$

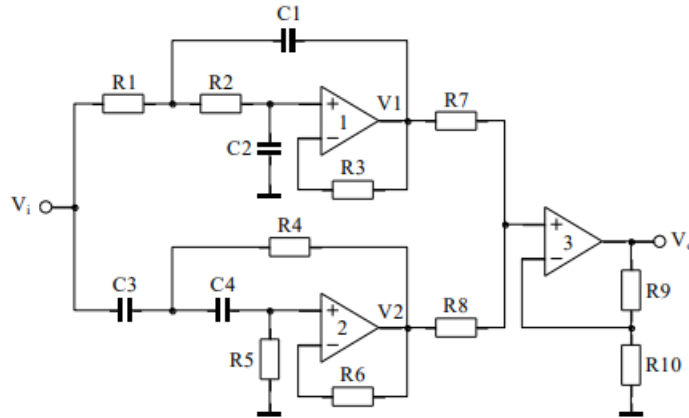
$$C_4 = \xi^2 C_3 \quad (55)$$

$$\xi = \sqrt{\frac{C_4}{C_3}} \quad (56)$$

2.2.8 Filtro Rejeita Faixa 2ª Ordem

Acima, já foi equacionado os filtros passa baixa e passa alta, assim para o Passa faixa, serão feitas associações, da forma:

Figura 10 – Topologia Filtro Rejeita Faixa 2ª Ordem



Fonte: (BERNARDO, b)

$$V_1 = \frac{V_i}{s^2 R_1 R_2 C_1 C_2 + s C_2 (R_1 + R_2) + 1} \quad (57)$$

$$V_2 = \frac{V_i s^2 R_4 R_5 C_3 C_4}{s^2 R_4 R_5 C_3 C_4 + s R_4 (C_3 + C_4) + 1} \quad (58)$$

Se $R_7 = R_8 = R_9 = R_{10} = R$, então:

$$V_0 = V_1 + V_2 = \frac{V_i}{s^2 R_1 R_2 C_1 C_2 + s C_2 (R_1 + R_2) + 1} + \frac{V_i s^2 R_4 R_5 C_3 C_4}{s^2 R_4 R_5 C_3 C_4 + s R_4 (C_3 + C_4) + 1} \quad (59)$$

Para a seção do passa baixa, as equações (35), (36), (37) e (38) são válidas.

Para a seção do passa alta teremos:

$$R_{6max} = \frac{0,1 \times V_{BE}}{I_{BMAX}} \quad (60)$$

Nesse caso, $R_5 = R_6$. Assim:

$$R_4 = \xi^2 R_5 \quad (61)$$

$$\xi = \sqrt{\frac{R_4}{R_5}} \quad (62)$$

$$C_3 = C_4 = \frac{1}{\xi \omega_n R_5} \quad (63)$$

3 PROJETO

3.1 FILTROS DE 1ª ORDEM

3.1.1 Passa Baixa

Para $f_c = 125Hz$, fez-se:

$$R_{max} = \frac{0,1 \times 0,7}{200p} = 350M\Omega \quad (64)$$

Escolhendo $R = 100K\Omega$, teremos:

$$C = \frac{1}{2\pi f_c R} = 12,73nF \quad (65)$$

Escolhendo $C = 12nF$ e recalculando R , teremos:

$$R = \frac{1}{2\pi f_c C} = 103,10K\Omega \quad (66)$$

Mantendo $R = 100K\Omega$ e recalculando f_c , teremos:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} = 132,63Hz \quad (67)$$

Um resultado bem próximo do que gostaríamos.

3.1.2 Passa Alta

Para $f_c = 12,5KHz$ e $max = 350M\Omega$, escolheu-se $R = 82K\Omega$. Calculando C :

$$C = \frac{1}{2\pi f_c R} = 155,3pF \quad (68)$$

Escolhendo $C = 150pF$ e recalculando f_c , teremos:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} = 12,9kHz \quad (69)$$

Um resultado bem próximo do que gostaríamos.

Para o filtro passa faixa, inverteu-se os componentes dos filtros passa baixa e passa alta pois precisávamos que a frequência do passa alta fosse menor que a do passa baixa.

Para o filtro rejeita faixa, fez-se a configuração inicial dos filtros (frequência do passa baixa menor que a do passa alta) e utilizou-se $R_5 = R_6 = R_3 = R_4 = 18K\Omega$.

3.2 FILTROS DE 2ª ORDEM

3.2.1 Passa Baixa

Para $f_c = 125Hz$ e $R_{max} = 350M\Omega$, escolheu-se $R_3 = 100K\Omega$. Assim, conforme já discutido, $R_1 = R_2 = 47K\Omega$. Considerou-se $\xi = 0,707$ (Butterworth).

Logo, para C_1 :

$$C_1 = \frac{1}{\xi 2\pi f_c R_1} = 31,32nF \quad (70)$$

Escolhendo $C_1 = 39nF$, teremos $C_2 = 19,49nF$, escolhemos então $C_2 = 18nF$.

Recalculando f_c , chegamos em $f_c = 12780Hz$, bem próximo do requisito do projeto.

Recalculando ξ com os valores dos capacitores reais, obtemos $\xi = 0,679$ e o ganho na frequência de corte de $-2,66dB$.

3.2.2 Passa Alta

Para $f_c = 12,5KHz$ e $max = 350M\Omega$, escolheu-se $R_3 = R_2 = 18K\Omega$, assim teremos $R_1 = 8,99K\Omega$ e para tal optou-se por utilizar dois resistores em série, de $8,2K\Omega$ e 820Ω , totalizando $R_1 = 9,020K\Omega$. Calculando ξ :

$$\xi = \sqrt{\frac{9020}{18}} = 0,707 \quad (71)$$

Calculando agora os capacitores, obtemos $C_1 = C_2 = 1nF$.

Recalculando a frequência obtivemos $f_c = 12,504KHz$, muito próximo do requisito de projeto.

Para o filtro passa faixa, inverteu-se os componentes dos filtros passa baixa e passa alta pois precisávamos que a frequência do passa alta fosse menor que a do passa baixa.

Para o filtro rejeita faixa, fez-se a configuração inicial dos filtros (frequência do passa baixa menor que a do passa alta) e utilizou-se $R_7 = R_8 = R_9 = R_{10} = R = 18K\Omega$.

3.2.3 Passa Baixa para PWM

Há algumas semanas, utilizamos uma topologia de Oscilador de Relaxação para gerar um sinal senoidal. Este sinal era passado em um integrador e obtínhamos uma forma de onda triangular.

Em paralelo, utilizamos a topologia de um Oscilador Ponte de Wien com frequência de $130Hz$.

Posteriormente, comparou-se esses dois sinais (saída do integrador e ponte de Wien) e obteve-se um modulador por largura de pulso (PWM).

Agora, propôs-se filtrar através de um passa baixa esse sinal PWM afim de obter-se o final senoidal inicial de $130Hz$.

Para isso, precisávamos de um filtro passa baixa com f_c dez vezes maior que a frequência da senóide, de modo a garantir que o sinal fosse filtrado.

Assim, reprojeteu-se um passa baixa, agora com $f_c = 1,25KHz$.

Escolheu-se $R_{23} = 100K\Omega$ e então $R_1 = R_2 = 47K\Omega$.

Calculando o capacitor, obtivemos $C_1 = 3,83nF$. Escolhendo então uma capacitância de $3,9nF$.

Assim, $C_2 = 1,94nF$ obtendo-se então por $C_2 = 1,8nF$.

Recalculando f_c com os componentes escolhidos comercialmente, obtivemos $f_c = 1278,067Hz$.

4 RESULTADOS PRÁTICOS E SIMULADOS

Os resultados obtidos em laboratório representam o circuito em funcionamento prático, ou seja, sujeito a imperfeições de ruídos internos e externos e níveis de tensão, corrente e frequência podendo diferir da teoria e da simulação. Vale ressaltar também que foram gravados vídeos referentes ao *AC Sweep* da fonte de tensão da entrada para visualizar o comportamento de cada um dos filtros, tais vídeos podem ser acessados no link abaixo: <https://drive.google.com/drive/folders/1nW7FpQV9sauaAWk-TZcq2ck43GET9oX>.

4.1 FILTROS 1ª ORDEM

4.1.1 Passa Baixa

Com os requisitos de projeto, obteve-se o seguinte sinal:

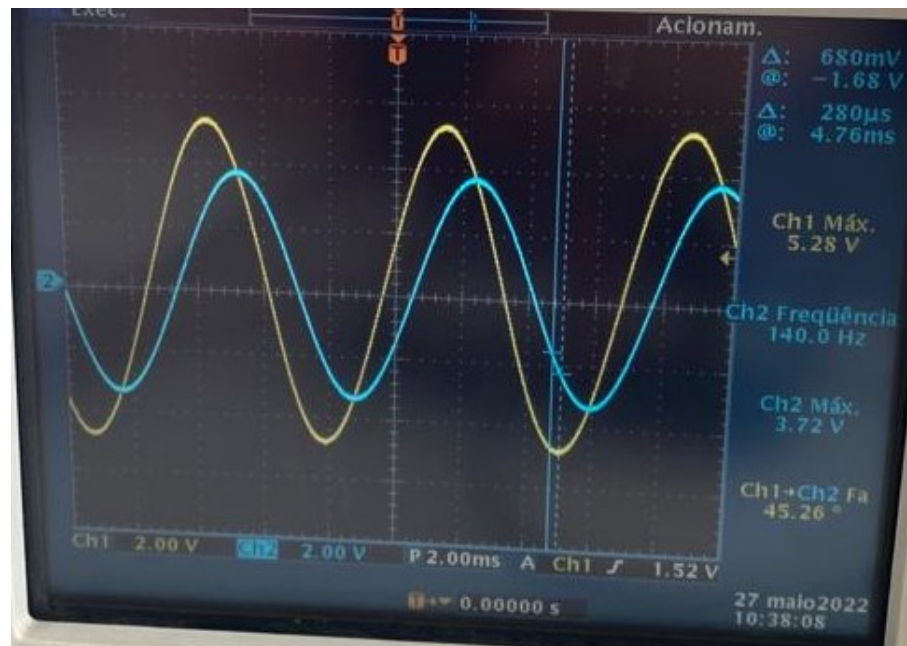


Figura 11 – Passa Baixa 1ª Ordem

Fonte: Próprio autor.

Nota-se nas figuras práticas que o valor de frequência em que ocorre a atenuação de -3dB, isto é, quando o módulo do sinal de saída atinge cerca de 70,7% do valor do sinal de entrada. Portanto, a frequência de corte do filtro passa-baixas é de 140Hz. Nestas figuras o canal 1 é a entrada ao passo que o canal 2 é a saída do filtro.

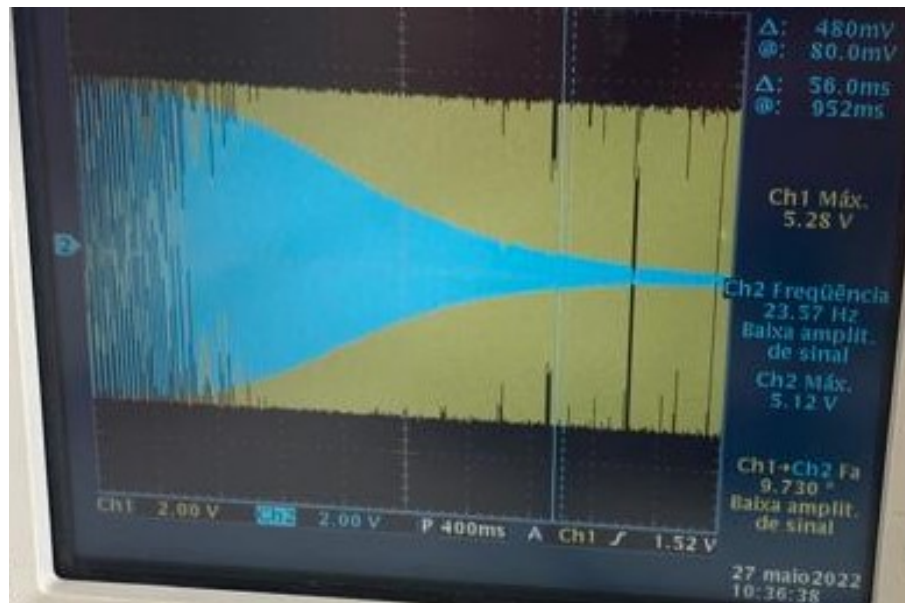


Figura 12 – Passa Baixa 1ª Ordem

Fonte: Próprio autor.

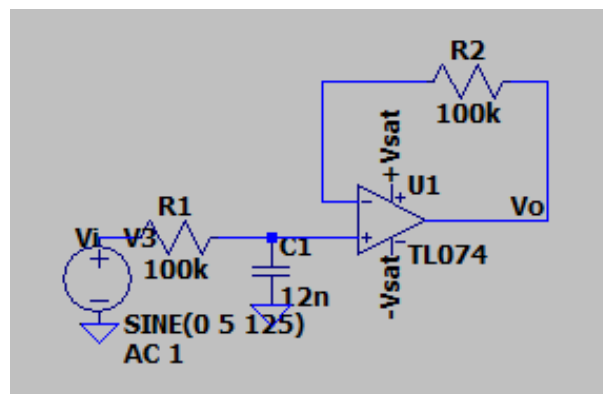


Figura 13 – Passa Baixa 1ª Ordem

Fonte: Próprio autor.

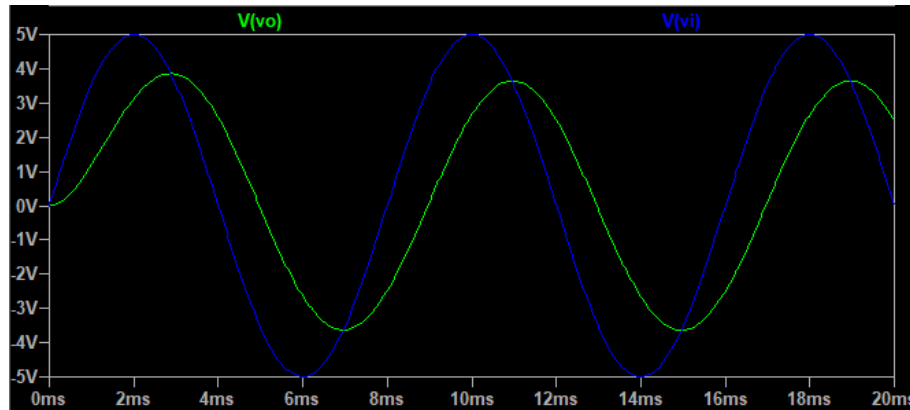


Figura 14 – Passa Baixa 1ª Ordem

Fonte: Próprio autor.

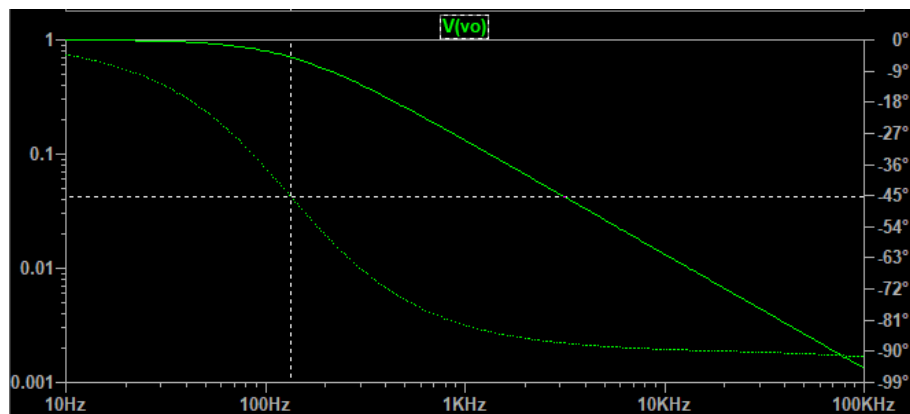


Figura 15 – Passa Baixa 1ª Ordem

Fonte: Próprio autor.

Com base nas figuras simuladas é possível notar que para uma frequência de cerca de 134Hz ocorre a atenuação de 3dB, sendo um valor bastante próximo do alcançado via prática.

4.1.2 Passa Alta

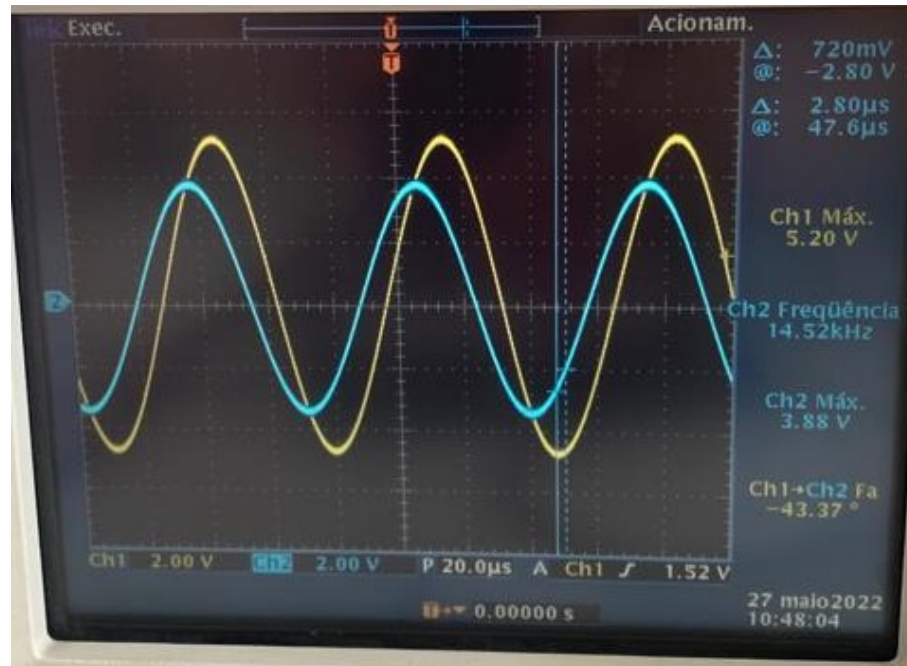


Figura 16 – Passa Alta 1ª Ordem

Fonte: Próprio autor.

Nota-se na figura prática que o valor da frequência de corte é de 14,52kHz, isto é, quando o módulo do sinal de saída atinge cerca de 70,7% do valor do sinal de entrada. Nesta figura o canal 1 é a entrada ao passo que o canal 2 é a saída do filtro.

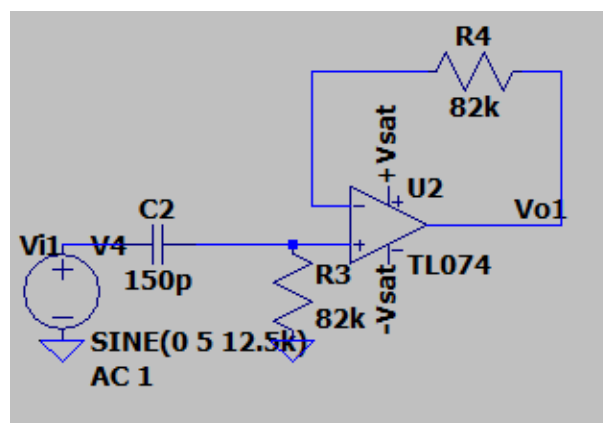


Figura 17 – Passa Alta 1ª Ordem

Fonte: Próprio autor.

Com base nas figuras simuladas é possível notar que para uma frequência de cerca de 13,05kHz ocorre a atenuação de 3dB, sendo um valor bastante próximo do alcançado via prática.

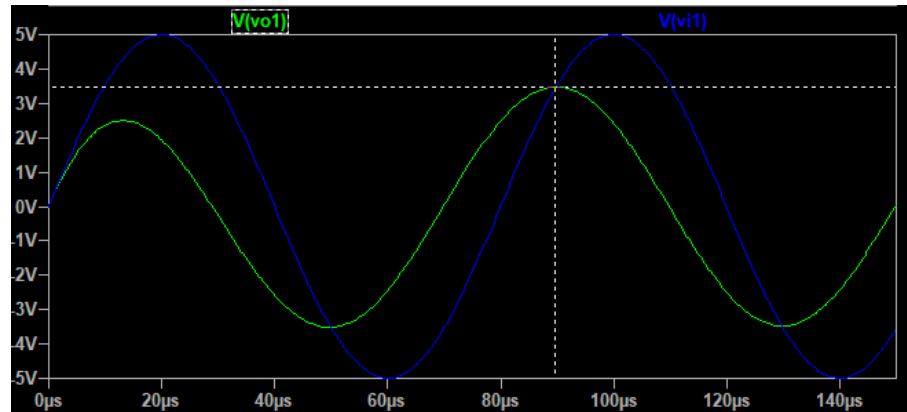


Figura 18 – Passa Alta 1ª Ordem

Fonte: Próprio autor.

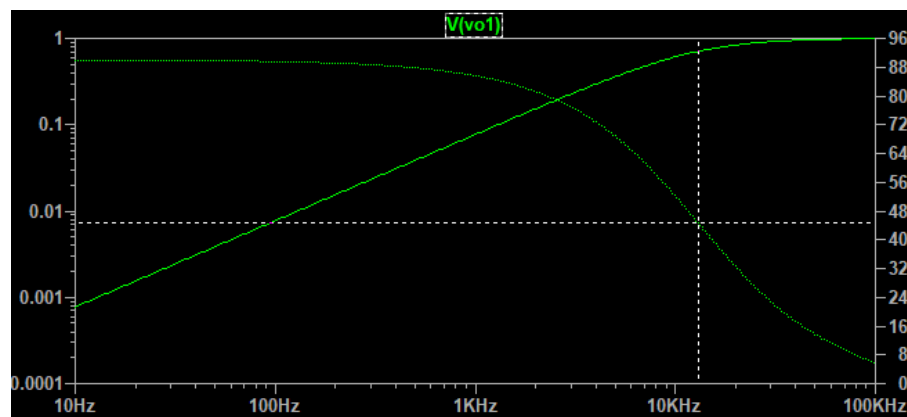


Figura 19 – Passa Alta 1ª Ordem

Fonte: Próprio autor.

4.1.3 Passa Banda

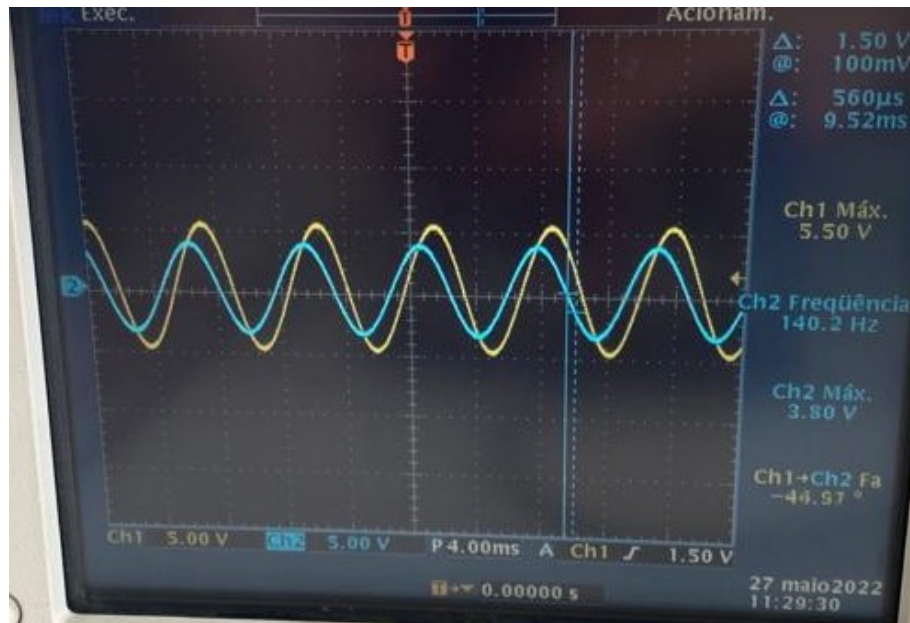


Figura 20 – Passa Banda 1ª Ordem

Fonte: Próprio autor.

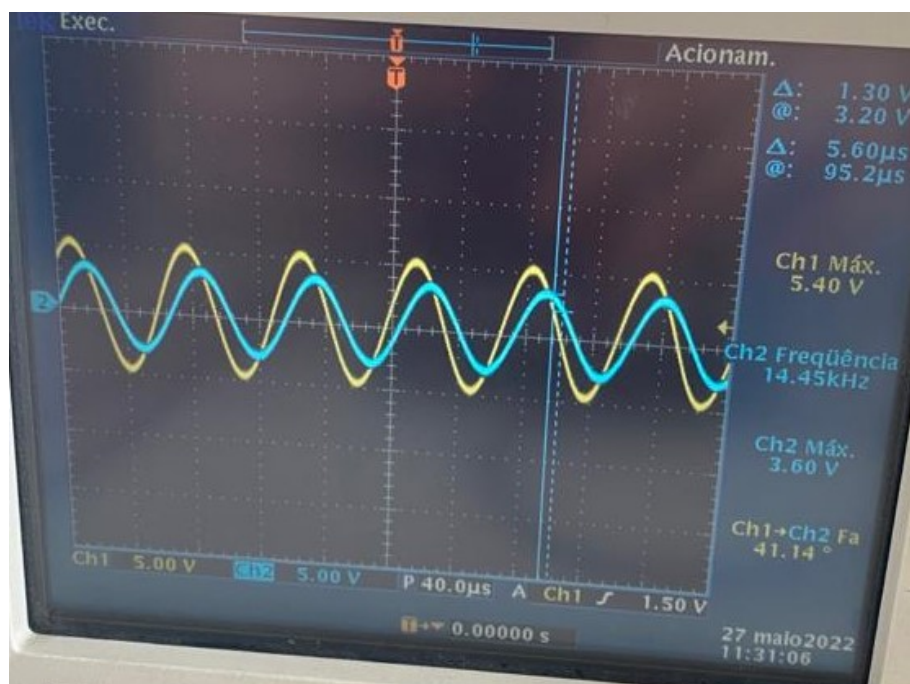


Figura 21 – Passa Banda 1ª Ordem

Fonte: Próprio autor.

Nota-se nas figuras práticas que o valor das frequências de corte são praticamente as mesmas vistas anteriormente para o passa baixa e para o passa alta (140Hz e 14,52KHz), exatamente o esperado em teoria, uma vez que um filtro passa banda nada mais é do que um

filtro passa baixa e um filtro passa alta acoplados. Nestas figuras o canal 1 é a entrada ao passo que o canal 2 é a saída do filtro.

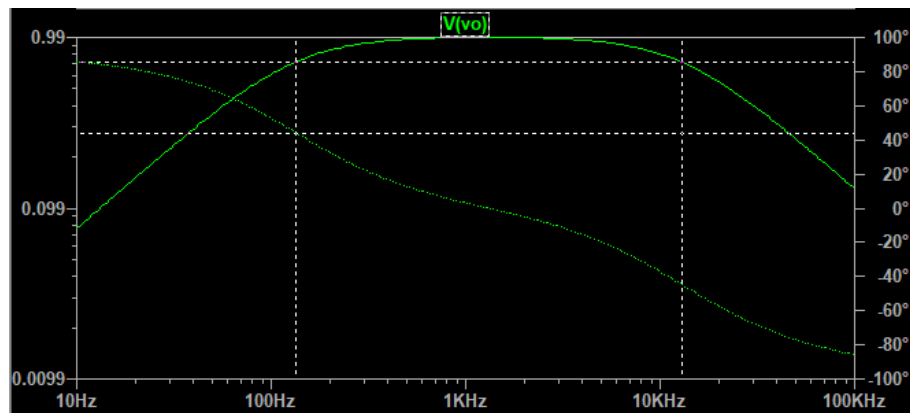


Figura 22 – Passa Banda 1ª Ordem

Fonte: Próprio autor.

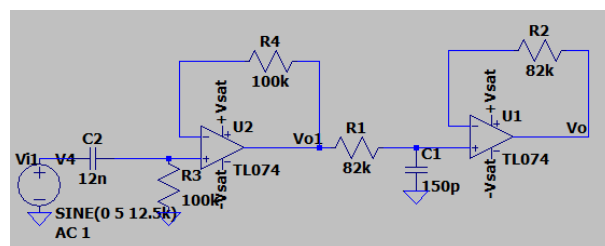


Figura 23 – Passa Banda 1ª Ordem

Fonte: Próprio autor.

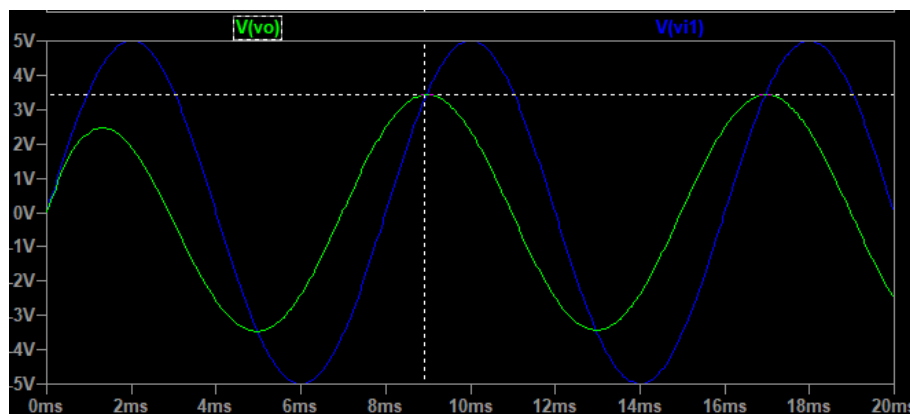


Figura 24 – Passa Banda 1ª Ordem

Fonte: Próprio autor.

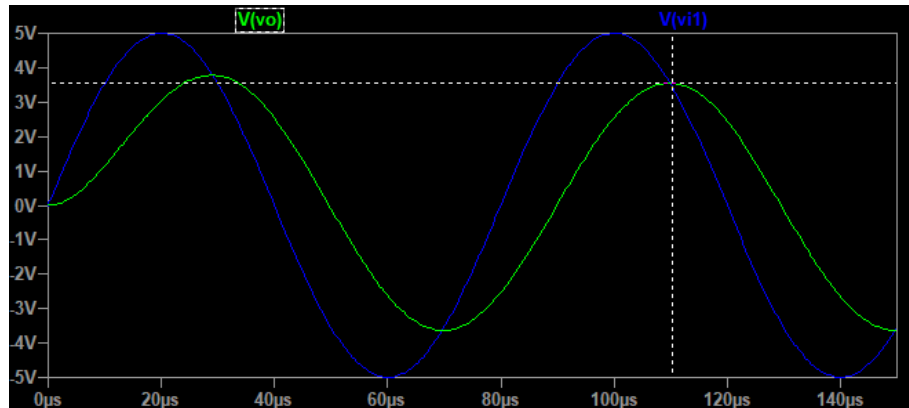


Figura 25 – Passa Banda 1ª Ordem

Fonte: Próprio autor.

Com base nas figuras simuladas é possível notar que as frequências de corte superior e inferior são as mesmas encontradas para os filtros passa baixa e passa alta (134Hz e 13,05kHz).

4.1.4 Rejeita Faixa

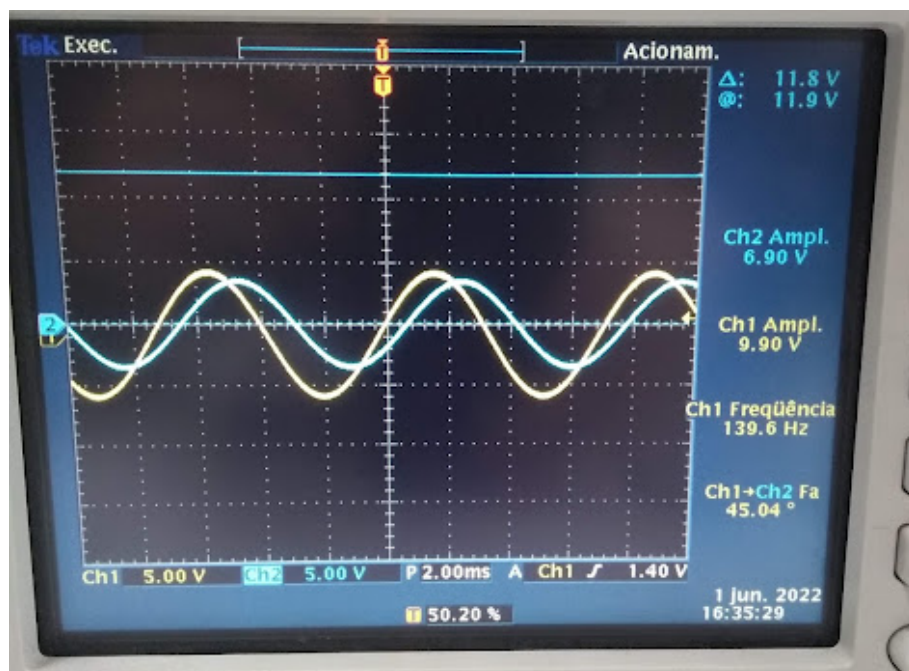


Figura 26 – Rejeita Faixa 1ª Ordem

Fonte: Próprio autor.

Nota-se nas figuras práticas que o valor das frequências de corte inferior e superior são praticamente as mesmas vistas anteriormente para o passa alta e para o passa baixa, isto é, cerca de 14,52kHz e cerca de 140Hz, exatamente como o esperado em teoria. Nestas figuras o canal 1 é a entrada ao passo que o canal 2 é a saída do filtro.

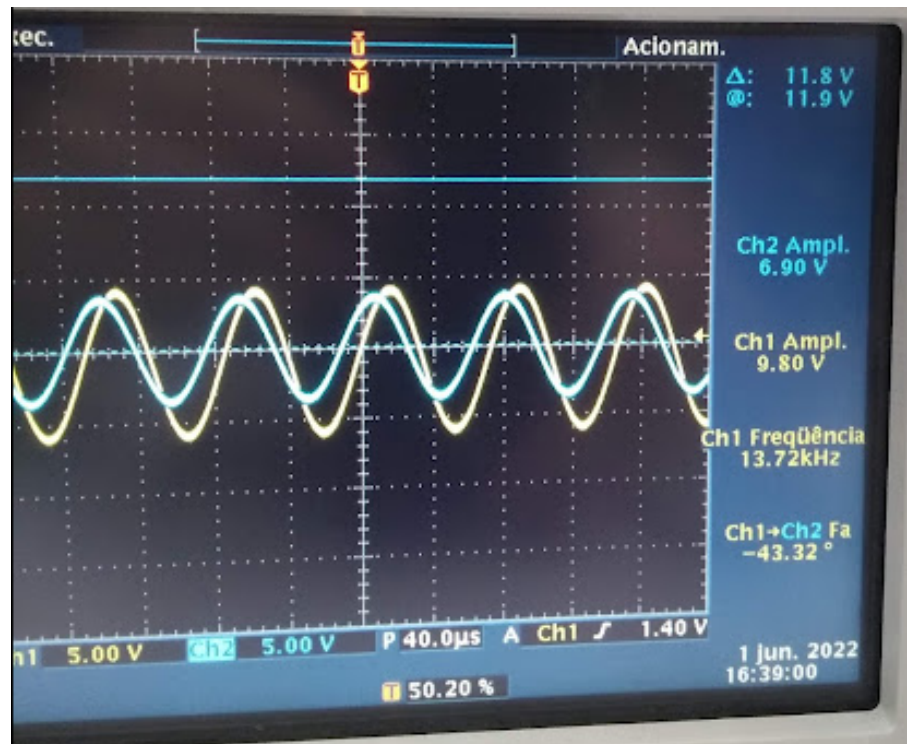


Figura 27 – Rejeita Faixa 1ª Ordem

Fonte: Próprio autor.

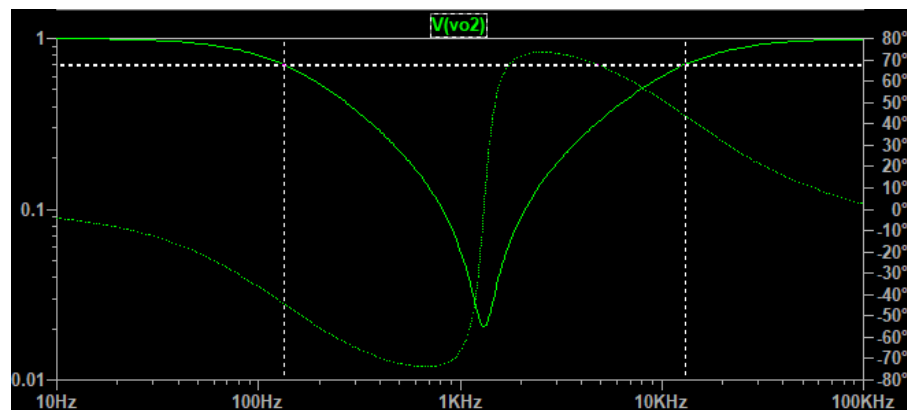


Figura 28 – Rejeita Faixa 1ª Ordem

Fonte: Próprio autor.

Com base nas figuras simuladas é possível notar que as frequências de corte superior e inferior são as mesmas encontradas para os filtros passa alta e passa baixa (13,05kHz e 134Hz).

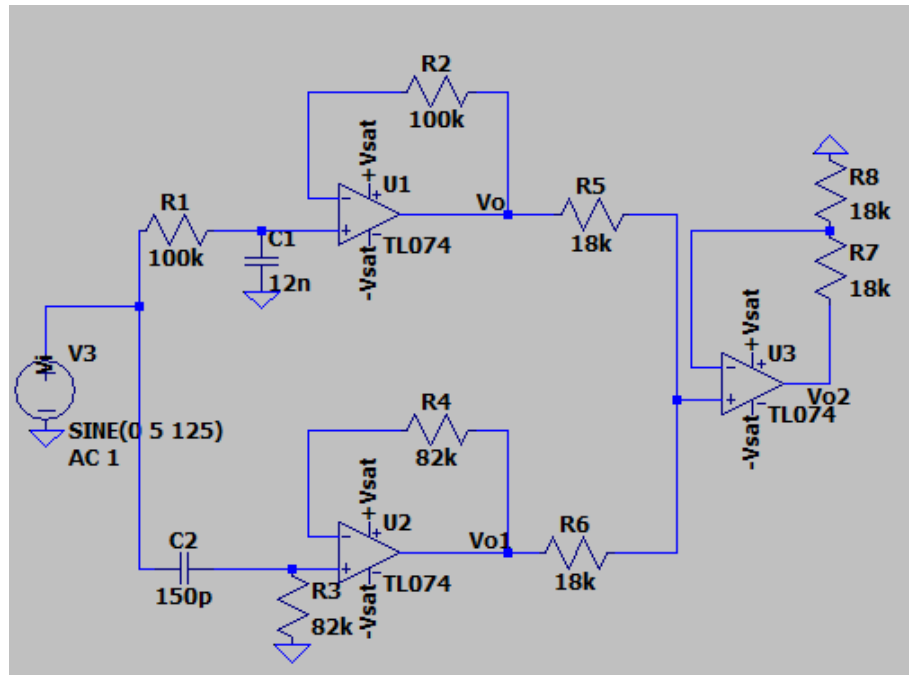


Figura 29 – Rejeita Faixa 1ª Ordem

Fonte: Próprio autor.

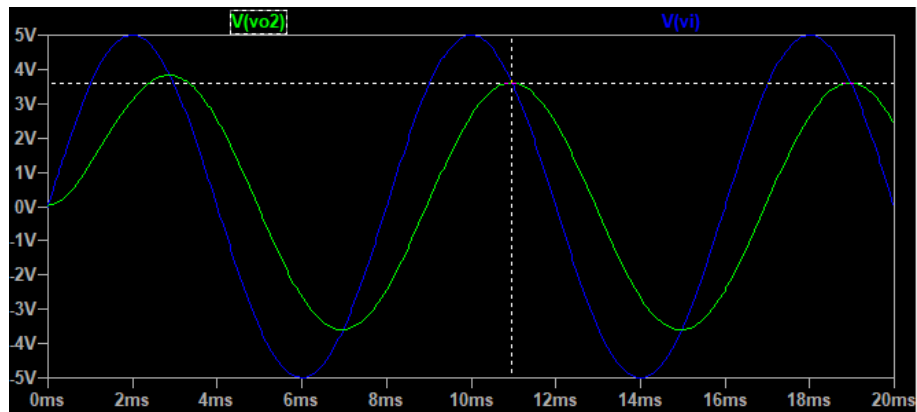


Figura 30 – Rejeita Faixa 1ª Ordem

Fonte: Próprio autor.

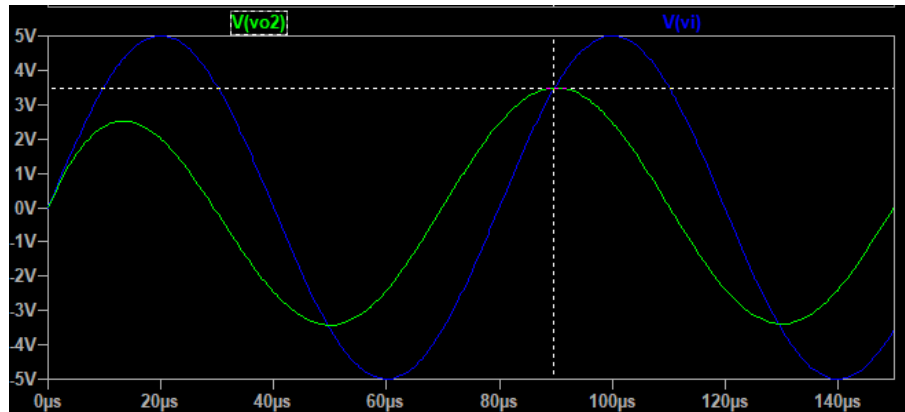


Figura 31 – Rejeita Faixa 1ª Ordem

Fonte: Próprio autor.

4.2 FILTROS 2ª ORDEM

Com os requisitos de projeto, obteve-se o seguinte sinal:

4.2.1 Passa Baixa

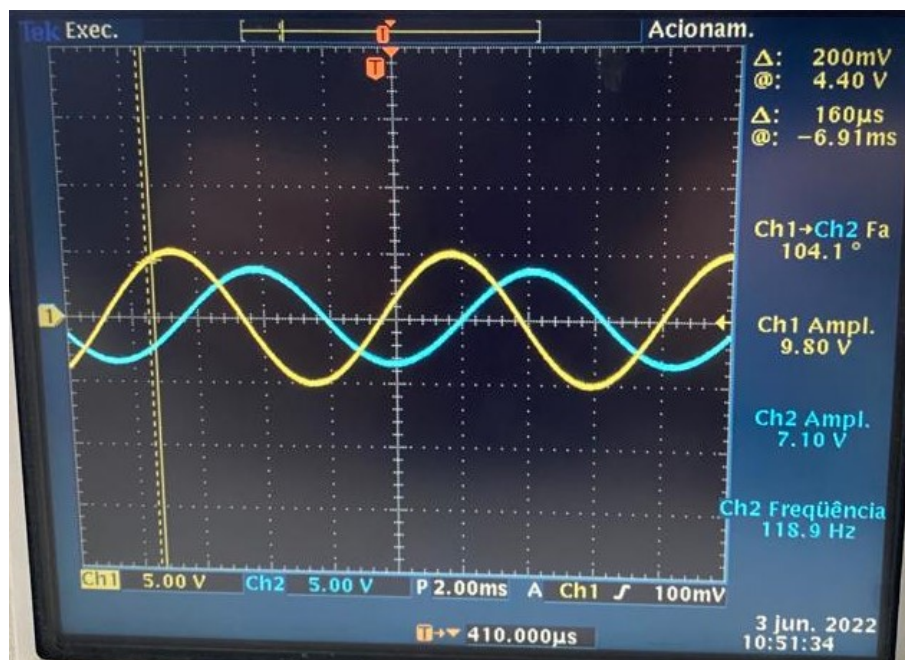


Figura 32 – Passa Baixa 2ª Ordem

Fonte: Próprio autor.

Nota-se nas figuras práticas que o valor da frequência de corte é de 118,9Hz. Nestas figuras o canal 1 é a entrada ao passo que o canal 2 é a saída do filtro.

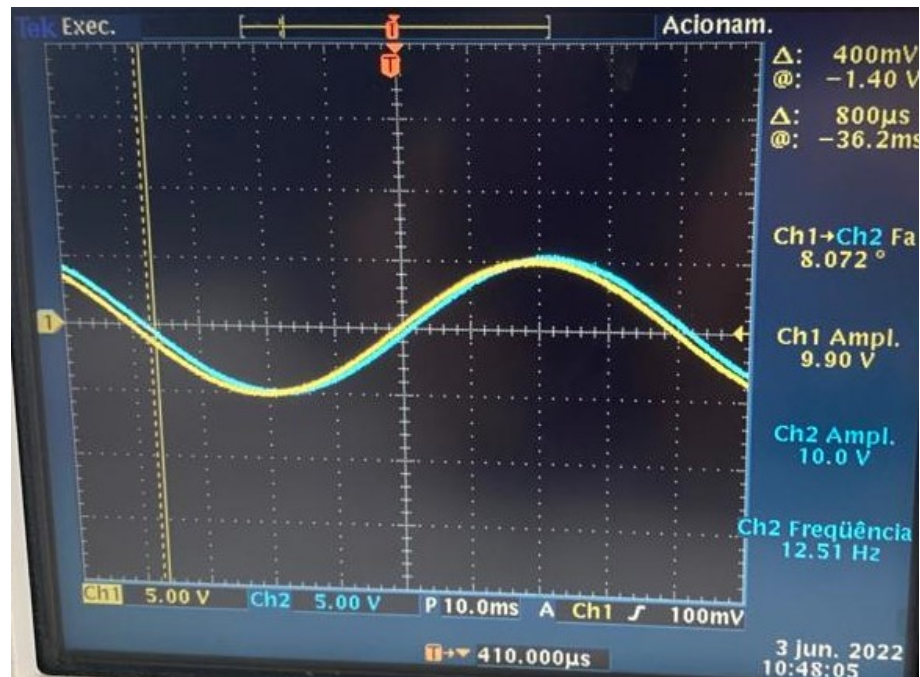


Figura 33 – Passa Baixa 2ª Ordem

Fonte: Próprio autor.

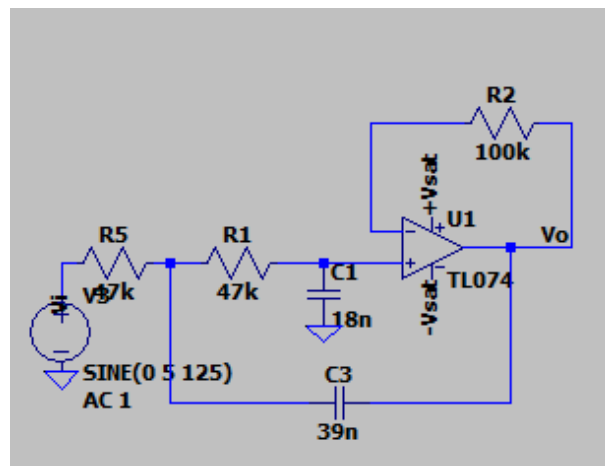


Figura 34 – Passa Baixa 2ª Ordem

Fonte: Próprio autor.

Com base nas figuras simuladas é possível notar que para uma frequência de cerca de 128Hz ocorre a frequência de corte, sendo um valor bastante próximo do alcançado via prática.

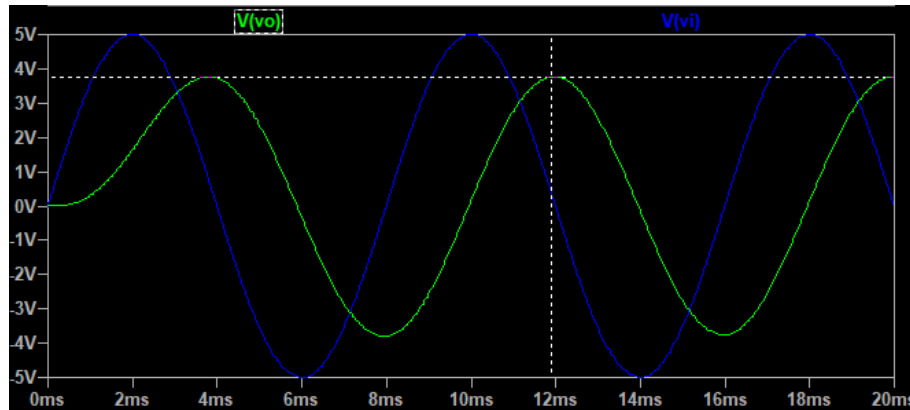


Figura 35 – Passa Baixa 2ª Ordem

Fonte: Próprio autor.

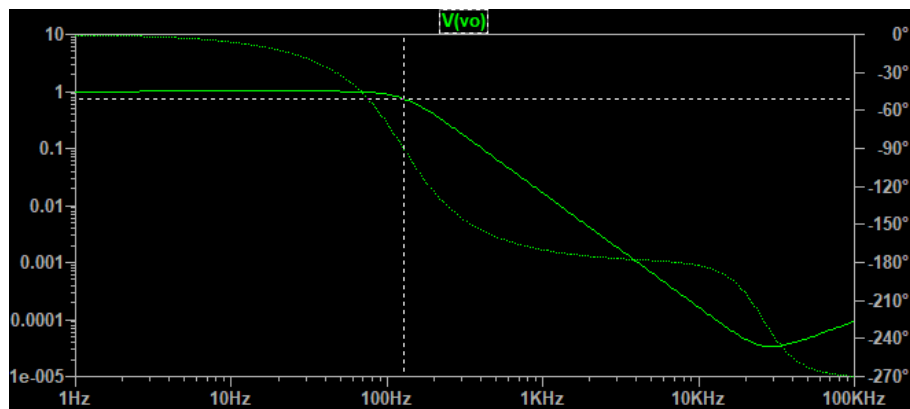


Figura 36 – Passa Baixa 2ª Ordem

Fonte: Próprio autor.

4.2.2 Passa Alta

Nota-se nas figura práticas que o valor da frequência de corte é de 13,72kHz. Nestas figuras o canal 1 é a entrada ao passo que o canal 2 é a saída do filtro.



Figura 37 – Passa Alta 2ª Ordem

Fonte: Próprio autor.

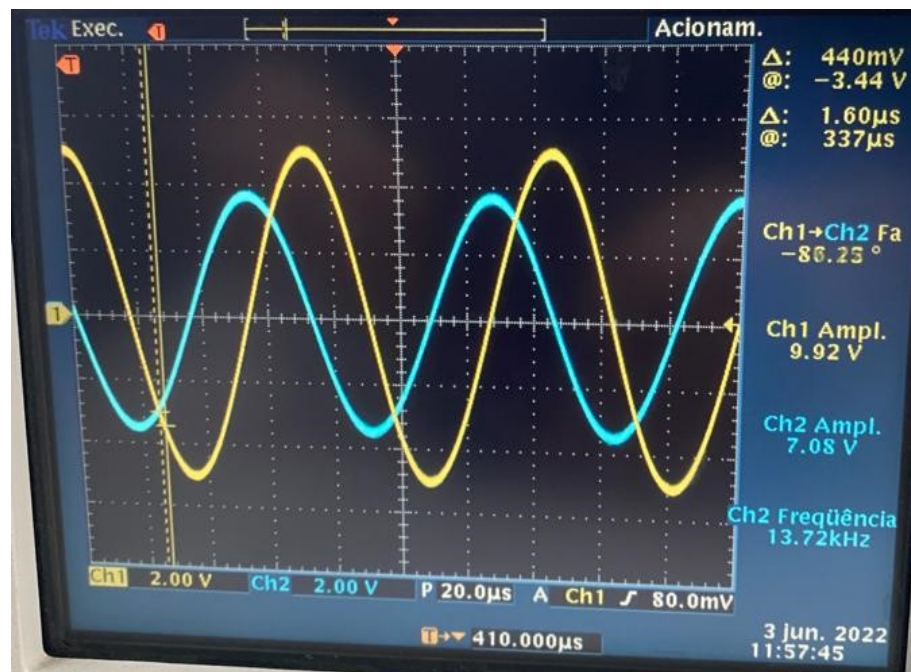


Figura 38 – Passa Alta 2ª Ordem

Fonte: Próprio autor.

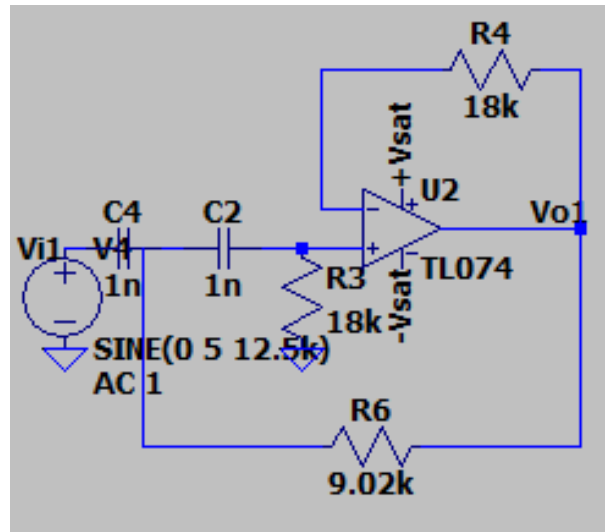


Figura 39 – Passa Alta 2ª Ordem

Fonte: Próprio autor.

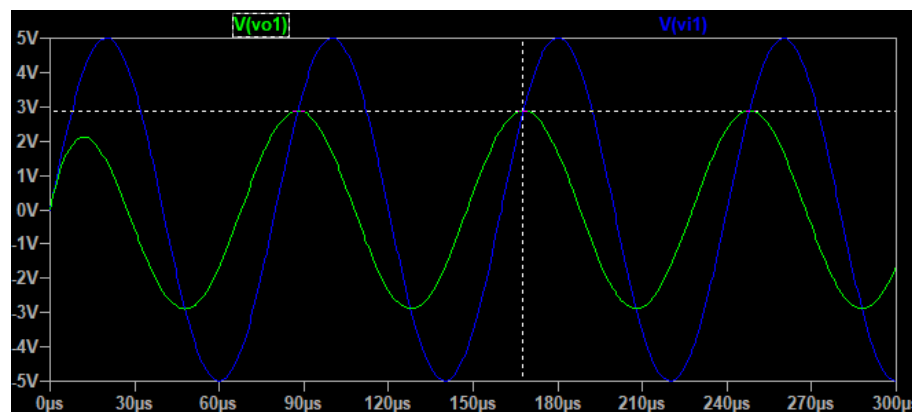


Figura 40 – Passa Alta 2ª Ordem

Fonte: Próprio autor.

Com base nas figuras simuladas é possível notar que para uma frequência de cerca de 17,32kHz ocorre a frequência de corte.

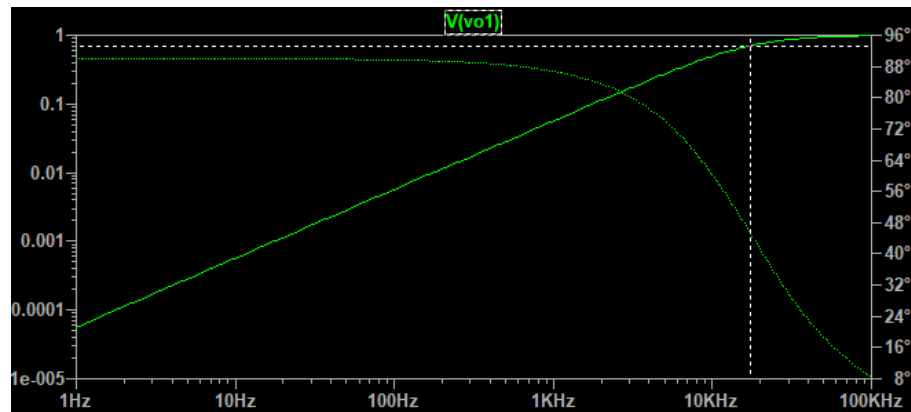


Figura 41 – Passa Alta 2ª Ordem

Fonte: Próprio autor.

4.2.3 Passa Banda

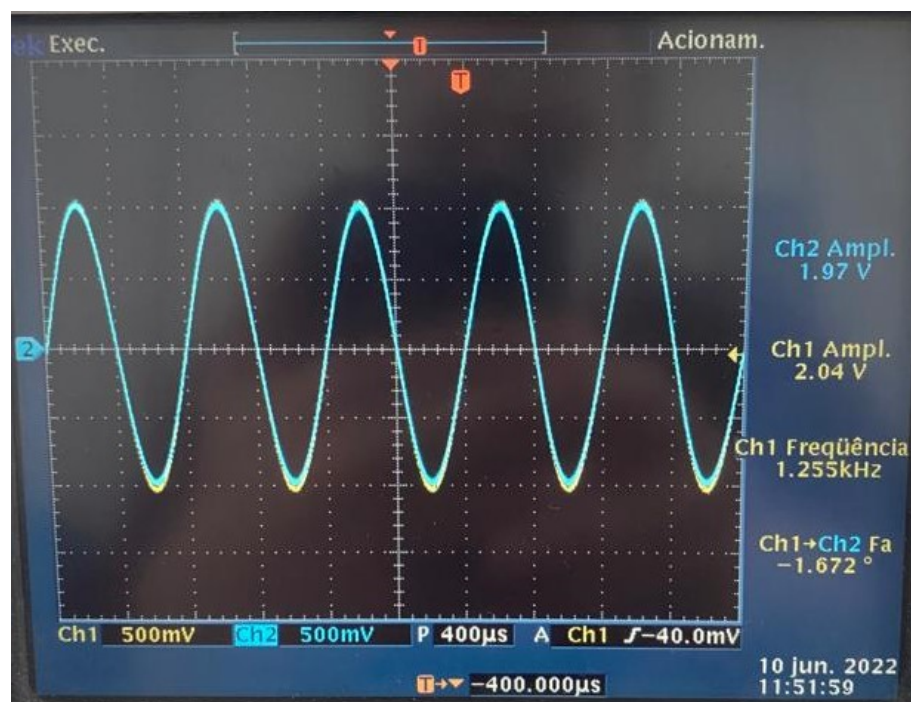


Figura 42 – Passa Banda 2ª Ordem

Fonte: Próprio autor.

Nota-se nas figuras práticas que para uma frequência de 1,255kHz o ganho é praticamente unitário, ao passo que para uma frequência bastante alta o ganho tende a ser nulo. Nestas figuras o canal 1 é a entrada ao passo que o canal 2 é a saída do filtro.

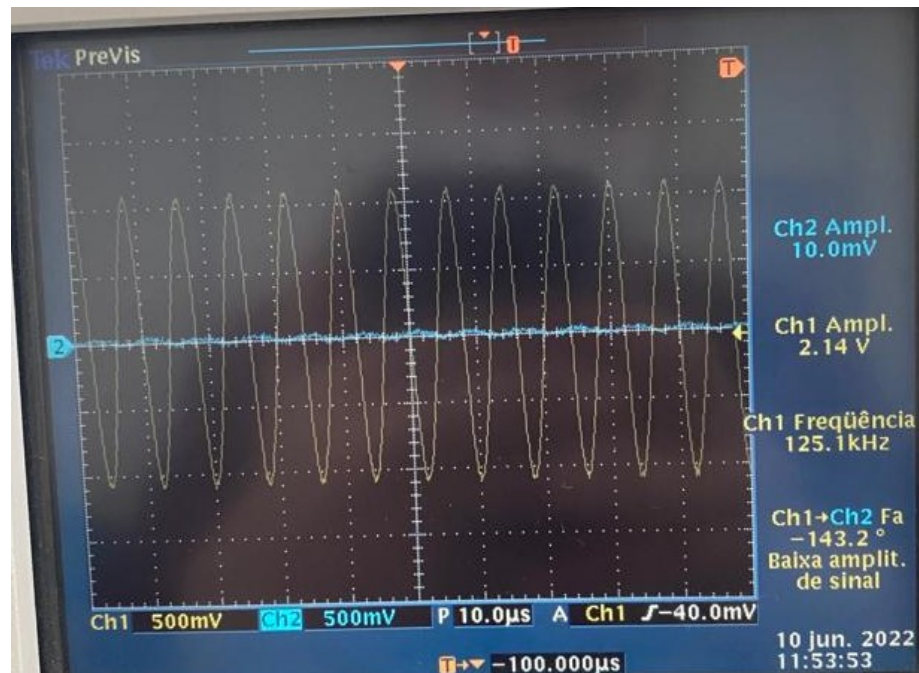


Figura 43 – Passa Banda 2ª Ordem

Fonte: Próprio autor.

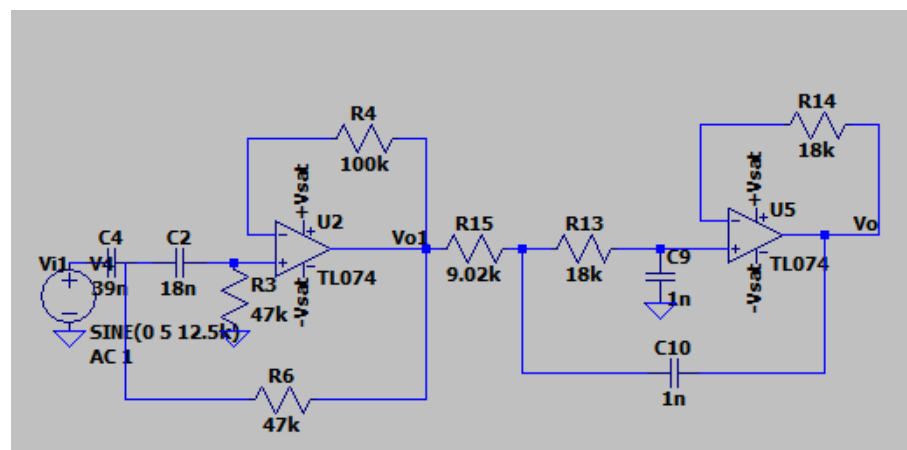


Figura 44 – Passa Banda 2ª Ordem

Fonte: Próprio autor.

Com base nas figuras simuladas é possível notar que a simulação concorda com a prática, uma vez que para uma frequência de 1,255kHz no gráfico de passa faixa, o ganho é unitário e, para frequências muito maiores, a tendência é de o ganho se anular.

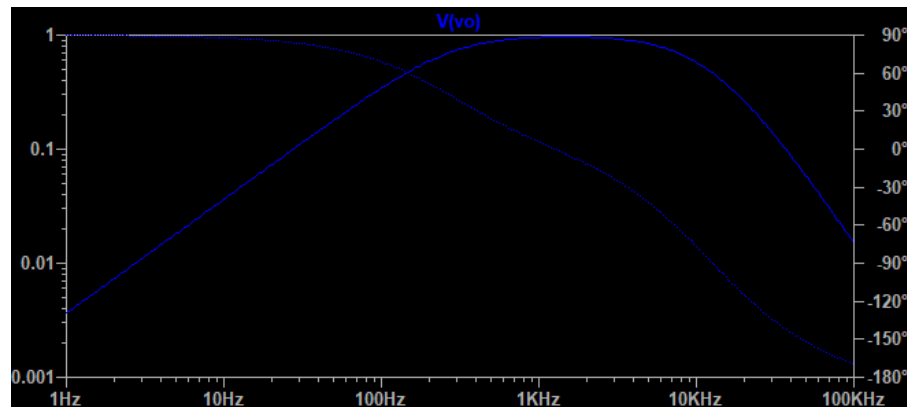


Figura 45 – Passa Banda 2ª Ordem

Fonte: Próprio autor.

4.2.4 Rejeita Faixa

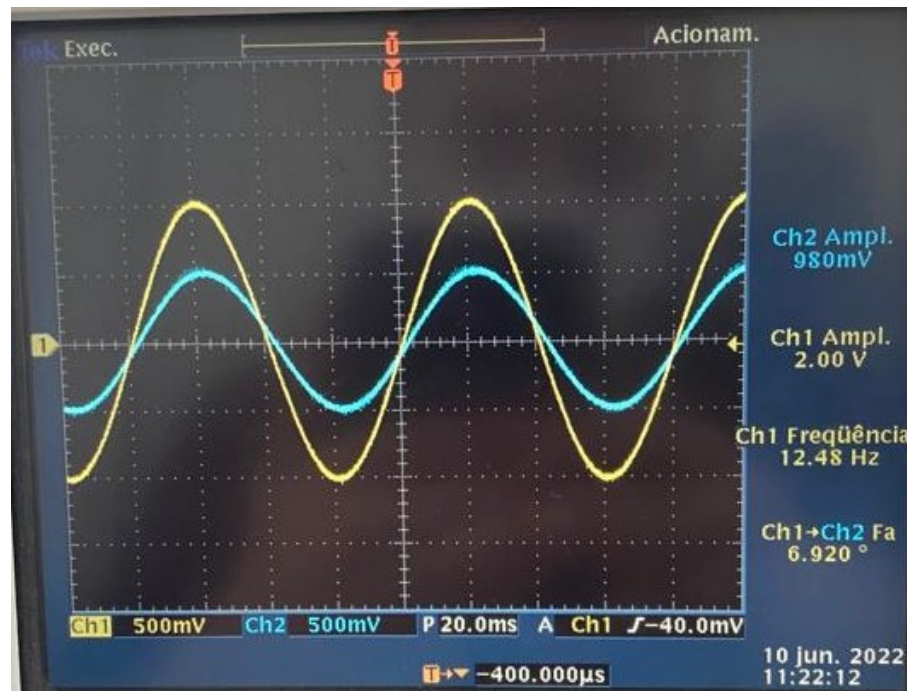


Figura 46 – Rejeita Faixa 2ª Ordem

Fonte: Próprio autor.

Nota-se nas figuras práticas que para uma frequência de 12,48Hz o ganho é praticamente unitário, ao passo que para uma frequência intermediária de 1,251kHz, o ganho tende a ser nulo. Nestas figuras o canal 1 é a entrada ao passo que o canal 2 é a saída do filtro.

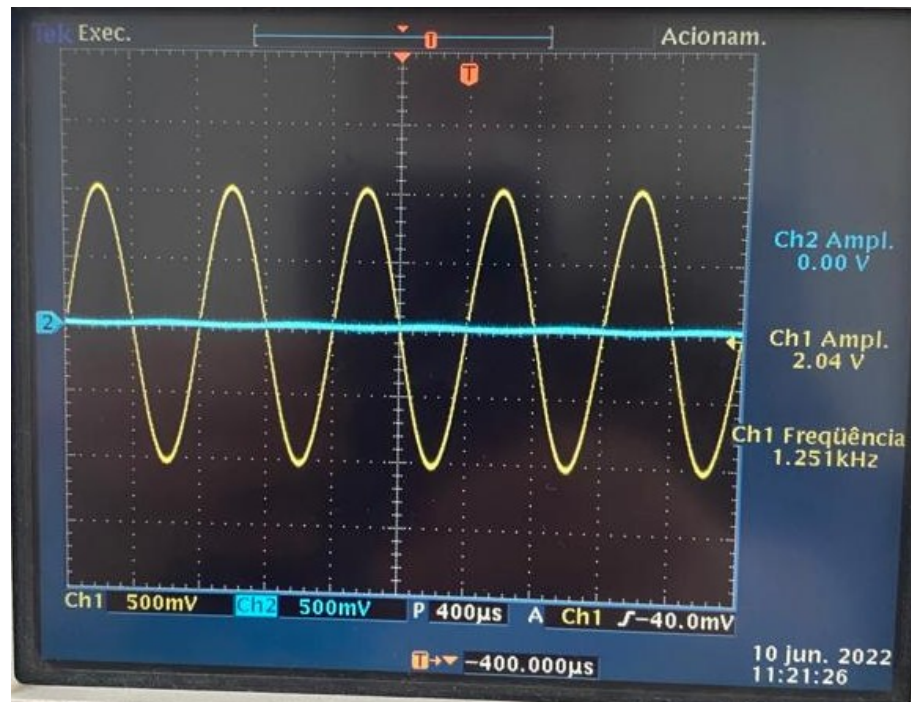


Figura 47 – Rejeita Faixa 2ª Ordem

Fonte: Próprio autor.

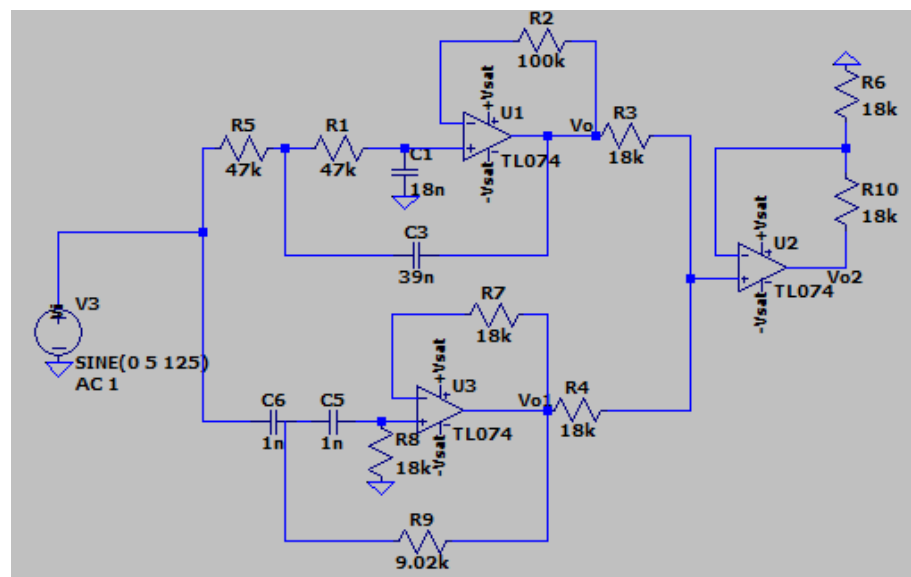


Figura 48 – Passa Faixa 2ª Ordem

Fonte: Próprio autor.

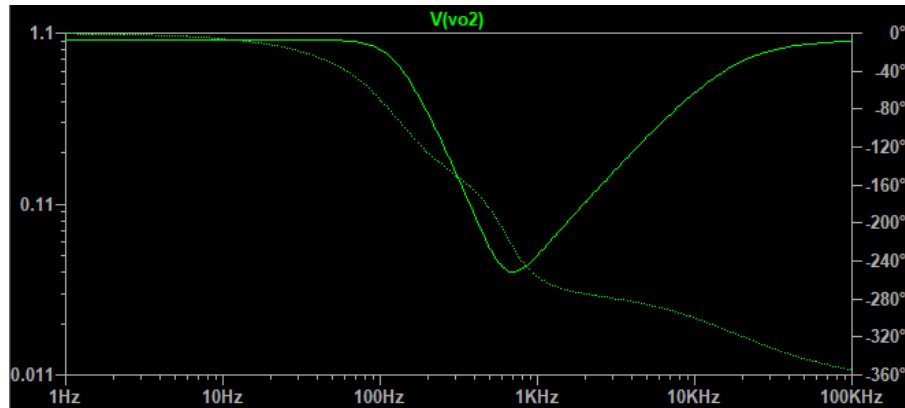


Figura 49 – Passa Faixa 2ª Ordem

Fonte: Próprio autor.

Com base nas figuras simuladas é possível notar que a simulação concorda com a prática, uma vez que para uma frequência baixa de cerca de 12,48Hz, o ganho tende a ser unitário, ao passo que para uma frequência intermediária, próxima a 1,251kHz, o ganho tende a ser nulo.

4.3 SENOIDE RECONSTRUÍDA POR PWM

Com base em um circuito comparador foi possível reconstruir a senoide gerada na saída do oscilador Ponte de Wien. Primeiramente concebeu-se uma senoide que tivesse aproximadamente 90% da amplitude da onda triangular utilizada na inversora (na não-inversora colocou-se a saída da ponte de Wien), a partir disso colocou-se um filtro passa baixas de segunda ordem na saída do comparador e então foi possível obter, na saída deste filtro, a senoide desejada.

No primeiro gráfico da prática, o canal 1 é referente ao PWM obtido na saída do comparador, o canal 2 é referente à saída do oscilador ponte de wien e o canal 3 é referente à saída após a filtragem. Nota-se que a frequência da senoide, após a filtragem, é extremamente semelhante à frequência do próprio oscilador senoidal.

No segundo gráfico da prática, o canal 1 é referente à entrada triangular na inversora do comparador, o canal 2 é referente à saída do oscilador ponte de wien e o canal 3 é referente à saída após a filtragem. Nota-se que a frequência da senoide, após a filtragem, é extremamente semelhante à frequência do próprio oscilador senoidal, vale ressaltar que a frequência do PWM é extremamente parecida à frequência da triangular.

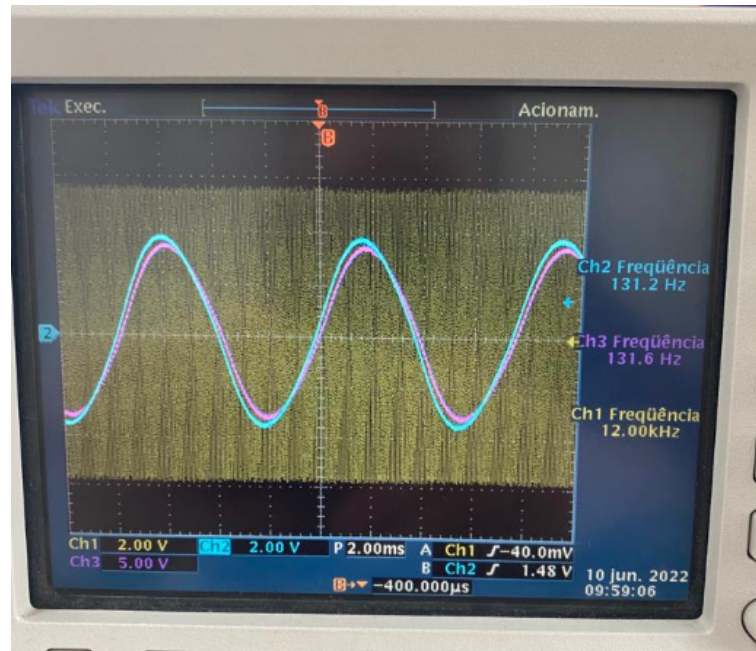


Figura 50 – Reconstrução do sinal

Fonte: Próprio autor.

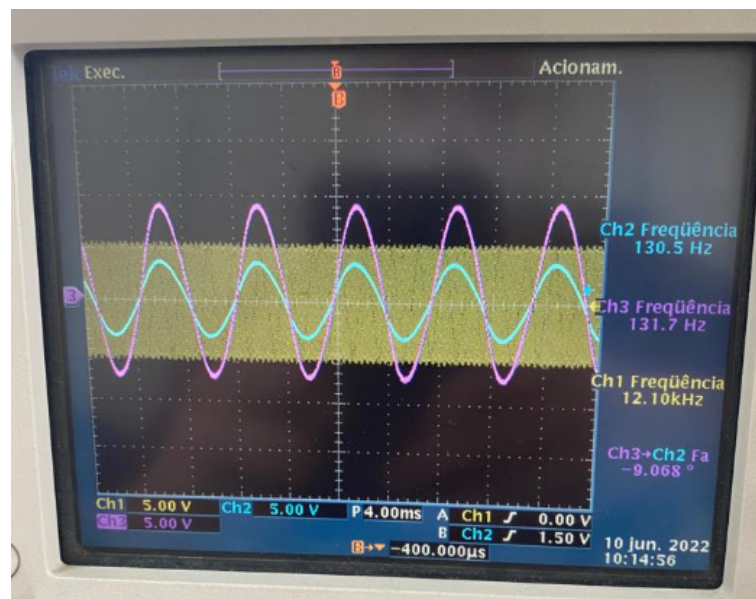


Figura 51 – Reconstrução do sinal

Fonte: Próprio autor.

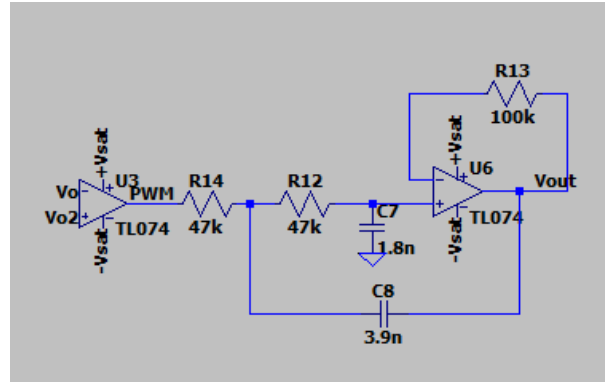


Figura 52 – Reconstrução do sinal

Fonte: Próprio autor.

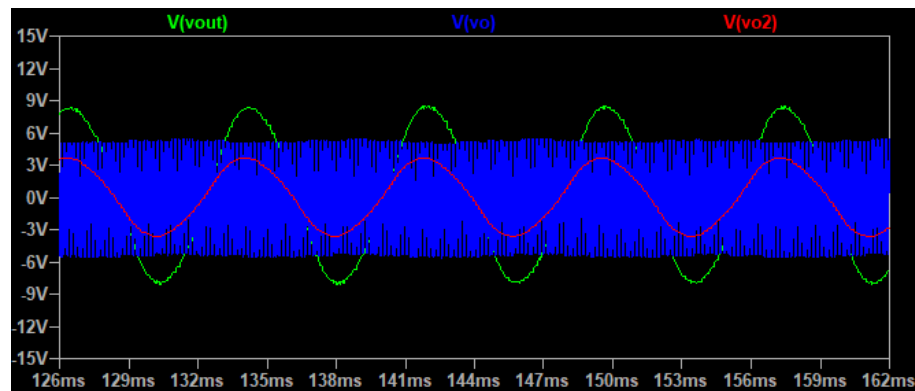


Figura 53 – Reconstrução do sinal

Fonte: Próprio autor.

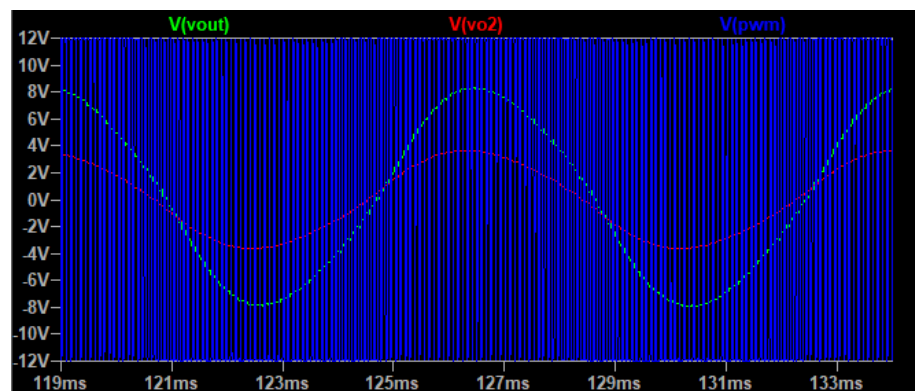


Figura 54 – Reconstrução do sinal

Fonte: Próprio autor.

Nota-se no primeiro e no segundo gráficos simulados que a frequência da senoide reconstruída (em verde) é extremamente parecida com a frequência da senoide colocada na não-inversora do comparador antes da filtragem. É importante citar que no primeiro gráfico simulado, a onda em azul é referente à triangular e, no segundo gráfico, esta é referente ao PWM.

5 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos neste relatório é possível notar que tanto os dados práticos como os simulados possuem bastante respaldo, uma vez que ambos chegaram em valores extremamente parecidos, além de satisfazerem os intervalos de frequência desejados para este projeto. É de suma importância também ressaltar que a senoide reconstruída, tanto por simulação quanto pela prática, se aproximou do esperado, já que ambas senoides chegaram a frequências extremamente parecidas, comprovando que um filtro passa baixas de segunda ordem na saída de um comparador torna possível a reconstrução de um sinal senoidal na entrada.

Finalmente, os experimentos práticos e simulados tornaram viável a melhor compreensão a respeito de filtros ativos de primeira e segunda ordem, além de estabelecer uma aplicação extremamente importante na reconstrução de sinais utilizando filtros.

REFERÊNCIAS

BERNARDO, A. **Filtros Ativos**. Dissertação (Mestrado). Capítulo IV - AO-I. Citado 3 vezes nas páginas 9, 10 e 11.

BERNARDO, A. **Filtros Ativos**. Dissertação (Mestrado). Capítulo IV - AO-J. Citado 4 vezes nas páginas 12, 13, 15 e 16.

CEE. **Filtros**. Dissertação (Mestrado) — Universidade da Madeira, 2019. Disponível em: <<http://cee.uma.pt/edu/e12/acetatos/filtros1.pdf>>. Acesso em: 04 jun. 2022. Citado na página 9.

VINCENCE, V. V. C. **Filtros Analógicos Ativos**. [S.l.: s.n.]. Citado na página 7.