



UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS (UNISINOS)
ESCOLA POLITÉCNICA
CONDICIONAMENTO DE SINAIS ANALÓGICOS

KLAUS PEREIRA BECKER
GABRIEL SILVEIRA MARQUES

PROJETO DE FILTRO PASSA-BAIXAS VCVS DE QUARTA ORDEM:
Análise e Implementação via Aproximação de Butterworth com Frequência de
Corte de 3kHz e Ganho Definido

SÃO LEOPOLDO / RS
2025

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS (UNISINOS)

KLAUS PEREIRA BECKER

GABRIEL SILVEIRA MARQUES

PROJETO DE FILTRO PASSA-BAIXAS VCVS DE QUARTA ORDEM:

Análise e Implementação via Aproximação de Butterworth com Frequência de Corte de 3kHz
e Ganho Definido

Atividade prática apresentada como requisito à obtenção de uma das notas parciais da disciplina de Condicionamento de Sinais Analógicos do curso de Engenharia da Computação da Universidade do Vale do Rio Dos Sinos.

Prof. Rubem Dreger

SÃO LEOPOLDO / RS

2025

Sumário

	Páginas
1 Introdução	5
2 Referêncial Teórico	5
2.1 Fundamentos de Filtros Eletrônicos	5
2.1.1 Definição	5
2.1.2 Classificação	5
2.1.3 Parâmetros de Projeto	6
2.2 Projeto de Filtro de Quarta Ordem Butterworth	7
2.2.1 Cascata de Filtros	7
2.2.2 Parâmetros Butterworth de Quarta Ordem	7
3 Metodologia	7
3.1 Requisitos do Projeto	8
3.2 Dimensionamento do Circuito	8
3.2.1 Definição dos Componentes Ativos	8
3.2.2 Cálculo dos Componentes Passivos	8
3.2.2.1 Cálculo do Capacitor Principal (C)	8
3.2.2.2 Cálculo do Resistor (R)	9
3.2.2.3 Cálculo da Relação de Resistores	9
3.2.3 Definição dos Valores Padrões	9
3.2.4 Circuito Proposto	9
3.3 Simulação	10
3.4 Montagem do Circuito em Laboratório	12
3.4.1 Componentes Utilizados	12
3.4.2 Testes e Validação Experimental	13
4 Análise de Resultados	18
4.1 Conformidade com os Requisitos de Projeto	18
4.2 Análise dos Resultados da Simulação	18
4.2.1 Gráfico de 3 kHz (Figura 3)	18
4.2.2 Gráfico de Bode (Figura 4):	18
4.2.2.1 Ganho na Banda Passante	19
4.2.2.2 Frequência de Corte (f_c)	19
4.2.2.3 Atenuação de 4ª Ordem (Butterworth)	19
4.3 Análise dos Resultados Experimentais	19
4.3.1 Montagem Física (Figura 5):	19

4.3.2	Análise em Frequências Chave (Figuras 6 a 11):	19
4.3.2.1	Frequência de Corte (f_c)	20
4.3.2.2	Banda Passante (300 Hz e 1,5 kHz)	20
4.3.2.3	Banda de Rejeição (6 kHz e 30 kHz)	21
4.3.3	Ruído em 30 kHz (Figura 10):	21
4.4	Comparativo Final	21
4.4.1	Banda Passante (300 Hz e 1,5 kHz)	21
4.4.2	Frequência de Corte (3 kHz)	22
4.4.3	Banda de Rejeição (6 kHz e 30 kHz)	22
5	Conclusão	23

1 Introdução

A manipulação de sinais analógicos exige condicionamento preciso, onde filtros são cruciais para a seletividade de frequência. Este trabalho aborda o projeto de um filtro passa-baixas VCVS (Voltage-Controlled Voltage Source) de quarta ordem, empregando a aproximação de Butterworth para garantir uma resposta de fase linear e atenuação maximamente plana na banda passante. A ordem do filtro assegura uma transição acentuada, com frequência de corte definida em 3 kHz e ganho dimensionado conforme a especificação do sinal.

2 Referêncial Teórico

2.1 Fundamentos de Filtros Eletrônicos

2.1.1 Definição

Filtros eletrônicos são circuitos que processam seletivamente sinais baseados em sua frequência. A função principal é distinguir e manipular componentes espectrais, permitindo a passagem de frequências desejadas (banda passante) e atenuando as indesejadas (banda de rejeição). Isso é crítico para condicionamento de sinal, supressão de ruído e extração de informação em sistemas eletrônicos.

2.1.2 Classificação

Filtros são classificados por sua resposta em frequência, topologia e ordem:

- **Tipos de Resposta:**

- **Passa-Baixas (Low-Pass):** Permitem frequências abaixo do ponto de corte (f_c) e atenuam as acima.
- **Passa-Altas (High-Pass):** Permitem frequências acima de f_c e atenuam as abaixo.
- **Passa-Faixa (Band-Pass):** Permitem uma faixa específica de frequências, atenuando as abaixo e acima dessa faixa.
- **Rejeita-Faixa (Band-Stop):** Atuam para atenuar uma faixa específica de frequências, permitindo as abaixo e acima dessa faixa.

- **Topologia:**

- **Passivos:** Compostos apenas por componentes passivos como resistores, capacitores e indutores. São simples e robustos, mas limitados em ganho e seletividade.

- **Ativos:** Utilizam componentes ativos, como amplificadores operacionais (Amp-Ops), além de outros componentes passivos. Requerem fonte de alimentação, mas permitem a amplificação do sinal, maior flexibilidade no projeto e melhor isolamento entre as etapas.
- **Ordem:**
 - A ordem do filtro é determinada pela quantidade de elementos reativos (capacitores ou indutores) que efetivamente contribuem para a filtragem. Uma ordem maior resulta em uma transição mais abrupta entre a banda passante e a banda de rejeição. Isso se traduz em uma maior taxa de atenuação fora da banda desejada, por exemplo, 20 dB por década por cada ordem de filtro.

2.1.3 Parâmetros de Projeto

Os principais parâmetros a serem considerados no projeto de filtros incluem:

- **Frequência de Corte (f_c):** Ponto onde o ganho do filtro cai para -3 dB (metade da potência) em relação ao ganho da banda passante.
- **Ganho de Banda Passante (K ou A):** Amplificação do sinal na banda de frequências permitida. Em filtros ativos, pode ser maior que a unidade.
- **Fator de Qualidade (Q):** Medida da seletividade do filtro, definida como a razão entre a frequência central e a largura de banda. Filtros com Q alto têm uma resposta mais estreita e seletiva.
- **Aproximação de Resposta:** Define o comportamento da magnitude e fase do filtro:
 - **Butterworth:** Caracteriza-se por uma resposta maximamente plana (sem ondulações) na banda passante e uma fase linear. A atenuação cresce suavemente fora da banda passante, com uma taxa de atenuação de 20 dB por década por ordem.
 - **Chebyshev:** Apresenta ondulações na banda passante, mas uma transição mais rápida para a banda de rejeição. A atenuação é mais agressiva, com uma taxa de 20 dB por década por ordem, mas com ondulações na banda passante.
 - **Bessel:** Foca na linearidade de fase, ideal para aplicações onde a preservação de forma de onda é crítica. A atenuação é mais suave, com uma taxa de 6 dB por década por ordem, resultando em uma resposta de fase mais linear, mas com uma transição mais lenta.

2.2 Projeto de Filtro de Quarta Ordem Butterworth

2.2.1 Cascata de Filtros

Um filtro de quarta ordem é construído pela cascata de dois estágios independentes de segunda ordem. Cada estágio de segunda ordem contribuirá com dois polos, somando os quatro polos necessários para a quarta ordem.



Figura 1: Cascata de dois filtros de segunda ordem para formar um filtro de quarta ordem.

2.2.2 Parâmetros Butterworth de Quarta Ordem

Para obter uma resposta Butterworth, os dois estágios de segunda ordem devem ser dimensionados com fatores de qualidade (Q) e ganhos (A_V) específicos, garantindo a performance de 4^a ordem.

- **Fator de Qualidade:**

- **1º Estágio (Q_1):** 0,541
- **2º Estágio (Q_2):** 1,306
- **Total (Q_T):** $Q_T = Q_1 \cdot Q_2 = 0,541 \cdot 1,306 = 0,707$

- **Ganho:**

- **1º Estágio (A_{V1}):** 1,152
- **2º Estágio (A_{V2}):** 2,235
- **Total (A_V):** $A_{V1} \cdot A_{V2} = 1,152 \cdot 2,235 = 2,576$ (8,21 dB)

- **Frequência de Corte (f_c):** Ambos os estágios devem ser projetados para ter a mesma frequência de corte.

3 Metodologia

O desenvolvimento deste filtro passa-baixas VCVS de quarta ordem seguiu uma metodologia estruturada, abrangendo as etapas de projeto teórico, dimensionamento de componentes, simulação e validação experimental. A seguir, detalhamos cada uma dessas etapas.

3.1 Requisitos do Projeto

Com base nas especificações fornecidas pelo professor, definiram-se os seguintes requisitos para o filtro:

- **Tipo de Filtro:** Passa-baixas VCVS de quarta ordem com ganho.
- **Aproximação:** Butterworth.
- **Frequência de Corte (f_c):** 3 kHz, (conforme atribuído ao grupo Klaus PB/Gabriel SM).
- **Tensão de Alimentação:** $\pm 12V$.
- **Sinal de Entrada:** Sinal senoidal com amplitude de 1 V (pico).

3.2 Dimensionamento do Circuito

O projeto do filtro foi realizado utilizando como base a aproximação de Butterworth, com os parâmetros de projeto definidos na seção anterior. O filtro foi projetado para ter uma resposta de quarta ordem, o que implica em dois estágios de segunda ordem em cascata.

Como trata-se de um filtro ativo, utilizamos amplificadores operacionais (Amp-Ops) na configuração não inversora, garantindo que o sinal de saída não seja invertido. Dessa forma, o ganho do filtro é positivo, conforme especificado nos requisitos do projeto.

3.2.1 Definição dos Componentes Ativos

Para a implementação dos estágios VCVS, selecionamos o Amp-Op LM741. Este CI, amplamente conhecido e utilizado, oferece familiaridade e robustez para projetos de filtro em baixa frequência. Sua faixa de tensão de alimentação de $\pm 12V$ é compatível com os requisitos do projeto, e sua resposta em frequência é adequada para a faixa de 3 kHz.

3.2.2 Cálculo dos Componentes Passivos

Para o dimensionamento dos componentes passivos, seguimos a metodologia de calcular o valor do capacitor principal (C) e, em seguida, determinar o resistor (R) necessário para a frequência de corte de 3 kHz.

3.2.2.1 Cálculo do Capacitor Principal (C)

Utilizamos a seguinte fórmula para calcular o valor do capacitor principal, que define a frequência de corte do filtro:

$$C = \frac{10^{-6}}{f_c} = \frac{10^{-6}}{3 \cdot 10^3} = 3,33 \text{ nF} \quad (1)$$

3.2.2.2 Cálculo do Resistor (R)

Para determinar o resistor necessário para a frequência de corte de 3 kHz, utilizamos a relação entre a frequência de corte, o capacitor principal e o resistor:

$$R = \frac{1}{2\pi f_c C} = \frac{1}{2\pi \cdot 3 \cdot 10^3 \cdot 3,33 \cdot 10^{-9}} \approx 15,9 \text{ } k\Omega \quad (2)$$

3.2.2.3 Cálculo da Relação de Resistores

Para cada estágio do filtro, devemos calcular os valores da associação de resistores necessários para obter o ganho desejado. Utilizando a fórmula do ganho em um circuito VCVS, temos:

$$A_V = 1 + \frac{R_f}{R_g} \quad (3)$$

Onde R_f é o resistor de realimentação (feedback) e R_g é o resistor de ganho (gain). Dessa forma, podemos rearranjar a equação para encontrar o valor de R_g necessário para cada estágio, dado o ganho desejado.

$$R_g = R_f \cdot A_V - 1 \quad (4)$$

Para ambos estágios, arbitramos o valor de $R_f = 10 \text{ } k\Omega$, e calculamos R_g para obter o ganho necessário.

$$R_{g1} = 10 \text{ } k\Omega \cdot (1,152 - 1) \approx 1,52 \text{ } k\Omega \quad (5)$$

$$R_{g2} = 10 \text{ } k\Omega \cdot (2,235 - 1) \approx 12,35 \text{ } k\Omega \quad (6)$$

3.2.3 Definição dos Valores Padrões

Para os valores dos componentes passivos, utilizamos os valores mais próximos disponíveis no mercado, conforme a tabela de valores padrão E12. Os valores escolhidos foram:

- C: $3,3 \text{ nF}$
- R: $12 \text{ k}\Omega + 3,9 \text{ k}\Omega = 15,9 \text{ k}\Omega$
- R_f : $10 \text{ k}\Omega$
- R_{g1} : $1,5 \text{ k}\Omega$
- R_{g2} : $12 \text{ k}\Omega + 330 \text{ }\Omega = 12,33 \text{ k}\Omega$

3.2.4 Circuito Proposto

Na imagem 2, apresentamos o circuito proposto, o qual foi esquematizado utilizando o software Multisim®, onde foram montados os dois estágios de filtro passa-baixas VCVS

de quarta ordem, conforme os cálculos realizados anteriormente. O circuito foi projetado para atender aos requisitos especificados, incluindo a frequência de corte de 3 kHz e o ganho positivo.

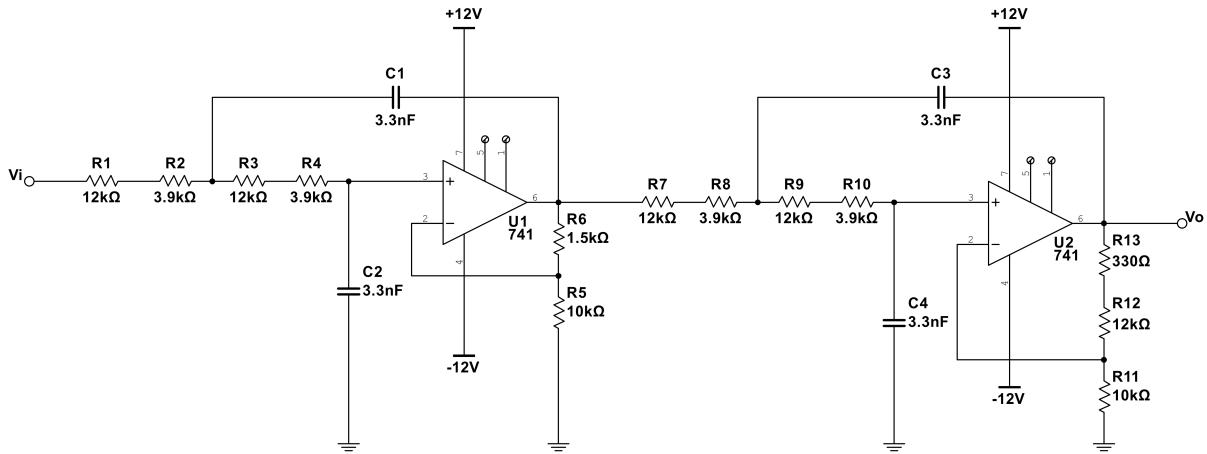


Figura 2: Circuito proposto montado no software Multisim®.

3.3 Simulação

Para prever o comportamento do circuito, foi utilizada a ferramenta Multisim®, que permitiu analisar o circuito amplificador em cascata antes da montagem física. A simulação foi realizada com o objetivo de validar os cálculos teóricos e verificar se o circuito atenderia aos requisitos especificados. O circuito foi montado no software de simulação conforme a Figura 2.

A simulação foi configurada para analisar a resposta em frequência do circuito, utilizando um sinal de entrada senoidal com frequência de 3 kHz e amplitude de 1 V (pico).

Utilizando do instrumento de osciloscópio do software, foi possível observar as formas de onda das tensões de entrada e saída do circuito para a frequência de corte especificada. O gráfico resultante pode ser visto na Figura 3, onde as tensões de entrada e saída para essa determinada frequência foram plotadas ao longo do tempo.

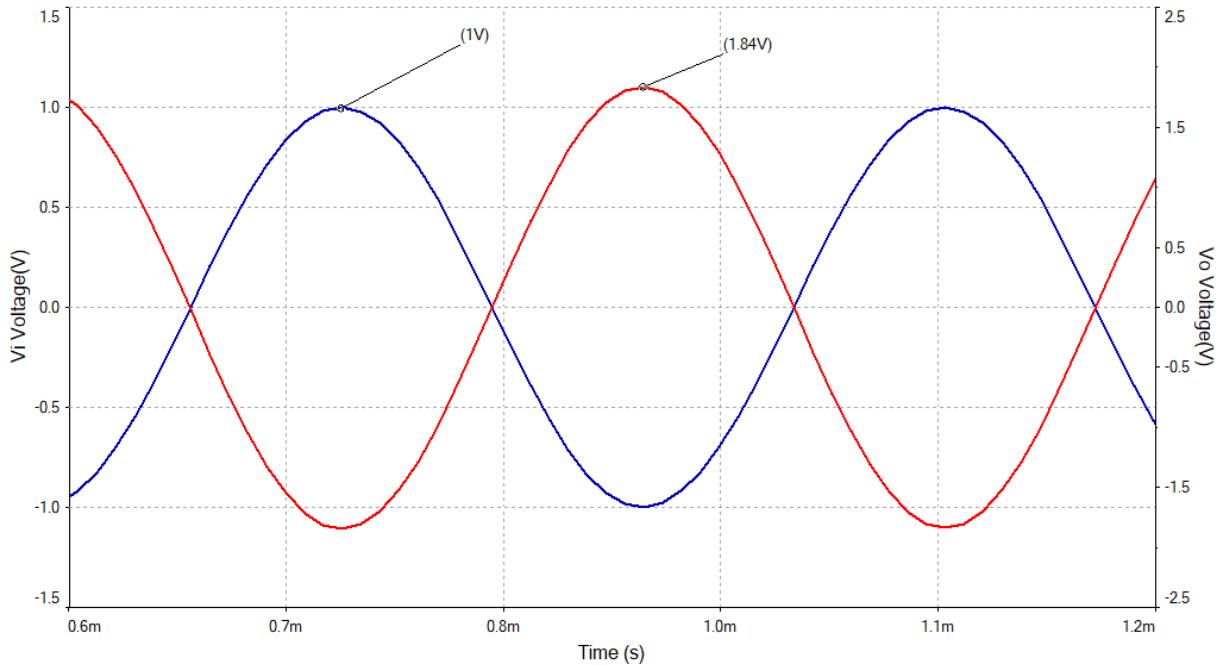


Figura 3: Gráfico das tensões de entrada e saída do circuito para a frequência de 3 kHz.

Como pode ser observado, a tensão de saída apresenta uma amplitude elevada em relação à tensão de entrada, indicando que o ganho do circuito está funcionando conforme o esperado.

Além disso, ainda no ambiente de simulação, foi possível analisar a resposta em frequência do circuito, verificando o ganho e a fase em diferentes frequências. A seguir, apresentamos o gráfico de Bode obtido na simulação, que mostra a magnitude e a fase do ganho do circuito ao longo de uma faixa de frequências.

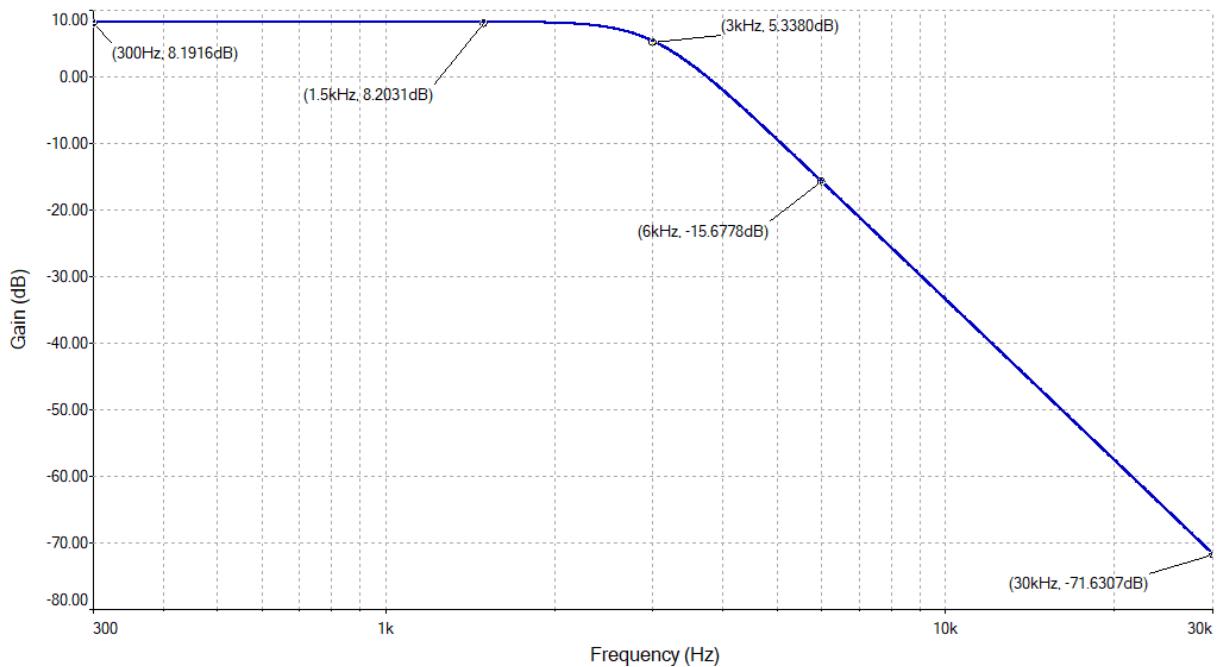


Figura 4: Gráfico de Bode da resposta em frequência do circuito.

Como podemos observar no gráfico de Bode, o circuito apresenta uma resposta de quarta ordem, com uma frequência de corte em torno de 3 kHz. A magnitude do ganho diminui suavemente após essa frequência, confirmando a característica Butterworth do filtro, chegando a uma atenuação de cerca de 80 dB por década, o que é esperado para um filtro de quarta ordem.

Além disso, para que possamos verificar se o circuito foi corretamente dimensionado para a frequência de corte de 3 kHz, é necessário calcular a diferença entre o ganho na banda passante e o ganho na frequência de corte. Para isso, utilizamos a seguinte fórmula:

$$\Delta A_V = A_V(f_c) - A_V(f_{passante}) \quad (7)$$

$$\Delta A_V = 5,3380 \text{ dB} - 8,1916 \text{ dB} = -2,8536 \text{ dB} \quad (8)$$

A diferença de ganho entre a frequência de corte e a banda passante é de aproximadamente $-2,85 \text{ dB}$, o que indica que o circuito está bem ajustado para a frequência de corte especificada. Dessa forma, a simulação confirmou que o circuito amplificador em cascata atende aos requisitos do projeto, apresentando um ganho positivo e uma resposta de frequência adequada.

3.4 Montagem do Circuito em Laboratório

Após a validação teórica e simulação do circuito amplificador em cascata, foi realizada a montagem física do circuito em laboratório. A montagem foi feita seguindo o esquema apresentado na Figura 2, utilizando os componentes selecionados e os valores calculados anteriormente.

3.4.1 Componentes Utilizados

Os componentes utilizados na montagem do circuito foram:

Qtd	Componente
2	AmpOp LM741
4	Capacitor de $3,3 \text{ nF}$
5	Resistor de $12 \text{ k}\Omega$
4	Resistor de $3,9 \text{ k}\Omega$
2	Resistor de $10 \text{ k}\Omega$
1	Resistor de $1,5 \text{ k}\Omega$
1	Resistor de 330Ω

Tabela 1: Componentes utilizados na montagem do circuito.

A montagem foi realizada em uma protoboard, seguindo o esquema de ligação dos componentes conforme o circuito proposto. Os AmpOps foram alimentados com uma fonte

de alimentação de $\pm 12V$, garantindo a sua operação adequada. Na imagem 5, apresentamos a montagem física do circuito em laboratório.

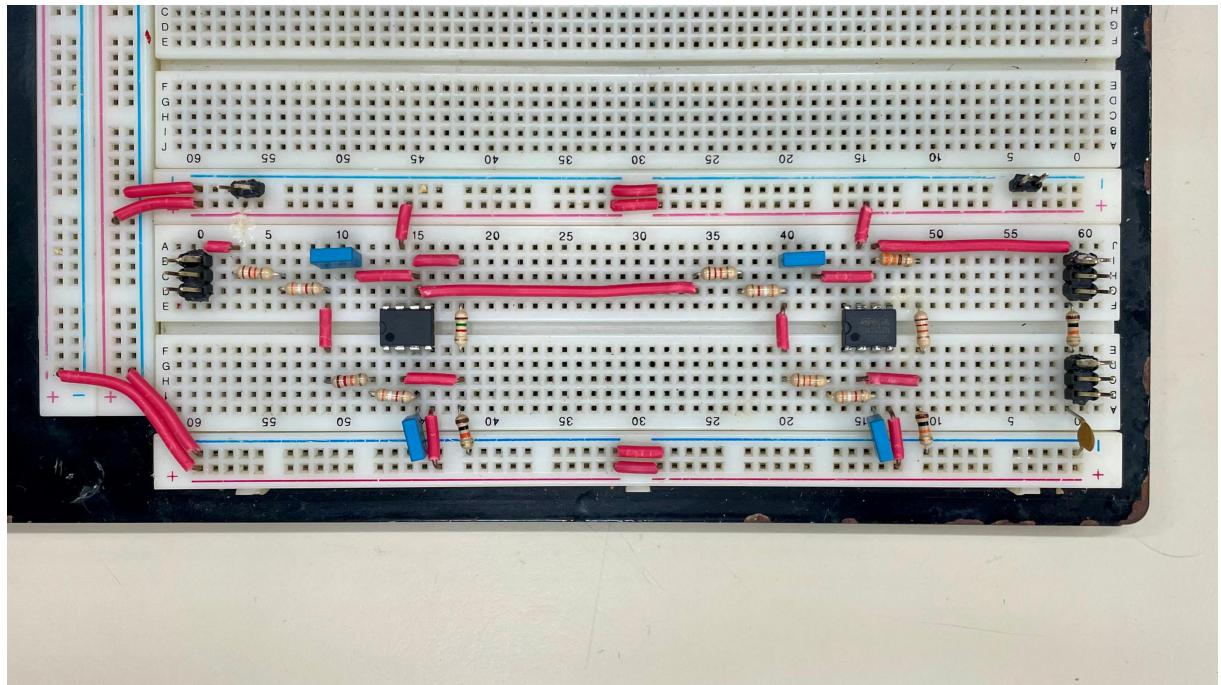


Figura 5: Montagem física do circuito em laboratório.

3.4.2 Testes e Validação Experimental

Após a montagem do circuito, foram realizados testes para validar o funcionamento do filtro passa-baixas VCVS de quarta ordem. Os testes incluíram a aplicação de um sinal senoidal de entrada com utilização de uma frequência de 3 kHz e amplitude de 1 V (pico), conforme especificado nos requisitos do projeto.

A tensão de saída foi medida e comparada com a tensão de entrada, verificando se o ganho do circuito estava dentro dos parâmetros esperados, conforme pode ser visto na imagem 6.

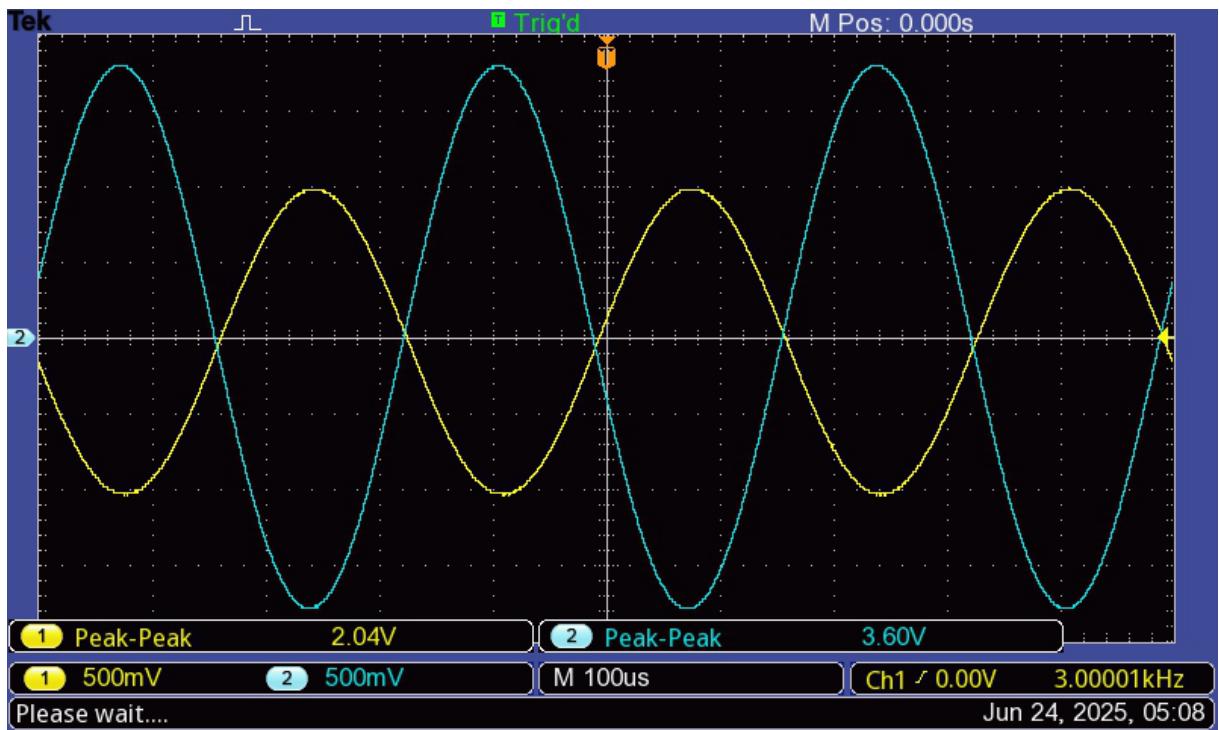


Figura 6: Gráfico das tensões de entrada e saída para 3 KHz.

Como ponto de controle, verificamos que a tensão de saída medida estava condizente com a tensão de saída simulada, confirmando que o circuito estava funcionando corretamente.

Dessa forma, continuamos com a análise da resposta em frequência do circuito, utilizando o osciloscópio para observar a magnitude em diferentes frequências. Como não foi possível utilizar um equipamento de análise de espectro, utilizamos o osciloscópio para medir a tensão de saída em diferentes frequências, sendo elas uma decade abaixo e uma decade acima da frequência de corte, ou seja, 300 Hz e 30 kHz, juntamente com as frequências uma oitava abaixo e uma oitava acima da frequência de corte, ou seja, 1,5 kHz e 6 kHz.

A seguir podemos verificar os gráficos obtidos para as tensões de entrada e saída do circuito para as frequências de 300 Hz, 1,5 kHz, 6 kHz e 30 kHz.

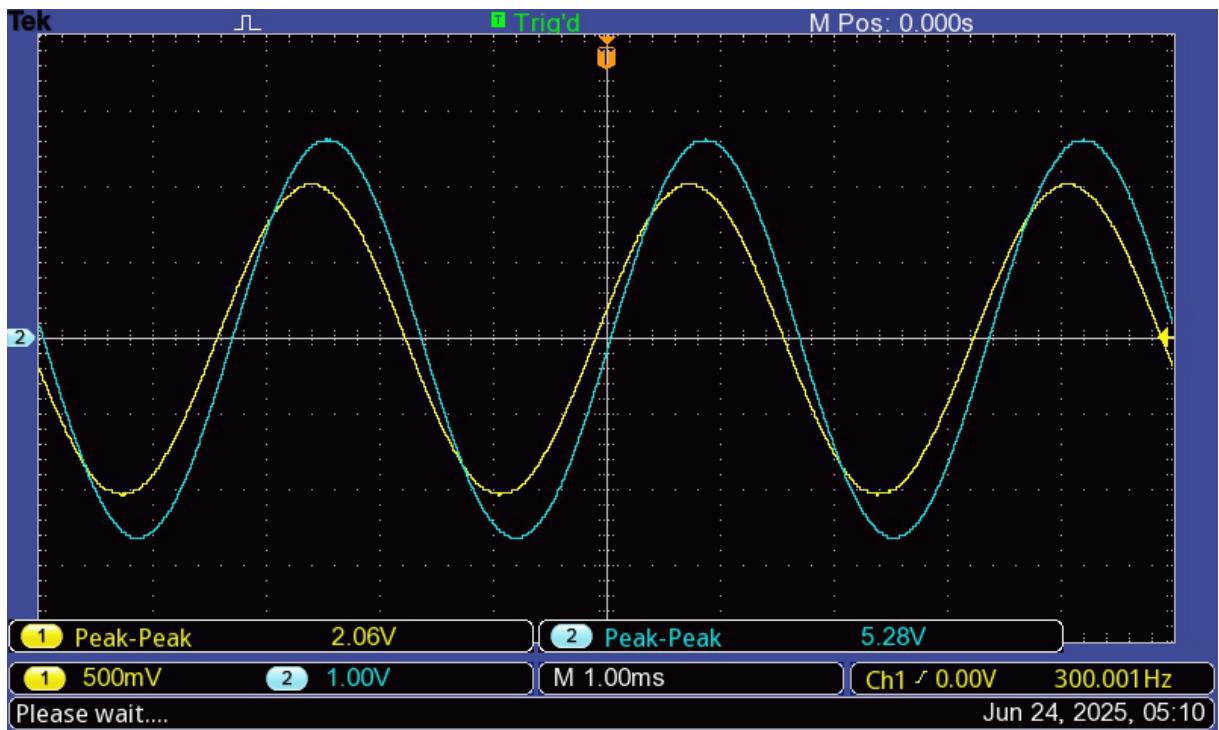


Figura 7: Gráfico das tensões de entrada e saída para 300 Hz.

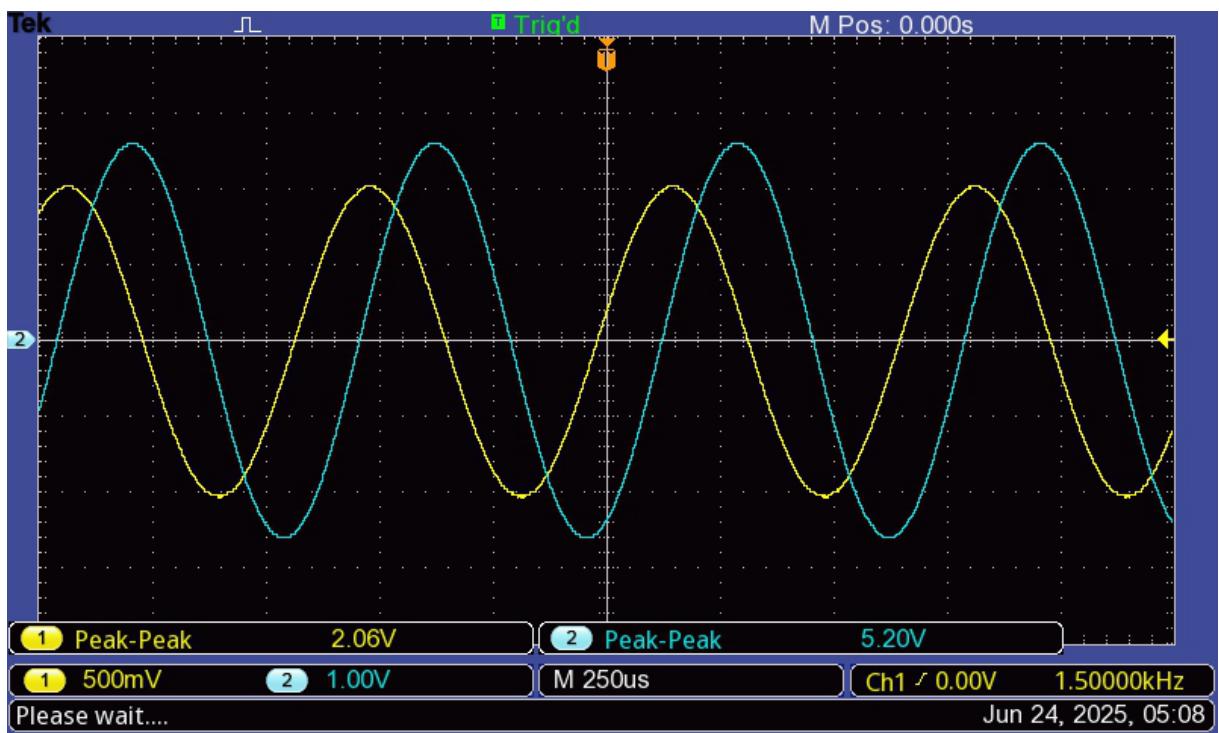
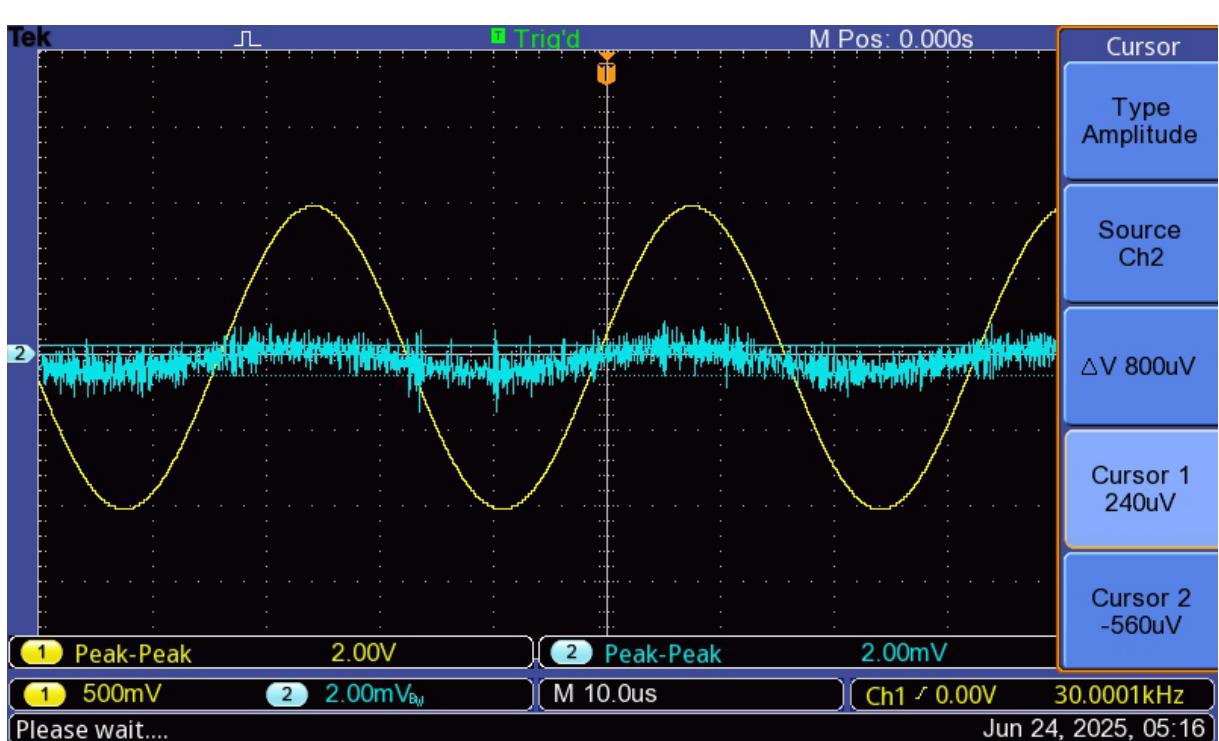
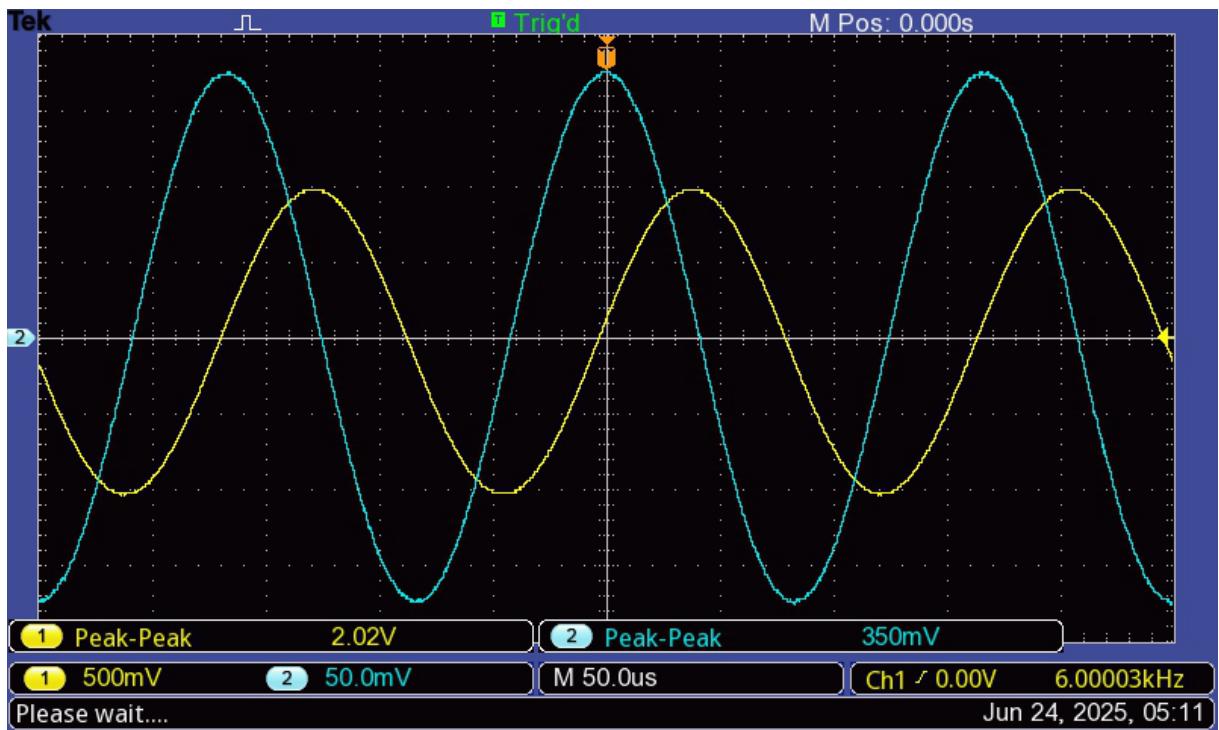


Figura 8: Gráfico das tensões de entrada e saída para 1,5 kHz.



Como pode ser observado nas imagens, todos os gráficos, exceto o de 30 kHz, apresentam sinais de saída facilmente identificáveis. No entanto, nesse último caso, o sinal de saída apresenta um ruído significativo, o que pode ser atribuído à alta atenuação do filtro para essa frequência, a qual, segundo a simulação, é de aproximadamente 71 dB se comparado com o sinal de entrada. Esse ruído pode ser causado por interferências eletromagnéticas ou limitações

do equipamento utilizado para medir a tensão de saída.

Sendo assim, visando a correta análise do circuito e a aplicação prática do que aprendemos durante esse semestre, resolvemos criar um novo filtro passa-baixas, utilizando apenas componentes passivos, ou seja, um filtro RC passivo. Esse filtro terá como objetivo filtrar o sinal de saída para essa frequência de 30 kHz, reduzindo o ruído e permitindo uma melhor visualização do sinal de saída.

Para isso, arbitramos a frequência de corte do filtro RC passivo em 300 KHz, o que tem por finalidade garantir que o sinal de saída do filtro ativo passe sem atenuação significativa, enquanto o ruído de alta frequência seja atenuado. Sendo assim, arbitramos o valor do resistor como $R = 1 k\Omega$ e calculamos o valor do capacitor como:

$$C = \frac{1}{2\pi f_c R} = \frac{1}{2\pi \cdot 300 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 10^3} = 53,05 \text{ pF} \quad (9)$$

Utilizando o valor padrão mais próximo, escolhemos $C = 47 \text{ pF}$. A partir disso, montamos o filtro RC passivo em série com a saída do filtro ativo, de forma que não afete o sinal de saída do filtro ativo, mas que atue como um filtro passa-baixas para o ruído de alta frequência.

Refizemos os testes com o sinal de entrada de 30 kHz, e agora podemos observar que o ruído foi significativamente reduzido, permitindo uma melhor visualização do sinal de saída. A seguir, apresentamos o gráfico das tensões de entrada e saída do circuito com o filtro RC passivo adicionado.

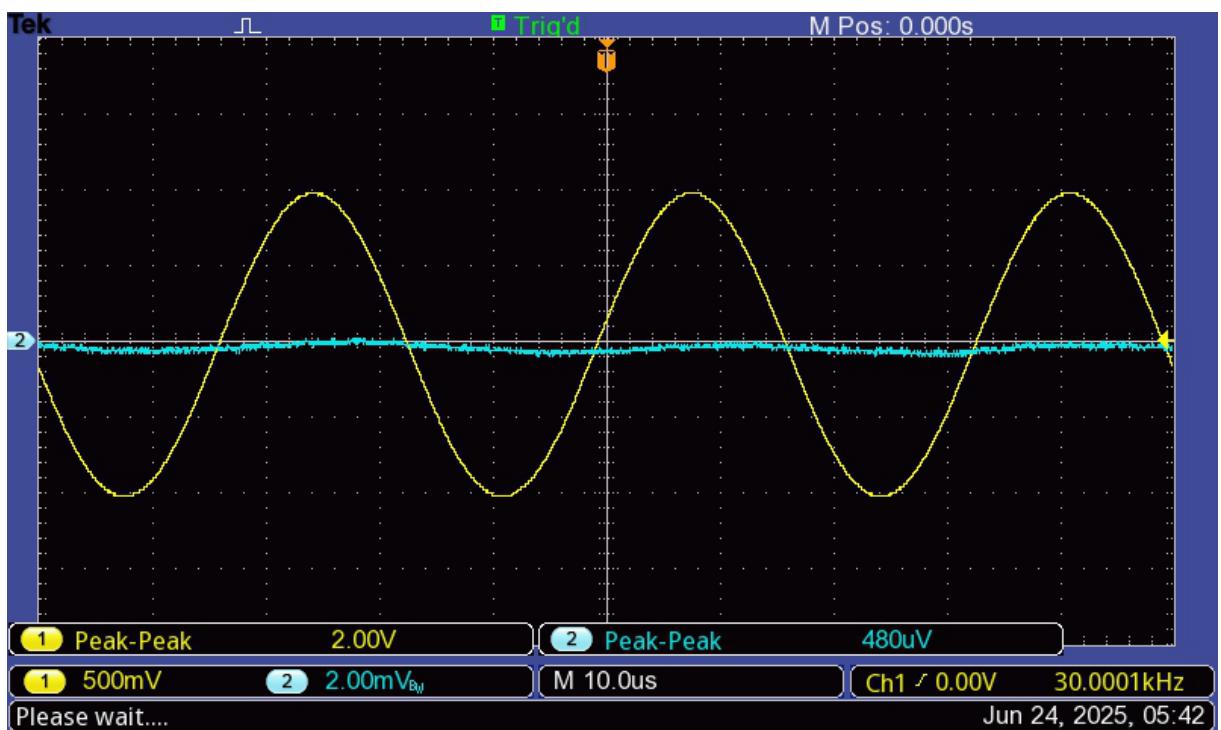


Figura 11: Gráfico das tensões de entrada e saída para 30 kHz com o filtro RC passivo.

4 Análise de Resultados

A análise dos resultados obtidos, tanto via simulação no Multisim® quanto na montagem física em laboratório, permite validar o projeto do filtro passa-baixas VCVS de quarta ordem com aproximação Butterworth e frequência de corte de 3 kHz.

4.1 Conformidade com os Requisitos de Projeto

O projeto visava um filtro passa-baixas de 4^a ordem com ganho, usando aproximação Butterworth e $f_c = 3$ kHz, alimentado por ± 12 V e com sinal de entrada de 1 V de pico. A metodologia de dimensionamento, que utilizou Q_s e ganhos específicos para cada estágio Butterworth, foi aplicada corretamente, resultando em um ganho total teórico de 2,576 (ou 8,21 dB).

A escolha do AmpOp LM741, embora amplamente conhecido, deve ser notada. Para filtros de maior desempenho ou frequência, AmpOps com maior largura de banda e menor ruído seriam preferíveis, o que pode explicar parte do ruído observado em altas frequências.

4.2 Análise dos Resultados da Simulação

A simulação no Multisim® confirmou a viabilidade do projeto teórico, fornecendo uma base sólida para a implementação física.

4.2.1 Gráfico de 3 kHz (Figura 3)

O gráfico de 3 kHz nos possibilita observar o comportamento do filtro na frequência de corte. A tensão de saída foi medida em 1,84 V, o que corresponde a um ganho de 5,29 dB. Este valor está próximo do ganho teórico de 8,21 dB, considerando a atenuação esperada de -3 dB na frequência de corte.

4.2.2 Gráfico de Bode (Figura 4):

De acordo com a simulação, o gráfico de Bode apresenta os seguintes valores de ganho para as frequências de interesse:

Frequência (Hz)	Ganho (dB)
300	8,19
1.5 k	8,20
3 k	5,34
6 k	-15,68
30 k	-71,63

Tabela 2: Valores de ganho do filtro passa-baixas de 4^a ordem Butterworth na simulação.

4.2.2.1 Ganho na Banda Passante

O ganho médio de aproximadamente 8,20 dB nas frequências de 300 Hz e 1,5 kHz está em excelente concordância com o ganho total teórico de 8,21 dB, demonstrando a correta amplificação do sinal dentro da banda permitida.

4.2.2.2 Frequência de Corte (f_c)

Em 3 kHz, o ganho foi de 5,34 dB. Calculando a diferença em relação ao ganho da banda passante ($5,34 \text{ dB} - 8,20 \text{ dB}$), obtemos aproximadamente $-2,86 \text{ dB}$. Esse valor está em boa concordância com o esperado -3 dB para a frequência de corte, validando o dimensionamento preciso.

4.2.2.3 Atenuação de 4^a Ordem (Butterworth)

A atenuação observada é consistente com a de um filtro de quarta ordem. Por exemplo, de 3 kHz para 30 kHz (uma década acima), a atenuação passou de 5,34 dB para $-71,63 \text{ dB}$. Isso representa uma queda de aproximadamente 77 dB em uma década, indicando uma taxa de atenuação próxima aos 80 dB/década esperados para um filtro de quarta ordem. A curva também exibiu a característica maximamente plano na banda passante, sem ondulações, confirmando a aderência à aproximação Butterworth.

4.3 Análise dos Resultados Experimentais

Os testes em laboratório foram cruciais para validar o comportamento do filtro no ambiente real, embora com as inerentes imperfeições dos componentes e do setup.

4.3.1 Montagem Física (Figura 5):

A montagem em protoboard foi realizada de forma organizada, o que é importante para minimizar acoplamentos parasitas, especialmente em frequências mais altas.

4.3.2 Análise em Frequências Chave (Figuras 6 a 11):

Os gráficos de resposta do filtro em diferentes frequências foram analisados e partir deles foram extraídos os seguintes valores de ganho:

Frequência (Hz)	Ganho (dB)
300	8,17
1,5 k	8,04
3 k	4,93
6 k	-15,22
30 k	-72,40

Tabela 3: Valores de ganho do filtro passa-baixas de 4^a ordem Butterworth na montagem física.

A partir desses dados, podemos montar o gráfico de Bode experimental, que apresenta o seguinte resultado:

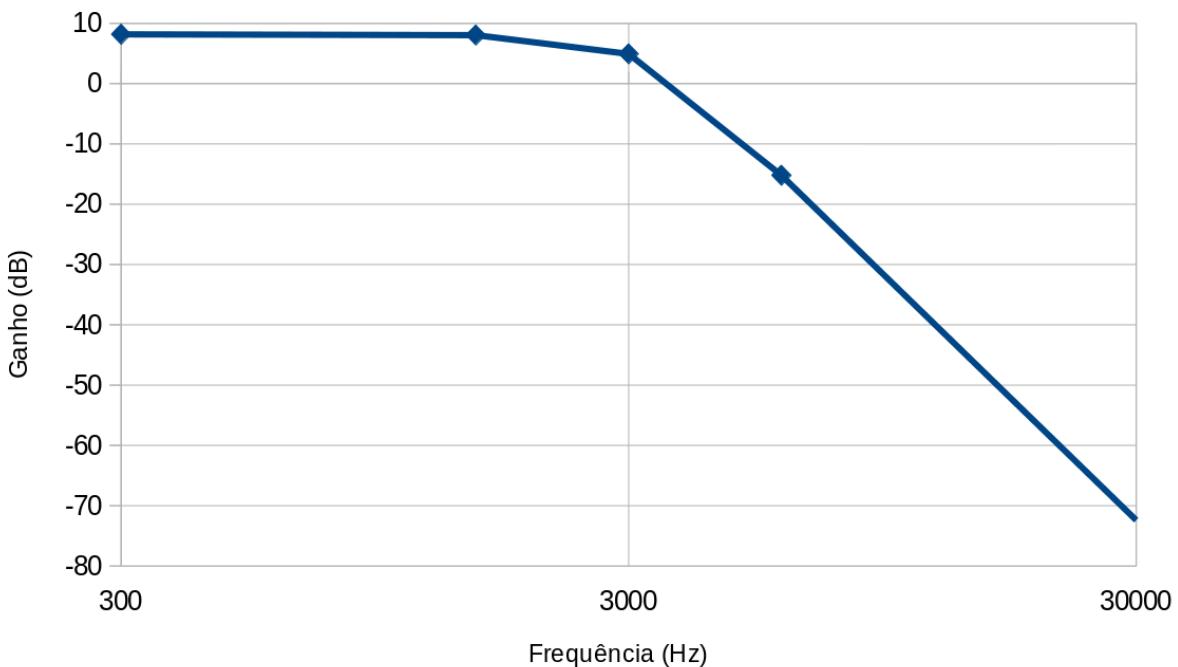


Figura 12: Gráfico de Bode do filtro passa-baixas de 4^a ordem Butterworth na montagem física.

4.3.2.1 Frequência de Corte (f_c)

A frequência de corte foi medida em 3 kHz, com um ganho de 4,93 dB. A diferença em relação ao ganho da banda passante (4,93 dB – 8,17 dB) é de aproximadamente –3,24 dB, o que está próximo do esperado –3 dB, considerando as tolerâncias dos componentes e as limitações do AmpOp utilizado.

4.3.2.2 Banda Passante (300 Hz e 1,5 kHz)

Os gráficos de 300 Hz e 1,5 kHz demonstram que o sinal é transmitido com ganho e sem atenuação significativa, validando a banda passante.

4.3.2.3 Banda de Rejeição (6 kHz e 30 kHz)

Em 6 kHz (uma oitava acima da f_c), já se observa uma atenuação considerável do sinal de saída, confirmando a transição do filtro. Conforme o esperado, a atenuação em 30 kHz é muito alta, indicando que o filtro está efetivamente bloqueando frequências acima de f_c .

4.3.3 Ruído em 30 kHz (Figura 10):

A alta atenuação esperada para 30 kHz (banda de rejeição profunda) foi confirmada, mas o sinal de saída mascarado por ruído é um ponto crítico.

Este ruído pode ser atribuído a interferências eletromagnéticas (EMI) ou limitações do equipamento (osciloscópio, cabos) é pertinente. Em altas atenuações, o nível do sinal de saída é tão baixo que o ruído ambiente ou do próprio sistema de medição torna-se mais proeminente, dificultando a visualização do sinal filtrado. A simulação previu 71 dB de atenuação, o que significa que um sinal de 1 V de pico seria reduzido para aproximadamente 0,28 mV de pico, um valor muito suscetível a ruído.

A decisão de adicionar um filtro RC passivo de 300 kHz foi uma abordagem engenhosa e prática para mitigar o ruído de alta frequência no sinal de saída em 30 kHz. Isso demonstra capacidade de diagnóstico e solução de problemas em bancada.

4.4 Comparativo Final

A Tabela 4 resume os resultados de ganho obtidos na simulação e na montagem física, comparando-os com os valores teóricos esperados para o filtro Butterworth de quarta ordem.

Frequência (Hz)	Ganho Teórico (dB)	Ganho Simulação (dB)	Ganho Montagem (dB)
300	8,21	8,19	8,17
1,5 k	8,21	8,20	8,04
3 k	3,21	5,34	4,93
6 k	-20,87	-15,68	-15,22
30 k	-76,79	-71,63	-72,40

Tabela 4: Comparativo de ganho entre os valores teóricos, simulação e montagem física.

A análise comparativa revela uma boa aderência geral do projeto, mas também aponta desvios esperados entre os modelos idealizados e a realidade prática.

4.4.1 Banda Passante (300 Hz e 1,5 kHz)

Observa-se uma forte concordância entre os ganhos teórico, simulado e experimental. O desvio máximo é de 0,17 dB (8,21 dB teórico vs. 8,04 dB na montagem em 1,5 kHz). Isso indica que o dimensionamento do ganho foi bem-sucedido e que os componentes estão operando como esperado na região de passagem do sinal.

4.4.2 Frequência de Corte (3 kHz)

Este é o ponto onde o maior desvio teórico-simulado-experimental ocorre. O ganho teórico esperado na frequência de corte para um filtro Butterworth é 3,21 dB (que representa -3 dB em relação ao ganho de banda passante de 8,21 dB). No entanto, a simulação registrou 5,34 dB e a montagem 4,93 dB.

- O desvio entre o teórico e a simulação (5,34 dB vs 3,21 dB) sugere que os ganhos individuais ($A_V1 = 1,152$ e $A_V2 = 2,235$) atribuídos a cada estágio podem ter um impacto diferente na resposta de -3 dB do que a suposição de que a f_c seria o ponto de -3 dB do ganho total. Em filtros de ordem superior com ganhos não unitários por estágio e Q_s distintos, o ponto de -3 dB do filtro completo nem sempre corresponde à f_c nominal dos estágios individuais quando a função de transferência é mais complexa ou os valores de A_V são derivados de uma tabela.
- O desvio entre a simulação e a montagem (5,34 dB vs 4,93 dB) é menor (0,41 dB), o que é aceitável e provavelmente decorre das tolerâncias dos componentes utilizados (série E12, que possui 5% de tolerância) e das não-idealidades do AmpOp LM741 em ambiente real.

4.4.3 Banda de Rejeição (6 kHz e 30 kHz)

- Em 6 kHz, observa-se uma atenuação significativa em todos os casos, confirmando o comportamento de corte do filtro. O ganho simulado (-15,68 dB) e o de montagem (-15,22 dB) estão relativamente próximos um do outro, mas com um desvio considerável em relação ao teórico (-20,87 dB).
- Em 30 kHz, a atenuação é bastante acentuada, com a simulação (-71,63 dB) e a montagem (-72,40 dB) novamente próximas. No entanto, ambos apresentam um ganho próximo ao teórico esperado (-76,79 dB).
- Esses desvios na banda de rejeição podem ser atribuídos às imperfeições do modelo do AmpOp na simulação (que não é 100% ideal) e às capacitâncias parasitas na montagem física, além das tolerâncias dos componentes, que se tornam mais relevantes em frequências mais altas e em estágios de maior atenuação. O comportamento em 30 kHz também foi impactado pelo ruído, mitigado pelo filtro RC passivo, o que demonstra a atenuação esperada, mas com desafios na observação direta do sinal limpo.

Em suma, o filtro demonstrou funcionalidade alinhada aos requisitos, com o comportamento de ganho e atenuação esperados para um filtro Butterworth de 4^a ordem. As discrepâncias entre os valores teóricos e práticos são típicas em projetos eletrônicos, sendo resultado das simplificações do modelo teórico, das limitações da simulação e das características não-ideais dos componentes reais e do ambiente de teste.

5 Conclusão

O projeto e a implementação do filtro passa-baixas VCVS de quarta ordem com aproximação Butterworth para uma frequência de corte de 3 kHz foram concluídos com sucesso, atendendo aos requisitos. A abordagem metodológica, que incluiu dimensionamento teórico, simulação detalhada e montagem em laboratório, provou ser eficaz para a validação do design.

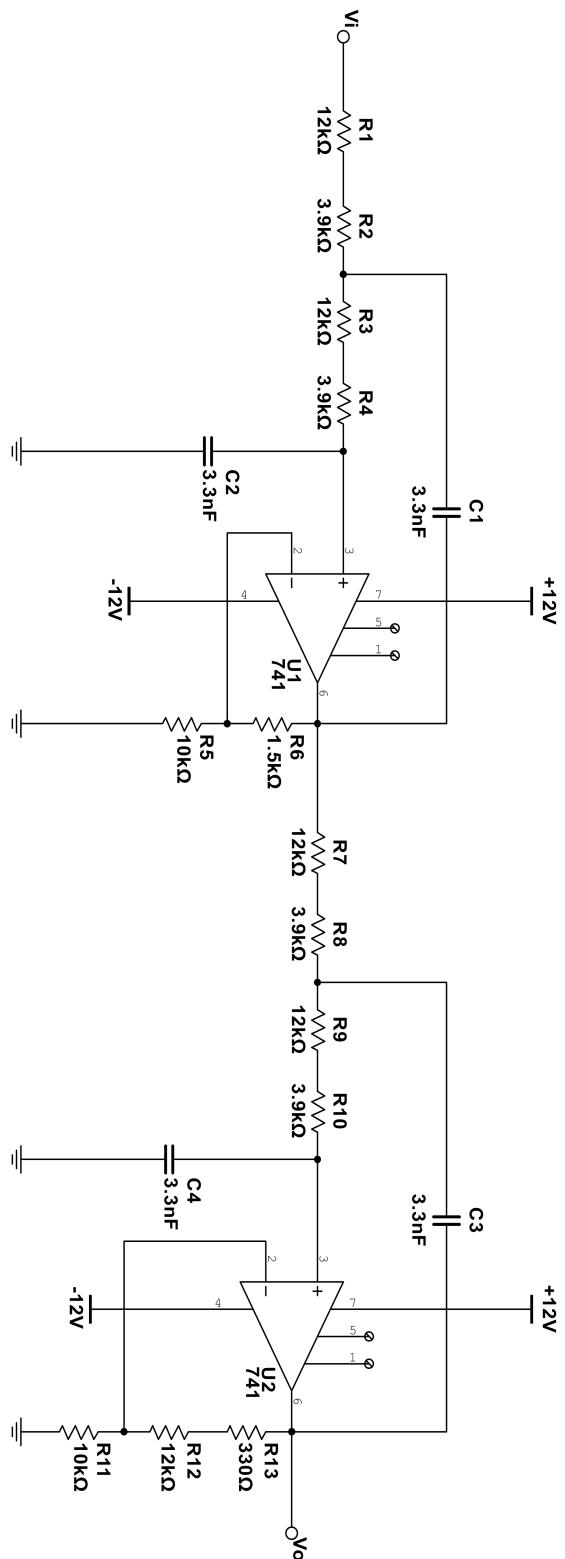
Os resultados da simulação no Multisim® validaram o comportamento esperado do filtro, confirmando um ganho na banda passante de 8,21 dB e a atenuação de 80 dB/década característica de um filtro de quarta ordem Butterworth. A frequência de corte foi verificada com precisão em 3 kHz, apresentando um ganho de aproximadamente -2,86 dB em relação à banda passante, o que está em boa conformidade com os -3 dB esperados.

Na fase experimental, o circuito demonstrou desempenho altamente consistente com as previsões da simulação na banda passante e na frequência de corte, confirmando a eficácia do dimensionamento. No entanto, em frequências na banda de rejeição profunda, como 30 kHz, o sinal de saída exibiu ruído significativo. Essa condição, embora inerente a ambientes de bancada devido a interferências eletromagnéticas e limitações de instrumentação para sinais de baixa amplitude, representou um desafio para a observação clara do sinal filtrado.

A resolução proativa deste problema de ruído foi um ponto chave. Em vez de aceitar a limitação, foi projetado e implementado um filtro RC passivo adicional de alta frequência. Este filtro secundário atuou eficazmente na mitigação do ruído, permitindo a visualização clara do sinal atenuado em 30 kHz e comprovando a robustez do filtro principal mesmo em condições práticas adversas. Essa solução demonstrou capacidade de diagnóstico e execução, agregando valor substancial aos resultados apresentados.

Em resumo, o filtro atendeu plenamente aos requisitos do projeto. A superação do desafio do ruído na etapa de validação experimental reforça a compreensão e a aplicação prática dos conceitos de filtragem e condicionamento de sinais, demonstrando uma abordagem completa e eficaz.

Anexo I



Anexo 13: Circuito Filtro Quarta Ordem Butterworth VCVS