

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

EDUARDO MANFIO

**ANÁLISE, COMPARAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DE FILTROS ANALÓGICOS
TIPO NOTCH 60 HZ PARA APLICAÇÃO EM ELETROCARDIOGRAFIA**

CAMPO MOURÃO

2021

EDUARDO MANFIO

**ANÁLISE, COMPARAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DE FILTROS ANALÓGICOS
TIPO NOTCH 60 HZ PARA APLICAÇÃO EM ELETROCARDIOGRAFIA**

**Analysis, comparison and development of 60 hz analogue notch filters for
application in electrocardiography**

Trabalho de conclusão de curso, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso, do curso Superior de Engenharia Eletrônica, do Departamento Acadêmico de Engenharia Eletrônica - DAELN - da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro em Eletrônica.

Orientador: Prof. Dr. Osmar Tormena Júnior.

CAMPO MOURÃO

2021



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

EDUARDO MANFIO

**ANÁLISE, COMPARAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DE FILTROS ANALÓGICOS
TIPO NOTCH 60 HZ PARA APLICAÇÃO EM ELETROCARDIOGRAFIA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Eletrônica da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
(UTFPR).

Data de aprovação: 24 de Novembro de 2021

Eduardo Giometti Bertogna
Doutor
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Lucas Ricken Garcia
Mestre
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Osmar Tormena Júnior
Doutor
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

CAMPO MOURÃO

2021

Agradecimentos

Agradeço primeiramente ao meu professor e orientador Dr. Osmar Tormena Júnior, por toda ajuda, por todo apoio, por todos os conselhos e principalmente pela compreensão que teve durante esse período complicado que não só eu, mas o mundo inteiro enfrentou.

Minha gratidão eterna aos meus pais, Edio Roberto Manfio e Sandra Regina Vieira dos Santos, que mesmo com todas as dificuldades, me apoiaram em toda graduação, sempre prezando pela minha felicidade e bem estar.

Agradeço imensamente também a todos os meus amigos e amigas da graduação, por todo apoio moral nos momentos difíceis, sem eles esse feito teria sido muito mais difícil de ser alcançado.

E por fim, agradeço especialmente a minha esposa Gabrieli Lima de Faria, por todo apoio, amor, carinho, compreensão e incentivo durante toda nossa trajetória e agradeço ao meu amado filho Elano de Faria Manfio, que foi meu principal pilar para dar forças nessa etapa final da graduação

RESUMO

Equipamentos médicos, assim como na maioria dos equipamentos eletrônicos, são passíveis de sofrer interferência eletromagnética da faixa de frequência da rede elétrica do sistema brasileiro: 60 hertz. Para solucionar esse problema são implementados nesses equipamentos filtros *notch*, capazes de atenuar ao máximo o sinal dos 60 hertz. O objetivo deste trabalho é estudar e comparar diversas topologias de filtro *notch* e desenvolver um filtro analógico de baixo custo, que possa ser aplicado em um eletrocardiógrafo. Com o auxílio do software *LTSpice XVII*, foram realizadas diversas simulações de topologias diferentes em 2^a, 4^a e 6^a ordens com aproximações de filtros diferentes e analisados todos os resultados obtidos e por fim, implementadas na prática as topologias com os melhores resultados.

Palavras chave: filtros *notch*; eletrocardiografia; filtro analógico.

ABSTRACT

Medical equipment, as in most electronic equipment, is liable to suffer electromagnetic interference from the 60 hertz of the power grid and, consequently, have its performance affected. To solve this problem, *notch* filters are implemented in this equipment, capable of attenuating the 60 hertz signal to the maximum. The objective of the work is to study and compare several *notch* filter topologies and develop a low-cost analog filter, which can be applied to an electrocardiograph. With *LTSpice XVII*, several simulations of different topologies in 2nd, 4th and 6th orders were carried out with different filter approximations and all the obtained results were analyzed and finally, the topologies with the best results were implemented in practice.

Key words: *notch* filter; analog filter; eletrocardiography.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Comparação das técnicas de filtragem.....	13
Figura 2 - Filtro <i>notch</i> na topologia Sallen-Key.....	16
Figura 3 - Filtro <i>notch</i> na topologia MultiFeedBack.....	18
Figura 4 - Filtro <i>notch</i> na topologia Biquad.....	19
Figura 5 - Resposta em magnitude de um filtro passa-baixas Butterworth.....	21
Figura 6 - Atraso de grupo do filtro Butterworth.....	21
Figura 7 - Resposta em magnitude de um filtro passa-baixas Chebyshev I.....	22
Figura 8 - Atraso de grupo do filtro Chebyshev I.....	22
Figura 9 - Resposta em magnitude de um filtro passa-baixas Elíptico.....	23
Figura 10 - Atraso de grupo do filtro Elíptico.....	23
Figura 11 - Topologia Sallen Key 2ª ordem Butterworth.....	27
Figura 12 - Resposta em magnitude da Sallen Key 2ª ordem Butterworth.....	27
Figura 13 - Atraso de grupo da Sallen Key 2ª ordem Butterworth.....	27
Figura 14 - Densidade espectral de potência de um ECG.....	28
Figura 15 - Resposta em magnitude da Sallen Key Butterworth 2ª ordem.....	30
Figura 16 - Atraso de grupo da Sallen Key Butterworth 2ª ordem.....	30
Figura 17 - Resposta em magnitude da Sallen Key Butterworth 4ª ordem.....	31
Figura 18 - Atraso de grupo da Sallen Key Butterworth 4ª ordem.....	31
Figura 19 - Resposta em magnitude da Sallen Key Butterworth 6ª ordem.....	31
Figura 20 - Atraso de grupo da Sallen Key Butterworth 6ª ordem.....	31
Figura 21 - Resposta em magnitude da Sallen Key Chebyshev 2ª ordem.....	31
Figura 22 - Atraso de grupo da Sallen Key Chebyshev 2ª ordem.....	31
Figura 23 - Resposta em magnitude da Sallen Key Chebyshev 4ª ordem.....	32
Figura 24 - Atraso de grupo da Sallen Key Chebyshev 4ª ordem.....	32
Figura 25 - Resposta em magnitude da Sallen Key Chebyshev 6ª ordem.....	32
Figura 26 - Atraso de grupo da Sallen Key Chebyshev 6ª ordem.....	32
Figura 27 - Resposta em magnitude da Sallen Key Elíptico 2ª ordem.....	32
Figura 28 - Atraso de grupo da Sallen Key Elíptico 2ª ordem.....	32
Figura 29 - Resposta em magnitude da Sallen Key Elíptico 4ª ordem.....	33
Figura 30 - Atraso de grupo da Sallen Key Elíptico 4ª ordem.....	33
Figura 31 - Resposta em magnitude da Sallen Key Elíptico 6ª ordem.....	33
Figura 32 - Atraso de grupo da Sallen Key Elíptico 6ª ordem.....	33
Figura 33 - Resposta em magnitude da MultiFeedBack Butterworth 2ª ordem.....	33
Figura 34 - Atraso de grupo da MultiFeedBack Butterworth 2ª ordem.....	33
Figura 35 - Resposta em magnitude da MultiFeedBack Butterworth 4ª ordem.....	34
Figura 36 - Atraso de grupo da MultiFeedBack Butterworth 4ª ordem.....	34
Figura 37 - Resposta em magnitude da MultiFeedBack Butterworth 6ª ordem.....	34
Figura 38 - Atraso de grupo da MultiFeedBack Butterworth 6ª ordem.....	34
Figura 39 - Resposta em magnitude da MultiFeedBack Chebyshev 2ª ordem.....	34
Figura 40 - Atraso de grupo da MultiFeedBack Chebyshev 2ª ordem.....	34
Figura 41 - Resposta em magnitude da MultiFeedBack Chebyshev 4ª ordem.....	35
Figura 42 - Atraso de grupo da MultiFeedBack Chebyshev 4ª ordem.....	35
Figura 43 - Resposta em magnitude da MultiFeedBack Chebyshev 6ª ordem.....	35

Figura 44 - Atraso de grupo da MultiFeedBack Chebyshev 6ª ordem.....	35
Figura 45 - Reposta em magnitude da MultiFeedBack Elíptico 2ª ordem.....	35
Figura 46 - Atraso de grupo da MultiFeedBack Elíptico 2ª ordem.....	35
Figura 47 - Reposta em magnitude da MultiFeedBack Elíptico 4ª ordem.....	36
Figura 48 - Atraso de grupo da MultiFeedBack Elíptico 4ª ordem.....	36
Figura 49 - Reposta em magnitude da MultiFeedBack Elíptico 6ª ordem.....	36
Figura 50 - Atraso de grupo da MultiFeedBack Elíptico 6ª ordem.....	36
Figura 51 - Reposta em magnitude da Biquad Butterworth 2ª ordem.....	36
Figura 52 - Atraso de grupo da Biquad Butterworth 2ª ordem.....	36
Figura 53 - Reposta em magnitude da Biquad Butterworth 4ª ordem.....	37
Figura 54 - Atraso de grupo da Biquad Butterworth 4ª ordem.....	37
Figura 55 - Reposta em magnitude da Biquad Butterworth 6ª ordem.....	37
Figura 56 - Atraso de grupo da Biquad Butterworth 6ª ordem.....	37
Figura 57 - Reposta em magnitude da Biquad Chebyshev 2ª ordem.....	37
Figura 58 - Atraso de grupo da Biquad Chebyshev 2ª ordem.....	37
Figura 59 - Reposta em magnitude da Biquad Chebyshev 4ª ordem.....	38
Figura 60 - Atraso de grupo da Biquad Chebyshev 4ª ordem.....	38
Figura 61 - Reposta em magnitude da Biquad Chebyshev 6ª ordem.....	38
Figura 62 - Atraso de grupo da Biquad Chebyshev 6ª ordem.....	38
Figura 63 - Reposta em magnitude da Biquad Elíptico 2ª ordem.....	38
Figura 64 - Atraso de grupo da Biquad Elíptico 2ª ordem.....	38
Figura 65 - Reposta em magnitude da Biquad Elíptico 4ª ordem.....	39
Figura 66 - Atraso de grupo da Biquad Elíptico 4ª ordem.....	39
Figura 67 - Reposta em magnitude da Biquad Elíptico 6ª ordem.....	39
Figura 68 - Atraso de grupo da Biquad Elíptico 6ª ordem.....	39
Figura 69 - TL082.....	42
Figura 70 - TL074.....	42
Figura 71 - Topologia Sallen Key com componentes ideais.....	43
Figura 72 - Topologia Sallen Key com componentes comerciais.....	43
Figura 73 - Sallen Key Butterworth 2ª ordem na placa perfurada.....	44
Figura 74 - Atenuação da topologia Sallen Key Butterworth 2ª ordem.....	45
Figura 75 - Topologia Biquad com componentes ideais.....	46
Figura 76 - Topologia Biquad com componentes comerciais.....	46
Figura 77 - Topologia Biquad Butterworth 2ª ordem na PCI.....	47
Figura 78 - Atenuação da topologia Biquad Butterworth 2ª ordem.....	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tabela de aproximação do filtro passa-baixas Butterworth.....	27
Tabela 2 - Tabela de aproximação do filtro passa-baixas Chebyshev.....	28
Tabela 3 - Tabela de aproximação do filtro passa-baixas Elíptico.....	28
Tabela 4 - Resultados da topologia Sallen Key.....	42
Tabela 5 - Resultados da topologia MultiFeedBack.....	42
Tabela 6 - Resultados da topologia Biquad.....	42
Tabela 7 - Preço dos materiais da topologia Sallen Key.....	46
Tabela 8 - Preço dos materiais da topologia Biquad.....	49

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
1.1 Objetivo Geral.....	12
1.2 Objetivos Específicos.....	12
1.3 Justificativa.....	13
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	15
2.1 Topologias.....	15
2.1.1 Sallen-key.....	15
2.1.2 MultiFeedBack (MFB).....	17
2.1.3 Biquad.....	19
2.2 Aproximações de filtragem.....	20
2.2.1 Butterworth	21
2.2.2 Chebyshev I.....	22
2.2.3 Elíptico.....	23
2.3 Efeitos do atraso de grupo e consequências.....	24
3 METODOLOGIA.....	25
3.1 Dimensionamento.....	25
3.2 Simulação no LTSpice.....	27
3.3 Análise de resultados e implementação.....	28
4 RESULTADOS.....	30
4.1 Resultados das simulações.....	30
4.1.1 Simulação da topologia Sallen Key.....	30
4.1.2 Simulação da topologia MultiFeedBack (MFB).....	33
4.1.3 Simulação da topologia Biquad (Biquadrática).....	36
4.2 Análise dos resultados simulados.....	39
4.3 Implementação do circuito.....	41
4.3.1 Implementação da topologia Sallen Key.....	43

4.3.2 Implementação da topologia Biquad.....	45
4.4 Componentes práticos.....	48
5 CONCLUSÃO.....	50
REFERÊNCIAS.....	51

1 INTRODUÇÃO

Os filtros analógicos do tipo *notch* são muito úteis para a indústria eletrônica de modo geral e, um dos principais motivos para sua aplicação é a grande quantidade de aparelhos eletrônicos passíveis de sofrer interferências de determinadas frequências fixas de operação, entre elas o ciclo de 60 hertz, oriundos do sistema de distribuição de rede elétrica. Em aparelhos médicos sensíveis, como é o caso do eletrocardiógrafo, a interferência dessa frequência é prejudicial tanto na aquisição quanto na leitura do sinal e, por essa razão, devem possuir filtros capazes de minimizar ao máximo tal interferência (WANHAMMAR, 2009).

No entanto, filtros eficientes possuem, normalmente algumas desvantagens como alto custo, alta complexidade ou distorções do sinal. Por meio de simulações utilizando algumas topologias de filtro *notch* analógicos, este estudo pretende encontrar filtros com melhor relação custo/benefício, maior desempenho para aplicação em eletrocardiógrafos

1.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é estudar diversas topologias de filtro *notch* analógicos para aplicação em eletrocardiógrafos, compará-los para verificar seu desempenho e eficiência e por fim, desenvolver um filtro *notch* analógico de baixo custo que possa ser aplicado em um eletrocardiógrafo.

1.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos, estão relacionados os seguintes procedimentos:

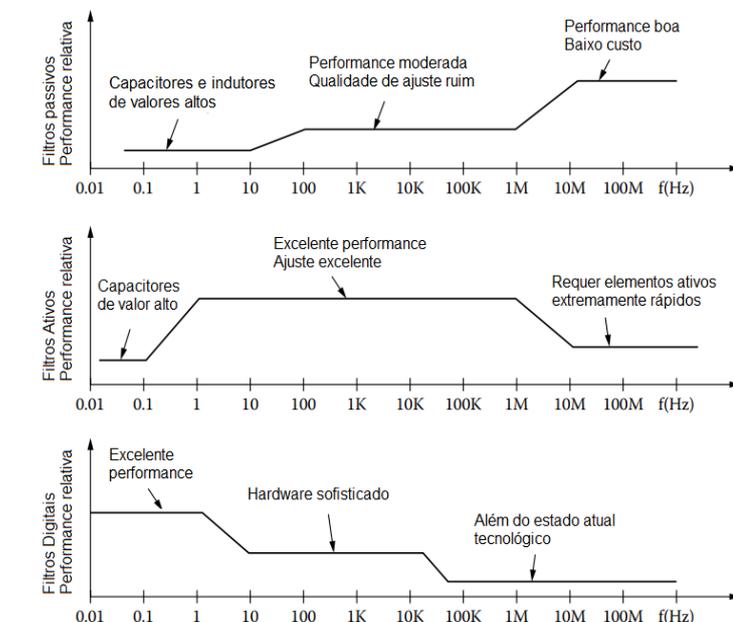
- Simulação da resposta em frequência no *Software* LTSpice XVII das seguintes topologias:
 - MultiFeedBack (MultiFeedBack);

- Sallen-Key;
 - Biquad (Biquadrática).
- Implementar nas topologias citadas nas seguintes aproximações:
 - Butterworth de 2^a, 4^a e 6^a ordem;
 - Chebyshev I de 2^a, 4^a e 6^a ordem;
 - Elíptico de 2^a, 4^a e 6^a ordem.
 - Analisar a resposta dos filtros de todos os tipos, ordens e topologias citadas e escolher a mais adequada para a aplicação.

1.3 Justificativa

É possível realizar o tratamento de um sinal usando a tecnologia analógica e tecnologia digital. Cada uma dessas tecnologias possui suas vantagens e desvantagens, como é possível observar na Figura 1.

Figura 1 – Comparação das técnicas de filtragem.



Fonte: Pactitis (2007, p 18)

Atualmente, o filtro digital é uma ferramenta poderosa para tratamento de sinais, pois eles possuem uma excelente performance somada com uma baixa variação de atraso de grupo, que é uma característica importante para processar sinais em tempo real (PACTITIS, 2007). No entanto, microcontroladores capazes de realizar instruções de processamento digital de sinais são componentes caros e não são tão fáceis de serem encontrados no comércio. Com a tecnologia analógica, por outro lado, é possível dimensionar filtros com boas respostas em magnitude e fase, com componentes baratos e de fácil acesso (PACTITIS, 2007).

Como o sinal cardíaco possui frequências que ultrapassam os 100 Hz, a aplicação de um simples filtro passa-baixas no circuito seria prejudicial para a aquisição do sinal, pois o filtro estaria atenuando componentes importantes do sinal. Por isso a escolha do filtro *notch* (também conhecido como filtro rejeita faixa) pois ele pode atenuar apenas uma pequena faixa de frequência e permitir a passagem do resto do sinal (SORNMO; LAGUNA, 2005).

Portanto, a proposta do presente trabalho é promover uma análise de diversas topologias de filtros *notch* analógicos, comparar e por fim, desenvolver um filtro eficiente e de baixo custo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta a teoria fundamental das três topologias de filtro *notch* que serão analisadas (Sallen-Key, MultiFeedBack e Biquad). Também serão introduzidos os conceitos e características sobre as aproximações de filtragem que serão implementados em cada uma delas (Butterworth, Chebyshev I e Elíptico). Por fim, será discutido o efeito do atraso de grupo sobre um sinal e suas consequências.

2.1 Topologias

Para os diversos tipos de filtros que existem (passa-baixas, passa-altas, rejeita faixas, passa-banda e passa-todas), existem também diversas topologias para cada um deles. As topologias, influenciam diretamente nos principais parâmetros do filtro pois cada uma delas possui uma função transferência diferente, quantidade de componentes diferente ou quantidade de realimentações por exemplo. Portanto, cada topologia possui peculiaridades, com vantagens e desvantagens, como demonstra a figura a seguir.

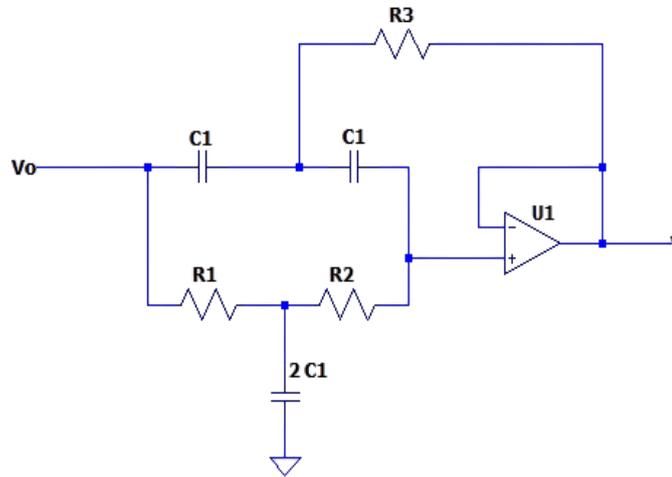
2.1.1 Sallen-key

A topologia Sallen-Key (Figura 2), também chamada de topologia VCVS (Voltage Controlled Voltage Source, do inglês, fonte de tensão controlada por tensão) é particularmente valorizada por sua simplicidade, como demonstra a Figura 2. A topologia foi implementada pela primeira vez por R. P. Sallen e L. Key no laboratório Lincoln do MIT (Instituto de Tecnologia de Massachusetts, Estados Unidos) em 1955 (JUNG, 2005).

É uma das topologias de filtro mais utilizadas e uma das razões é que sua configuração mostra menor dependência entre a desempenho do filtro e o desempenho do amplificador operacional. Isso ocorre pelo fato de que nessa

configuração o amplificador operacional age como um amplificador, ao contrário de um integrador, que minimiza o ganho e largura de banda (JUNG, 2005).

Figura 2 – Filtro *notch* na topologia Sallen-Key



Fonte: Autoria própria (2020)

Outra vantagem é que a proporção entre os valores do maior e menor resistor e capacitor é baixa, tornando uma topologia simples de ser aplicada. No entanto, na topologia Sallen-Key, o fator de qualidade Q é muito sensível para o valor dos elementos do circuito, principalmente se o fator Q for muito alto, o que pode causar instabilidade no sistema. Além disso, possui a desvantagem de ter ganho unitário, não oferecendo a opção de ajuste de ganho (JUNG, 2005).

Para dimensionar os componentes do circuito, foram utilizadas as seguintes equações, deduzidas a partir da função transferência do circuito.

$$R_1 = \frac{1}{2\omega_0 c Q C_1} \quad (1)$$

$$R_2 = \frac{2cQ}{\omega_0 C_1} \quad (2)$$

$$R_3 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (3)$$

$$C_1 = \frac{10}{f_c} \mu \quad (4)$$

Em que:

ω_0 é a frequência de corte, em radianos por segundo.

Q é o fator de qualidade. Ele é dado pela razão entre a frequência de corte central pela largura de banda: $Q = \frac{f_c}{BW}$. Ou seja, quanto mais alto for o fator de qualidade, mais precisa e seletiva vai ser a resposta do filtro. No entanto, valores de Q muito altos podem provocar instabilidade no sistema.

BW (do inglês bandwidth) é a largura de banda, que em um filtro rejeita faixa é dada por $BW = f_2 - f_1$, que são as frequências de corte nas bandas de transição.

A Equação 4 é definida como regra de projeto, mas os capacitores podem ser dimensionados para valores comerciais para facilitar a implementação dos mesmos (JOHNSON, 1980).

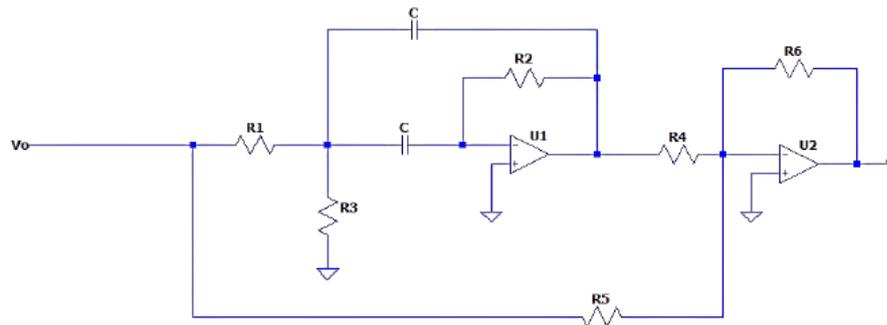
A constante c é obtida a partir de uma tabela de valores já pré-estabelecidos. Essa constante varia de acordo com a ordem do filtro e aproximação implementada. Ela é de extrema importância pois é a partir dela que é possível aumentar a ordem do filtro, cascadeando os estágios, sem alterar suas características principais (ganho, frequência e fator de qualidade). As variáveis citadas e procedimentos são utilizados em todas as topologias estudadas (JOHNSON, 1980).

2.1.2 MultiFeedBack (MFB)

Diferentemente da topologia Sallen-Key, o MultiFeedBack (Figura 3) utiliza o amplificador operacional na configuração de integrador, portanto, os parâmetros do amplificador operacional influenciam muito mais em sua função transferência. Também é mais difícil de implementar um circuito com um fator de qualidade Q alto e frequências altas devido às limitações do ganho de malha aberta do amplificador operacional (JUNG, 2005).

Os circuitos são projetados para um fator de qualidade baixo ($Q < 20$). Isso permite que o circuito possua um bom ajuste na frequência e no próprio fator Q , tornando-o mais estável e menos sensível, ao contrário da topologia Sallen-Key (JUNG, 2005).

Figura 3 – Filtro *notch* na topologia MultiFeedBack



Fonte: Autoria própria (2020)

Para dimensionar os componentes do circuito, foram utilizadas as seguintes equações, deduzidas a partir da função transferência do circuito.

$$R_1 = \frac{cQ}{2\omega_0 C_1} \quad (5)$$

$$R_2 = \frac{R_1}{c^2 Q^2 - 1} \quad (6)$$

$$R_4 = 4R_1 \quad (7)$$

$$R_5 = 2R_3 \quad (8)$$

$$R_6 = KR_3 \quad (9)$$

$$C_1 = \frac{10}{f_c} \mu F \quad (10)$$

Em que:

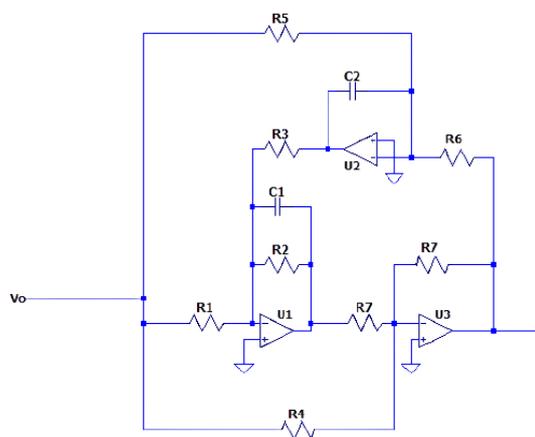
K é o ganho da resposta em magnitude. Nesta topologia, o valor de R_3 é arbitrário, o que torna possível uma boa regulação do ganho e um dimensionamento equilibrado dos componentes.

2.1.3 Biquad

O nome desta topologia deriva de sua função transferência que é uma função quadrática tanto no numerador quanto no denominador, tornando-a uma função biquadrática. Essa configuração oferece uma implementação mais precisa, à custa do aumento de elementos no circuito (Figura 4). Com ela é possível ajustar os três principais parâmetros do filtro (ganho, fator de qualidade e frequência) de forma independente (JUNG, 2005).

Pelo fato de todos os parâmetros serem ajustáveis de forma independente, os efeitos de variação devido a temperatura e as tolerâncias dos próprios componentes se tornam menos prejudiciais à precisão do circuito. Mas como desvantagem temos a quantidade de componentes que o torna mais caro e a configuração dos amplificadores operacionais, que atuam como integradores, semelhante à topologia MultiFeedBack, o que leva às mesmas limitações no ganho de largura de banda (JUNG, 2005).

Figura 4 – Filtro *notch* na topologia Biquad



Fonte: Autoria própria (2020)

Para dimensionar os componentes do circuito, foram utilizadas as seguintes equações, deduzidas a partir da função transferência do circuito:

$$\beta = \frac{1}{cQ} \quad (11)$$

$$R_1 = \frac{1}{K\beta\omega_0 C_1} \quad (12)$$

$$R_2 = KR_1 \quad (13)$$

$$R_3 = \frac{1}{\omega_0 C_1} \quad (14)$$

$$R_4 = \frac{R_7}{K} \quad (15)$$

$$R_5 = \frac{1}{K\omega_0 C_2} \quad (16)$$

$$R_6 = \frac{C_1 R_3}{C_2} \quad (17)$$

Os valores de C_2 e R_7 são arbitrários, no entanto, para facilitar o dimensionamento dos componentes foi feito $C_2 = C_1$ e $R_4 = R_7$.

2.2 Aproximações de filtragem

Para projetar um filtro, seja ele um passa-baixas, passa-altas, passa-banda ou rejeita faixas, é essencial saber o tipo de aproximação que será implementada nele, pois ela irá influenciar diretamente em parâmetros importantes da resposta do filtro, como o *roll-off* (taxa de decaimento), distorção de atraso de grupo e oscilações na banda de passagem e na banda de rejeição (WANHAMMAR, 2009).

Existem diversas aproximações, mas neste trabalho serão abordadas apenas três aproximações de filtros: Butterworth, Chebyshev I e Elíptico. Essas aproximações são bem conhecidas e largamente utilizadas em projetos de filtros, cada uma delas possuindo suas qualidades e peculiaridades (JOHNSON, 1980).

Quadro 1 – Características das aproximações de filtros

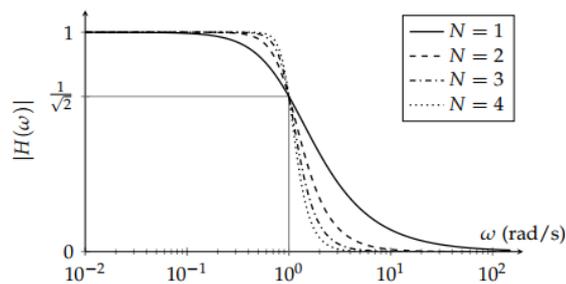
Aproximações de filtros	Resposta em magnitude	Varição do atraso de grupo
Bessel	Ruim	Baixa
Butterworth	Razoável	Média
Chebyshev I	Boa	Alta
Chebyshev II	Boa	Alta
Elíptico	Muito boa	Muito alta

Fonte: Autoria própria (2020)

2.2.1 Butterworth

A aproximação de Butterworth é uma das mais utilizadas por sua simplicidade de ajuste e pelas suas boas propriedades. Os filtros de Butterworth possuem como característica uma resposta bem plana em sua banda de passagem e globalmente monotônica. Essa aproximação tem um fator de *roll-off* suave, tornando sua frequência de corte pouco abrupta em relação as demais aproximações, sendo necessário uma ordem de filtro mais elevada para maior eficiência, como demonstra a Figura 5. No entanto, a aproximação de Butterworth é aquela que demonstra menor variação de atraso de grupo, o que é um ponto positivo no quesito de integridade do sinal (TORMENA, 2019).

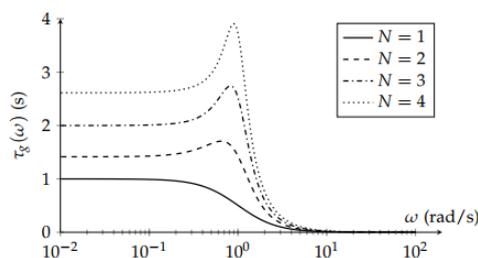
Figura 5 – Resposta em magnitude de um filtro passa-baixas Butterworth



Fonte: Tormena (2019, p 1)

Como dito anteriormente, a variação do atraso de grupo do filtro de Butterworth é bem menor comparado com as outras aproximações que serão analisadas a seguir, no entanto, conforme a ordem do filtro aumenta, o atraso de grupo aumenta proporcionalmente, como pode ser observado na Figura 6 (TORMENA, 2019).

Figura 6 – Atraso de grupo do filtro Butterworth

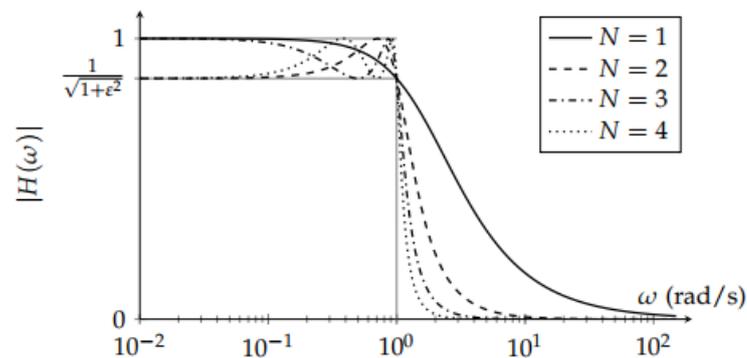


Fonte: Tormena (2019, p 1)

2.2.2 Chebyshev I

A aproximação de Chebyshev I também é comumente utilizada em projetos de filtros. Diferentemente da aproximação de Butterworth, o Chebyshev I não tem uma resposta plana em sua banda de passagem, mas sim uma oscilação com amplitude constante entre dois limites de tolerância, chamada de *equiripple*. Outra característica do Chebyshev I é que seu *roll-off* é mais abrupto se comparado com o Butterworth, como é demonstrado na Figura 7 (WANHAMMAR, 2009).

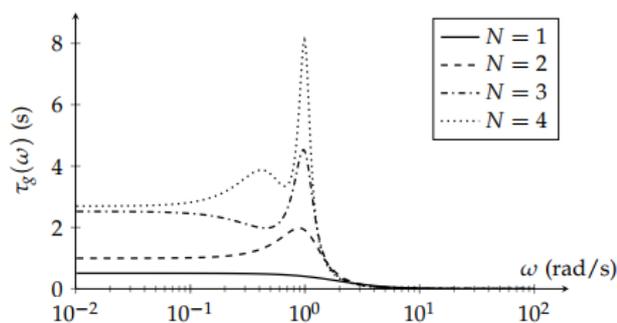
Figura 7 – Resposta em magnitude de um filtro passa-baixas Chebyshev I



Fonte: Tormena (2019, p 1)

Essa aproximação demonstra uma eficiência maior, não sendo necessário uma ordem tão elevada quanto seria para Butterworth. No entanto, a distorção gerada pelo atraso de grupo nessa aproximação acaba sendo bem maior, podendo afetar o sinal de forma negativa (Figura 8).

Figura 8 – Atraso de grupo do filtro Chebyshev I

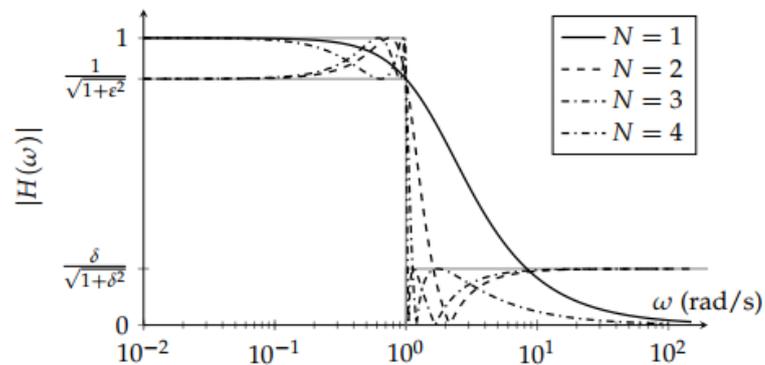


Fonte: Tormena (2019, p 1)

2.2.3 Elíptico

O filtro elíptico (Figura 9), também conhecido como Cauer em algumas literaturas, possui o *roll-off* mais abrupto dentre todas as outras aproximações abordadas. Portanto, ele consegue atingir um bom nível de eficiência em uma ordem baixa (TORMENA, 2019). Outro ponto que deve ser levado em consideração é que o filtro elíptico também possui *equiripple* tanto na banda de passagem quanto na banda de rejeição (WANHAMMAR, 2009).

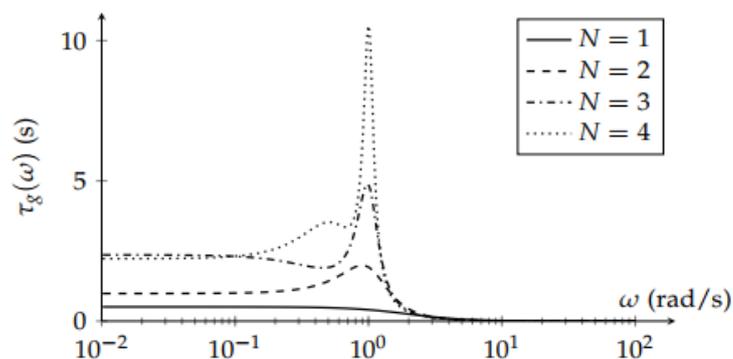
Figura 9 - Resposta em magnitude de um filtro passa-baixas Elíptico



Fonte: Tormena (2019, p 1)

No entanto, como desvantagem o filtro elíptico possui a pior resposta em atraso de grupo entre todas as aproximações abordadas, o que causa uma grande distorção do sinal, como mostra a Figura 10 (TORMENA, 2019).

Figura 10 - Atraso de grupo do filtro Elíptico



Fonte: Tormena (2019, p 1)

2.3 Efeitos do atraso de grupo e consequências

Quando um sinal passa por um processo de filtragem analógica é absolutamente normal que sua fase seja alterada, conseqüentemente, gerando um certo atraso de grupo. No entanto, dependendo da ordem do filtro e do tipo de aproximação implementada nele, o atraso pode ser maior ou menor.

Para aplicações em áudio, por exemplo, o atraso de grupo de alguns milissegundos não é tão relevante pois a audição humana não consegue perceber a distorção do sinal. Mas para aplicações que exigem monitoramento em tempo real, como em ECGs (eletrocardiogramas) e EEGs (eletroencefalogramas), uma variação no atraso de grupo muito alta causa uma distorção no sinal que pode prejudicar muito no diagnóstico do exame (WANHAMMAR, 2009).

Portanto, para projetar um filtro para aplicação em ECG, deve ser considerado tanto sua eficiência em rejeitar a interferência eletromagnética da rede quanto sua resposta em atraso de grupo pois esse fator irá influenciar na fidelidade do sinal que está sendo analisado.

3 METODOLOGIA

O desenvolvimento foi dividido em três etapas: o dimensionamento das três topologias de 2ª, 4ª e 6ª ordens com a implementação das três aproximações, a simulação das topologias já dimensionadas no software LTspice XVII e por fim, a análise dos resultados.

3.1 Dimensionamento

Para dimensionar o valor dos componentes de cada topologia, de determinada ordem e aproximação, foi necessário a utilização das tabelas de aproximações de filtros passa-baixas para obter o valor da constante c , já mencionada anteriormente, e cada aproximação e ordem possui um valor de constante c diferente.

A função transferência de um filtro rejeita faixa é derivada da função transferência normalizada de um filtro passa-baixas, devido sua simplicidade. Por este motivo é possível utilizar os dados da tabela de aproximações do filtro passa-baixas em um filtro rejeita faixa.

A partir dos valores das tabelas demonstradas a seguir, foi possível dimensionar o valor dos componentes das topologias com as aproximações, como mostram as Tabelas 1, 2 e 3.

Tabela 1 – Tabela de aproximação do filtro passa-baixas Butterworth

Butterworth 2° Ordem	c
Estágio 1	1
Butterworth 4° Ordem	c
Estágio 1	1
Estágio 2	1
Butterworth 6° Ordem	c
Estágio 1	1
Estágio 2	1
Estágio 3	1

Fonte: Autoria própria (2020)

Tabela 2 – Tabela de aproximação do filtro passa-baixas Chebyshev

Chebyshev 2° Ordem	c
Estágio 1	3,314037
Chebyshev 4° Ordem	c
Estágio 1	1,330031
Estágio 2	0,622925
Chebyshev 6° Ordem	c
Estágio 1	1,129387
Estágio 2	0,696374
Estágio 3	0,263361

Fonte: Autoria própria (2020)

Tabela 3 – Tabela de aproximação do filtro passa-baixas Elíptico

Elíptico 2° Ordem	c
Estágio 1	3,328375
Elíptico 4° Ordem	c
Estágio 1	0,854559
Estágio 2	1,261686
Elíptico 6° Ordem	c
Estágio 1	0,621688
Estágio 2	0,941234
Estágio 3	0,054358

Fonte: Autoria própria (2020)

Como a proposta é usar filtros de 2^a, 4^a e 6^a ordens, foi necessário apenas cascatear estágios de 2° ordem para aumentar a ordem. É possível notar que em cada estágio a constante c é diferente (com exceção da aproximação de Butterworth). Um detalhe importante a salientar é que esses valores são referentes à um *equiripple* de 0.1 dB (decibéis) para as aproximações de Chebyshev e Elíptico.

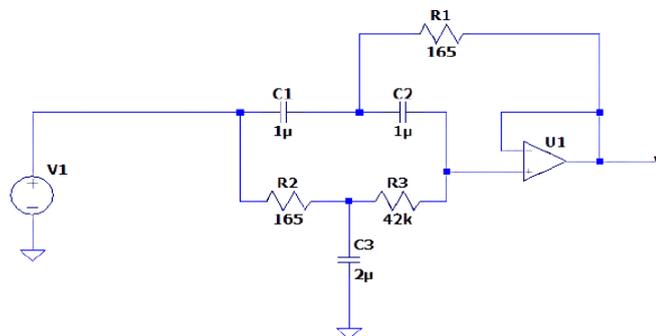
Devido a limitação de algumas topologias, todos os circuitos foram dimensionados para um fator de qualidade Q igual a 10, que não é alto o suficiente para causar qualquer tipo de instabilidade e também não é tão baixo para tornar o filtro impreciso e atenuar frequências importantes do sinal cardíaco.

3.2 Simulação no LTSpice

Nesta etapa, para simular a resposta em frequência e em fase dos filtros, foi utilizada como ferramenta o *software* LTSpice XVII. Vale ressaltar que as simulações dos circuitos foram realizadas utilizando componentes ideais com comportamentos ideais, para comparar qual das topologias possui o melhor desempenho teórico.

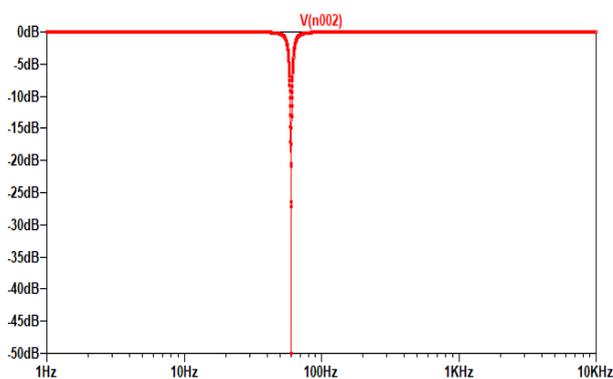
Na Figura 11 é mostrado como exemplo um filtro *notch* Sallen-Key Butterworth de 2° ordem e nas Figuras 12 e 13 são apresentadas simulações realizadas no LTSpice:

Figura 11 – Topologia Sallen-Key de 2° ordem Butterworth



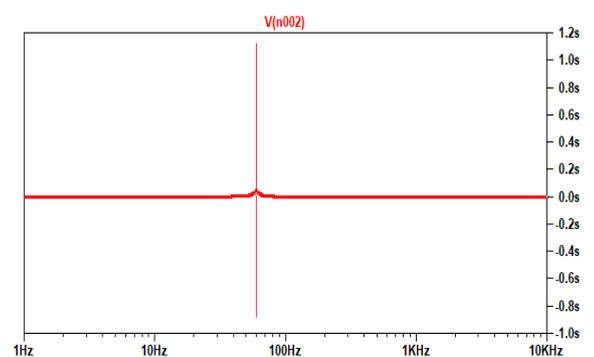
Fonte: Autoria própria (2020)

Figura 12 – Resposta em magnitude



Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 13 – Atraso de grupo



Fonte: Autoria própria (2021)

O mesmo procedimento foi realizado para todas as topologias, em todas as ordens e aproximações.

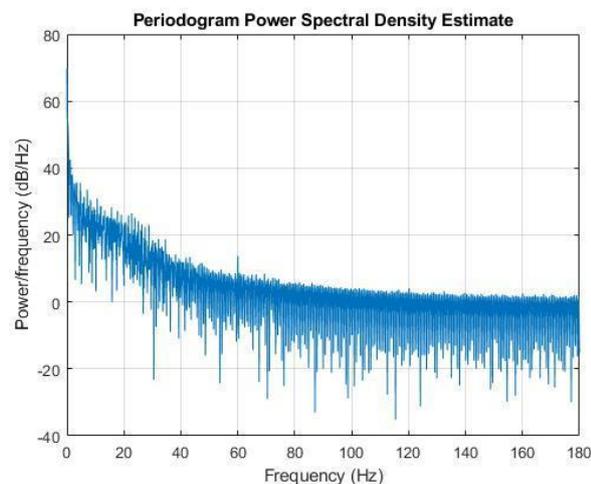
3.3 Análise de resultados e implementação

Foram levados em consideração os seguintes fatores para a análise dos resultados: a eficiência do filtro (sua capacidade de rejeitar a frequência dos 60 Hz), a variação do atraso de grupo e o custo para implementação do filtro.

Para analisar a eficiência de cada topologia foi necessário apenas compará-las, observando a atenuação na frequência de 60 Hz. Já para a variação de atraso de grupo, o critério para análise foi medir a variação do atraso entre a faixa de frequência de 1 Hz e 40 Hz que é onde está concentrada a maior parte da potência do sinal do ECG, como pode ser observado na PSD (densidade espectral de potência) de um sinal de ECG simulado pelo software MATLAB (Figura 14), adquirido de um banco de dados disponibilizado pelo MIT (Instituto de Tecnologia de Massachussets) (MOODY; MARK, 2005a).

A região onde mais ocorre variação de atraso de grupo é na região de rejeição, entre 58 Hz e 62 Hz, mas como o filtro está rejeitando essa faixa de frequência do sinal, ela não se torna tão relevante (MOODY; MARK, 2005b).

Figura 14 – Densidade espectral de potência de um sinal ECG



Fonte: Autoria própria (2020)

Após a análise e comparação dos resultados obtidos nas simulações, os circuitos com os melhores resultados serão implementados para a placa de circuito impresso e testadas no osciloscópio, inserindo nelas um sinal senoidal de 60 Hz, $1V_{pp}$ e checando a atenuação desse mesmo sinal na saída.

4 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados e discussões da metodologia utilizada para dimensionar e analisar as topologias de filtro *notch* e suas aproximações. São apresentados os resultados das simulações realizadas no LTSpice XVII, uma comparação teórica entre todas as topologias e por fim, o resultado prático.

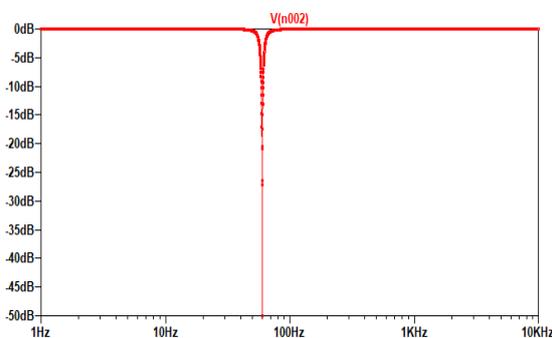
4.1 Resultados das simulações

Neste subcapítulo serão demonstrados os resultados de todas as simulações realizadas no software LTSpice XVII. Essas simulações consistem na resposta em magnitude e na variação de atraso de grupo de cada topologia de filtro *notch* abordada neste trabalho.

4.1.1 Simulação da topologia Sallen Key

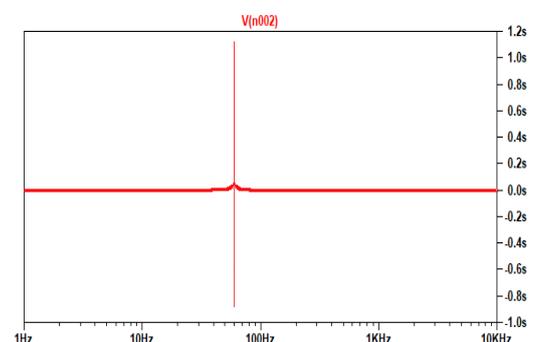
Primeiramente, é mostrado abaixo (Figuras 15 a 20) os resultados das simulações da topologia Sallen Key na aproximação Butterworth, de 2^a, 4^a e 6^a ordens.

Figura 15 – Resposta em magnitude, 2^a ordem



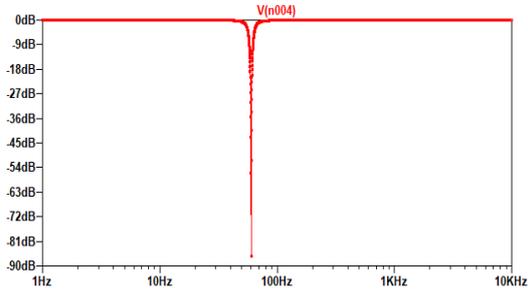
Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 16 – Variação de atraso de grupo, 2^a ordem



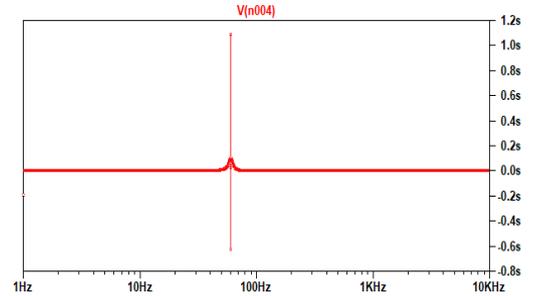
Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 17 - Resposta em magnitude, 4ª ordem



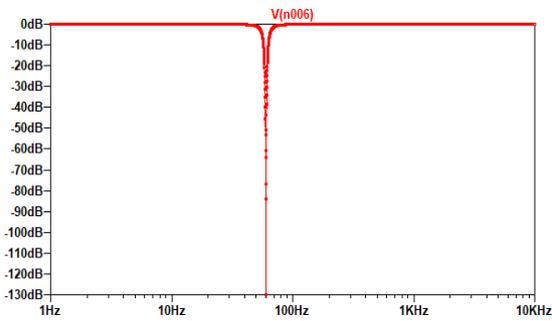
Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 18 - Variação de atraso de grupo, 4ª ordem



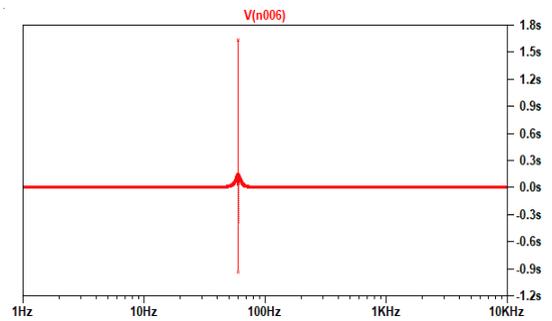
Fonte: Autoria própria (2020)

Figura 19 - Resposta em magnitude, 6ª ordem



Fonte: Autoria própria (2021)

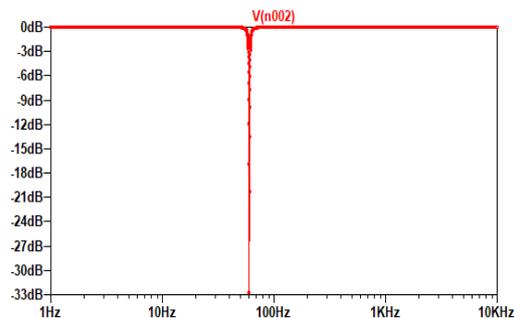
Figura 20 - Variação de atraso de grupo, 6ª ordem



Fonte: Autoria própria (2021)

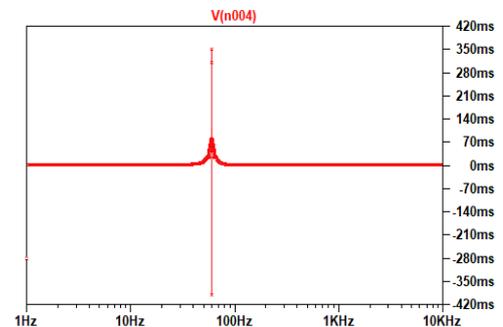
A seguir são apresentados os resultados (Figuras 21 a 26) da topologia Sallen Key com a aproximação em Chebyshev I de 2ª, 4ª e 6ª ordem.

Figura 21 – Resposta em magnitude, 2ª ordem



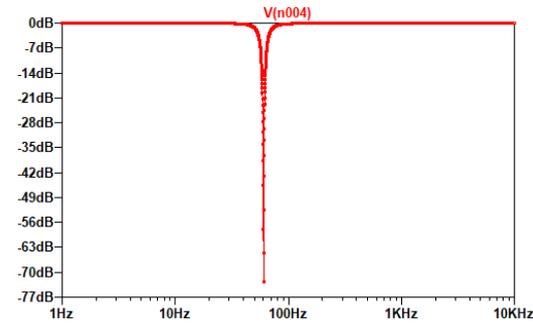
Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 22 – Variação de atraso de grupo, 2ª ordem



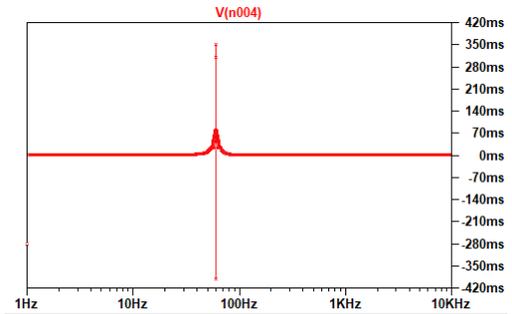
Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 23 – Resposta em magnitude, 4ª ordem



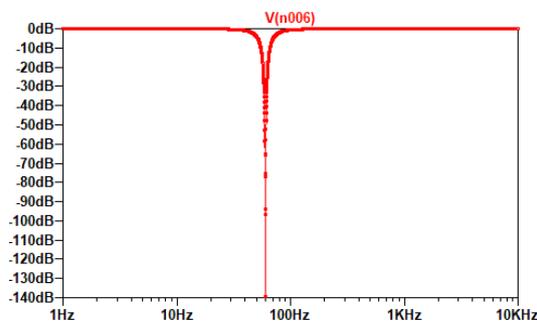
Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 24 – Variação de atraso de grupo, 4ª ordem



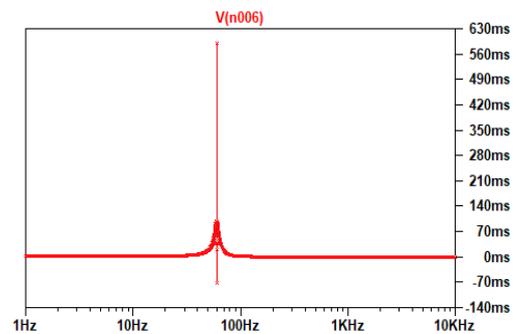
Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 25 – Resposta em magnitude, 6ª ordem



Fonte: Autoria própria (2021)

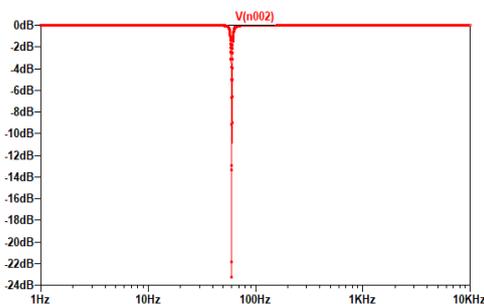
Figura 26 – Variação de atraso de grupo, 6ª ordem



Fonte: Autoria própria (2021)

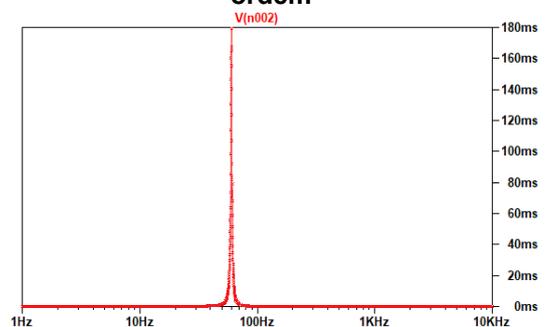
E para finalizar a topologia Sallen-Key, seguem abaixo (Figuras 27 a 32) os resultados das simulações com a implementação da aproximação de filtro Elíptico.

Figura 27 – Resposta em magnitude, 2ª ordem



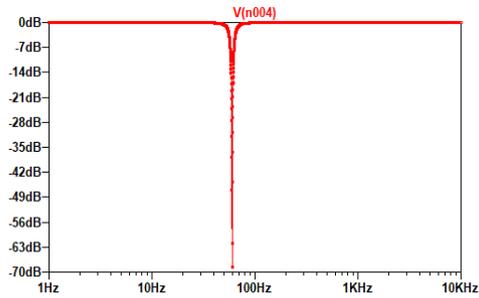
Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 28 – Variação de atraso de grupo, 2ª ordem



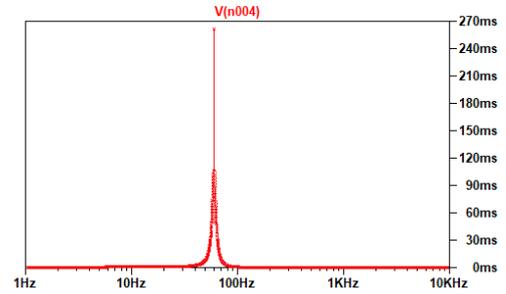
Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 29 – Resposta em magnitude, 4ª ordem



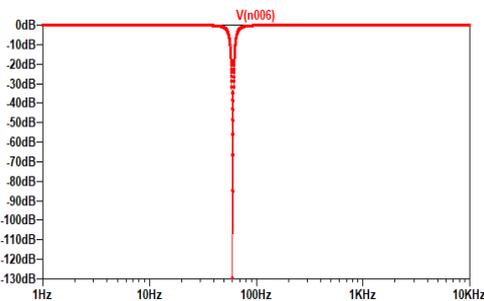
Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 30 – Variação de atraso de grupo, 4ª ordem



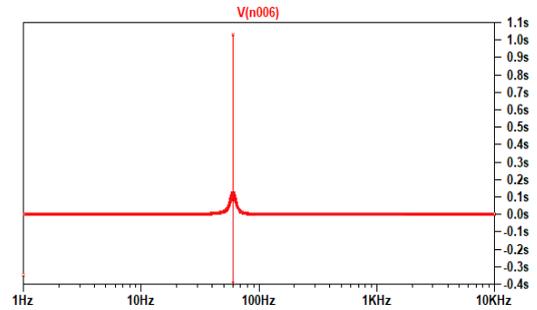
Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 31 – Resposta em magnitude, 6ª ordem



Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 32 – Variação de atraso de grupo, 6ª ordem

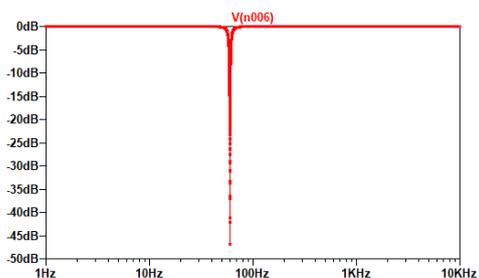


Fonte: Autoria própria (2021)

4.1.2 Simulação da topologia MultiFeedBack (MFB)

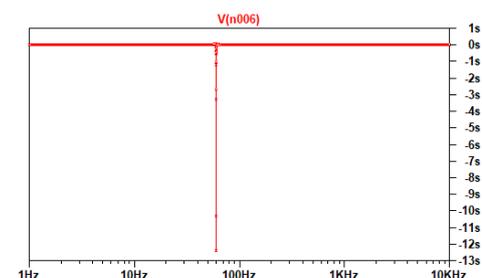
Abordando agora a topologia MFB, são apresentados abaixo (Figuras 33 a 38) os resultados das simulações na aproximação de Butterworth em 2ª, 4ª e 6ª ordens.

Figura 33 – Resposta em magnitude, 2ª ordem



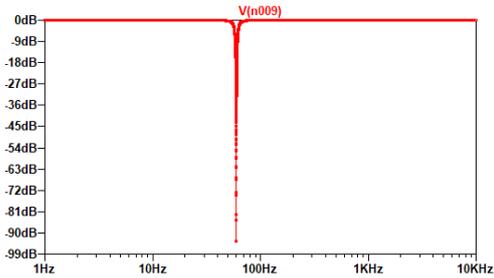
Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 34 – Variação de atraso de grupo, 2ª ordem



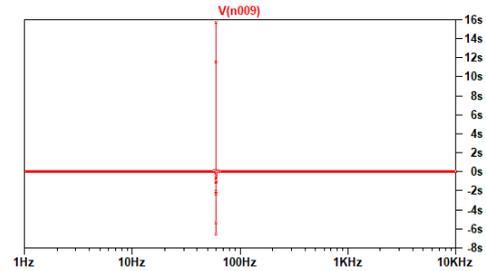
Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 35 – Resposta em magnitude, 4ª ordem



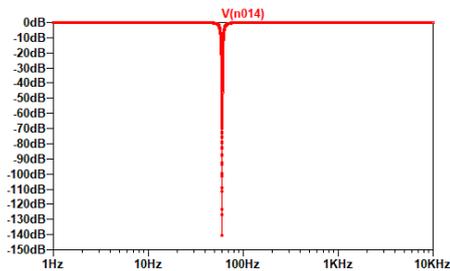
Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 36 – Variação de atraso de grupo, 4ª ordem



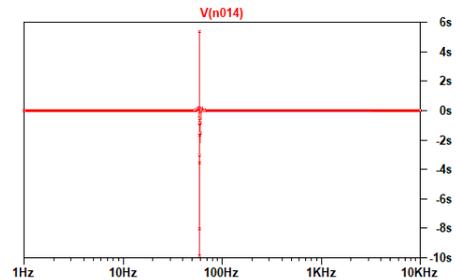
Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 37 – Resposta em magnitude, 6ª ordem



Fonte: Autoria própria (2021)

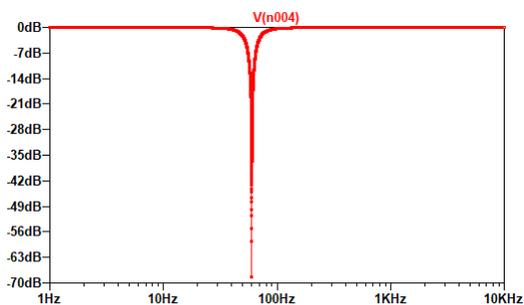
Figura 38 – Variação de atraso de grupo, 6ª ordem



Fonte: Autoria própria (2021)

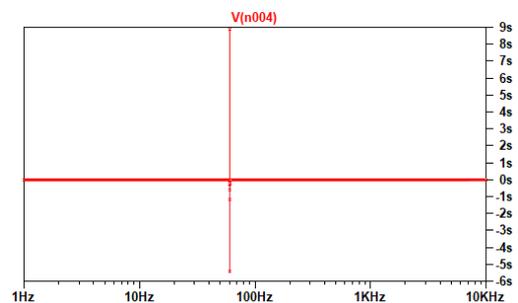
Abaixo são apresentados (Figuras 39 a 44) os resultados obtidos da simulação da topologia MFB com a implementação da aproximação de Chebyshev I em 2ª, 4ª e 6ª ordens.

Figura 39 - Resposta em magnitude, 2ª ordem



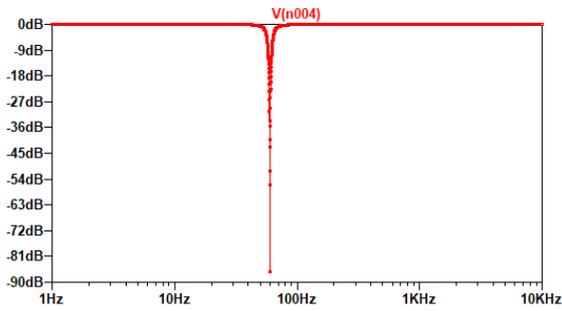
Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 40 - Variação do atraso de grupo, 2ª ordem



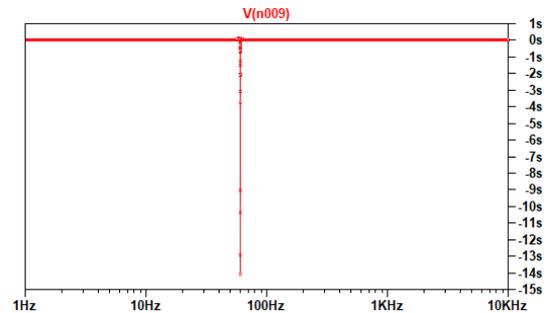
Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 41 - Resposta em magnitude, 4ª ordem



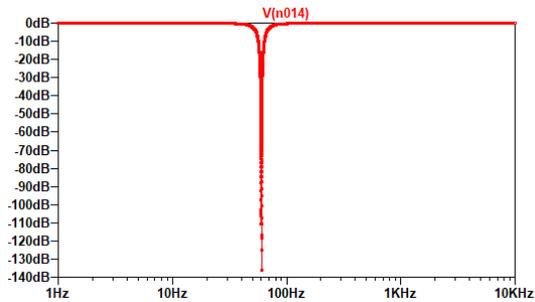
Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 42 - Variação do atraso de grupo, 4ª ordem



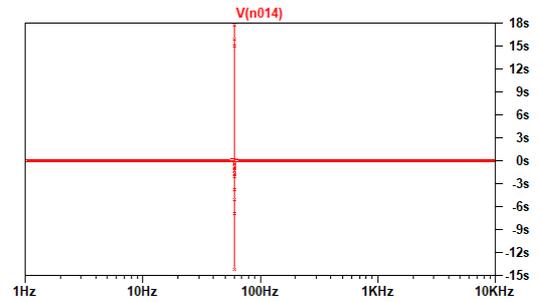
Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 43 - Resposta em magnitude, 6ª ordem.



Fonte: Autoria própria (2021).

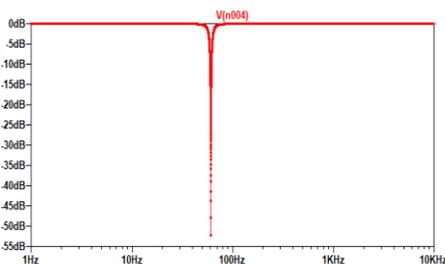
Figura 44 - Variação do atraso de grupo, 6ª ordem.



Fonte: Autoria própria (2021)

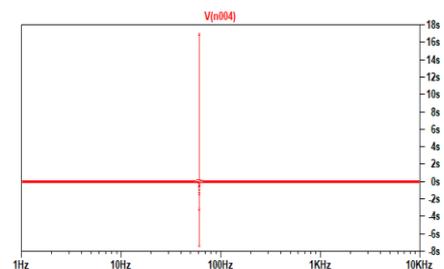
Para finalizar a topologia MultiFeedBack, são apresentados (Figuras 45 a 50) os resultados das simulações com a implementação da aproximação Elíptica em 2ª, 4ª e 6ª ordens.

Figura 45 – Resposta em magnitude, 2ª ordem



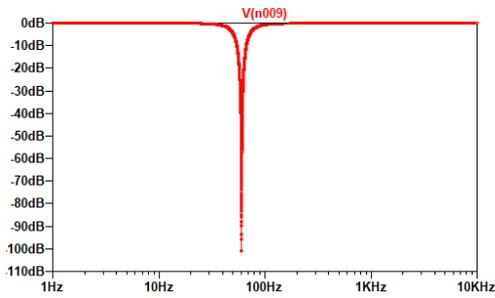
Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 46 – Variação do atraso de grupo, 2ª ordem



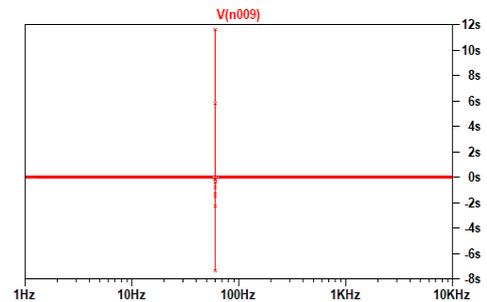
Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 47 – Resposta em magnitude, 4ª ordem



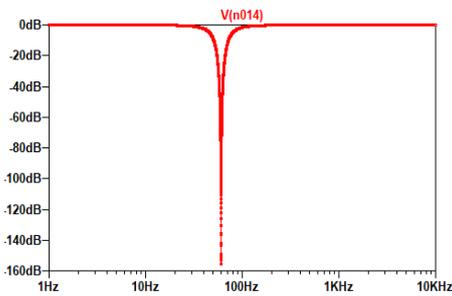
Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 48 – Variação do atraso de grupo, 4ª ordem



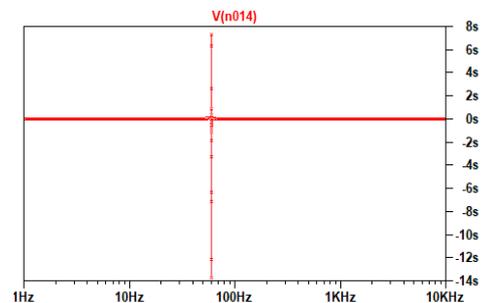
Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 49 – Resposta em magnitude, 6ª ordem



Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 50 – Variação do atraso de grupo, 6ª ordem

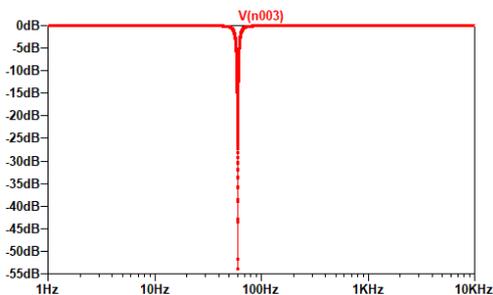


Fonte: Autoria própria (2021)

4.1.3 Simulação da topologia Biquad (Biquadrática)

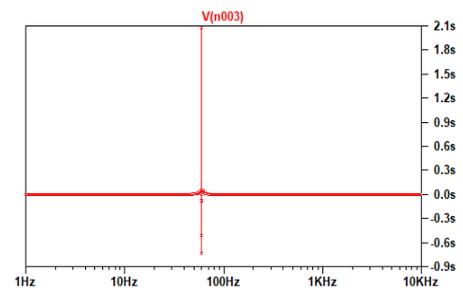
E para terceira e última topologia abordada neste trabalho, o mesmo processo é aplicado. Primeiramente, serão demonstrados (Figuras 51 a 56) os resultados da implementação da aproximação de Butterworth, em 2ª, 4ª e 6ª ordens.

Figura 51 – Resposta em magnitude, 2ª ordem



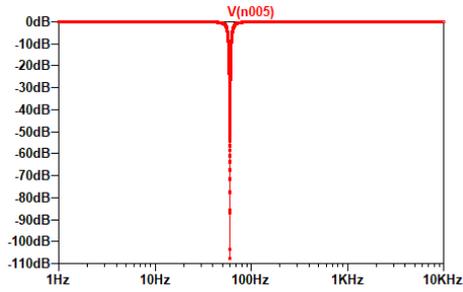
Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 52 – Variação do atraso de grupo, 2ª ordem



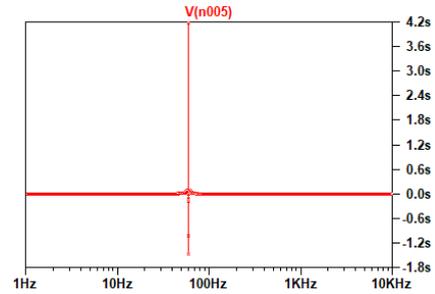
Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 53 – Resposta em magnitude, 4ª ordem



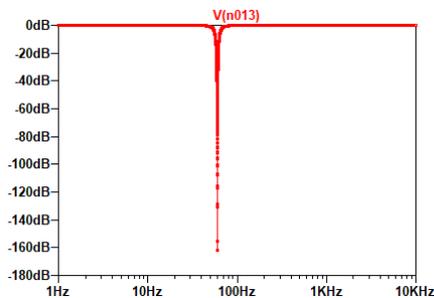
Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 54 – Variação do atraso de grupo, 4ª ordem



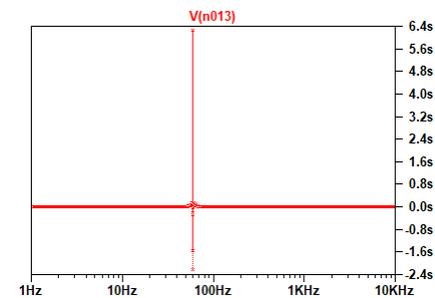
Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 55 – Resposta em magnitude, 6ª ordem



Fonte: Autoria própria (2021)

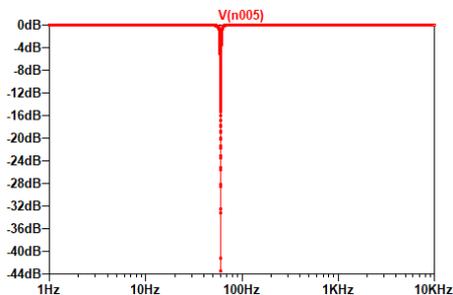
Figura 56 – Variação do atraso de grupo, 6ª ordem



Fonte: Autoria própria (2021)

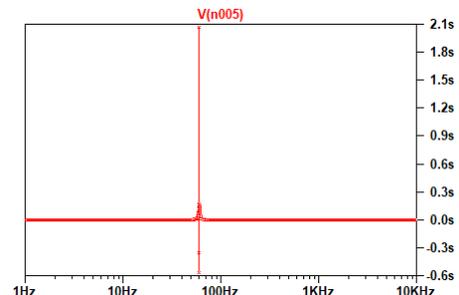
Serão demonstrados abaixo (Figuras 57 a 62) os resultados das simulações da topologia Biquad com a implementação da aproximação de Chebyshev I, em 2ª, 4ª e 6ª ordens.

Figura 57 – Resposta em magnitude, 2ª ordem



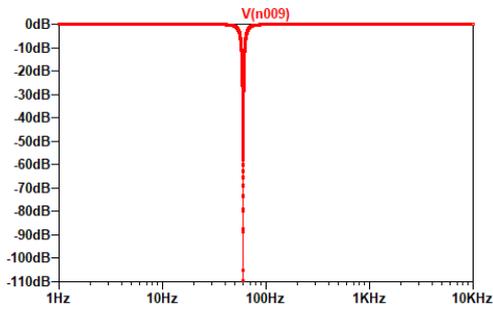
Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 58 – Variação do atraso de grupo, 2ª ordem



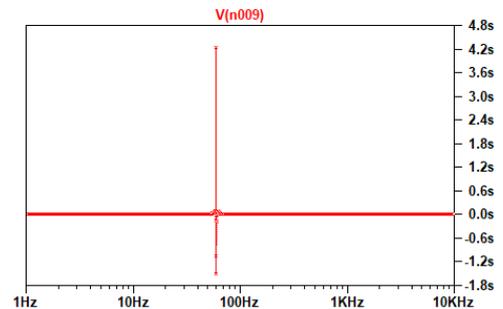
Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 59 – Resposta em magnitude, 4ª ordem



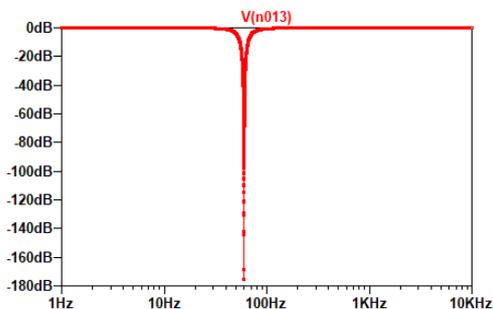
Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 60 – Variação do atraso de grupo, 4ª ordem



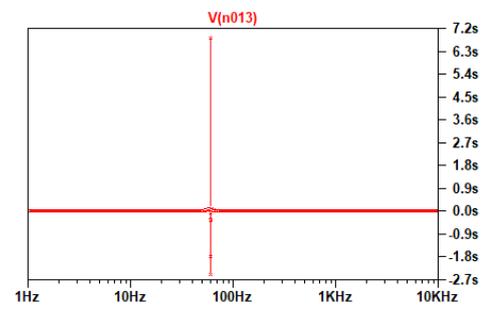
Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 61 – Resposta em magnitude, 6ª ordem



Fonte: Autoria própria (2021)

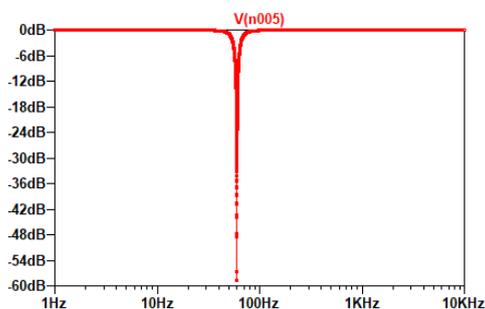
Figura 62 – Variação do atraso de grupo, 6ª ordem



Fonte: Autoria própria (2021)

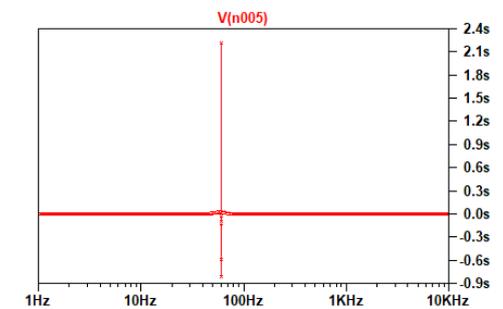
Por fim, terminando a topologia Biquad com a implementação da aproximação Elíptica, em 2ª, 4ª e 6ª ordens, nas Figuras 63 a 68.

Figura 63 – Resposta em magnitude, 2ª ordem



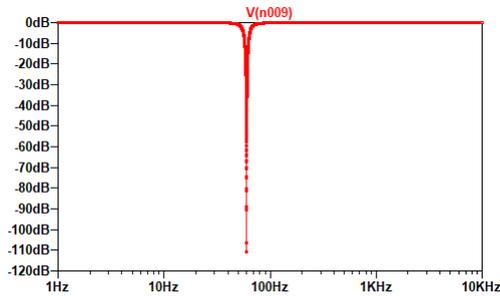
Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 64 – Variação do atraso de grupo, 2ª ordem



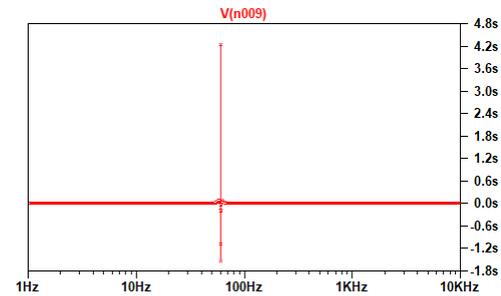
Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 65 – Resposta em magnitude, 4ª ordem



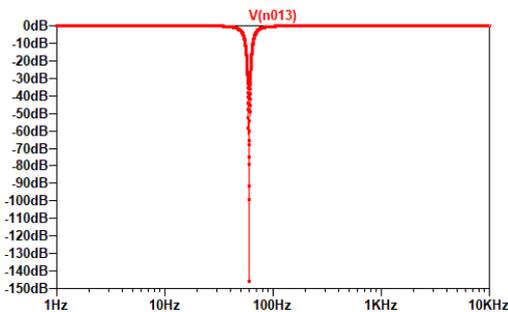
Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 66 – Variação do atraso de grupo, 4ª ordem



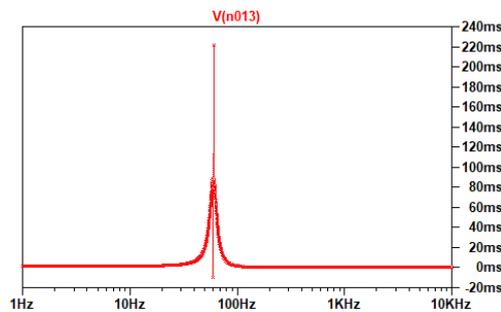
Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 67 – Resposta em magnitude, 6ª ordem



Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 68 – Variação do atraso de grupo, 6ª ordem



Fonte: Autoria própria (2021)

4.2 Análise dos resultados simulados

Neste subcapítulo serão mostrados e comparados os resultados obtidos das simulações do LTSpice XVII com o uso de tabelas. Enfatizando que todas as simulações foram realizadas com componentes ideais e com valores não comerciais, pois desta forma é possível comparar a eficiência de todas as topologias de forma teórica, para usar como uma base para implementação do circuito na prática.

Como foi descrito anteriormente na metodologia, os critérios adotados para comparação de resultados foram a atenuação do sinal na frequência dos 60 Hz e a variação do atraso de grupo medida entre 1 Hz e 40 Hz.

Serão apresentadas a seguir nas Tabelas 4, 5 e 6 as topologias Sallen Key, MultiFeedBack e Biquad com os resultados de atenuação e variação de atraso de grupo para cada aproximação (Butterworth, Chebyshev I e Elíptico) em 2ª, 4ª e 6ª ordens.

Tabela 4 – Resultados da topologia Sallen Key

Ordem do filtro	Sallen Key					
	Butterworth		Chebyshev I		Elíptico	
	Atenuação (dB)	Atraso de grupo (ms)	Atenuação (dB)	Atraso de grupo (ms)	Atenuação (dB)	Atraso de grupo (ms)
2	-29,2	0,996	-26,65	0,31	-22,81	0,324
4	-57,61	1,901	-51,82	2,408	-67,22	1,901
6	-85,67	2,942	-97,87	5,237	-101,41	3,51

Fonte: Autoria própria (2021)

Tabela 5 – Resultados da topologia MultiFeedBack

Ordem do filtro	MultiFeedBack					
	Butterworth		Chebyshev I		Elíptico	
	Atenuação (dB)	Atraso de grupo (ms)	Atenuação (dB)	Atraso de grupo (ms)	Atenuação (dB)	Atraso de grupo (ms)
2	-21,96	0,868	-34,24	0,78	-29,02	2,899
4	-42,71	1,342	-58,7	1,505	-61,95	4,839
6	-65,67	2,135	-103,2	4,13	-116,04	8,29

Fonte: Autoria própria (2021)

Tabela 6 – Resultados da topologia Biquad

Ordem do filtro	Biquad					
	Butterworth		Chebyshev I		Elíptico	
	Atenuação (dB)	Atraso de grupo (ms)	Atenuação (dB)	Atraso de grupo (ms)	Atenuação (dB)	Atraso de grupo (ms)
2	-52,7	1,004	-42,35	0,34	-57,74	1,708
4	-105,35	1,912	-106,93	2,314	-109,17	2,337
6	-157,97	3,08	-171,36	5,465	-138,92	4,955

Fonte: Autoria própria (2021)

Observando as tabelas acima é possível concluir que boa parte dos resultados condizem com a teoria quando se trata da comparação entre as aproximações. A aproximação de Butterworth, por exemplo, é a que possui a menor variação de atraso de grupo nas três topologias e em todas as ordens. A Elíptica por outro lado, possui uma ótima atenuação do sinal porém é a aproximação que possui a maior variação de atraso de grupo em quase todos os casos, resultado que condiz com a teoria também.

Outro ponto que é possível de se observar é que entre todas as topologias, a Biquad foi a que apresentou os melhores valores de atenuação do sinal, com pouca

diferença na variação do atraso de grupo comparada com as topologias de Sallen Key e MultiFeedBack.

Comparando as topologias Sallen Key e MultiFeedBack apenas, é possível afirmar que a aproximação de Chebyshev I foi mais eficaz na MultiFeedBack do que na Sallen Key tanto em termos de atenuação quanto em atraso de grupo. No entanto, a aproximação de Butterworth teve um desempenho melhor na topologia Sallen Key no quesito de atenuação, com poucas diferenças no atraso de grupo. Em relação a aproximação elíptica, a topologia Sallen Key apresentou uma variação de atraso de grupo bem menor que a topologia MultiFeedBack, por outro lado, sua atenuação do sinal foi inferior comparada com a MFB.

4.3 Implementação do circuito

Esta etapa descreverá o processo de como os circuitos com os melhores resultados foram implementados para placas de circuito impresso, o teste no osciloscópio, a lista de materiais e o custo de cada projeto.

Foram escolhidas as topologias Sallen Key 2ª ordem com a aproximação em Butterworth e a Biquad 2ª ordem com a aproximação em Butterworth para serem implementadas em circuito físico.

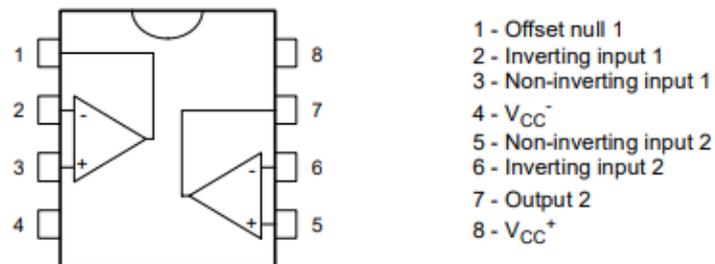
A topologia Sallen Key de 2ª ordem foi escolhida por possuir bem menos componentes eletrônicos que a MultiFeedBack e por eles serem mais próximos dos valores comerciais. A aproximação Butterworth foi escolhida pois ela apresentou uma boa resposta em magnitude junto com uma variação de atraso de grupo relativamente baixa, como pode ser visto na Tabela 4.

A topologia Biquad foi escolhida também por possuir a melhor resposta em magnitude entre todas as topologias com uma diferença baixa de variação de atraso de grupo comparado com as outras topologias (Tabela 6). A aproximação de

Butterworth foi escolhida também por dosar bem entre ter uma boa resposta em magnitude com uma variação de atraso de grupo aceitável.

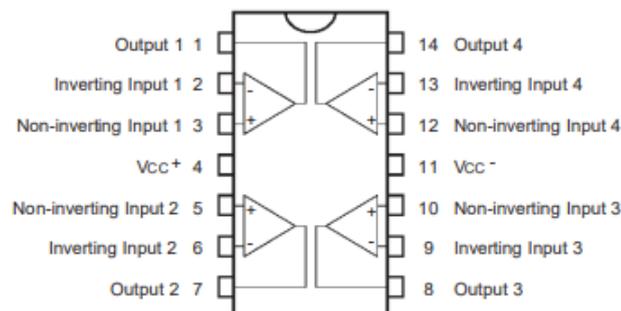
Para a confecção das placas foram usados resistores e capacitores com uma tolerância de 10% de seu valor nominal. Os amplificadores operacionais utilizados para o circuito da topologia Sallen Key e Biquad foram respectivamente o TL082 (Figura 69) e o TL074 (Figura 70). Ambos amplificadores operacionais de baixo ruído e que são amplamente utilizados em aplicações de filtragem de sinais. Outra vantagem desses amplificadores operacionais é que eles são de baixo custo e são fáceis de serem encontrados no comércio.

Figura 69 – TL082



Fonte: STMicroeletronics (2021, p 1)

Figura 70 – TL074

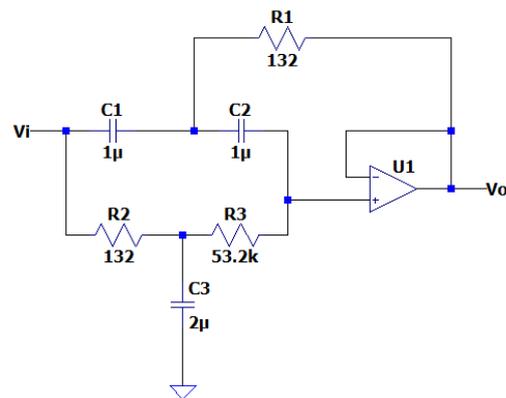


Fonte: STMicroeletronics (2021, p 1)

4.3.1 Implementação da topologia Sallen Key

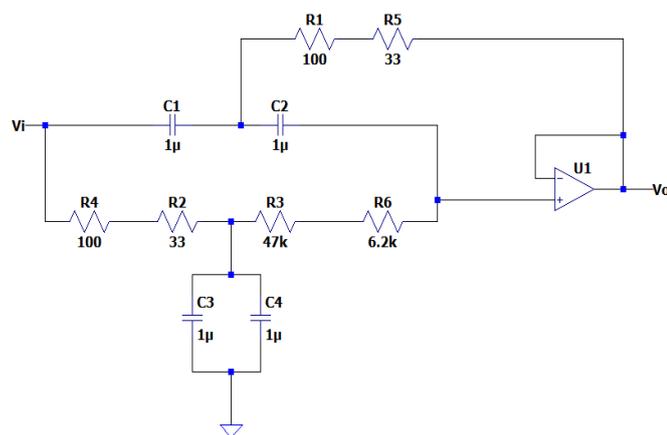
Primeiramente, foi dimensionado o circuito com os componentes ideais (Figura 71) no LTSpice XVII, no entanto, foi necessário realizar associações em série para ajustar os valores dos resistores e uma associação em paralelo para ajustar o valor do capacitor (Figura 72).

Figura 71 - Topologia Sallen Key com componentes ideais



Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 72 – Topologia Sallen Key com componentes comerciais



Fonte: Autoria própria (2021)

Abaixo segue a lista de componentes e seus respectivos preços da topologia Sallen Key Butterworth de 2ª ordem. O valor dos componentes da Tabela 7 é uma

média que foi feita da pesquisa nos sites de diversas lojas brasileiras de componentes eletrônicos.

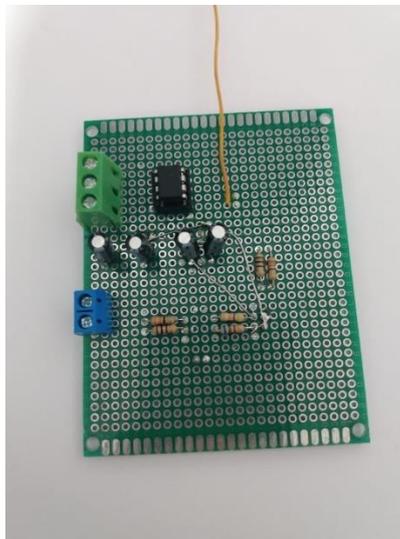
Tabela 7 – Preço dos materiais da topologia Sallen Key

Quantidade (unidades)	Componentes	Preço (R\$)	Preço Total (R\$)
2	Resistor 100R 1/4W	0,05	0,10
2	Resistor 33R 1/4W	0,06	0,12
1	Resistor 47k 1/4W	0,06	0,06
1	Resistor 6.2k 1/4W	0,05	0,05
4	Capacitor eletrolítico 1u 50V	0,15	0,60
1	TL082	1,57	1,57
1	Placa de fenolite perfurada 5cm x 10cm	12,25	12,25
1	Borne 2 polos	1,39	1,39
1	Borne 3 polos	1,69	1,69
			17,83

Fonte: Autoria própria (2021)

A Figura 73 mostra o circuito implementado na placa de fenolite perfurada da topologia Sallen Key Butterworth de 2ª ordem.

Figura 73 – Sallen Key Butterworth 2ª ordem na placa perfurada

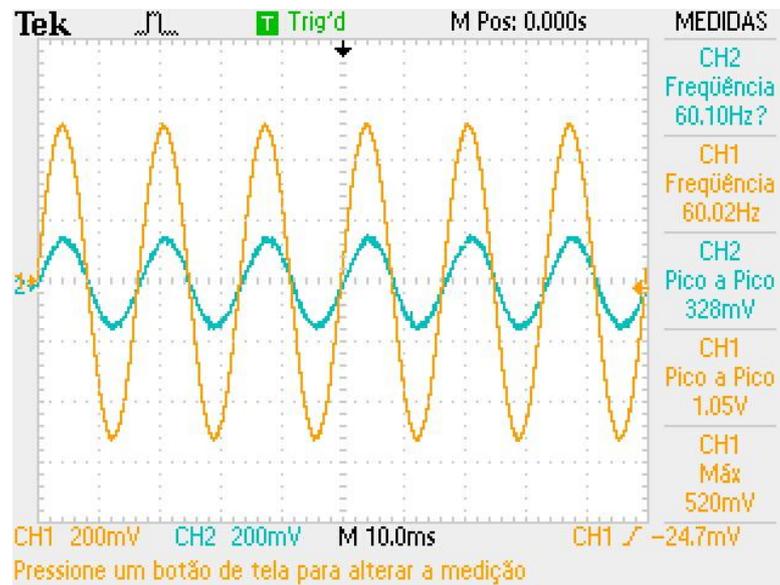


Fonte: Autoria própria (2021)

Após a montagem do circuito da topologia Sallen Key, foi realizado o teste com o auxílio de um osciloscópio e um gerador de função, que no qual será ajustado um sinal senoidal na frequência de 60 Hz, com 1 V_{pp} e sem *offset*, ou seja, com o sinal excursionando simetricamente no eixo dos 0 Volts.

O resultado obtido pode ser observado na Figura 74:

Figura 74 – Atenuação da topologia Sallen Key Butterworth 2ª ordem



Fonte: Autoria própria (2021)

O CH1(sinal laranja) é uma abreviação em inglês de *Channel 1* (canal 1). Ele é o sinal de entrada, que vem direto do gerador de função. A configuração do sinal de entrada foi medida no osciloscópio com 60,1 Hz e 1,05 V_{pp} .

O CH2 (sinal azul) é o sinal de saída do circuito, após passar pelo filtro *notch*. O osciloscópio nesse caso mensurou o sinal de saída com uma tensão de 0,328 V_{pp} , que é equivalente a 31,23% da tensão do sinal de entrada. O filtro está atenuando cerca de $-9,68$ dB do sinal.

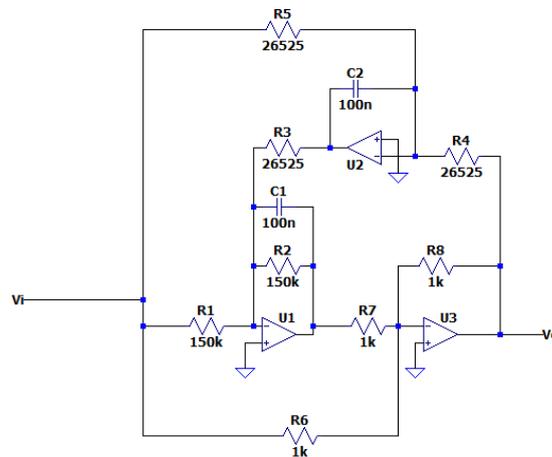
4.3.2 Implementação da topologia Biquad

O mesmo processo vale para a topologia Biquad. Ela foi dimensionada com componentes ideais no LTSpice e depois os valores dos componentes foram ajustados através de associações para obter-se o valor mais próximo possível do

dimensionamento. Nesse caso, foi necessário a utilização de um resistor variável para obter o valor de 3 resistores em específico do circuito.

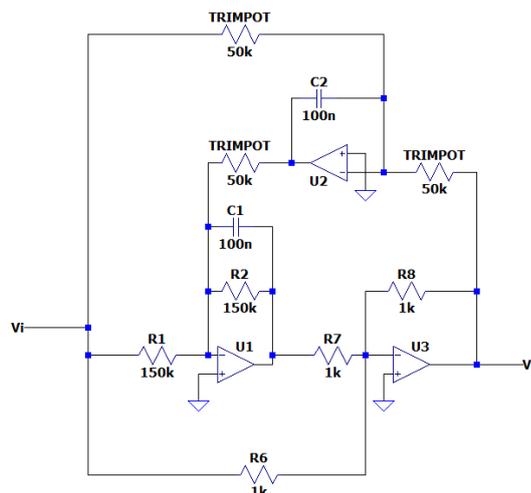
Seguem abaixo o esquemático da topologia Biquad Butterworth 2ª ordem dimensionada com componentes ideais (Figura 75) e o ajuste para componentes comerciais (Figura 76).

Figura 75 – Topologia Biquad com componentes ideais



Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 76 – Topologia Biquad com componentes comerciais



Fonte: Autoria própria (2021)

Foram colocados resistores variáveis de 50 kΩ (trimpots) no lugar dos resistores R3, R4 e R5 pois ficaria complexo e inviável associar resistores até atingir os 26,525 kΩ. Desta forma, tem-se o trabalho apenas de ajustar os trimpots para a

resistência correta (antes de soldar placa de circuito impresso), mas facilita e diminui drasticamente na quantidade de componentes do circuito.

Abaixo segue a Tabela 8 com a informação dos materiais utilizados e preços:

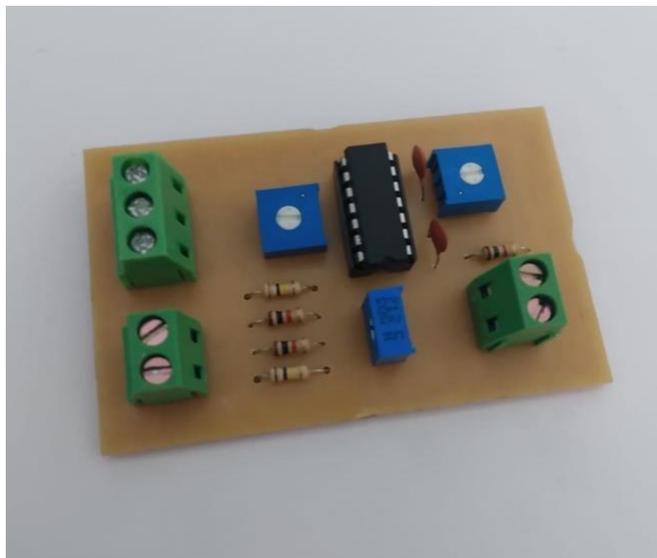
Tabela 8 – Preços dos materiais da topologia Biquad

Quantidade (unidades)	Componentes	Preço (R\$)	Preço total (R\$)
2	Resistor 150k 1/4W	0,05	0,10
3	Resistor 1k 1/4W	0,05	0,15
3	Trimpot 50k 1/4W	1,97	5,91
1	TL074	2,09	2,09
1	Placa de fenolite 10cm x 10cm	4,10	4,10
2	Capacitor Cerâmico 100n	0,13	0,26
2	Borne 2 polos	1,39	2,78
1	Borne 3 polos	1,69	1,69
			17,08

Fonte: Autoria própria (2021)

A seguir na Figura 77 é mostrado o circuito da topologia Biquad Butterworth 2ª ordem implementada numa PCI (placa de circuito impresso).

Figura 77 – Topologia Biquad Butterworth 2ª ordem na PCI

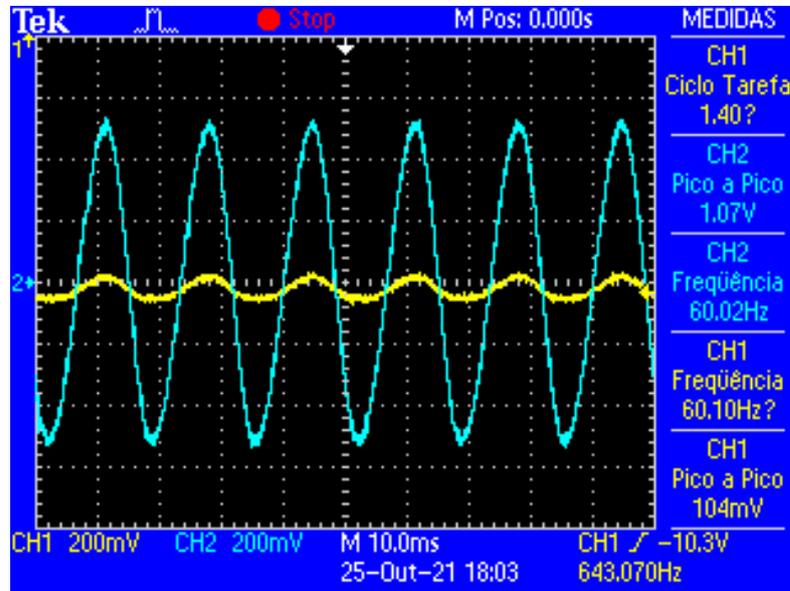


Fonte: Autoria própria (2021)

Após a montagem a montagem do circuito da topologia Biquad, foram realizados os mesmos procedimentos da topologia Sallen Key, foi injetado um sinal

senoidal de 60 Hz, com $1 V_{pp}$ e sem *offset*. Depois o sinal de entrada e saída é medido através de um osciloscópio, como é observado na Figura 78.

Figura 78 – Atenuação da topologia Biquad Butterworth 2ª ordem



Fonte: Autoria própria (2021)

Dessa vez, o canal 2 (sinal azul) é a entrada. O sinal de entrada foi medido pelo osciloscópio com uma tensão de $1,07 V_{pp}$ e numa frequência de 60,1 Hz.

No canal 1 (sinal amarelo), que é saída após o sinal ser filtrado, o osciloscópio mediu uma tensão de $0,104 V_{pp}$, o equivalente a 9,7 % da tensão de entrada do sinal. Neste caso, o filtro Biquad Butterworth de 2ª ordem está atenuando $-19,65\text{dB}$ do sinal.

4.4 Componentes práticos

É possível afirmar que os circuitos dos dois filtros tiveram bons resultados se considerarmos que todos os componentes usados tinham uma tolerância de 10% de seus valores nominais. A precisão do componente para este tipo de aplicação afeta diretamente na resposta do sistema, no caso, do filtro.

Componentes como resistores e os trimpots tendem a variar ainda mais se submetidos a variações de temperaturas. A utilização de capacitores eletrolíticos para

filtros ativos também não muito aconselhável devido a sua tolerância alta. Para estes casos, o mais aconselhável é a utilização de capacitores tântalo devido a sua maior precisão.

Por fim, a construção da placa também influencia diretamente na performance do circuito. Placas de circuito com muitos jumpers ou trilhas extremamente grossas ou fazendo ângulos de 90° podem ser problemáticas para o funcionamento do circuito. Uma boa prática é realizar um aterramento em torno das trilhas da placa.

Basicamente, se fosse utilizado componentes com tolerâncias menores ou iguais a 1%, as respostas dos filtros chegariam bem mais perto da resposta ideal simulada.

5 CONCLUSÃO

Para este trabalho, foi apresentado uma análise de três topologias de filtros *notch* analógicos, de diversas ordens com a implementação de aproximações diferentes para compará-las e por fim desenvolver de um filtro *notch* analógico adequado para a aplicação em eletrocardiógrafo.

Para tal feito, com o auxílio do software LTSpice XVII, foi necessário simular todas as três topologias, em 2^a, 4^a e 6^a ordens, cada uma com aproximações diferentes (Butterworth, Chebyshev I e Elíptico), totalizando 27 simulações. A partir disso, foram analisadas suas repostas e magnitude e variação de atraso de grupo, características importantes para um filtro que será aplicado em um sistema de processamento em tempo real. Com esses resultados, foram comparados os dados obtidos e escolhida as melhores configurações de filtro (topologia, aproximação e ordem).

Além de servir de literatura de referência para projetos de filtros *notch* e possivelmente contribuir com o desenvolvimento da engenharia biomédica no país, o objetivo deste trabalho é desenvolver um filtro *notch* analógico de baixo custo e aplicável em um eletrocardiógrafo.

Observando os resultados obtidos dos dois circuitos e considerando a taxa de tolerância dos componentes somado com a montagem da placa de circuito, é possível afirmar que os filtros *notch* funcionaram de maneira adequada. Todos os componentes que foram utilizados tinham uma variação consideravelmente alta de seus valores nominais.

Por tanto, para trabalhos futuros, a utilização de componentes mais precisos e com uma construção adequada da placa de circuito impresso, é possível obter resultados ainda mais promissores.

REFERÊNCIAS

- IRONS, F.H. **Active Filters for Integrated-Circuit Applications**. Artech House. 2005.
- JOHNSON, D. E. **A Handbook of Active Filters**. 1980.
- JUNG, W. G. **Op Amp Applications Handbook**. Newnes. 2005.
- MOODY, G. MARK ,R. **MIT-BIH Arrhythmia database**. 2005a. Disponível em: <https://www.physionet.org/content/mitdb/1.0.0/>. Acesso em: 06 jun. 2020.
- MOODY, G. MARK ,R. **The impact of the MIT-BIH Arrhythmia Database**. IEEE Eng in Med and Biol. 2005b. Disponível em: <http://ecg.mit.edu/george/publications/mitdb-embs-2001.pdf>. Acesso em: 06 jun. 2020.
- PACTITIS, S. A. **Active Filters: Theory and Desing**. New York: CRC Press. 2007.
- PERTENCE JR, A. **Eletrônica Analógica: Amplificadores operacionais e filtros ativos**. Porto Alegre: Bookman. 2003.
- SORNMO, L. LAGUNA, P. **Bioelectrical Signal Processing: in a cardiac and neurological aplications**. Sandiego: Elsevier, 2005.
- STMICROELETRONICS. **TL082: low noise j-fet quad operacional amplifiers**. Datasheet. 2001.Disponível em: <http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/SGSThompsonMicroelectronics/mXvwqq.pdf>. Acesso em: 10 set. 2021.
- STMICROELETRONICS. **TL074: general purpose j-fet dual operacional amplifier**. Datasheet. 2001.Disponível em: <http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/stmicroelectronics/2300.pdf>. Acesso em: 09 set. 2021.
- TORMENA, J. O. **Processamento digital de sinais: Aula 6 – Análise espectral**. Campo Mourão, 27 de junho de 2019. Disponível em: <http://paginapessoal.utfpr.edu.br/tormena/processamento-digital-desinais/material6.pdf/view>. Acesso em: 06 out. 2020.
- TORMENA, J. O. **Sinais e sistemas: aula 1 – filtros analógicos**. Campo Mourão, 18 de Abril de 2019. Disponível em: <http://paginapessoal.utfpr.edu.br/tormena/sinais-e-sistemas/material1.pdf/view>. Acesso em: 05 out. 2020.
- TORMENA, J. O. **Sinais e sistemas: Aula 4 – Diagrama de Bode**. Campo Mourão, 16 de Outubro de 2019. Disponível em: <http://paginapessoal.utfpr.edu.br/tormena/sinais -e-sistemas/material4.pdf/view>

VALKENBURG, V. **Analog Filter Desing**. New York: Holt, Rinehart and Winston, 1982.

WANHAMMAR, L. **Analog filters using MATLAB**. Springer Science & Business Media, 2009.