

# Trabalho 02

## Projeto de Filtros Analógicos

Welliton Jhonathan Leal Babinski

Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Pato Branco  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica  
Processamento de Sinais  
Prof. Dr. Rafael Cardoso

19 de Agosto de 2020

### Resumo

Este trabalho se trata do projeto de filtros analógicos de tempo contínuo, sendo eles todos ativos e com especificações semelhantes, porém cada tipo de função especificada exige um projeto e configurações de circuitos diferentes.

### 1 Introdução

Os filtros ativos são projetados usando a localização dos pólos e zeros no plano S. Basicamente, uma tabela de localizações dos pólos e zero é usada em conjunto com equações simples para encontrar valores de componentes. Eles podem ser usados de maneira semelhante às tabelas de valores de componentes normalizados, como aqueles usados no design de filtros passivos, escalando para a frequência e resposta necessárias. A impedância da fonte ou da carga não afeta a localização dos pólos e zeros. (WINDER, 2002)

Um filtro de primeira ordem possui um único pólo com um valor real negativo porque sua equação diferencial de entrada e saída é da ordem um. A função de transferência é dada por:

$$H(s) = K \cdot \frac{a}{s+a},$$

onde  $\omega_0$  é a frequência de corte, um número real não negativo, K é o ganho do filtro e R(s) é o sinal de entrada do filtro, um polinômio em s de uma ordem não superior a um e cuja raiz é o zero do filtro. Um zero possível e sua localização em relação ao polo determinam o tipo de filtro: passa-baixas, passa-altas, passa tudo, avanço ou atraso. (NAHVI; EDMINISTER, 2018)

Os filtros de segunda ordem têm um par de pólos no plano da metade esquerda. Os zeros possíveis determinam o tipo de filtro: passa-baixas, passa-altas, passa tudo, passa banda, *notch*, etc. A função de transferência é:

$$H(s) = K \cdot \frac{a}{s^2+b_1 \cdot s+b_2},$$

onde a e b são números reais positivos. K é o ganho do filtro e R(s) é o sinal de entrada do filtro, um polinômio

em s de uma ordem não superior a 2 e cujas raízes são os zeros do filtro. (NAHVI; EDMINISTER, 2018) Há várias topologias de filtro ativos (configurações de circuito) que podem ser usadas para implementar um filtro. Vamos nos limitar ao popular filtro Sallen-Key. Essa forma é muito conveniente, pois implementa naturalmente o fator quadrático que estamos usando para a descrição da função de aproximação. (THEDE, 2004)

### 2 Projetos dos Filtros

Nesta seção será apresentado o projeto dos filtros, as equações, configurações de circuitos utilizadas e os cálculos realizados para determinar os componentes necessários para cumprir as especificações definidas.

As funções de transferência dos filtros são normalizadas com relação à frequência de corte  $\omega_c = 2\pi f_c$ , isso é feito utilizando a variável

$$S_N = \frac{s}{2\pi f_c} = \frac{s}{\omega_c} = \frac{j\omega}{\omega_c} \quad (1)$$

em vez da variável complexa s, A forma geral de um polinômio normalizado característico, que representa um filtro de n-ésima ordem do tipo passa-baixas, é dada por

$$A(s) = \frac{A_0}{\Pi_i (1 + a_i S_N + b_i S_N^2)} \quad (2)$$

enquanto do tipo passa-altas, é dada por

$$A(s) = \frac{A_\infty}{\Pi_i \left(1 + \frac{a_i}{S_N} + \frac{b_i}{S_N^2}\right)} \quad (3)$$

sendo  $A_\infty$  o ganho de banda passante.

Os coeficientes de filtro  $a_i$  e  $b_i$  distinguem entre os filtros Butterworth, Tschebyscheff e Bessel. (MANCINI, 2003) Para este trabalho será utilizada a aproximação de filtros Butterworth, os coeficientes já são tabelados e a função Butterworth é:

$$|H(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^{2n}}} \quad (4)$$

Já sabemos que a função Butterworth não tem zeros, para encontrarmos os polos, utilizamos a relação  $s = j\omega$  que mudando ela fica no formato  $\omega = \frac{s}{j}$ , substituindo em 4 temos

$$1 + \left(\frac{s}{j\omega_0}\right)^{2n} = 0,$$

as raízes desse polinômio são dadas por

$$s^{2n} + (-1)^n \omega_0^{2n} = 0,$$

os polos serão encontrados através da expressão geral

$$p_k = \omega_c \cdot \exp\left(j\pi \frac{1}{2}\right) \cdot \exp\left(j\pi \cdot \frac{2k-1}{2n}\right), k = 1, 2, 3 \dots n \quad (5)$$

## 2.1 Passa-Baixas de Primeira Ordem

Para o primeiro projeto, será abordado o filtro passa-baixas de primeira ordem com a especificação onde a frequência de corte deve ser de 250 Hz. Para o filtro passa-baixas de primeira ordem o coeficiente  $b$  sempre será zero,  $b_1 = 0$ , aplicando na equação 2 obtemos a função de transferência

$$A(s) = \frac{A_0}{1 + a_1 S_N} \quad (6)$$

O filtro será do tipo Butterworth, a ordem  $n = 1$  e frequência de corte  $F_c = 250 \text{ Hz}$ .

A configuração do circuito a ser utilizada será a inversora, que segue na imagem abaixo:

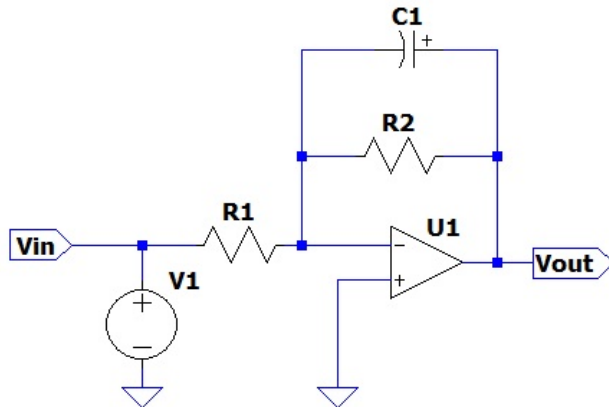


Figura 1: Circuito de filtro de primeira ordem passa-baixas na configuração inversora

Fonte: Software LTspice

A partir do circuito da figura 1 obtemos a seguinte função de transferência:

$$A(s) = \frac{-\frac{R_2}{R_1}}{1 + \omega_c R_2 C_1 s} \quad (7)$$

Comparando com a equação 6, observa-se as relações:

$$A_0 = -\frac{R_2}{R_1} \text{ e } a_1 = \omega_c R_2 C_1$$

Para dimensionarmos o circuito, já temos a frequência de corte e como o ganho  $A_0$  será unitário então definiremos os dois resistores como iguais,  $R_1 = R_2 = 100\Omega$ ,

observando na tabela Butterworth o coeficiente para  $n = 1$  é  $a_1 = 1$ , assim nos resta apenas encontrar o valor do capacitor a partir de

$$C_1 = \frac{a_1}{2\pi f_c R_2} = \frac{1}{2\pi \cdot 250 \cdot 100} \quad (8)$$

$$C_1 = 6.366 \cdot 10^{-6} \text{ ou } C_1 \approx 6,37 \mu F.$$

Utilizando de 5 é encontrado o polo

$$p(1) = [-3,087 \cdot 10^3 + 3,78j \cdot 10^{-13}]$$

Substituindo os valores em 7, A Função de transferência desnormalizada do filtro passa-baixas de primeira ordem será

$$A(s) = \frac{-1}{1 + (1,000597)s} \quad (9)$$

## 2.2 Passa-Baixas de Segunda Ordem

Para o segundo projeto, será abordado o filtro passa-baixas de segunda ordem, o filtro será do tipo Butterworth, a ordem  $n = 2$  e frequência de corte  $F_c = 250 \text{ Hz}$ . A função de transferência padrão do filtros passa-baixas de segunda ordem é dada por:

$$A(s) = \frac{A_0}{1 + a_1 S_N + b_1 S_N^2} \quad (10)$$

A configuração do circuito a ser utilizada será a Sallen-Key, que segue na imagem abaixo:

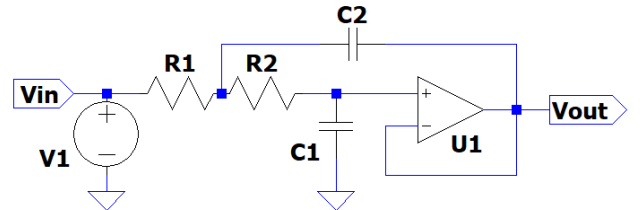


Figura 2: Circuito de filtro de segunda ordem passa-baixas topologia Sallen-Key

Fonte: Software LTspice

A partir do equacionamento do circuito da figura 2 e já normalizando, obtemos a seguinte função de transferência:

$$A(s) = \frac{1}{1 + \omega_c C_1 (R_1 + R_2) S_N + \omega_c^2 R_1 R_2 C_1 C_2 S_N^2} \quad (11)$$

Como o ganho será unitário e comparando com a equação 10, observamos as seguintes relações:

$$\begin{aligned} A_0 &= 1, \\ a_1 &= \omega_c C_1 R_1 + R_2, \\ b_1 &= \omega_c^2 R_1 R_2 C_1 C_2, \end{aligned}$$

Manipulando as expressões anteriores e definidos os valores de  $R_1 = R_2 = 100\Omega$  para dimensionarmos o circuito, utilizando os coeficientes Butterworth  $a_1 = 1,4141$  e  $b_1 = 1$ , é descoberto os valores de  $C_1$  e  $C_2$  através de

$$C_1 = \frac{a_1}{\omega_c(R_1 + R_2)} = 4,5012 \approx 4,5\mu F,$$

$$C_2 = \frac{b_1}{\omega_c^2 R_1 R_2 C_1} = 9,0063 \approx 9,0\mu F,$$

Os capacitores satisfazem a condição  $C_2 \geq C_1 \frac{4b_1}{a_1^2}$ .  
Utilizando de 5 encontramos os polos

$$p(1) = [-1, 111.10^3 + 1.111j.10^{-3}],$$

$$p(2) = [-1, 111.10^3 + 1.111j.10^{-3}]$$

Substituindo os valores em 11, A Função de transferência desnormalizada do filtro passa-baixas de segunda ordem será

$$A(s) = \frac{1}{1 + (1,4137)s + (999,3.10^{-3})s^2} \quad (12)$$

## 2.3 Passa-Altas de Primeira Ordem

Para o terceiro projeto, será abordado o filtro passa-altas de primeira ordem com a especificação onde a frequência de corte deve ser de 250 Hz. Como se trata da ordem 1, o coeficiente  $b$  sempre será zero,  $b_1 = 0$ , aplicando na equação 3 obtemos a função de transferência

$$A(s) = \frac{A_0}{1 + \frac{a_1}{S_N}} \quad (13)$$

O filtro será do tipo Butterworth, a ordem  $n = 1$  e frequência de corte  $F_c = 250Hz$ .

A configuração do circuito a ser utilizada será a inversora, que segue na imagem abaixo:

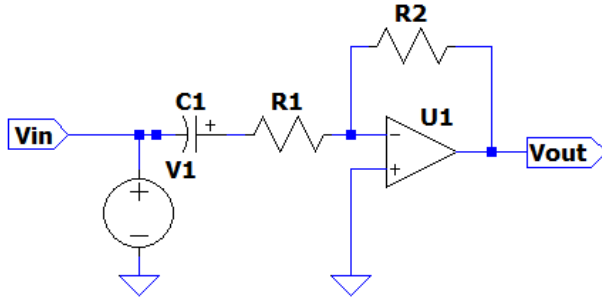


Figura 3: Circuito de filtro de primeira ordem passa-altas na configuração inversora

Fonte: Software LTspice

A partir do circuito da figura 3 obtemos a seguinte função de transferência:

$$A(s) = \frac{-\frac{R_2}{R_1}}{1 + \frac{1}{\omega_c R_1 C_1} \cdot \frac{1}{s}} \quad (14)$$

Comparando com a equação 6, observa-se as relações:

$$A_0 = -\frac{R_2}{R_1} \text{ e } a_1 = \frac{1}{\omega_c} R_1 C_1$$

Para dimensionarmos o circuito, já temos a frequência de corte e como o ganho  $A_\infty$  será unitário então definimos os dois resistores como iguais,  $R_1 = R_2 = 100\Omega$ , observando na tabela Butterworth o coeficiente para  $n = 1$  é  $a_1 = 1$ , assim nos resta apenas encontrar o valor do capacitor a partir de

$$C_1 = \frac{a_1}{2\pi f_c R_1} = \frac{1}{2\pi \cdot 250 \cdot 100} \quad (15)$$

$C_1 = 6.366.10^{-6}$  ou  $C_1 \approx 6,37\mu F$ , que são os mesmos valores do encontrado no filtro passa-baixas da seção 2.1

Utilizando de 5 é encontrado o polo

$$p(1) = [-3,087.10^3 + 3,78j.10^{-13}]$$

Substituindo os valores em 14, A Função de transferência desnormalizada do filtro passa-altas de primeira ordem será

$$A(s) = \frac{-1}{1 + \frac{1}{(1,000597)s}} \quad (16)$$

Outra forma a qual poderíamos ter recorrido para o projeto seria, se o circuito do filtro passa-baixas já tiver sido obtido, para obter o filtro passa-altas, podemos simplesmente modificar o filtro passa-baixas, como o obtido na subseção 2.1. Todas as resistências permanecem inalteradas, pois não são sensíveis à frequência. Uma capacitância de  $C_i$  Faradays no filtro passa-baixas tem uma admitância de  $sC_i$  Siemens. Torna-se uma admitância de  $\frac{\Omega C_i}{s}$  Siemens no filtro passa-altas e corresponde à admissão de uma indutância de  $\frac{1}{\Omega C_i}$  henrys.(SU, 2012)

## 2.4 Passa-Altas de Segunda Ordem

Para o quarto projeto, será abordado o filtro passa-altas de segunda ordem, o filtro será do tipo Butterworth, a ordem  $n = 2$  e frequência de corte  $F_c = 250Hz$ . A função de transferência padrão dos filtros passa-altas de segunda ordem é dada por:

$$A(s) = \frac{A_\infty}{1 + \frac{a_1}{S_N} + \frac{b_1}{S_N^2}} \quad (17)$$

A configuração do circuito a ser utilizada será a Sallen-Key, que segue na imagem abaixo:

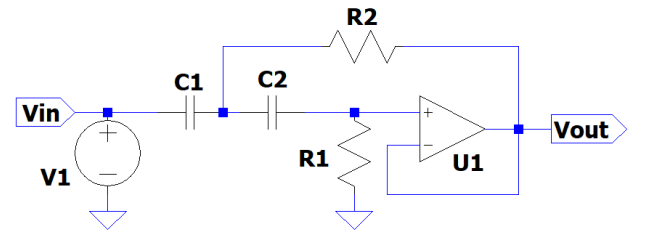


Figura 4: Circuito de filtro de segunda ordem passa-altas topologia Sallen-Key

Fonte: Software LTspice

A partir do equacionamento do circuito da figura 4 e já o normalizando, obtemos a seguinte função de transferência:

$$A(s) = \frac{A_0}{1 + \frac{(C_1 + C_2)}{(\omega_c R_1 C_1 C_2)} \cdot \frac{1}{S_N} + \frac{1}{(\omega_c^2 R_1 R_2 C_1 C_2)} \cdot \frac{1}{S_N^2}} \quad (18)$$

Como o ganho será unitário e para simplificar os *design*, um processo comum é definirmos os capacitores com valores iguais,  $C_1 = C_2 = C$ , a função de

transferência normalizada e simplificada será

$$A(s) = \frac{1}{1 + \frac{2}{(\omega_c R_1 C) \cdot \frac{1}{S_N}} + \frac{1}{(\omega_c^2 R_1 R_2 C^2) \cdot \frac{1}{S_N^2}}} \quad (19)$$

comparando com a equação 17, observamos as seguintes relações:

$$\begin{aligned} A_\infty &= 1, \\ a_1 &= \frac{2}{\omega_c R_1 C}, \\ b_1 &= \frac{1}{\omega_c^2 R_1 R_2 C^2}, \end{aligned}$$

Manipulando as expressões anteriores, isolando os resistores, para dimensionarmos o circuito, utilizando os coeficientes Butterworth  $a_1 = 1,4141$  e  $b_1 = 1$ , definindo  $C = 4.5\mu$  encontramos os valores

$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{1}{\pi a_1 f_c C} = 200,09 \approx 200\Omega, \\ R_2 &= \frac{a_1}{4\pi f_c b_1 C} = 100,03 \approx 100\Omega, \end{aligned}$$

Substituindo os valores em 19, A Função de transferência desnormalizada do filtro passa-altas de segunda ordem será

$$A(s) = \frac{1}{1 + \frac{1}{(706,86 \cdot 10^{-3})s} + \frac{1}{(222,07 \cdot 10^3)s^2}} \quad (20)$$

## 2.5 Passa-Banda de Segunda Ordem

Para o quinto projeto, será abordado o filtro passa-banda, o projeto será feito tendo como base uma simplificação do circuito resultante de uma associação em cascata do filtro passa-baixas com o passa-altas, ambos de primeira ordem como projetado anteriormente nas subsecções 2.1 e 2.3, ao serem somados o mesmo acontece com a ordem dos filtros.

A configuração do circuito a ser utilizada será a que segue na imagem abaixo, pode ser observada em dois estágios, um diferenciador e outro integrador, os resistores e capacitores foram adaptados no formato para a utilização de apenas um amp-op:

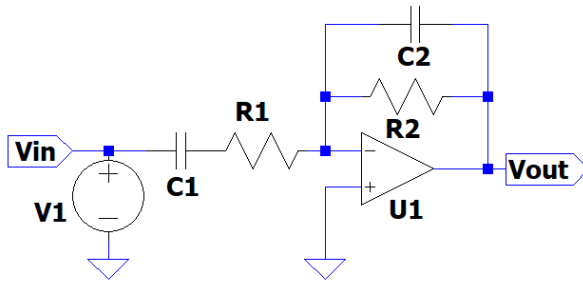


Figura 5: Circuito de filtro de segunda ordem passa-baixa  
Fonte: Software LTspice

A partir do circuito da figura 5 obtemos a seguinte função de transferência e já normalizada como apresentado abaixo:

$$A(s) = \frac{\omega_c C_1 R_2 S_N}{1 + \omega_c (R_1 C_1 + R_2 C_2) S_N + \omega_c^2 (R_1 C_1 R_2 C_2) S_N^2} \quad (21)$$

Primeiro é necessário encontrarmos os limites inferior e superior para remodelarmos o valor dos nossos

componentes, do contrário o filtro apesar de agir como passa banda, a única banda passante seria a frequência central de 250hz, mas para esse caso específico precisamos obter uma banda passante de 1000Hz, portanto utilizando as equações abaixo é possível encontrar esses limites.

$$\Omega_{inf} = -\left(\frac{B_{wth}}{2} - \sqrt{\frac{B_{wth}^2}{4} + \Omega_c^2}\right) \quad (22)$$

$$\Omega_{sup} = \left(\frac{B_{wth}}{2} + \sqrt{\frac{B_{wth}^2}{4} + \Omega_c^2}\right) \quad (23)$$

Substituindo os valores de  $B_{wth} = 1000Hz$  e  $\Omega_c = 250Hz$ , encontramos os limites como,  $\Omega_{inf} = 59,01Hz$  e  $\Omega_{sup} = 1059Hz$ . Afim de redimensionarmos o circuito com ganho unitário foi definido os resistores  $R_1 = R_2 = 1K\Omega$ , substituindo  $\Omega_{inf} = Fc_{inf}$  e  $\Omega_{sup} = Fc_{sup}$  já obtidos, o valor de  $a_1 = 1$ , o capacitor  $C_1$  da parcela do filtro passa-altas será definido por

$$\begin{aligned} Fc_{inf} &= \frac{1}{2\pi R_1 C_1} \\ C_1 &= 2,6968\mu F \end{aligned}$$

e o capacitor  $C_2$  da parcela do filtro passa-baixas será definido por

$$\begin{aligned} Fc_{sup} &= \frac{1}{2\pi R_2 C_2} \\ C_2 &= 150,29nF \end{aligned}$$

Substituindo os valores encontrados em 21, A Função de transferência desnormalizada do filtro passa-banda de segunda ordem será

$$A(s) = \frac{2,968 \cdot 10^{-3}}{1 + (3,1183 \cdot 10^{-3})s + (446,06 \cdot 10^{-9})s^2} \quad (24)$$

## 2.6 Rejeita-Banda de Segunda Ordem

Para o sexto projeto, será abordado o filtro rejeita-banda, o mesmo será feito utilizando o circuito conhecido como "Twin-T", como o ganho  $A_0$  necessário é unitário e não necessita de amplificação, foi escolhida da configuração com a realimentação unitária como se segue apresentado na figura abaixo

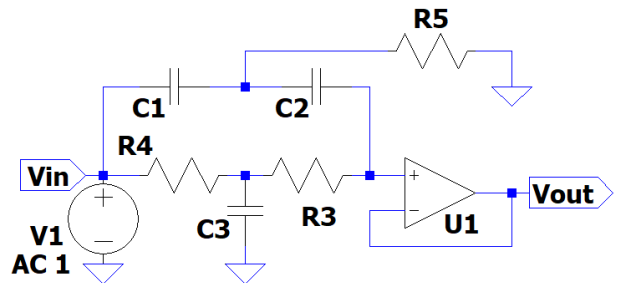


Figura 6: Circuito de filtro passa-banda de segunda ordem  
Fonte: Software LTspice

Substituindo os valores de  $B_{wth} = 1000Hz$  e  $\Omega_c = 250Hz$ ,

$$Q = \frac{f_o}{B_{wth}}$$

encontramos  $Q = 0,25$ , o mesmo que o de um filtro rejeita-banda passivo. Afim de redimensionarmos o circuito definimos os capacitores  $C_1 = C_2 = 1\mu F$  e como  $C_3 = 2C$ , então  $C_3 = 2\mu F$ , Substituindo os valores já possuídos abaixo obtemos o valor de  $R$ ,

$$F_{mid} = \frac{1}{2\pi RC}$$

$$R = 636.62\Omega$$

então  $R_3 = R_4 = 636.62\Omega$ , e como  $R_5 = R/2$ ,  $R_5 = 318,31\Omega$ .

No caso do desejo de adição de uma amplificação no circuito, a configuração do circuito muda um pouco e os resistores a serem adicionados  $R_1$  e  $R_2$  devem satisfazer as seguintes relações;

$$R_2 = (A_0 - 1)R_1 \text{ ou } R_2 = R_1(1 - \frac{1}{2Q})$$

### 3 Resultados

Os sinais de entrada aplicados no circuito foram uma ondas senoidais com 5V de amplitude onde a frequência foi variada de acordo com cada caso, as imagens a seguir mostram a resposta na frequência e no tempo dos filtros com relação aos respectivos sinais de entrada. Para fins de manter as respostas o mais próximas do projetado possível e como os projetos só foram implementados via simulação, foram mantidos os valores mesmo não sendo os comerciais dos componentes eletrônicos para uma resposta com maior acurácia.

#### 3.1 Passa-Baixas de Primeira Ordem

Resultados obtidos através da simulação do circuito do filtro Passa-Baixas de Primeira ordem:

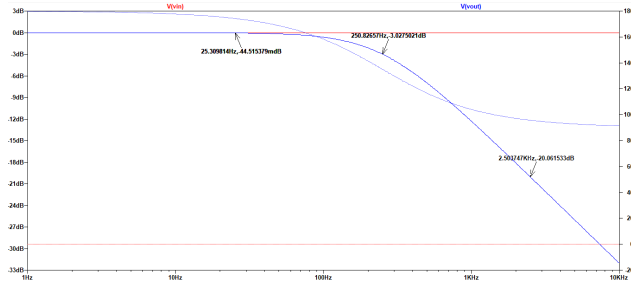


Figura 7: Resposta em Frequência do filtro PB de primeira ordem em 25Hz, 250hz e 2500Hz

Fonte: *Software LTspice*

#### 3.2 Passa-Baixas de Segunda Ordem

Resultados obtidos através da simulação do circuito do filtro Passa-Baixas de Segunda ordem:

#### 3.3 Passa-Altas de Primeira Ordem

Resultados obtidos através da simulação do circuito do filtro Passa-Altas de Primeira ordem:

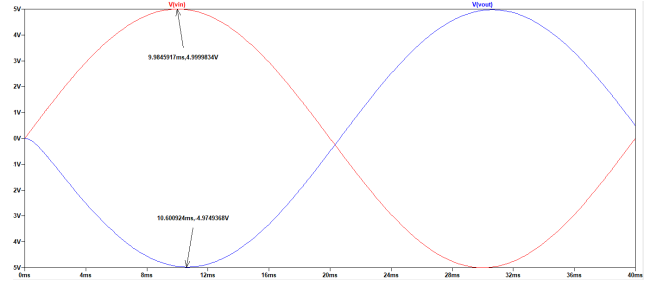


Figura 8: Resposta no Tempo do filtro PB de primeira ordem para um sinal de entrada de 25Hz em 40ms

Fonte: *Software LTspice*

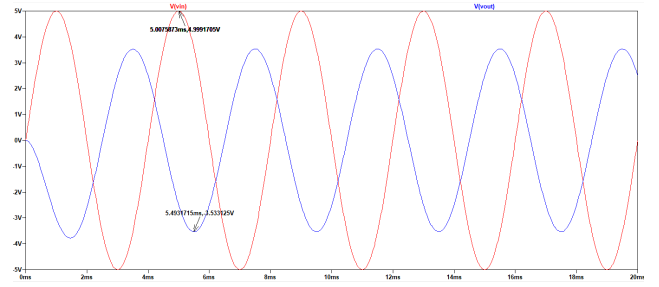


Figura 9: Resposta no Tempo do filtro PB de primeira ordem para um sinal de entrada de 250Hz em 20ms

Fonte: *Software LTspice*

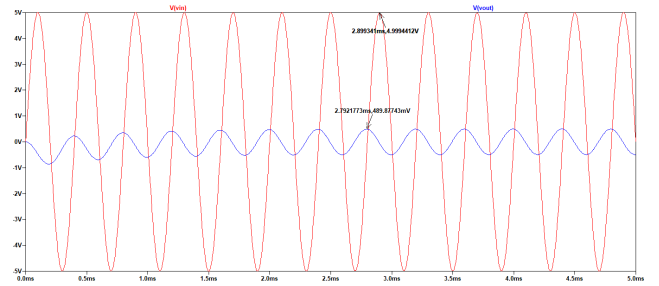


Figura 10: Resposta no Tempo do filtro PB de primeira ordem para um sinal de entrada de 2500Hz em 5ms

Fonte: *Software LTspice*

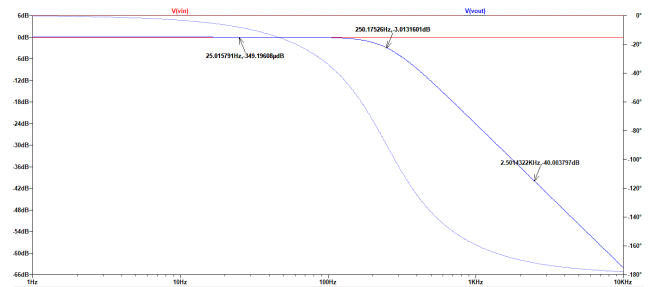


Figura 11: Resposta em Frequência do filtro PB de segunda ordem em 25Hz, 250Hz e 2500Hz

Fonte: *Software LTspice*

#### 3.4 Passa-Altas de Segunda Ordem

Resultados obtidos através da simulação do circuito do filtro Passa-Altas de Segunda ordem:

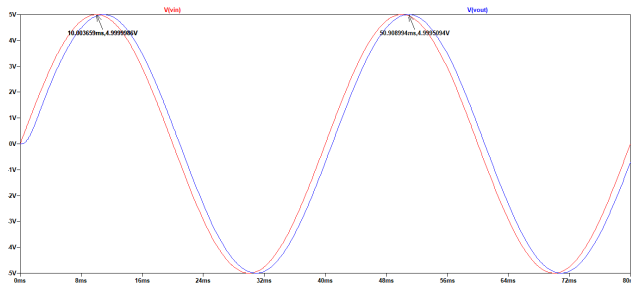


Figura 12: Resposta no Tempo do filtro PB de segunda ordem para um sinal de entrada de 25Hz em 80ms  
Fonte: *Software LTspice*

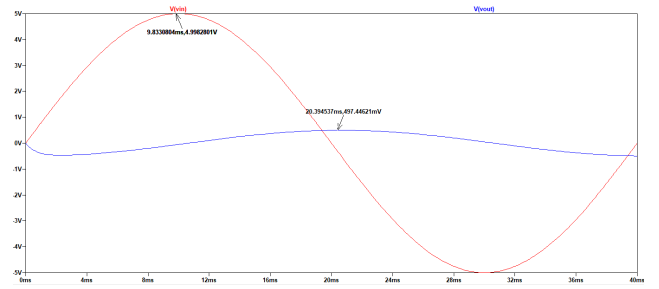


Figura 16: Resposta no Tempo do filtro PA de primeira ordem para um sinal de entrada de 25Hz em 40ms  
Fonte: *Software LTspice*

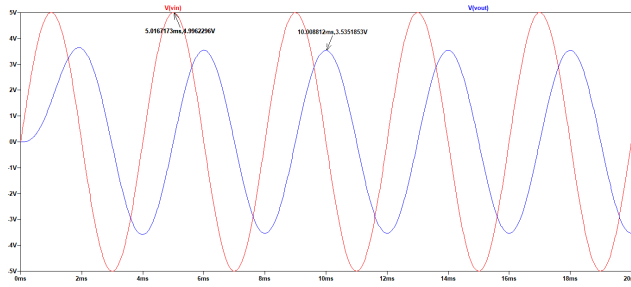


Figura 13: Resposta no Tempo do filtro PB de segunda ordem para um sinal de entrada de 250Hz em 20ms  
Fonte: *Software LTspice*

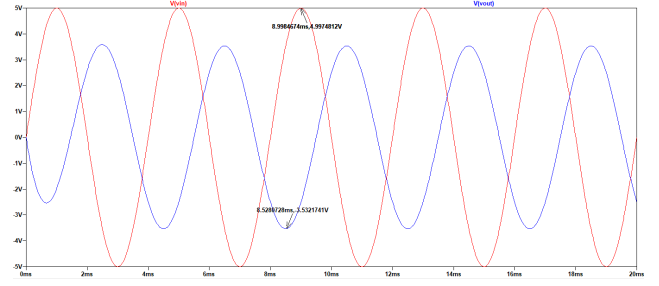


Figura 17: Resposta no Tempo do filtro PA de primeira ordem para um sinal de entrada de 250Hz em 20ms  
Fonte: *Software LTspice*

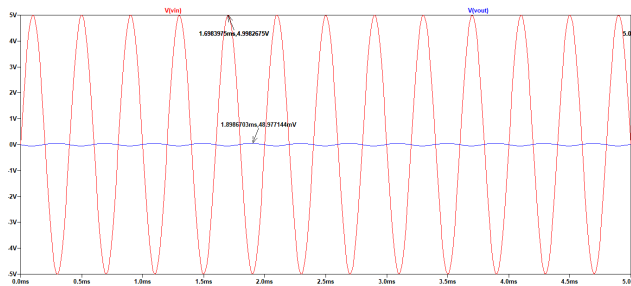


Figura 14: Resposta no Tempo do filtro PB de segunda ordem para um sinal de entrada de 2500Hz em 5ms  
Fonte: *Software LTspice*

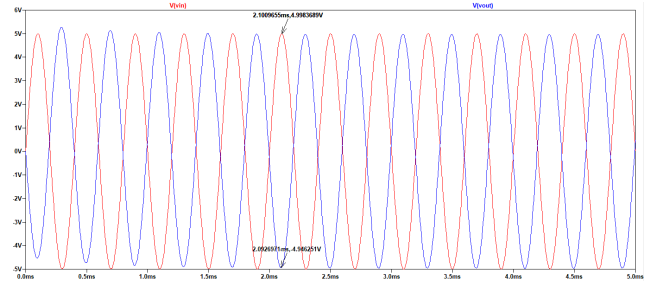


Figura 18: Resposta no Tempo do filtro PA de primeira ordem para um sinal de entrada de 2500Hz em 5ms  
Fonte: *Software LTspice*

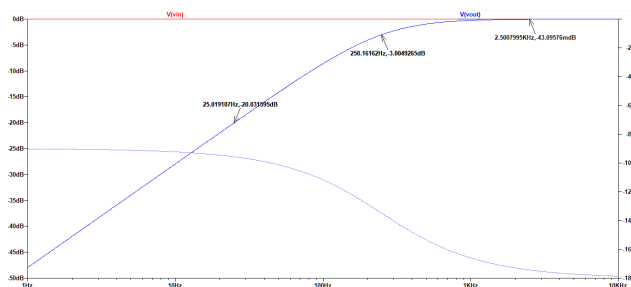


Figura 15: Resposta em Frequência do filtro PA de primeira ordem em 25Hz, 250Hz e 2500Hz  
Fonte: *Software LTspice*

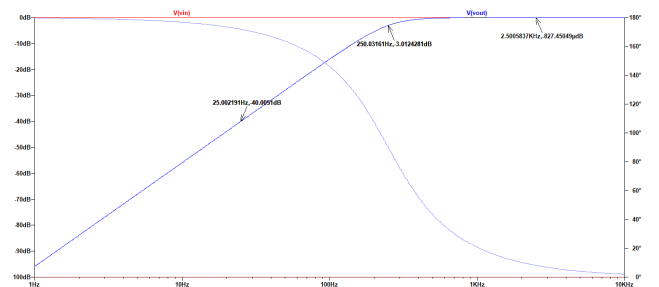


Figura 19: Resposta em Frequência do filtro PA de segunda ordem em 25Hz, 250Hz e 2500Hz  
Fonte: *Software LTspice*

### 3.5 Passa-Banda de Segunda Ordem

Resultados obtidos através da simulação do circuito do filtro Passa-Banda de Segunda ordem:

### 3.6 Rejeita-Banda de Segunda Ordem

Resultados obtidos através da simulação do circuito do filtro Rejeita-Banda de Segunda ordem:

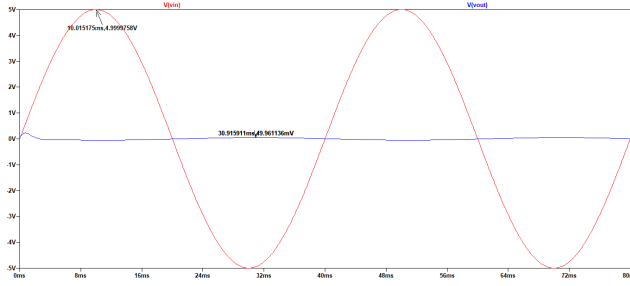


Figura 20: Resposta no Tempo do filtro PA de segunda ordem para um sinal de entrada de 25Hz em 80ms  
Fonte: *Software LTspice*

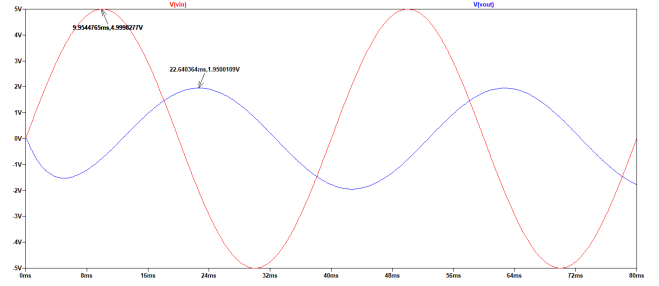


Figura 24: Resposta no Tempo do filtro BP de segunda ordem para um sinal de entrada de 25Hz em 80ms  
Fonte: *Software LTspice*

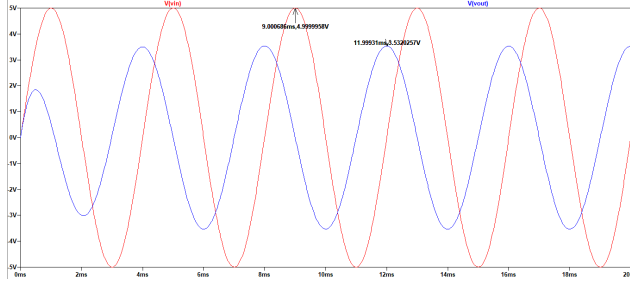


Figura 21: Resposta no Tempo do filtro PA de segunda ordem para um sinal de entrada de 250Hz em 20ms  
Fonte: *Software LTspice*

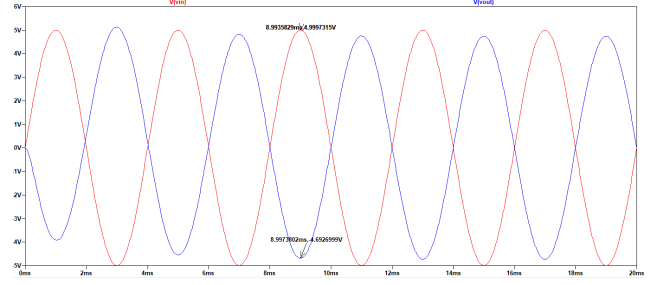


Figura 25: Resposta no Tempo do filtro BP de segunda ordem para um sinal de entrada de 250Hz em 20ms  
Fonte: *Software LTspice*

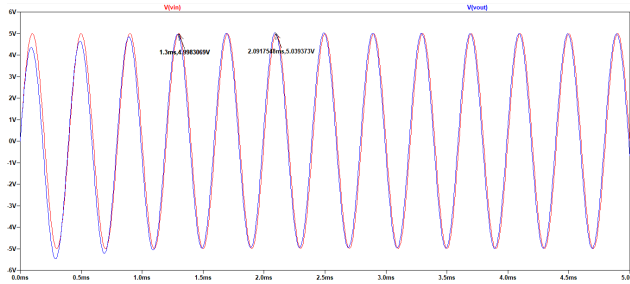


Figura 22: Resposta no Tempo do filtro PA de segunda ordem para um sinal de entrada de 2500Hz em 5ms  
Fonte: *Software LTspice*

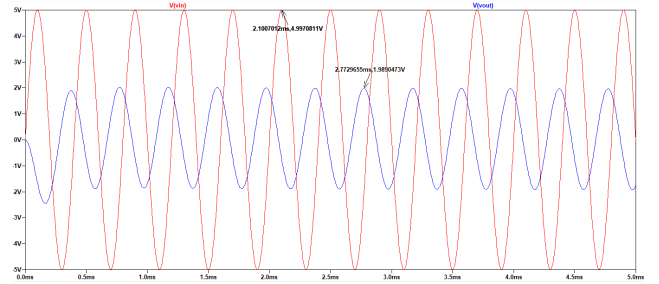


Figura 26: Resposta no Tempo do filtro BP de segunda ordem para um sinal de entrada de 2500Hz em 5ms  
Fonte: *Software LTspice*

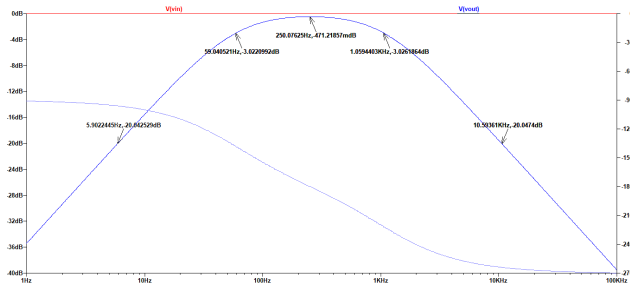


Figura 23: Resposta em Frequência do filtro BP de segunda ordem em 25Hz, 59Hz, 250Hz, 1059Hz e 2500Hz  
Fonte: *Software LTspice*

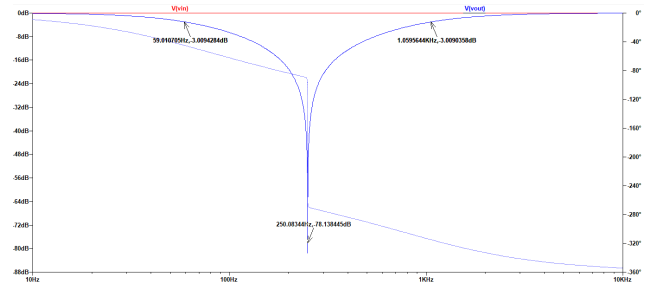


Figura 27: Resposta em Frequência do filtro RB de segunda ordem em 59Hz, 250Hz, 1059Hz  
Fonte: *Software LTspice*

## 4 Conclusão

Analisando as respostas de todos os projetos podemos observar os indicadores que os filtros agiram de forma esperada, analisando pelo domínio do tempo cada um se comportou de acordo com sua função, filtrando ondas mais rápidas e curtas ou ondas mais longas e lentas,

dependendo do caso de aplicação e da onda de entrada, já no domínio da frequência, nas frequências de corte de cada um as amplitudes corresponderam os -3db desejados assim como os decaimento de dB por década também de acordo com a ordem do circuito, nos circuitos onde havia uma configuração inversora as fases invertidas foram observadas nas respostas.



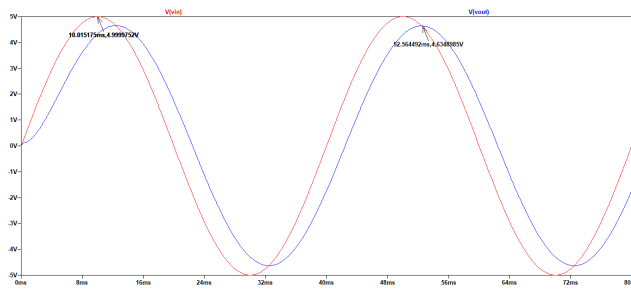


Figura 28: Resposta no Tempo do filtro BP de segunda ordem para um sinal de entrada de 25Hz em 80ms  
Fonte: *Software* LTspice

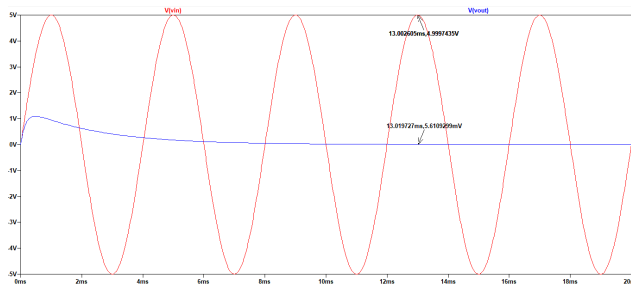


Figura 29: Resposta no Tempo do filtro RP de segunda ordem para um sinal de entrada de 250Hz em 20ms  
Fonte: *Software* LTspice

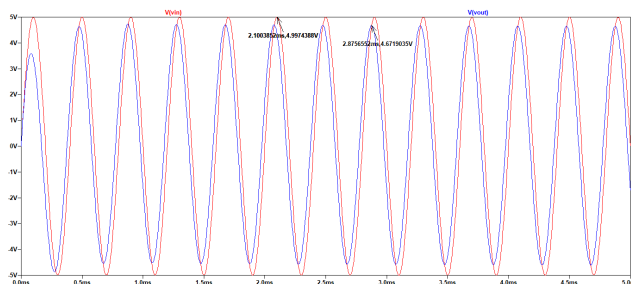


Figura 30: Resposta no Tempo do filtro RP de segunda ordem para um sinal de entrada de 2500Hz em 5ms  
Fonte: *Software* LTspice

## Referências

- MANCINI, R. **Op amps for everyone: design reference**. [S.l.]: Newnes, 2003.
- NAHVI, M.; EDMINISTER, J. **Schaum's outline of theory and problems of electric circuits**. [S.l.]: McGraw-Hill Education, 2018.
- SU, K. L. **Analog filters**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2012.
- THEDE, L. **Practical analog and digital filter design**. [S.l.]: Artech House, 2004.
- WINDER, S. **Analog and digital filter design**. [S.l.]: Elsevier, 2002.

O ponto principal que se pode abstrair a partir desde trabalho é que a partir do projeto de um filtro passa-baixas, se pode projetar qualquer outro partindo dele, seja por meios de transformação de frequência ou pela simples troca de componentes de lugar, para cada tipo de filtro e aproximação sempre existe mais de um método de projeto ou configuração do circuito para se seguir, vários caminhos, um tanto confusos as vezes, porém todos tem a mesma base fundamental, o filtro passa-baixas.