

Projeto aplicado 3 (Aula prática/Atividade de laboratório):
Projeto de filtros ativos

Nome: Rafael Anderson Dalmolin **Data:** 18/08/2021
Wesley do Nascimento Almeida

1) Objetivos

- 1.1 Projetar e simular dois filtros ativos (passa-baixas) de acordo com as especificações;
- 1.2 Sendo um filtro por aproximação Butterworth;
- 1.3 E outro por Chebyshev.

2) Requisitos de projeto

Para essa atividade considerar as especificações da Figura 2).

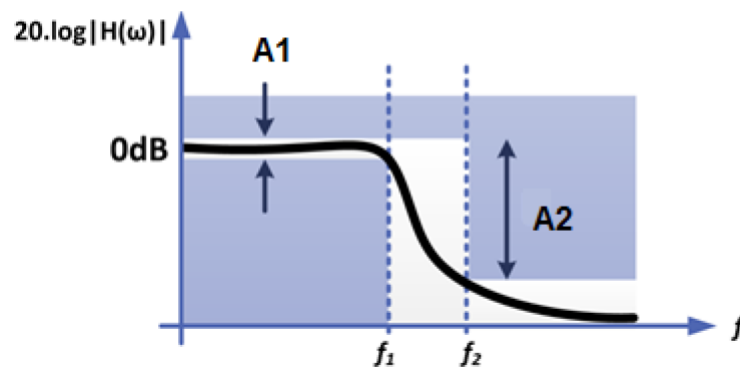


Figura 1: Diagrama de Bode dos requisitos

(a) Quais são os requisitos (especificações) de projeto do seu grupo?

Grupo número 8.

$$A_1 = 1dB$$

$$A_2 = 20dB$$

$$f_1 = 56kHz$$

$$f_2 = 88kHz$$

3) Desenvolvimento matemático do filtro Butterworth

(a) Para o filtro **Butterworth** indique:

A ordem do filtro, tanto o valor calculado quanto o aproximado (inteiro) utilizado.

$$n = 6.578 \approx 7$$

Frequência normalizada do filtro:

$$w_0 = 387.561 \cdot 10^6 \frac{rad}{s}$$

$$f_0 = 61.682 \cdot 10^3 Hz$$

A função de transferência do filtro:

$$|H(wj)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{351.904 \cdot 10^3}{387.561 \cdot 10^3}\right)^2}}$$

Os pólos encontrados para esse filtro:

$$p_1 = -86.2405 \cdot 10^3 + 377.8442 \cdot 10^3 \cdot j$$

$$p_2 = -241.6405 \cdot 10^3 + 303.0076 \cdot 10^3 \cdot j$$

$$p_3 = -349.1806 \cdot 10^3 + 168.1565 \cdot 10^3 \cdot j$$

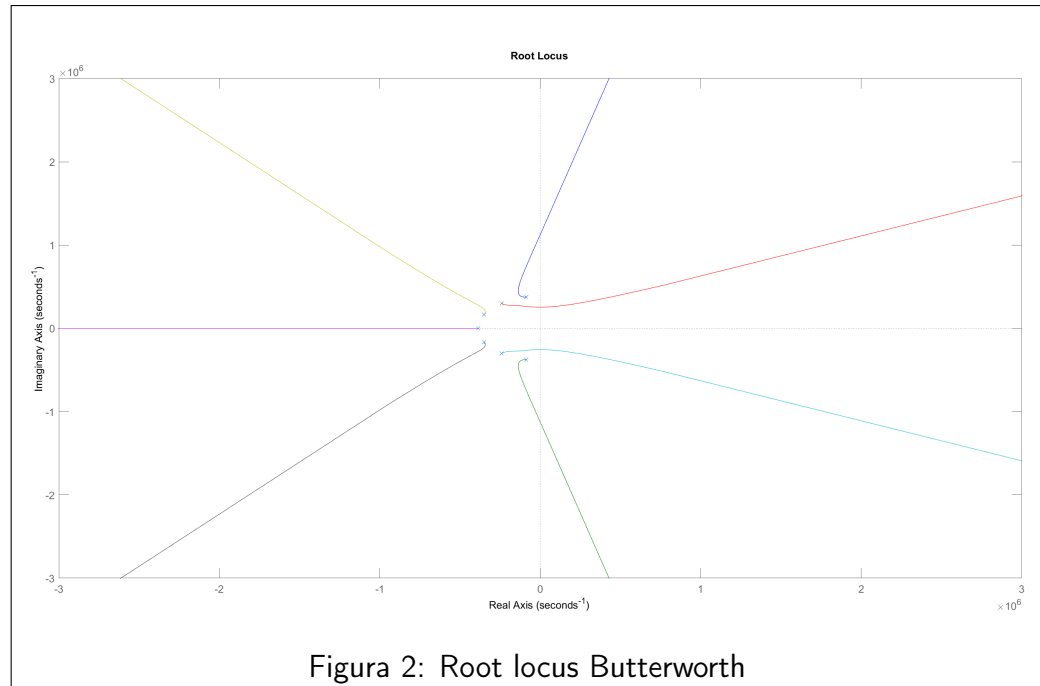
$$p_4 = -387.5612 \cdot 10^3$$

$$p_5 = -349.1806 \cdot 10^3 - 168.1565 \cdot 10^3 \cdot j$$

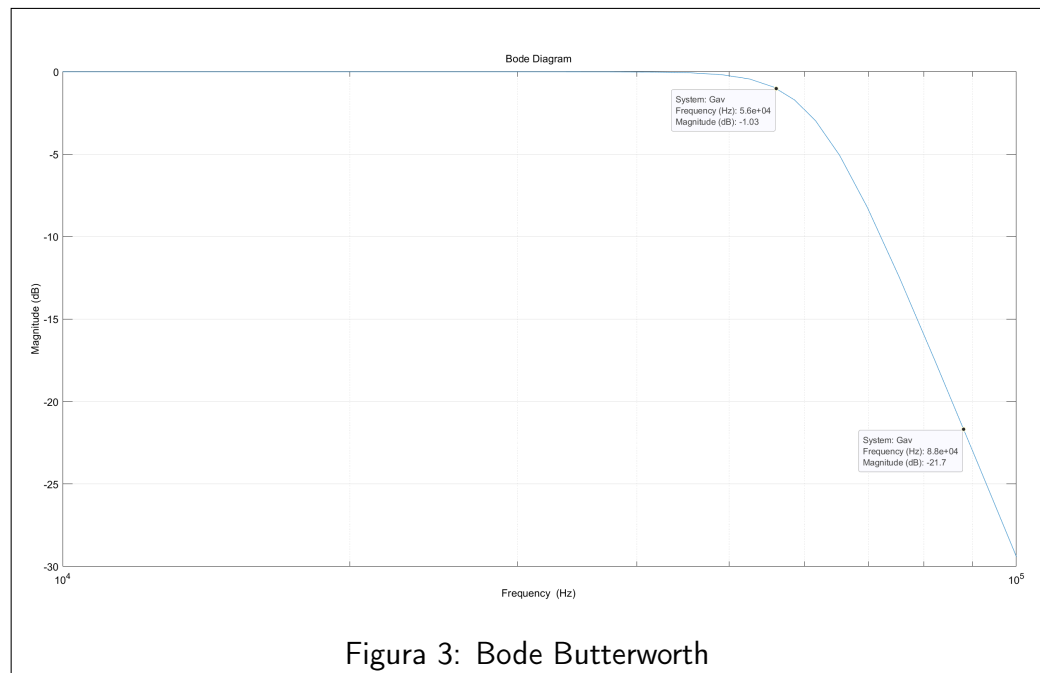
$$p_6 = -241.6405 \cdot 10^3 - 303.0076 \cdot 10^3 \cdot j$$

$$p_7 = -86.2405 \cdot 10^3 - 377.8442 \cdot 10^3 \cdot j$$

(b) Apresente o gráfico root locus para o filtro projetado.



(c) Apresente o diagrama de Bode para o filtro projetado, em dB por Hertz.



4) Desenvolvimento matemático do filtro Chebyshev

(a) Para o filtro Chebyshev indique:

Valor do *ripple* ε

$$\varepsilon = 508.847 \cdot 10^{-3}$$

A ordem do filtro, tanto o valor calculado quanto o aproximado (inteiro) utilizado.

$$n = 3.5806 \approx 4$$

Frequência normalizada do filtro:

$$w_0 = 351.904 \cdot 10^3 \frac{rad}{s}$$

$$f_0 = 56.0073 \cdot 10^3 Hz$$

A função de transferência do filtro:

$$|H(wj)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \varepsilon^2 \left(8 \cdot \left(\frac{552.992 \cdot 10^3}{351.904 \cdot 10^3} \right)^4 - 8 \cdot \left(\frac{552.992 \cdot 10^3}{351.904 \cdot 10^3} \right)^2 + 1 \right)^2}}$$

Os pólos encontrados para esse filtro:

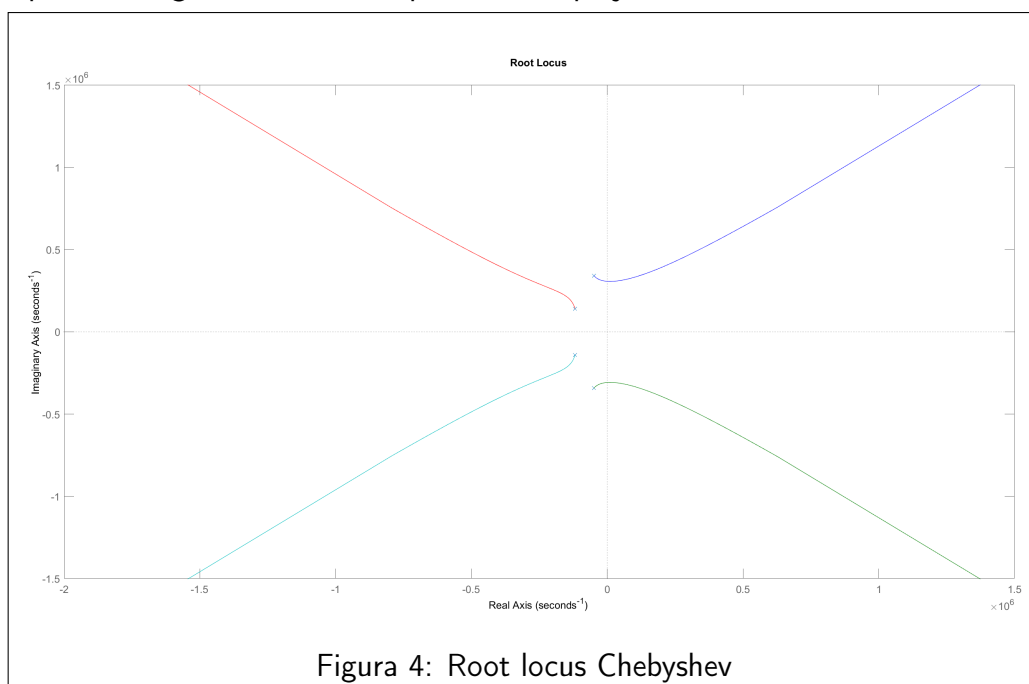
$$p_1 = -49.1033 \cdot 10^3 + 342.3487 \cdot 10^3 \cdot j$$

$$p_2 = -118.5458 \cdot 10^3 + 141.8055 \cdot 10^3 \cdot j$$

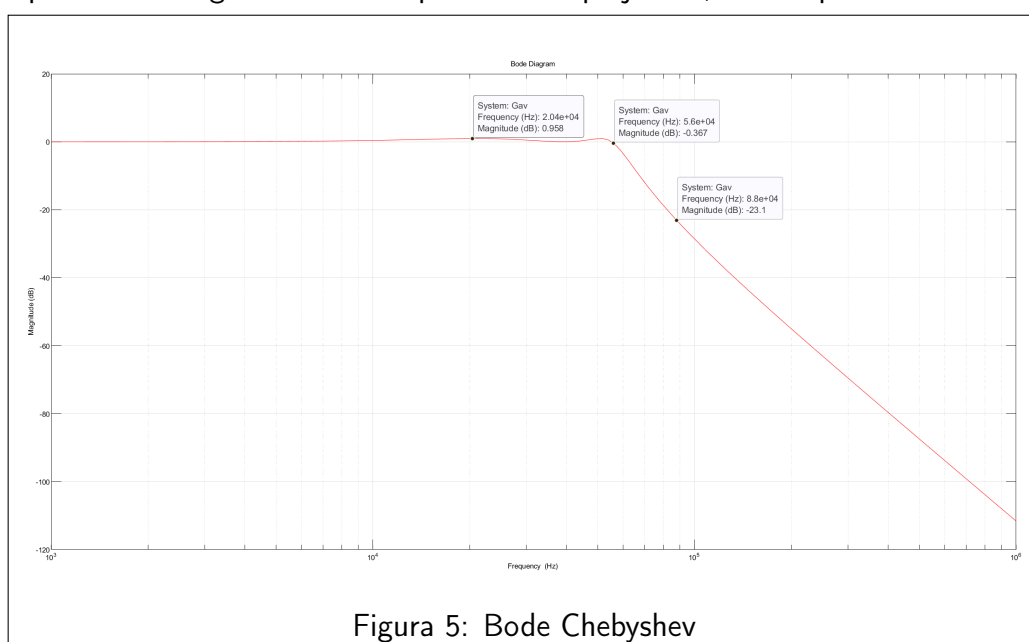
$$p_3 = -118.5458 \cdot 10^3 - 141.8055 \cdot 10^3 \cdot j$$

$$p_4 = -49.1033 \cdot 10^3 - 342.3487 \cdot 10^3 \cdot j$$

(b) Apresente o gráfico root locus para o filtro projetado.



(c) Apresente o diagrama de Bode para o filtro projetado, em dB por Hertz.



5) Implementação analógica do filtro Butterworth

(a) Indique quais polos serão implementados em cada filtro e quantos filtros serão.

Será implementando três filtros Sallen-key com os polos conjugados:

p_1 e p_7 , p_2 e p_6 , p_3 e p_5 .

um filtro RC passivo com o polo p_4 .

Onde unidos formam um filtro de sétima de ordem.

(b) Implemente cada par de polos e o polo impar (se necessário).

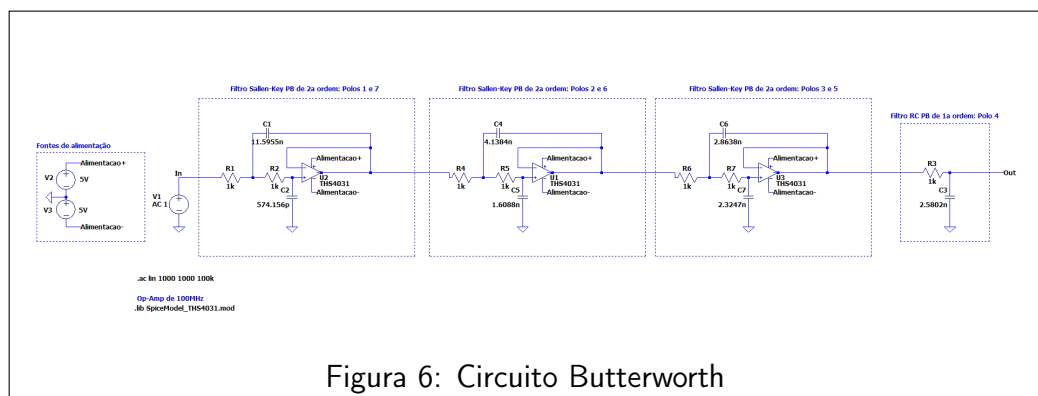
Par de polos: $p_{1e7} = -86.2405 \cdot 10^3 \pm 377.8442 \cdot 10^3 j$
 Fator de qualidade: 2.246
 Frequência de corte: $61.6823 kHz$
 $R1 = 1k\Omega$
 $R2 = 1k\Omega$
 $C1 = 11.5955\mu F$
 $C2 = 574.156\mu F$

Par de polos: $p_{2e6} = -241.6405 \cdot 10^3 \pm 303.0076 \cdot 10^3 j$
 Fator de qualidade: 0.802
 Frequência de corte: $61.6823 kHz$
 $R1 = 1k\Omega$
 $R2 = 1k\Omega$
 $C1 = 4.138\mu F$
 $C2 = 1.608\mu F$

Par de polos: $p_{3e5} = -349.1806 \cdot 10^3 \pm 168.1565 \cdot 10^3 j$
 Fator de qualidade: 0.555
 Frequência de corte: $61.6823 kHz$
 $R1 = 1k\Omega$
 $R2 = 1k\Omega$
 $C1 = 2.863\mu F$
 $C2 = 2.325\mu F$

Par de polos: $p_4 = -387.5612 \cdot 10^3$
 Frequência de corte: $61.6823 kHz$
 $R1 = 1k\Omega$
 $C1 = 2.580\mu F$

(c) Mostre o circuito completo do filtro implementado.



6) Implementação analógica do filtro Chebyshev

(a) Indique quais polos serão implementados em cada filtro e quantos filtros serão.

Será implementando dois filtros Sallen-key com os polos conjugados:
 p_1 , p_4 e p_2 , p_3 .
 um filtro RC passivo com o polo p_4 .

- (b) Implemente cada par de polos e o polo impar (se necessário).

Par de polos: $p_{1e4} = -118.5458 \cdot 10^3 \pm 141.8055 \cdot 10^3 j$
 Fator de qualidade: 3.522
 Frequência de corte: $55.044 kHz$
 $R1 = 1k\Omega$
 $R2 = 1k\Omega$
 $C1 = 20.365nF$
 $C2 = 410.515pF$

Par de polos: $p_{2e3} = -49.1033 \cdot 10^3 \pm 342.3487 \cdot 10^3 j$
 Fator de qualidade: 0.780
 Frequência de corte: $29.416 kHz$
 $R1 = 1k\Omega$
 $R2 = 1k\Omega$
 $C1 = 8.435nF$
 $C2 = 3.470nF$

- (c) Mostre o circuito completo do filtro implementado.

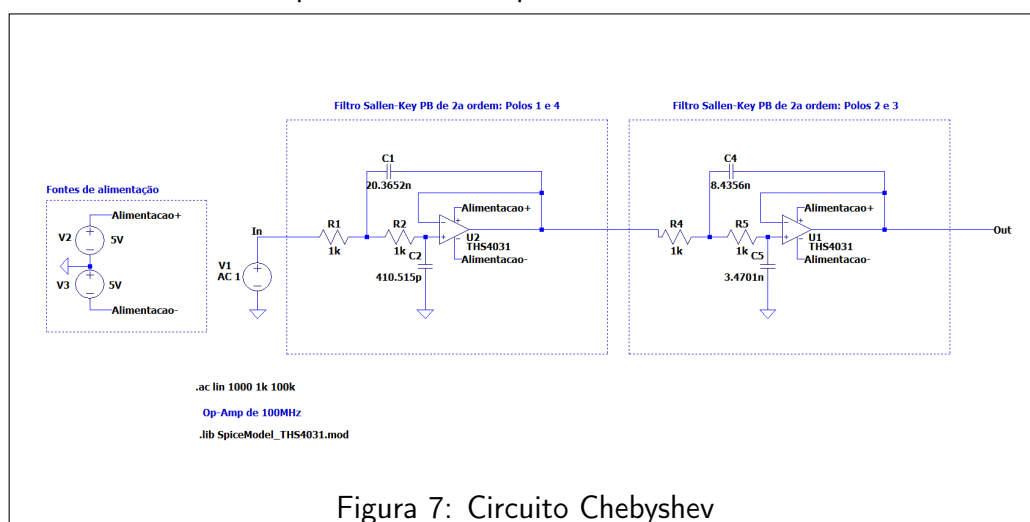


Figura 7: Circuito Chebyshev

7) Simulação do filtro Butterworth

- (a) Mostre o circuito a ser simulado, indique o software de simulação, modelos de amp-op utilizados e parâmetros de simulação.

Conforme apresentando na figura 6 onde é apresentando o circuito de Butterworth, desenvolvido no LTSpice XVII.

(b) Mostre diagrama de Bode para o circuito simulado.

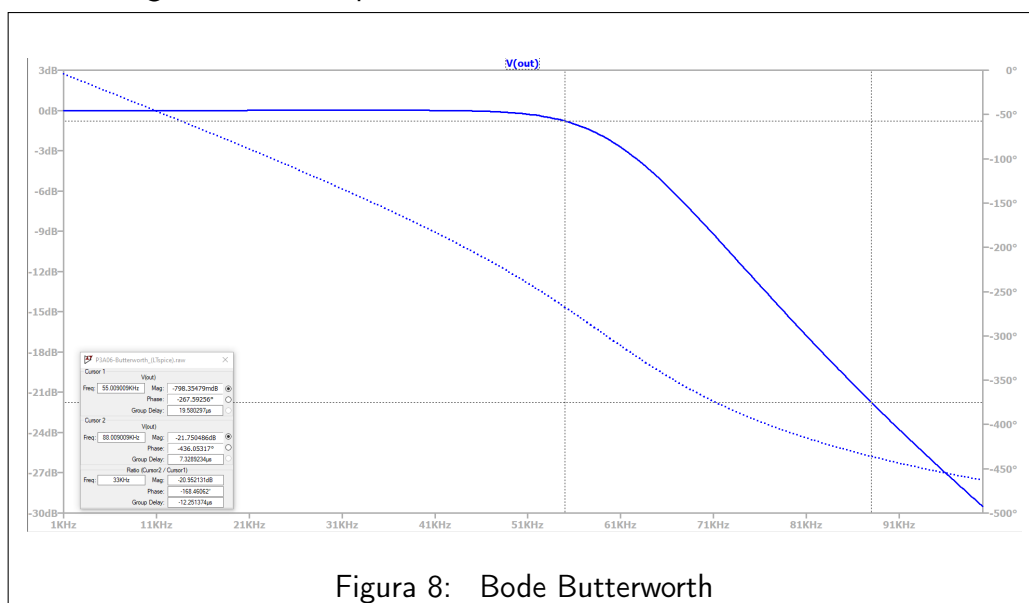


Figura 8: Bode Butterworth

8) Simulação do filtro Chebyshev

(a) Mostre o circuito a ser simulado, indique o software de simulação, modelos de amp-op utilizados e parâmetros de simulação.

Conforme apresentando na figura 7 onde é apresentando o circuito de Chebyshev, desenvolvido no LTSpice XVII.

(b) Mostre diagrama de Bode para o circuito simulado.

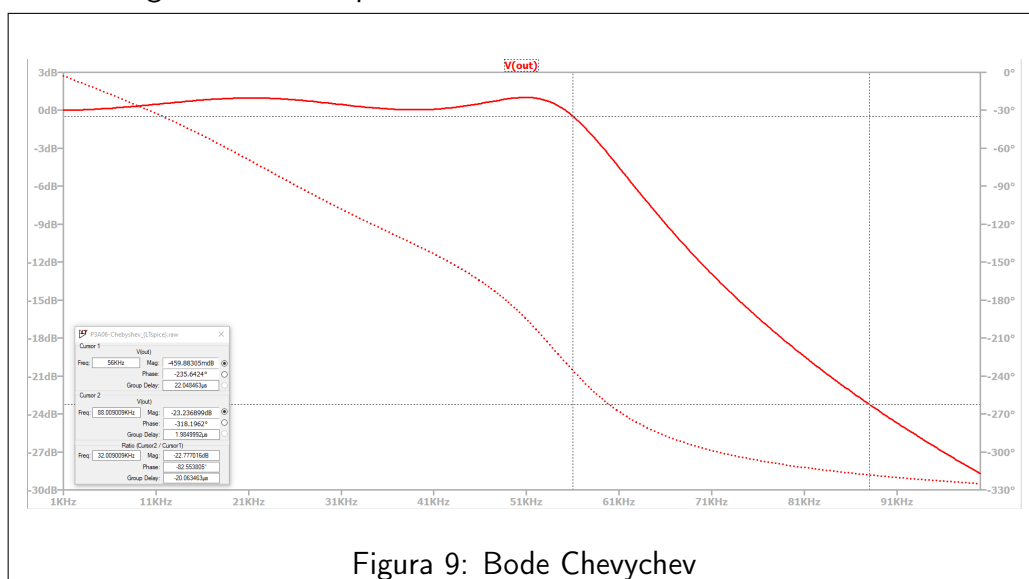


Figura 9: Bode Chebyshev

9) Resumo dos resultados

(a) Resumo dos resultados para o filtro Butterworth

	Teórico	Simulado	Erro %
Ganho em $1kHz$	$-1.317 \cdot 10^{-12}dB$	$-2.277 \cdot 10^{-3}dB$	$173 \cdot 10^9\%$
Ganho em f_1	$-0.998dB$	$-1dB$	0.75%
Ganho em f_0	$-3.010dB$	$-3.065dB$	1.8%
Ganho em f_2	$-21.635dB$	$-21.75dB$	0.53%
Ganho em $10 \times f_2$	$-161.605dB$	$-162.360dB$	0.47%

(b) Resumo dos resultados para o filtro Chebyshev

	Teórico	Simulado	Erro %
Ganho em $1kHz$	$4.5255 \cdot 10^{-3}db$	$3.0225 \cdot 10^{-3}db$	33.2%
Ganho em $5kHz$	$0.110dB$	$0.109dB$	0.98%
Ganho em f_1	$0.367dB$	$-0.459dB$	25.44%
Ganho em f_2	$-23.111dB$	$-23.232dB$	0.53%
Ganho em $10 \times f_2$	$-107.152dB$	$-107.388dB$	0.22%

10) Conclusões

(a) Quais suas conclusões ao final desse projeto? Funcionou ou não? Erro aceitável ou não?

Em vista dos argumentos apresentando, foi possível identificar que ambos os filtros funcionaram de acordo com o projetado, havendo uma pequena variação comparado com o teórico por motivo da ordem dos filtros. É importante evidenciar que a resposta em frequência do filtro butterworth é o mais plana possível (não possui ripple, ou ondulações) na banda passante e se aproxima do zero na banda rejeitada, conforme apresentado na figura 3. Verifica-se que o filtro Butterworth possui uma atenuação mais lenta e uma resposta em fase mais linear na banda passante, do que, quando comparado com o filtro Chebyshev.

Respectivamente o filtro Chebyshev obteve oscilações com pico de até 0.96dB antes da frequência de corte e entre a banda passante atenuou mais do que o projetado devido ao fator n (Ordem do filtro) ser arredondando para o inteiro mais próximo acima, obtendo uma atenuação de -23,12dB.

Pode-se observar na secção 9 os resultados obtidos teoricamente e através dos filtros implementando-se no software LTspice, as variações entre os resultados, se da, por não idealidade dos componentes utilizados.