



UNIVERSIDADE  
ESTADUAL DE LONDRINA



---

David Maykon Krepsky Silva  
Havena Louise Pavão

## Título do Experimento

Data de realização do experimento:  
12 de maio de 2016  
Série/Turma:  
1000/1011  
Prof. Me. Jaime Laelson Jacob

2 de junho de 2016

---

## **Resumo**

Neste trabalho foi realizado o estudo de filtros passivos compostos indutores e capacitores (filtros LC) de forma a analisar a resposta em frequência para filtro passa baixas (FPB), filtro passa alta (FPA) e filtro passa faixa (FPF). A metodologia utilizada consiste em realizar o projeto do filtro normalizado, transformar para o tipo de filtro requerido e simular o circuito no software Orcad. Durante o laboratório foi possível observar as diferentes respostas em frequência para cada tipo de filtro estudado. Também foi visualizado a melhora no fator  $Q$  de filtros em cascata em relação a um único filtro de ordem mais alta.

# Sumário

<b>Resumo</b>	<b>1</b>
<b>Sumário</b>	<b>2</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>3</b>
<b>2 Teoria</b>	<b>4</b>
2.1 Filtros Passivos . . . . .	4
2.2 Frequência de Corte e Largura de Banda . . . . .	5
2.3 Projeto de filtros passivos . . . . .	5
<b>3 Metodologia Experimental</b>	<b>7</b>
3.1 FPB . . . . .	7
3.2 FPA . . . . .	7
3.3 FPF Cascata . . . . .	7
3.4 FPF . . . . .	7
<b>4 Resultados e Análise de Dados</b>	<b>8</b>
4.1 FPB . . . . .	8
4.2 FPA . . . . .	8
4.3 FPF em cascata . . . . .	10
4.4 FPF . . . . .	11
<b>5 Discussão e Conclusão</b>	<b>13</b>
<b>6 Referências Bibliográficas</b>	<b>14</b>

# 1 Introdução

O experimento tem como objetivo desenvolver o conhecimento dos alunos sobre filtros passivos, em específico, filtros do tipo LC. Tais filtros são fundamentais para a área de engenharia elétrica sendo amplamente utilizados nos campos de telecomunicações, instrumentação, controle e etc.

## 2 Teoria

### 2.1 Filtros Passivos

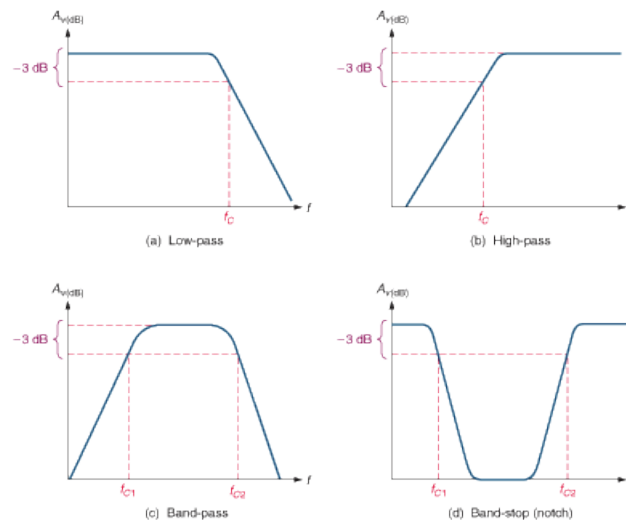
Filtros passivos são circuitos que removem uma porção indesejada do sinal sem inserir energia no mesmo. São compostos por resistores, capacitores e indutores que utilizam as propriedades de armazenamento de energia (em forma de campo elétrico nos capacitores e campo magnético nos indutores) para alterar a amplitude do sinal de acordo com a frequência. Os filtros ativos diferem dos passivos pois possuem eletrônica de modo a amplificar (aumentar a energia) do sinal, porém, para frequências muito altas o uso de filtros ativos se torna inviável, dado a grande quantidade de capacitância parasita nos dispositivos semi-condutores.

Os filtros passivos são classificados de acordo com a faixa de frequências a qual o filtro atenua, sendo elas:

- **Passa-Baixas (FPB)** o qual permite a passagem das frequências abaixo de  $f_c$  (frequência de corte);
- **Passa-Altas (FPA)** o qual permite a passagem das frequências acima de  $f_c$ ;
- **Passa-Faixa (FPF)** que atenua frequências abaixo de  $f_1$  e frequências acima de  $f_2$ ;
- **Rejeita-Faixa (FRF)** que permite a passagem de frequências entre  $f_1$  e  $f_2$ .

A figura 1 mostra os tipos de resposta em frequência para os filtros citados.

Figura 1: Resposta em frequência para filtros FPA, FPB, FPF e FRF



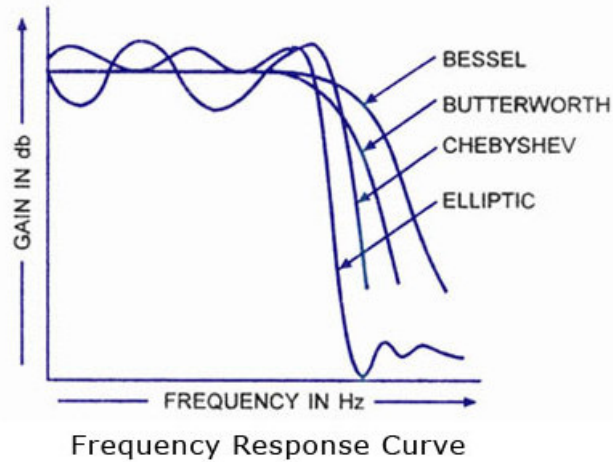
Fonte: [www.dreamitdesignitbuildit.wordpress.com](http://www.dreamitdesignitbuildit.wordpress.com).

Uma segunda classificação para os filtros é relacionada ao *ripple* e a defasagem da resposta em frequência. Os tipos mais comuns empregados na prática são:

- **Butterworth**;
- **Chebyshev (tipo I ou II)**;
- **Bessel**.

A figura 2 mostra as características da resposta em frequência para os filtros citados acima.

Figura 2: Características dos filtros Butterworth, Chebyshev, Bessel e Elíptico



Fonte: <http://www.circuitstoday.com>

## 2.2 Frequência de Corte e Largura de Banda

A frequência de corte ( $f_c$ ) é a frequência para qual o filtro apresentará uma atenuação de 3dB e é o parâmetro fundamental para o projeto de filtros. Outro parâmetro importante para os filtros do tipo passa-faixa e rejeita-faixa é a largura da banda de passagem, a qual é composta por uma frequência de corte inferior (denominada  $f_1$ ) e uma superior ( $f_2$ ).

## 2.3 Projeto de filtros passivos

Figura 3: Tabela para projetos de filtros Butterworth de segunda a quarta ordem.

$n$	$R_S/R_L$	$C_1$	$L_2$	$C_3$	$L_4$
2	1.111	1.035	1.835		
	1.250	0.849	2.121		
	1.429	0.697	2.439		
	1.667	0.566	2.828		
	2.000	0.448	3.346		
	2.500	0.342	4.095		
	3.333	0.245	5.313		
	5.000	0.156	7.707		
3	10.000	0.074	14.514		
	$\infty$	1.414	0.707		
	0.900	0.908	1.633	1.599	
	0.800	0.844	1.384	1.925	
	0.700	0.815	1.185	2.277	
	0.600	1.023	0.965	2.702	
	0.500	1.181	0.779	3.261	
	0.400	1.425	0.604	4.064	
4	0.300	1.838	0.440	5.363	
	0.200	2.669	0.284	7.910	
	0.100	5.167	0.138	15.455	
	$\infty$	1.500	1.333	0.500	
	1.111	0.466	1.592	1.744	1.469
	1.250	0.388	1.695	1.511	1.811
	1.429	0.325	1.862	1.291	2.175
	1.667	0.269	2.103	1.082	2.613
	2.000	0.218	2.452	0.883	3.187
	2.500	0.169	2.986	0.691	4.009
	3.333	0.124	3.883	0.507	5.338
	5.000	0.080	5.694	0.331	7.940
	10.000	0.039	11.094	0.162	15.642
	$\infty$	1.531	1.577	1.052	0.383
$n$	$R_L/R_S$	$L_1$	$C_2$	$L_3$	$C_4$

Fonte: Abrão, T. (2002) [1].






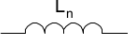



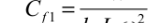






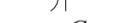


Para o projeto de filtros passivos, o primeiro passo é o projeto de um filtro passa baixas normalizado. O valor dos componentes do filtro normalizado é obtido através de tabelas que dependem da relação entre a resposta característica desejada (Butterworth, Chebyshev e etc.), a ordem do filtro e a relação entre a resistência da fonte,  $R_S$  e a resistência da carga,  $R_L$ .

A figura 3 mostra o exemplo de uma tabela para projeto de filtros normalizados.

A segunda etapa consiste em converter o filtro normalizado para o tipo de resposta desejada (FPA, FPF, FRF) e com a frequência de corte necessária.

A figura 4 mostra o processo de conversão do filtro.

Figura 4: Desnormalização do filtro.

Elemento	P. Baixas	P. Altas	P. Faixa	Rej. Faixa
	$R_b = k_z R_n$ 	$R_a = k_z R_n$ 	$R_f = k_z R_n$ 	$R_r = k_z R_n$ 
	$L_b = \frac{k_z L_n}{\omega_0}$ 	$C_a = \frac{1}{k_z L_n \omega_0}$ 	$L_{f1} = \frac{k_z L_n}{BW}$  $C_{f1} = \frac{BW}{k_z L_n \omega_0^2}$ 	$L_{r1} = \frac{k_z L_n BW}{\omega_0^2}$  $C_{r1} = \frac{1}{k_z L_n BW}$ 
	$C_b = \frac{C_n}{k_z \omega_0}$ 	$L_a = \frac{k_z}{C_n \omega_0}$ 	$L_{f2} = \frac{k_z BW}{C_n \omega_0^2}$  $C_{f2} = \frac{C_n}{k_z BW}$ 	$L_{r2} = \frac{k_z}{C_n BW}$  $C_{r2} = \frac{C_n BW}{k_z \omega_0^2}$ 

Fonte: Abrão, T. (2002) [1].

## 3 Metodologia Experimental

### 3.1 FPB

Projetar um FPB com resposta Butterworth de 3a. ordem utilizando apenas um indutor, terminações como no caso anterior, isto é,  $R_S = 50\Omega$  e  $R_L = 470\Omega$  e  $f_c = 5,4 \text{ kHz}$ . Implemente e caracterize a resposta em frequência do filtro passivo, determinando experimentalmente os parâmetros que caracterizam o filtro FPB:

- frequência de corte;
- atenuação fora da faixa de passagem (dB/década);
- atenuação na faixa de passagem;
- defasagem ao longo de toda a faixa de frequências (de passagem e rejeição).

### 3.2 FPA

Refaça o item anterior para um FPA com resposta Butterworth de 3a. ordem utilizando apenas um indutor, terminações  $R_S = 470\Omega$  e  $R_L = 50\Omega$  e  $f_c = 4,6 \text{ kHz}$ . Implemente e caracterize a resposta em frequência do filtro passivo, anotando os parâmetros que caracterizam o filtro FPA.

### 3.3 FPF Cascata

Conecte os dois filtros em série (cascata) observando as impedâncias e meça a resposta em frequência do conjunto. Qual a função de transferência correspondente? Quais a(s) nova(s) frequência(s) de corte.

### 3.4 FPF

Projete um filtro Butterworth com a função de transferência resultante da associação dos filtros do item anterior a partir dos valores tabelados para os elementos LC de protótipo.

- implemente novamente o filtro, agora utilizando os elementos de projeto do item 4.
- compare a resposta em frequência (módulo) com a obtida no item 3a.



## 4 Resultados e Análise de Dados

### 4.1 FPB

O primeiro filtro projetado foi um filtro passa-baixas de terceira ordem, com resposta do tipo Butterworth utilizando apenas 1 indutor.

A figura 4.1 mostra o circuito normalizado.

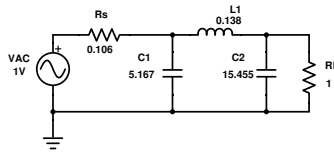


Figura 5: Filtro passa-baixas normalizado.

A figura 4.1 mostra o circuito já desnormalizado, pronto para simulação.

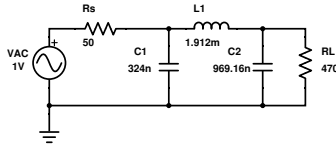


Figura 6: Filtro desnormalizado passa-baixas.

A resposta em frequência obtida está na figura 4.1, onde foi obtido uma frequência de corte de 5,317 kHz.

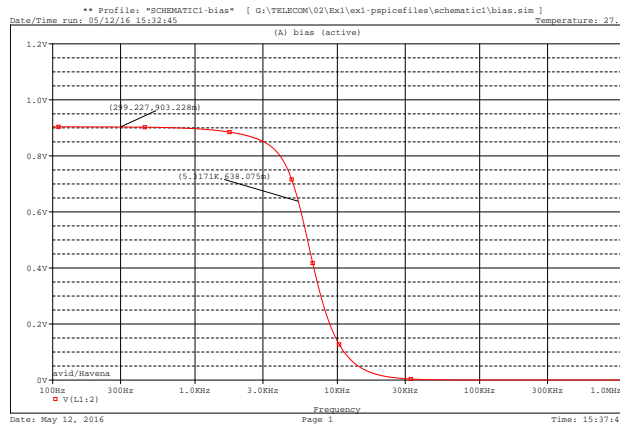


Figura 7: Resposta em frequência do filtro passa-baixas.

A figura 4.1 mostra a resposta em dB, nota-se que a atenuação aumenta em aproximadamente 60 dB por década, o que corresponde a ordem 3 do filtro.

A figura 4.1 mostra a fase da resposta em frequência para o filtro passa baixas, onde é possível observar uma defasagem de 270 graus, o que condiz com a teoria pois o filtro é de ordem 3.

### 4.2 FPA

O segundo filtro projetado foi um filtro passa-altas de terceira ordem, com resposta do tipo Butterworth utilizando apenas 1 indutor.

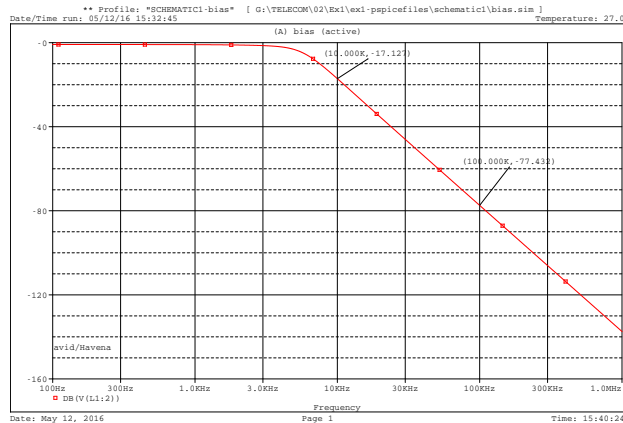


Figura 8: Resposta em frequência do filtro passa-baixas em dB.

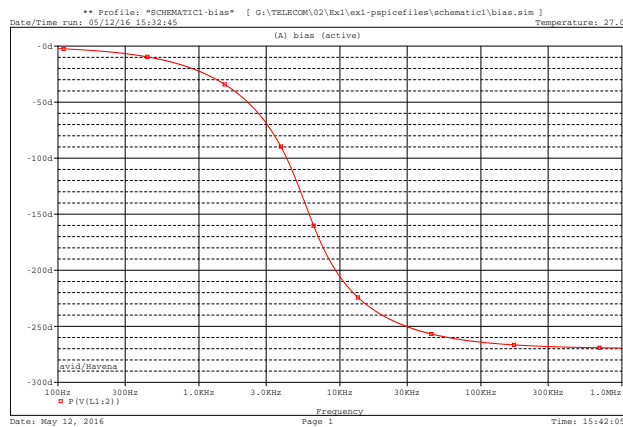


Figura 9: Fase da resposta em frequência do filtro passa-baixas.

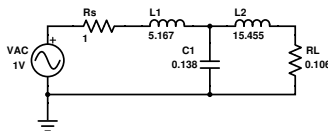


Figura 10: Filtro passa-altas normalizado.

A figura 4.2 mostra o circuito normalizado.

A figura 4.2 mostra o circuito já desnormalizado, pronto para simulação.

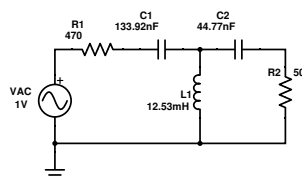


Figura 11: Filtro desnormalizado passa-altas.

A resposta em frequência obtida está na figura 4.2, onde foi obtido uma frequência de corte de 4,384 kHz.

A figura 4.2 mostra a resposta em dB, nota-se que a atenuação aumenta em aproximadamente 60 dB por década, o que corresponde a ordem 3 do filtro.

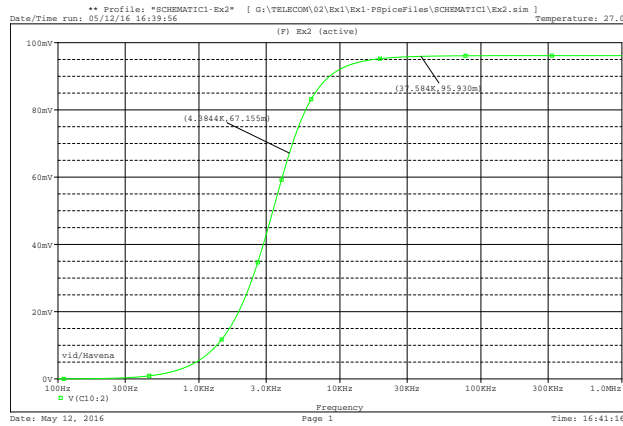


Figura 12: Resposta em frequência do filtro passa-altas.

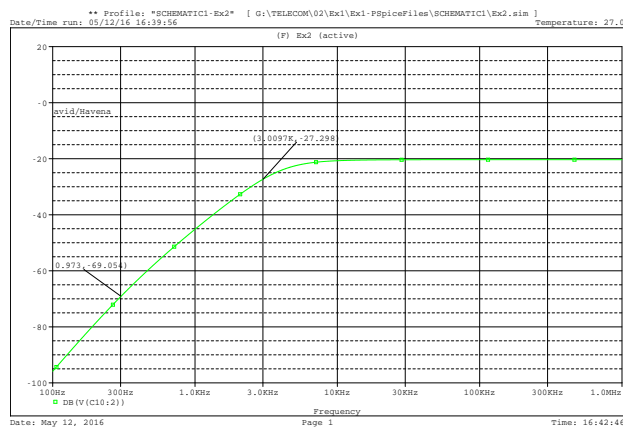


Figura 13: Resposta em frequência do filtro passa-altas em dB.

A figura 4.2 mostra a fase da resposta em frequência para o filtro passa altas, onde é possível observar uma defasagem de 270 graus, o que condiz com a teoria pois o filtro é de ordem 3.

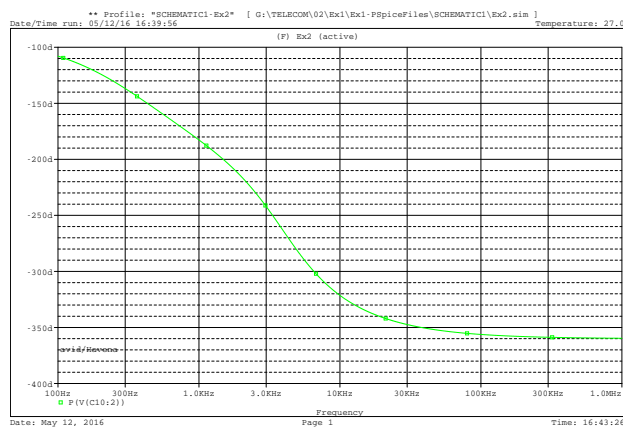


Figura 14: Fase da resposta em frequência do filtro passa-altas.

### 4.3 FPF em cascata

O terceiro filtro projetado foi um filtro passa-faixas em cascata de terceira ordem, com resposta do tipo Butterworth utilizando apenas 1 indutor.

A figura 4.3 mostra o circuito já desnormalizado, pronto para simulação.

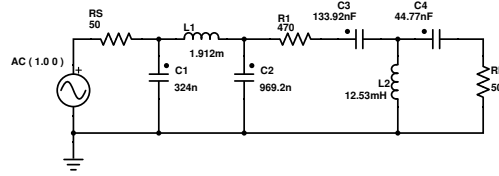


Figura 15: Filtro desnormalizado passa-faixa em cascata.

A resposta em frequência obtida está na figura 4.3, onde foi obtido uma frequência central de 4,655 kHz.

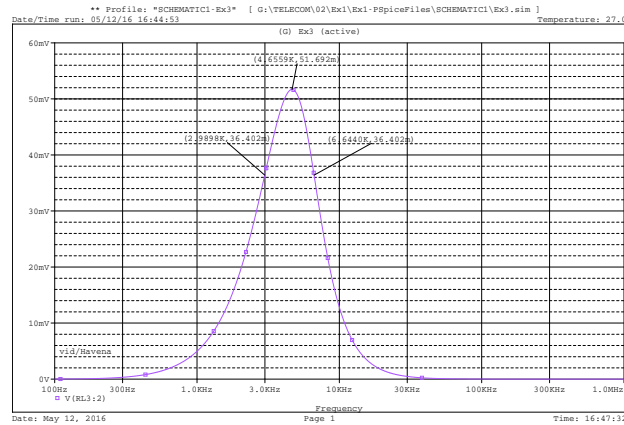


Figura 16: Resposta em frequência do filtro passa-faixa em cascata.

A figura 4.3 mostra a resposta em dB, nota-se que a atenuação aumenta em aproximadamente 60 dB por década, o que corresponde a ordem 3 do filtro.

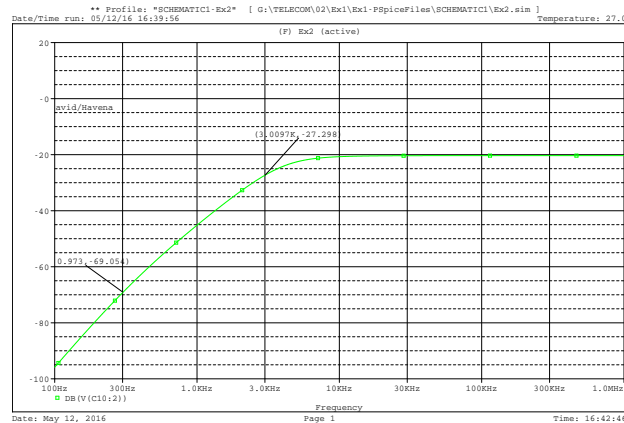


Figura 17: Resposta em frequência do filtro passa-faixa em cascata em dB.

A figura 4.3 mostra a fase da resposta em frequência para o filtro passa altas, onde é possível observar uma defasagem de 270 graus, o que condiz com a teoria pois o filtro é de ordem 3.

## 4.4 FPF

O quarto e ultimo filtro foi projetado para ter uma resposta em frequência semelhante a do filtro FPF. O objetivo foi de analisar as diferenças em se utilizar um filtro FPF e um filtro

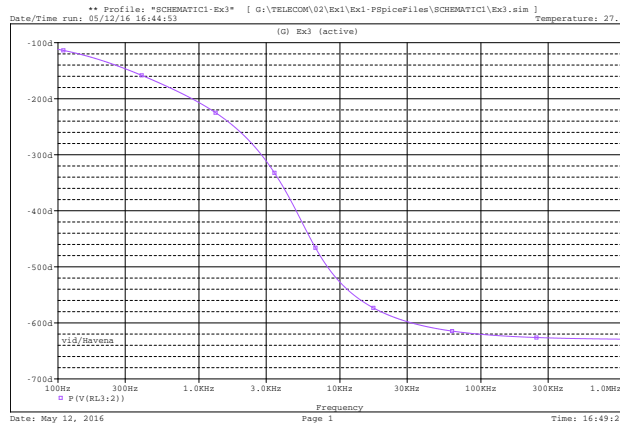


Figura 18: Fase da resposta em frequência do filtro passa-faixa em cascata.

FPB em conjunto com um filtro FPA.

O terceiro filtro projetado foi um filtro passa-faixas em cascata de terceira ordem, com resposta do tipo Butterworth utilizando apenas 1 indutor.

A figura 4.4 mostra o circuito já desnormalizado, pronto para simulação.

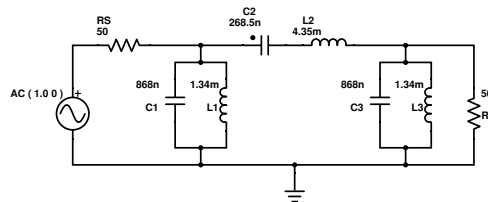


Figura 19: Filtro desnormalizado passa-faixa.

A resposta em frequência obtida está na figura 4.4, onde foi obtido uma frequência central de 4,655 kHz.

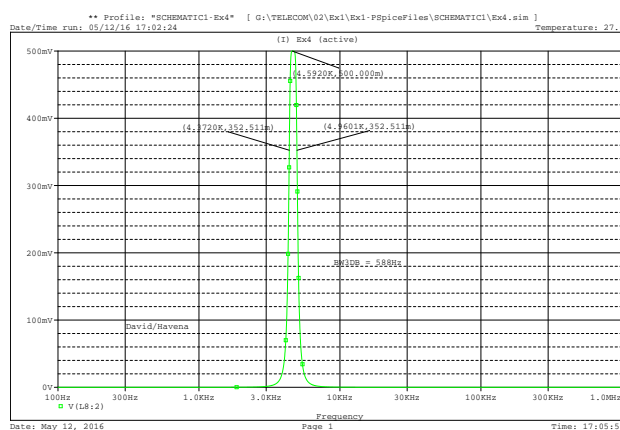


Figura 20: Resposta em frequência do filtro passa-faixa.

A figura 4.4 mostra a resposta em dB, nota-se que a atenuação aumenta em aproximadamente 60 dB por década, o que corresponde a ordem 3 do filtro.

A figura 4.4 mostra a fase da resposta em frequência para o filtro passa altas, onde é possível observar uma defasagem de 270 graus, o que condiz com a teoria pois o filtro é de ordem 3.

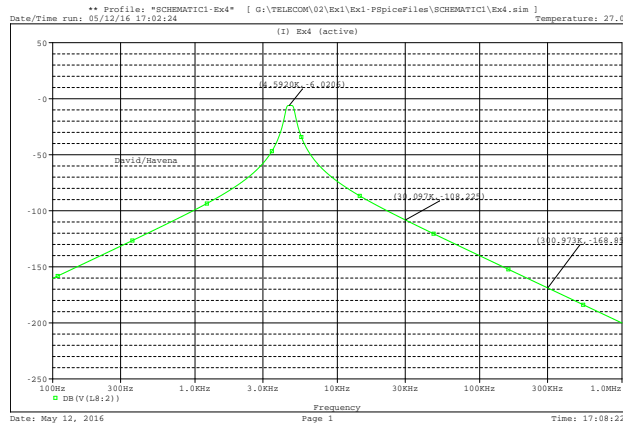


Figura 21: Resposta em frequência do filtro passa-faixa em dB.

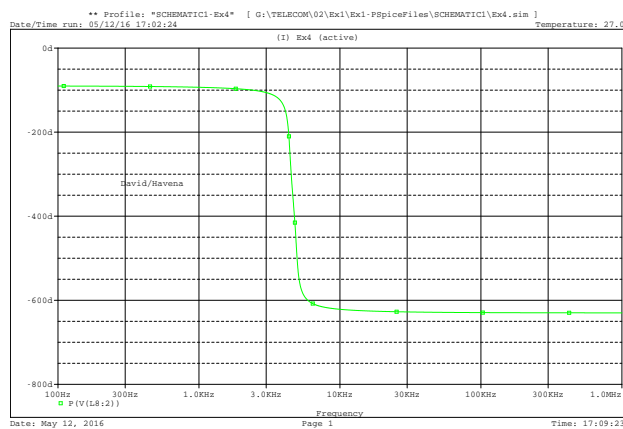


Figura 22: Fase da resposta em frequência do filtro passa-faixa.

## 5 Discussão e Conclusão

Conclui-se que o cálculo para o projeto de filtros passivos possui fundamento, pois a resposta obtida na simulação é bastante próxima da resposta desejada. Observou-se também que pode-se utilizar de vários filtros em cascata para obter uma determinada resposta em frequência. Isso ajuda a reduzir a ordem do filtro, tornando-os mais baratos e a melhorar o fator de qualidade (Q) do filtro. Sendo assim, vimos nesse laboratório conceitos fundamentais para o engenheiro eletricitista, de modo a firmar os conhecimentos adquiridos durante as aulas teóricas.

## 6 Referências Bibliográficas

- [1] T. Abrão, *Circuitos de Telecomunicações*. Londrina - Paraná: Dep. de Engenharia Elétrica, UEL, 2002.
- [2] L. W. Couch, *Digital and Analog Communication Systems*. New Jersey: Prentice Hall Inc, 2001.