

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA  
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA INDUSTRIAL ELETRÔNICA

CHARI MIDORI SASAKI  
LARISSA KEIKO OSHIRO

**KIT DIDÁTICO PARA A IMPLEMENTAÇÃO DE  
FILTROS PASSIVOS E ATIVOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA  
2014

CHARI MIDORI SASAKI  
LARISSA KEIKO OSHIRO

## **KIT DIDÁTICO PARA A IMPLEMENTAÇÃO DE FILTROS PASSIVOS E ATIVOS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado ao Curso Superior de Engenharia Industrial Eletrônica, do Departamento de Eletrônica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Prof. Dr. Joaquim Miguel Maia

CURITIBA  
2014

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

CHARI MIDORI SASAKI  
LARISSA KEIKO OSHIRO

### **KIT DIDÁTICO PARA A IMPLEMENTAÇÃO DE FILTROS PASSIVOS E ATIVOS**

Trabalho de conclusão de curso aprovado como requisito à obtenção do grau de Engenheiro, do Curso Superior de Engenharia Industrial Elétrica com Ênfase em Eletrônica e Telecomunicações do Departamento Acadêmico de Eletrônica – DAELN – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR.

---

Prof. Dr. Joaquim Miguel Maia  
Professor orientador

---

Prof. Dr. Kleber Horikawa Nabas  
Professor convidado

---

Prof. Dr. Rubens Alexandre Faria  
Professor convidado

Curitiba, 21 de março de 2014.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, gostaríamos de agradecer ao Professor Dr. Joaquim Miguel Maia pela orientação, paciência e compreensão desprendidos para a realização deste projeto e também ao Professor Dr. Rubens Alexandre Faria por nos emprestar o osciloscópio USB, fundamental para este projeto.

Gostaríamos de agradecer a ajuda e empréstimo da casa do colega Gustavo Dambinski, e também a sua família por nos receberem tão bem.

Aos colegas de curso que em alguns momentos nos deram soluções para problemas, a primeira vista, impossíveis de serem solucionados, principalmente os colegas André Vinícius Bezerra, Bruno Thimóteo de Souza, Diego Reis, Diogo Wachtel Granado, Jonas Kenzo Hamasaki, José Carlos de Oliveira Jr. e Philipe Dias, este que nos ajudou da Alemanha.

E por último, mas não menos importante, às nossas famílias que compreenderam e nos apoiaram neste momento importante de nossas vidas acadêmicas.

## RESUMO

SASAKI, Chari Midori; OSHIRO, Larissa Keiko. **Kit didático para implementação de filtros passivos e ativos**. 2014. 145 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Superior de Engenharia Industrial Eletrônica), Departamento Acadêmico de Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

A implementação de filtros para remover ou amenizar os sinais indesejados, melhorando a aquisição de dados de equipamentos, principalmente, de telecomunicação ou de instrumentação, tem um papel fundamental na indústria eletrônica. Neste contexto, este trabalho apresenta um kit didático para a implementação fácil e prática de filtros analógicos, visando incentivar os estudantes ao estudo de filtros analógicos. O kit é composto por uma bancada para exemplificar na prática o funcionamento de filtros passivos e ativos, uma apostila com as explicações teóricas e um gerador de funções, composto por um Arduino e um módulo DDS (Digital Direct Synthesis), o qual irá gerar um sinal senoidal de entrada que será aplicado ao sistema. Além disso, foi elaborada uma fonte de alimentação simétrica de  $\pm 12V$  (suportando uma corrente de 1A, no máximo), a qual alimentará o amplificador operacional, utilizado para a implementação de filtros ativos. O sistema permite a implementação de filtros passivos e ativos. Em ambos os casos, podem ser testados filtros passa-baixa, passa-alta, passa-faixa e rejeita faixa. A frequência do sinal de entrada será selecionada via display LCD, que se comunicará com o arduino, gerando, juntamente com o módulo DDS, o sinal de entrada, na faixa entre 5 Hz e 2 MHz. Para os testes foi usado um osciloscópio e verificou-se que foi possível a implementação de todos os filtros anteriormente citados.

**Palavras chave:** Filtro passivo. Filtro ativo. Bancada didática. DDS.

## ABSTRACT

SASAKI, Chari Midori; OSHIRO, Larissa Keiko. **Didactic kit for passives and actives filter implementation**. 2014. 145 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Superior de Engenharia Industrial Eletrônica), Departamento Acadêmico de Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

The implementation of filters to remove or mitigate the unwanted signals, improving data acquisition equipment, mainly for telecommunications or instrumentation, has a key role in the electronics industry. In this context, this work presents an educational kit for easy and practical implementation of analog filters, aimed at encouraging students to study analog filters. The kit contains a stand to instance the passives and actives filters' behavior, a handout with theoretical explanations, a signal generator of sine waves comprised by an Arduino and a DDS module (Digital Direct Synthesis), which will generate a sine input signal applied to the system. In addition, a symmetrical power supply +12 V was created (a current of 1A supporting a maximum), which feeds the operational amplifier used for implementing active filters. The system enables the deployment of passive and active filters. In both cases, can be tested low pass, high-pass, band-pass and band reject filters. The frequency of the input signal will be selected via LCD display that communicates with the Arduino generating along with the DDS module the input signal, in the range from 5 Hz to 2 MHz. For testing an oscilloscope was used and the tests had demonstrated it was possible to implement all the filters mentioned above.

**Keywords:** Passive filter. Active Filter. Didactic stand. DDS.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2 – Diagrama em blocos do sistema desenvolvido. ....	13
Figura 3 - Módulo DDS.....	15
Figura 4 – Diagrama de blocos básico do DDS.....	16
Figura 5 - Espectro de saída de um sinal amostrado .....	17
Figura 6 - Pinagem do AD9850 .....	17
Figura 7 - Placa Arduíno Uno .....	19
Figura 8 - Diagram em blocos do Atmega 328.....	20
Figura 9 - Shield LCD para o Arduíno .....	21
Figura 10 - Diagrama em blocos de uma fonte analógica .....	23
Figura 11 - Representação esquemática de um divisor de tensão.....	23
Figura 12 - Simbologia dos filtros .....	25
Figura 13 - Curvas de Respostas dos filtros (ideal e real).....	26
Figura 14 - Circuito RLC série .....	28
Figura 15 - Variação de fase do circuito RLC série .....	28
Figura 16 - Módulo da resposta em frequência .....	29
Figura 17 – Seletividade.....	30
Figura 18 - Filtro passa-baixa RL .....	31
Figura 19 - Filtro passa-baixa RC.....	32
Figura 20 - Curva de Resposta em frequência do filtro passa-baixa – Ganho de tensão .....	33
Figura 21 - Curva de resposta em frequência do filtro passa-baixa – Fase .....	33
Figura 22 - Filtro passa-alta RL.....	34
Figura 23 - Filtro Passa-Alta RC.....	35
Figura 24 - Curva de resposta em frequência do filtro passa-alta - ganho de tensão .....	36
Figura 25 - Curva de resposta em frequência filtro passa-alta – Fase .....	36
Figura 26 - Filtro passa-faixa RLC série.....	37

Figura 27 - Filtro passa-faixa RLC paralelo.....	38
Figura 28 - Filtro passa-faixa RC.....	40
Figura 29 - Curva de resposta em frequência filtro passa-faixa - ganho em tensão .	41
Figura 30 - Curva de resposta em frequência filtro passa-faixa – fase .....	41
Figura 31 - Filtro rejeita-faixa RLC série.....	42
Figura 32 - Filtro rejeita-faixa RLC paralelo.....	43
Figura 33 - Filtro rejeita-faixa RC – duplo T.....	45
Figura 34 - Resposta em Frequência Filtro Rejeita-Faixa duplo T .....	45
Figura 35 - Filtro rejeita-faixa duplo T .....	45
Figura 36 - Curva de resposta em frequência para o filtro rejeita-faixa – ganho de tensão .....	47
Figura 37 - Curva de resposta em frequência do filtro rejeita-faixa – fase .....	47
Figura 38 - Simbologia do amplificador operacional.....	50
Figura 39 - Símbolo de um amplificador genérico .....	50
Figura 40 - Gráfico ganho versus frequência de um ampop. ....	52
Figura 41 - Gráfico frequência versus ganho .....	52
Figura 42 - Frequência normalizada $w/w_0$ .....	53
Figura 43 - Círculo de Butterworth, para n igual a um número par (a) e para n igual a um número ímpar (b).....	54
Figura 44 - Projeto de filtro ativo passa-baixa de 1ª. Ordem.....	56
Figura 45 - Curva de resposta em frequência (Ganho de tensão) do filtro PB de 1ª. Ordem .....	57
Figura 46 - Curva de resposta em frequência (fase) do filtro PB de 1ª. Ordem .....	57
Figura 47 - Projeto de filtro ativo passa-baixa de 2ª. Ordem.....	58
Figura 48 - Curva de resposta em frequência (Ganho de tensão) do filtro PB de 1ª. Ordem .....	59
Figura 49 - Curva de resposta em frequência (fase) do filtro PB de 2ª. Ordem .....	59
Figura 50 - Cascadeamento de filtros PB para obter filtros PB de ordem maior que 2 .....	60



Figura 51 - Projeto de filtro ativo passa-alta de 1ª. Ordem.....	60
Figura 52 - Projeto de filtro ativo passa-alta de 2ª. Ordem.....	61
Figura 53 - Cascadeamento de filtros PB e PA de ordem n para obter um filtro PF de ordem 2n. ....	63
Figura 54 - Projeto de filtro ativo passa-faixa .....	63
Figura 55 - Curva de resposta em frequência (Ganho de tensão) do filtro PF .....	64
Figura 56 - Curva de resposta em frequência (fase) do filtro PF .....	65
Figura 57 - Cascadeamento de filtro PF para projetar um filtro de ordem maior que 2 .....	65
Figura 58 - Projeto de filtro ativo rejeita-faixa .....	66
Figura 59 - Curva de resposta em frequência (Ganho de tensão) do filtro RF .....	67
Figura 60 - Curva de resposta em frequência (fase) do filtro RF.....	67
Figura 61 - Diagrama de blocos do gerador de funções. ....	68
Figura 62 - Hardware do Gerador de Função.....	69
Figura 63 - Esquemático do Gerador de Função .....	70
Figura 64 - Seleção via LCD do valor da frequência do sinal do gerador .....	71
Figura 65 - Sinal de saída do gerador de função com frequência de 10 kHz.....	72
Figura 66 - Fluxograma do software do gerador de função.....	73
Figura 67 - Função da leitura do valor no pino analógico.....	74
Figura 68 - Código que chama a função de execução de cada botão .....	75
Figura 69 - Funções que convertem o sinal analógico para digital e o envia para o DDS.....	76
Figura 70 - Esquemático da fonte de alimentação simétrica $\pm 12V$ .....	77
Figura 71 – Protótipo da fonte de alimentação simétrica $\pm 12V$ .....	77
Figura 72 - Curva de resposta em frequência do filtro passa-alta RL .....	80
Figura 73 - Resposta em frequência do filtro passa-alta RL - curva real esperada...	81
Figura 74 - Curva de resposta em frequência de um circuito RF de 60Hz e 2 estágios .....	83

Figura 75 - Curva de resposta em frequência de um circuito RF de 60Hz e 2 estágios .....	84
Figura 76 – Conector kre 2 vias .....	85
Figura 77 – Osciloscópio .....	91
Figura 78 - Filtro passa-baixa RL .....	92
Figura 79 - Curva de resposta em frequência para o filtro passa-baixa RL .....	94
Figura 80 - Curva esperada de resposta em frequência do filtro passa-baixa .....	94
Figura 81 - Filtro passa-baixa RC.....	95
Figura 82 - Curva de resposta em frequência do filtro passa-baixa RC .....	97
Figura 83 - Filtro Passa-Alta RL .....	97
Figura 847 - Curva de resposta em frequência do filtro passa-alta RL .....	99
Figura 85 - Curva esperada de resposta em frequência filtro passa-alta .....	99
Figura 86 - Filtro passa-alta RC .....	100
Figura 87 - Curva de resposta em frequência filtro passa-alta RC.....	102
Figura 88 - Filtro passa-faixa RLC série.....	102
Figura 892 - Resposta em frequência filtro passa-faixa RLC série .....	104
Figura 90 - Curva esperada de resposta em frequência filtro passa-faixa .....	105
Figura 91 - Filtro passa-faixa RLC paralelo.....	105
Figura 92 - Curva de resposta em frequência filtro passa-faixa RLC paralelo .....	107
Figura 93 - Filtro passa-faixa RC.....	108
Figura 94 - Curva de resposta em frequência filtro passa-faixa RC .....	109
Figura 95 - Filtro rejeita-faixa RLC série.....	110
Figura 96- Curva de resposta em frequência do filtro rejeita-faixa RLC série .....	112
Figura 97 - Curva esperada de resposta em frequência do filtro rejeita-faixa .....	112
Figura 98 - Filtro rejeita-faixa RLC paralelo.....	113
Figura 99 - Resposta em frequência do filtro rejeita-faixa RLC paralelo .....	115
Figura 100 - Filtro rejeita-faixa duplo T.....	115

Figura 101 - Resposta em frequência do filtro rejeita-faixa duplo T .....117

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Polinômios normalizados de Butterworth .....	54
Tabela 2 - Parâmetros para filtros Butterworth.....	55
Tabela 3 - Dados coletados do filtro passa-alta RL .....	79
Tabela 4 - Dados coletados do filtro rejeita-faixa de 4 <sup>a</sup> . Ordem .....	82
Tabela 5 - Dados filtro passa-baixa RL.....	92
Tabela 6 - Dados do filtro passa-baixa RC .....	95
Tabela 7 - Dados do filtro passa-alta RL.....	98
Tabela 8 - Dados filtro passa-alta RC .....	100
Tabela 9 - Dados do filtro passa-faixa série.....	103
Tabela 10 - Dados do filtro passa-faixa RLC paralelo .....	106
Tabela 11 - Dados do filtro passa-faixa RLC paralelo .....	108
Tabela 12 - Dados do filtro rejeita-faixa RLC série.....	110
Tabela 13 - Dados do filtro rejeita-faixa RLC paralelo.....	113
Tabela 14 - Dados obtidos do filtro rejeita-faixa duplo T. ....	116
Tabela 15 – Valores dos parâmetros e componentes do filtro passa-faixa de 1 <sup>a</sup> . ordem.....	119
Tabela 16 – Dados coletados do filtro passa-baixa de 2 <sup>a</sup> . ordem .....	119
Tabela 17 – Valores dos parâmetros e componentes do filtro passa-baixa de 2 <sup>a</sup> . ordem.....	121
Tabela 18 – Dados coletados do filtro passa-baixa de 2 <sup>a</sup> . ordem .....	121
Tabela 19 – Valores dos parâmetros e componentes do filtro passa-baixa de 3 <sup>a</sup> . ordem.....	123
Tabela 20 – Dados coletados do filtro passa-baixa de 3 <sup>a</sup> . ordem .....	123
Tabela 21 – Valores dos parâmetros e componentes do filtro passa-alta de 1 <sup>a</sup> . ordem.....	125
Tabela 22 – Dados coletados do filtro passa-alta de 1 <sup>a</sup> . ordem .....	125
Tabela 23 – Valores dos pa Tabela 30 – Dados coletados do filtro passa-faixa de 4 <sup>a</sup> . ordem ....	127
.....	127
Tabela 24 – Dados coletados do filtro passa-alta de 2 <sup>a</sup> . ordem .....	127
Tabela 25 – Valores dos parâmetros e componentes do filtro passa-alta de 3 <sup>a</sup> . ordem.....	129

Tabela 26 – Dados coletados do filtro passa-alta de 3 <sup>a</sup> . ordem .....	129
Tabela 27 – Valores dos parâmetros e componentes do filtro passa-faixa de 2 <sup>a</sup> . ordem.....	131
Tabela 28 – Dados coletados do filtro passa-alta de 3 <sup>a</sup> . ordem .....	131
Tabela 29 – Valores dos parâmetros e componentes do filtro passa-faixa de 2 <sup>a</sup> . ordem.....	133
Tabela 30 – Dados coletados do filtro passa-faixa de 4 <sup>a</sup> . ordem.....	133
Tabela 31 – Valores dos parâmetros e componentes do filtro rejeita-faixa de 2 <sup>a</sup> . ordem .....	136
Tabela 32 – Dados coletados do filtro rejeita-faixa de 2 <sup>a</sup> . ordem.....	136
Tabela 33 – Valores dos parâmetros e componentes do filtro rejeita-faixa de 4 <sup>a</sup> . ordem .....	138
Tabela 34 – Dados coletados do filtro rejeita-faixa de 4 <sup>a</sup> . ordem.....	138

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

DDS	<i>Digital Direct Synthesis</i>
PLL	<i>Phase-locked loop</i>
D/A	Digital-Analógico
A/D	Analógico-Digital
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i>
RX	Receptor
TX	Transmissor
SMPS	<i>Switched Power Mode Supplies</i>
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
PB	Passa-baixa
PA	Passa-alta
PF	Passa-faixa
AmpOp	Amplificador Operacional
MFB	Estrutura de realimentação Múltipla ( <i>Multiple Feedback</i> )
VCVS	Estrutura da fonte de tensão controlada por tensão ( <i>Voltage-Controlled Voltage Source</i> )
f	Frequência em Hertz. Medida em hertz (Hz)
Q	Fator de Qualidade ou seletividade
Av	Ganho. Pode ser medido em decibels (dB)
V	Tensão. Medida em volt (V)
BW	Largura de banda
PCI	Placa de Circuito Impresso
GND	<i>Ground</i>
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>

MODEM	<i>Modulation-Demodulator</i>
CI	Circuito Integrado
RC	Circuitos de Resistores e Capacitores
LC	Circuitos de Indutores e Capacitores

## Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>11</b>
1.1	JUSTIFICATIVA	12
1.2	OBJETIVOS	12
1.2.1	Objetivo Geral	12
1.2.2	Objetivos Específicos	12
1.2.3	Diagrama	12
1.3	EMBASAMENTO TEÓRICO	14
1.4	METODOLOGIA	14
<b>2</b>	<b>Fundamentação Teórica</b>	<b>14</b>
2.1	GERADOR DE FUNÇÃO	14
2.1.1	Módulo DDS	14
2.1.2	Arduíno	18
2.2	FONTE DE ALIMENTAÇÃO SIMÉTRICA	22
2.3	FILTROS	24
2.4	RESSONÂNCIA, FATOR $Q_0$ E SELETIVIDADE	27
2.5	FILTROS PASSIVOS	30
2.5.1	Filtro passa-baixa passivo	31
2.5.2	Filtro passa-alta	34
2.5.3	Filtro Passa-Faixa	36
2.5.4	Filtro Rejeita-Faixa	41
2.6	FILTROS ATIVOS	48
2.6.1	Vantagens e Desvantagens dos filtros ativos	48
2.6.2	Amplificador Operacional	49
2.6.3	Tipos de filtros quanto à função-resposta	53
2.6.4	Tipos de Filtro quanto à função executada	55
<b>3</b>	<b>DESENVOLVIMENTO</b>	<b>68</b>
3.1	DESENVOLVIMENTO GERAL	68
3.1.1	Estudo sobre filtros ativos e passivos	68
3.1.2	Gerador de Funções	68
3.1.3	Fonte de Alimentação Simétrica	76
3.1.4	Projetos dos filtros	77
3.1.5	Bancada	84
3.1.6	Placa desenvolvida para filtros ativos	85
3.1.7	Software utilizado para desenvolver as placas PCB	87
3.1.8	Material de apoio	89
<b>4</b>	<b>TESTES E ANÁLISES</b>	<b>90</b>
4.1	TESTES E ANÁLISES DO GERADOS DE FUNÇÃO	90
4.2	TESTES E ANÁLISES DOS FILTROS PASSIVOS	91
4.2.1	Filtro Passa-Baixa RL	91
4.2.2	Filtro Passa-Baixa RC	94



4.2.3	Filtro Passa-Alta RL .....	97
4.2.4	Filtro Passa-Alta RC .....	100
4.2.5	Filtro Passa-Faixa RLC série .....	102
4.2.6	Filtro Passa-Faixa RLC Paralelo .....	105
4.2.7	Filtro Passa-Faixa RC .....	107
4.2.8	Filtro Rejeita-Faixa RLC série .....	110
4.2.9	Filtro Rejeita-Faixa RLC paralelo .....	112
4.2.10	Filtro Rejeita-Faixa duplo T .....	115
4.3	TESTES E ANÁLISES DOS FILTROS ATIVOS .....	117
4.3.1	Filtro Passa-Baixa – 1ª. ordem .....	118
4.3.2	Filtro Passa-Baixa – 2ª. ordem (Butterworth) .....	121
4.3.3	Filtro Passa-Baixa – 3ª. ordem (Butterworth) .....	122
4.3.4	Filtro Passa-Alta – 1ª. ordem .....	124
4.3.5	Filtro Passa-Alta – 2ª. ordem (Butterworth) .....	126
4.3.6	Filtro Passa-Alta – 3ª. ordem (Butterworth) .....	128
4.3.7	Filtro Passa-Faixa – 2ª. ordem (Butterworth) .....	130
4.3.8	Filtro Passa-Faixa – 4ª. ordem (Butterworth) .....	133
4.3.9	Filtro Rejeita-Faixa – 2ª. ordem (Butterworth) .....	135
4.3.10	Filtro Rejeita-Faixa – 2ª. ordem (Butterworth) .....	137
<b>5</b>	<b>DISCUSSÃO E CONCLUSÕES</b> .....	<b>141</b>
5.1	POSSÍVEIS MELHORIAS .....	141
5.2	DIFICULDADES ENCONTRADAS .....	141
5.3	CONCLUSÃO .....	142
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>143</b>
<b>7</b>	<b>APÊNDICES</b> .....	<b>147</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A atuação de filtros tem apresentado um crescimento significativo na área da eletrônica. É raro encontrar algum sistema eletrônico que não contenha nenhum tipo de filtro. Seu papel vem sendo de grande importância principalmente nos ramos das telecomunicações e da instrumentação industrial. Um exemplo que pode ser citado e que é facilmente encontrado no dia-a-dia são os chamados MODEM (*Modulation-DEModulator*), através dos quais os terminais de computadores são conectados à rede telefônica. E os filtros (ativos) são elementos constituintes básicos desses equipamentos (PERTENCE, 1988, p.189).

Segundo Brandshaw (1987), filtros podem ser definidos como “um circuito que apresenta um comportamento típico em função da frequência do sinal a ele aplicado”, de modo que possibilite a passagem de sinais de determinadas frequências, removendo ou amenizando os sinais com frequências indesejadas.

Esses circuitos são compostos basicamente por impedâncias interconectadas e o sinal de saída depende dos valores das resistências, capacitâncias e indutâncias presentes no sistema e de como esses elementos estão conectados entre si (MUSSOI, 2004, p.24).

A tecnologia mais antiga para a aplicação de filtros utiliza indutores e capacitores, formando circuitos chamados de filtros passivos LC. No entanto, os indutores apresentam algumas limitações, tais como impossibilidade de serem produzidos na forma monolítica (ou em CIs), incompatibilidade com as técnicas modernas de montagem de sistemas eletrônicos, além de serem inviáveis para certas frequências por conta de seu tamanho volumoso. Por esse motivo, vem sido cada vez mais viável os filtros que não fazem uso de indutores. Desses, os mais conhecidos são os filtros ativos RC, os quais utilizam amplificadores operacionais, motivo pelo qual são considerados filtros ativos, combinados com os elementos passivos, resistores e capacitores (SEDRA, Adel S.; SMITH, Kenneth C., 2000, p.812).

Considerando essa crescente importância em diversas áreas da tecnologia, especialmente na eletrônica, a realização desse projeto tem a intenção de incentivar o conhecimento sobre filtros, propondo um forma prática e didática de aprendizado sobre o assunto. Serão abordados os dois tipos de filtros anteriormente mencionados, filtros passivos e ativos. O sistema é composto basicamente por uma bancada, onde serão implementados os circuitos dos filtros analógicos, cujo sinal de entrada será produzido por um gerador de função usando a tecnologia DDS.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

No decorrer do curso de graduação em engenharia eletrônica, foi observado uma certa dificuldade por parte dos alunos no que diz respeito a filtros. Foi observado que a utilização de bancada para a prática de uma disciplina traz um melhor rendimento para os alunos, visto que facilita a visualização e o aprendizado. Percebe-se também que há uma otimização do tempo de montagem de circuitos, aumentando o tempo de análise de resultados.

Com o kit, os alunos terão em mãos um material de apoio para explicação teórica sobre filtros passivos e ativos e, logo, poderão implementar exemplos e acompanhar a análise passo-a-passo.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo desenvolver um kit didático de filtros passivos e ativos, composto por um material teórico de apoio, uma bancada de implementação de circuitos de filtros, um gerador de sinais e uma fonte de alimentação simétrica, para auxiliar no aprendizado de alunos de graduação ou de pessoas interessadas por esta área. Serão abordadas as etapas do projeto, desde o desenvolvimento até os testes práticos.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Projetar uma bancada contendo filtros passivos e filtros ativos;
- Projetar um gerador de sinais senoidais utilizando o Arduíno e o DDS (*Digital Direct Synthesis*);
- Desenvolver material de apoio com explicações e exemplos práticos;

### 1.2.3 Diagrama

O projeto pode ser descrito através do diagrama em blocos mostrado na figura 1.

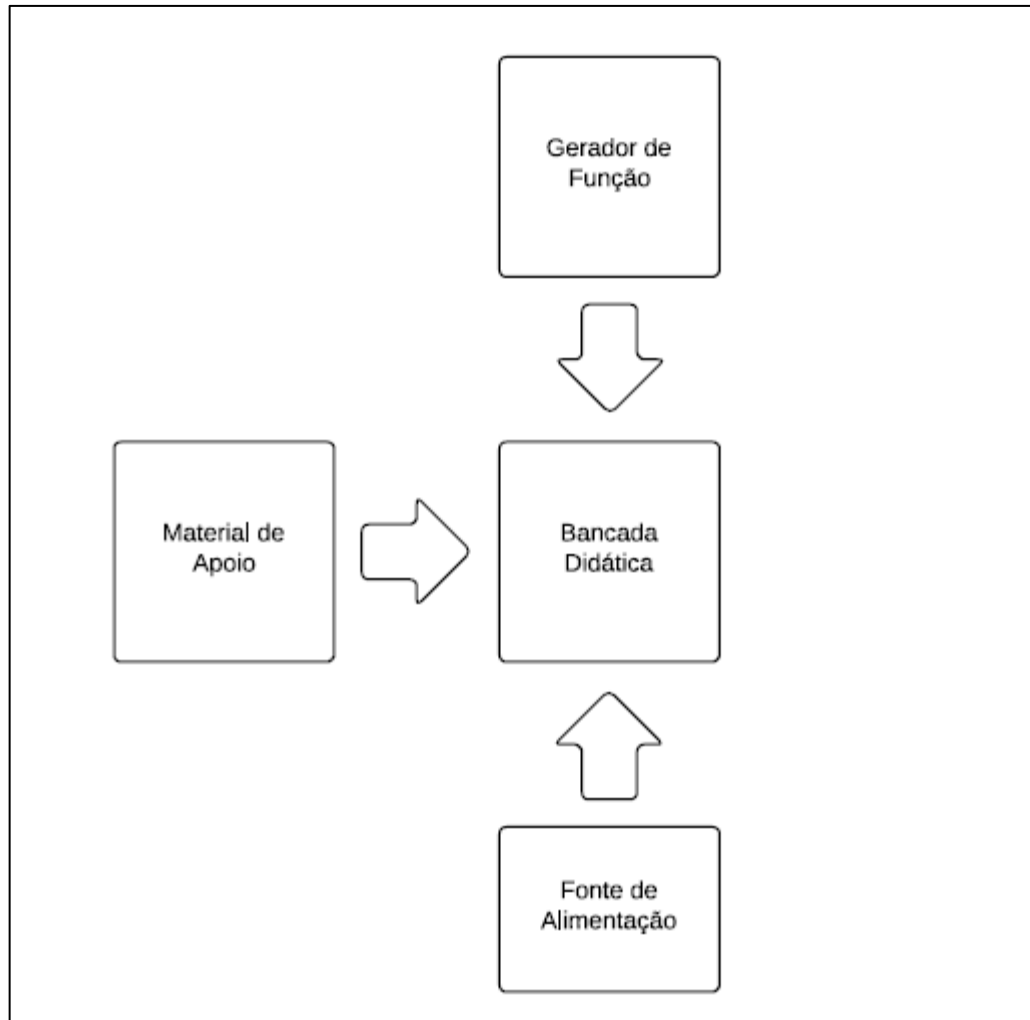


Figura 1 – Diagrama em blocos do sistema desenvolvido.  
 FONTE: Autoria própria (2014)

- Bloco Material de Apoio – representa o material de apoio desenvolvido para auxílio na parte teórica sobre filtros, com exemplos a serem testados na bancada.
- Bloco Bancada Didática – representa a bancada didática que será utilizada para testar os exemplos disponíveis no material de apoio. A bancada apresenta dimensões de 80 cm x 40 cm, contendo placas PCB de filtros ativos e bornes banana e conectores kre de 2 vias para os filtros passivos.
- Bloco Gerador de Sinais – representa o gerador de sinais senoidais desenvolvido com o Arduino e o DDS que irá gerar o sinal de entrada, cuja frequência compreende de 5 Hz a 2 MHz, para os circuitos da bancada.
- Bloco Fonte de Alimentação – representa a fonte de alimentação simétrica de  $\pm 12V$  que irá alimentar os amplificadores operacionais utilizados em filtros ativos.

### 1.3 EMBASAMENTO TEÓRICO

Para o desenvolvimento do projeto, foram utilizados conhecimentos de engenharia elétrica e engenharia eletrônica, sendo os principais:

- Circuitos elétricos;
- Filtros Passivos;
- Filtros Ativos;
- Amplificadores operacionais;
- Microcontroladores;
- Linguagem de programação C

### 1.4 METODOLOGIA

A metodologia utilizada foi baseada na coleta de dados, análise de gráficos e desenvolvida de acordo com os seguintes tópicos:

- Estudo de filtros;
- Projeto dos filtros ativos e passivos (cálculo da frequência de corte, levantamento da curva de resposta em frequência teórico, cálculo dos componentes);
- Montagem dos circuitos na bancada de testes
- Aplicação do sinal senoidal gerado pelo gerador de sinais desenvolvido;
- Leitura dos dados através do osciloscópio;
- Levantamento da curva de resposta em frequência através do excel;
- Análise dos gráficos;
- Comparação dos dados experimentais com os dados projetados;
- Comprovação do funcionamento.

## 2 Fundamentação Teórica

### 2.1 GERADOR DE FUNÇÃO

#### 2.1.1 Módulo DDS

Antigamente, para se obter sinais estáveis de alta frequência, eram muito utilizados os osciladores controlados por cristais. Quando o objetivo é se obter um número reduzido de frequências, essa opção ainda é recomendável. No entanto, se

for necessário uma grande número de frequências, o mais adequado seria utilizar um sintetizador PLL (*phase-locked loop*), ou seja, sintetizador de frequência com malha de captura de fase ou um DDS, ou seja, sintetizador digital direto (SCHULER, 2013, p. 111). Este último é a tecnologia utilizada no projeto e sua principal vantagem é a velocidade da frequência, uma vez que pode ser programada de tal maneira que seja capaz de gerar um grande número de frequências em alta resolução.

O principal componente do módulo DDS é o AD9850, um dispositivo altamente integrado que usa a tecnologia DDS a fim de construir um sintetizador de frequência digitalmente programável (ANALOG DEVICES, 2004).

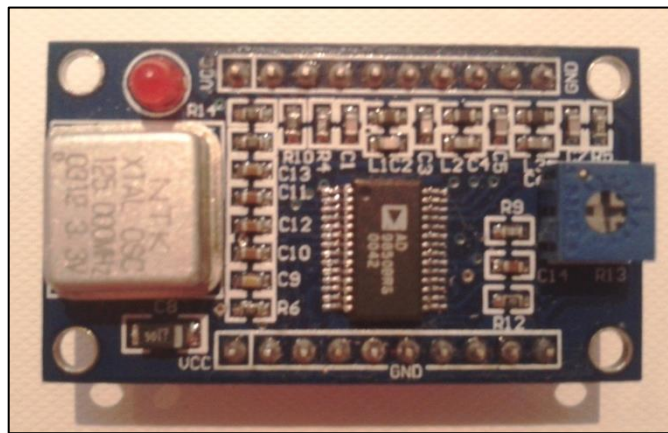


Figura 2 - Módulo DDS  
FONTE: Autoria própria (2014).

O AD9850 gera uma onda senoidal de saída, a qual é uma função de um sinal de *clock* e uma palavra de sintonia, que é representada por um número binário. Em palavra de sintonia de frequência é responsável por ajustar o valor de incremento de fase. Em cada pulso de *clock*, o acumulador de fase passa para uma nova posição na tabela de pesquisa da onda senoidal. Cada valor da senóide é então enviado da tabela de pesquisa para o conversor digital-analógico (D/A), o qual produz uma tensão correspondente à onda senoidal em um dado valor da fase. Após a filtragem das componentes de alta frequência, a saída torna-se próxima de uma onda senoidal (SCHULER, 2013, p. 111).

Conforme o fabricante do dispositivo Analog Devices (2004), esta senóide pode ser diretamente usada como uma fonte de frequência ou pode ser convertida a uma onda quadrada para ser usada como *clock*. A alta velocidade do AD9850 fornece 32 bits de ajuste de frequência, o que resulta numa resolução de ajuste de saída de 0.0291 Hz por 125 MHz da frequência de *clock*. A arquitetura do circuito permite a geração de frequência de saída de até metade da frequência do *clock* (62,5 MHz). Além disso, o dispositivo fornece 5 bits para modulação de fase controlada digitalmente, a qual possibilita o deslocamento de fase da saída, em incremento de 180°, 90°, 45°, 22.5° e 11.25° ou qualquer combinação combinação dos mesmos.

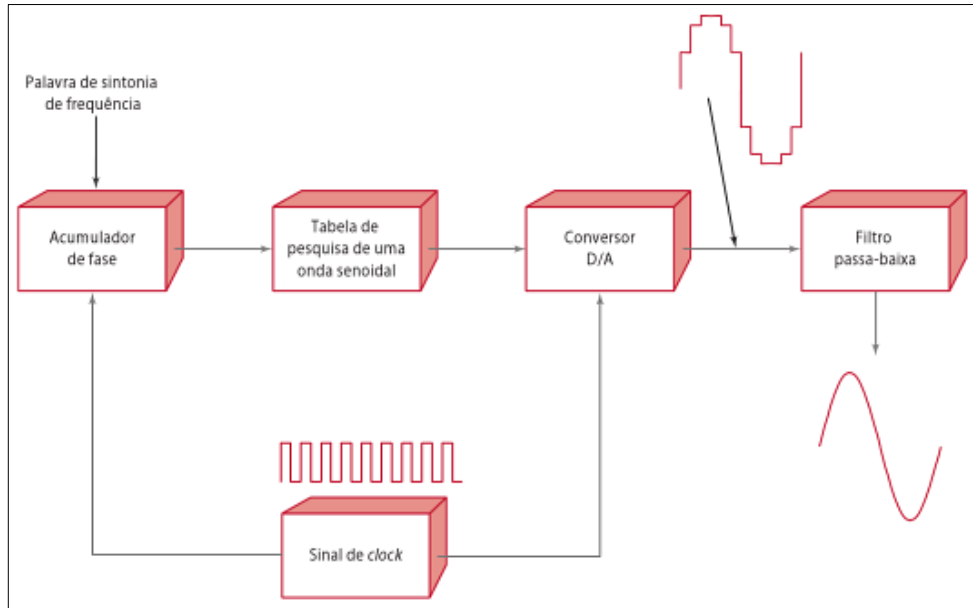


Figura 3 – Diagrama de blocos básico do DDS  
 FONTE: Schuler (2013)

Na Figura 3 é mostrado um diagrama de blocos básico do DDS. De acordo com a Analog Devices (2004), a frequência de saída pode ser calculada pela fórmula a seguir:

$$f_{saída} = \frac{(\Delta\phi \cdot f_{clock})}{2^N} \quad (1)$$

Onde:  $\Delta\phi$  = valor do incremento de fase;

$f_{clock}$  = frequência do *clock*;

$f_{saída}$  = frequência de saída;

$N$  = tamanho do acumulador de fase em termos do número de bits

Existem circuitos integrados DDS comerciais que contém acumuladores de fase com 32 bits, possibilitando, assim, operações em frequências iguais ou acima de 100MHz. O valor mais alto do incremento de fase está relacionado ao tamanho do acumulador de fase. Porém, isso não chega a ser possível na prática e o valor do incremento de fase corresponde a um número inteiro menor que  $2^N$  (Schuler, 2013, p.112).

O circuito do DDS é basicamente uma função do divisor de frequência digital, cuja resolução periódica é determinada pela frequência do *clock* do sistema e  $N$  - número de bits da fração da frequência do *clock*. O AD9850 é um sinal amostrado, cujo espectro de saída segue a teoria de amostragem de Nyquist. Especificamente, esse espectro de saída contém os sinais fundamentais de *aliasing* que ocorrem nos múltiplos da frequência do *clock*  $\pm$  a frequência de saída desejada (ANALOG DEVICES, 2004). Observando a Figura 4 é possível visualizar melhor isso.

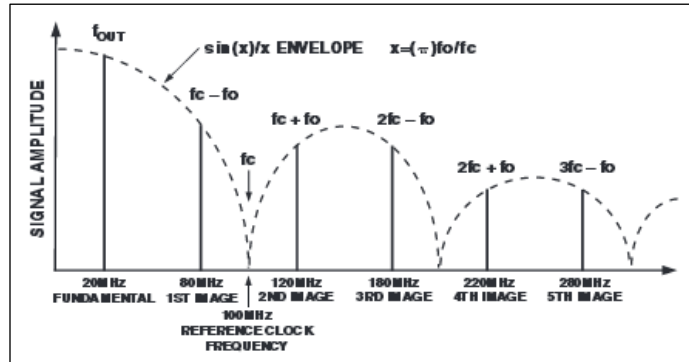


Figura 4 - Espectro de saída de um sinal amostrado  
 FONTE: Analog Devices (2004)

A frequência de *clock* do AD9850 tem uma limitação mínima de 1MHz. O dispositivo contém um circuito interno capaz de detectar quando o limite de velocidade mínimo do *clock* é excedido e automaticamente ativa o modo de desligamento. Quando se encontra neste estado e se a frequência do *clock* excede novamente esse limite, o dispositivo retoma o funcionamento normal. A função desse desligamento é impedir que o AD9850 seja prejudicado devido à corrente excedida.

Tanto a saída do conversor A/D quanto a entrada do comparador são disponíveis como sinais diferenciados que podem ser configurados de modo flexível em qualquer forma desejada para alcançar o objetivo do sistema final (ANALOG DEVICES, 2004).

### 2.1.1.1 Programando o AD9850

O AD9850 contém um registrador de 40 bits, usado para programar a palavra de sintonia de 32 bits, a modulação de fase de 5 bits e a função de desligar. Este registrador pode ser carregado de modo paralelo ou serial (ANALOG DEVICES, 2004).

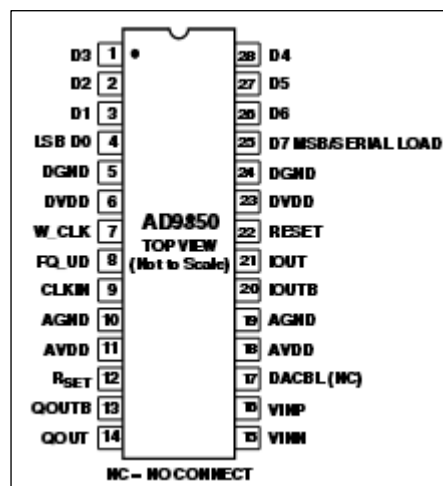


Figura 5 - Pinagem do AD9850  
 FONTE: Analog Devices (2004).



De acordo com a Analog Devices, o modo paralelo, o registrador é carregado por um barramento de 8 bits. Portanto, para completar os 40 bits são necessários cinco repetições de 8 bits. Os sinais *W\_CLK* e *FQ\_UD* são utilizados para endereçar e carregar registradores. A borda de subida do *FQ\_UD* carrega os 40 bits do dado de controle e resseta o endereço do ponteiro para o primeiro registrador. As bordas de subida subsequentes do *W\_CLK* carregam os dados de 8 bits [7:0] e movem o ponteiro para o registrador seguinte. Depois de carregar cinco vezes, as bordas do *W\_CLK* são ignorados até que seja ressetado ou que alguma borda de subida do *FQ\_UD* ressete o endereço do ponteiro para o primeiro registrador.

No modo serial, em contrapartida, as bordas de subida subsequentes do *W\_CLK* transferem o dado de 1 bit através da programação dos 40 bits de informação. Após a transferência dos 40 bits, é necessário um pulso do *FQ\_UD* para atualizar a frequência de saída (ANALOG DEVICES, 2004).

## 2.1.2 Arduíno

O arduíno é uma pequena placa de microcontrolador que contém um conector serial, um plugue de conexão USB, permitindo a ligação com um computador, além de alguns terminais de E/S analógica e digital, possibilitando a conexão com dispositivos externos, tais como motores, relés, sensores luminosos, entre outros.

Originalmente, o arduino foi desenvolvido como recurso auxiliar para estudantes e, por isso, apresenta facilidade de uso, possibilitando, no entanto, a criação de inúmeros projetos.

Além dessa vantagem, pode ser citado o fato de que o arduíno não se limita apenas a placas com microcontrolador. Há diversas placas acessórias, os chamados *shields*, que são compatíveis com o arduíno e são encaixadas diretamente por cima deste. Existem diversos tipos de *shields*, para diversas finalidades (MONK, 2013, p. 11). Um exemplo é o *shield* LCD, que será posteriormente descrito e utilizado neste projeto.

### 2.1.2.1 Hardware

De acordo com Monk (2013), o *hardware* consiste em uma placa “*open-source*”, ou seja, seus projetos estão disponíveis gratuitamente sob uma licença da Creative Commons, permitindo a construção de placas alternativas de menor custo. A mais usada é o Arduino Uno que, inclusive, foi a escolhida para este projeto.

A Figura 6 apresenta a placa de Arduino. Para um melhor conhecimento dela, a seguir serão descritos alguns dos seus vários componentes.

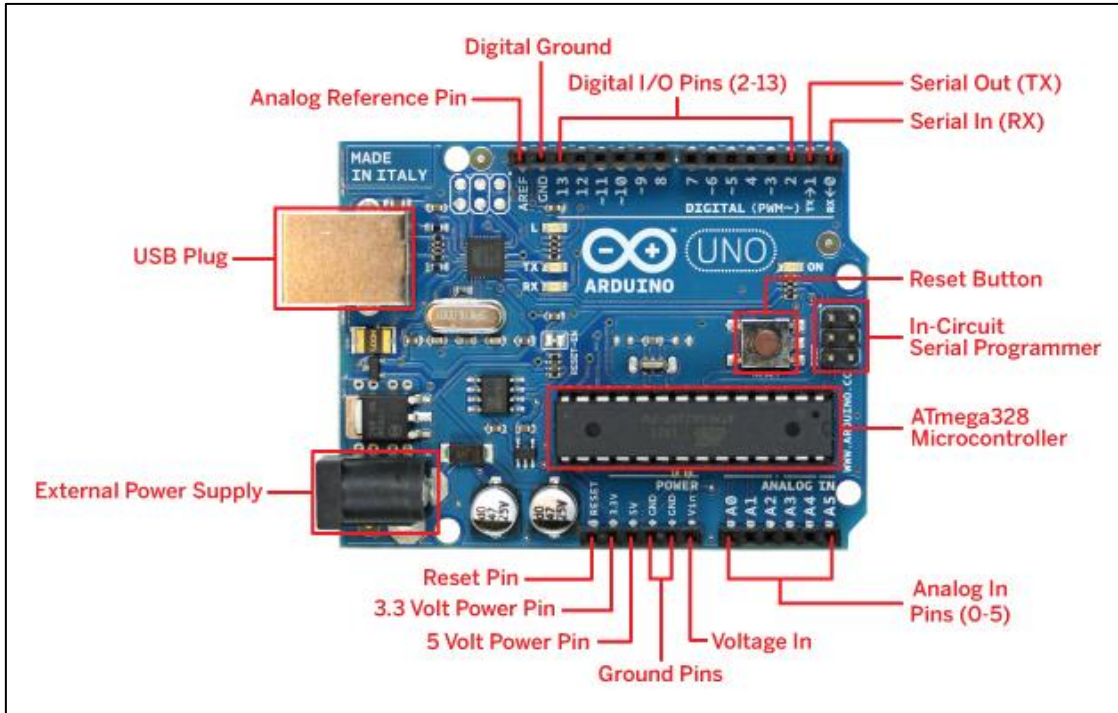


Figura 6 - Placa Arduino Uno  
 FONTE: Arduino Brasil (2011).

### 2.1.2.2 Fonte de alimentação

A tensão de operação da placa de Arduino é de 5V. Porém, a placa pode ser alimentada por conector de alimentação, recebendo qualquer tensão entre 7V e 12V. O hardware apresenta um regulador de 5V a fim de converter essa tensão de alimentação para o valor apropriado, além de mantê-la constante (MONK, 2013, p.7).

### 2.1.2.3 Conexões de Alimentação

Serão descritos os conectores de alimentação elétrica., que se encontram no primeiro barramento da parte de baixo da placa na Figura 6. É possível observar que os pinos fornecem tensões de valores de 3.3V, 5V e 9V, além do pino GND.

O primeiro pino, *Reset*, tem o mesmo papel que o botão de *Reset* do Arduino, ou seja, quando ativado, é enviado ao pino do microcontrolador da placa um pulso lógico, fazendo com que o dispositivo limpe a memória e comece o seu programa desde o início. O microcontrolador é resetado por meio do pino *Reset*, quando este recebe um sinal em nível baixo (0V) (MONK, 2013, p. 8).

### 2.1.2.4 Entradas Analógicas

Ao lado dos pinos de conexão de alimentação, estão os seis pinos analógicos (denominados de A0 a A5). A leitura deles é feita por valores de tensão. Esses pinos

possuem uma resistência interna elevada, portanto possibilita que apenas uma corrente muito baixa passe por eles. Esses valores de tensão podem ser usados no programa do *software* (MONK, 2013, p. 8).

Apesar de lerem sinal de entrada analógico, há a possibilidade de esses pinos funcionarem como entradas ou saídas digitais. Isso poderá ser configurado no código do *software*.

### 2.1.2.5 Entradas e saídas digitais

As conexões digitais estão localizados na parte superior da placa e podem exercer a função de entrada ou de saída de sinal. São 13 pinos no total (0 a 13), sendo que os dois primeiros referem-se aos pinos de comunicação RX e TX, correspondendo à recepção e à transmissão, respectivamente. De acordo com Monk (2013), tais pinos digitais têm a capacidade de fornecer 40mA com 5V.

### 2.1.2.6 Microcontrolador

A placa de Arduino possui o microcontrolador de 28 pinos, especificado como Atmega328, pertencente à família AtMega/Atmel, da série megaAVR. Pela Figura 7, é possível visualizar os seu diagrama em blocos (MONK, 2013, p. 9).

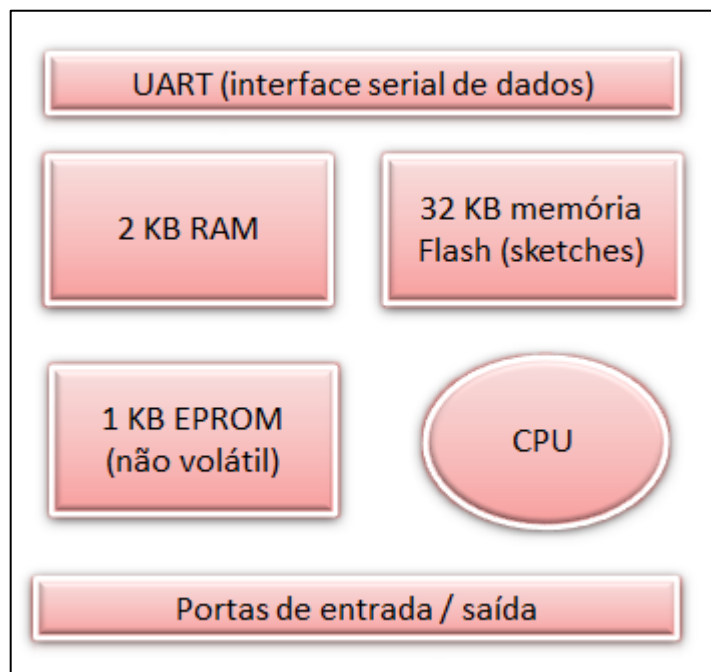


Figura 7 - Diagrama em blocos do Atmega 328.  
FONTE: Adaptado de Tekne (2014).

### 2.1.2.7 Software

O *software* consiste em um compilador de uma linguagem específica, baseada em outra chamada Processing, muito semelhante à linguagem C. Segundo Monk (2013), esse aplicativo corresponde aos chamados *sketches*, que “são como documentos em um editor de texto”.

### 2.1.2.8 Shield LCD

Outro elemento utilizado para a construção do gerador DDS é o *shield* LCD, acessório pré-fabricado pelo Arduino. Como mencionado anteriormente, o Arduino possui diversos acessórios, possibilitando o desenvolvimento de diversos projetos.

Este é um módulo que contém um *display* LCD 16 caracteres por 2 linhas e 6 botões de pressão. Ele já vem montado, não necessitando de soldagem. É preciso apenas encaixá-lo sobre a placa de arduino (MONK, 2013, p.114).

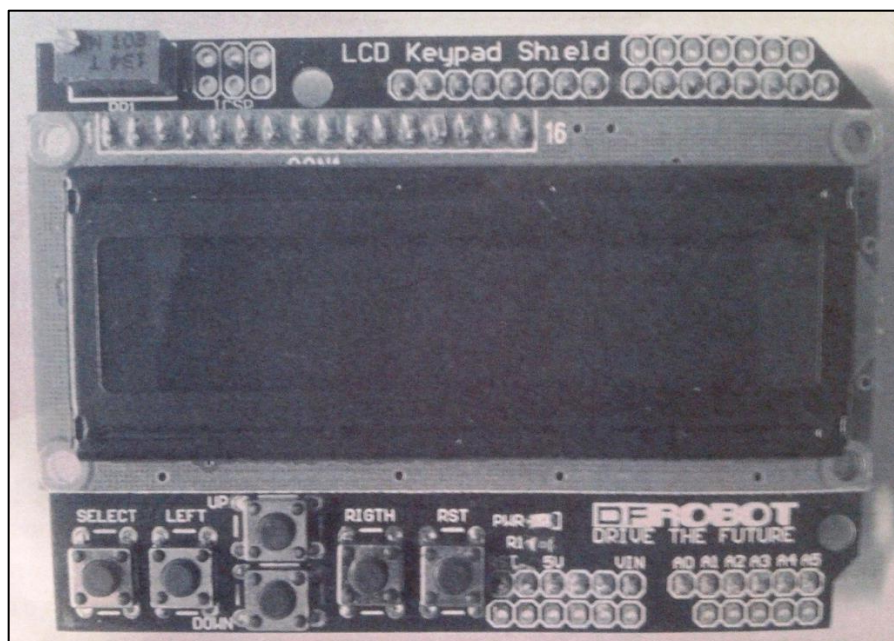


Figura 8 - Shield LCD para o Arduino  
 FONTE: Monk (2013).

Para o controle do *display* LCD, são utilizados sete pinos do Arduino, sendo um pino analógico e seis pinos digitais.

Para o software, o IDE do Arduino apresenta uma biblioteca para o LCD (LiquidCrystal.h). Esta biblioteca contém muitas funções úteis, simplificando bastante o processo de utilização do LCD (MONK, 2013, p.115).

A seguir são apresentadas algumas funções mais usuais da biblioteca referente ao LCD utilizada pelo Arduino:

- `setCursor(x, y)`: desloca o cursor para a posição 'x' da linha 'y';

- blink: faz o cursor piscar;
- noBlink: faz com que o cursor pare de piscar;
- noDisplay: o display é desligado sem apagar o conteúdo;
- display: liga o display (é usado sempre depois de um noDisplay);
- cursor: exhibe o cursor;
- noCursor: oculta o cursor.

## 2.2 FONTE DE ALIMENTAÇÃO SIMÉTRICA

Qualquer circuito eletrônico necessita de energia elétrica para funcionar. Um lugar onde é possível encontrar energia de forma acessível é em uma tomada de rede de energia, por exemplo. No entanto, esta energia não apresenta características compatíveis, visto que a maioria dos circuitos eletrônicos utilizam baixas tensões contínuas e a energia encontrada na rede de energia apresenta alta tensão alternada. Assim sendo, para que seja possível aproveitar a energia da rede para operar um circuito eletrônico é necessário fazer essa conversão antes de sua utilização. Para realizar essa conversão, são utilizadas as chamadas “fontes de alimentação”.

Newton Braga (2013) define uma fonte de alimentação como:

“(...) um circuito que a partir da tensão elétrica disponível (alternada ou contínua) fornece a tensão contínua (ou mesmo alternada) na forma requerida pelo circuito alimentado necessita. O tipo mais comum de fonte de alimentação é a que converte a tensão alternada da rede de energia 110V/220V (...) em baixas tensões contínuas, na faixa de 3 a 60V.” (BRAGA, 2013, p. 07)

As fontes de alimentação podem ser classificadas em dois tipos, dependendo da tecnologia em que atuam:

- Lineares ou analógicas
- SMPS ou Switched Power Mode Supplies (do inglês, fontes chaveadas)

As que apresentam maior rendimento e, portanto, mais usuais são as fontes analógicas. É desse tipo a fonte projetada e que será abordada neste projeto. A Figura 9 apresenta um diagrama em blocos contendo os estágios de uma fonte de tensão analógica, bem como a forma de onda resultante de cada bloco.

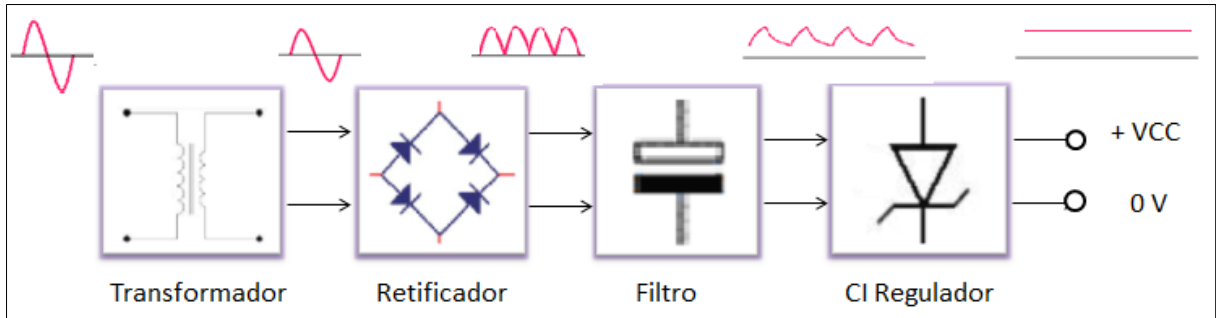


Figura 9 - Diagrama em blocos de uma fonte analógica  
 FONTE: Adaptado de Braga (2014).

No primeiro bloco, um transformador recebe uma tensão de corrente alternada (CA), cujo valor normalmente é de 120 V eficazes (rms), e abaixa esse valor para o nível de tensão CC (corrente contínua) na qual se deseja operar. No segundo bloco, o sinal passa por uma ponte retificadora de diodos semicondutores que tem como função fornecer uma tensão retificada de onda-completa, que, em seguida, é filtrada por um capacitor simples, resultando assim em uma tensão CC. Porém, essa tensão apresenta algumas ondulação, conhecida como *ripple*, ou alguma variação CA. Assim, a fim de amenizar essa ondulação, utiliza-se um circuito regulador, que também possui o papel de manter constante o valor da saída (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2004, p. 567).

Segundo Braga (2013), quando se trata de fontes analógicas ou lineares, o bloco do regulador “funciona como um resistor variável”, ou seja, o valor de sua resistência varia de acordo com a corrente na carga. Assim, é formado um divisor, no qual a tensão na carga não varia, independente da corrente que nela passa. Isto pode ser observado pela Figura 10. Caso a corrente na carga aumente, a resistência do CI regulador diminui a fim de aumentar a sua tensão e manter, assim, uma tensão constante na carga.

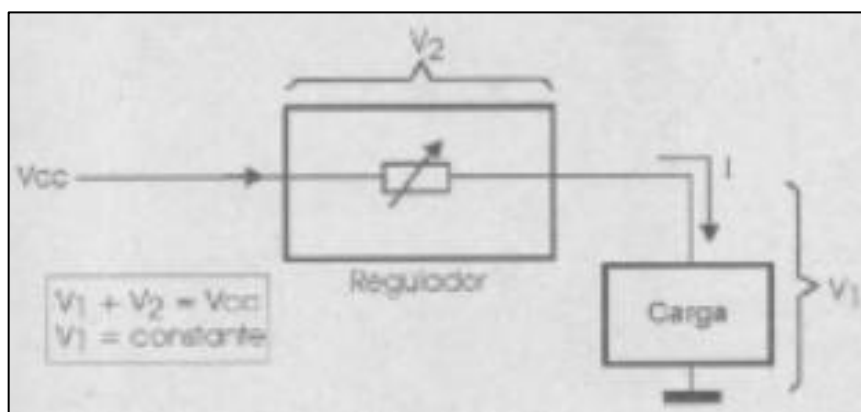


Figura 10 - Representação esquemática de um divisor de tensão  
 FONTE: Braga (2013).

## 2.3 FILTROS

Segundo Romano (1982, p. 185), “a ideia de filtragem implica a de separação. Algo que passa, ou que desejamos obter; algo que é retirado, ou que rejeitamos”.

A definição formal de filtro é a seguinte, segundo Pertence (1988, p. 189):

“Um filtro elétrico é um quadripolo capaz de atenuar determinadas frequências do espectro do sinal de entrada e permitir a passagem das demais.”

Os filtros podem ser classificados sob três aspectos (PERTENCE, 1988):

- Quanto à função executada;
- Quanto à tecnologia empregada;
- Quanto à função resposta (ou aproximação utilizada).

Quanto à função executada, eles podem ser classificados em (PERTENCE, 1988,p. 191):

- Passa-baixa (PB): Permite a passagem de frequências abaixo da frequência de corte ( $f_c$ ).
- Passa-alta (PA): Permite a passagem de frequências acima da frequência de corte ( $f_c$ )
- Passa-faixa (PF): Permite a passagem de frequências dentro de uma determinada faixa, que é delimitada pela frequência de corte inferior ( $f_{ci}$ ) e pela frequência de corte superior ( $f_{cs}$ )
- Rejeita-faixa (RF): Permite a passagem de frequências abaixo da frequência de corte inferior ( $f_{ci}$ ) e acima da frequência de corte superior ( $f_{cs}$ ).

Na Figura 11 a simbologia de cada uma das funções é apresentada, e na Figura 12 as curvas de respostas ideais de cada um dos filtros. São mostradas as curvas ideais juntamente com as respostas reais dos filtros (linhas tracejadas).

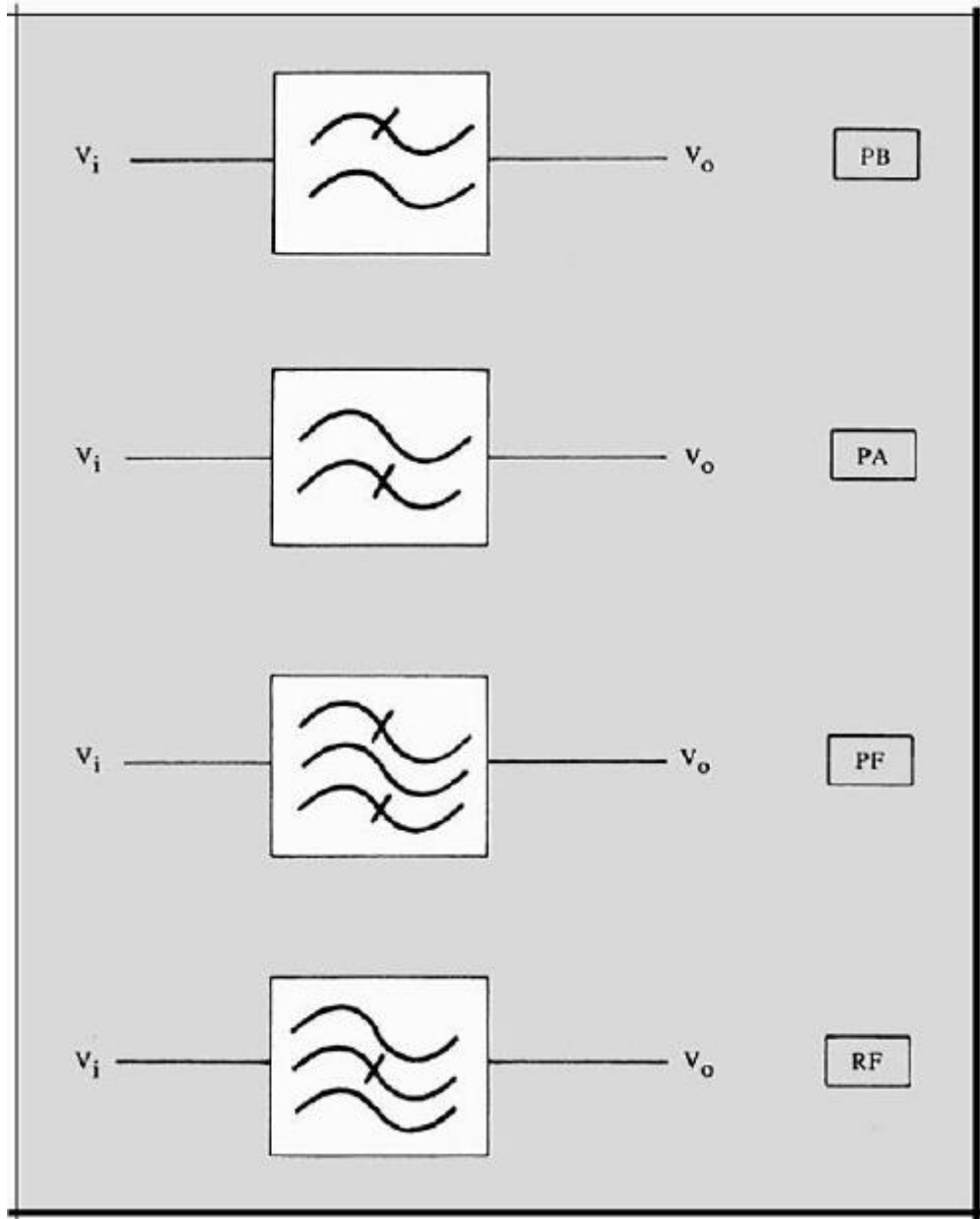


Figura 11 - Simbologia dos filtros  
FONTE: PERTENCE (2007)



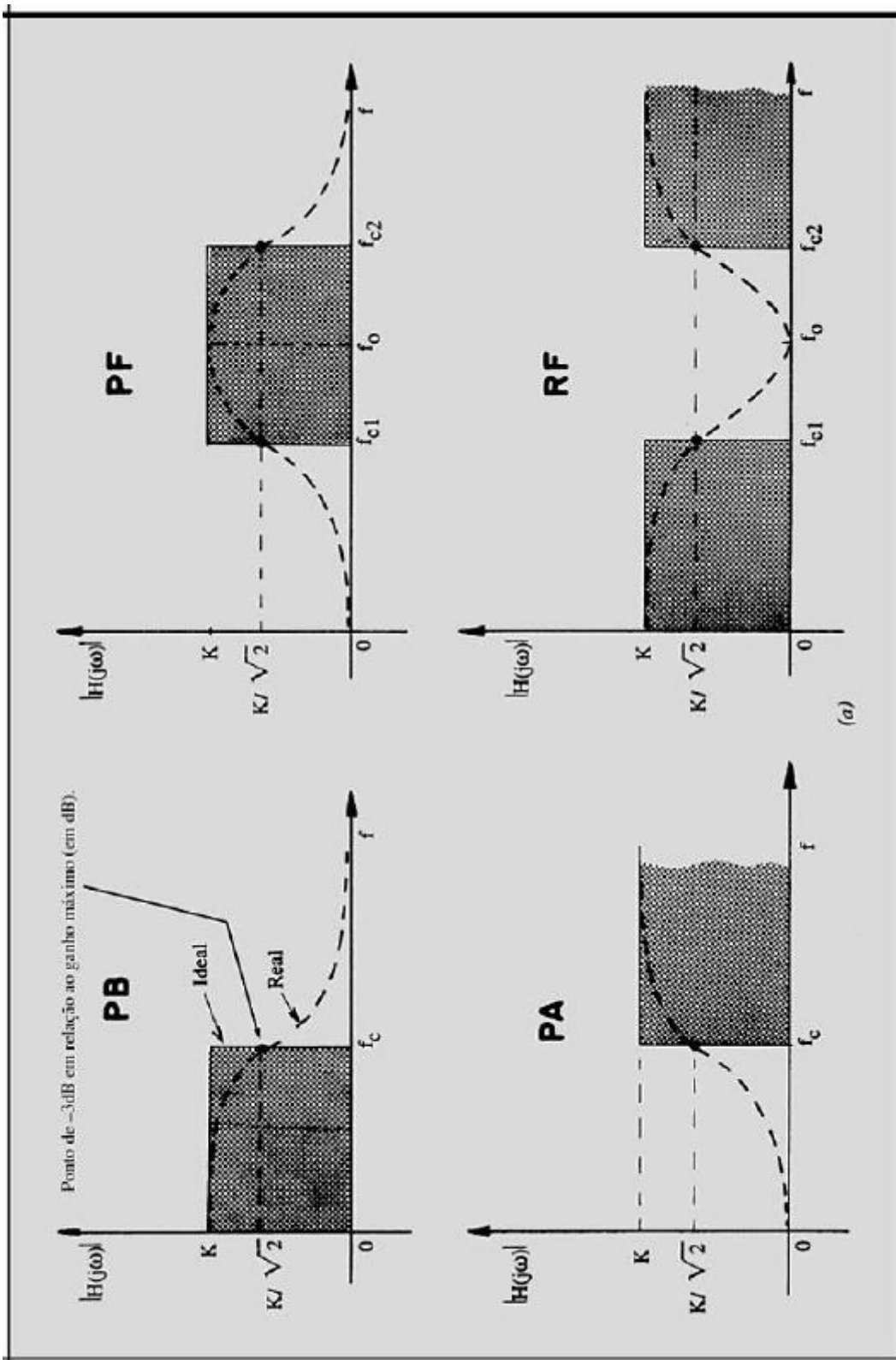


Figura 12 - Curvas de Respostas dos filtros (ideal e real)  
 FONTE: PERTENCE (2007)

O segundo aspecto de classificação dos filtros nos permite considerar três tecnologias fundamentais (PERTENCE,1988):

- a) Filtros Passivos: circuitos compostos apenas por elementos passivos (resistores, capacitores e indutores). Uma outra maneira característica desses filtros é que o ganho de tensão sempre será menor ou igual a 1 (0 dB), visto que eles não possuem componentes para amplificar os sinais. Os filtros passivos funcionam bem em altas frequências (acima de 100 kHz). Em aplicações de baixas frequências eles necessitam de componentes mais robustos, dificultando a sua implementação.
- b) Filtros Ativos: circuitos compostos por elementos passivos associados a elementos ativos.
- c) Filtros Digitais: filtros que utilizam elementos digitais em sua constituição.

A terceira maneira de classificar os filtros é através da função resposta ou aproximação para projetá-los. Os tipos mais comuns de aproximação são os seguintes:

- Butterworth;
- Chebyshev;
- Cauer;
- Bessel.

As aproximações apresentam uma função matemática específica, que através dela é possível obter uma curva de resposta aproximada para um determinado filtro.

## 2.4 RESSONÂNCIA, FATOR $Q_0$ E SELETIVIDADE

Segundo Pertence (1988, p.196), “baseando-se no circuito RLC série, como mostrado na Figura 13, em condição de circuito aberto, uma impedância de entrada dada por:

$$Z_i(\omega) = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \quad (2)$$

Diz-se que o circuito está em ressonância série quando  $Z_i(\omega)$  é real (e assim  $|Z_i(\omega)|$  é um mínimo); ou seja, se tivermos(1988, p.196):

$$\omega L - \frac{1}{\omega C} = 0 \text{ ou } \omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (3)$$

Teremos a máxima corrente no circuito.”

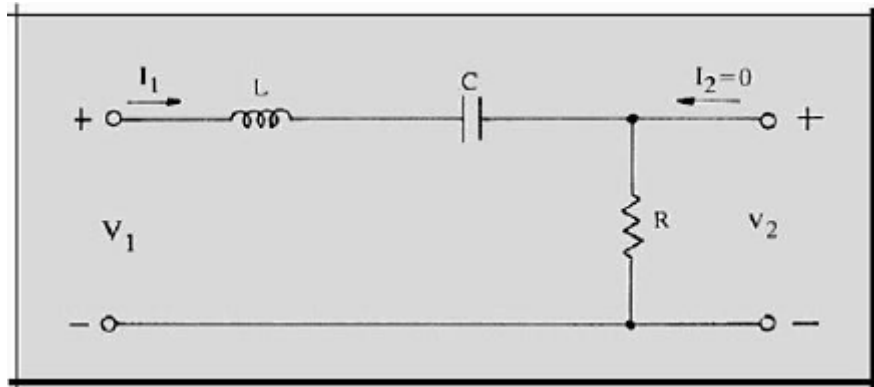


Figura 13 - Circuito RLC série  
 FONTE: PERTENCE (2007)

Na Figura 14, pode-se observar a variação da fase do circuito RLC em função da frequência.

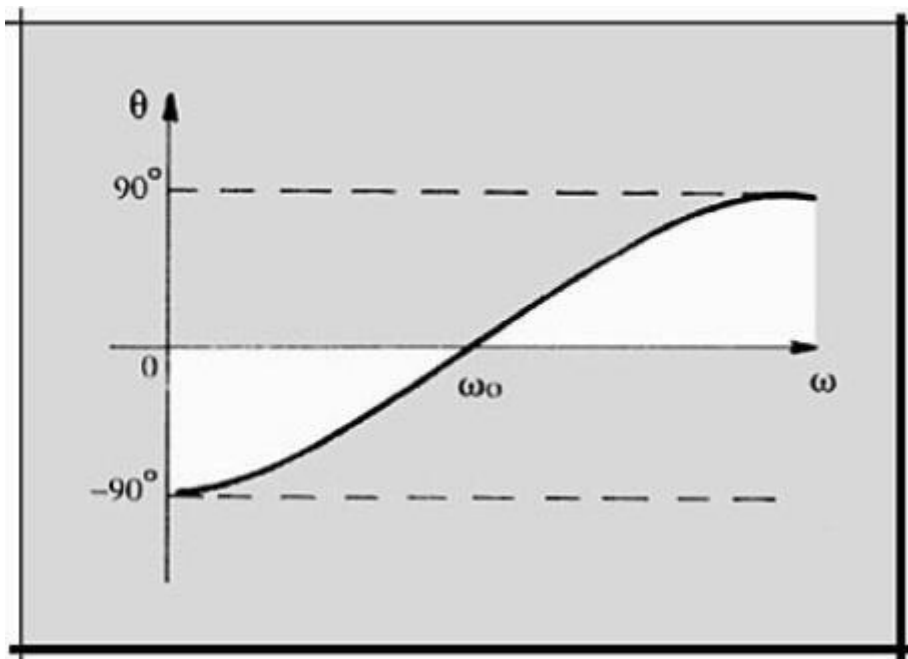


Figura 14 - Variação de fase do circuito RLC série  
 FONTE: PERTENCE (2007)

O módulo da resposta em frequência pode ser observado na Figura 15. Pode-se observar que ocorre uma redução tanto abaixo quanto acima da frequência de ressonância  $\omega_0$ . As frequências correspondentes a um ganho de 0,707 são as frequências de corte inferior e superior, nesta imagem em rad/s.

$$BW = \omega_{c2} - \omega_{c1} \quad \text{ou} \quad BW = f_{c2} - f_{c1} \quad (4)$$

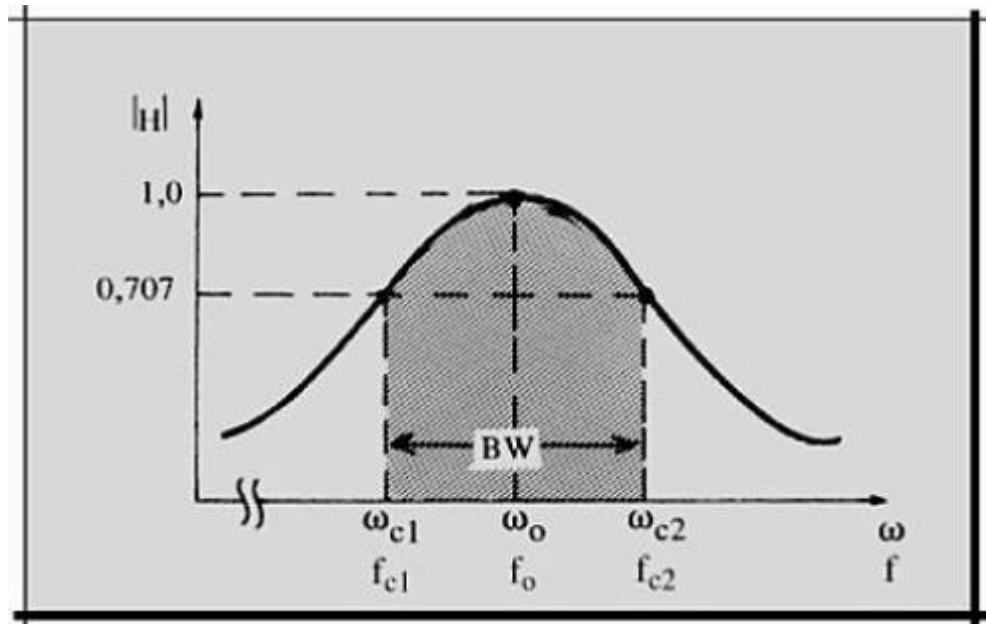


Figura 15 - Módulo da resposta em frequência  
 FONTE: PERTENCE (2007)

Segundo Pertence (1988, p. 198) “um fator de qualidade,  $Q_o = \omega_o L/R$ , pode ser definido para o circuito RLC série, quando em ressonância. As frequências de meia potência podem ser expressas em termos dos elementos do circuito, ou em termos de  $\omega_o$  e  $Q_o$ ”, como mostrado:

$$\omega_{c2} = \omega_o \left( \sqrt{1 + \frac{1}{4Q_o^2}} + \frac{1}{2Q_o} \right) \quad (5)$$

$$\omega_{c1} = \omega_o \left( \sqrt{1 + \frac{1}{4Q_o^2}} - \frac{1}{2Q_o} \right) \quad (6)$$

Subtraindo uma pela outra, obtemos:

$$BW = \frac{\omega_o}{Q_o} = \frac{f_o}{Q_o} \quad (7)$$

O que mostra que quanto maior é o valor de fator de qualidade, mais estreita é a largura da banda, ou seja, a seletividade do circuito será maior.

A seletividade é, conforme Pertence (1988, p. 199), “habilidade de um circuito distinguir, num dado espectro de frequências, uma determinada frequência em relação às demais”. A seletividade só faz sentido em filtros passa-faixa e rejeita-

faixa, visto que estes apresentam uma faixa de frequência que será atenuada ou não. Uma outra maneira de calcular o fator de qualidade é através da equação (8).

$$Q_o = \frac{\omega_o}{\omega_{c2} - \omega_{c1}} = \frac{f_o}{f_{c2} - f_{c1}} = \frac{f_o}{BW} \quad (8)$$

Nota-se que um  $Q_o$  alto significa alta seletividade (para um valor fixo de  $f_o$ ), pois indica menor largura de faixa (BW) e vice-versa. A Figura 16, ilustra tal fato.

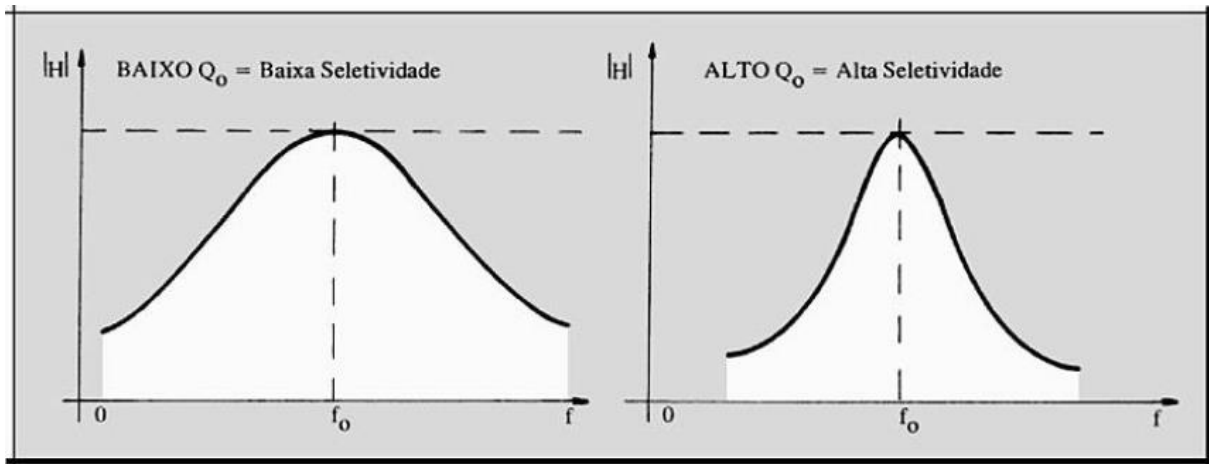


Figura 16 – Seletividade  
FONTE: PERTENCE (2007)

## 2.5 FILTROS PASSIVOS

Um filtro passivo é simplesmente um filtro que não utiliza nenhum elemento amplificador (transistores, amplificadores operacionais). Assim, é a mais simples (em termos de componentes necessários) implementação de função de transferência. Filtros passivos também tem outra vantagem. Porque eles não tem nenhum componente ativo, os filtros passivos não necessitam de fonte de alimentação. Como eles não são restringidos por uma limitação de largura de banda dos ampops, eles trabalham muito bem em altas frequências. Eles podem ser usados em aplicações envolvendo maiores níveis de tensão e corrente do que podem ser manipulados por meio de dispositivos ativos. Filtros passivos também geram menos ruído quando comparado com circuitos que utilizam componentes ativos. O ruído que eles produzem é simplesmente o ruído térmico provenientes dos componentes resistivos e, com um *design* cuidadoso, a amplitude desse ruído pode ser bem pequena.

Entretanto, filtros passivos possuem algumas importantes desvantagens. Como eles não utilizam elementos ativos, eles não podem gerar ganho de sinal. A impedância de entrada pode ser menor do que a desejada, e a impedância de saída pode ser acima do nível ideal para algumas aplicações, então amplificadores *buffers* podem ser necessários. Indutores são necessários para a síntese das características mais úteis dos filtros passivos, e estes podem se tornar caros se uma alta precisão (1% ou 2%, por exemplo), tamanho físico pequeno ou grande valor

forem necessários. Os valores padrões de indutores não são muito próximos, e é difícil achar um valor dentro de 10% de um valor arbitrário, então indutores ajustáveis são muito usados. Ajustar estes para os valores desejados é demorado e caro quando grandes quantidades de filtros são produzidos. Além disso, filtros passivos complexos (ordem maior do que 2) podem ser difíceis de implementar e demorados (TEXAS INSTRUMENTS, 2011, p. 17).

### 2.5.1 Filtro passa-baixa passivo

O filtro passa-baixa é um circuito que permite a passagem de sinais abaixo da frequência de corte ( $f_c$ ), as frequências acima desse limite são atenuadas (MUSSOI, 2004, p.26).

Um circuito RL passivo, como apresentado na Figura 17, pode comportar-se como um filtro passa-baixa.

Para sinais de frequência baixa, o indutor apresenta um valor baixo de reatância,  $X_L \ll R$ , e se comporta como um curto-circuito. Assim, a maior parte da tensão de entrada estará sobre o resistor de saída.

Para sinais de alta frequência, o indutor apresenta um valor alto de reatância,  $X_L \gg R$ , comportando-se como um circuito aberto. Assim, a maior parte da tensão de entrada estará sobre o indutor e a tensão sobre o resistor de saída será muito pequena.

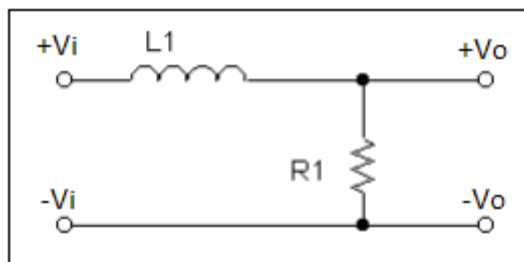


Figura 17 - Filtro passa-baixa RL  
FONTE: Adaptado de Mussoi (2014)

A expressão para o ganho de tensão de um filtro passa-baixa RL é (MUSSOI, 2004, p. 28):

$$Av = \sqrt{\frac{1}{1 + (2\pi f \frac{L}{R})^2}} \quad (9)$$

E a expressão para a fase é (MUSSOI, 2004, p. 29):

$$\alpha = -\text{arctg}\left(2\pi f \frac{L}{R}\right) \quad (10)$$

Para o cálculo da frequência de corte de um filtro passa-baixa RL, é utilizada a seguinte equação (MUSSOI, 2004, p. 30):

$$f_c = \frac{R}{2\pi L} \quad (11)$$

Um circuito RC como o apresentado na Figura 18 pode comportar-se como um Filtro Passivo Passa-Baixa (MUSSOI, 2004, p. 32).

Para sinais de baixa frequência, o capacitor apresentará uma alta reatância,  $X_c \gg R$  e se comportará como um circuito aberto. Assim, a maior parte da tensão de entrada estará sobre o capacitor de saída.

Para sinais de alta frequência, o capacitor apresentará uma baixa reatância,  $X_c \ll R$ , e se comportará como um curto circuito. Assim, a maior parte da tensão de entrada estará sobre o resistor.

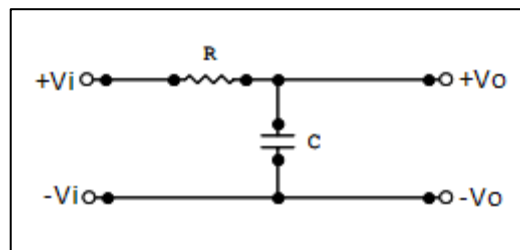


Figura 18 - Filtro passa-baixa RC  
FONTE: Adaptado de Mussoi (2014)

A expressão para o ganho de tensão e fase de um filtro passa-baixa RC são, respectivamente (MUSSOI, 2004, p. 34):

$$A_v = \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi fRC)^2}} \quad (12)$$

$$\alpha = -\text{arctg}(2\pi fRC) \quad (13)$$

A frequência de corte para um filtro passa-baixa RC pode ser dada por (MUSSOI, 2004, p. 34):

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (14)$$

Com as expressões do ganho e da fase podemos traçar as curvas de resposta em frequência dos filtros passa-baixa (MUSSOI, 2004, p. 35):

- Ganho:
  - $f = 0 - A_v = 1$
  - $f = f_c - A_v = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707$
  - $f \rightarrow \infty - A_v = 0$
- Fase:
  - $f = 0 - \alpha = 0$
  - $f = f_c - \alpha = -45^\circ$
  - $f \rightarrow \infty - \alpha = -90^\circ$

As formas de onda que representam a resposta em frequência do ganho em tensão e a fase para o filtro passa-baixa são mostradas nas Figura 19 e Figura 20.

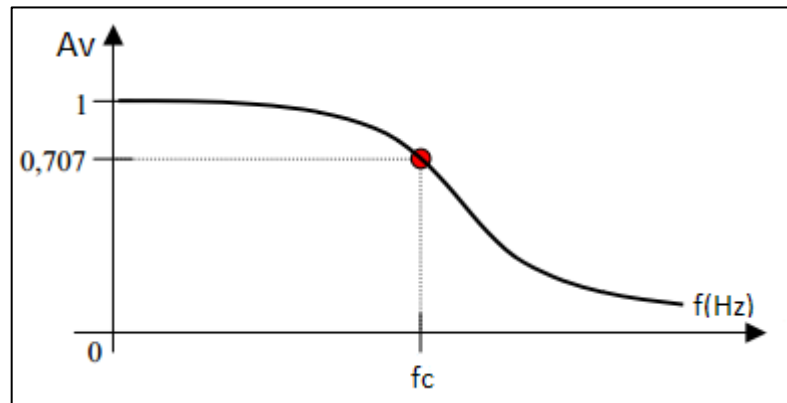


Figura 19 - Curva de Resposta em frequência do filtro passa-baixa – Ganho de tensão  
 FONTE: Adaptado de Mussoi (2014)

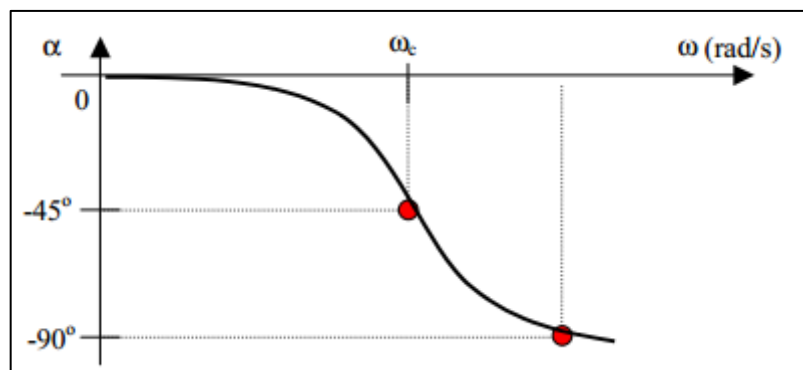


Figura 20 - Curva de resposta em frequência do filtro passa-baixa – Fase  
 FONTE: Adaptado de Mussoi (2014)



### 2.5.2 Filtro passa-alta

Um circuito RL como apresentado na Figura 21, pode comportar-se como um filtro passa-alta.

Para sinais de baixa frequência, o indutor apresentará baixa reatância,  $X_L \ll R$ , e se comportará como um curto-circuito. Assim, a maior parte da tensão de entrada estará sobre o resistor e a tensão sobre o indutor de saída será muito pequena.

Para sinais de alta frequência, o indutor apresenta alta reatância,  $X_L \gg R$ , e se comporta como um circuito aberto. Assim, a maior parcela da tensão de entrada estará sobre o indutor de saída.

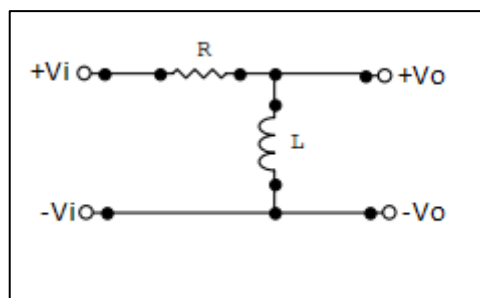


Figura 21 - Filtro passa-alta RL  
FONTE: Adaptado de Mussoi (2014)

As expressões para o ganho de tensão e a fase para um filtro passa-alta RL são, respectivamente (MUSSOI, 2004, p.42):

$$A_v = \sqrt{\frac{1}{1 + \left(\frac{R}{2\pi fL}\right)^2}} \quad (15)$$

$$\alpha = -\arctg(2\pi fRC) \quad (16)$$

A expressão para a frequência de corte de um filtro passa-alta RL é dada por (MUSSOI, 2004, p. 42):

$$f_c = \frac{R}{2\pi L} \quad (17)$$

Um circuito como o apresentado na Figura 22, pode comportar-se como um filtro passa-alta RC (MUSSOI, 2004, p. 45).

Para sinais de baixa frequência, o capacitor apresenta uma alta reatância capacitiva,  $X_c \gg R$ , e se comportará como um circuito aberto. Assim, a maior parte da tensão de entrada estará sobre o capacitor e a tensão sobre o resistor de saída será muito pequena.

Para sinais de alta frequência, o capacitor apresenta baixa reatância capacitiva  $X_c \ll R$ , e se comportará como um curto circuito. Assim, a maior parte da tensão de entrada estará sobre o resistor de saída.

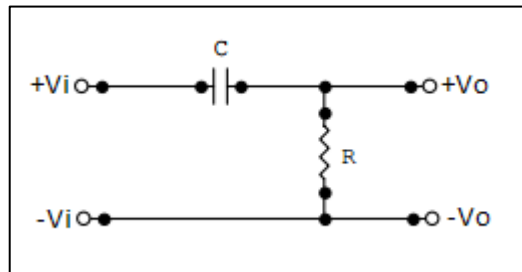


Figura 22 - Filtro Passa-Alta RC  
FONTE: Adaptado de Mussoi (2014)

As expressões para o ganho e a fase para um filtro passa-alta RC são, respectivamente (MUSSOI, 2004, p. 47):

$$Av = \sqrt{\frac{1}{1 + \left(\frac{1}{2\pi fRC}\right)^2}} \quad (18)$$

$$\alpha = \arctg\left(\frac{1}{2\pi fRC}\right) \quad (19)$$

A expressão para a frequência de corte do filtro passa-alta RC é (MUSSOI, 2004, p. 47):

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (20)$$

Com a expressão do ganho e da fase podemos traçar as curvas de resposta em frequência do filtro passa-alta, como indicam as Figura 23 e Figura 24.

- Ganho:

$$f = 0 - Av = 1$$

$$f = f_c - Av = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707$$

$$f \rightarrow \infty - Av = 0$$

- Fase:

$$f = 0 - \alpha = \arctg(\infty) = +90^\circ$$

$$f = f_c - \alpha = \arctg(1) = +45^\circ$$

$$f \rightarrow \infty: \alpha = \arctg(0) = 0^\circ$$

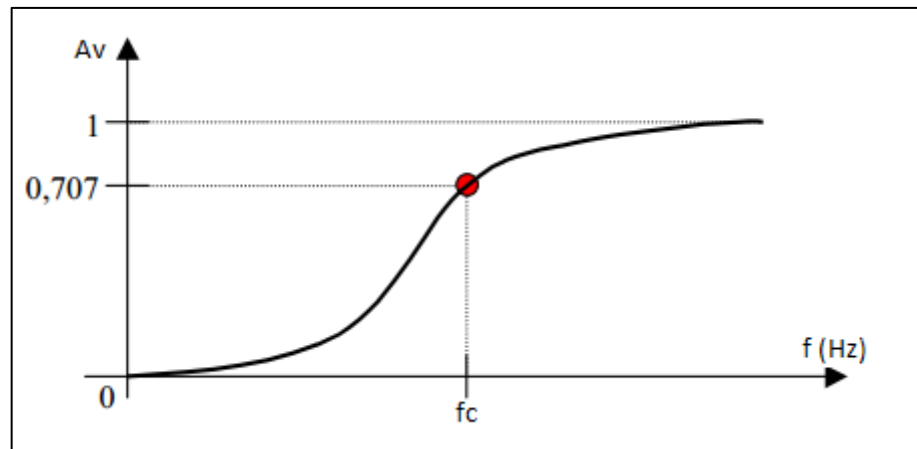


Figura 23 - Curva de resposta em frequência do filtro passa-alta - ganho de tensão  
 FONTE: Adaptado de Mussoi (2014)

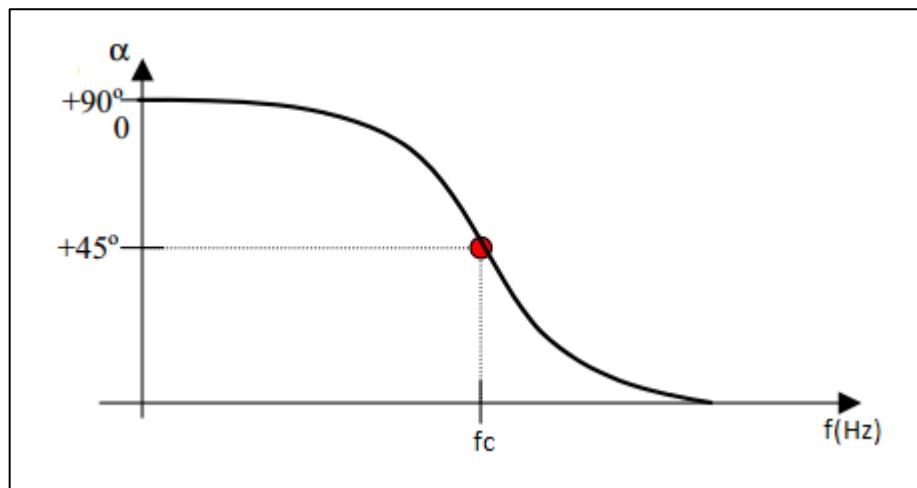


Figura 24 - Curva de resposta em frequência filtro passa-alta – Fase  
 FONTE: Adaptado de Mussoi (2014)

### 2.5.3 Filtro Passa-Faixa

Um circuito RLC como apresentado na Figura 25, pode comportar-se como um filtro passivo passa-faixa série (MUSSOI, 2004, p. 51).

Segundo Mussoi (2004, p. 51) “um filtro passa-faixa é baseado na ressonância que ocorre entre indutores e capacitores em circuitos CA.”

Para sinais de baixa frequência o indutor apresenta baixa reatância indutiva e seu comportamento é de um curto-circuito, e o capacitor apresenta alta reatância capacitiva e seu funcionamento é de um circuito aberto. Assim, a maior parte da tensão de entrada estará sobre o capacitor, e a tensão sobre o resistor de saída será muito baixa, ou seja, o sinal será atenuado.

Para sinais de alta frequência o capacitor apresenta baixa reatância capacitiva e seu comportamento é de um curto-circuito, e o indutor apresenta alta reatância indutiva e seu comportamento é de um circuito aberto. Assim, a maior parte da tensão de entrada estará sobre o indutor, e a tensão sobre o resistor de saída será muito baixa, ou seja, o sinal será atenuado.

Para os sinais os quais as frequências estiverem numa faixa próxima à frequência de ressonância do circuito, o indutor e o capacitor apresentarão baixa reatância e se comportarão como um curto-circuito. Assim, a maior parcela da tensão de entrada estará sobre o resistor de saída.

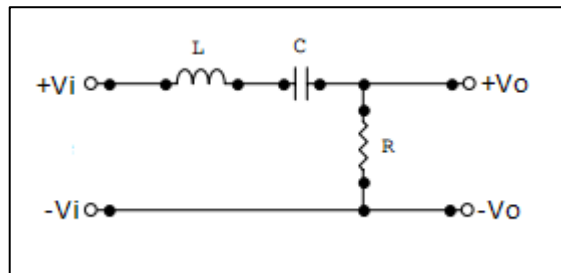


Figura 25 - Filtro passa-faixa RLC série  
FONTE: Adaptado de Mussoi (2014)

As expressões para o ganho e a fase para um filtro passa-faixa série são, respectivamente (MUSSOI, 2004, p. 52):

$$A_v = \sqrt{\frac{1}{1 + \left(\frac{1 - (2\pi f)^2 LC}{2\pi f RC}\right)^2}} \quad (21)$$

$$\alpha = \arctg\left(\frac{1 - (2\pi f)^2 LC}{2\pi f RC}\right) \quad (22)$$

Como a expressão do ganho é de segundo ordem, obtemos duas equações do segundo grau, cada uma com duas soluções que corresponderão à frequência de corte inferior e à frequência de corte superior do filtro passa-faixa série (MUSSOI, 2004, p. 53):

$$f_{ci} = \frac{-RC \pm \sqrt{(RC)^2 + 4LC}}{4\pi LC} \quad (23)$$

$$f_{cs} = \frac{RC \pm \sqrt{(RC)^2 + 4LC}}{4\pi LC} \quad (24)$$

A chamada frequência central de um filtro passa-faixa ocorre justamente na frequência de ressonância (MUSSOI, 2004, p. 54).

Segundo Mussoi (2004, p. 54), “para haver ressonância série é necessário que as reatâncias capacitiva e indutiva do circuito se anulem e se comportem como um curto-circuito, ou seja”:

$$X_{eq} = 0 \quad (25)$$

$$|X_L| = |X_C| \quad (26)$$

Assim, o ganho será unitário pois toda a tensão de entrada estará na saída. Portanto:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (27)$$

Um circuito RLC, como mostrado na Figura 26, pode comportar-se como um filtro passa-faixa.

Para os sinais de baixa frequência, o capacitor apresentará uma alta reatância e se comportará como um circuito aberto. O indutor apresentará uma baixa reatância e se comportará como um curto circuito. Assim, a maior parte da tensão de entrada estará sobre o resistor e a tensão de saída será muito baixa, ou seja, o sinal será atenuado. Então, o circuito impede a passagem de sinais de baixa frequência.

Para os sinais de alta frequência, o indutor apresentará uma alta reatância e se comportará como um circuito aberto. O capacitor apresentará uma baixa reatância e se comportará como um curto circuito. Assim, a maior parte da tensão de entrada estará sobre o resistor e a tensão de saída será muito baixa, ou seja, o sinal será atenuado. Então, o circuito impede a passagem de sinais de alta frequência.

Para os sinais os quais apresentem frequências próximas a frequência de ressonância, o indutor e o capacitor apresentarão alta reatância e seus comportamentos tenderão a um circuito aberto. Assim, a maior parte da tensão de entrada estará sobre o circuito LC.

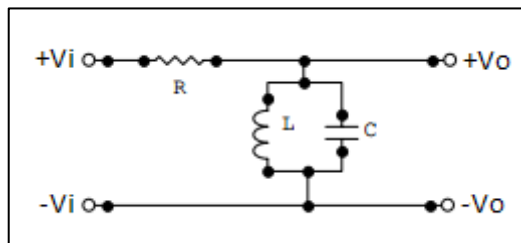


Figura 26 - Filtro passa-faixa RLC paralelo  
FONTE: Adaptado de Mussoi (2014)

As expressões para o ganho e a fase são, respectivamente (MUSSOI, 2004, p. 58):

$$Av = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{R - (2\pi f)^2 RLC}{2\pi fL}\right)^2}} \quad (28)$$

$$\alpha = \arctg\left(\frac{R - (2\pi f)^2 RLC}{2\pi fL}\right) \quad (29)$$

Como a expressão do ganho é de segunda ordem, obtemos duas equações de segundo grau, cada uma com duas soluções que correspondem à frequência de corte superior e à frequência de corte inferior do filtro passa-faixa paralelo (MUSSOI, 2004, p.59).

$$f_{ci} = \frac{-\frac{L}{R} \pm \sqrt{\left(\frac{L}{R}\right)^2 + 4LC}}{4\pi LC} \quad (30)$$

$$f_{cs} = \frac{\frac{L}{R} \pm \sqrt{\left(\frac{L}{R}\right)^2 + 4LC}}{4\pi LC} \quad (31)$$

A chamada frequência central de um filtro passa-faixa ocorre justamente na frequência de ressonância (MUSSOI, 2004, p. 59).

Segundo Mussoi (2004, p. 59) “para haver ressonância paralela, é necessário que a impedância equivalente do circuito ressonante seja infinita, ou seja, um circuito aberto. Para que isso ocorra é necessário que as reatâncias capacitiva e indutiva do circuito se anulem”, então:

$$|X_L| = |X_C| \quad (32)$$

Tal que:

$$X_{eq} = \frac{X_L \cdot X_C}{X_L + X_C} = \infty \quad (33)$$

Nesta situação, o ganho do circuito é unitário, então (MUSSOI, 2004, p. 60):

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (34)$$

Um circuito como mostrado na Figura 27, pode comportar-se como um filtro passa-faixa. Este filtro é projetado colocando um filtro passa-alta em série com um filtro passa-baixa.

Essa combinação pode ser como demonstrada na Figura 27, onde C1 e R1 constituem o filtro passa-altas e o R2 e o C2 o filtro passa-baixas (LOPES, 2008, p. 27).

A frequência de corte inferior é imposta pelo filtro passa-altas e a frequência de corte superior pelo filtro passa-baixas (LOPES, 2008, p. 217):

$$f_{ci} = \frac{1}{2\pi \cdot R1 \cdot C1} \quad (35)$$

$$f_{cs} = \frac{1}{2\pi \cdot R2 \cdot C2} \quad (36)$$

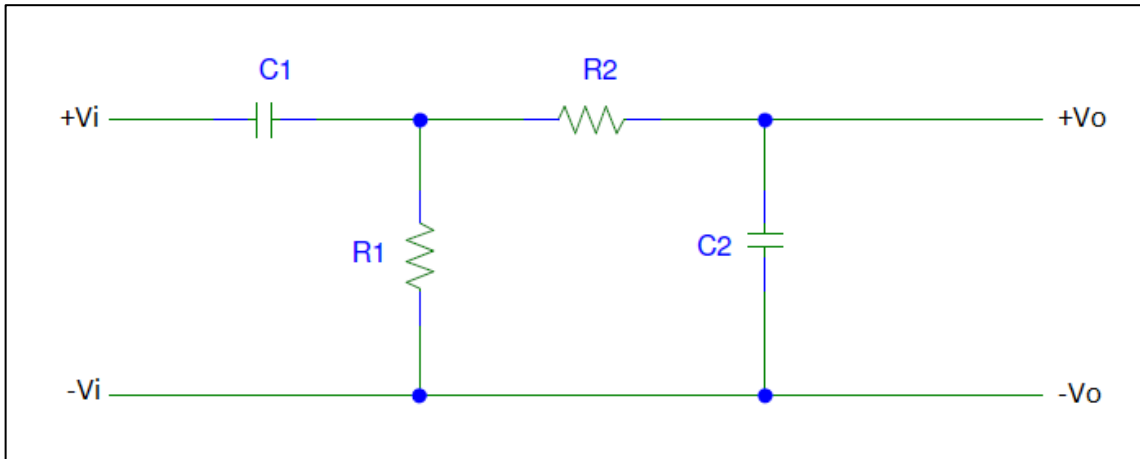


Figura 27 - Filtro passa-faixa RC  
 FONTE: Adaptado de Mussoi (2014)

Com as equações de ganho e fase, é possível traçar as curvas de resposta em frequência para o ganho e a fase deste circuito (MUSSOI, 2004, p. 55).

- Ganho:

$$f = 0: A_v = 0$$

$$f = f_r: A_v = 1$$

$$f \rightarrow \infty: A_v = 0$$

- Fase:

$$f = 0: \alpha = \arctg(\infty) = +90^\circ$$

$$f = f_r: \alpha = 0^\circ$$

$$f \rightarrow \infty: \alpha = \arctg(-\infty) = -90^\circ$$

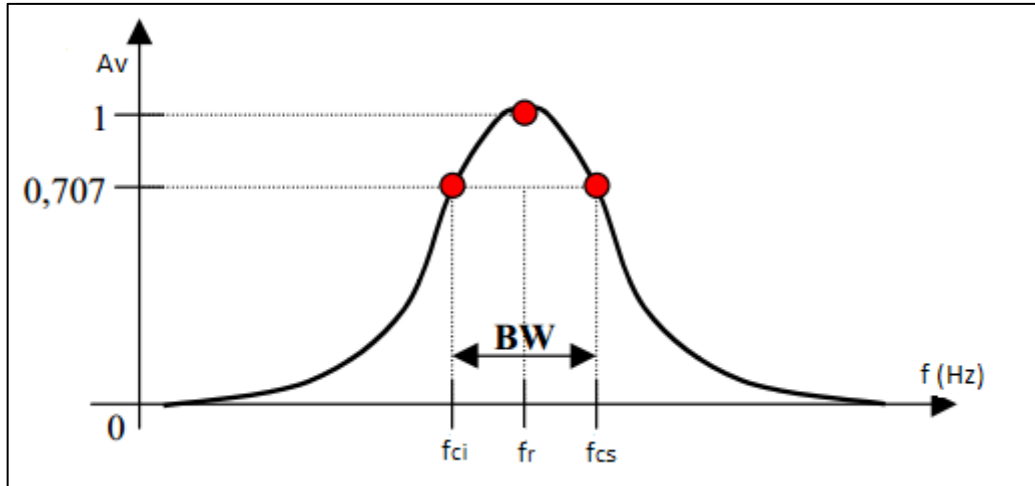


Figura 28 - Curva de resposta em frequência filtro passa-faixa - ganho em tensão  
 FONTE: Adaptado de Mussoi (2014)

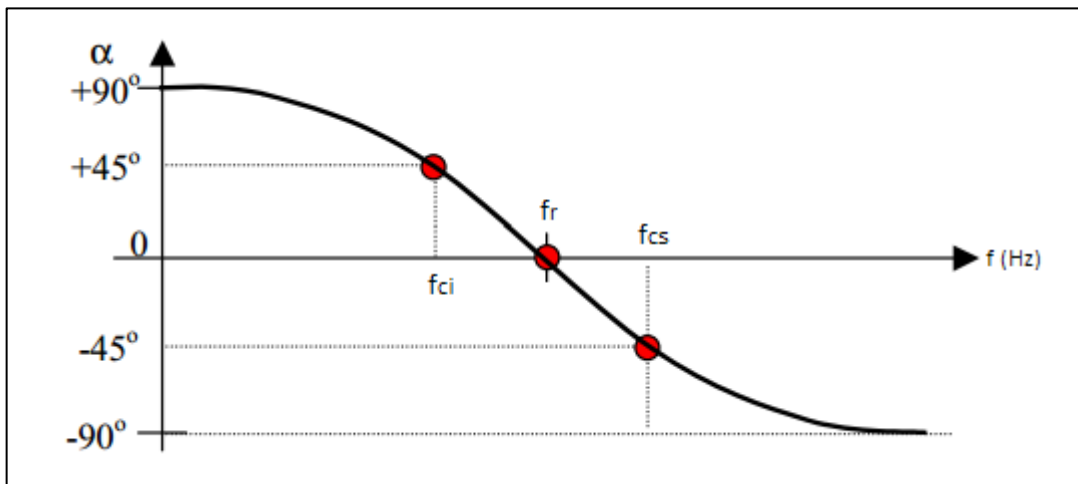


Figura 29 - Curva de resposta em frequência filtro passa-faixa – fase  
 FONTE: Adaptado de Mussoi (2014)

#### 2.5.4 Filtro Rejeita-Faixa

O filtro rejeita-faixa também utiliza o conceito de ressonância em sua implementação. Na Figura 30, podemos observar um filtro rejeita-faixa série. Seu funcionamento é descrito a seguir:

Para os sinais de baixa frequência o indutor apresenta baixa reatância, seu comportamento é de um curto-circuito. O capacitor apresenta alta reatância e seu comportamento é de um circuito aberto. Assim, a maior parte da tensão de entrada estará sobre o capacitor e a tensão sobre o resistor será muito baixa, ou seja, a tensão de saída será praticamente igual à tensão de entrada

Para os sinais de alta frequência o capacitor apresenta baixa reatância e seu comportamento é de um curto-circuito. O indutor apresenta alta reatância e seu comportamento é de um circuito aberto. Assim, a maior parte da tensão de entrada



estará sobre o indutor e a tensão sobre o resistor será muito baixa, ou seja, a tensão de saída será praticamente igual a tensão de entrada.

Para os sinais os quais apresentem frequências próximas a frequência de ressonância, o indutor e o capacitor apresentarão baixa reatância e se comportarão como um curto-circuito. Assim, a maior parte da tensão de entrada estará sobre o resistor e a tensão de saída será praticamente nula, ou seja, o sinal será atenuado.

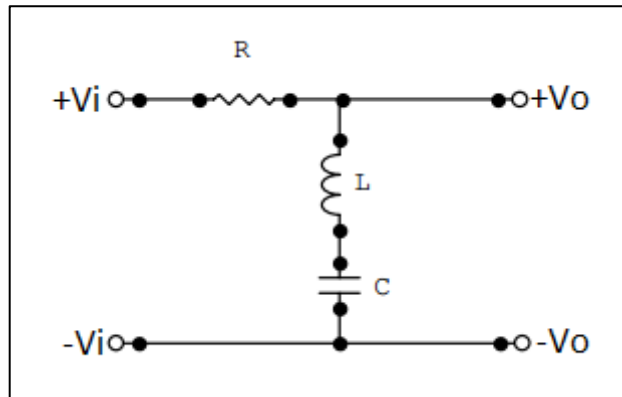


Figura 30 - Filtro rejeita-faixa RLC série  
FONTE: Adaptado de Mussoi (2014)

As expressões para o Ganho de Tensão e a Fase para um Filtro Rejeita-Faixa Série são, respectivamente (MUSSOI, 2004, p. 64):

$$A_v = \sqrt{\frac{1}{1 + \left(\frac{\omega RC}{1 - \omega^2 LC}\right)^2}} \quad (37)$$

$$\alpha = \arctg\left(\frac{\omega RC}{1 - \omega^2 LC}\right) \quad (38)$$

Como a expressão do Ganho é de segunda ordem, obtivemos duas equações de segundo grau, cada uma com duas soluções que corresponderão à Frequência de Corte Inferior e à Frequência de Corte Superior do Filtro Rejeita-Faixa RLC Série (MUSSOI, 2004, p. 65).

$$f_{ci} = \frac{-RC \pm \sqrt{(RC)^2 + 4LC}}{4\pi LC} \quad (39)$$

$$f_{cs} = \frac{RC \pm \sqrt{(RC)^2 + 4LC}}{4\pi LC} \quad (40)$$

A frequência central coincide com a frequência de ressonância, e para haver ressonância em série, é necessário que as reatâncias capacitivas e indutivas se anulem e se comportem como um curto-circuito, ou seja (MUSSOI, 2004, p. 66):

$$|X_C| = |X_L| \quad (41)$$

Assim, o ganho será nulo pois a reatância total da saída será zero, o seu comportamento é de um curto-circuito, a tensão de saída será nula e toda a tensão de entrada estará sobre o resistor. Portanto:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (42)$$

Um circuito como o mostrado na Figura 31 pode comportar-se como um filtro rejeita-faixa paralelo.

Para sinais de baixa frequência, o capacitor apresenta uma alta reatância capacitiva, comportando-se como um circuito aberto. O indutor apresenta baixa reatância indutiva, comportando-se como um curto-circuito. Assim, a maior parte da tensão de entrada estará sobre o resistor de saída.

Para sinais de alta frequência, o indutor apresenta reatância alta indutiva, comportando-se como um circuito aberto. O capacitor apresenta baixa reatância capacitiva, comportando-se como um curto-circuito. Assim, a maior parte da tensão de entrada estará sobre o resistor de saída

Para os sinais os quais apresentem frequências próximas a frequência de ressonância, o indutor e o capacitor apresentarão alta reatância e ambos se comportarão como um circuito aberto. Assim, a maior parte da tensão de entrada estará sobre o circuito LC e a tensão sobre o resistor de saída será praticamente nula, ou seja, o sinal será atenuado.

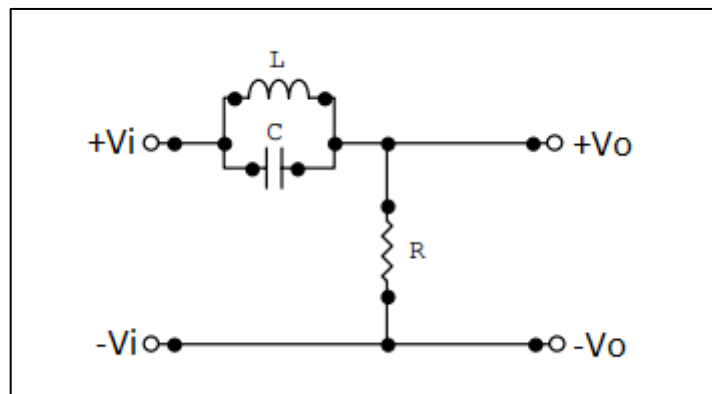


Figura 31 - Filtro rejeita-faixa RLC paralelo  
FONTE: Autoria própria (2014)

As expressões para o ganho e a fase são, respectivamente (MUSSOI, 2004, p. 70):

$$A_v = \sqrt{\frac{1}{1 + \left(\frac{\omega L}{R - \omega^2 RLC}\right)^2}} \quad (43)$$

$$\alpha = \arctg\left(\frac{R - \omega^2 RLC}{\omega L}\right) \quad (44)$$

Como a expressão do ganho é uma equação de segunda ordem, obtém-se duas equações do segundo grau, cada uma com duas soluções que correspondem a frequência de corte inferior e a frequência de corte superior do filtro rejeita-faixa paralelo (MUSSOI, 2004, p. 71):

$$f_{ci} = \frac{-\frac{L}{R} \pm \sqrt{\left(\frac{L}{R}\right)^2 + 4LC}}{4\pi LC} \quad (45)$$

$$f_{cs} = \frac{\frac{L}{R} \pm \sqrt{\left(\frac{L}{R}\right)^2 + 4LC}}{4\pi LC} \quad (46)$$

Sabe-se que a frequência de corte central ocorre exatamente na frequência de ressonância (MUSSOI, 2004, p. 71).

Para haver ressonância paralela, é necessário que as reatâncias equivalentes sejam infinitas para que assim elas comportem-se como um curto-circuito. Ou seja, é necessário que as duas reatâncias anulem uma a outra, então (MUSSOI, 2004, p. 72):

$$|X_L| - |X_C| \quad (47)$$

Na situação do circuito da Figura 31, o ganho é nulo, assim (MUSSOI, 2004, p. 72):

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (48)$$

Um arranjo possível para se formar um filtro rejeita-faixa pode ser visto na Figura 32. É uma combinação conhecida como duplo T. Este circuito também é chamado de filtro Notch, por (idealmente) apresentar uma banda de rejeição muito estreita, como mostrado na Figura 33.

Nas baixas frequências, os capacitores apresentam uma reatância capacitiva muito elevada, e seu comportamento é de um circuito aberto, e apenas os dois resistores  $R_2$  ficam no caminho do sinal.

Nas altas frequências, a reatância capacitiva dos capacitores  $C_1$  será muito baixa, e seu comportamento é de um curto-circuito.

As frequências entre a frequência de corte inferior e a frequência de corte superior não poderão passar. Elas serão bloqueadas nos capacitores  $C_1$  (com reatância capacitiva alta) ou desviadas em  $C_2$  (com reatância capacitiva baixa) (LOPES, 2008, p. 27).

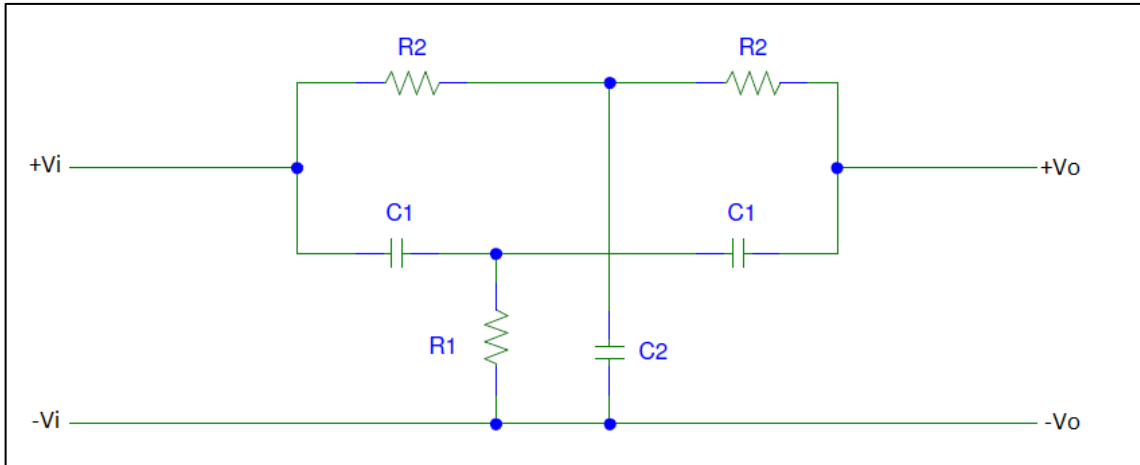


Figura 32 - Filtro rejeita-faixa RC – duplo T  
 FONTE: Autoria própria (2014)

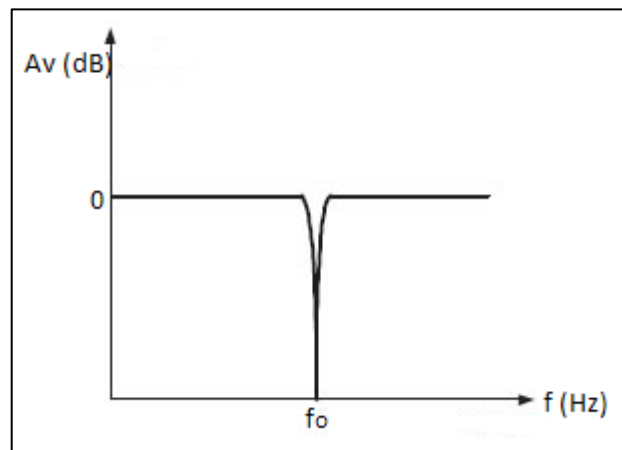


Figura 33 - Resposta em Frequência Filtro Rejeita-Faixa duplo T  
 FONTE: Adaptado de Mussoi (2014)

Outra maneira equivalente de configurar esse circuito é mostrado na Figura 34

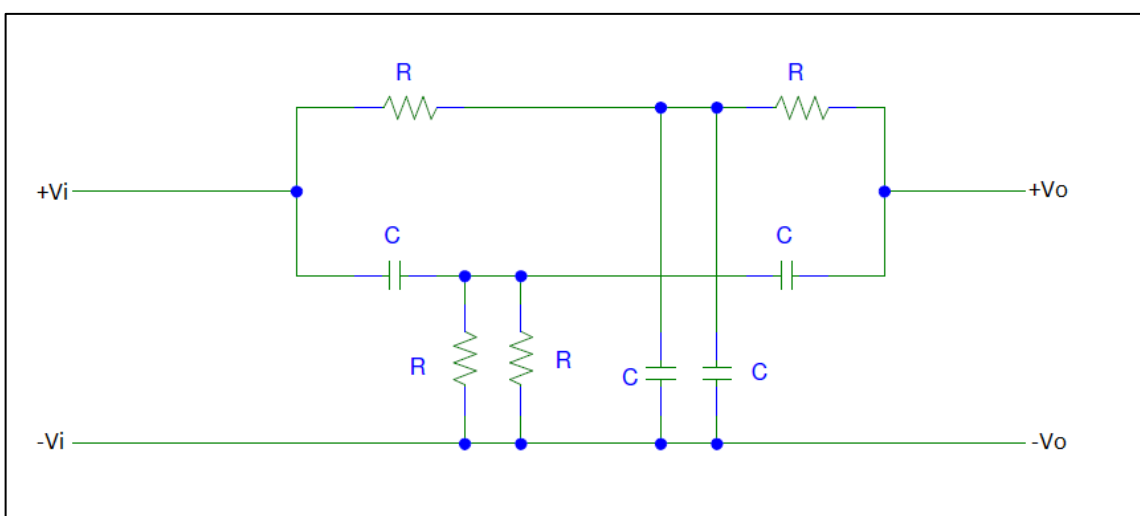


Figura 34 - Filtro rejeita-faixa duplo T  
 FONTE: Autoria própria (2014)

Esta configuração é equivalente à da Figura 32, visto que a resistência equivalente do ramo que é ligado ao terra é  $\frac{R}{2}$ , e o valor do capacitor equivalente do ramo que também está ligado ao terra é  $2C$ .

O cálculo do resistor  $R1$  da Figura 32 é (LOPES, 2008, p. 27):

$$R1 = \frac{R2}{2} \quad (49)$$

E o cálculo do capacitor  $C2$  é (LOPES, 2008, p. 27):

$$C2 = 2 \cdot C1 \quad (50)$$

O que prova que os circuitos são equivalentes.

Ao analisar o filtro duplo T, percebe-se que ele é uma junção de um filtro passa-baixa em paralelo com um filtro passa-alta, portanto a frequência onde ocorrerá a máxima rejeição poderá ser calculada utilizando a mesma fórmula dos filtros passa-baixa e passa-alta, fazendo algumas considerações (LOPES, 2008, p.27):

Fazendo:

$$R2 = 2 \cdot R1 \quad (51)$$

E

$$C2 = 2 \cdot C1 \quad (52)$$

A máxima rejeição ocorrerá na frequência:

$$f_o = \frac{1}{2\pi R1 \cdot C2} \quad (53)$$

Com as equações de ganho e fase, é possível traçar as curvas de resposta em frequência para o ganho de tensão e a fase do circuito rejeita-faixa (MUSSOI, 2004, p. 72):

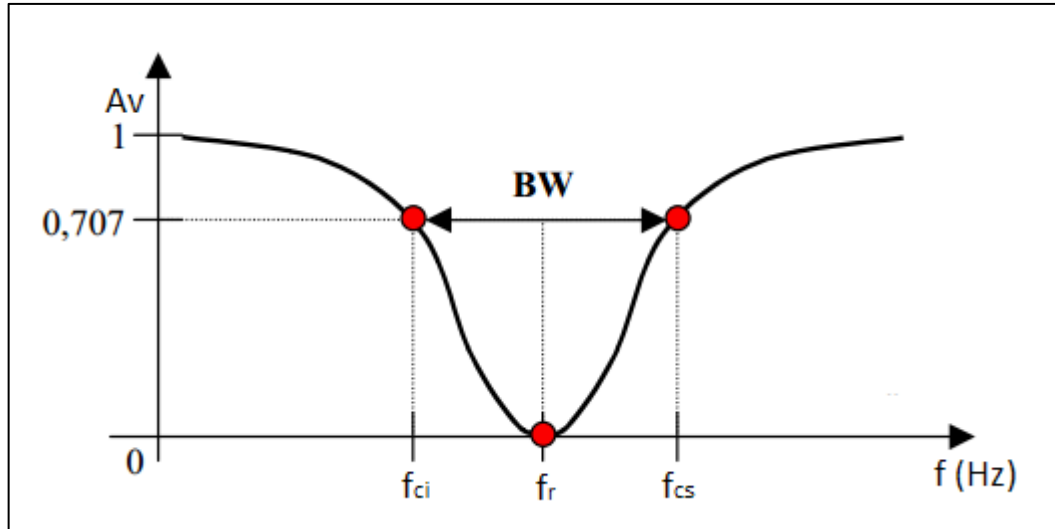


Figura 35 - Curva de resposta em frequência para o filtro rejeita-faixa – ganho de tensão  
 FONTE: Adaptado de Mussoi (2014)

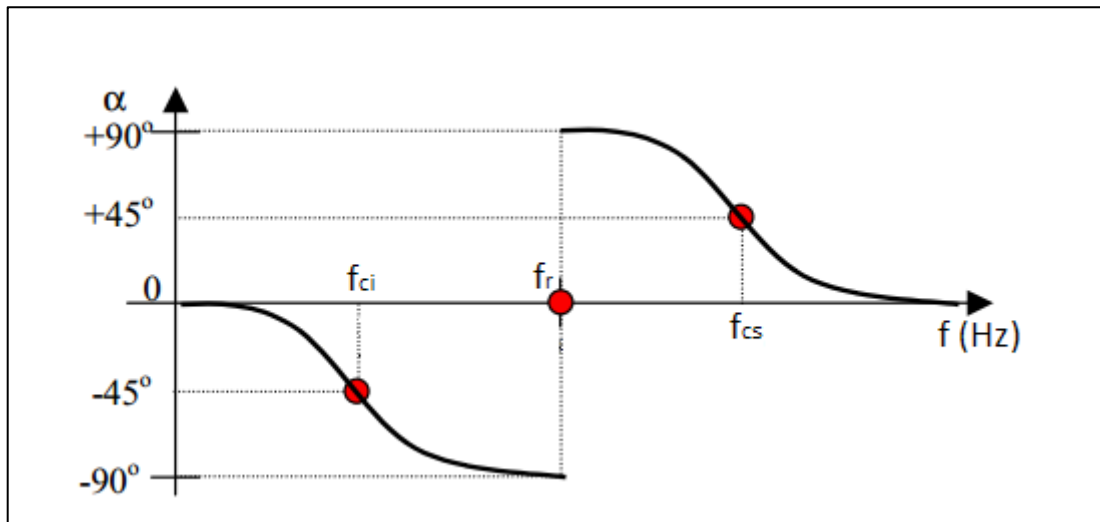


Figura 36 - Curva de resposta em frequência do filtro rejeita-faixa – fase  
 FONTE: Adaptado de Mussoi (2014)

- Ganho:

$$f = 0: A_v = 1$$

$$f = f_r: A_v = 0$$

$$f \rightarrow \infty: A_v = 1$$

- Fase:

$$f = 0: \alpha = \arctg(0) = 0^\circ$$

$$f = f_r: \alpha = \arctg\left(\frac{\omega_r RC}{\pm 0}\right) = \pm 90^\circ$$

$$f \rightarrow \infty: \alpha = \arctg(0) = 0^\circ$$

## 2.6 FILTROS ATIVOS

Os filtros ativos são assim chamados por apresentam componentes ativos, ou seja, que necessitam de alimentação, associados aos componentes passivos (resistores e capacitores). Assim, ao contrário dos filtros passivos, os ativos apresentam também um amplificador a fim de produzir uma amplificação de tensão (ganho) e buferização ou isolamento do sinal (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2004, p. 487). Os indutores raramente são utilizados em projetos de filtros ativos devido ao seu tamanho e alto custo.

Os elementos ativos citados anteriormente podem ser: válvulas, transistores ou amplificadores operacionais. A evolução dos filtros ativos pode ser dividida em três gerações, tendo esses três componentes como elementos ativos.

A primeira geração era implementada com as válvulas. Porém, os resultados não eram muito satisfatórios, uma vez que apresentavam alta margem de ruído, elevado consumo de potência e baixo ganho. Os transistores fazem parte da segunda geração. Apesar de apresentarem evolução considerável nos resultados de implementação dos filtros ativos, ainda deixavam muito a desejar. Por fim, a terceira geração é caracterizada pela utilização dos amplificadores operacionais. Esses componentes possuem alta resistência de entrada e baixa resistência de saída que, combinadas com outras características, proporcionam ótimos resultados na implementação dos filtros (PERTENCE, 1988, p.195). E o foco do estudo e dos projetos aqui apresentados serão os filtros ativos implementados com o amplificador operacional.

Os filtros ativos possuem diversas aplicações e atualmente têm sido cada vez mais utilizados em diversas áreas de eletrônica. Dentre elas, as telecomunicações, a bioengenharia e a instrumentação (principalmente a eletromedicina ou bioeletrônica) podem ser citadas como aquelas nas quais eles são mais utilizados (PERTENCE, 1988, p.190).

Como mencionado no Capítulo 1, os filtros podem ser classificados de acordo com a função executada (filtros passa-baixa, passa-alta, passa-faixa ou rejeita-faixa) e quanto à função-resposta (ou aproximação) utilizada (filtros Butterworth, Chebyshev e Cauer). Nesta seção, serão abordadas as implementações dos filtros ativos de acordo com essas duas classificações.

### 2.6.1 Vantagens e Desvantagens dos filtros ativos

Comparando os filtros passivos e ativos, estes apresentam diversas vantagens em relação àqueles:

- Possibilidade de amplificação elevada (alto ganho) do sinal de entrada, mesmo quando se trata de sinal de nível muito baixo;

- Possibilidade de implementar de maneira fácil a associação em cascata de estágios simples a fim de projetar filtros mais complexos;
- Grande flexibilidade de projetos;
- O uso de indutores é dispensável. Isto se torna positivo, visto que, em baixas frequências, esses componentes são volumosos e pesados, além de caros (PERTENCE, 1988, p. 190).

Apesar de possuírem muitas vantagens, os filtros ativos apresentam também algumas limitações, tais como:

- Necessidade de fonte de alimentação, devido aos componentes ativos (amplificadores operacionais);
- A resposta em frequência se limita à capacidade de resposta dos próprios amplificadores operacionais;
- Impossibilidade de serem utilizados em sistemas de média e alta potência (por exemplo, filtros para conversores e inversores, os quais são usados em acionamentos industriais) (PERTENCE, 1988, p. 190).

### 2.6.2 Amplificador Operacional

Como os filtros ativos são caracterizados pelos componentes ativos, é preciso entender como esses dispositivos funcionam. O componente que será estudado e com o qual serão implementados os projetos dos filtros ativos será o amplificador operacional.

O amplificador operacional é um dispositivo extremamente versátil e eficiente, cuja atuação se encontra em diversos ramos industrial, especialmente na eletrônica (CARTER, Bruce. 2001, p.7). Também conhecido como amp-op, o operacional é um amplificador diferencial que apresenta uma alta impedância de entrada e uma baixa impedância de saída e, por conta disso, apresenta um ganho muito alto. Além disso, é um circuito integrado projetado para operar sob alimentação simétrica (PERTENCE, 1988, p. 15). Esse componente oferece muitas vantagens, tais como: baixo custo, tamanho reduzido, alta confiabilidade, tensão pequena e corrente de deslocamento (*offset*) (MILLMAN; HALKIAS, 1981, p.561).

Os amp-ops possuem uma série de aplicações, sendo muito utilizados em sistemas eletrônicos de controle industrial, em instrumentação médica, em instrumentação nuclear, em computadores analógicos, nos equipamentos de telecomunicações, em filtros, em osciladores e entre outros (PERTENCE, 1988, p. 4).

A Figura 38 apresenta a simbologia de um amp-op básico com duas entradas - sendo uma inversora e outra, não inversora - e uma saída, que corresponde a um valor múltiplo (fator A) da diferença entre as duas entradas, conforme a equação 1. Este valor corresponde ao ganho de tensão do amplificador. A entrada inversora



resulta em uma saída com a mesma polaridade (ou fase) e, por outro lado, a entrada não-inversora resulta em uma saída com polaridade (ou fase) oposta (BOYLESTAD, NASHELSKY, 2004, p. 453).

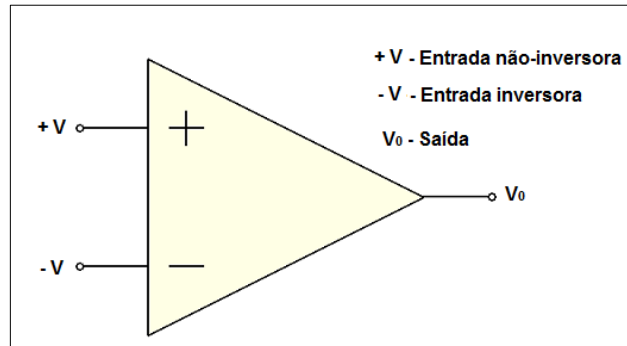


Figura 37 - Simbologia do amplificador operacional  
 FONTE: Adaptado de Pertence (2014).

$$V_o = [(+V) - (-V)] \quad (54)$$

### 2.6.2.1 Ganho de Tensão de um Amplificador

Os AmpOps se caracterizam por apresentar um ganho de tensão, que corresponde ao fator pelo qual a tensão de entrada é multiplicada, resultando, assim, na tensão de saída do componente.

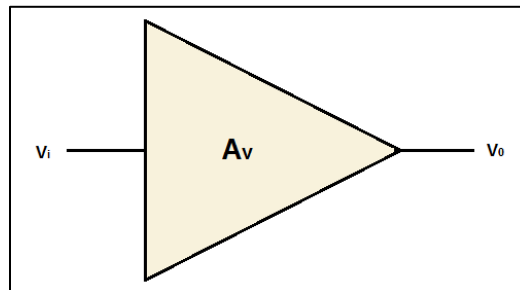


Figura 38 - Símbolo de um amplificador genérico  
 FONTE: Adaptado de Pertence (2014).

Considerando o símbolo genérico de um amplificador apresentado na Figura 38, onde:

$V_i$ : sinal de entrada

$V_o$ : sinal de saída

$A_v$ : ganho de tensão do amplificador

Pode-se definir o fator de ganho  $A_v$  como sendo (PERTENCE, 1988, p. 10):

$$Av = \frac{V_o}{V_i} \quad (55)$$

Convertendo para decibéis:

$$G(dB) = 10 \log G \quad (56)$$

Como, em se tratando de tensão, o ganho em decibéis é calculado como razão do quadrado. Portanto,

$$Av(dB) = 10 \log \frac{V_o^2}{V_i^2} \quad \longrightarrow \quad Av(dB) = 2 * 10 \log \frac{V_o}{V_i}$$

Tem-se que o ganho de tensão em decibéis corresponde a (PERTENCE, 1988, p.10):

$$Av(dB) = 20 \log \frac{V_o}{V_i} \quad (57)$$

### 2.6.2.2 Ganho Largura de Banda

O AmpOp é um componente com a finalidade de funcionar como amplificador de alto ganho e com uma banda-passante ampla. Devido aos efeitos de realimentação dos operacionais, essa operação tende a oscilar. Para evitar esse instabilidade, os operacionais apresentam circuitos de compensação interna, que acabam por reduzir o ganho de malha aberta à medida que a frequência aumenta. Essa redução é conhecida como *roll-off*. Em frequências baixas, o ganho geralmente corresponde a um valor muito alto ( $Av$ ). À medida que a frequência aumenta, o ganho de malha aberta reduz, até que atinja o valor unitário, como pode ser verificado na Figura 39. A frequência referente ao ganho unitário é especificada pelo fabricante como largura de banda de ganho unitário,  $B1$  (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2004, p.465).

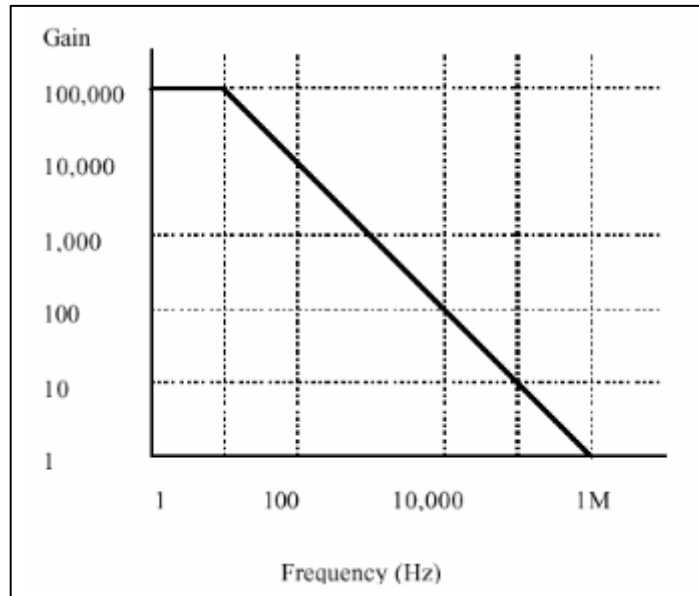


Figura 39 - Gráfico ganho versus frequência de um ampop.  
 FONTE: Lamar University

Outro aspecto importante em relação à frequência é que o ganho referente à frequência de corte  $f_c$  do operacional corresponde à 3 dB abaixo que o ganho máximo. Em se tratando de ganho CC, esse valor corresponde à 0,707 do ganho. Pode-se observar isso na Figura 41.

A frequência de ganho unitário e a frequência de corte de um ampop obedecem à seguinte relação (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2004, p.465):

$$f_1 = A_{vd} \cdot f_c \quad (58)$$

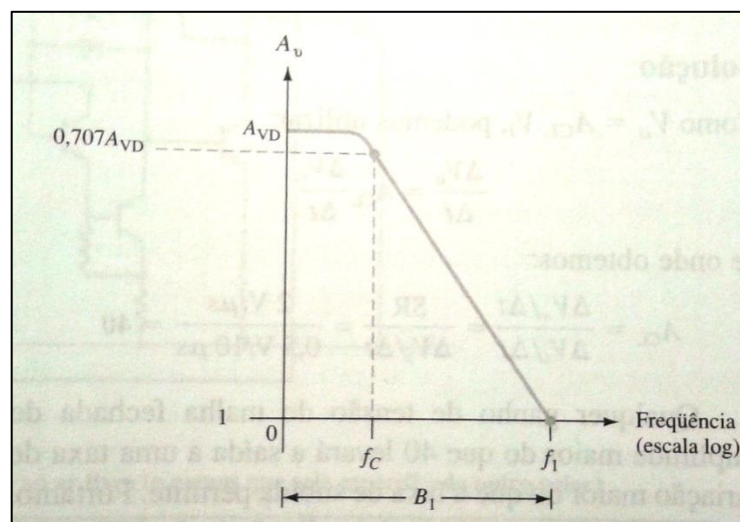


Figura 40 - Gráfico frequência versus ganho  
 FONTE: Boylestad; Nashelsky (2004).

### 2.6.3 Tipos de filtros quanto à função-resposta

Nesta seção serão abordados dois tipos de filtros classificados quanto à aproximação usada para projetá-los. A respeito dos filtros de Butterworth, Sedra (2000) afirma:

“Essas funções têm como vantagem o fato de expressões completamente analíticas estarem disponíveis com seus parâmetros. Portanto, podem ser usadas no projeto de filtros sem a necessidade de um computador ou tabelas. Sua utilidade, porém, é limitada a aplicações relativamente simples.” (Sedra, Adel S., 2000, p. 820)

#### 2.6.3.1 Filtro Butterworth

Um filtro que utiliza uma aproximação do tipo Butterworth possui a seguinte função de transferência:

$$Av(s) = \frac{Avo}{Bn(s)} \quad (59)$$

E fazendo  $s = jw$ ,

$$|Av(s)|^2 = |Av(s)| |Av(-s)| = \frac{Avo^2}{1 + \left(\frac{w}{wo}\right)^{2n}} \quad (60)$$

Pelas equações (59) e (60), tem-se que o módulo de  $Bn(s)$  é descrito como:

$$Bn(w) = \sqrt{1 + (w/wo)^{2n}} \quad (61)$$

A resposta do filtro Butterworth para diversos valores de  $n$  está mostrada na Figura 41. Nota-se que as respostas se aproximam a da resposta de um filtro ideal à medida que  $n$  aumenta.

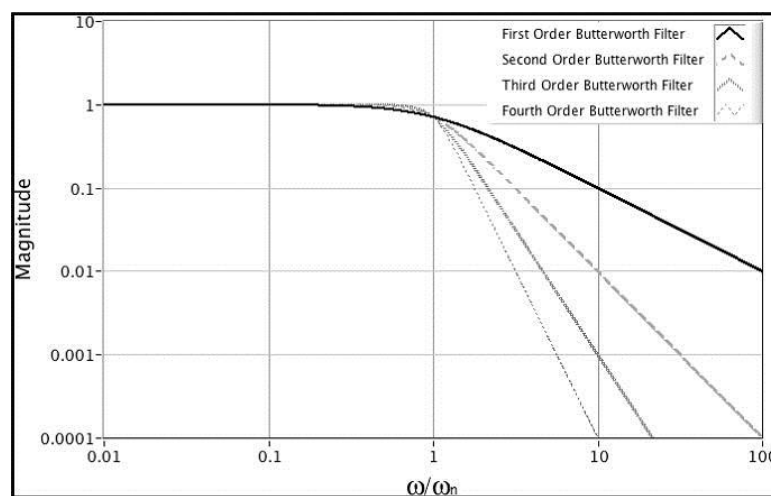


Figura 41 - Frequência normalizada  $w/w_o$   
 FONTE: UtahState University (2010).

A Tabela 1 apresenta os polinômios de Butterworth para filtros de até ordem 8, para  $\omega_0 = 1$  rad/s. É possível notar que quando  $n$  é um número par, os polinômios correspondem aos produtos de formas quadráticas e, quando é um número ímpar, o fator  $(s + 1)$  é acrescentado. O valor dos zeros dos polinômios normalizados de Butterworth são apenas -1 e são determinados pelos círculos de Butterworth de raio igual a 1. O fator de amortecimento  $k$  (onde,  $k = \cos\theta$ ) corresponde à metade do coeficiente de  $s$  de cada fator quadrático da tabela (Millman; Halkias, 1981, p. 607).

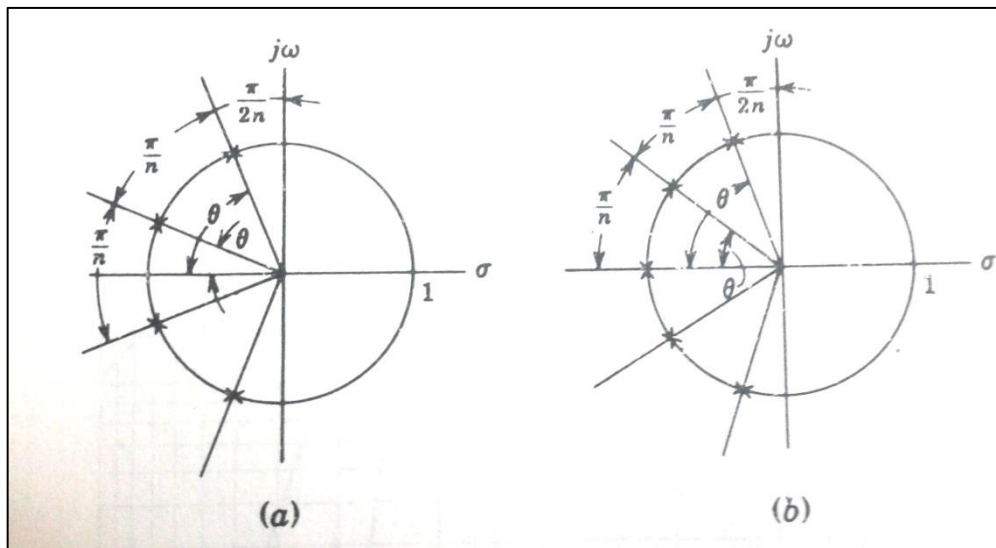


Figura 42 - Círculo de Butterworth, para  $n$  igual a um número par (a) e para  $n$  igual a um número ímpar (b)

FONTE: Millman (1988).

Tabela 1 - Polinômios normalizados de Butterworth

n	Fatores de polinomiais $B_n(s)$
1	$(s + 1)$
2	$s^2 + 1.414s + 1$
3	$(s + 1)(s^2 + s + 1)$
4	$(s^2 + 0.7654s + 1)(s^2 + 1.8478s + 1)$
5	$(s + 1)(s^2 + 0.6180s + 1)(s^2 + 1.6180s + 1)$
6	$(s^2 + 0.5176s + 1)(s^2 + 1.414s + 1)(s^2 + 1.9318s + 1)$
7	$(s + 1)(s^2 + 0.4450s + 1)(s^2 + 1.247s + 1)(s^2 + 1.8022s + 1)$
8	$(s^2 + 0.3986s + 1)(s^2 + 1.111s + 1)(s^2 + 1.6630s + 1)(s^2 + 1.9622s + 1)$

FONTE: Millman (1981)

Mais à diante, serão apresentados cálculos para a construção de filtros ativos do tipo Butterworth. Para isso, serão necessários valores dos parâmetros  $a$  e  $b$ , que

variam de acordo com o polinômio de Butterworth mostrado na tabela anterior. Os valores desses parâmetros podem ser consultados na tabela a seguir:

Tabela 2 – Parâmetros para filtros Butterworth

<i>n</i>	<i>a</i>	<i>b</i>
2	1,414214	1
3	1	1
	-	1
4	0,765367	1
	1,847759	1
5	0,618034	1
	1,618034	1
	-	1
6	0,517638	1
	1,414214	1
	1,931852	1
7	0,445042	1
	1,24698	1
	1,801938	1
	-	1
8	0,390181	1
	1,11114	1
	1,662939	1
	1,961571	1

FONTE: Adaptado de Pertence (2014).

#### 2.6.4 Tipos de Filtro quanto à função executada

Há diversas configurações de implementação de filtros ativos. Abordaremos duas mais usuais na prática:

- Estrutura de realimentação Múltipla (MFB, em inglês, *Multiple Feedback*);
- Estrutura da fonte de tensão controlada por tensão (VCVS, em inglês, *Voltage-Controlled Voltage Source*). Pode também ser conhecida como estrutura de Sallen e Key.

Ambas configurações apresentam algumas vantagens, como facilidade para ajustar o ganho e a frequência, alta estabilidade, impedância de saída baixa, alta estabilidade, entre outros. Por outro lado, o fator de seletividade *Q* é limitado no valor máximo de 10, quando implementados filtros nessas estruturas (PERTENCE, 1988, p.214).

A seguir, serão descritos os quatro tipo de filtros.

### 2.6.4.1 Filtros Passa-Baixa

#### 2.6.4.1.1 Primeira ordem

Para a implementação do filtro passa-baixa de primeira ordem, será abordada a estrutura VCVS, a qual pode ser vista na Figura 43.

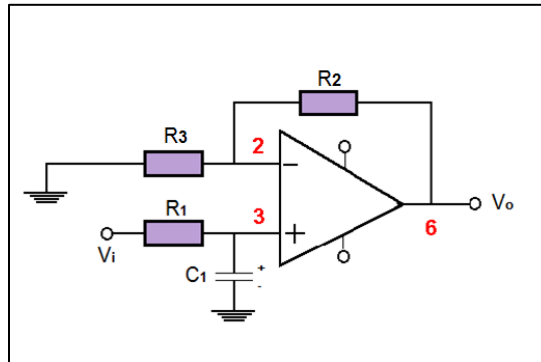


Figura 43 - Projeto de filtro ativo passa-baixa de 1ª. Ordem  
 FONTE: Adaptado de Boylestad (2014).

O ganho  $A_v$  correspondente pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$A_v = 1 + \frac{R_2}{R_3} \quad (62)$$

O valor do capacitor pode ser calculado por:

$$C = \frac{10}{f_c} \text{ (uF)} \quad (63)$$

Na realidade, o valor do capacitor pode ser escolhido arbitrariamente. A equação 9 é uma regra empírica para projetos ativos (PERTENCE, 1988, p.216). Isto é para evitar que sejam usados resistores de valores muito baixos e capacitores de valores muito alto, devido à limitação dos operacionais em relação aos valores de capacitores e correntes que podem apresentar em sua saída. Se isso acontecer, eles não conseguem fornecer as correntes adequadas para esse tipo de carga. Os valores dos resistores conectados aos operacionais não devem ser muito menores que  $300\Omega$  para evitar que puxem muita corrente e acabem queimando o CI.

Continuando com a determinação dos valores dos componentes, como  $f_c = \frac{1}{2\pi RC}$ ,

$$R_1 = \frac{1}{b2\pi f_c C_1} \quad (64)$$

Onde coeficiente  $b$  é uma constante usada para determinar o tipo de função resposta quando a ordem do filtro é maior ou igual a 2. Neste caso, seu valor deve

ser consultado na respectiva tabela da função-resposta desejada. No caso de filtro de primeira ordem, o coeficiente  $b$  recebe valor unitário ( $b = 1$ ), pois não importa qual é o tipo de função-resposta (PERTENCE, 1988, p. 216).

Por fim,  $R3$  é calculado pela fórmula:

$$R3 = \frac{A_v}{A_v - 1} R1 \quad (65)$$

O gráfico resposta em frequência de ganho de tensão e fase estão representados pelas Figura 44 e Figura 45, respectivamente:

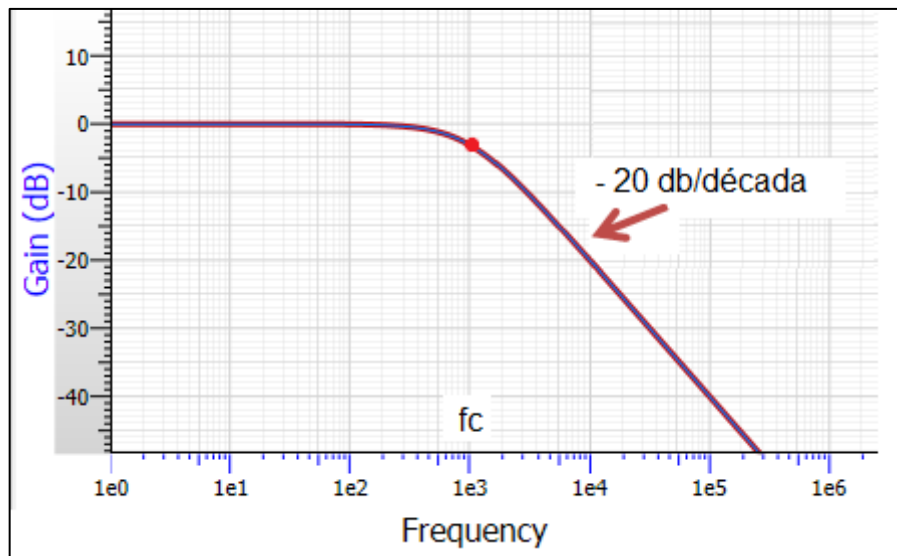


Figura 44 - Curva de resposta em frequência (Ganho de tensão) do filtro PB de 1ª. Ordem  
 FONTE: FilterPro (2014).

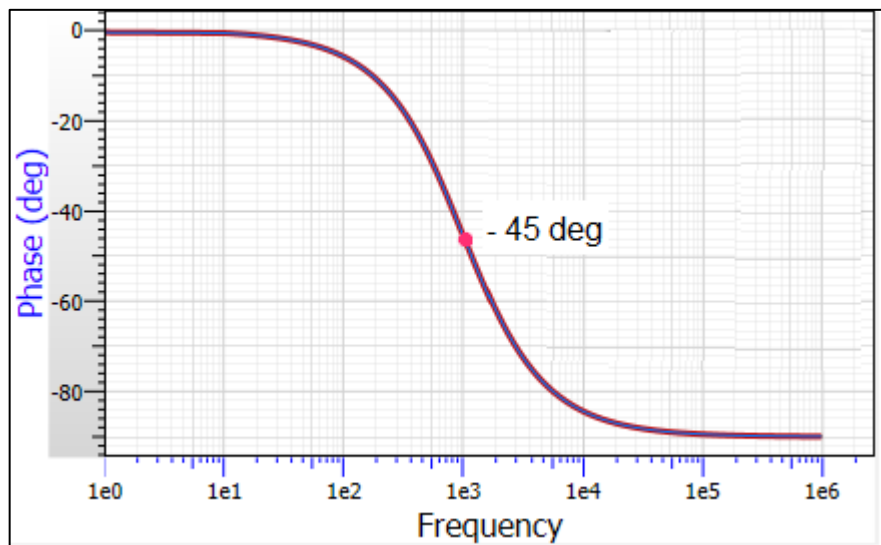


Figura 45 - Curva de resposta em frequência (fase) do filtro PB de 1ª. Ordem  
 FONTE: FilterPro (2014).



### 2.6.4.1.2 Segunda Ordem

O esquemático do filtro ativo passa-baixa de segunda ordem, na configuração VCVS, está representado na Figura 46 a seguir:

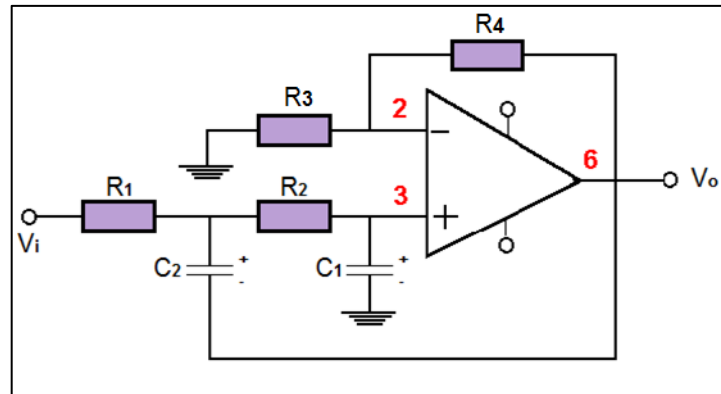


Figura 46 - Projeto de filtro ativo passa-baixa de 2ª. Ordem  
 FONTE: Adaptado de Boylestad (2014).

Os cálculos dos componentes são feitos pelas equações seguintes:

$$A_v = 1 + \frac{R_4}{R_3} \quad (66)$$

$$R_1 = \frac{2}{\left[ aC_2 + \sqrt{[a^2 + 4b(A_v - 1)]C_2^2 - 4bC_1C_2} \right] \omega c}, \quad (67)$$

lembrando que  $\omega c = 2\pi fc$ .

$$R_2 = \frac{1}{bC_1C_2R_1\omega c^2} \quad (68)$$

$$R_3 = \frac{A_v(R_1 + R_2)}{A_v - 1} \quad (A_v > 1) \quad (69)$$

$$R_4 = A_v(R_1 + R_2) \quad (70)$$

Para obter os valores das constantes  $a$  e  $b$ , deve-se consultar às tabelas apropriadas, referentes ao tipo de função-resposta se deseja projetar. Quando se trata do filtro Butterworth, os valores de  $a$  e  $b$  podem ser encontrados na tabela 2, do item Filtros de Butterworth.

O valor de  $C_2$  deve ser próxima de

$$C_2 = \frac{10}{fc} \quad (71)$$

Depois que determinado o valor de C2, o próximo e último passo é calcular o valor de C1 pela equação 18:

$$C1 \leq \frac{[a^2 + 4b(Av - 1)]C2}{4b} \quad (72)$$

O gráfico resposta em frequência de ganho de tensão e fase estão representados pelas Figura 47 e Figura 48, respectivamente:

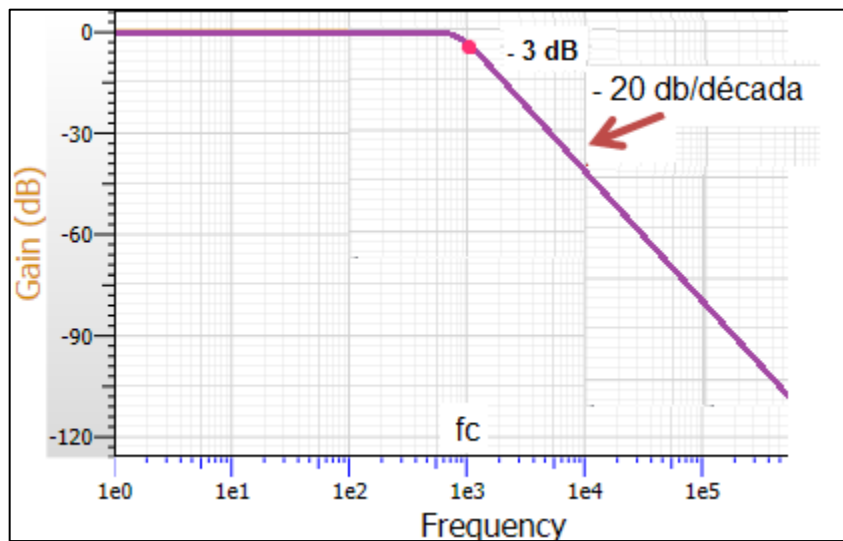


Figura 47 - Curva de resposta em frequência (Ganho de tensão) do filtro PB de 1ª. Ordem  
FONTE: FilterPro (2014).

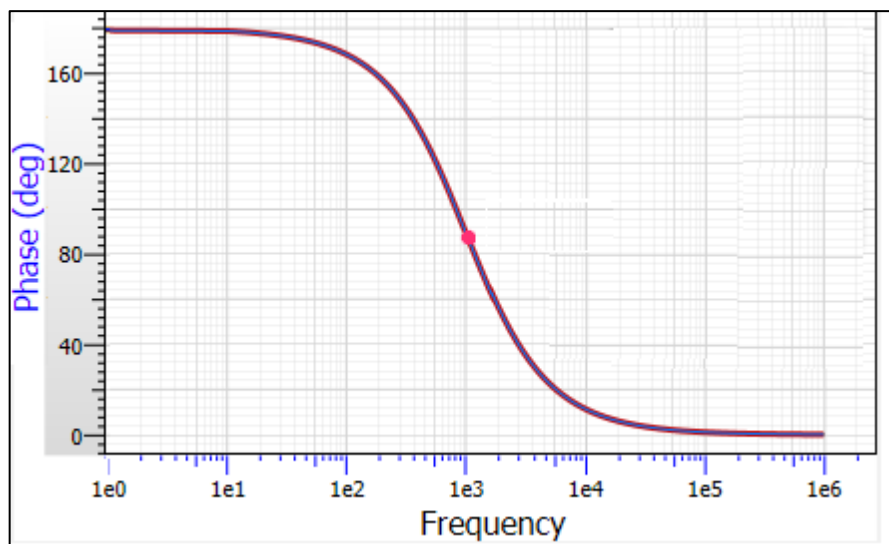


Figura 48 - Curva de resposta em frequência (fase) do filtro PB de 2ª. Ordem  
FONTE: FilterPro (2014).

### 2.6.4.1.3 Ordem maior que 2

Para se obter filtro PB ativo passa-baixa com ordem maior que a segunda, é feita uma associação em cascata de primeira e segunda ordem. Por exemplo, se deseja projetar um filtro de 3ª. ordem, pode associar 2 estágios de filtro ativo PB, sendo um de primeira ordem e outro de segunda ordem. Da mesma forma, é possível projetar um filtro PB de 4ª. ordem, cascadeando dois filtros PB de 2ª. ordem (PERTENCE, 1988, p.229). Isto pode ser visualizado na Figura 49:

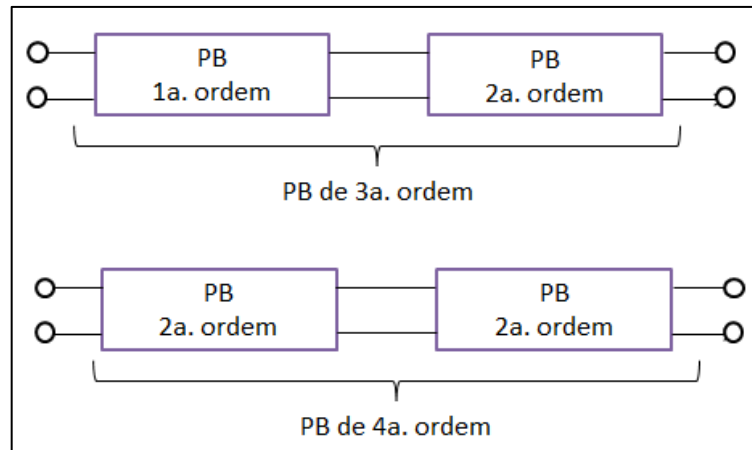


Figura 49 - Cascadeamento de filtros PB para obter filtros PB de ordem maior que 2  
FONTE: Adaptado de Pertence (2014).

### 2.6.4.2 Filtro Passa-Alta

Os procedimentos para obter um filtro passa-alta é semelhante aos do passa-baixa. Porém, a diferença está na permutação dos resistores por capacitores e vice-versa. Isto é chamada de transformação RC  $\rightarrow$  CR (PERTENCE, 1988, p. 222).

#### 2.6.4.2.1 Primeira Ordem

Aplicando a transformação RC  $\rightarrow$  CR do circuito passa-baixa, é obtido um filtro passa-alta, conforme a Figura 50:

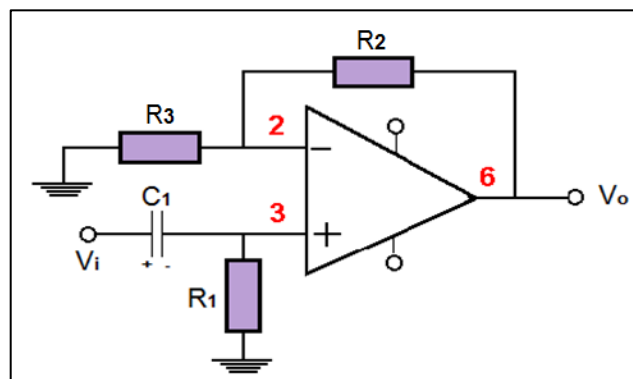


Figura 50 - Projeto de filtro ativo passa-alta de 1ª. Ordem  
FONTE: Adaptado de Boylestad (2014).

Os valores dos componentes são obtidos por meio de cálculo das seguintes equações:

$$A_v = 1 + \frac{R_2}{R_3} \quad (73)$$

$$R_1 = \frac{1}{2\pi f_c C_1} \quad (74)$$

$$R_2 = \frac{A_v R_1}{A_v - 1} \quad (A_v > 1) \quad (75)$$

$$R_3 = \frac{A_v}{A_v - 1} R_1 \quad (76)$$

Da mesma forma que no filtro passa-baixa, o capacitor do filtro passa alta de 1ª. ordem é calculado pela equação:

$$C = \frac{10}{f_c} (\mu\text{F}) \quad (77)$$

#### 2.6.4.2.2 Segunda Ordem

Assim como no filtro ativo PA de primeira ordem, a transformação RC  $\rightarrow$  CR também é válida para filtros PA de segunda ordem, obtendo, assim, o circuito na configuração VCVS da Figura 51.

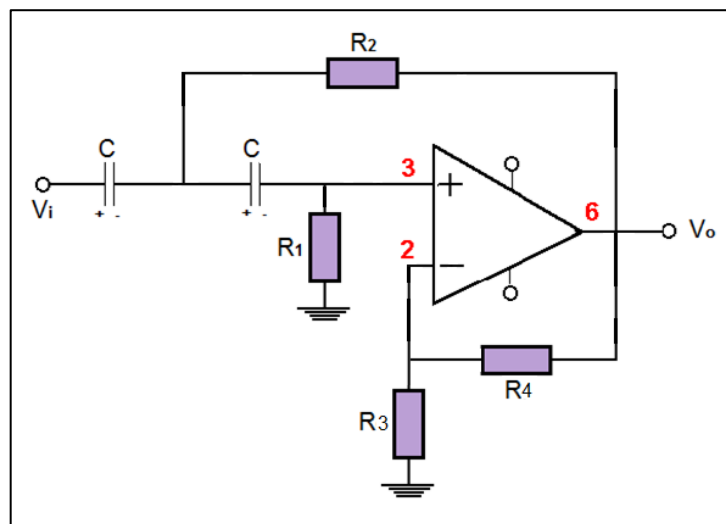


Figura 51 - Projeto de filtro ativo passa-alta de 2ª. Ordem  
 FONTE: Adaptado de Boylestad (2014).

Utilizando as equações seguintes, é possível obter os valores dos componentes:

$$A_v = 1 + \frac{R_4}{R_3} \quad (78)$$

Para o filtro ativo de segunda ordem, os valores dos capacitores C1 e C2 são iguais. Portanto,

$$C_1 = C_2 = C \quad (79)$$

$$R_1 = \frac{4b}{\left[ a + \sqrt{a^2 + 8b(A_v - 1)\omega c C} \right]} \quad (80)$$

$$R_2 = \frac{b}{\omega c^2 C^2 R_1} \quad (81)$$

$$R_3 = \frac{A_v R_1}{A_v - 1} \quad (A_v > 1) \quad (82)$$

$$R_4 = A_v R_1 \quad (83)$$

#### **2.6.4.2.3 Ordem maior que 2**

A lógica utilizada para construir filtros ativos passa-baixa de ordem maior que 2 também é válida para os filtros ativos passa-alta. Para se obter filtros PA de ordem maior, deve-se combinar filtros PA de primeira e segunda ordem, fazendo associação em cascata.

#### **2.6.4.3 Filtros Passa-Faixa**

A configuração mais usual na prática para projetar filtro PF é a estrutura MFB. A menor ordem de um filtro do tipo PF é 2 e pode-se projetar de duas formas.

A primeira seria cascatear um filtro PA com um filtro PB, como está representado pela Figura 16. O ganho dos dois filtros devem ser iguais e a frequência de corte do PB deve ser maior que o do PA. Os filtros devem ser projetados independentemente.

A ordem do filtro PF resultante será o dobro da ordem dos filtros PB e PA.

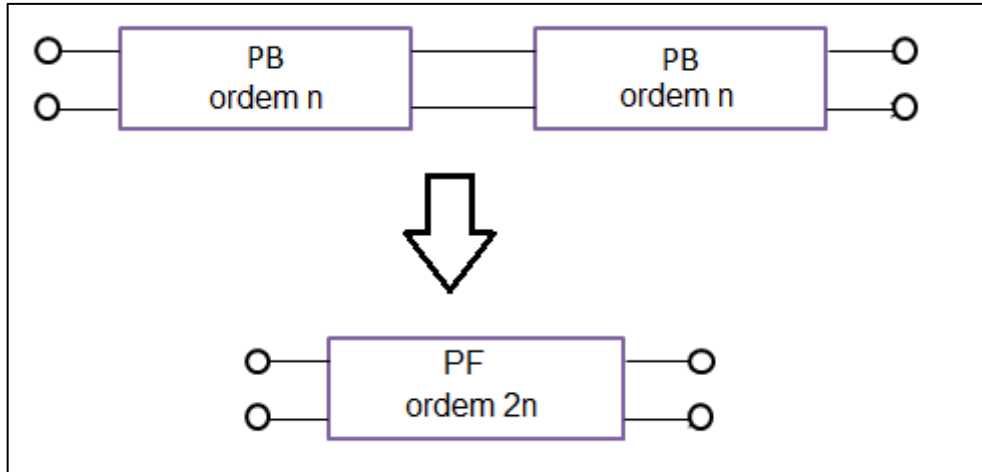


Figura 52 - Cascateamento de filtros PB e PA de ordem  $n$  para obter um filtro PF de ordem  $2n$ .  
 FONTE: Adaptado de Pertence (2014).

Porém, essa alternativa nem sempre pode apresentar boa precisão em se tratando de filtro PF por conta dos problemas que podem surgir em relação ao fator de seletividade  $Q$ , com a largura de banda resultante da associação e com o ganho do circuito correspondente à faixa de passagem (PERTENCE, 1988, p. 234).

A outra maneira de projetar o filtro PF é por meio de cálculos que serão apresentados a seguir. Será possível observar que os valores dos componentes estão diretamente relacionados com o fator  $Q$ .

A estrutura MFB para um filtro passa-faixa está representada na Figura 53.

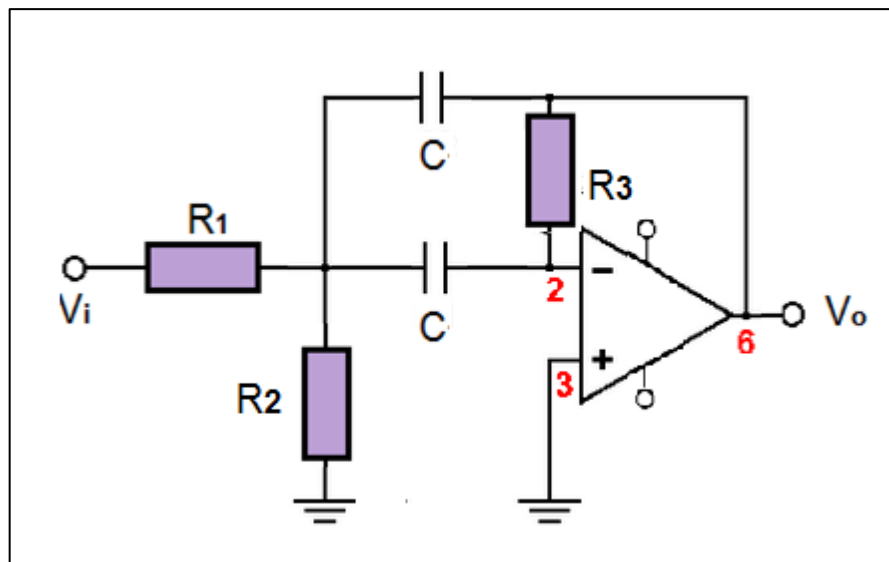


Figura 53 - Projeto de filtro ativo passa-faixa  
 FONTE: Adaptado de Boylestad (2014).

Geralmente, as frequências de corte inferior e superior são escolhidas pelo projetista.

Assim, tem-se o valor da largura de banda e a frequência central:

$$BW = fc2 - fc1 \quad (84)$$

$$fo = \sqrt{fc1 * fc2} \quad (85)$$

O ganho  $Av$  também é estabelecido pelo projetista. Pela equação 32, obtém-se o fator  $Q$ , lembrando que este não deve exceder o valor de 10:

$$Av < 2Q^2 \quad (86)$$

Assim como os demais filtros apresentados anteriormente, o valor  $C$  do filtro PF é estabelecido por um valor comercial perto de  $10/fo$ .

Para obter os valores dos resistores, são utilizadas as seguintes equações:

$$R1 = \frac{Q}{\omega_0 C Av} \quad (87)$$

$$R2 = \frac{Q}{\omega_0 C (2Q^2 - Av)} \quad (88)$$

$$R3 = \frac{2Q}{\omega_0 C} \quad (89)$$

Um exemplo de resposta em frequência de ganho de tensão e fase são representadas pelas Figura 54 e Figura 55:

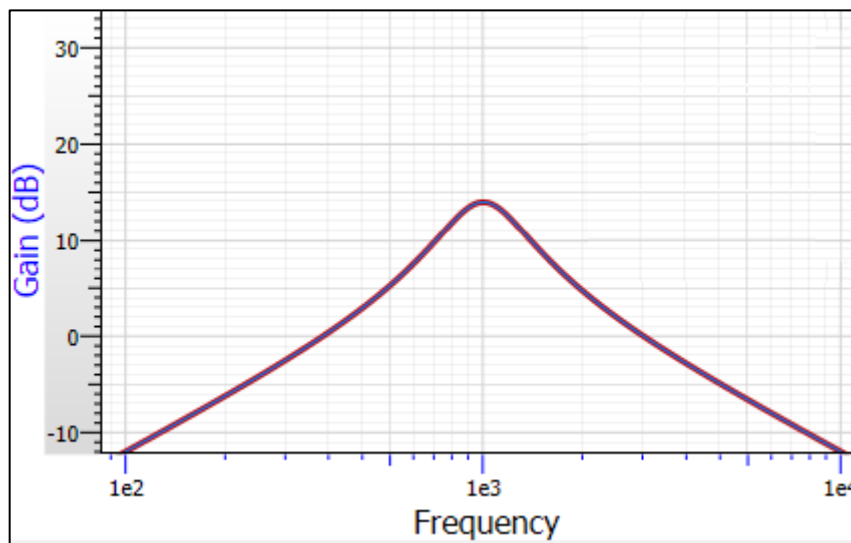


Figura 54 - Curva de resposta em frequência (Ganho de tensão) do filtro PF  
 FONTE: FilterPro (2014).

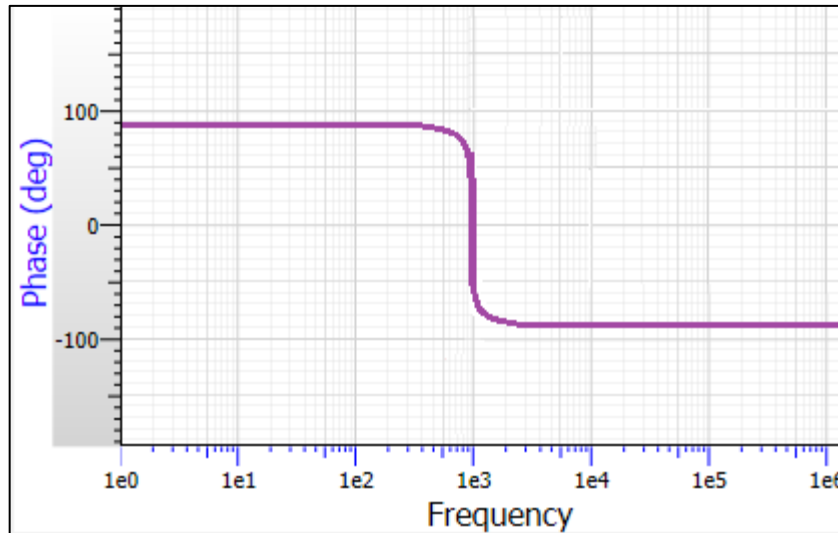


Figura 55 - Curva de resposta em frequência (fase) do filtro PF  
 FONTE: Adaptado de FilterPro (2014).

#### 2.6.4.3.1 Ordem maior que 2

Como já citado, a menor ordem que um filtro passa-faixa pode apresentar é 2. Para projetar filtros PF de ordem maior pela configuração MFB, é preciso fazer a associação em cascata de filtros PF. É válido observar que os filtros ativos PF apresentarão sempre ordem par.

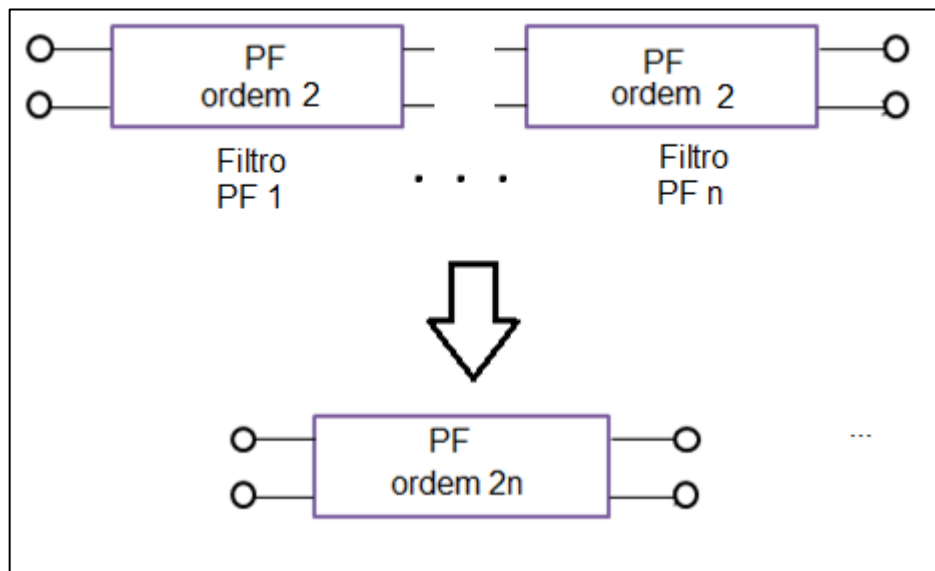


Figura 56 - Cascateamento de filtro PF para projetar um filtro de ordem maior que 2  
 FONTE: Adaptado de Pertence (2014)

#### 2.6.4.4 Filtro Rejeita-Faixa

As ideias apresentadas anteriormente para o filtro PF em relação aos o cascateamento dos filtros PA e PB podem ser levadas em consideração para o filtro RF, salvo que, neste caso, a frequência de corte do PB deve ser inferior a do PA.



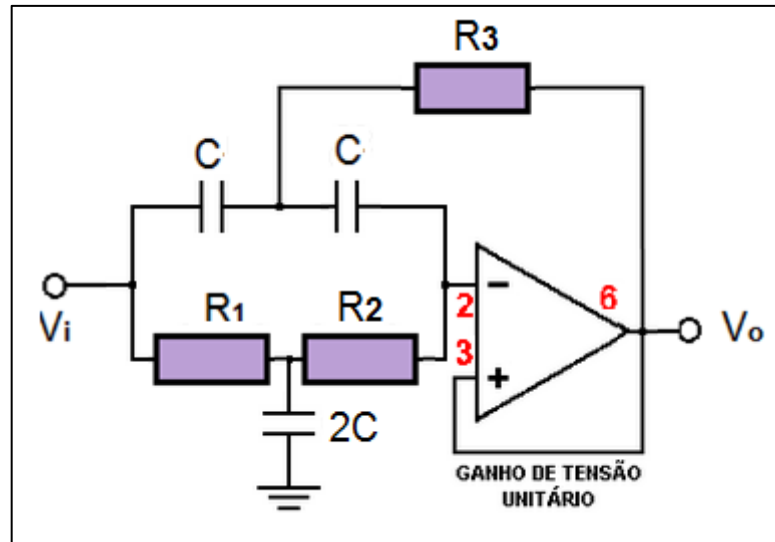


Figura 57 - Projeto de filtro ativo rejeita-faixa  
 FONTE: Adaptado de Boylestad (2014).

Como se pode observar na figura 58, este circuito só permite ganho unitário. O valor do fator de seletividade  $Q$  está diretamente relacionado aos valores dos componentes e não deve exceder ao valor de 10.

Os procedimentos para obter os valores de  $f_0$ ,  $BW$ ,  $Q$  e  $C$  de um filtro rejeita-faixa são iguais aos que foram usados para o filtro passa-faixa.

E as equações para determinar os valores dos resistores estão apresentadas a seguir:

$$R1 = \frac{1}{2Q\omega_0 C} \quad (90)$$

$$R2 = \frac{2Q}{\omega_0 C} \quad (91)$$

$$R3 = \frac{R1R2}{R1 + R2} \quad (91)$$

Um exemplo de resposta em frequência de ganho de tensão e fase são representadas pelas Figura 58 e Figura 59:

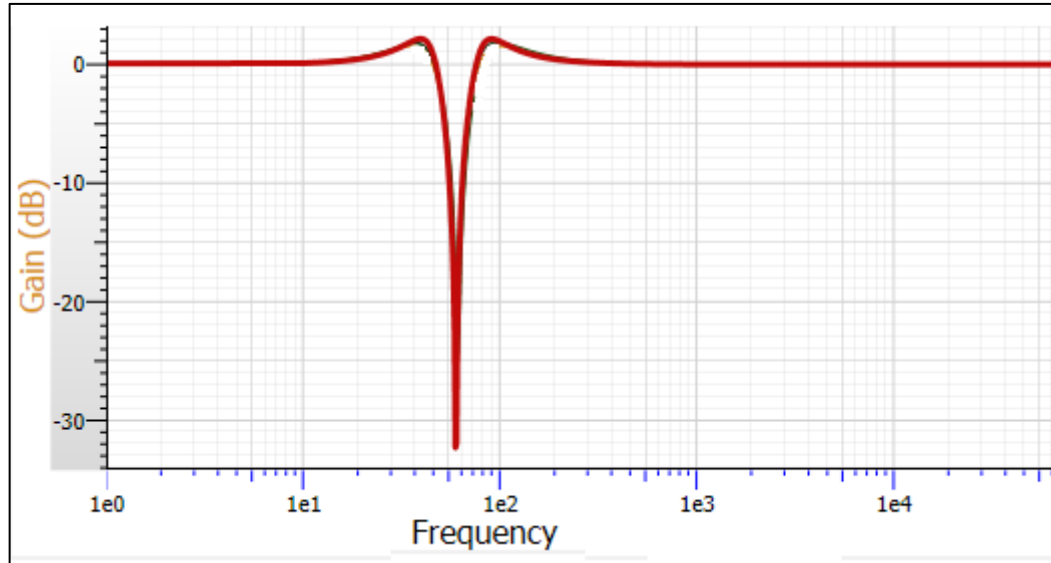


Figura 58 - Curva de resposta em frequência (Ganho de tensão) do filtro RF  
 FONTE: FilterPro (2014).

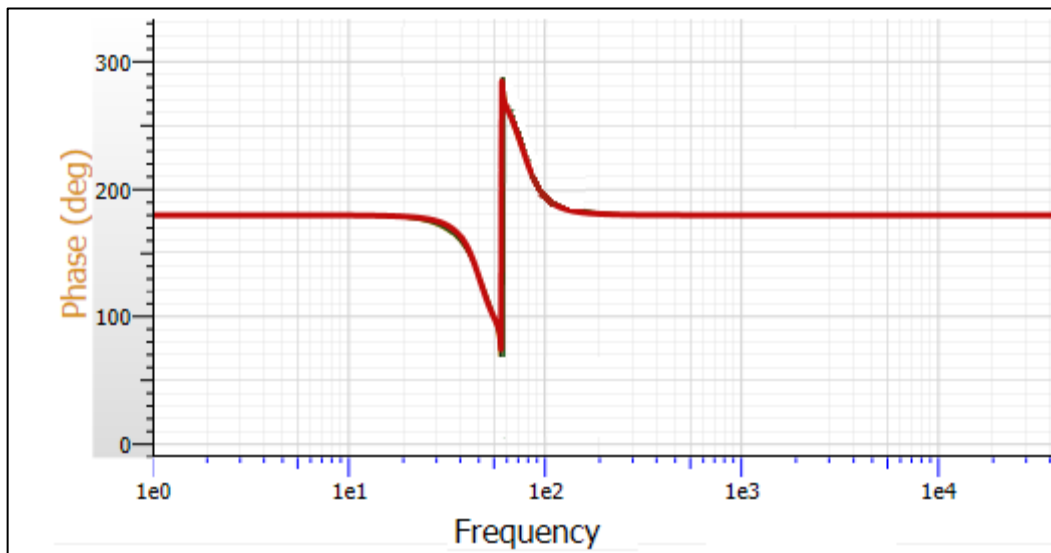


Figura 59 - Curva de resposta em frequência (fase) do filtro RF  
 FONTE: FilterPro (2014).

#### 2.6.4.4.1 Ordem maior que 2

As considerações para projetar um filtro RF de ordem maior que 2 são as mesmas descritas para os filtros PF. Os filtros rejeita-faixa apresentam ordem par e devem ser cascateados para formar um filtro RF de ordem maior.

### 3 DESENVOLVIMENTO

#### 3.1 DESENVOLVIMENTO GERAL

O trabalho desenvolvido foi composto por algumas etapas: estudo sobre filtros ativos e passivos, estudo sobre o periférico DDS, projetos de exemplos de filtros para serem colocados nas bancadas, desenvolvimento do gerador de sinais senoidais utilizando o Arduíno e o DDS, desenvolvimento da fonte de alimentação, testes dos filtros projetados, desenvolvimento do material de apoio, construção da bancada.

##### 3.1.1 Estudo sobre filtros ativos e passivos

O estudo sobre filtros foi necessário para dar uma base sólida para a progressão do desenvolvimento do projeto. Os livros bases utilizados foram:

- “Filtros e Linhas” – 2ª. Edição – Romano, Hélio Drago
- “Eletrônica” – 1ª. Edição – Millman, Jacob; Halkias, Christos C.
- “Amplificadores Operacionais e Filtros Ativos” – 2ª. Edição – Pertence Jr., Antônio
- “Microeletrônica” – 4ª. Edição – Sedra, Adel S.; Smith, Kenneth C.
- “Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos” – 8ª. Edição – Boylestad, Robert L.; Nashelsky, Louis.

##### 3.1.2 Gerador de Funções

O sinal de entrada utilizado para os filtros da bancada será gerado por um gerador de funções projetado neste trabalho. Para a implementação desse gerador, foram utilizados:

- Módulo DDS (AD9850)
- Arduíno Uno
- *Shield* LCD

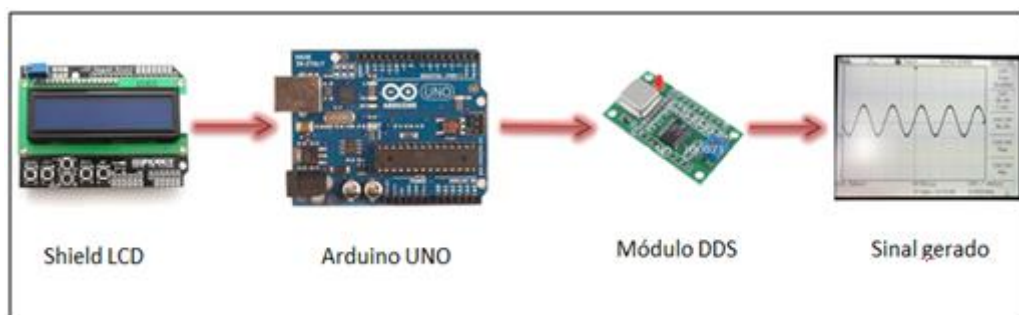


Figura 60 - Diagrama de blocos do gerador de funções.

FONTE: A autoria própria (2013).

A frequência do sinal é informada pelo usuário através do LCD, que se comunica com o Arduino. Este é responsável por converter o sinal analógico recebido pelo LCD em digital e o envia para o módulo DDS, que possui um conversor interno D/A de alta velocidade. Este conversor, por sua vez, se encarregará de transformar os dados digitais no sinal senoidal analógico com a frequência desejada.

### 3.1.2.1 Hardware

Como mencionado anteriormente, o *hardware* do gerador de função é composto de um módulo DDS, da placa Arduino Uno e um *Shield* LCD. Para fazer a ligação entre esses componentes, tanto o módulo DDS quanto o *Shield* LCD são conectados diretamente com o arduino. Como ambos utilizam pinos digitais do arduino e não havendo pinos suficientes, foi preciso utilizar alguns pinos analógicos como digitais. Essa conversão é feita no próprio código do *software*.

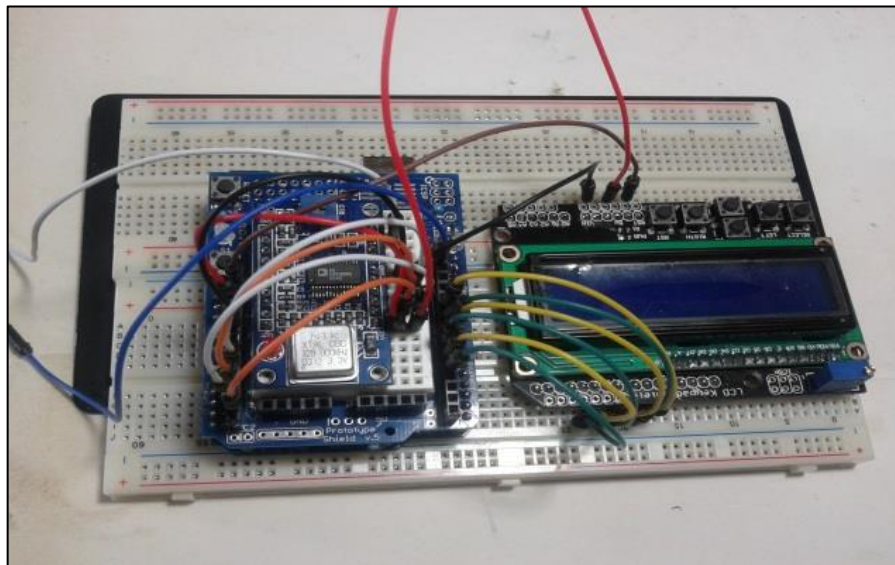


Figura 61 - Hardware do Gerador de Função  
FONTE: A autoria própria (2013).

A Figura 61 mostra o conjunto dos três dispositivos montado, formando a parte de *hardware* do gerador de função. O módulo DDS foi colocado no Proto *Shield*, um tipo de protoboard adaptado que serve para montar circuitos e que é encaixado em cima do arduino, a fim de facilitar a circuitaria. A Figura 62, a seguir, apresenta o esquemático do gerador de função.

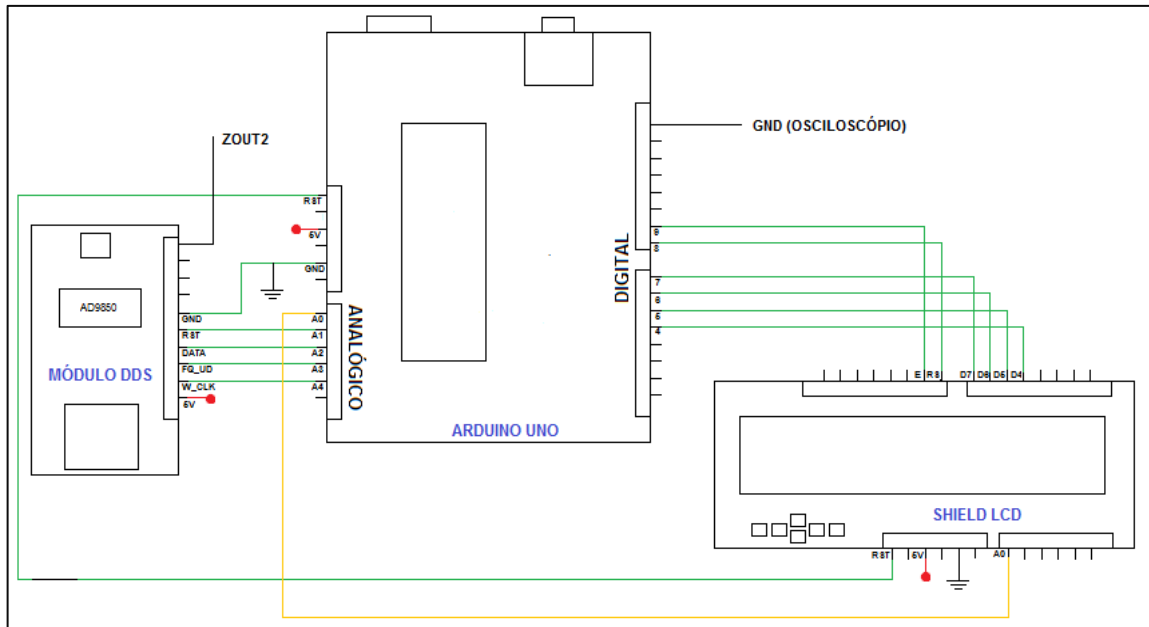


Figura 62 - Esquemático do Gerador de Função  
 FONTE: Autoria própria (2013).

### 3.1.2.1 Conexão entre LCD e Arduino

Para conectar o *shield* LCD com o arduino, são necessários sete pinos do arduino - sendo que 6 desses são digitais e um, analógico – além dos pinos de alimentação (+5V e GND) e do *Reset*. Os pinos digitais do arduino utilizados são 4, 5, 6, 7, 8 e 9, os quais são ligados com os pinos D4, D5, D6, D7, RS e E do *shield* LCD, respectivamente. E o pino analógico do arduino, usado para a leitura dos botões, é o A0

### 3.1.2.2 Conexão entre o DDS e o arduino

Os pinos do módulo DDS utilizados para conectá-lo ao arduino são *Reset*, *Data*, *FQ\_UD*, *W\_CLK* e os de alimentação (+5V e GND). Os quatro primeiros utilizam pinos digitais do arduino, porém por conta dos *shield* LCD - cujas conexão também são feitas por meio de pinos digitais - foram usados os pinos analógicos (A1, A2, A3 e A4), convertendo-os para digital. A saída do sinal senoidal analógico é detectado pelo pino 10 (ZOUT2) do DDS.

### 3.1.2.3 Funcionamento do Gerador de Função

A frequência desejada do sinal é informada pelo LCD e selecionada pelo usuário por meio dos botões do shield. O LCD foi programado de modo que seja possível selecionar o valor do módulo da frequência e a grandeza de sua unidade (Hz, kHz ou MHz). A faixa de frequências que se pode gerar é de 5 Hz até 2 MHz. Para facilitar a seleção da frequência, o seu valor foi dividido em casas de unidade, dezena, centena e decimal, e o usuário altera o valor por dígito (que compreende

entre 0 e 9). No código do *software* é feito o cálculo da composição dessas casas para formar o valor da frequência.

Os botões *LEFT* e *RIGHT* do *shield* servem para deslocar o cursor do *display* para a esquerda e direita, respectivamente. Os botões *UP* e *DOWN* têm a função de alterar, nesta ordem, para cima e para baixo o valor de cada dígito, podendo variar de 0 a 9, e a grandeza do Hertz, sendo possível escolher entre Hz, kHz e MHz.

É possível visualizar melhor toda essa configuração do *display* LCD observando a Figura 63:

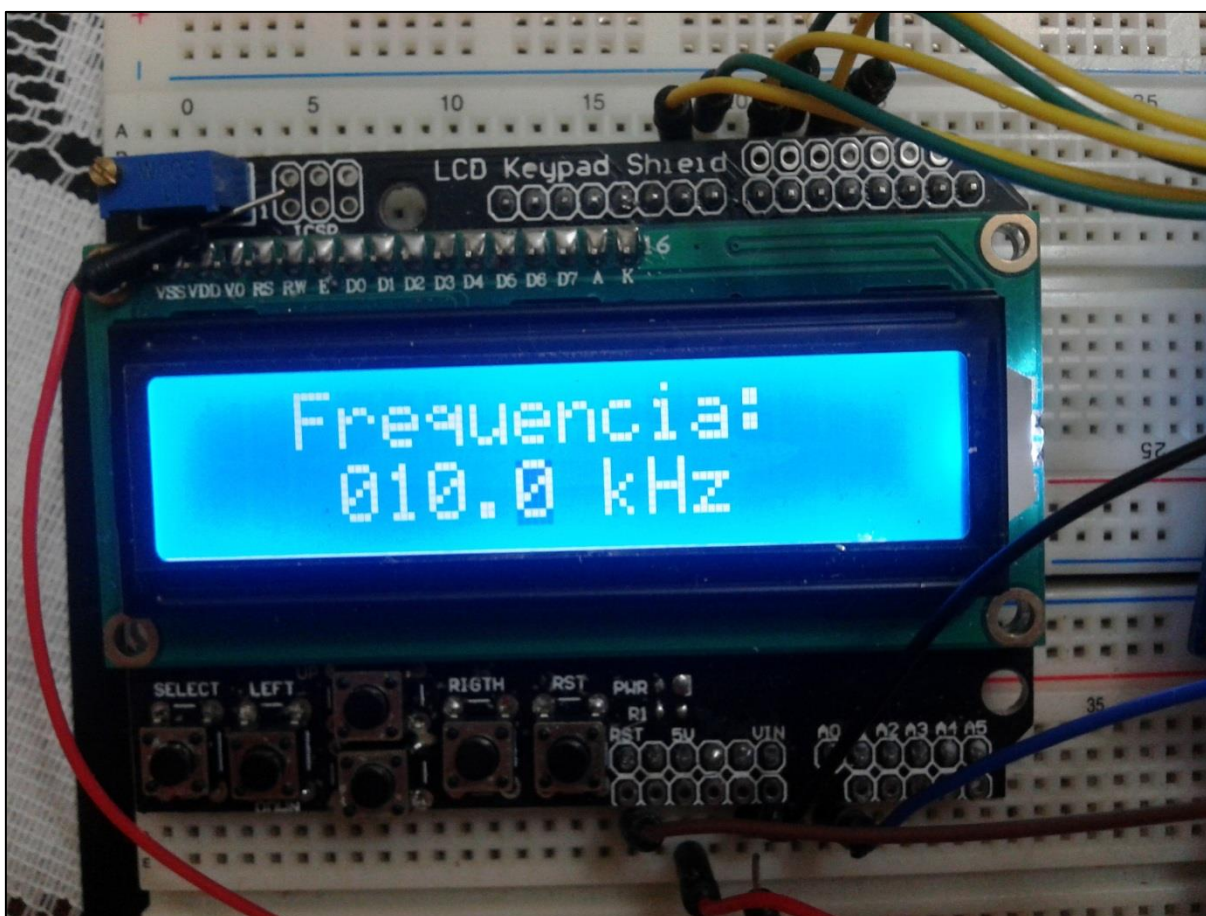


Figura 63 - Seleção via LCD do valor da frequência do sinal do gerador  
FONTE: Autoria própria (2014).

O código do *software*, escrito na linguagem C, se encarrega de fazer todos os cálculos do valor da frequência, e o arduino converte este valor em sinais digitais para serem transmitidos ao módulo DDS. Este é responsável por converter esses sinais digitais em uma onda senoidal analógica. Na Figura 64 mostra o gerador de função em funcionamento. No caso, o valor da frequência selecionada é 10 kHz, e a onda senoidal de saída é conferida através do osciloscópio.



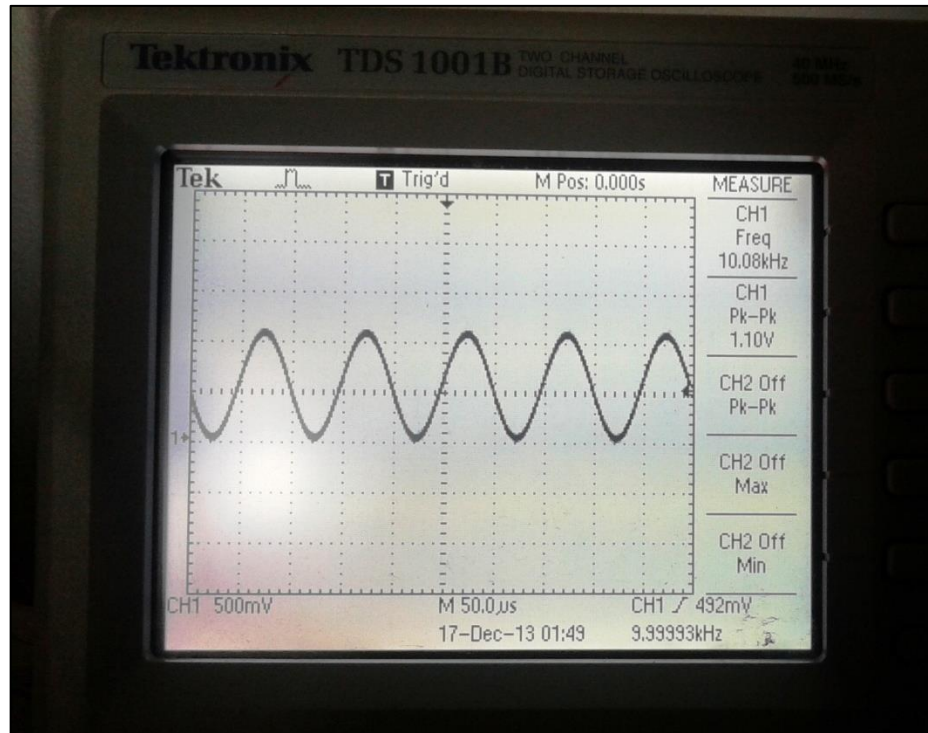


Figura 64 - Sinal de saída do gerador de função com frequência de 10 kHz  
FONTE: Autoria própria (2013).

### 3.1.2.2 Software

O programa do software foi desenvolvido na Linguagem C e compilado no sketch do Arduino. Nesta seção será explicado cada etapa do código para o funcionamento do gerador DDS.

### 3.1.2.2.1 Fluxograma

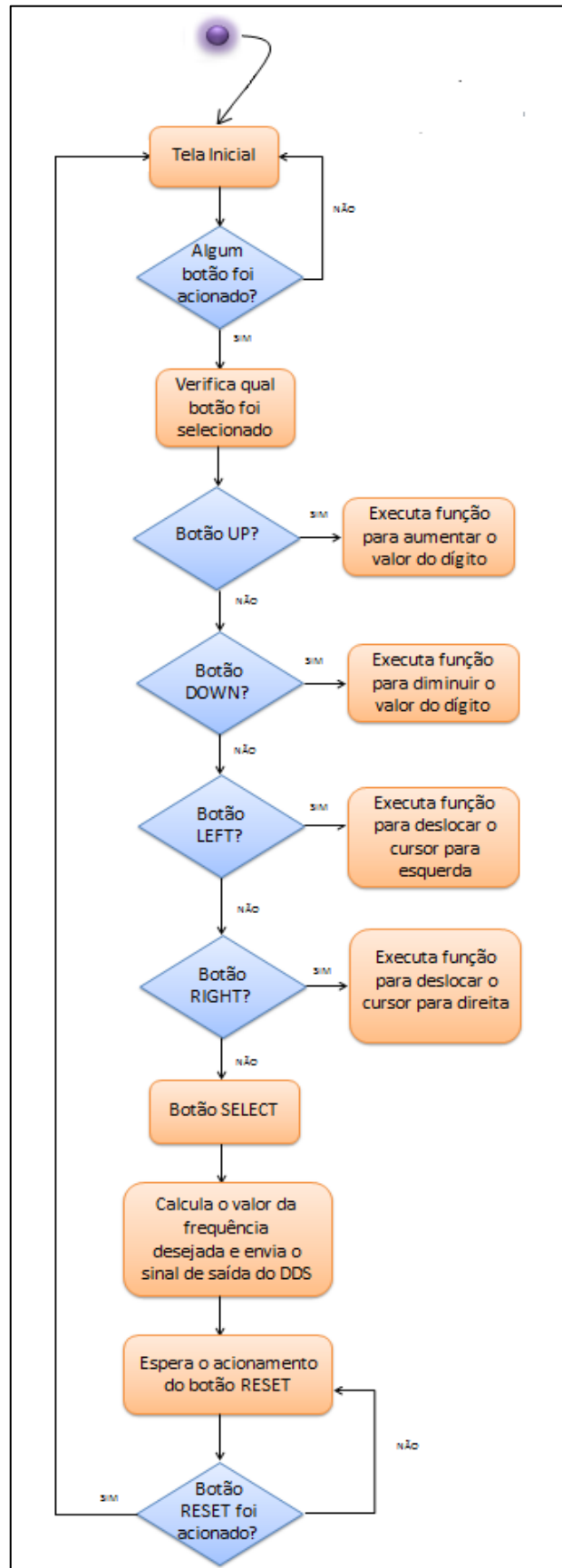


Figura 65 - Fluxograma do software do gerador de função  
 FONTE: Autoria própria (2014).



### 3.1.2.2 Principais Funções do software

O código apresenta algumas funções chaves para a geração de um sinal senoidal.

Como é possível observar no fluxograma, uma das primeiras atividades que programa faz é verificar se algum botão do LCD foi acionado. Assim que houver o acionamento de qualquer botão (exceto o botão Reset, que está conectado ao pino Reset da placa Arduino), a função executada é a da leitura do valor do pino analógico. Esta função tem o papel de identificar qual botão do LCD foi acionado, como pode-se verificar no código da Figura 66.

```
int read_LCD_buttons()
{
  adc_key_in = analogRead(0); // faz a leitura dos pinos analógicos.

  if (adc_key_in > 1000) return btnNONE;
  // os valores dos pinos são: 0, 144, 329, 504, 741
  if (adc_key_in < 50) return btnRIGHT;
  if (adc_key_in < 250) return btnUP;
  if (adc_key_in < 450) return btnDOWN;
  if (adc_key_in < 650) return btnLEFT;
  if (adc_key_in < 850) return btnSELECT;

  return btnNONE; // caso não retornar nenhuma das variáveis retorna esta.
}
```

Figura 66 - Função da leitura do valor no pino analógico.  
FONTE: Autoria própria (2014)

Assim que foi identificado o botão acionado, é chamada a função que executa o que o botão selecionado deve fazer. Isto está localizado na função loop() do código e é feito por meio de um *switch*, como está apresentado pela Figura 67 a seguir:

```

switch (lcd_key)
{
  case btnLEFT:          // botão p/ mover o cursor uma casa à esquerda
  {
    delay(500);          // espera 0,5s após a leitura do botão
    esquerda = anda_esquerda(posicao); // armazena na variável o valor da nova posição, depois de
                                     // ter deslocado uma posição à esquerda
    lcd.setCursor(esquerda, 1); // posiciona o cursor na nova posição à esquerda
    lcd.blink();          // função que faz o cursor piscar
    posicao = esquerda;
  }
  break;

  case btnRIGHT:         // botão p/ mover o cursor uma casa à direita
  {
    delay(500);          // espera 0,5s após a leitura do botão

    direita = anda_direita(posicao); // armazena na variável o valor da nova posição depois de ter
                                     // deslocado uma posição à direita
    lcd.setCursor(direita, 1); // posiciona o cursor na nova posição à direita
    lcd.blink();          // função que faz o cursor piscar
    posicao = direita;
  }
  break;

  case btnSELECT:
  {
    delay(500);          // espera 0,5s após a leitura do botão
    frequencia = determina_frequencia(centena, dezena, unidade, grandeza);
    selecionar(frequencia);
  }
  break;

  default:
  ;
}

```

Figura 67 - Código que chama a função de execução de cada botão  
 FONTE: Autoria própria (2014).

Finalmente, as principais funções são aquelas que são responsáveis por converter o sinal analógico em dados digitais que serão enviados para o AD9850 e estão representadas na Figura 68.

```

void tfr_byte(byte data) // transfere um byte, um bit por vez,
                        // para o AD9850, no modo serial
{
    for (int i=0; i<8; i++, data>>=1)
    {
        digitalWrite(DATA, data & 0x01);
        pulseHigh(W_CLK); // pulso de clock é acionado depois
                          // que cada bit é enviado
    }
}

void sendFrequency(double frequency)
{
    // frequência calculada do datasheet : freq = clk*palavra de sintonia/2^32

    int32_t freq = frequency * 4294967295/125000000; //clock do Ad9850: 125MHz
    for (int b=0; b<4; b++, freq>>=8)
    {
        tfr_byte(freq & 0xFF);
    }
    tfr_byte(0x000); //byte de final de controle (tudo zero p/ AD9850)
    pulseHigh(FQ_UD);
}

```

Figura 68 - Funções que convertem o sinal analógico para digital e o envia para o DDS  
 FONTE: Autoria própria (2014).

### 3.1.3 Fonte de Alimentação Simétrica

Foi necessário desenvolver uma fonte simétrica para alimentar os amplificadores operacionais que fazem parte dos filtros ativos, para que possa ser disponibilizada juntamente com a bancada e o gerador.

A fonte desenvolvida é do tipo analógica, por apresentar maior rendimento. Ele fornece uma tensão de  $\pm 12V$  para a alimentação dos AmpOps, e seu diagrama em blocos foi mostrado na Figura 9, na seção de fundamentação teórica.

As Figura 69 e Figura 70 mostram, respectivamente, o esquemático do projeto da fonte e o protótipo da fonte já finalizada.

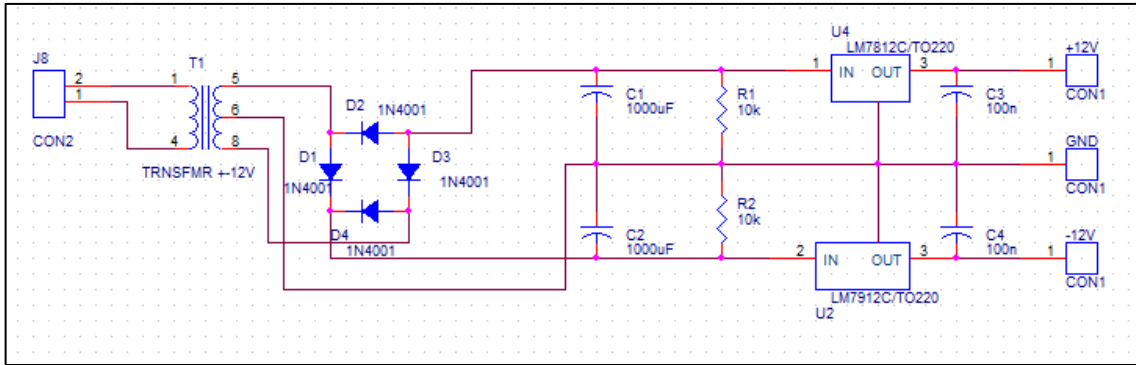


Figura 69 - Esquemático da fonte de alimentação simétrica  $\pm 12V$   
 FONTE: Adaptado de 'Eletrônica – Electronic Circuits and Service Manuals' (2014).

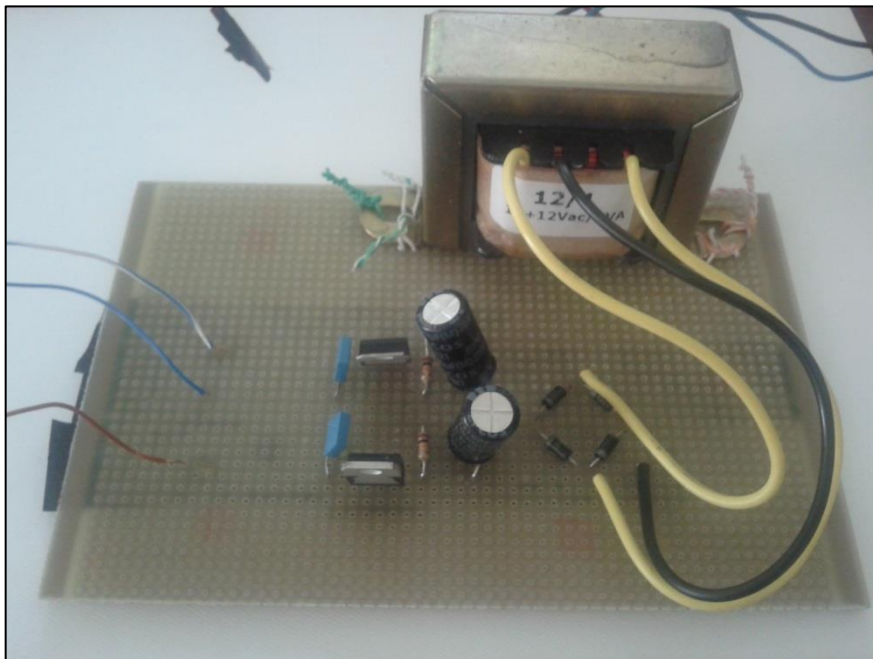


Figura 70 – Protótipo da fonte de alimentação simétrica  $\pm 12V$   
 FONTE: Autoria própria (2014).

### 3.1.4 Projetos dos filtros

Após a fundamentação teórica sobre o funcionamento dos filtros passivos e ativos, fez-se necessário projetar filtros para servirem de exemplo prático na bancada didática.

Para os filtros passivos, primeiro foi verificado os valores de indutores disponíveis no mercado, visto que a faixa de valores não é muito diversificada. Os valores encontrados foram:

- $1\mu H$
- $3,3\mu H$
- $4,7\mu H$
- $10\mu H$

- 33 $\mu$ H
- 47 $\mu$ H
- 56 $\mu$ H
- 100 $\mu$ H
- 220 $\mu$ H
- 330 $\mu$ H
- 470 $\mu$ H
- 560 $\mu$ H
- 1mH

Os de capacitores e resistores foram calculados em cima dos valores de indutores, já que esses apresentam uma maior variedade disponível comercialmente.

O primeiro passo para os cálculos, foi estipular um valor de frequência de corte. Sabe-se que os filtros passivos, que contém indutores, trabalham melhor em frequências mais altas (PERTENCE,2007, p. 166). Portanto para os circuitos do tipo RL ou RLC, foram utilizadas frequências de corte de no mínimo 100kHz.

Com o valor de frequência de corte desejado, foram feitos cálculos, utilizando as equações demonstradas na parte de fundamentação teórica deste documento, para a definição de valores de componentes.

Após a projeto, foi feita a montagem do circuito numa bancada de testes, e o sinal do gerador de funções foi aplicado na entrada desses. O sinal foi variado de uma década abaixo da frequência de corte até uma década acima dele, estes valores foram colocados em uma tabela do excel, foram mensurados os valores de tensão pico-a-pico de entrada e saída, e o cálculo do ganho era realizado utilizando a fórmula:

$$\frac{V_o}{V_i} = Av \quad (92)$$

Com o valor do ganho, foi possível transformar este valor em decibels, utilizando a fórmula:

$$Av (dB) = 20 \cdot \log(Av) \quad (93)$$

Com os valores de frequência e do ganho em decibels, foi possível traçar a curva de resposta em frequência para cada circuito. Esta curva é necessária para fazer a comparação com a curva real esperada e assim verificar o funcionamento do filtro.

A tabela, como a mostrada na Tabela , foi uma das utilizadas para fazer os procedimentos demonstrados.

Tabela 3 - Dados coletados do filtro passa-alta RL

fc = 105kHz / R = 660 Ω / L = 1mH				
f [Hz]	Vin [V]	Vout[V]	Av	Av [dB]
10k	8,91E-02	1,09E-02	0,122334	-18,249
15k	8,91E-02	1,25E-02	0,140292	-17,0594
20k	8,91E-02	1,72E-02	0,193042	-14,287
25k	8,91E-02	2,03E-02	0,227834	-12,8476
30k	8,91E-02	2,50E-02	0,280584	-11,0388
35k	9,06E-02	2,97E-02	0,327815	-9,68743
40k	9,06E-02	3,28E-02	0,362031	-8,82509
45k	9,06E-02	3,59E-02	0,396247	-8,04067
50k	9,06E-02	3,91E-02	0,431567	-7,29903
55k	9,22E-02	4,22E-02	0,457701	-6,78837
60k	9,22E-02	4,53E-02	0,491323	-6,17265
65k	9,22E-02	4,88E-02	0,529284	-5,52622
70k	9,22E-02	5,16E-02	0,559653	-5,04162
75k	9,22E-02	5,47E-02	0,593275	-4,53487
80k	9,22E-02	5,63E-02	0,610629	-4,28445
85k	9,22E-02	5,78E-02	0,626898	-4,05606
90k	9,38E-02	6,09E-02	0,649254	-3,75171
95k	9,38E-02	6,25E-02	0,666311	-3,52646
100k	9,38E-02	6,56E-02	0,69936	-3,10598
101k	9,38E-02	6,56E-02	0,69936	-3,10598
102k	9,38E-02	6,56E-02	0,69936	-3,10598
103k	9,38E-02	6,56E-02	0,69936	-3,10598
104k	9,38E-02	6,56E-02	0,69936	-3,10598
105k	9,38E-02	6,56E-02	0,69936	-3,10598
105,5k	9,38E-02	6,56E-02	0,69936	-3,10598
110k	9,53E-02	6,88E-02	0,721931	-2,83009
115k	9,53E-02	6,88E-02	0,721931	-2,83009
120k	9,53E-02	7,03E-02	0,737671	-2,64275
125k	9,53E-02	7,19E-02	0,75446	-2,44728
130k	9,53E-02	7,34E-02	0,770199	-2,26794
135k	9,53E-02	7,50E-02	0,786988	-2,08063
140k	9,53E-02	7,66E-02	0,803778	-1,89728
145k	9,53E-02	7,81E-02	0,819517	-1,72884
150k	9,53E-02	7,81E-02	0,819517	-1,72884
200k	9,69E-02	8,75E-02	0,902993	-0,88631
250k	1,00E-01	9,22E-02	0,922	-0,70538
300k	1,00E-01	9,53E-02	0,953	-0,41814
350k	1,01E-01	9,69E-02	0,959406	-0,35995
400k	1,07E-01	1,03E-01	0,959813	-0,35627
450k	1,07E-01	1,03E-01	0,960748	-0,34781
500k	1,07E-01	1,03E-01	0,960748	-0,34781
550k	1,07E-01	1,03E-01	0,962617	-0,33093

600k	1,07E-01	1,04E-01	0,971963	-0,24701
650k	1,07E-01	1,04E-01	0,971963	-0,24701
700k	1,07E-01	1,06E-01	0,990654	-0,08156
750k	1,07E-01	1,06E-01	0,990654	-0,08156
800k	1,07E-01	1,06E-01	0,990654	-0,08156
850k	1,07E-01	1,06E-01	0,990654	-0,08156
900k	1,07E-01	1,06E-01	0,990654	-0,08156
1M	1,07E-01	1,07E-01	1	0

FONTE: Autoria própria (2014)

Após o levantamento de dados e inserção em uma tabela, como mostrada na Tabela , a curva de resposta em frequência foi traçada utilizando os valores de frequência e do ganho em decibels, como mostrado na Figura 71.

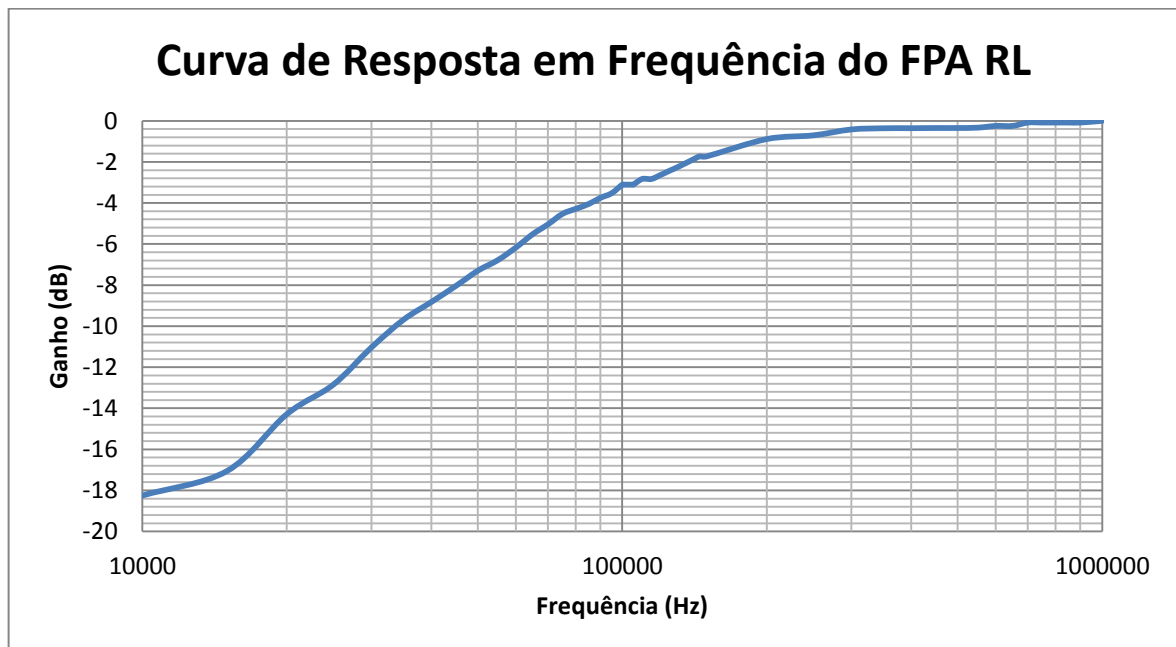


Figura 71 - Curva de resposta em frequência do filtro passa-alta RL  
FONTE: Autoria própria (2014)

Com a curva da Figura 71, foi, primeiramente, feita uma comparação visual com a curva real esperada para este circuito, mostrada na Figura 72.

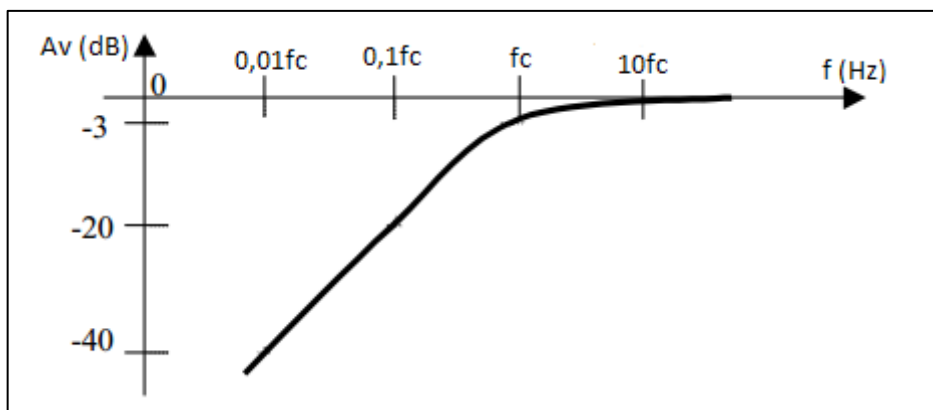


Figura 72 - Resposta em frequência do filtro passa-alta RL - curva real esperada  
 FONTE: Autoria própria (2014)

Após a comparação visual, que pode-se comprovar que a curva gerada estava de acordo com a curva esperada, foi feita a análise numérica. Nesta análise, foi possível atestar que o filtro projetado funciona de acordo com o esperado, visto que na frequência de corte (105kHz) o ganho é de -3,1dB, na frequência uma década abaixo (10kHz), o ganho é de -18,3dB, e na frequência uma década acima da frequência de corte (1MHz), o ganho é de 0 dB (PERTENCE, 2007, p.170).

Para os filtros ativos, para todos os filtros testados foi feito uma planilha contendo os valores de todos os parâmetros necessários. A primeira etapa para determinar os valores de tais parâmetros foi estabelecer o valor da frequência de corte (ou frequência central, no caso do filtro rejeita-faixa) e do ganho desejado (no caso do filtro RF, o ganho é unitário, como já visto na seção da fundamentação teórica). Em seguida, tendo o valor da frequência de corte, calculou-se o capacitor, cujo valor obedece à regra  $C = \frac{10}{f_c} (\mu F)$  (PERTENCE, 1988, p. 216).

Por fim, foi possível determinar os valores dos resistores e de outros parâmetros necessários, seguindo a teoria apresentada anteriormente.

Cada filtro tem suas particularidades, portanto os valores estabelecidos para as frequências de corte e para o ganho variam muito de acordo com o tipo de filtro em questão. Por exemplo, para o filtro ativo passa-baixa e passa-alta de primeira ordem foi possível projetar filtro de ganhos de até 26 dB. Em contrapartida, o circuito do filtro ativo rejeita-faixa com configuração VCVS só possibilita ganho unitário, ou seja, 0 dB. No geral, os ganhos variam de 0 dB a 26 dB, e as frequências de corte, de 100 Hz a 10 kHz.

Determinados todos os parâmetros necessários para a construção dos filtros, o próximo passo foi montar um protótipo e testar.

Para o teste prático, o procedimento foi semelhante ao dos filtros passivos: o circuito recebia do gerador DDS o sinal de entrada e as medições eram feitas variando a frequência do sinal de entrada até uma década acima ou abaixo da



frequência de corte. Isto porque o ganho (de um filtro de primeira ordem) demora uma década para cair em  $-20$  dB (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2004, p.487).

Para analisar o ganho, foi medida a tensão pico-a-pico na entrada e na saída dos filtros. Por meio da equação,

$$Av = \frac{v_o}{v_i}, \quad (94)$$

foi possível calcular o valor do ganho.

Para converter esse valor para o nível em dB, foi utilizada a equação

$$Av \text{ (dB)} = 20 \log(Av) \quad (95)$$

A Tabela 4 e a Figura 73 mostram um exemplo desse experimento. No caso é um filtro rejeita-faixa, de dois estágios, com frequência central igual a 60 Hz.

Tabela 4 - Dados coletados do filtro rejeita-faixa de 4ª. Ordem

Av = 1 / fo = 60 Hz				
f (Hz)	Vin	Vo	Av	Av (dB)
5	0,088	0,128	1,454545	3,254546
10	0,168	0,24	1,428571	3,098039
20	0,32	0,4	1,25	1,9382
30	0,448	0,6	1,339286	2,537465
35	0,512	0,72	1,40625	2,961251
40	0,608	0,8	1,315789	2,383728
41	0,64	0,8	1,25	1,9382
42	0,68	0,84	1,235294	1,835407
43	0,7	0,84	1,2	1,583625
44	0,72	0,84	1,166667	1,338936
45	0,76	0,8	1,052632	0,445528
46	0,8	0,76	0,95	-0,44553
47	0,82	0,72	0,878049	-1,12963
48	0,84	0,68	0,809524	-1,83541
49	0,84	0,64	0,761905	-2,36199
50	0,84	0,58	0,690476	-3,21703
60	0,84	0,2	0,238095	-12,465
70	0,8	0,4	0,5	-6,0206
73	0,78	0,48	0,615385	-4,21707
74	0,78	0,5	0,641026	-3,86249
75	0,78	0,56	0,717949	-2,87813
76	0,76	0,6	0,789474	-2,05325
77	0,76	0,64	0,842105	-1,49267

78	0,76	0,66	0,868421	-1,22539
79	0,76	0,7	0,921053	-0,71431
80	0,76	0,7	0,921053	-0,71431
85	0,76	0,86	1,131579	1,073697
90	0,76	0,94	1,236842	1,846285
100	0,8	1,04	1,3	2,278867
150	0,92	1,08	1,173913	1,392719
200	0,96	1,06	1,104167	0,860693
300	1	1,04	1,04	0,340667
400	1	1,04	1,04	0,340667
500	1	1,04	1,04	0,340667
1000	1	1,04	1,04	0,340667

FONTE: Autoria própria (2014).

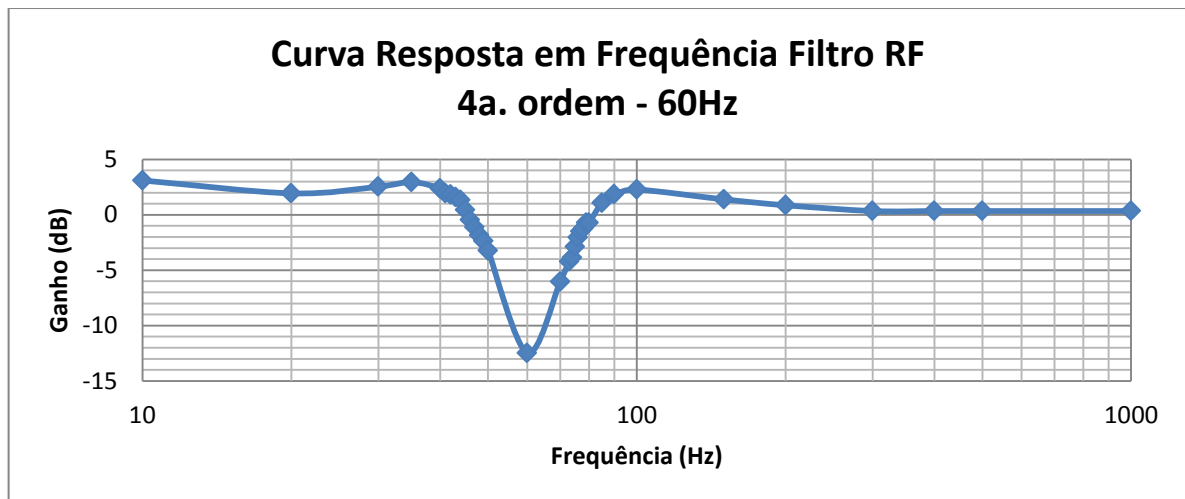


Figura 73 - Curva de resposta em frequência de um circuito RF de 60Hz e 2 estágios  
FONTE: Autoria própria (2014).

Pelo gráfico, é nítido que o filtro ameniza o sinal em 60 Hz. Para a análise dos resultados dos filtros de ordem maior, recorreu-se ao auxílio de um aplicativo de simulação de filtros ativos, FilterPro, da Texas Instruments

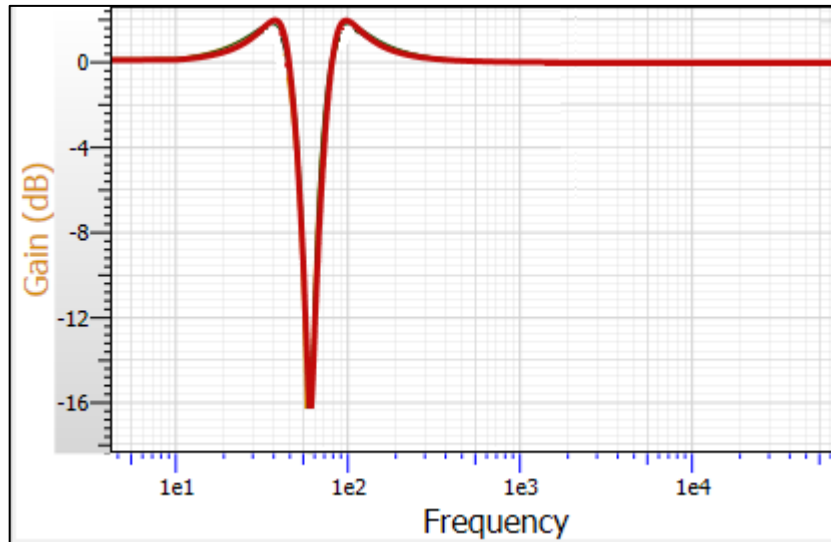


Figura 74 - Curva de resposta em frequência de um circuito RF de 60Hz e 2 estágios  
 FONTE: Filter Pro (2014).

Analisando o gráfico da simulação, o filtro apresenta uma queda de 16dB. Considerando que a queda do ganho do filtro projetado em relação ao ganho da frequência em que já se encontra estabilizado (a partir de 300 Hz) corresponde a 12,7 dB, tem-se:

$$\frac{\Delta A_{vsim} - \Delta A_{vproj}}{\Delta A_{vsim}} = E ,$$

Onde E = taxa de erro

$\Delta A_{vsim}$  = variação do ganho do filtro simulado

$\Delta A_{vproj}$  = variação do ganho do filtro projetado

Calculando,

$$E = \frac{16 - 12,7}{16} = \frac{3,3}{16} = 0,206$$

Portanto, o filtro projetado rejeita o sinal de 60 Hz, com uma taxa de erro de 20,6%.

### 3.1.5 Bancada

Após o projeto dos filtros, foi feito o dimensionamento deles. Foi concluído que para os filtros ativos seriam necessárias placas de circuito impresso para a implementação da bancada e para os filtros passivos seriam utilizados terminais conectores kre de 2 vias, mostrado na Figura 75, e bornes banana, uma vez que estes filtros só utilizam resistores, capacitores e indutores.



Figura 75 – Conector kre 2 vias  
FONTE: TiggerCOMP (2014)

Feito o desenvolvimento das placas de circuito impresso e a projeção dos filtros passivos, foi concluído que o tamanho ideal para a bancada seria de 40cm x 80 cm. O protótipo da bancada possui um apoio de metal para que essa fique em um ângulo inclinado, possibilitando uma melhor visualização dos circuitos.

### 3.1.6 Placa desenvolvida para filtros ativos

Como já mencionado no item anterior, para cada circuito de filtro ativo projetado para ser implementado na bancada será confeccionada uma placa de circuito impresso. No total serão nove PCIs, sendo todas de face simples. As dimensões variam: seis medem 10cm x 10cm, três medem 10cm x 20cm e uma, 10cm x 30cm.

Para projetar o esquemático e fazer o layout da placa foram utilizados, respectivamente, o Orcad Capture e o Altium Designer, os quais serão posteriormente descritos.

Na Figura 76, é mostrado o protótipo, gerado pelo próprio programa Altium, de uma das placas. No caso, trata-se de um circuito que pode funcionar tanto como filtro passa-baixa quanto como filtro passa-alta, ambos de primeira ordem. Como foi visto na seção de fundamentação teórica, a única diferença entre esses dois filtros é que no filtro passa-baixa, o capacitor C1 é ligado ao terra e o resistor R1 recebe o sinal de entrada, enquanto que no passa-alta, essa situação se inverte. Por isso, foi possível projetar esses dois filtros em um mesmo circuito, de modo que permita ao usuário conectar tanto o resistor R1 como o capacitor C1 no GND ou sinal de entrada, de acordo com o tipo de filtro que ele pretende implementar. Assim, otimiza espaço, barateando o custo.

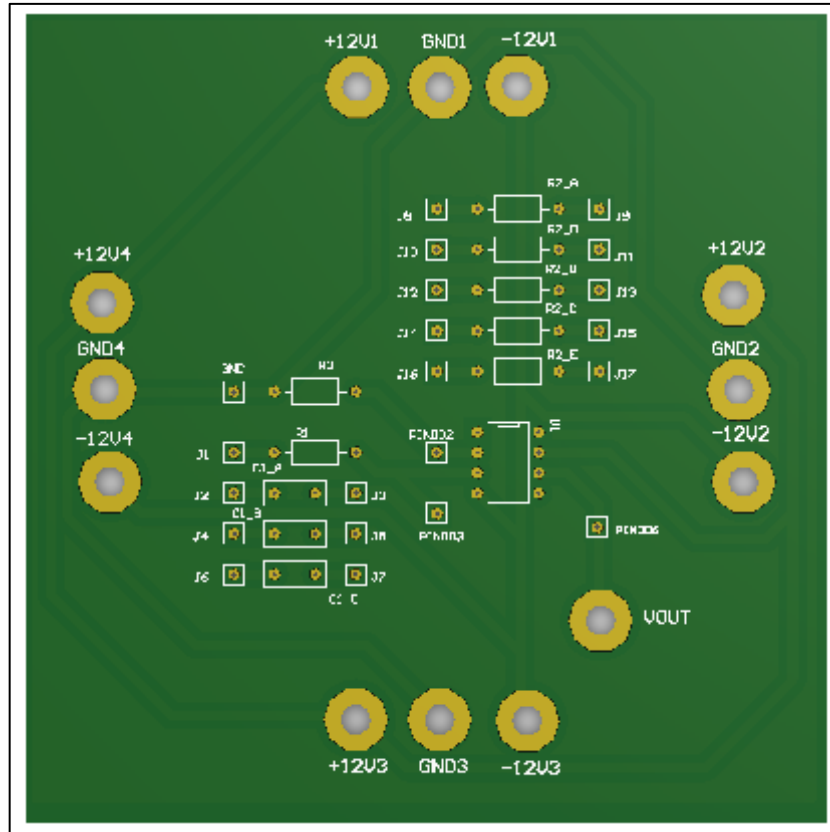


Figura 76 – Protótipo da placa do filtro ativo PB e PA de 1ª. ordem  
 FONTE: Altium Designer (2014).

Pode-se observar na figura 76 que há conectores (são do tipo Borne REF-B07) de alimentação em todos os lados da placa. Foi assim projetado para que se permita alimentar alguma placa que não esteja tão perto da fonte de forma mais organizada (como está representada na Figura 77), evitando que haja passagens de fios por cima dos circuitos. A figura a seguir mostra uma representação da visão superior da parte de filtros ativos da bancada, na qual o filtro 3 recebe alimentação por intermédio dos filtros 4 e 5. O conector do sinal de saída Vout também é do tipo Borne REF-B07, e a entrada Vin é um pino de barramento do tipo fêmea. As conexões entre os componentes serão feitas pelo usuário por meio de jumpers para protoboard do tipo macho.



Figura 77 – Alimentação do filtro 3 por intermédio de outras placas.  
Fonte: Autoria própria (2004).

### 3.1.7 Software utilizado para desenvolver as placas PCB

Para a confecção de placas de circuito impresso, antes de enviar os arquivos necessários ao fabricante, é preciso passar por duas etapas. A primeira consiste basicamente em projetar o esquemático de cada circuito e a segunda, em projetar a PCB (*Printed Circuit Board* ou placa de circuito impresso), estabelecendo suas características – como por exemplo, as dimensões da placa, quantidade de layers e tamanho das trilhas – e rotear o circuito, além de planejar o layout da placa, determinando a posição de cada componente.

Existe uma variedade de *softwares* que se pode usar para essas finalidades e, para cada etapa citada anteriormente, é utilizado um programa diferente. Mas geralmente esses dois *softwares* são fornecidos juntos em um mesmo pacote, pelo mesmo fabricante.

Para projetar o esquemático, foi utilizado o programa Orcad Capture, de autoria da Cadence Design Systems. Este programa permite construir o esquemático do circuito, gerar a lista de conexões (*netlist*), realizar a simulação, entre outras atividades. Na Figura 78 consta o esquemático do circuito dos filtros passa-baixa e passa-alta de primeira ordem.

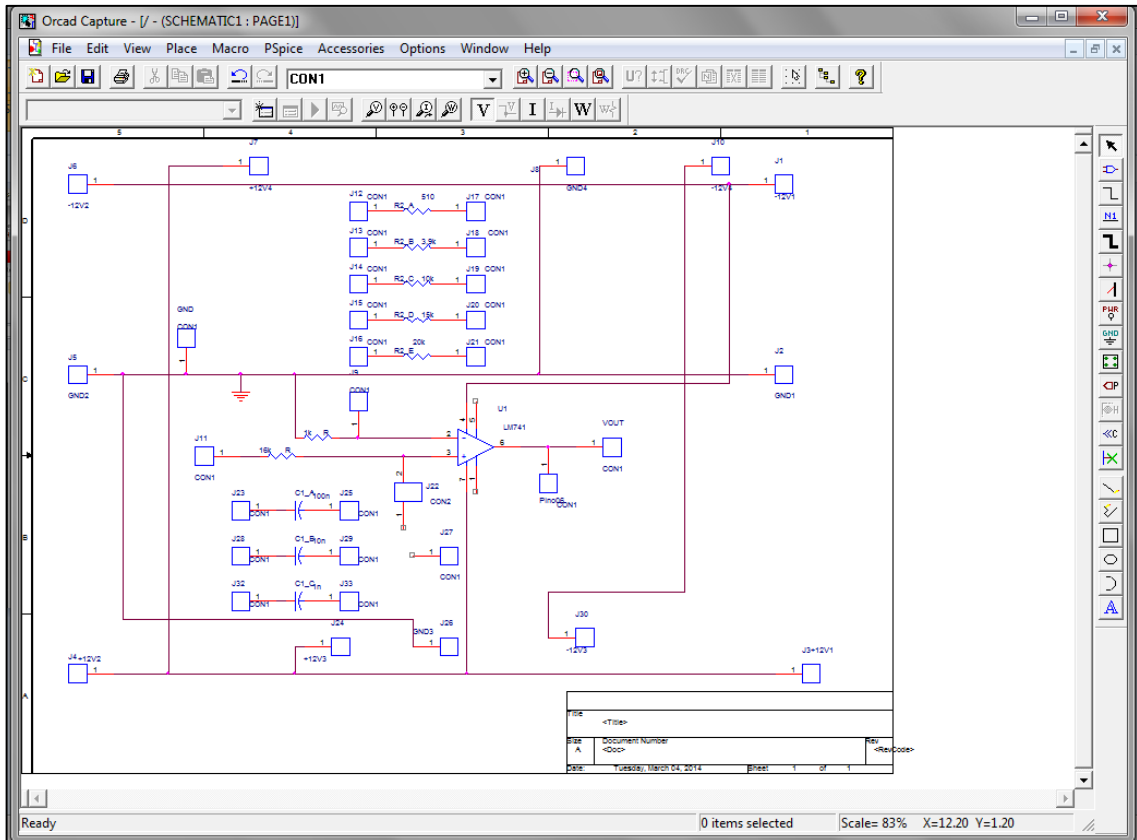


Figura 78 – Esquemático de um dos circuitos feito no programa Orcad Capture  
Fonte: Autoria própria (2014).

Finalizada esta etapa, o próximo passo é transformar esse esquemático em uma PCB. O layout das primeiras placas foi feito no Orcad Layout, do mesmo fabricante do Orcad Capture. No entanto, notou-se que ele apresenta algumas limitações. Por exemplo, para mandar para a confecção, foi solicitado pelo fabricante de PCB que as placas com dimensões 10 cm x 10 cm fossem agrupados em um mesmo layout. O Layout Orcad não apresenta essa opção de importar de forma prática e rápida um layout pronto para ser agrupado com outro.

Assim, perante esse impasse, foi decidido optar construir as PCBs com o programa Altium Design, fabricado pela Altium Limited. Este *software* permite importar tanto os arquivos das PCBs bem como dos esquemáticos feitos em outros programas similares. Dessa forma, foi possível aproveitar os esquemáticos projetados no Orcad Capture e construir seus respectivos layouts utilizando o Altium Designer. A seguir, a Figura 79 apresenta o layout do esquemático da Figura 78, projetado com esse *software*.

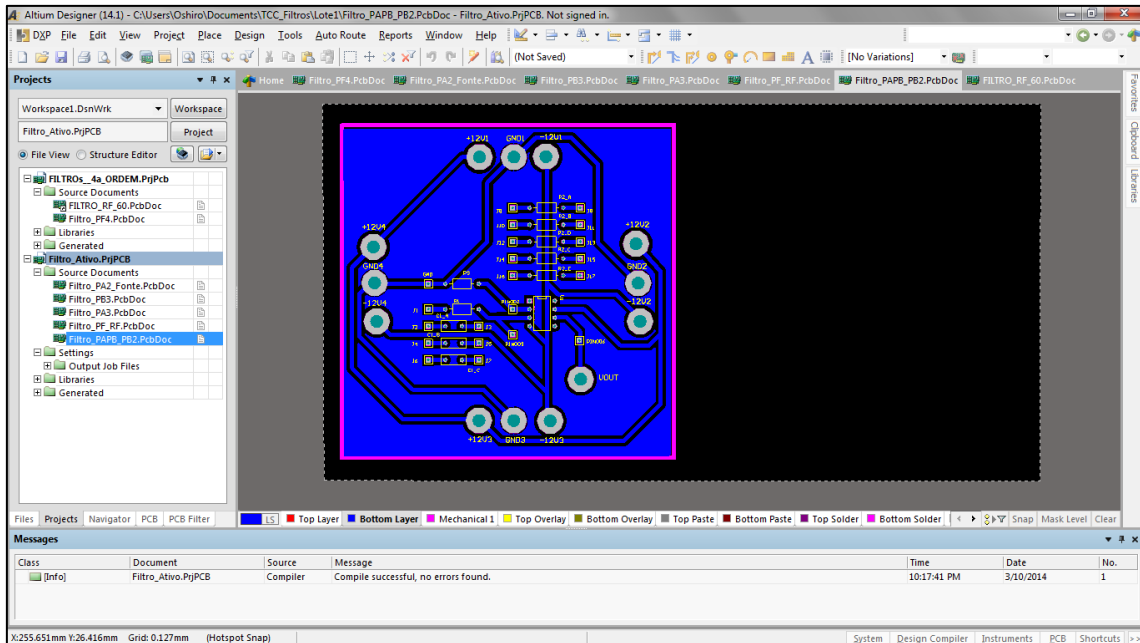


Figura 79 – Layout da PCB dos filtros passa-baixa e passa-alta feitos no altium Designer  
Fonte: Autoria própria (2014).

### 3.1.8 Material de apoio

Para este projeto, foi proposto o desenvolvimento de um material de apoio teórico. Este material apresenta as explicações de cada tipo de filtro apresentado na bancada didática, além da explicação do funcionamento desta.

Primeiramente os filtro foram divididos entre passivos e ativos. Dentro dos filtros passivos, os filtros foram subdivididos em:

- Filtro Passa-Baixa;
- Filtro Passa-Alta;
- Filtro Passa-Faixa;
- Filtro Rejeita-Faixa.

Os filtros passa-baixa e passa-alta foram subdivididos entre:

- Filtros RC;
- Filtros RL.

E os filtros passa-faixa e rejeita-faixa foram subdivididos em:

- Filtros Passa/Rejeita-faixa série
- Filtros Passa/Rejeita-faixa paralelo
- Filtros Passa/Rejeita-faixa RC.

Dentro de cada subdivisão apresentada, foram explicados os funcionamentos, demonstrados os cálculos de frequência de corte, do ganho, de fase, de fator de qualidade e largura de banda (aplicado somente a filtros passa-faixa e filtros rejeita-



faixa), foram mostradas as curvas características dos circuitos e também um exemplo prático explicado passo-a-passo para cada um.

A parte dos filtros ativos abrange os tipos de filtros classificados de acordo com a função resposta (aproximação) e com a função executada.

No item sobre a função de resposta, os principais tipos de filtros abordados são:

- Filtros de Butterworth
- Filtros de Chebyshev

Em relação à função executada, o item é subdividido em:

- Filtros Passa-Baixa
- Filtros Passa-Alta
- Filtros Passa-Faixa
- Filtros Rejeita-Faixa

Da mesma forma que na parte de filtros passivos, sobre os ativos é apresentada toda explanação teórica contendo cálculos e curvas de respostas. Os projetos práticos encontram-se ao final da explicação de cada tipo de filtro da seção que trata sobre a função executada. Nesta parte prática é explicada o funcionamento do circuito na bancada e haverá exemplo de projetos acompanhado com um roteiro passo-a-passo.

## **4 TESTES E ANÁLISES**

### **4.1 TESTES E ANÁLISES DO GERADOR DE FUNÇÃO**

Os testes do gerador de função foram realizados no dia 17/12/2013 e foi verificado que o gerador DDS projetado permite gerar sinal senoidal com frequências na faixa de 5Hz a 2 MHz.

A instrumentação básica foi composta por:

- Osciloscópio digital, Figura 76.

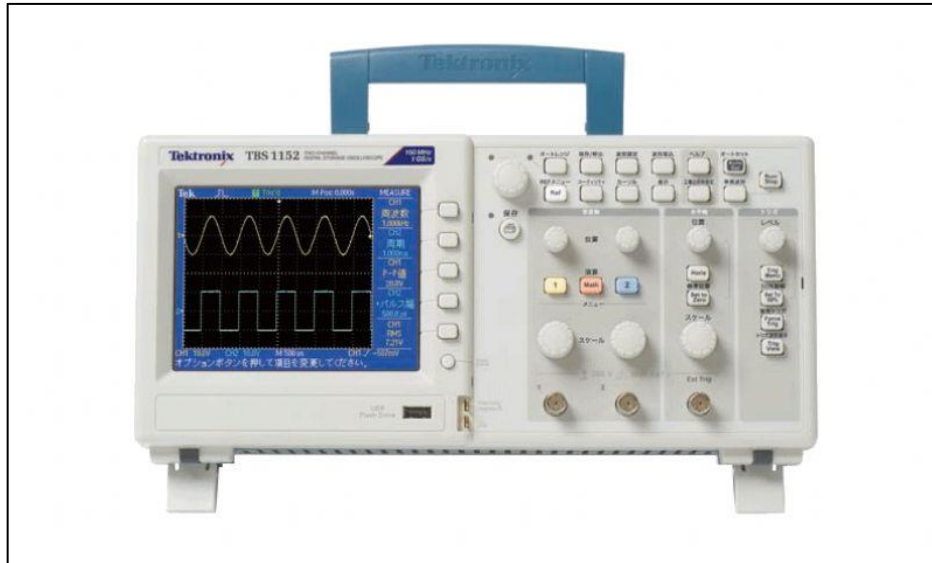


Figura 76 – Osciloscópio  
 FONTE: TEKTRONIX (2014)

## 4.2 TESTES E ANÁLISES DOS FILTROS PASSIVOS

Para os filtros passivos foram desenvolvidos 9 circuitos, sendo eles:

1. Filtro Passa-Baixa RL
2. Filtros Passa-Baixa RC
3. Filtro Passa-Alta RL
4. Filtro Passa-Alta RC
5. Filtro Passa-Faixa RLC série
6. Filtro Passa-Faixa RLC paralelo
7. Filtro Rejeita-Faixa RLC série
8. Filtro Rejeita-Faixa RLC paralelo
9. Filtro Rejeita-Faixa duplo T

### 4.2.1 Filtro Passa-Baixa RL

O filtro projetado é mostrado na Figura 77.

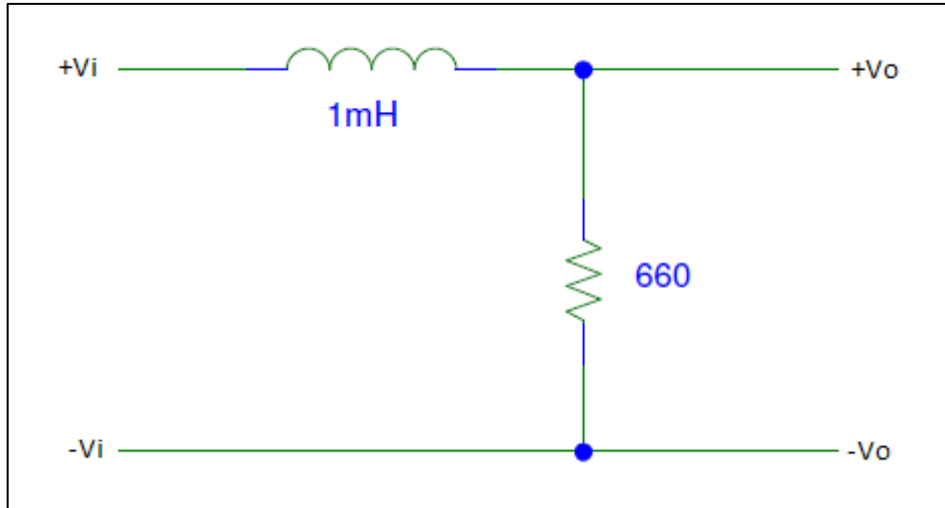


Figura 77 - Filtro passa-baixa RL  
 FONTE: Autoria própria (2014)

A frequência de corte é de 105kHz.

Os dados obtidos para o filtro Passa-Baixa RL estão disponíveis na Tabela 5.

Tabela 5 - Dados filtro passa-baixa RL

fc=105kHz / R=660Ω / L=1mH				
f	Vin	Vout	Av	Av(dB)
10k	8,91E-02	8,75E-02	0,982043	-0,15739
15k	9,06E-02	8,75E-02	0,965784	-0,3024
20k	9,06E-02	8,75E-02	0,965784	-0,3024
25k	9,06E-02	8,59E-02	0,948124	-0,4627
30k	9,06E-02	8,59E-02	0,948124	-0,4627
35k	9,06E-02	8,44E-02	0,931567	-0,61572
40k	9,06E-02	8,44E-02	0,931567	-0,61572
45k	9,06E-02	8,28E-02	0,913907	-0,78196
50k	9,06E-02	8,13E-02	0,897351	-0,94075
55k	9,06E-02	7,97E-02	0,879691	-1,1134
60k	9,06E-02	7,81E-02	0,862031	-1,28954
65k	9,06E-02	7,81E-02	0,862031	-1,28954
70k	9,22E-02	7,66E-02	0,830803	-1,61004
75k	9,22E-02	7,50E-02	0,813449	-1,79339
80k	9,22E-02	7,38E-02	0,800434	-1,93349
85k	9,38E-02	7,19E-02	0,766525	-2,30948
90k	9,38E-02	7,03E-02	0,749467	-2,50495
95k	9,38E-02	6,88E-02	0,733475	-2,69229
100k	9,38E-02	6,88E-02	0,733475	-2,69229
101k	9,38E-02	6,72E-02	0,716418	-2,89667
102k	9,38E-02	6,72E-02	0,716418	-2,89667

103k	9,38E-02	6,72E-02	0,716418	-2,89667
104k	9,38E-02	6,72E-02	0,716418	-2,89667
105k	9,38E-02	6,56E-02	0,69936	-3,10598
105,5k	9,38E-02	6,56E-02	0,69936	-3,10598
110k	9,53E-02	6,56E-02	0,688353	-3,24378
115k	9,53E-02	6,41E-02	0,672613	-3,4447
120k	9,69E-02	6,25E-02	0,644995	-3,80888
125k	9,69E-02	6,25E-02	0,644995	-3,80888
130k	9,69E-02	6,09E-02	0,628483	-4,03413
135k	9,69E-02	5,94E-02	0,613003	-4,25075
140k	9,69E-02	5,78E-02	0,596491	-4,48792
145k	9,69E-02	5,63E-02	0,581011	-4,71631
150k	9,69E-02	5,63E-02	0,581011	-4,71631
200k	1,03E-01	4,84E-02	0,469903	-6,55984
250k	1,07E-01	4,69E-02	0,438318	-7,16422
300k	1,10E-01	3,91E-02	0,355455	-8,98432
350k	1,10E-01	3,59E-02	0,326364	-9,72596
400k	1,10E-01	3,13E-02	0,284545	-10,917
450k	1,10E-01	2,97E-02	0,27	-11,3727
500k	1,10E-01	2,81E-02	0,255455	-11,8537
550k	1,10E-01	2,66E-02	0,241818	-12,3302
600k	1,10E-01	2,66E-02	0,241818	-12,3302
650k	1,10E-01	1,69E-02	0,153636	-16,2701
700k	1,10E-01	1,69E-02	0,153636	-16,2701
750k	1,12E-01	1,69E-02	0,150893	-16,4266
800k	1,12E-01	1,50E-02	0,133929	-17,4625
850k	1,10E-01	1,36E-02	0,123636	-18,1571
900k	1,10E-01	1,28E-02	0,116364	-18,6837
1M	1,10E-01	1,04E-02	0,094545	-20,4872

FONTE: Autoria Própria (2014)

Com os dados obtidos, foi levantado a curva de resposta em frequência, utilizando o Microsoft Excel, como mostrado na Figura 78.

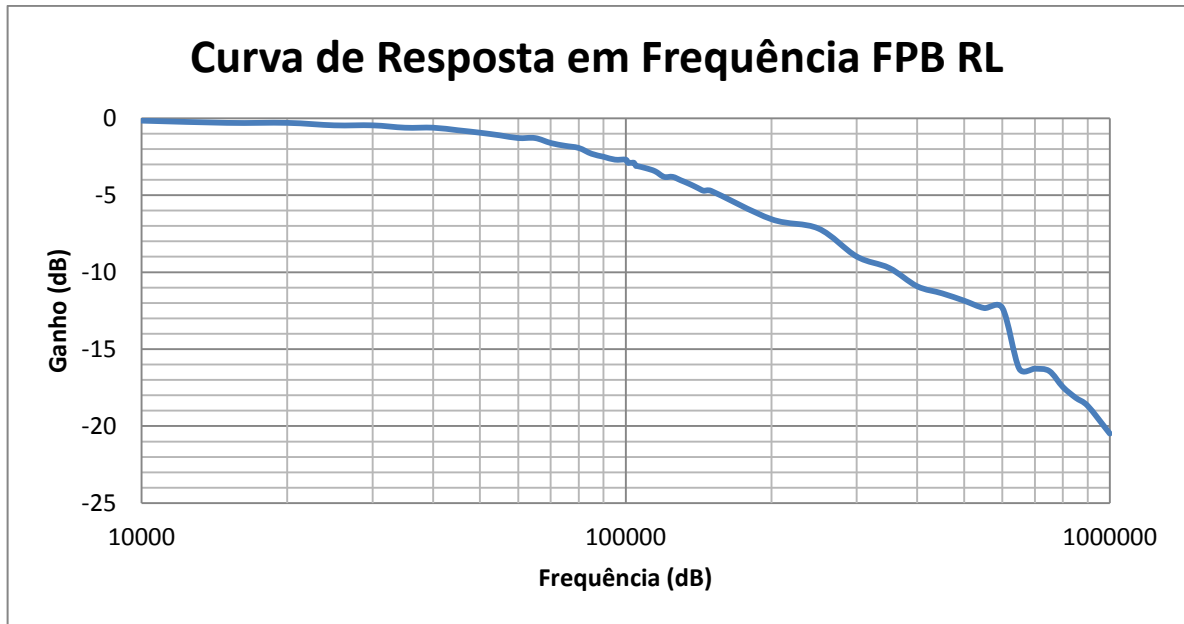


Figura 78 - Curva de resposta em frequência para o filtro passa-baixa RL  
 FONTE: Autoria própria (2014)

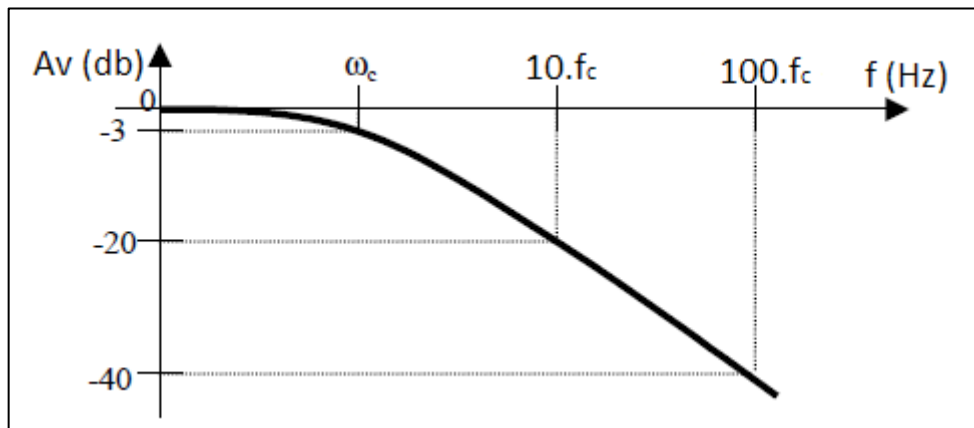


Figura 79 - Curva esperada de resposta em frequência do filtro passa-baixa  
 FONTE: Adaptado de Mussoi (2014)

Analisando as curvas das Figura 78 e Figura 79, podemos verificar que elas são de fato semelhantes, o que comprova, juntamente com o valor de ganho, o funcionamento do filtro projetado.

#### 4.2.2 Filtro Passa-Baixa RC

O filtro passa-baixa RC projetado é mostrado na Figura 80

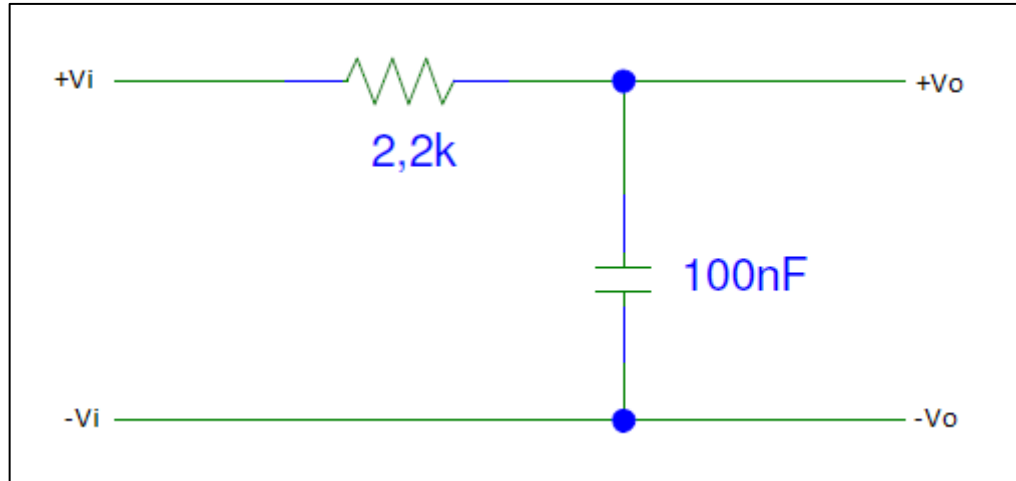


Figura 80 - Filtro passa-baixa RC  
 FONTE: Autoria própria (2014)

A frequência de corte utilizada foi de 700Hz

Os dados obtidos para o filtro Passa-Baixa RC estão disponíveis na Tabela 6.

Tabela 6 - Dados do filtro passa-baixa RC

fc = 700Hz / R=2,2kΩ / C=100nF				
f(Hz)	Vin (mV)	Vout (mV)	Av	Av(dB)
50	1,03E-01	1,00E-01	0,970874	-0,25674
60	1,06E-01	1,00E-01	0,943396	-0,50612
70	1,06E-01	1,00E-01	0,943396	-0,50612
80	1,06E-01	1,00E-01	0,943396	-0,50612
90	1,06E-01	1,00E-01	0,943396	-0,50612
100	1,06E-01	1,00E-01	0,943396	-0,50612
150	1,06E-01	1,00E-01	0,943396	-0,50612
200	1,06E-01	1,00E-01	0,943396	-0,50612
250	1,06E-01	9,69E-02	0,914151	-0,77964
300	1,06E-01	9,38E-02	0,884906	-1,06206
350	1,03E-01	9,06E-02	0,879612	-1,11418
400	1,03E-01	8,75E-02	0,849515	-1,41658
450	1,06E-01	8,75E-02	0,825472	-1,66596
500	1,06E-01	8,13E-02	0,766981	-2,30431
550	1,06E-01	8,13E-02	0,766981	-2,30431
600	1,00E-01	7,50E-02	0,75	-2,49877
650	1,00E-01	7,19E-02	0,719	-2,86542
660	1,00E-01	7,03E-02	0,703	-3,06089
670	1,00E-01	7,03E-02	0,703	-3,06089
680	1,00E-01	7,03E-02	0,703	-3,06089
690	1,00E-01	6,88E-02	0,688	-3,24823
695	1,00E-01	6,88E-02	0,688	-3,24823

700	1,00E-01	6,88E-02	0,688	-3,24823
705	1,00E-01	6,88E-02	0,688	-3,24823
710	1,00E-01	6,88E-02	0,688	-3,24823
720	1,00E-01	6,88E-02	0,688	-3,24823
730	1,00E-01	6,72E-02	0,672	-3,45261
740	1,00E-01	6,72E-02	0,672	-3,45261
750	1,00E-01	6,56E-02	0,656	-3,66192
760	1,00E-01	6,56E-02	0,656	-3,66192
770	1,00E-01	6,56E-02	0,656	-3,66192
780	1,00E-01	6,56E-02	0,656	-3,66192
790	1,00E-01	6,41E-02	0,641	-3,86284
800	1,00E-01	6,41E-02	0,641	-3,86284
850	9,84E-02	6,25E-02	0,635163	-3,9423
900	9,84E-02	5,94E-02	0,603659	-4,38417
950	9,69E-02	5,78E-02	0,596491	-4,48792
1k	9,69E-02	5,63E-02	0,581011	-4,71631
1,5k	9,69E-02	4,06E-02	0,418989	-7,55595
2k	9,69E-02	3,13E-02	0,323013	-9,81559
2,5k	9,69E-02	2,81E-02	0,28999	-10,7523
3k	9,69E-02	2,50E-02	0,257998	-11,7677
3,5k	9,69E-02	2,19E-02	0,226006	-12,9176
4k	9,69E-02	1,88E-02	0,194014	-14,2433
4,5k	9,69E-02	1,72E-02	0,177503	-15,0159
5k	9,69E-02	1,56E-02	0,160991	-15,864
5,5k	9,69E-02	1,41E-02	0,145511	-16,7421
6k	9,69E-02	1,25E-02	0,128999	-17,7883
6,5k	9,69E-02	1,25E-02	0,128999	-17,7883
7k	9,69E-02	1,25E-02	0,128999	-17,7883
7,5k	9,69E-02	1,00E-02	0,103199	-19,7265
8k	9,69E-02	9,37E-03	0,096698	-20,2917
8,5k	9,69E-02	5,94E-03	0,0613	-24,2507
9k	9,69E-02	5,94E-03	0,0613	-24,2507
9,5k	9,69E-02	5,31E-03	0,054799	-25,2246
10k	9,69E-02	5,31E-03	0,054799	-25,2246

FONTE: Autoria própria (2014)

Com os dados obtidos, foi levantado a curva de resposta em frequência, utilizando como mostrado na Figura 81.

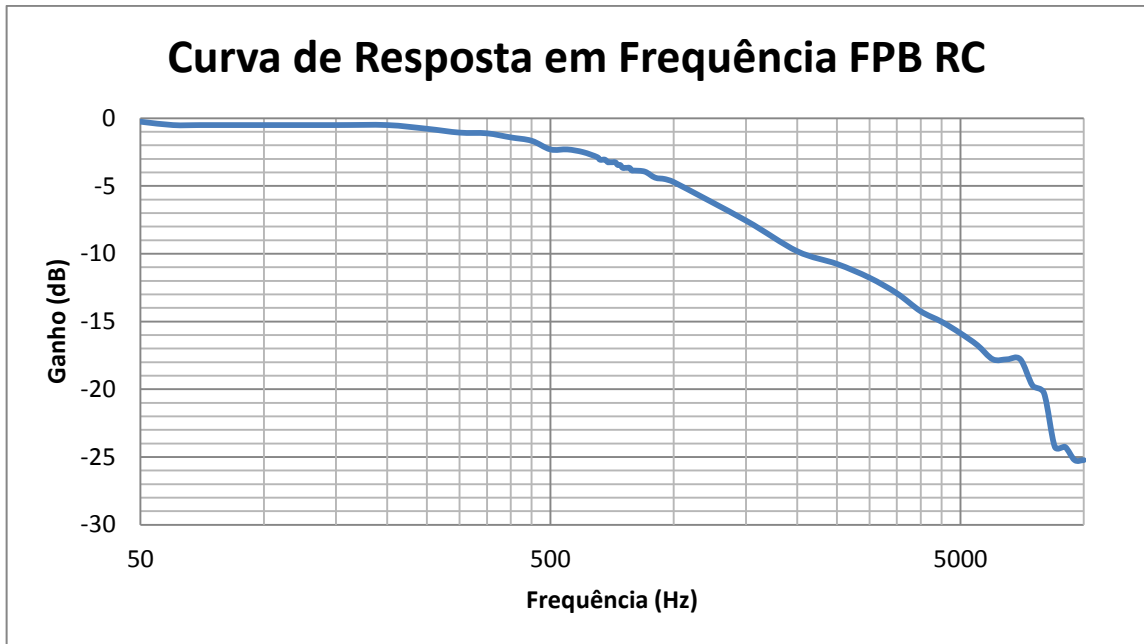


Figura 81 - Curva de resposta em frequência do filtro passa-baixa RC  
 FONTE: Autoria própria (2014)

Analisando as curvas das Figura 81 e Figura 79, podemos verificar que elas são de fato semelhantes, o que comprova, juntamente com o valor de ganho, o funcionamento do filtro projetado.

#### 4.2.3 Filtro Passa-Alta RL

O filtro passa-alta RL projeto foi o mostrado na Figura 82.

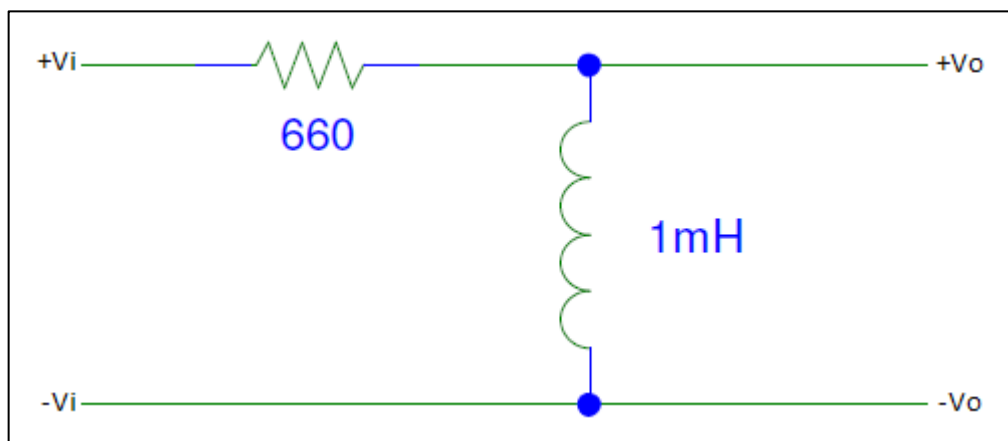


Figura 82 - Filtro Passa-Alta RL  
 FONTE: Autoria própria (2014)

A frequência de corte utilizada foi de 105kHz.

Os dados obtidos para o filtro Passa-Alta RL estão disponíveis na Tabela 7.



Tabela 7 - Dados do filtro passa-alta RL

fc = 105kHz / R = 660 Ω/ L = 1mH				
f [Hz]	Vin [mV]	Vout[mV]	Av	Av [dB]
10k	8,91E-02	1,09E-02	0,122334	-18,249
15k	8,91E-02	1,25E-02	0,140292	-17,0594
20k	8,91E-02	1,72E-02	0,193042	-14,287
25k	8,91E-02	2,03E-02	0,227834	-12,8476
30k	8,91E-02	2,50E-02	0,280584	-11,0388
35k	9,06E-02	2,97E-02	0,327815	-9,68743
40k	9,06E-02	3,28E-02	0,362031	-8,82509
45k	9,06E-02	3,59E-02	0,396247	-8,04067
50k	9,06E-02	3,91E-02	0,431567	-7,29903
55k	9,22E-02	4,22E-02	0,457701	-6,78837
60k	9,22E-02	4,53E-02	0,491323	-6,17265
65k	9,22E-02	4,88E-02	0,529284	-5,52622
70k	9,22E-02	5,16E-02	0,559653	-5,04162
75k	9,22E-02	5,47E-02	0,593275	-4,53487
80k	9,22E-02	5,63E-02	0,610629	-4,28445
85k	9,22E-02	5,78E-02	0,626898	-4,05606
90k	9,38E-02	6,09E-02	0,649254	-3,75171
95k	9,38E-02	6,25E-02	0,666311	-3,52646
100k	9,38E-02	6,56E-02	0,69936	-3,10598
101k	9,38E-02	6,56E-02	0,69936	-3,10598
102k	9,38E-02	6,56E-02	0,69936	-3,10598
103k	9,38E-02	6,56E-02	0,69936	-3,10598
104k	9,38E-02	6,56E-02	0,69936	-3,10598
105k	9,38E-02	6,56E-02	0,69936	-3,10598
105,5k	9,38E-02	6,56E-02	0,69936	-3,10598
110k	9,53E-02	6,88E-02	0,721931	-2,83009
115k	9,53E-02	6,88E-02	0,721931	-2,83009
120k	9,53E-02	7,03E-02	0,737671	-2,64275
125k	9,53E-02	7,19E-02	0,75446	-2,44728
130k	9,53E-02	7,34E-02	0,770199	-2,26794
135k	9,53E-02	7,50E-02	0,786988	-2,08063
140k	9,53E-02	7,66E-02	0,803778	-1,89728
145k	9,53E-02	7,81E-02	0,819517	-1,72884
150k	9,53E-02	7,81E-02	0,819517	-1,72884
200k	9,69E-02	8,75E-02	0,902993	-0,88631
250k	1,00E-01	9,22E-02	0,922	-0,70538
300k	1,00E-01	9,53E-02	0,953	-0,41814
350k	1,01E-01	9,69E-02	0,959406	-0,35995
400k	1,07E-01	1,03E-01	0,959813	-0,35627
450k	1,07E-01	1,03E-01	0,960748	-0,34781
500k	1,07E-01	1,03E-01	0,960748	-0,34781
550k	1,07E-01	1,03E-01	0,962617	-0,33093

600k	1,07E-01	1,04E-01	0,971963	-0,24701
650k	1,07E-01	1,04E-01	0,971963	-0,24701
700k	1,07E-01	1,06E-01	0,990654	-0,08156
750k	1,07E-01	1,06E-01	0,990654	-0,08156
800k	1,07E-01	1,06E-01	0,990654	-0,08156
850k	1,07E-01	1,06E-01	0,990654	-0,08156
900k	1,07E-01	1,06E-01	0,990654	-0,08156
1M	1,07E-01	1,07E-01	1	0

FONTE: Autoria própria (2014)

Com os dados obtidos, foi levantado a curva de resposta em frequência, a levantada com Microsoft Excel, como mostrado na Figura 837.

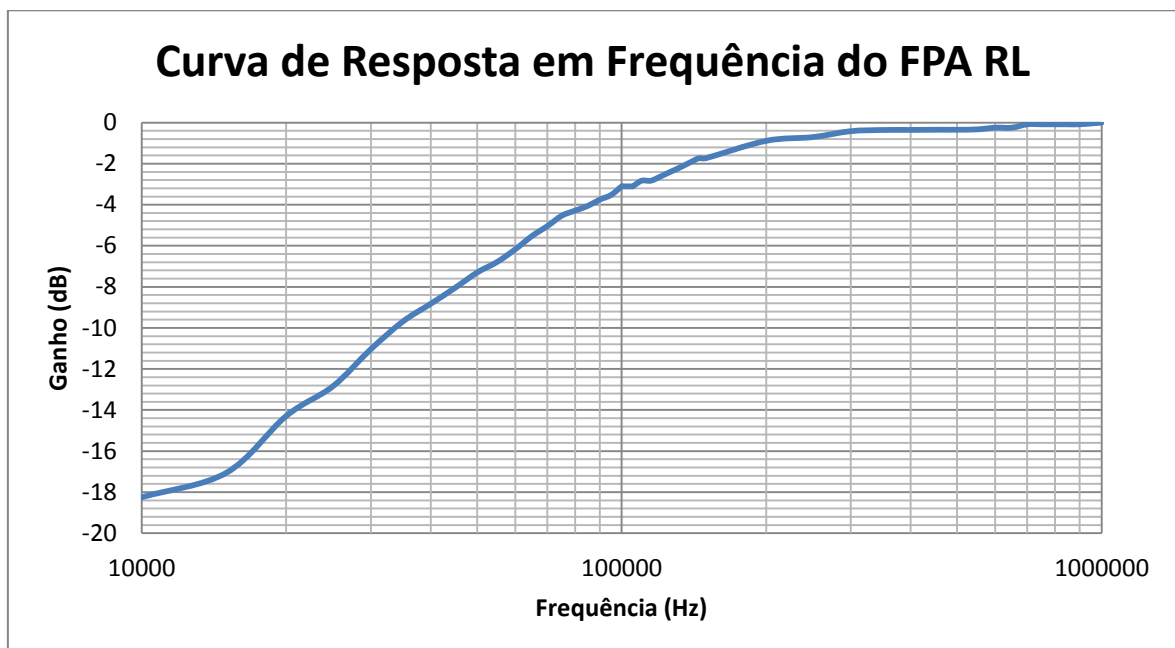


Figura 837 - Curva de resposta em frequência do filtro passa-alta RL  
FONTE: Autoria própria (2014)

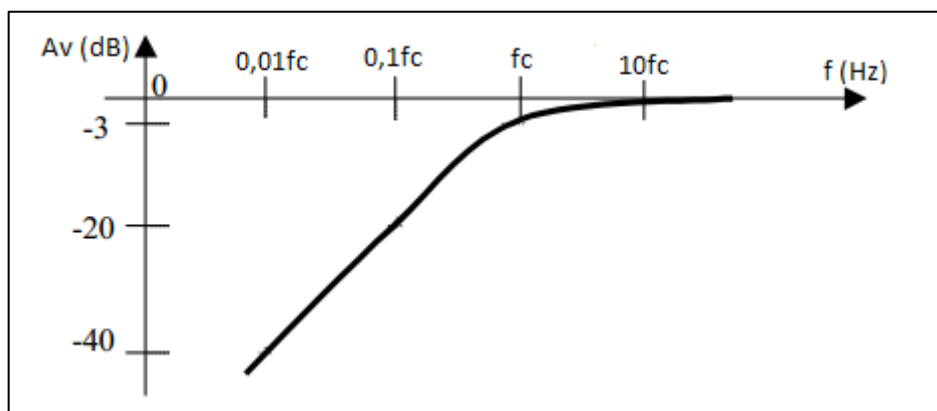


Figura 84 - Curva esperada de resposta em frequência filtro passa-alta  
FONTE: Adaptado de Mussoi (2014)

Analisando as curvas das Figura 83 e Figura 84, podemos verificar que elas são de fato semelhantes, o que comprova, juntamente com o valor de ganho, o funcionamento do filtro projetado.

#### 4.2.4 Filtro Passa-Alta RC

O filtro passa-alta RC projetado foi o mostrado na Figura 85.

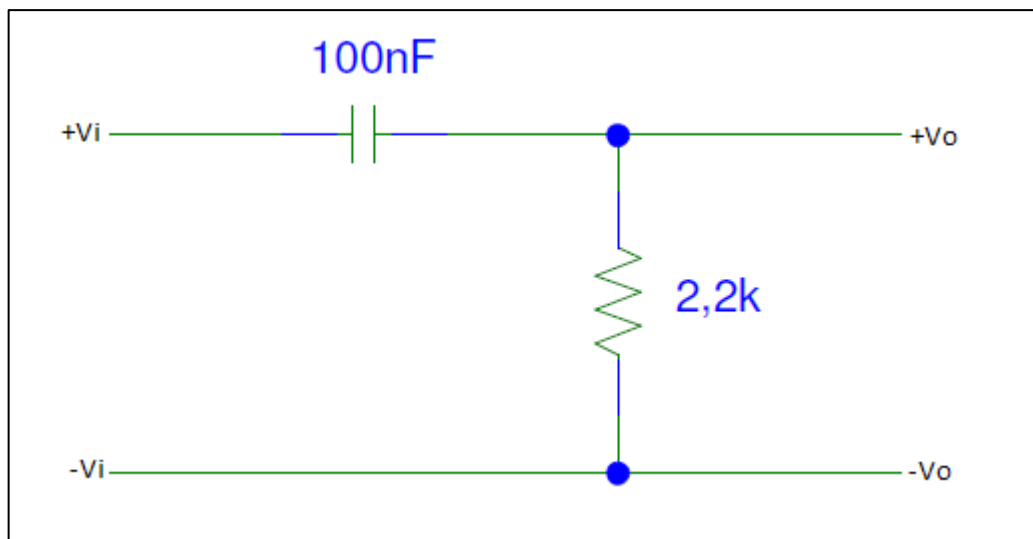


Figura 85 - Filtro passa-alta RC  
FONTE: Autoria própria (2014)

A frequência de corte utilizada foi de 700Hz.

Os dados obtidos para o filtro Passa-Alta RC estão disponíveis na Tabela 8.

Tabela 8 - Dados filtro passa-alta RC

fc = 700Hz/R=2,2k/C=100nF				
f (Hz)	Vin (mV)	Vout (mV)	Av	Av(dB)
50	1,03E+02	1,12E+01	0,108738	-19,2724
60	1,03E+02	1,28E+01	0,124272	-18,1125
70	1,06E+02	1,56E+01	0,14717	-16,6436
80	1,06E+02	1,88E+01	0,177358	-15,023
90	1,06E+02	2,19E+01	0,206604	-13,6972
100	1,06E+02	2,19E+01	0,206604	-13,6972
150	1,06E+02	2,55E+01	0,240566	-12,3753
200	1,03E+02	2,81E+01	0,272816	-11,2826
250	1,03E+02	3,44E+01	0,333981	-9,52558
300	1,03E+02	4,38E+01	0,425243	-7,42726
350	1,03E+02	4,67E+01	0,453398	-6,87041
400	1,03E+02	5,31E+01	0,515534	-5,75485
450	1,06E+02	5,94E+01	0,560377	-5,03039
500	1,03E+02	5,94E+01	0,576699	-4,78102
550	1,03E+02	6,56E+01	0,636893	-3,91867
600	1,03E+02	6,88E+01	0,667961	-3,50498
650	1,03E+02	7,19E+01	0,698058	-3,12217
660	1,03E+02	7,19E+01	0,698058	-3,12217

670	1,03E+02	7,19E+01	0,698058	-3,12217
680	1,00E+02	6,88E+01	0,688	-3,24823
690	1,00E+02	6,88E+01	0,688	-3,24823
695	1,00E+02	7,03E+01	0,703	-3,06089
700	1,00E+02	7,03E+01	0,703	-3,06089
705	1,00E+02	7,03E+01	0,703	-3,06089
710	1,00E+02	7,03E+01	0,703	-3,06089
720	1,00E+02	7,03E+01	0,703	-3,06089
730	1,00E+02	7,03E+01	0,703	-3,06089
740	1,00E+02	7,03E+01	0,703	-3,06089
750	1,00E+02	7,19E+01	0,719	-2,86542
760	1,00E+02	7,19E+01	0,719	-2,86542
770	1,00E+02	7,34E+01	0,734	-2,68608
780	1,00E+02	7,34E+01	0,734	-2,68608
790	1,00E+02	7,34E+01	0,734	-2,68608
800	1,00E+02	7,34E+01	0,734	-2,68608
850	1,00E+02	7,66E+01	0,766	-2,31542
900	1,00E+02	7,81E+01	0,781	-2,14698
950	9,69E+01	7,81E+01	0,805986	-1,87345
1k	9,69E+01	7,81E+01	0,805986	-1,87345
1,5k	9,69E+01	8,75E+01	0,902993	-0,88631
2k	9,38E+01	8,75E+01	0,932836	-0,6039
2,5k	9,38E+01	9,06E+01	0,965885	-0,30149
3k	9,38E+01	9,06E+01	0,965885	-0,30149
3,5k	9,38E+01	9,06E+01	0,965885	-0,30149
4k	9,38E+01	9,06E+01	0,965885	-0,30149
4,5k	9,38E+01	9,06E+01	0,965885	-0,30149
5k	9,38E+01	9,06E+01	0,965885	-0,30149
5,5k	9,38E+01	9,06E+01	0,965885	-0,30149
6k	9,38E+01	9,38E+01	1	0
6,5k	9,38E+01	9,38E+01	1	0
7k	9,38E+01	9,38E+01	1	0
7,5k	9,38E+01	9,38E+01	1	0
8k	9,38E+01	9,38E+01	1	0
8,5k	9,38E+01	9,38E+01	1	0
9k	9,38E+01	9,38E+01	1	0
9,5k	9,38E+01	9,38E+01	1	0
10k	9,38E+01	9,38E+01	1	0

FONTE: Autoria Própria (2014)

Com os dados obtidos, foi levantado a curva de resposta em frequência, com o Microsoft Excel, como mostrado na Figura 86.

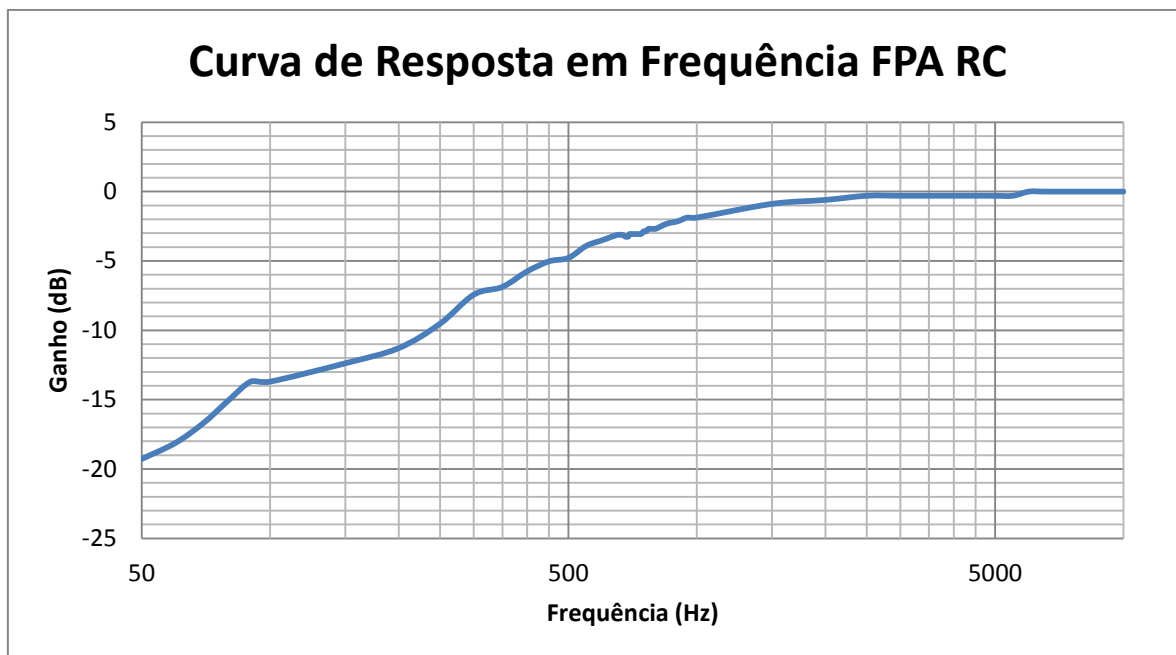


Figura 86 - Curva de resposta em frequência filtro passa-alta RC  
 FONTE: Autoria Própria (2014)

Analisando as curvas das Figura 86 e Figura 84, podemos verificar que elas são de fato semelhantes, o que comprova, juntamente com o valor de ganho, o funcionamento do filtro projetado.

#### 4.2.5 Filtro Passa-Faixa RLC série

O filtro passa-faixa RLC série projetado foi o mostrado na Figura 87.

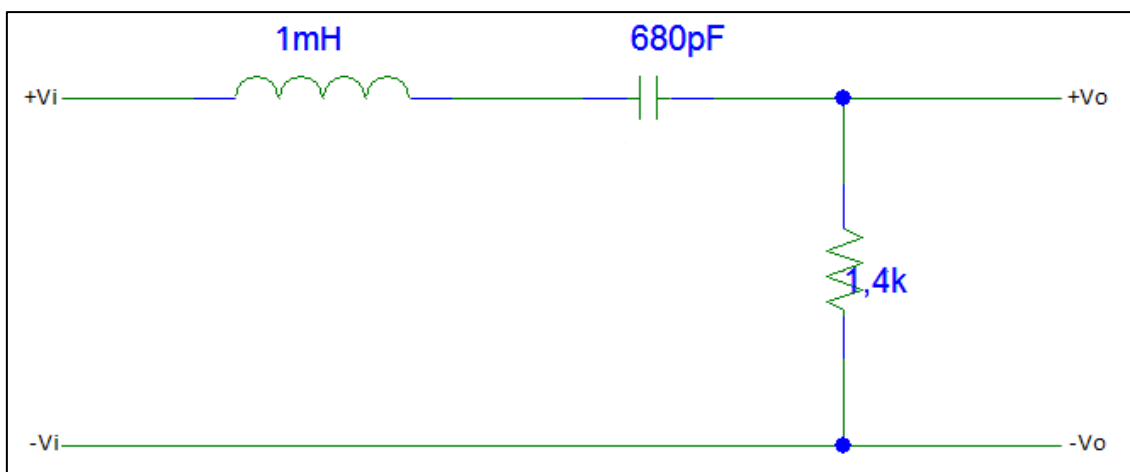


Figura 87 - Filtro passa-faixa RLC série  
 FONTE: autoria própria (2014)

A frequência de corte inferior é de 100kHz e a frequência de corte superior é de 300kHz.

Os dados obtidos para o filtro Passa-Faixa RLC série estão disponíveis na Tabela 9.

Tabela 9 - Dados do filtro passa-faixa série

fci= 100kHz/fcs=300kHz/fr=173kHz/C=680pF/R=1,4k/L=1mH				
f (Hz)	Vin (mV)	Vout(mV)	Av	Av(dB)
10k	1,04	6,40E-02	0,061538	-24,21706731
20k	1	1,26E-01	0,126	-17,9925891
30k	1	1,86E-01	0,186	-14,60974112
40k	1	2,46E-01	0,246	-12,18129786
50k	1	3,08E-01	0,308	-10,22898567
60k	1	3,64E-01	0,364	-8,777972327
70k	1	4,20E-01	0,42	-7,535014192
80k	1	4,76E-01	0,476	-6,447860946
90k	1	5,32E-01	0,532	-5,481767354
100k	1	5,92E-01	0,592	-4,553565866
110k	9,60E-01	6,28E-01	0,654167	-3,686231786
120k	9,60E-01	6,52E-01	0,679167	-3,360472746
130k	9,60E-01	7,28E-01	0,758333	-2,402797075
140k	9,60E-01	7,60E-01	0,791667	-2,029152815
150k	9,60E-01	7,92E-01	0,825	-1,670921029
160k	9,20E-01	8,24E-01	0,895652	-0,957212313
170k	9,20E-01	8,56E-01	0,930435	-0,626281253
173k	9,20E-01	8,56E-01	0,930435	-0,626281253
175k	9,20E-01	8,72E-01	0,947826	-0,465426848
180k	9,20E-01	8,72E-01	0,947826	-0,465426848
190k	9,20E-01	8,88E-01	0,965217	-0,307497231
200k	9,20E-01	9,04E-01	0,982609	-0,152387937
210k	9,20E-01	9,12E-01	0,991304	-0,07585978
220k	9,20E-01	9,20E-01	1	0
230k	9,20E-01	9,20E-01	1	0
240k	9,20E-01	9,04E-01	0,982609	-0,152387937
250k	9,20E-01	9,04E-01	0,982609	-0,152387937
260k	9,20E-01	8,88E-01	0,965217	-0,307497231
270k	9,20E-01	8,72E-01	0,947826	-0,465426848
280k	9,20E-01	8,64E-01	0,93913	-0,545481697
290k	9,20E-01	8,40E-01	0,913043	-0,790170826
300k	9,20E-01	8,24E-01	0,895652	-0,957212313
310k	9,20E-01	8,08E-01	0,878261	-1,127529331
320k	9,20E-01	7,92E-01	0,86087	-1,301252915
330k	9,20E-01	7,76E-01	0,843478	-1,478522122
340k	9,60E-01	7,52E-01	0,783333	-2,121067849
350k	9,60E-01	7,28E-01	0,758333	-2,402797075

360k	9,60E-01	7,12E-01	0,741667	-2,595824788
370k	9,60E-01	6,96E-01	0,725	-2,793239869
380k	9,60E-01	6,72E-01	0,7	-3,0980392
390k	9,60E-01	6,56E-01	0,683333	-3,307347873
400k	9,60E-01	6,32E-01	0,658333	-3,631083095
450k	9,60E-01	5,44E-01	0,566667	-4,933446667
500k	9,60E-01	4,64E-01	0,483333	-6,31506505
550k	1	4,00E-01	0,4	-7,958800173
600k	1	3,52E-01	0,352	-9,06914673
650k	1	3,04E-01	0,304	-10,34252833
700k	1	2,56E-01	0,256	-11,83520069
750k	9,60E-01	2,24E-01	0,233333	-12,64046429
800k	9,60E-01	1,92E-01	0,2	-13,97940009
850k	9,60E-01	1,68E-01	0,175	-15,13923903
900k	9,60E-01	1,44E-01	0,15	-16,47817482
950k	9,60E-01	1,28E-01	0,133333	-17,50122527
1M	9,60E-01	1,12E-01	0,116667	-18,66106421

FONTE: Autoria própria (2014)

Com os dados obtidos, foi levantado a curva de resposta em frequência, com o Microsoft Excel, como mostrado na Figura 88.

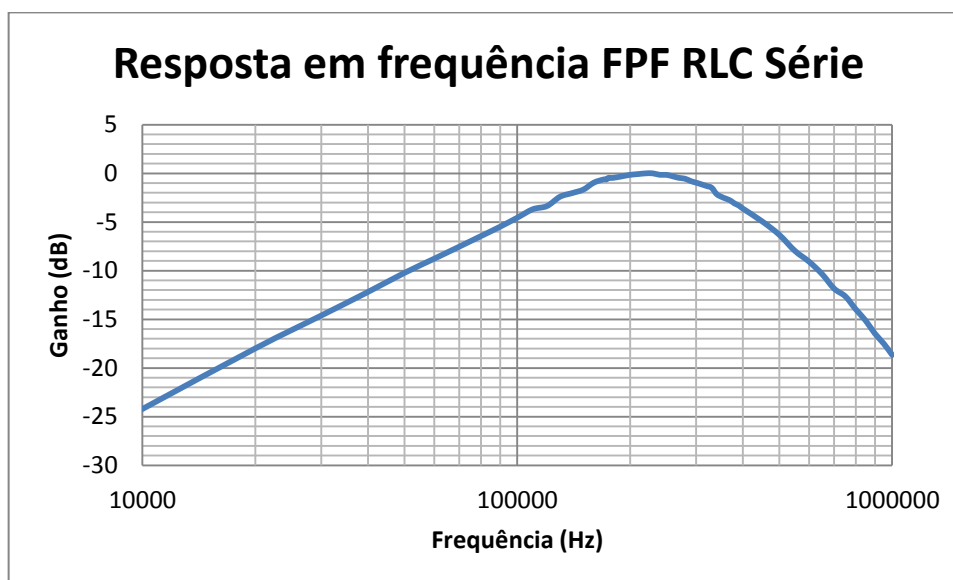


Figura 882 - Resposta em frequência filtro passa-faixa RLC série  
FONTE: Autoria própria (2014)

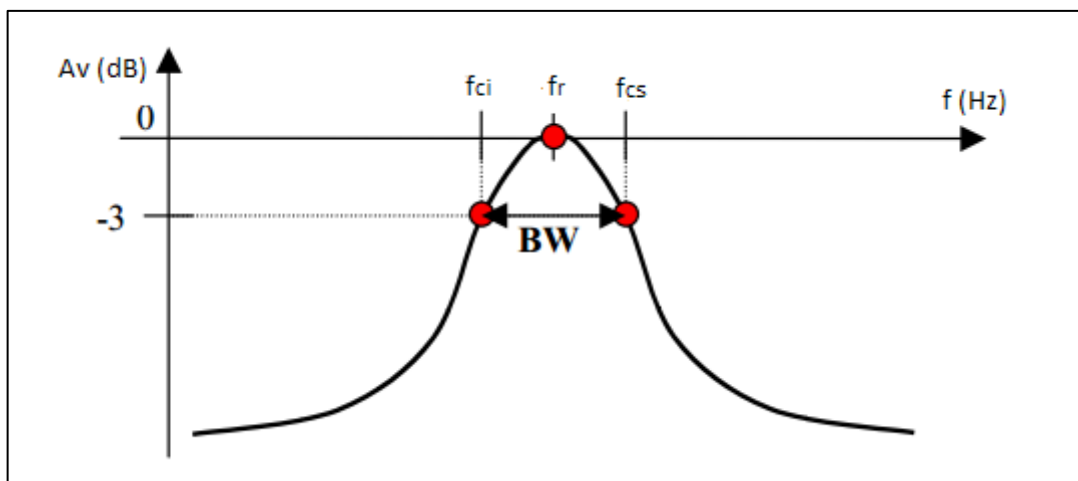


Figura 89 - Curva esperada de resposta em frequência filtro passa-faixa  
 FONTE: Adaptado de Mussoi (2014)

Analisando as curvas das Figura 88 e Figura 89, podemos verificar que elas são de fato semelhantes, o que comprova, juntamente com o valor de ganho, o funcionamento do filtro projetado.

#### 4.2.6 Filtro Passa-Faixa RLC Paralelo

O projeto do filtro passa-faixa RLC paralelo é mostrado na Figura 90.

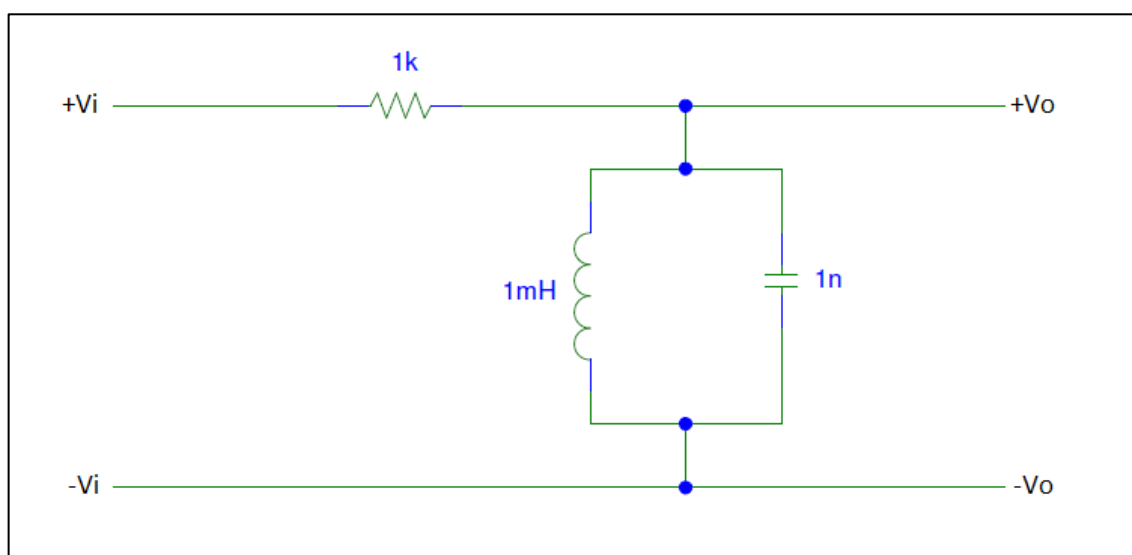


Figura 90 - Filtro passa-faixa RLC paralelo  
 FONTE: Autoria própria (2014)

A frequência de corte inferior utilizada foi de 98,4kHz e a frequência de corte superior é de 258kHz.

Os dados obtidos para o filtro Passa-Faixa RLC paralelo estão disponíveis na Tabela 10.



Tabela 10 - Dados do filtro passa-faixa RLC paralelo

fci=98,4kHz/fcs=258kHz/fr=159kHz/C=1nF/L=1mH/R=1kOhm				
f (Hz)	Vin (mV)	Vout (mV)	Av	Av(dB)
10k	9,60E-01	6,00E-02	0,0625	-24,08239965
20k	9,20E-01	1,20E-01	0,130435	-17,69213163
30k	9,20E-01	1,80E-01	0,195652	-14,17030644
40k	9,20E-01	2,44E-01	0,265217	-11,52796002
50k	9,60E-01	3,08E-01	0,320833	-9,874410331
60k	9,60E-01	3,80E-01	0,395833	-8,049752728
70k	9,60E-01	4,56E-01	0,475	-6,466127808
80k	9,60E-01	5,28E-01	0,55	-5,19274621
90k	9,60E-01	6,20E-01	0,645833	-3,797590871
95k	9,60E-01	6,44E-01	0,670833	-3,467707314
100k	9,60E-01	6,64E-01	0,691667	-3,202063073
110k	9,60E-01	7,04E-01	0,733333	-2,693971478
120k	9,60E-01	7,36E-01	0,766667	-2,307868374
130k	1	9,00E-01	0,9	-0,915149811
140k	1	9,49E-01	0,949	-0,454675751
150k	1	9,60E-01	0,96	-0,354575339
160k	9,60E-01	9,40E-01	0,979167	-0,182867589
170k	1,00E+00	9,40E-01	0,94	-0,537442928
180k	1	9,00E-01	0,9	-0,915149811
190k	9,60E-01	8,60E-01	0,895833	-0,955455636
200k	9,60E-01	8,20E-01	0,854167	-1,369147613
210k	9,60E-01	7,80E-01	0,8125	-1,803532607
220k	9,60E-01	7,40E-01	0,770833	-2,260790266
230k	9,60E-01	7,00E-01	0,729167	-2,743463861
240k	9,60E-01	6,80E-01	0,708333	-2,995246407
250k	9,60E-01	6,60E-01	0,6875	-3,25454595
258k	9,60E-01	6,20E-01	0,645833	-3,797590871
260k	9,60E-01	6,20E-01	0,645833	-3,797590871
270k	9,20E-01	5,80E-01	0,630435	-4,007196676
280k	9,20E-01	5,80E-01	0,630435	-4,007196676
290k	9,60E-01	5,40E-01	0,5625	-4,997549464
300k	9,20E-01	5,20E-01	0,565217	-4,955689674
350k	9,20E-01	4,20E-01	0,456522	-6,810770739
400k	9,20E-01	3,80E-01	0,413043	-7,680084615
450k	9,20E-01	3,40E-01	0,369565	-8,646178206
500k	9,20E-01	3,00E-01	0,326087	-9,733331453
550k	8,80E-01	2,64E-01	0,3	-10,45757491
600k	8,80E-01	2,44E-01	0,277273	-11,14185692
650k	8,80E-01	2,20E-01	0,25	-12,04119983
700k	8,80E-01	2,04E-01	0,231818	-12,69705009
750k	8,80E-01	1,92E-01	0,218182	-13,22362887

800k	8,80E-01	1,80E-01	0,204545	-13,78420334
850k	8,80E-01	1,64E-01	0,186364	-14,59277648
900k	8,80E-01	1,56E-01	0,177273	-15,02716148
950k	8,80E-01	1,52E-01	0,172727	-15,25278168
1M	8,80E-01	1,40E-01	0,159091	-15,96709273
1,5M	8,00E-01	9,20E-02	0,115	-18,78604319
2M	8,00E-01	7,20E-02	0,09	-20,91514981

FONTE: Autoria própria (2014)

Com os dados obtidos, foi levantado a curva de resposta em frequência, com o Microsoft Excel, como mostrado na Figura 91.

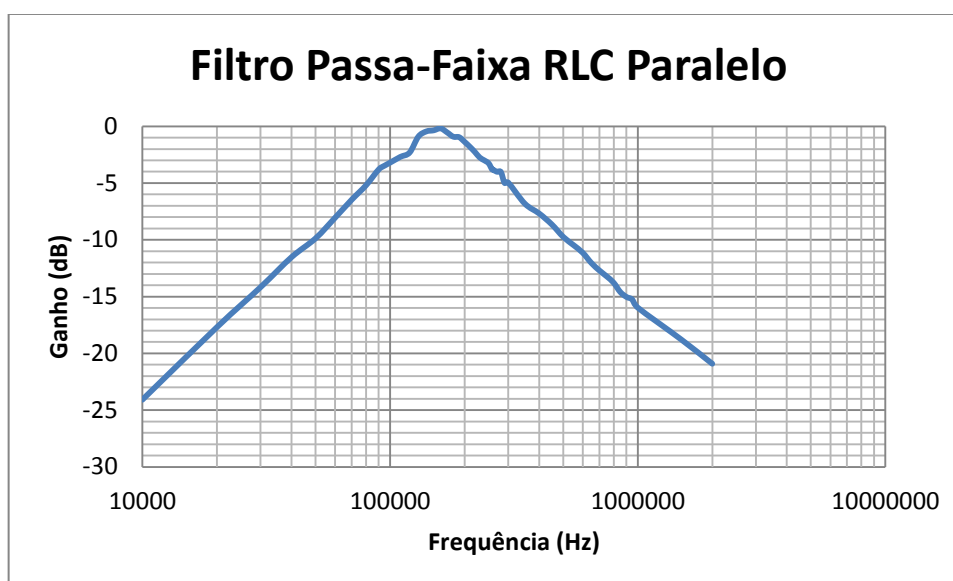


Figura 91 - Curva de resposta em frequência filtro passa-faixa RLC paralelo  
FONTE: Adaptado de Mussoi (2014)

Analisando as curvas das Figura 91 e Figura 89, podemos verificar que elas são de fato semelhantes, o que comprova, juntamente com o valor de ganho, o funcionamento do filtro projetado.

#### 4.2.7 Filtro Passa-Faixa RC

O projeto do filtro passa-faixa RC é mostrado na Figura 92.

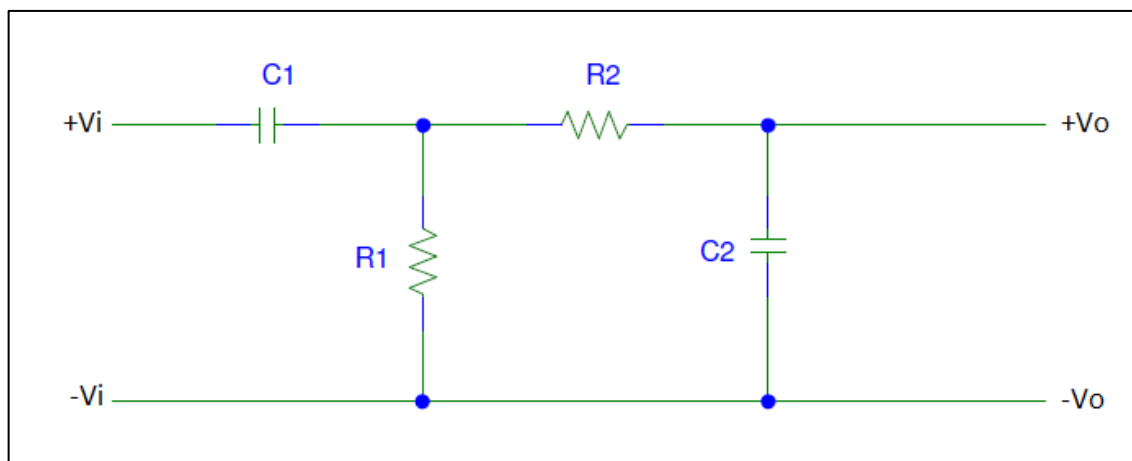


Figura 92 - Filtro passa-faixa RC  
 FONTE: Autoria própria (2014)

A frequência de corte inferior é de 723Hz e a frequência superior é de 23kHz.

Os dados obtidos para o filtro Passa-Faixa RC estão disponíveis na Tabela 2.

Tabela 2 - Dados do filtro passa-faixa RLC paralelo

fci = 723Hz/fcs=23kHz/fr=4,1kHz/C1=22nF/C1=680pF/R1=R2=10kΩ				
f(Hz)	Vin	Vout	Av	Av(dB)
50	1,04	7,20E-02	0,069231	-23,19401686
100	1,04E+00	1,40E-01	0,134615	-17,41810607
200	1,04E+00	2,68E-01	0,257692	-11,77797091
300	1,04	3,84E-01	0,369231	-8,654042299
400	1,04	4,80E-01	0,461538	-6,715842038
500	1,04	5,60E-01	0,538462	-5,376906246
600	1,04	6,32E-01	0,607692	-4,32632522
700	1,04	6,80E-01	0,653846	-3,690488532
723	1,04	0,696	0,669231	-3,488481994
750	1,04	0,704	0,676923	-3,389213603
800	1,04	7,28E-01	0,7	-3,0980392
900	1,04	7,60E-01	0,730769	-2,72439494
1k	1,04	7,92E-01	0,761538	-2,366163154
2k	1,04	9,04E-01	0,869231	-1,217298176
3k	1,04	9,40E-01	0,903846	-0,878109714
4k	1	0,94	0,94	-0,537442928
5k	1	0,94	0,94	-0,537442928
6k	1	0,94	0,94	-0,537442928
7k	1	9,00E-01	0,9	-0,915149811
8k	1	9,00E-01	0,9	-0,915149811
9k	1	8,80E-01	0,88	-1,110346557
10k	1	8,60E-01	0,86	-1,310030975
15k	1	7,80E-01	0,78	-2,158107946
20k	1	7,00E-01	0,7	-3,0980392

21k	1	6,80E-01	0,68	-3,349821746
22k	1	6,60E-01	0,66	-3,609121289
23k	1	6,60E-01	0,66	-3,609121289
23,5k	1	0,66	0,66	-3,609121289
24k	1,00E+00	6,40E-01	0,64	-3,87640052
25k	1	6,20E-01	0,62	-4,15216621
26k	1	6,20E-01	0,62	-4,15216621
27k	1	6,00E-01	0,6	-4,436974992
28k	1	5,80E-01	0,58	-4,731440129
29k	1	5,80E-01	0,58	-4,731440129
30k	1	5,60E-01	0,56	-5,03623946
35k	9,60E-01	5,00E-01	0,520833	-5,666024574
40k	9,60E-01	4,60E-01	0,479167	-6,390268027
45k	1	4,16E-01	0,416	-7,618133387
50k	9,60E-01	3,84E-01	0,4	-7,958800173
55k	9,60E-01	3,52E-01	0,366667	-8,714571391
60k	9,60E-01	3,20E-01	0,333333	-9,542425094
70k	9,60E-01	2,80E-01	0,291667	-10,70226403
80k	9,60E-01	2,48E-01	0,258333	-11,75639104
90k	1,00E+00	2,24E-01	0,224	-12,99503963
100k	1	2,00E-01	0,2	-13,97940009
150k	9,60E-01	1,44E-01	0,15	-16,47817482
200k	9,60E-01	1,04E-01	0,108333	-19,30475787

FONTE: Autoria própria (2014)

Com os dados obtidos, foi levantado a curva de resposta em frequência, com o Microsoft Excel, como mostrado na Figura 93.

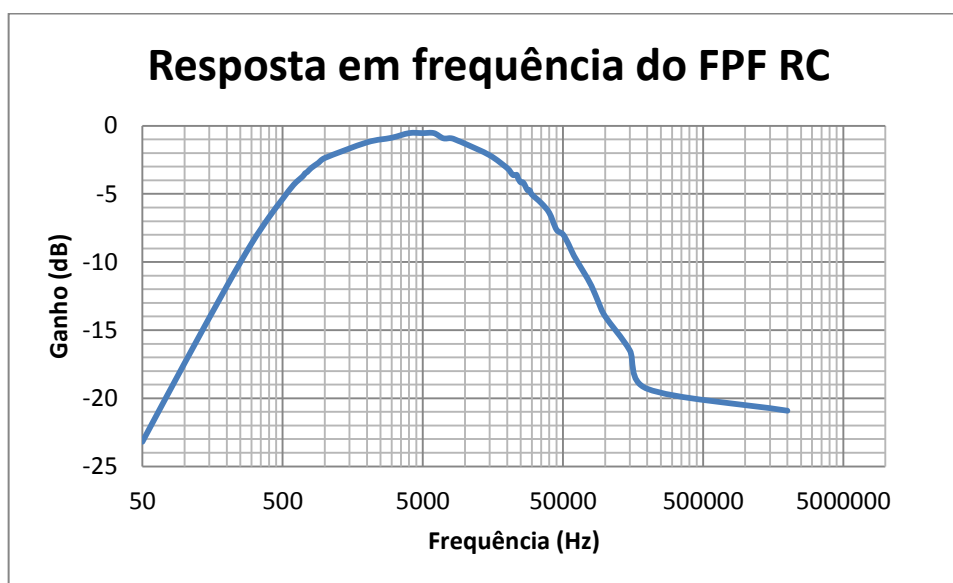


Figura 93 - Curva de resposta em frequência filtro passa-faixa RC  
FONTE: Autoria própria (2014)

Analisando as curvas das Figura 93 e Figura 89, podemos verificar que elas são de fato semelhantes, o que comprova, juntamente com o valor de ganho, o funcionamento do filtro projetado.

#### 4.2.8 Filtro Rejeita-Faixa RLC série

O projeto de filtro rejeita-faixa RLC série é mostrado na Figura 94.

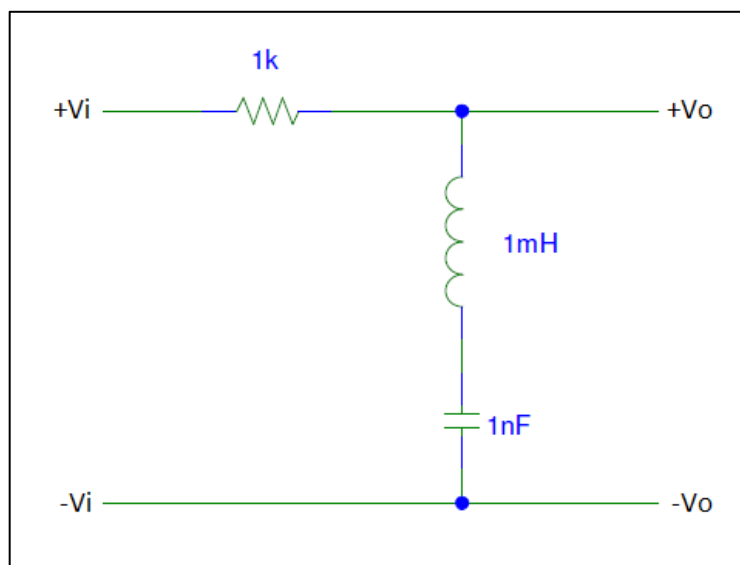


Figura 94 - Filtro rejeita-faixa RLC série  
FONTE: Autoria própria (2014)

A frequência de corte inferior é de 98,4kHz e a frequência de corte superior é de 258kHz.

Os dados obtidos para o filtro rejeita-faixa RLC série estão disponíveis na Tabela 3.

Tabela 3 - Dados do filtro rejeita-faixa RLC série

fci=98,4kHz/fcs=258kHz/R=1k/L=1mH/C=1nF				
f (Hz)	Vin (V)	Vout (V)	Av	Av(dB)
10k	1,00E+00	1,04E+00	1,04	0,340666786
20k	1	1,04E+00	1,04	0,340666786
30k	1	9,60E-01	0,96	-0,354575339
40k	1	9,60E-01	0,96	-0,354575339
50k	1	9,60E-01	0,96	-0,354575339
60k	1	8,80E-01	0,88	-1,110346557
70k	1	8,80E-01	0,88	-1,110346557
80k	9,60E-01	8,00E-01	0,833333	-1,583624921
90k	9,60E-01	7,60E-01	0,791667	-2,029152815
98,4k	9,60E-01	6,80E-01	0,708333	-2,995246407

100k	9,60E-01	6,80E-01	0,708333	-2,995246407
110k	9,60E-01	6,00E-01	0,625	-4,082399653
120k	9,60E-01	5,20E-01	0,541667	-5,325357788
130k	9,60E-01	4,20E-01	0,4375	-7,180438853
140k	8,80E-01	3,00E-01	0,340909	-9,347228349
150k	9,20E-01	1,80E-01	0,195652	-14,17030644
200k	9,60E-01	3,60E-01	0,375	-8,519374645
210k	9,60E-01	4,40E-01	0,458333	-6,776371131
230k	960	580	0,604167	-4,37686479
240k	960	620	0,645833	-3,797590871
250k	960	680	0,708333	-2,995246407
258k	960	720	0,75	-2,498774732
260k	960	740	0,770833	-2,260790266
270k	960	760	0,791667	-2,029152815
280k	960	800	0,833333	-1,583624921
290k	960	820	0,854167	-1,369147613
300k	960	860	0,895833	-0,955455636
350k	960	920	0,958333	-0,369668114
400k	960	960	1	0
450k	960	960	1	0
500k	960	960	1	0
550k	960	980	1,020833	0,179096853
600k	960	960	1	0
650k	960	940	0,979167	-0,182867589
700k	960	940	0,979167	-0,182867589
750k	960	920	0,958333	-0,369668114
800k	960	900	0,9375	-0,560574472
850k	960	880	0,916667	-0,755771218
900k	960	860	0,895833	-0,955455636
950k	960	840	0,875	-1,15983894
1M	960	820	0,854167	-1,369147613

FONTE: Autoria própria (2014)

Com os dados obtidos, foi levantado a curva de resposta em frequência, com o Microsoft Excel, como mostrado na Figura 95.

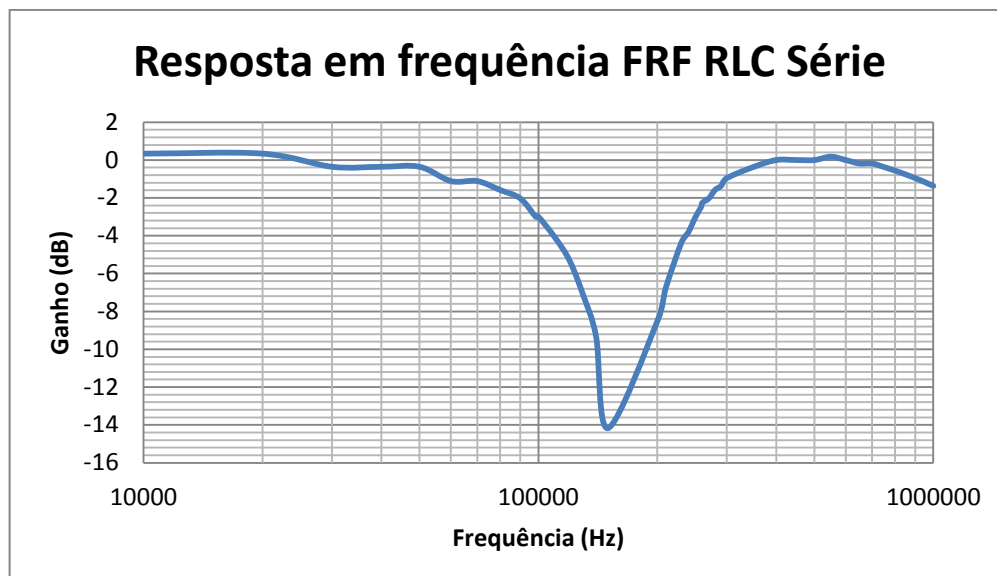


Figura 95- Curva de resposta em frequência do filtro rejeita-faixa RLC série  
 FONTE: Autoria própria (2014)

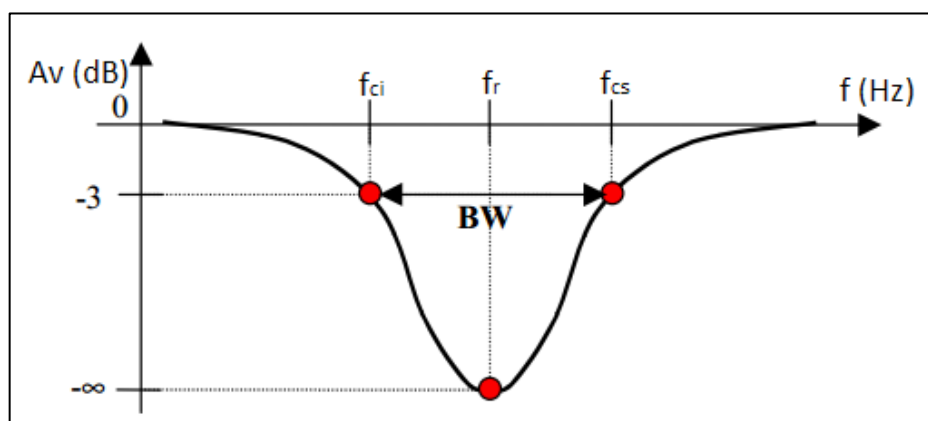


Figura 96 - Curva esperada de resposta em frequência do filtro rejeita-faixa  
 FONTE: Adaptado de Mussoi (2014)

Analisando as curvas das Figura 95 e Figura 96, podemos verificar que elas são de fato semelhantes, o que comprova, juntamente com o valor de ganho, o funcionamento do filtro projetado.

#### 4.2.9 Filtro Rejeita-Faixa RLC paralelo

O projeto do filtro rejeita-faixa RLC paralelo é mostrado na Figura 97.

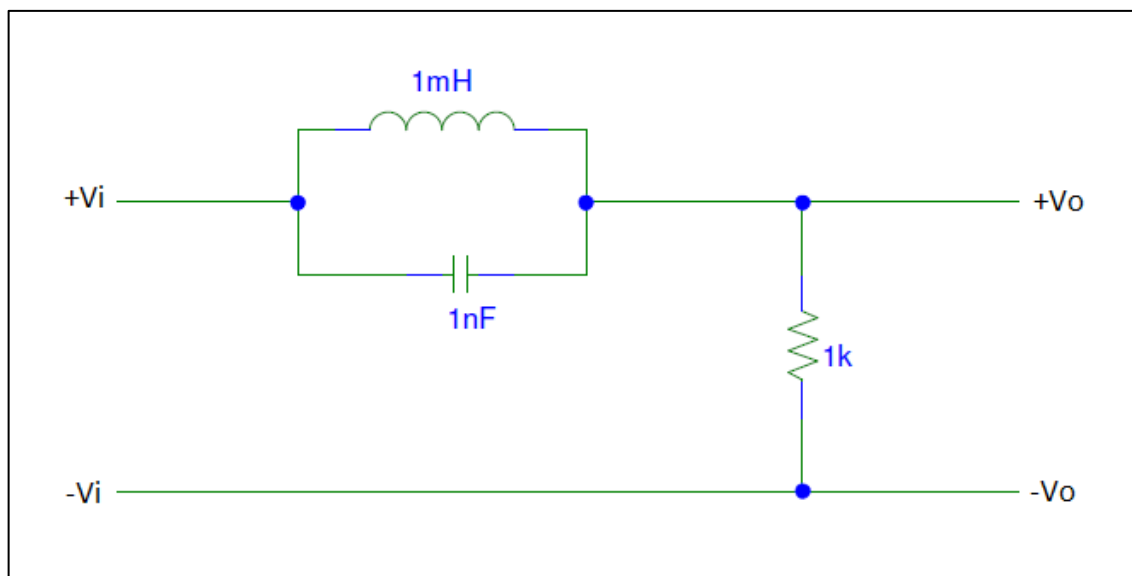


Figura 97 - Filtro rejeita-faixa RLC paralelo.  
 FONTE: Autoria própria (2014)

A frequência de corte inferior é de 98,4kHz e a frequência de corte superior é de 159,2kHz.

Os dados obtidos para o filtro rejeita-faixa RLC paralelo estão disponíveis na Tabela 4.

Tabela 4 - Dados do filtro rejeita-faixa RLC paralelo

fci=98,4kHz/fcs=258kHz/fr=159,2kHz/R=1k/L=1mH/C=1nf)				
f (Hz)	Vin (mV)	Vout (mV)	Av	Av(dB)
10k	9,60E+02	9,60E+02	1	0
20k	920	9,20E+02	1	0
30k	920	9,20E+02	1	0
40k	920	9,20E+02	1	0
50k	920	8,80E+02	0,956522	-0,386103104
60k	920	8,40E+02	0,913043	-0,790170826
70k	920	840	0,913043	-0,790170826
80k	9,20E+02	7,60E+02	0,826087	-1,659484701
90k	9,20E+02	7,60E+02	0,826087	-1,659484701
98,4k	9,20E+02	6,80E+02	0,73913	-2,625578293
100k	9,20E+02	6,80E+02	0,73913	-2,625578293
110k	9,20E+02	6,00E+02	0,652174	-3,712731539
120k	1,00E+03	5,20E+02	0,52	-5,679933127
130k	1,00E+03	4,40E+02	0,44	-7,13094647
140k	1,00E+03	2,80E+02	0,28	-11,05683937
150k	1,00E+03	1,80E+02	0,18	-14,8945499



159k	1,00E+03	1,20E+02	0,12	-18,41637508
200k	1,00E+03	3,20E+02	0,32	-9,897000434
210k	1,00E+03	3,80E+02	0,38	-8,404328068
230k	1000	480	0,48	-6,375175252
240k	1000	520	0,52	-5,679933127
250k	960	540	0,5625	-4,997549464
258k	960	580	0,604167	-4,37686479
260k	960	580	0,604167	-4,37686479
270k	960	620	0,645833	-3,797590871
280k	960	620	0,645833	-3,797590871
290k	960	660	0,6875	-3,25454595
300k	960	660	0,6875	-3,25454595
350k	920	700	0,76087	-2,373795747
400k	920	740	0,804348	-1,891122152
450k	920	760	0,826087	-1,659484701
500k	920	780	0,847826	-1,433864493
550k	920	780	0,847826	-1,433864493
600k	920	780	0,847826	-1,433864493
650k	920	780	0,847826	-1,433864493
700k	920	800	0,869565	-1,213956807
750k	920	800	0,869565	-1,213956807
800k	880	800	0,909091	-0,827853703
850k	880	800	0,909091	-0,827853703
900k	880	800	0,909091	-0,827853703
950k	880	800	0,909091	-0,827853703
1M	880	800	0,909091	-0,827853703

FONTE: Autoria própria (2014)

Com os dados obtidos, foi levantado a curva de resposta em frequência, com o Microsoft Excel, como mostrado na Figura 98.

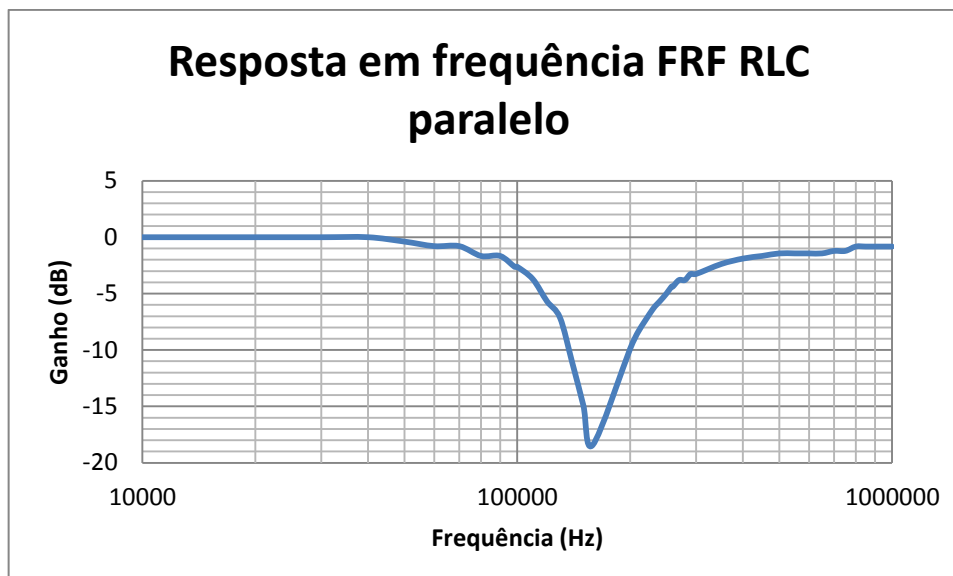


Figura 98 - Resposta em frequência do filtro rejeita-faixa RLC paralelo  
 FONTE: Autoria própria (2014)

Analisando as curvas das Figura 96 e Figura 98, podemos verificar que elas são de fato semelhantes, o que comprova, juntamente com o valor de ganho, o funcionamento do filtro projetado.

#### 4.2.10 Filtro Rejeita-Faixa duplo T

O filtro rejeita-faixa duplo T projetado é mostrado na Figura 99.

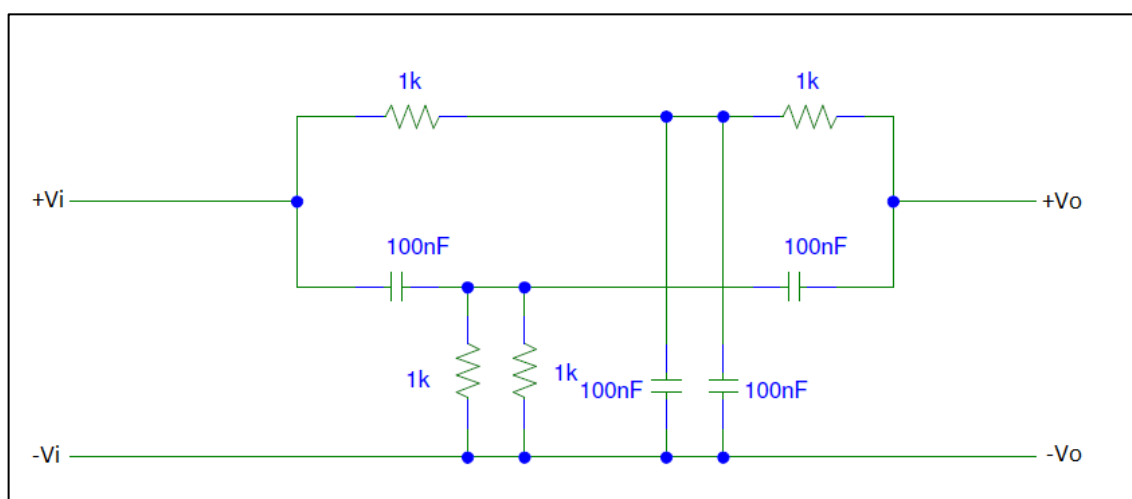


Figura 99 - Filtro rejeita-faixa duplo T  
 FONTE: Autoria própria (2014)

A frequência de máxima rejeição é de 1,5kHz.

Os dados obtidos para o filtro rejeita-faixa duplo T estão disponíveis na Tabela

5.

Tabela 5 - Dados obtidos do filtro rejeita-faixa duplo T

fo=1,5kHz/R=1k/C=10nF				
f (Hz)	Vin (mV)	Vout (mV)	Av	Av(dB)
10	1040	1040	1	0
20	1000	1040	1,04	0,340667
30	1000	1040	1,04	0,340667
40	1000	1040	1,04	0,340667
50	1000	1000	1	0
60	1000	1040	1,04	0,340667
70	1000	1040	1,04	0,340667
80	1040	1000	0,961538	-0,34067
90	1000	960	0,96	-0,35458
100	1040	960	0,923077	-0,69524
200	1000	880	0,88	-1,11035
300	1000	800	0,8	-1,9382
400	1000	640	0,64	-3,8764
500	1000	560	0,56	-5,03624
600	1000	480	0,48	-6,37518
700	1000	400	0,4	-7,9588
800	960	360	0,375	-8,51937
900	960	280	0,291667	-10,7023
1k	960	260	0,270833	-11,346
1,1k	960	200	0,208333	-13,6248
1,2k	960	160	0,166667	-15,563
1,3k	960	140	0,145833	-16,7229
1,4k	920	100	0,108696	-19,2758
1,5k	920	60	0,065217	-23,7127
1,6k	920	40	0,043478	-27,2346
1,7k	920	20	0,021739	-33,2552
1,8k	920	40	0,043478	-27,2346
1,9k	920	60	0,065217	-23,7127
2,0k	920	60	0,065217	-23,7127
2,1k	920	100	0,108696	-19,2758
2,2k	920	120	0,130435	-17,6921
2,3k	920	140	0,152174	-16,3532
2,4k	920	160	0,173913	-15,1934
2,5k	920	160	0,173913	-15,1934
3k	920	240	0,26087	-11,6715
3,5k	920	300	0,326087	-9,73333
4k	840	360	0,428571	-7,35954
4,5k	840	400	0,47619	-6,44439
5k	840	440	0,52381	-5,61653
5,5k	840	480	0,571429	-4,86076
6k	840	500	0,595238	-4,50619
6,5k	840	540	0,642857	-3,83771

7k	800	540	0,675	-3,41392
7,5k	800	560	0,7	-3,09804
8k	800	560	0,7	-3,09804
8,5k	800	600	0,75	-2,49877
9k	760	600	0,789474	-2,05325
9,5k	760	600	0,789474	-2,05325
10k	760	620	0,815789	-1,76844
15k	760	640	0,842105	-1,49267
30k	760	720	0,947368	-0,46962
40k	720	720	1	0
50k	720	720	1	0
100k	680	680	1	0

FONTE: A autoria própria (2014)

Com os dados obtidos, foi levantado a curva de resposta em frequência, com o Microsoft Excel, como mostrado na Figura 100.

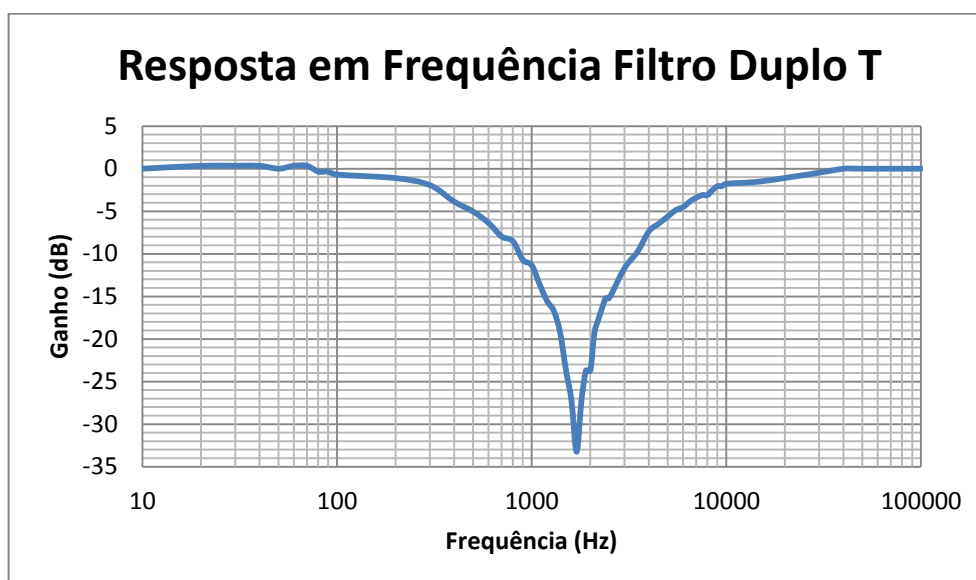


Figura 100 - Resposta em frequência do filtro rejeita-faixa duplo T

FONTE: A autoria própria (2014)

Analisando as curvas das Figura 96 e Figura 100, podemos verificar que elas são de fato semelhantes, o que comprova, juntamente com o valor de ganho, o funcionamento do filtro projetado.

### 4.3 TESTES E ANÁLISES DOS FILTROS ATIVOS

Os tipos de filtro ativos que foram projetados e testados são:

- - Filtro Passa-Baixa – 1ª. ordem
- - Filtro Passa-Baixa – 2ª. ordem (Butterworth)
- - Filtro Passa-Baixa – 3ª. ordem (Butterworth)

- - Filtro Passa-Alta – 1ª. ordem
- - Filtro Passa-Alta – 2ª. ordem (Butterworth)
- - Filtro Passa-Alta – 3ª. ordem (Butterworth)
- - Filtro Passa-Faixa – 2ª. ordem (Butterworth)
- - Filtro Passa-Faixa – 4ª. ordem (Butterworth)
- - Filtro Rejeita-Faixa – 2ª. ordem (Butterworth)
- - Filtro Rejeita-Faixa – 4ª. ordem (Butterworth)

O amplificador operacional utilizado em todos os filtros foi o componente LM741. Os testes foram feitos seguindo os seguintes passos:

1. Estipular valores de ganho e frequência de corte;
2. Determinar os valores dos componentes

O procedimento para o cálculo dos componentes dos filtros PB e PA (de todas as ordens), o filtro PF de 2ª. ordem e o filtro RF de 2ª. ordem foi o mesmo apresentado na seção de fundamentação teórica, na parte sobre a função executada.

Para o filtro PF de 4ª. ordem, foram utilizadas as equações apresentadas na parte de filtros de Butterworth da fundamentação teórica.

E para o filtro RF de 4ª. ordem, os valores dos componentes foram determinados com o auxílio do aplicativo de filtros ativos, FilterPro, da Texas Instruments.

3. Depois de montar o circuito, medir os valores de tensão de entrada e saída e calcular o ganho;
4. Plotar a curva de resposta em frequência.

#### **4.3.1 Filtro Passa-Baixa – 1ª. ordem**

Os filtros passa-baixa de 1ª. ordem tem a seguinte configuração:

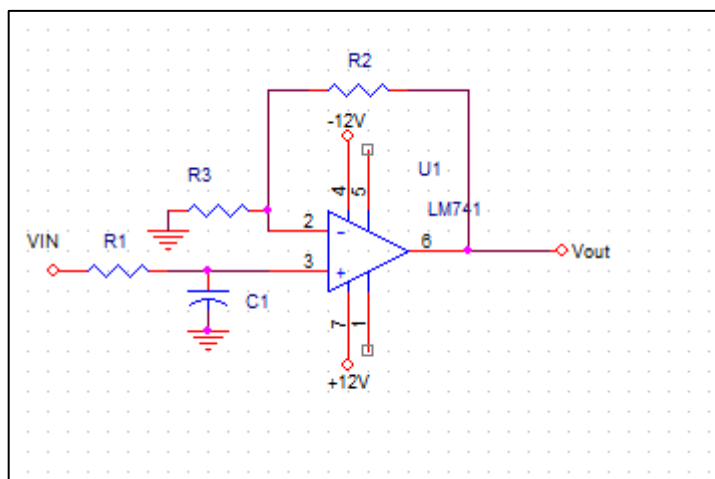


Figura 105 – Esquemático do filtro PB 1ª. ordem  
 FONTE: A autoria própria (2014).

- Primeiro passo: Estipular valores de ganho e frequência de corte.

$A_v = 15$  e  $f_c = 1\text{kHz}$

- Segundo passo: Calcular os valores dos componentes

Tabela 15 – Valores dos parâmetros e componentes do filtro passa-faixa de 1ª. ordem

Primeira Ordem					
$A_v$	$F_c$ (Hz)	$C_1$ (F)	$R_1$ ( $\Omega$ )	$R_2$ ( $\Omega$ )	$R_3$ ( $\Omega$ )
15	1000	1E-08	1,59E+04	1,40E+04	1,00E+03
Valores comerciais		1E-08	1,60E+04	1,50E+04	1,00E+03

FONTE: A autoria própria (2014).

- Terceiro Passo: Medir as tensões de entrada e saída e calcular o ganho:

Tabela 16 – Dados coletados do filtro passa-baixa de 2ª. ordem

$F_c = 1\text{kHz} / A_v = 15 / R_2 = 14\text{k}$				
f (Hz)	$V_{in}$	$V_o$	$A_v$	$A_v$ (dB)
100	0,94	13,8	14,68085106	23,33502
200	0,94	13,6	14,46808511	23,20822
300	0,94	13,6	14,46808511	23,20822
400	0,94	13,2	14,04255319	22,94892
500	0,94	12,8	13,61702128	22,68164
600	0,96	12,4	12,91666667	22,22301
700	0,98	11,6	11,83673469	21,46464
800	0,98	11,2	11,42857143	21,15984
900	0,98	10,8	11,02040816	20,84395
1000	0,98	10,2	10,40816327	20,34748
2000	0,98	6,8	6,93877551	16,82566

3000	1,02	4,8	4,705882353	13,45282
4000	1,02	3,6	3,529411765	10,95405
5000	1,02	3,2	3,137254902	9,930996
6000	1,02	2,4	2,352941176	7,432221
7000	1,02	2,2	2,156862745	6,67645
8000	1,02	1,84	1,803921569	5,124353
9000	1,02	1,68	1,647058824	4,334182
10000	1,02	1,52	1,490196078	3,464868

FONTE: Autoria própria (2014).

- Quarto Passo: Plotar a curva de resposta em frequência

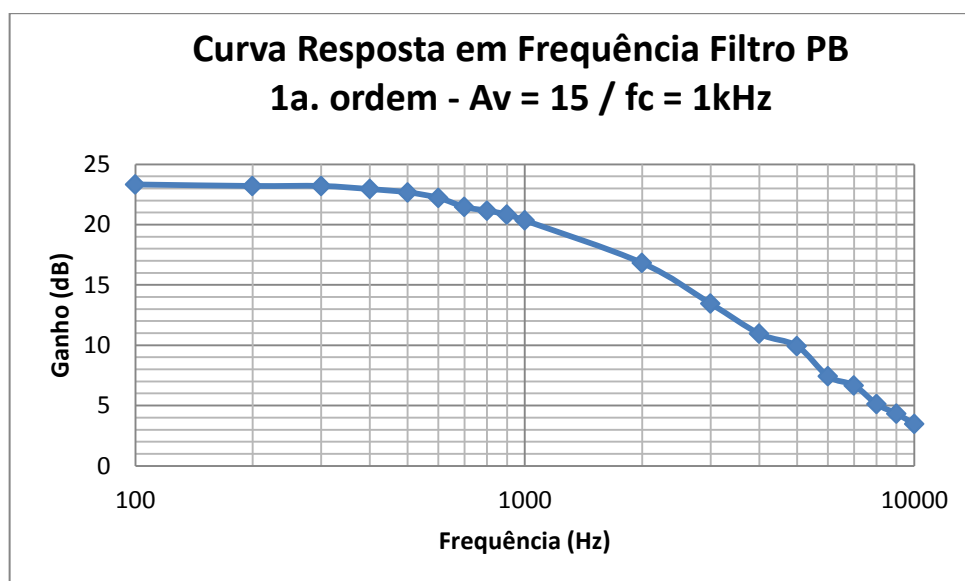


Figura 106 – Curva de resposta em frequência de um PB de ordem 2.

FONTE: Autoria própria (2014).

- Análise

Na frequência de corte (1kHz), o ganho apresenta uma queda de 3dB e uma década depois, uma queda de 17dB, valor próximo do valor esperado, 20dB.

### 4.3.2 Filtro Passa-Baixa – 2ª. ordem (Butterworth)

Os filtros passa-baixa de 2ª. ordem tem a seguinte configuração:

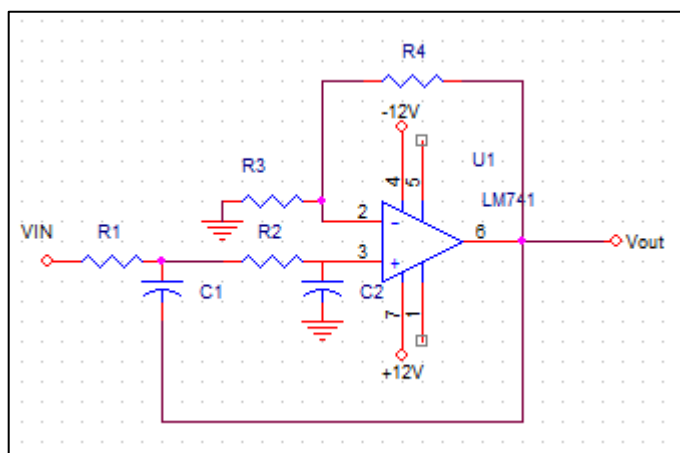


Figura 107 – Esquemático do filtro PB 2ª. ordem  
FONTE: Autoria própria (2014).

- Primeiro passo: Estipular valores de ganho e frequência de corte.

$$A_v = 5 \text{ e } f_c = 1\text{kHz}$$

- Segundo passo: Calcular os valores dos componentes

Tabela 17 – Valores dos parâmetros e componentes do filtro passa-baixa de 2ª. ordem

Segunda Ordem										
$A_v$	$F_c$ (Hz)	$\omega_0$	$a$	$b$	$C_2$ (F)	$C_1$ (F)	$R_1$ ( $\Omega$ )	$R_2$ ( $\Omega$ )	$R_3$ ( $\Omega$ )	$R_4$ ( $\Omega$ )
5	1000	6283,185	1,41	1	1E-08	4,50E-08	2,26E+04	2,50E+03	3,13E+04	1,25E+05
Valores comerciais usados					1E-08	4,70E-08	2,26E+04	2,40E+03	3,00E+04	1,20E+05

Fonte: Autoria própria (2014).

- Terceiro Passo: Medir as tensões de entrada e saída e calcular o ganho:

Tabela 18 – Dados coletados do filtro passa-baixa de 2ª. ordem

$F_c = 1\text{kHz} / A_v = 5$				
$f$ (Hz)	$V_{in}$	$V_o$	$A_v$	$A_v$ (dB)
10	1	4,96	4,96	13,90963
50	1,02	4,96	4,862745	13,73763
100	1,02	4,96	4,862745	13,73763
200	1,02	4,96	4,862745	13,73763
300	1,02	4,88	4,784314	13,59639
400	1,02	4,8	4,705882	13,45282
500	1,02	4,72	4,627451	13,30684
600	1,02	4,64	4,54902	13,15836
700	1	4,4	4,4	12,86905
800	1	4,08	4,08	12,2132
900	1	3,76	3,76	11,50376



1000	1	3,44	3,44	10,73117
1500	1,02	2,08	2,039216	6,189263
2000	1,02	1,2	1,176471	1,411621
3000	1,02	0,56	0,54902	-5,20824
4000	1,02	0,32	0,313725	-10,069
5000	1	0,22	0,22	-13,1515
6000	1	0,16	0,16	-15,9176
7000	1	0,12	0,12	-18,4164
8000	1	0,08	0,08	-21,9382
9000	1	0,08	0,08	-21,9382
10000	1,02	0,08	0,078431	-22,1102

Fonte: Autoria própria (2014).

- Quarto Passo: Plotar a curva de resposta em frequência

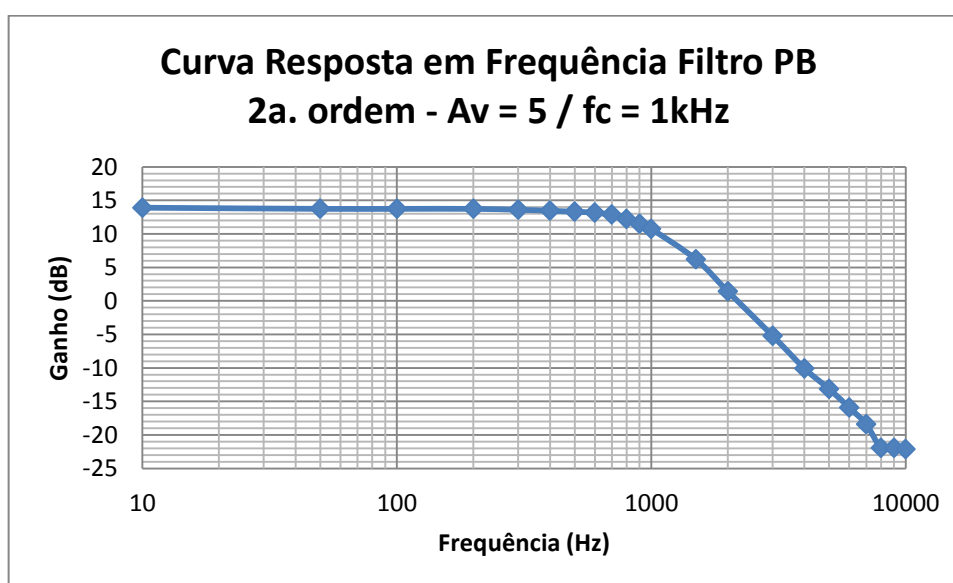


Figura 108 – Curva de resposta em frequência de um PB de ordem 2.  
FONTE: Autoria própria (2014).

- Análise

Na frequência de corte (1kHz), o ganho apresenta uma queda de 3,2dB e uma década depois, uma queda de 32dB, um pouco abaixo do esperado. Provavelmente devido ao baixo valor da tensão de entrada, quando o valor do ganho cai muito, não se consegue medir precisamente o valor da tensão de saída. Porém, é nítido que a queda do ganho é bem mais rápida neste caso que no caso anterior.

#### 4.3.3 Filtro Passa-Baixa – 3ª. ordem (Butterworth)

Os filtros passa-baixa de 3ª. ordem tem a seguinte configuração (lembrando que se trata de uma associação em cascata de um filtro PB de 1ª. ordem com um de 2ª. ordem):

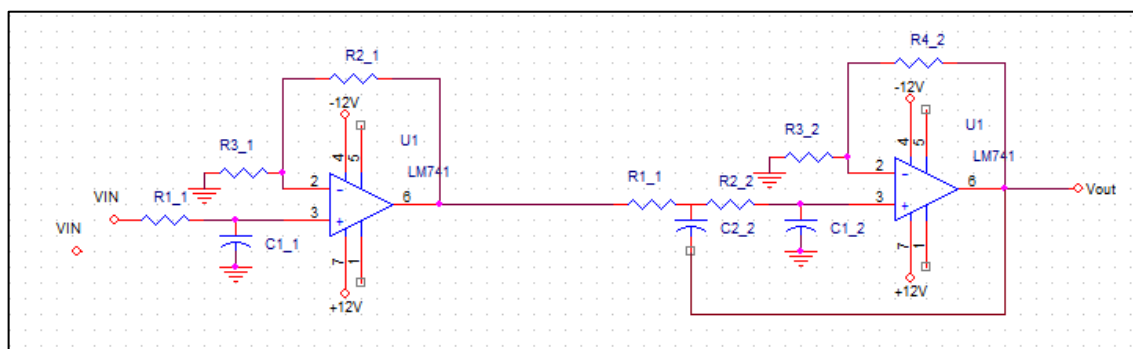


Figura 109 – Esquemático do filtro PB 3ª. ordem

FONTE: Autoria própria (2014).

- Primeiro passo: Estipular valores de ganho e frequência de corte.

$$A_v = 7,5 \text{ e } f_c = 1\text{kHz}$$

- Segundo passo: Calcular os valores dos componentes

Tabela 19 – Valores dos parâmetros e componentes do filtro passa-baixa de 3ª. ordem

Terceira Ordem										
Primeira Ordem										
		Av	Fc (Hz)	C1 (F)	R1 (Ω)	R2 (Ω)	R3 (Ω)			
		1,5	1000	1E-08	1,59E+04	510	1,00E+03			
		Valores comerciais		1E-08	1,60E+04	5,10E+02	1,00E+03			
Segunda Ordem										
Av	Fc (Hz)	Wo	a	b	C2 (F)	C1 (F)	R1 (Ω)	R2 (Ω)	R3 (Ω)	R4 (Ω)
5	1000	6283,185	1	1	1E-08	4,25E-08	3,18E+04	1,87E+03	4,21E+04	1,69E+05
Valores comerciais usados					1,00E-08	4,40E-08	3,00E+04	2,00E+03	4,30E+04	1,50E+05

Fonte: Autoria própria (2014).

- Terceiro Passo: Medir as tensões de entrada e saída e calcular o ganho

Tabela 20 – Dados coletados do filtro passa-baixa de 3ª. ordem

Fc = 1kHz / Av = 1,5 x 5				
f (Hz)	Vin	Vo	Av	Av (dB)
10	1,02	7,6	7,45098	17,44427
50	1,02	7,6	7,45098	17,44427
100	1,02	7,6	7,45098	17,44427
200	1,02	7,6	7,45098	17,44427
300	1,02	7,6	7,45098	17,44427
400	1,02	7,4	7,254902	17,21263
500	1,02	7,2	7,058824	16,97465
600	1,02	6,8	6,666667	16,47817
700	1,02	6,4	6,27451	15,9516
800	1,02	5,8	5,686275	15,09656
900	1,02	5,2	5,098039	14,14806
1000	1,02	4,6	4,509804	13,08315

1500	1,02	2	1,960784	5,848596
2000	1,02	0,96	0,941176	-0,52658
3000	1,02	0,32	0,313725	-10,069
4000	1,02	0,2	0,196078	-14,1514
5000	1,02	0,12	0,117647	-18,5884
6000	1,02	0,12	0,117647	-18,5884
7000	1,02	0,04	0,039216	-28,1308
8000	1,02	0,04	0,039216	-28,1308
9000	1,02	0,04	0,039216	-28,1308
10000	1,02	0,04	0,039216	-28,1308

Fonte: Autoria própria (2014).

- Quarto Passo: Plotar a curva de resposta em frequência

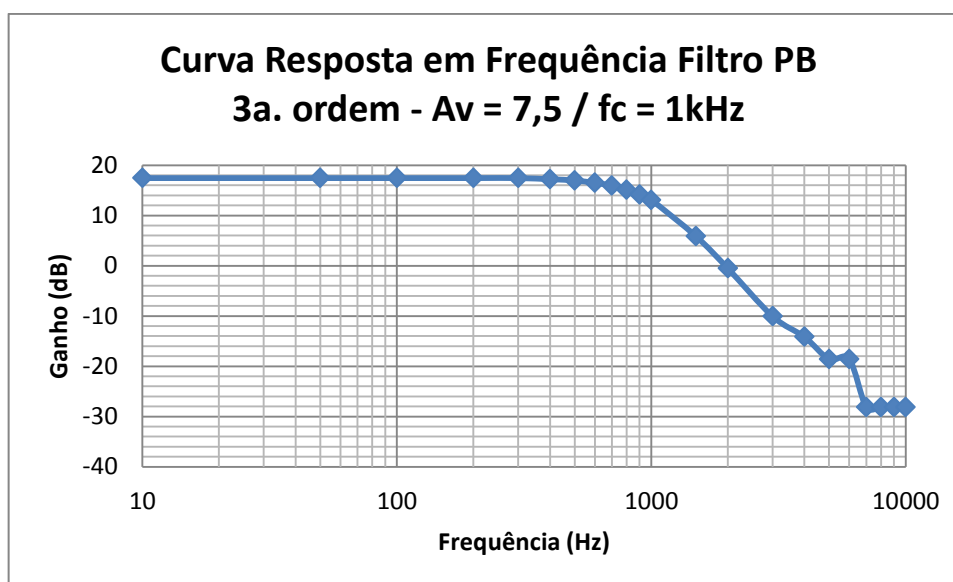


Figura 110 – Curva de resposta em frequência de um PB de ordem 3.  
FONTE: Autoria própria (2014).

- Análise

Na frequência de corte (1kHz), o ganho apresenta uma queda de 4,4 dB, um pouco acima do esperado e uma década depois, uma queda de 41 dB, um pouco abaixo do esperado. A justificativa é a mesma que no caso do filtro PB de segunda ordem. Porém, é nítido que a queda do ganho é mais rápida neste caso que no filtro de segunda e de primeira ordem.

#### 4.3.4 Filtro Passa-Alta – 1ª. ordem

Os filtros passa-alta de 1ª. ordem tem a seguinte configuração:

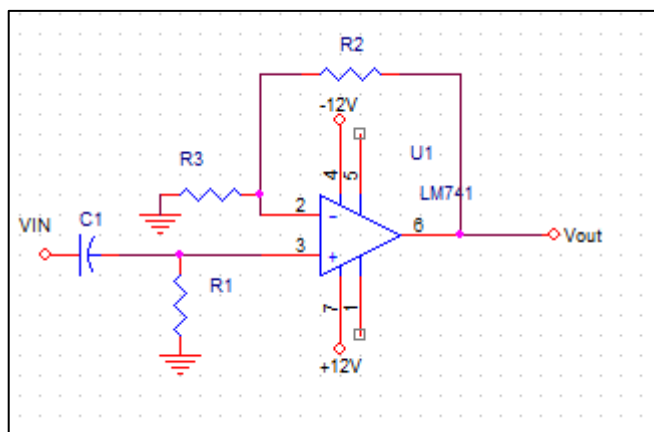


Figura 111 – Esquemático do filtro PA 1ª. ordem

Fonte: Autoria própria (2014).

- Primeiro passo: Estipular valores de ganho e frequência de corte.

$A_v = 5$  e  $f_c = 1\text{kHz}$

- Segundo passo: Calcular os valores dos componentes

Tabela 21 – Valores dos parâmetros e componentes do filtro passa-alta de 1ª. ordem

Primeira Ordem					
$A_v$	$F_c$ (Hz)	$C_1$ (F)	$R_1$ ( $\Omega$ )	$R_2$ ( $\Omega$ )	$R_3$ ( $\Omega$ )
20	100	1E-07	1,59E+04	1,90E+04	1,00E+03
Valores comerciais		1E-07	1,60E+04	2,00E+04	1,00E+03

Fonte: Autoria própria (2014).

- Terceiro Passo: Medir as tensões de entrada e saída e calcular o ganho

Tabela 22 – Dados coletados do filtro passa-alta de 1ª. ordem

$F_c = 1\text{kHz} / A_v = 20 / R_2 = 19,7\text{k}$				
$f$ (Hz)	$V_{in}$	$V_o$	$A_v$	$A_v$ (dB)
100	1,08	2,16	2	6,0206
200	1,04	4,16	4	12,0412
300	1,04	6,08	5,846154	15,3374
400	1,04	8	7,692308	17,72113
500	1,04	9,2	8,846154	18,93509
600	1,04	10,8	10,38462	20,32781
700	1,04	12	11,53846	21,24296
800	1,04	13,2	12,69231	22,07081
900	1,04	14	13,46154	22,58189
1000	1,04	14,8	14,23077	23,06457
2000	1,04	18,6	17,88462	25,04959
3000	1,04	19,8	19,03846	25,59264
4000	1,04	20	19,23077	25,67993
5000	1	20	20	26,0206

6000	1	20	20	26,0206
7000	1	20	20	26,0206
8000	1	20	20	26,0206
9000	1	20	20	26,0206
10000	1	19,8	19,8	25,9333

FONTE: Autoria própria (2014).

- Quarto Passo: Plotar a curva de resposta em frequência

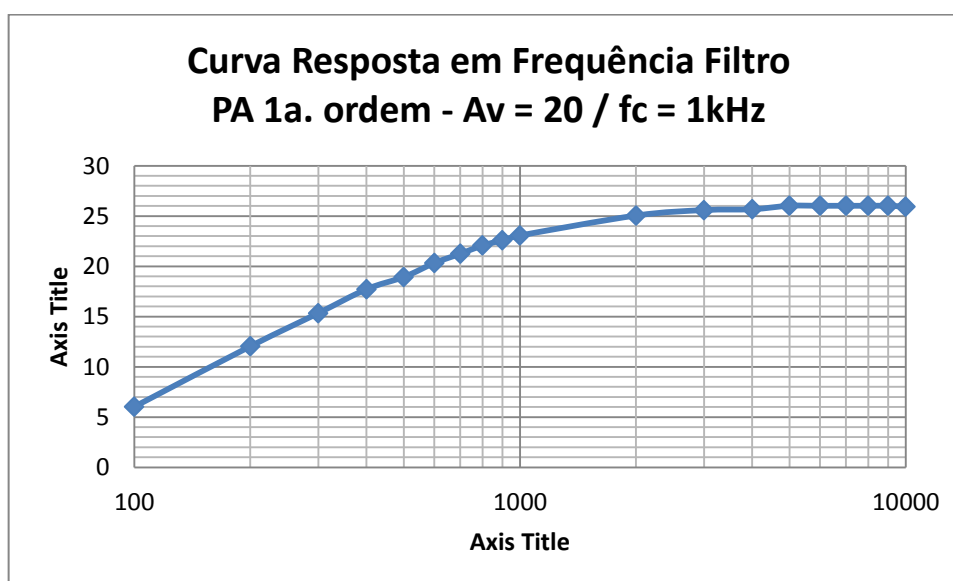


Figura 112 – Curva de resposta em frequência de um PB de ordem 3.  
FONTE: Autoria própria (2014).

- Análise

Na frequência de corte (1kHz), o ganho apresenta uma queda de 2,9 dB e uma década antes, uma diferença de 17dB, valor próximo do valor esperado, 20dB.

#### 4.3.5 Filtro Passa-Alta – 2ª. ordem (Butterworth)

Os filtros passa-alta de 2ª. ordem tem a seguinte configuração

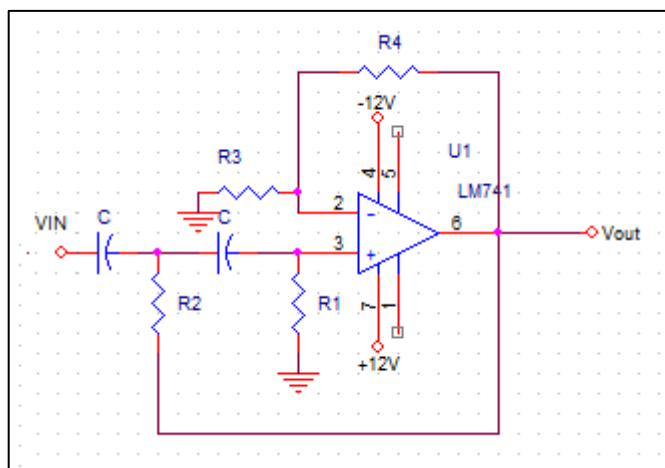


Figura 113 – Esquemático do filtro PA 2ª. ordem  
 FONTE: Autoria própria (2014).

- Primeiro passo: Estipular valores de ganho e frequência de corte.

$A_v = 5$  e  $f_c = 1\text{kHz}$

- Segundo passo: Calcular os valores dos componentes

Tabela 23 – Valores dos parâmetros e componentes do filtro passa-alta de 2ª. ordem

Segunda Ordem											
$A_v$	$F_c$ (Hz)	$\omega_0$	$a$	$b$	$C_2$ (F)	$C_1$ (F)	$R_1$ ( $\Omega$ )	$R_2$ ( $\Omega$ )	$R_3$ ( $\Omega$ )	$R_4$ ( $\Omega$ )	
5	1000	6283,185	1	1	1E-08	1E-08	9,44E+03	2,68E+04	1,18E+04	4,72E+04	
Valores comerciais usados					1,00E-08	1,00E-08	1,00E+04	2,70E+04	1,20E+04	4,70E+04	

Fonte: Autoria própria (2014).

- Terceiro Passo: Medir as tensões de entrada e saída e calcular o ganho

Tabela 24 – Dados coletados do filtro passa-alta de 2ª. ordem

$F_c = 1\text{kHz} / A_v = 5$				
$f$ (Hz)	$V_{in}$	$V_o$	$A_v$	$A_v$ (dB)
50	1,04	0,04	0,038462	-28,2995
100	1,04	0,08	0,076923	-22,2789
200	1,04	0,2	0,192308	-14,3201
300	1,04	0,44	0,423077	-7,47161
400	1,04	0,72	0,692308	-3,19402
500	1,04	1,08	1,038462	0,327808
600	1,04	1,48	1,423077	3,064568
700	1,04	1,88	1,807692	5,14249
800	1,04	2,28	2,192308	6,81803
900	1,04	2,6	2,5	7,9588
1000	1,04	2,92	2,807692	8,96699
1500	1,04	3,96	3,807692	11,61324
2000	1,04	4,4	4,230769	12,52839
3000	1,04	4,8	4,615385	13,28416
4000	1,04	4,8	4,615385	13,28416

5000	1,04	4,88	4,692308	13,42773
6000	1,04	4,88	4,692308	13,42773
7000	1,04	4,96	4,769231	13,56897
8000	1,04	4,96	4,769231	13,56897
9000	1,04	4,96	4,769231	13,56897
10000	1,04	4,96	4,769231	13,56897

Fonte: Autoria própria (2014).

- Quarto Passo: Plotar a curva de resposta em frequência

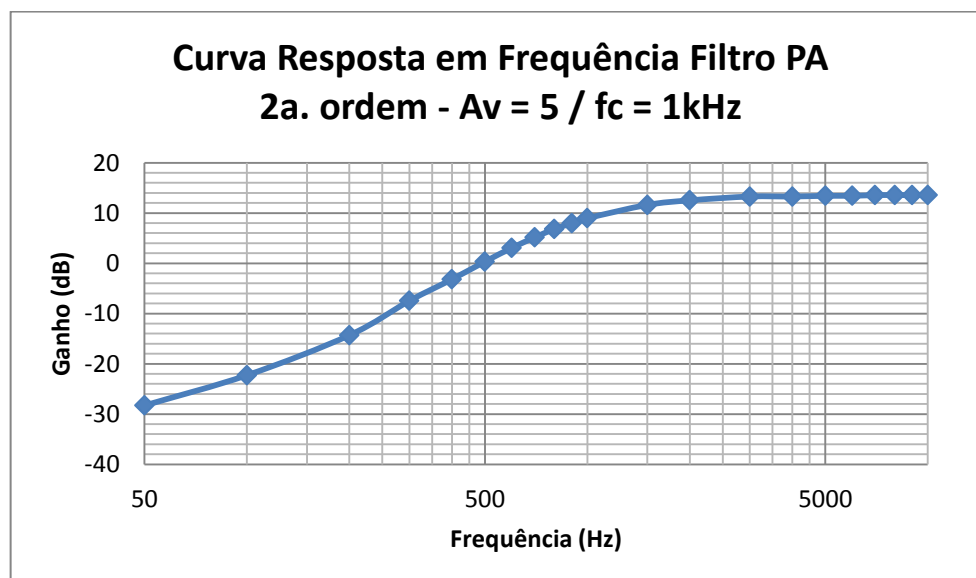


Figura 114 – Curva de resposta em frequência de um PA de ordem 2.  
FONTE: Autoria própria (2014).

- Análise

Na frequência de corte (1kHz), o ganho apresenta uma queda de 4,6dB, um pouco acima do esperado e, uma década antes, uma queda de 31dB, um pouco abaixo do esperado. Provavelmente devido ao baixo valor da tensão de entrada, quando o valor do ganho cai muito, não se consegue medir precisamente o valor da tensão de saída. Porém, é nítido que a queda do ganho é bem mais rápida neste caso que no caso do filtro de primeira ordem.

#### 4.3.6 Filtro Passa-Alta – 3ª. ordem (Butterworth)

Os filtros passa-alta de 3ª. ordem tem a seguinte configuração (lembrando que se trata de uma associação em cascata de um filtro PB de 1ª. ordem com um de 2ª. ordem):

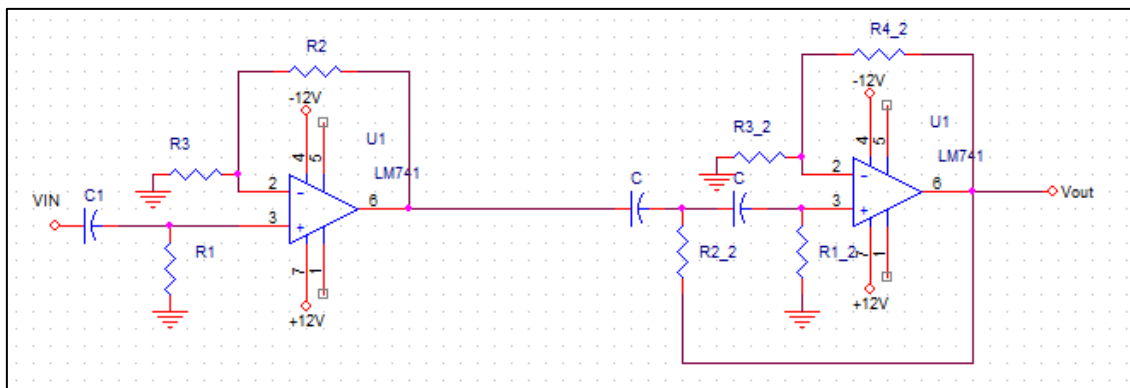


Figura 115 – Esquemático do filtro PA 3ª. ordem  
 FONTE: Autoria própria (2014).

- Primeiro passo: Estipular valores de ganho e frequência de corte.

$$A_v = 7,5 \text{ e } f_c = 1\text{kHz}$$

- Segundo passo: Calcular os valores dos componentes

Tabela 25 – Valores dos parâmetros e componentes do filtro passa-alta de 3ª. ordem

Terceira Ordem										
Primeira Ordem										
	$A_v$	$F_c$ (Hz)	$C_1$ (F)	$R_1$ ( $\Omega$ )	$R_2$ ( $\Omega$ )	$R_3$ ( $\Omega$ )				
	1,5	1000	1E-08	15915,49	510	1000				
Segunda Ordem										
$A_v$	$F_c$ (Hz)	$\omega_0$	$a$	$b$	$C_2$ (F)	$C_1$ (F)	$R_1$ ( $\Omega$ )	$R_2$ ( $\Omega$ )	$R_3$ ( $\Omega$ )	$R_4$ ( $\Omega$ )
5	1000	6283,185	1	1	1E-08	1E-08	9,44E+03	2,68E+04	1,18E+04	4,72E+04

Fonte: Autoria própria (2014).

- Terceiro Passo: Medir as tensões de entrada e saída e calcular o ganho

Tabela 26 – Dados coletados do filtro passa-alta de 3ª. ordem

$F_c = 1\text{kHz} / A_v = 1,5 \times 5$				
f (Hz)	$V_{in}$	$V_o$	$A_v$	$A_v$ (dB)
10	1,04	0,08	0,076923	-22,2789
50	1,04	0,1	0,096154	-20,3407
100	1,04	0,08	0,076923	-22,2789
200	1,04	0,12	0,115385	-18,757
300	1,04	0,28	0,269231	-11,3975
400	1,04	0,52	0,5	-6,0206
500	1,04	1	0,961538	-0,34067
600	1,04	1,6	1,538462	3,741733
700	1,04	2,36	2,269231	7,117573
800	1,04	3,2	3,076923	9,762333
900	1,04	3,92	3,769231	11,52505
1000	1,04	4,64	4,461538	12,98969
1500	1,04	6,56	6,307692	15,99741
2000	1,04	7,04	6,769231	16,61079



3000	1,04	7,36	7,076923	16,99689
4000	1,04	7,4	7,115385	17,04397
5000	1,04	7,4	7,115385	17,04397
6000	1,04	7,4	7,115385	17,04397
7000	1,04	7,4	7,115385	17,04397
8000	1,04	7,4	7,115385	17,04397
9000	1,04	7,6	7,307692	17,27561
10000	1,04	7,4	7,115385	17,04397

Fonte: Autoria própria (2014).

- Quarto Passo: Plotar a curva de resposta em frequência

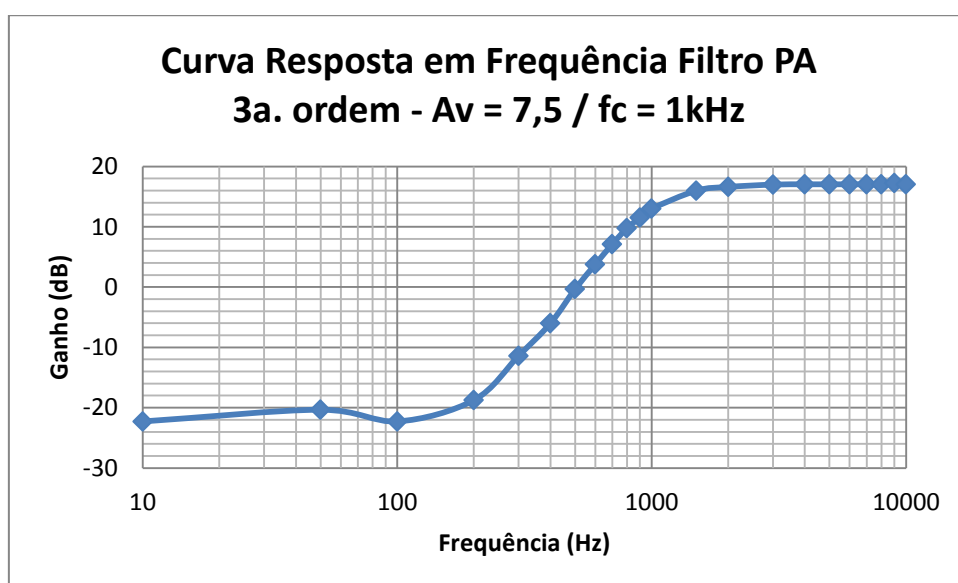


Figura 116 – Curva de resposta em frequência de um PA de ordem 3.  
FONTE: Autoria própria (2014).

- Análise

Na frequência de corte (1kHz), o ganho apresenta uma queda de 4 dB e uma década antes, uma queda de 35dB, abaixo do esperado. A justificativa é a mesma que no caso do filtro PB de segunda ordem. Porém, é nítido que a queda do ganho é mais rápida neste caso que no filtro de segunda e de primeira ordem.

#### 4.3.7 Filtro Passa-Faixa – 2ª. ordem (Butterworth)

Os filtros passa-faixa de 2ª. ordem tem a seguinte configuração

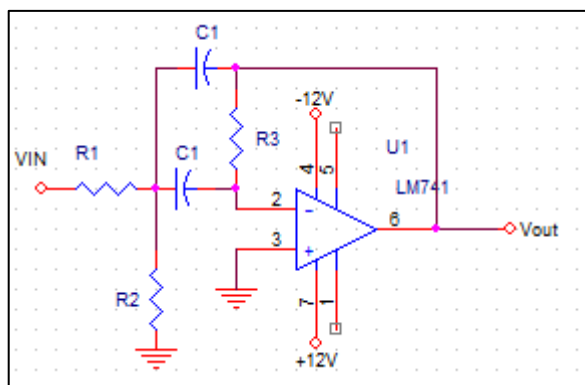


Figura 117 – Esquemático do filtro PF 2ª. ordem

FONTE: Autoria própria (2014).

- Primeiro passo: Estipular valores de ganho e frequência de corte.

$$A_v = 1,5 \text{ e } f_c = 1\text{kHz}$$

- Segundo passo: Calcular os valores dos componentes

Tabela 27 – Valores dos parâmetros e componentes do filtro passa-faixa de 2ª. ordem

$A_v$	$F_o$ (Hz)	$F_{c1}$ (Hz)	$F_{c2}$ (Hz)	$W_o$	$Q$	$C_1$ (F)	$R_1$ ( $\Omega$ )	$R_2$ ( $\Omega$ )	$R_3$ ( $\Omega$ )
1,5	979,7959	800	1200	6156,239	2,449489743	1,02E-08	2,60E+04	3,71E+03	7,80E+04
Valores comerciais usados						10n	2,70E+04	4,00E+03	7,50E+04

Fonte: Autoria própria (2014).

- Terceiro Passo: Medir as tensões de entrada e saída e calcular o ganho

Tabela 28 – Dados coletados do filtro passa-alta de 3ª. ordem

$A_v = 1,5 / \Delta f = 800\text{Hz a } 1200\text{Hz}$				
f (Hz)	$V_{in}$	$V_o$	$A_v$	$A_v$ (dB)
10	0,704	0,024	0,034091	-29,3472
50	0,728	0,028	0,038462	-28,2995
100	0,92	0,064	0,069565	-23,1522
300	1	0,208	0,208	-13,6387
500	1	0,4	0,4	-7,9588
600	1	0,544	0,544	-5,28802
700	1	0,744	0,744	-2,56854
800	1	1,02	1,02	0,172003
850	1	1,16	1,16	1,28916
900	1	1,28	1,28	2,144199
1000	1	1,42	1,42	3,045767
1100	1	1,3	1,3	2,278867
1200	1	1,08	1,08	0,668475
1300	1	0,9	0,9	-0,91515
1400	1	0,76	0,76	-2,38373
1500	1	0,66	0,66	-3,60912

1800	1	0,48	0,48	-6,37518
2000	1	0,4	0,4	-7,9588
5000	1,02	0,136	0,133333	-17,5012
10000	1,02	0,064	0,062745	-24,0484
20000	1	0,036	0,036	-28,8739

Fonte: Autoria própria (2014).

- Quarto Passo: Plotar a curva de resposta em frequência

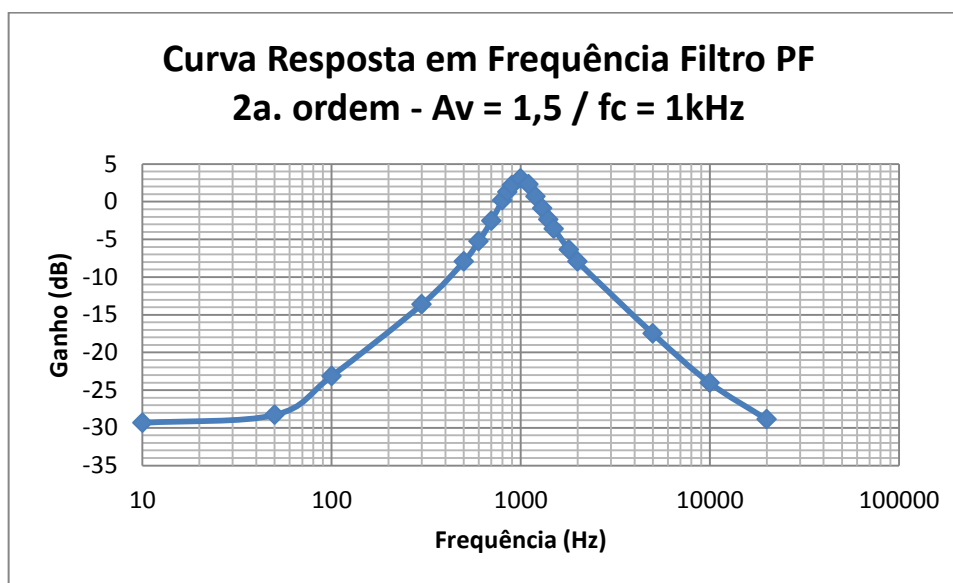


Figura 118 – Curva de resposta em frequência de um PF de ordem 2.  
FONTE: Autoria própria (2014).

- Análise

Nas frequências de corte da parte passa-alta (800Hz) e da parte passa-baixa (1200Hz), o ganho apresenta uma queda de 2,9 dB e 2,4 dB, respectivamente. Em uma década antes, a queda é de 26,6dB e uma década depois, de 27dB, abaixo do esperado. A justificativa é a mesma que no caso dos filtros PB e PA de segunda ordem.

### 4.3.8 Filtro Passa-Faixa – 4ª. ordem (Butterworth)

Os filtros passa-faixa de 4ª. ordem tem a seguinte configuração

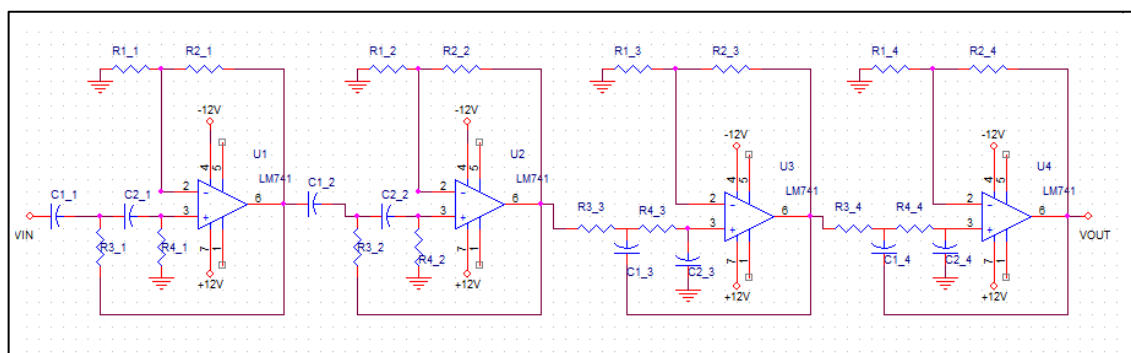


Figura 119 – Esquemático do filtro PF 4ª. ordem  
FONTE: Autoria própria (2004).

- Primeiro passo: Estipular valores de ganho e faixa de passagem .

$$A_v = 1,5 \text{ e } 1\text{kHz} \leq f_o \leq 10\text{kHz}$$

- Segundo passo: Calcular os valores dos componentes

Este projeto de filtro PF de quarta ordem foi baseado em um exemplo que consta no livro “Eletrônica”, dos autores Jacob Millman e Christos C. Halkias, página 608. Como já mencionado no início, ao procedimento usado para projetar esse filtro é o apresentado no item 3.6.3.1 do capítulo Fundamentação Teórica. Os valores calculados foram:

Tabela 29 – Valores dos parâmetros e componentes do filtro passa-faixa de 2ª. ordem

Filtro Passa Faixa													
Filtros Passa-alta (ordem 2 cada um) - $f_c = 1 \text{ kHz} / A_v = 2,5$													
$A_v$	$f_c$ (Hz)	$C1\_1$ (F)	$C2\_1$ (F)	$R1\_1$ ( $\Omega$ )	$R2\_1$ ( $\Omega$ )	$R3\_1$ ( $\Omega$ )	$R4\_1$ ( $\Omega$ )	$C1\_2$ (F)	$C2\_2$ (F)	$R1\_2$ ( $\Omega$ )	$R2\_2$ ( $\Omega$ )	$R3\_2$ ( $\Omega$ )	$R4\_2$ ( $\Omega$ )
2,5	1000	1,00E-08	1,00E-08	1,00E+04	1,20E+04	1,60E+04	1,60E+04	1,00E-08	1,00E-08	1,00E+04	1,50E+03	1,60E+04	1,60E+04
Filtros Passa-baixa (ordem 2 cada um) - $f_c = 10 \text{ kHz} / A_v = 2,5$													
$A_v$	$f_c$ (Hz)	$C1\_3$ (F)	$C2\_3$ (F)	$R1\_3$ ( $\Omega$ )	$R2\_3$ ( $\Omega$ )	$R3\_3$ ( $\Omega$ )	$R4\_3$ ( $\Omega$ )	$C1\_4$ (F)	$C2\_4$ (F)	$R1\_4$ ( $\Omega$ )	$R2\_4$ ( $\Omega$ )	$R3\_4$ ( $\Omega$ )	$R4\_4$ ( $\Omega$ )
2,5	10000	1,00E-09	1,00E-09	1,00E+04	1,20E+04	1,60E+04	1,60E+04	1,00E-09	1,00E-09	1,00E+04	1,50E+03	1,60E+04	1,60E+04

Fonte: Autoria própria (2014).

- Terceiro Passo: Medir as tensões de entrada e saída e calcular o ganho

Tabela 30 – Dados coletados do filtro passa-faixa de 4ª. ordem

$A_v = 6,25 / \Delta f = 1\text{kHz a } 10\text{kHz}$				
f (Hz)	Vin	Vo	$A_v$	$A_v$ (dB)
50	1,04	0,08	0,076923	-22,2789
100	1,04	0,08	0,076923	-22,2789
500	1,04	0,4	0,384615	-8,29947
550	1,04	0,56	0,538462	-5,37691
600	1,04	0,8	0,769231	-2,27887
650	1,04	1,1	1,057692	0,487187

700	1,04	1,46	1,403846	2,94639
750	1,04	1,88	1,807692	5,14249
800	1,04	2,34	2,25	7,04365
850	1,04	2,88	2,769231	8,847183
900	1,04	3,4	3,269231	10,28891
950	1,04	3,91	3,759615	11,50287
1000	1,04	4,4	4,230769	12,52839
1500	1,04	6,32	6,076923	15,67367
2000	1,04	6,48	6,230769	15,89083
3000	1,04	6,48	6,230769	15,89083
4000	1,04	6,56	6,307692	15,99741
5000	1,04	6,56	6,307692	15,99741
6000	1,04	6,56	6,307692	15,99741
7000	1,04	6,48	6,230769	15,89083
8000	1,04	6,24	6	15,56303
9000	1,04	5,76	5,538462	14,86778
9500	1,04	5,36	5,153846	14,24263
10000	1,04	4,88	4,692308	13,42773
10500	1,04	4,4	4,230769	12,52839
11000	1,04	3,92	3,769231	11,52505
11500	1,04	3,44	3,307692	10,3905
12000	1,04	2,96	2,846154	9,085167
12500	1,04	2,64	2,538462	8,091412
13000	1,04	2,32	2,230769	6,969093
14000	1,04	1,68	1,615385	4,165519
15000	1,04	1,36	1,307692	2,330111
16000	1,04	1,08	1,038462	0,327808
17000	1,04	0,84	0,807692	-1,85508
18000	1,04	0,68	0,653846	-3,69049
19000	1,04	0,56	0,538462	-5,37691
20000	1,04	0,44	0,423077	-7,47161
25000	1,04	0,2	0,192308	-14,3201

Fonte: Autoria própria (2014).

- Quarto Passo: Plotar a curva de resposta em frequência

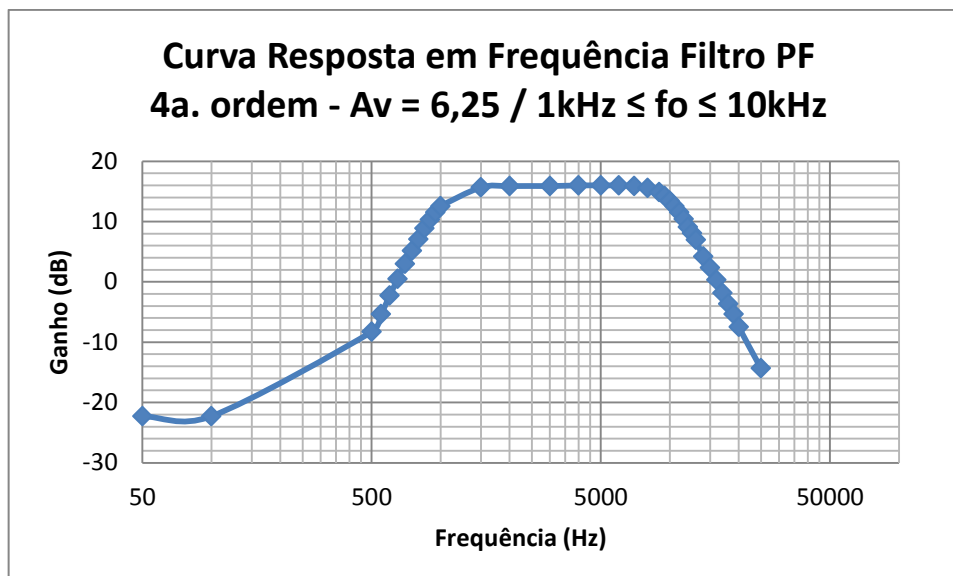


Figura 120 – Curva de resposta em frequência de um PF de ordem 4.  
FONTE: Autoria própria (2014).

#### - Análise

Nas frequências de corte da parte passa-alta (1 kHz) e da parte passa-baixa (10 kHz), o ganho apresenta uma queda de 3,5 dB e 2,5 dB, respectivamente. E mesmo não sendo possível até uma década após a segunda frequência de corte, é notável que a queda do ganho é mais rápida neste caso, com ordem igual a 4, do que no caso anterior, cuja ordem era 2.

#### 4.3.9 Filtro Rejeita-Faixa – 2ª. ordem (Butterworth)

Os filtros rejeita-faixa de 2ª. ordem tem a seguinte configuração:

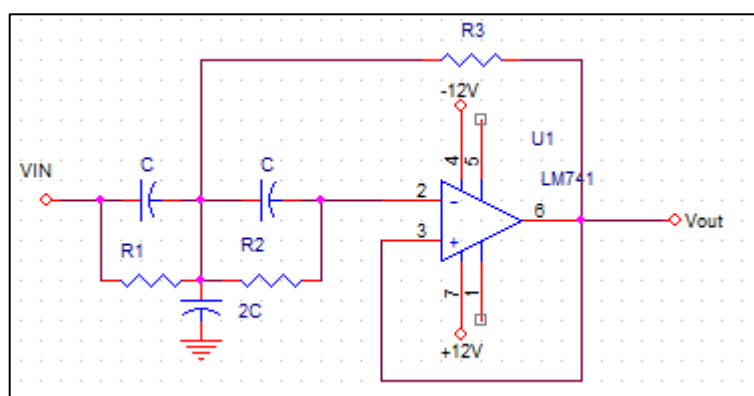


Figura 121 – Esquemático do filtro RF 2ª. ordem  
FONTE: Autoria própria (2014).

- Primeiro passo: Estipular valores de ganho e frequência de corte.

$A_v = 1$  e  $f_c = 1\text{kHz}$

- Segundo passo: Calcular os valores dos componentes

Tabela 31 – Valores dos parâmetros e componentes do filtro rejeita-faixa de 2ª. ordem

Av	Fo (Hz)	Fc1 (Hz)	Fc2 (Hz)	Wo	Q	C1 (F)	R1 (Ω)	R2 (Ω)	R3 (Ω)
1	1000	500	2000	6283,185	0,666667	1E-08	1,19E+04	2,12E+04	7,64E+03
Valores comerciais usados						1E-08	1,20E+04	2,20E+04	7,50E+04

Fonte: Autoria própria (2014).

- Terceiro Passo: Medir as tensões de entrada e saída e calcular o ganho

Tabela 32 – Dados coletados do filtro rejeita-faixa de 2ª. ordem

Av = 1 / Δf = 500Hz a 2000Hz / Q = 0,667				
f (Hz)	Vin	Vo	Av	Av (dB)
20	0,98	0,98	1	0
50	0,98	0,98	1	0
100	0,98	0,98	1	0
200	0,96	0,94	0,979167	-0,18287
300	0,98	0,86	0,877551	-1,13455
400	0,98	0,78	0,795918	-1,98263
500	0,98	0,68	0,693878	-3,17434
600	0,98	0,56	0,571429	-4,86076
800	0,98	0,26	0,265306	-11,5251
1000	0,98	0,06	0,061224	-24,2615
1200	1	0,3	0,3	-10,4576
1500	1	0,54	0,54	-5,35212
1800	1,02	0,66	0,647059	-3,78112
2000	1,02	0,74	0,72549	-2,78737
2200	1,02	0,78	0,764706	-2,33011
2500	1,02	0,82	0,803922	-1,89573
3000	1,02	0,9	0,882353	-1,08715
5000	1,02	0,98	0,960784	-0,34748
8000	1,02	1	0,980392	-0,172
10000	1	1	1	0
20000	1	0,98	0,98	-0,17548

Fonte: Autoria própria (2014).

- Quarto Passo: Plotar a curva de resposta em frequência

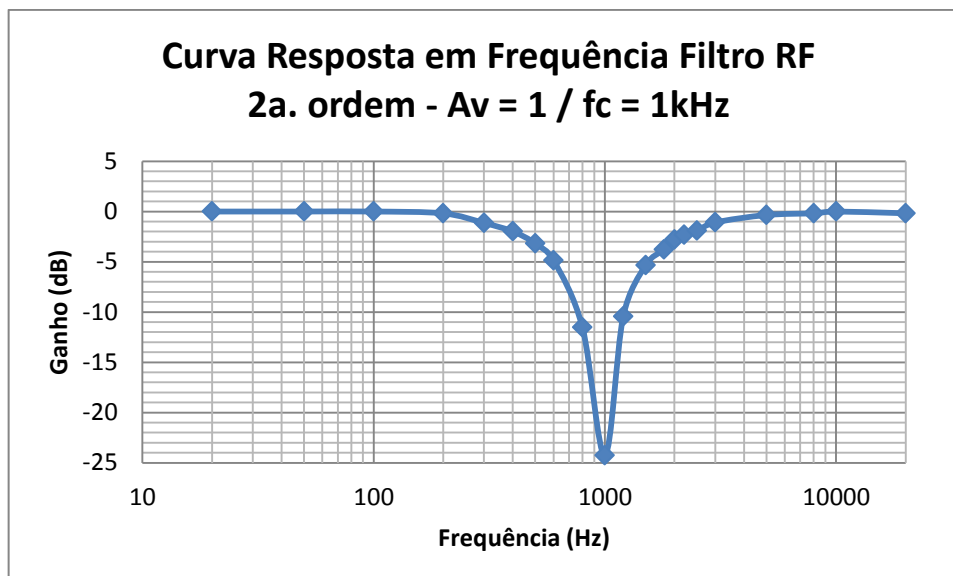


Figura 122 – Curva de resposta em frequência de um RF de ordem 2.  
FONTE: Autoria própria (2014).

- Análise

Nas frequências de corte da parte passa-baixa (500Hz) e da parte passa-alta (2000Hz), o ganho apresenta uma queda de 3,2 dB e 2,85 dB, respectivamente, perto do esperado para ambos os casos (3 dB).

#### 4.3.10 Filtro Rejeita-Faixa – 2ª. ordem (Butterworth)

Os filtros rejeita-faixa de 4ª. ordem tem a seguinte configuração:

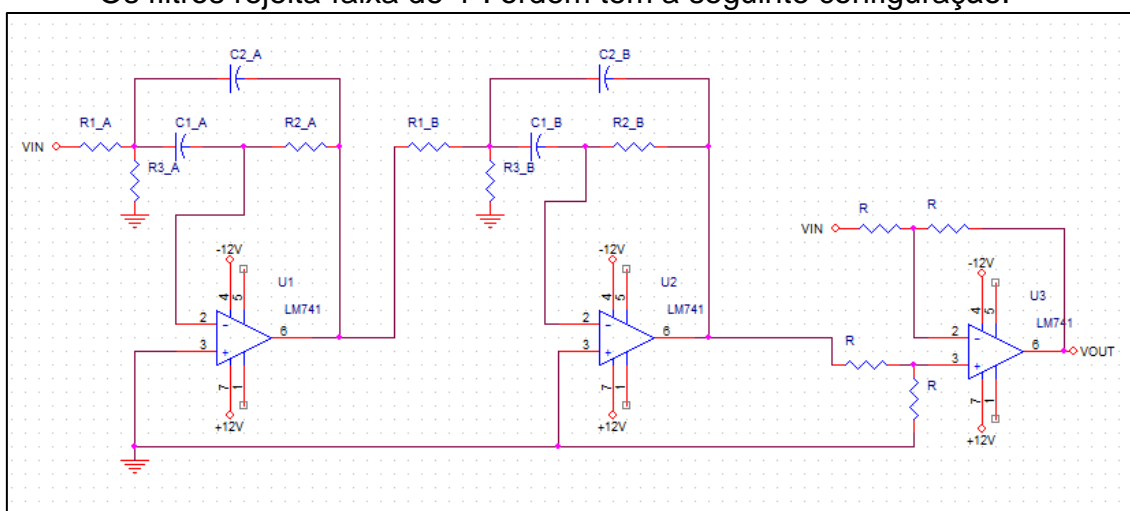


Figura 123 – Esquemático do filtro RF 4ª. ordem  
FONTE: Autoria própria (2014).

- Primeiro passo: Estipular valores de ganho e frequência de corte.

$A_v = 1$  e  $f_c = 60\text{Hz}$



- Segundo passo: Calcular os valores dos componentes

Neste caso foi utilizado o aplicativo do Texas Instruments, Filter Pro, para gerar os valores dos componentes.

Tabela 33 – Valores dos parâmetros e componentes do filtro rejeita-faixa de 4ª. ordem

Filtro RF 1					Filtro RF 1					Somador
R1 (Ω)	R2 (Ω)	R3 (Ω)	C1 (F)	C2 (F)	R1 (Ω)	R2 (Ω)	R3 (Ω)	C1 (F)	C2 (F)	R (Ω)
5,10E+04	1,50E+05	1,00E+04	1,00E-07	1,00E-07	2,70E+04	5,60E+03	8,20E+04	1,00E-07	1,00E-07	1,00E+04

Fonte: Autoria própria (2014).

- Terceiro Passo: Medir as tensões de entrada e saída e calcular o ganho

Tabela 34 – Dados coletados do filtro rejeita-faixa de 4ª. ordem

Av = 1 / Δf = 46,6Hz a 77,2Hz				
f (Hz)	Vin	Vo	Av	Av (dB)
5	0,088	0,128	1,454545	3,254546
10	0,168	0,24	1,428571	3,098039
20	0,32	0,4	1,25	1,9382
30	0,448	0,6	1,339286	2,537465
35	0,512	0,72	1,40625	2,961251
40	0,608	0,8	1,315789	2,383728
41	0,64	0,8	1,25	1,9382
42	0,68	0,84	1,235294	1,835407
43	0,7	0,84	1,2	1,583625
44	0,72	0,84	1,166667	1,338936
45	0,76	0,8	1,052632	0,445528
46	0,8	0,76	0,95	-0,44553
47	0,82	0,72	0,878049	-1,12963
48	0,84	0,68	0,809524	-1,83541
49	0,84	0,64	0,761905	-2,36199
50	0,84	0,58	0,690476	-3,21703
60	0,84	0,2	0,238095	-12,465
70	0,8	0,4	0,5	-6,0206
73	0,78	0,48	0,615385	-4,21707
74	0,78	0,5	0,641026	-3,86249
75	0,78	0,56	0,717949	-2,87813
76	0,76	0,6	0,789474	-2,05325
77	0,76	0,64	0,842105	-1,49267
78	0,76	0,66	0,868421	-1,22539
79	0,76	0,7	0,921053	-0,71431
80	0,76	0,7	0,921053	-0,71431
85	0,76	0,86	1,131579	1,073697
90	0,76	0,94	1,236842	1,846285
100	0,8	1,04	1,3	2,278867
150	0,92	1,08	1,173913	1,392719
200	0,96	1,06	1,104167	0,860693

300	1	1,04	1,04	0,340667
400	1	1,04	1,04	0,340667
500	1	1,04	1,04	0,340667
1000	1	1,04	1,04	0,340667

Fonte: Autoria própria (2014).

- Quarto Passo: Plotar a curva de resposta em frequência

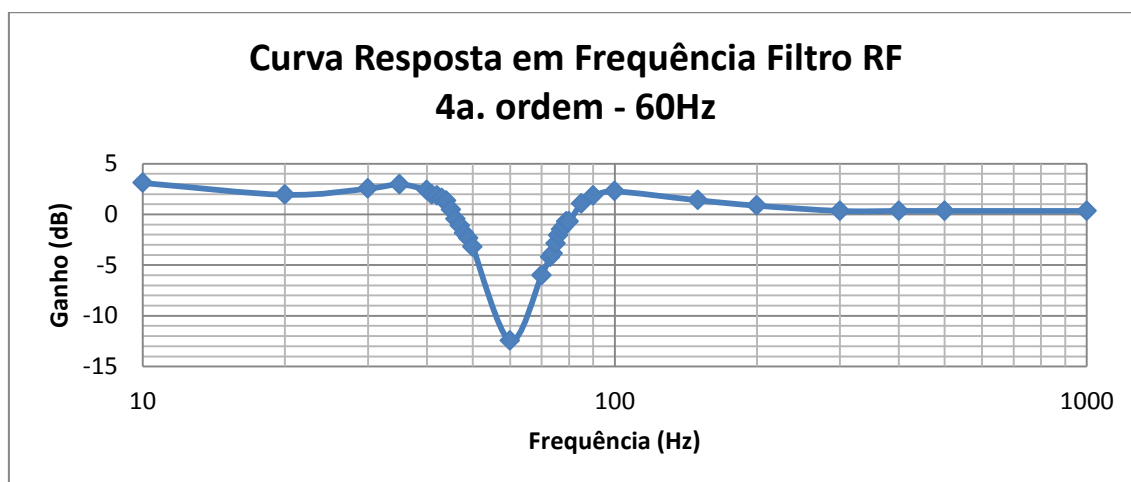


Figura 124 – Curva de resposta em frequência de um RF de ordem 4.  
FONTE: Autoria própria (2014).

- Análise

Pelo gráfico, é nítido que a frequência do sinal eliminado é de 60 Hz. Como mencionado no início dessa seção, para projetar e analisar os resultados de filtros de ordem maior, foi utilizado um aplicativo da Texas Instruments, chamado Filter Pro. A simulação do aplicativo resultou na seguinte curva de resposta em frequência:

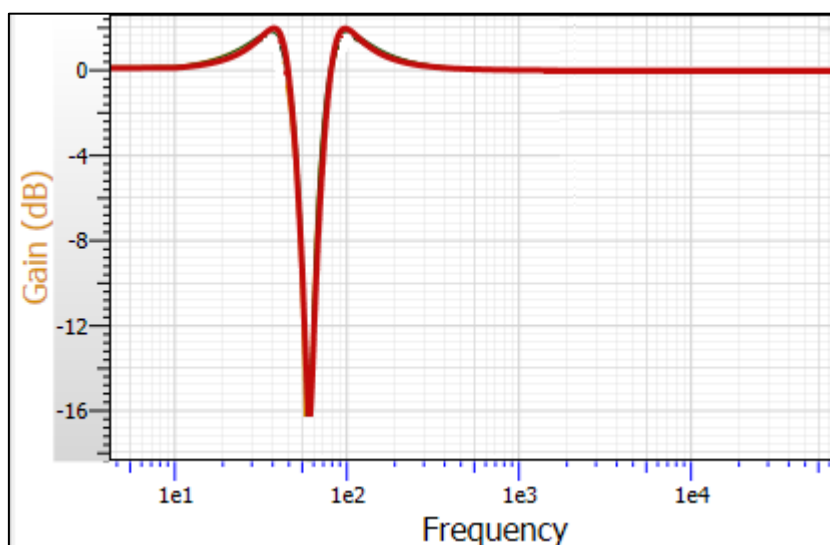


Figura 125 – Curva de resposta em frequência para um RF de ordem 4 simulado pelo Filter Pro  
FONTE: Filter Pro

Nota-se que a forma de onda é muito semelhante. Na simulação, o ganho tem uma queda acerca de 16 dB. No filtro projetado, essa queda tem um valor em torno de 12,7 dB, próximo do valor esperado.

## 5 DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

Este capítulo é destinado para fazer uma discussão e uma análise geral dos resultados obtidos, apresentando algumas possíveis melhorias, bem como a conclusão sobre o sistema projetado.

### 5.1 POSSÍVEIS MELHORIAS

O que pode ter faltado a este projeto foi o desenvolvimento de filtros passivos de ordens maiores, isso devido a não ser considerado um acréscimo significativo didaticamente que compensasse o tempo de trabalho, por isso foi decidido focar nos filtros ativos que tem mais utilidade prática atualmente.

Algumas possíveis melhorias foram pensadas durante o desenvolvimento do projeto, foram elas:

- Como a bancada desenvolvida foi um protótipo e ainda não foi passada pelo teste com o cliente (alunos), provavelmente sofrerá atualizações;
- O gerador de funções poderia ser acoplado juntamente à bancada, isso deixaria o kit mais prático, facilitando no transporte e utilização;
- Adicionar filtros passivos de ordens maiores.

### 5.2 DIFICULDADES ENCONTRADAS

Algumas dificuldades foram encontradas durante o desenvolvimento do projeto, foram elas:

- Escassez de bons materiais sobre filtros passivos – Houve grande dificuldade para encontrar materiais de boa referência para o desenvolvimento de filtros passivos. Os livros encontrados como fonte cobrem superficialmente a parte de filtros passivos, focando o estudo mais sobre filtros ativos. Não foi encontrado nenhum software de desenvolvimento de filtros passivos, como o FilterPro, da Texas Instruments, para filtros ativos portanto os filtros passivos projetados foram desenvolvidos na base da tentativa e erro.
- Apesar de ser um componente de fácil uso e que apresenta bom desempenho, o amplificador operacional possui algumas limitações. Uma delas, a qual teve influência direta para projetar os filtros ativos, é a relação ganho *versus* frequência. Devido a esse fator, em alguns testes com certos valores de ganho, as medições acabavam se distorcendo, mesmo quando a frequência de entrada era consideravelmente abaixo da frequência limite, apresentada no gráfico da Figura 40. Assim, alguns filtros tiveram que ser reprojatados, principalmente os filtros passa-baixa e passa-alta, cujos ganhos testados são maiores.
- Outra dificuldade, já citada anteriormente, foi em relação ao *software* para projetar a PCB dos filtros ativos. O programa usado inicialmente foi o Orcad Layout. Mas como algumas funções não eram muito práticas, a solução foi optar por outro *software* similar e o escolhido foi o Altium Designer.

### 5.3 CONCLUSÃO

Os objetivos propostos por este trabalho foram:

- Desenvolver uma bancada para a prática;
- Desenvolver material de apoio com explicações, exemplos e aplicações;
- Desenvolver um gerador de funções utilizando um DDS e o Arduino.

Apesar das dificuldades citadas, os objetivos específicos foram executados com sucesso dentro do prazo estipulado. O sistema permite testes de circuitos que implementam filtros analógicos - sendo estes passivos e ativos - com frequências geradas com a tecnologia DDS, na faixa de 5 Hz a 2 MHz.

Tanto para filtros passivos e ativos, é possível a implementação de filtros dos tipos passa-baixa, passa-alta, passa-faixa e rejeita-faixa. E para completar o aprendizado, o material didático elaborado pode auxiliar o usuário na utilização da bancada.

## 6 REFERÊNCIAS

ALDO, Aldoberto. **Análise de Circuitos e Formas de onda**. São Paulo, 2008.

ALTIUM DESIGNER. Disponível em  
<[http://www.add.ece.ufl.edu/4924/docs/Altium Polygon Pour Clearance.pdf](http://www.add.ece.ufl.edu/4924/docs/Altium_Polygon_Pour_Clearance.pdf)>  
Acesso em 1 de mar. 2014.

ARQUIVOS GERBER. Disponível em  
<<http://micropress.com.br/application/assets/files/gerando-gerber-no-altium-designer.pdf>> Acesso em 4 de mar. 2014

BAND STOP FILTERS. Disponível em:  
< [http://www.allaboutcircuits.com/vol\\_2/chpt\\_8/5.html](http://www.allaboutcircuits.com/vol_2/chpt_8/5.html)> Acesso em: 20 de fev.  
2014.

BOYLESTAD, Robert L.; NASHELSKY, Louis. **Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos**. São Paulo,: Pearson, 2004.

BRADSHAW, A. B., “Filtros: Teoria e Prática”. Revista Elektor Eletrônica número 16, 1987.

BRAGA, Newton C. Amplificadores Operacionais. Disponível em:  
<<http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/eletronica/52-artigos-diversos/6820-alimentacao-de-operacionais-com-fontes-simples-art842>> Acesso em  
13 de dez. 2013

CARTER, Bruce; BROWN, Thomas R. **Handbook of Operational Amplifier Applications**. Texas Instruments, 2009.

CERUTTI, Fernando. **Comunicação de Dados e Redes de Computadores**. Florianópolis, 2000.

CONVERSÃO MILÍMETRO EM MILS. Disponível em  
<<http://www.convertunits.com/from/mm/to/mils>> Acesso em 28 de fev. 2014.

ESQUEMÁTICO DO DDS, disponível em:  
< <http://www.minikits.com.au/doc/AD9850-DDS-01.pdf>> Acesso em: 13 de dez. 2013.

FILTERS. Disponível em:  
< <http://mysite.du.edu/~etuttle/electron/elect15.htm>> Acesso em: 25 de fev. 2014.

FILTER PRO. Disponível em: < <http://www.ti.com/tool/filterpro>> Acesso em 18 de jan. 2014.

FILTROS ATIVOS. Disponível em: <  
<http://www.ebah.com.br/content/ABAAfzDUAJ/eletronica-2-filtros-ativo>> Acesso em : 21 de jan.2014.

FONTE SIMÉTRICA. Disponível em <<http://www.electronica-pt.com/circuitos/pt/fonte-alimentacao/15-12v-and-15v-symmetric-power-supply.html>>  
Acesso em 8 de jan. 2014

FUNCIONAMENTO DOS BOTÕES DO LCD. Disponível em: <  
<[http://www.dfrobot.com/wiki/index.php/Arduino\\_LCD\\_KeyPad\\_Shield\\_%28SKU:\\_D\\_FR0009%29](http://www.dfrobot.com/wiki/index.php/Arduino_LCD_KeyPad_Shield_%28SKU:_D_FR0009%29)> 13 de dez. 2013.

IRWIN, David. **Análise de Circuitos em Engenharia**. São Paulo: Makron Books, 2005.

MILLMAN, Jacob; HALKIAS, Christos C. **Eletrônica**. São Paulo: McGraw-Hill, 1981.

MONK, Simon. **Programação com Arduino**. Porto Alegre: Bookman, 2013.

MUSSOI, Fernando L.R. **Resposta em Frequência: Filtros Passivos**. Florianópolis, 2004.

PERTENCE Jr., Antonio. **Amplificadores Operacionais e Filtros Ativos**. São Paulo: McGraw-Hill, 1988.

PROJETO DE FILTROS. Disponível em: <  
<http://www.poli.br/~jener/disciplinas/Eletronica/Aulas/8-%20FILTROS%20ATIVOS%20PROJETOS%20%5BModo%20de%20Compatibilidad e%5D.pdf>> Acesso em 21 jan.2014.

ROMANO, Hélio D. **Filtros e Linhas**. Rio de Janeiro, 1982.

SCHULER, Charles. **Eletrônica II**. São Paulo: Bookman, 2013.

SEDRA, Adel S.; SMITH, Kenneth C. **Microeletrônica**. São Paulo: Pearson, 2000.

SHIELD LCD. Disponível em: <<http://labdegaragem.com/profiles/blogs/tutorial-como-utilizar-lcd-shield>> Acesso em 22 dez. 2013.

SILVA, Fener T. L. Filtros ativos: Projetos. Disponível em <<http://www.poli.br/~jener/disciplinas/Eletronica/Aulas/8-%20FILTROS%20ATIVOS%20PROJETOS%20%5BModo%20de%20Compatibilidad e%5D.pdf>> Acesso em 10 de jan. 2014

SOUZA, Luiz. Como fazer fonte simétrica. Disponível em: <<http://www.youtube.com/watch?v=ee8Pem1kYRQ>> Acesso em 8 de jan. 2014.

TERROSO, Anderson. Orcad. Disponível em <<https://sites.google.com/site/andterroso/orcad>> Acesso em 6 de fev.2014.

TEXAS INSTRUMENTS. Disponível em:

< [www.ti.com/lit/an/snoa224a/snoa224a.pdf](http://www.ti.com/lit/an/snoa224a/snoa224a.pdf)> Acesso em: 24 de fev. 2014.



TOLERÂNCIA DOS CAPACITORES. Disponível em  
<<http://eletronicanoel.blogspot.com.br/2012/05/curso-de-eletronica-capacitores.html>>

Acesso em 10 de jan. 2014

## 7 APÊNDICES

APÊNDICE A – MATERIAL DE APOIO TEÓRICO PARA DESENVOLVIMENTO DOS FILTROS PASSIVOS E ATIVOS.

## 1. INTRODUÇÃO

A atuação de filtros tem apresentado um crescimento significativo na área da eletrônica. É raro encontrar algum sistema eletrônico que não contenha nenhum tipo de filtro. Seu papel vem sendo de grande importância principalmente nos ramos das telecomunicações e da instrumentação industrial. Um exemplo que pode ser citado e que é facilmente encontrado no dia-a-dia são os chamados MODEM (*Modulation-DEModulator*), através dos quais os terminais de computadores são conectados à rede telefônica. E os filtros (ativos) são elementos constituintes básicos desses equipamentos (PERTENCE, 1988, p.189).

Segundo Brandshaw (1987), filtros podem ser definidos como “um circuito que apresenta um comportamento típico em função da frequência do sinal a ele aplicado”, de modo que possibilite a passagem de sinais de determinadas frequências, removendo ou amenizando os sinais com frequências indesejadas.

Esses circuitos são compostos basicamente por impedâncias interconectadas e o sinal de saída depende dos valores das resistências, capacitâncias e indutâncias presentes no sistema e de como esses elementos estão conectados entre si (MUSSOI, 2004, p.24).

A tecnologia mais antiga para a aplicação de filtros utiliza indutores e capacitores, formando circuitos chamados de filtros passivos LC. No entanto, os indutores apresentam algumas limitações, tais como impossibilidade de serem produzidos na forma monolítica (ou em CIs), incompatibilidade com as técnicas modernas de montagem de sistemas eletrônicos, além de serem inviáveis para certas frequências por conta de seu tamanho volumoso. Por esse motivo, vem sendo cada vez mais viável os filtros que não fazem uso de indutores. Desses, os mais conhecidos são os filtros ativos RC, os quais utilizam amplificadores operacionais, motivo pelo qual são considerados filtros ativos, combinados com os elementos passivos, resistores e capacitores (SEDRA, Adel S.; SMITH, Kenneth C., 2000, p.812).

Considerando essa crescente importância em diversas áreas da tecnologia, especialmente na eletrônica, a realização desse projeto tem a intenção de incentivar o conhecimento sobre filtros, propondo uma forma prática e didática de aprendizado sobre o assunto. Serão abordados os dois tipos de filtros anteriormente mencionados, filtros passivos e ativos. O sistema é composto basicamente por uma bancada, onde serão implementados os circuitos dos filtros analógicos, cujo sinal de entrada será produzido por um gerador de função usando a tecnologia DDS.

## 2. FILTROS PASSIVOS

Os filtros passivos são circuitos construídos apenas com elementos passivos, ou seja, capacitores, indutores e resistores.

Uma outra característica desses filtros é que o ganho de tensão é sempre menor ou igual a um (ou 0 dB), já que não possuem um dispositivo ativo para amplificar o sinal.

### 2.1 FILTRO PASSA-BAIXA (FPB)

Um filtro passa-baixa passivo é um circuito que permite a passagem de sinais de tensão e corrente somente em frequências abaixo da frequência de corte ( $f_c$ ), atenuando frequências que ultrapassam esse valor.

#### 2.1.1 Filtro Passa-Baixa Ideal

Para uma frequência abaixo da frequência de corte ( $f_c$ ), o ganho é unitário, ou seja, o módulo do sinal de entrada é igual ao de saída. Para frequências acima da frequência de corte o ganho é zero, ou seja, o módulo do sinal de saída é atenuado até zero.

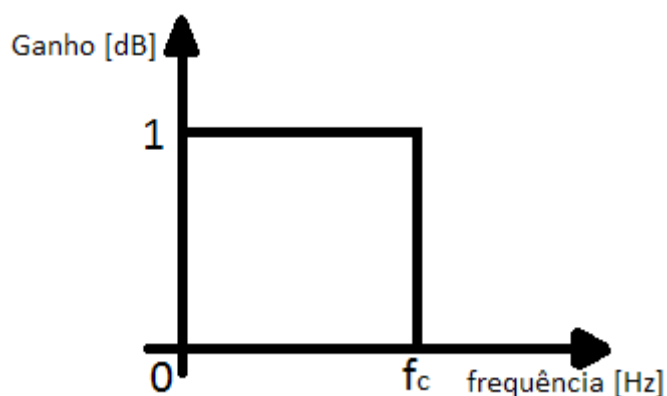


Figura 101 - Curva de resposta em frequência para um Filtro Passa-Baixa Ideal

Simbologia usual:

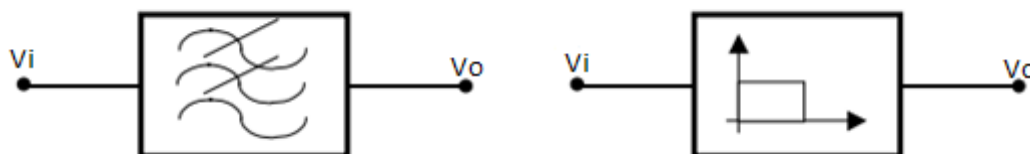


Figura 102 - Simbologia usual para filtros passa-baixa

### 2.1.2 Filtro Passa-Baixa RL

Um circuito passivo RL, como mostrado na figura 2.1.2-1, comporta-se como filtro passa-baixa real.

Para sinais de baixa frequência, o indutor apresenta um valor baixo de reatância,  $X_L \ll R$ , e seu comportamento tende a um curto-circuito. Assim, a maior parte da tensão de entrada estará sobre o resistor de saída.

Para sinais de alta frequência, o indutor apresenta um valor alto de reatância,  $X_L \gg R$ , e seu comportamento tende a um circuito aberto. Assim, a maior parte da tensão de entrada estará sobre o indutor e a tensão sobre o resistor de saída será muito pequena.

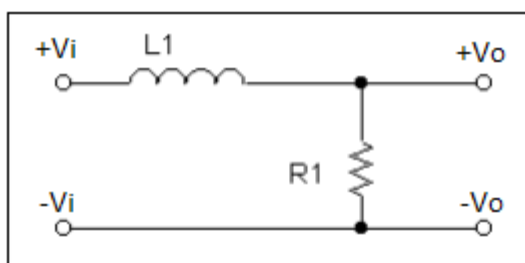


Figura 103 - Filtro Passa-Baixa RL

#### 2.1.2.1 GANHO E FASE

Para este circuito, a tensão de saída em função da tensão de entrada pode ser dada pela expressão:

$$V_o = \frac{R \cdot L}{R + X_L} = \frac{R}{R + j\omega L} \cdot V_i$$

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{R}{R + j\omega L}$$

Se fatorarmos a expressão, dividindo tanto o numerador quanto o denominador por R, temos:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{R}{R + j\omega L} \cdot \frac{R}{R} = \frac{1}{1 + j\omega \frac{L}{R}} = \frac{1}{1 + j \cdot 2\pi f \frac{L}{R}}$$

Assim, essa é a Função de Transferência de um filtro passa-baixa RL, na forma fatorada:

$$H(2\pi f) = \frac{1}{1 + j \cdot 2\pi f \frac{L}{R}}$$

Ao fazermos o módulo da função de transferência, obtemos o Ganho e a Fase.

Portanto, a expressão do ganho é dada por:

$$Av = \sqrt{\frac{1}{1 + (2\pi f \frac{L}{R})^2}}$$

E a expressão da fase é dada por:

$$\alpha = -\arctg(2\pi f \frac{L}{R})$$

### 2.1.2.2 FREQUÊNCIA DE CORTE

Sabemos que o ganho na frequência de corte é:

$$Av = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707$$

Então:

$$\frac{1}{\sqrt{2}} = \sqrt{\frac{1}{1 + (2\pi f_c \frac{L}{R})^2}}$$

Isolando  $f_c$ , teremos a frequência de corte para um filtro passa-baixa RL:

$$f_c = \frac{R}{2\pi L}$$

Na frequência de corte, a fase será:

$$\alpha = -45^\circ$$

### 2.1.2.3 CURVAS CARACTERÍSTICAS

Com a expressão do ganho e da fase é possível traçar as curvas de resposta em frequência do filtro passa-baixa RL, como indicado nas figuras 4 e 5.

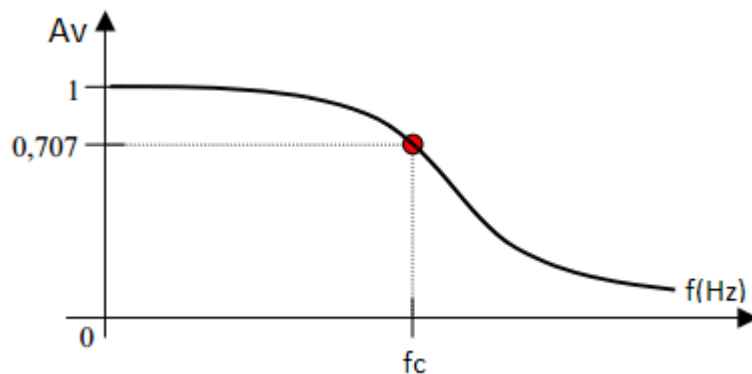


Figura 104 - Curva de resposta em frequência filtro passa-baixa RL - Ganho de Tensão

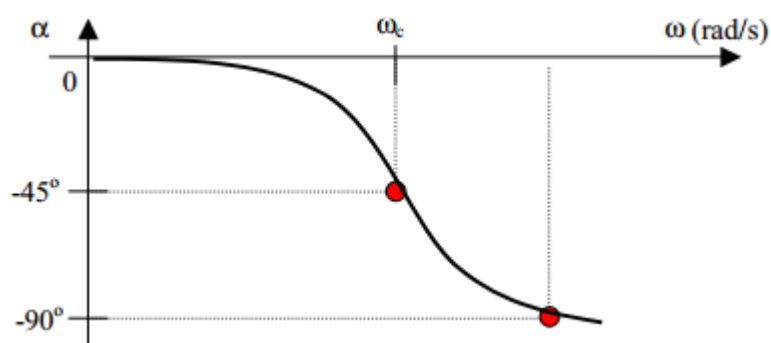


Figura 105 - Curva de Resposta em Frequência do filtro passa-baixa RL - Fase

Ganho:

$$f = 0: A_v = 1$$

$$f = f_c: A_v = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707$$

$$f \rightarrow \infty: A_v = 0$$

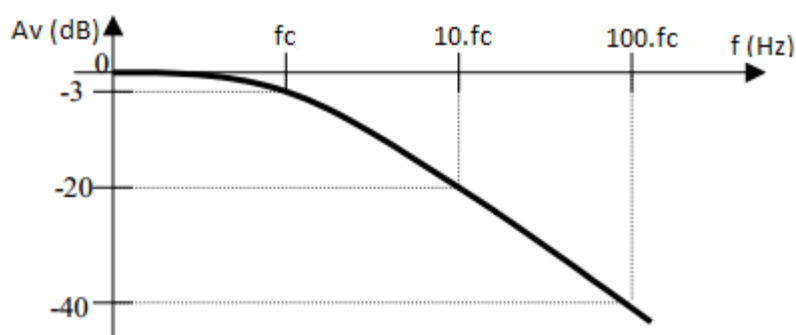
Fase:

$$f = 0: \alpha = -\arctg(0^\circ) = 0^\circ$$

$$f = f_c: \alpha = -\arctg(1) = -45^\circ$$

$$f \rightarrow \infty: \alpha = -\arctg(\infty) = -90^\circ$$

Também é possível traçar a curva de resposta em frequência do ganho em dB de um filtro passa-baixa RL usando a escala logarítmica, como mostrado na figura 6.



A Figura 106 - Curva de resposta em frequência filtro passa-baixa RL -ltro passa-baixa RL - Ganho de  
través  
da

curva mostrada na figura 6, podemos perceber que após a frequência de corte, cada vez que a frequência aumenta de um fator de 10, o ganho diminui em 20 dB. Podemos, assim dizer, que há uma atenuação de 20dB por aumento de década.

#### 2.1.2.4 EXEMPLO DE FILTRO PASSA-BAIXA RL

Para exemplificar o funcionamento e os cálculos para projetar um filtro passa-baixa RL, é apresentado um passo-a-passo.

Montar um filtro passa-baixa RL com frequência de corte 105kHz e  $L = 1\text{mH}$ . Calcular o valor de resistor.

Resolução:

Sabe-se que o valor de frequência de corte é de 105kHz e o valor do indutor é de 1mH. Com isso, coloca-se esses valores na fórmula de frequência de corte para obter o valor de resistor necessário para implementar o circuito, portanto:

$$f_c = \frac{R}{2\pi L}$$

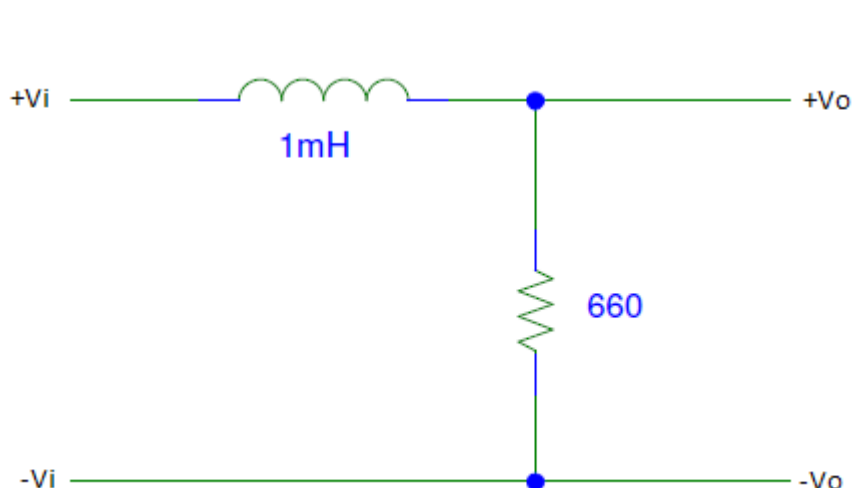
Substituindo  $f_c = 105\text{kHz}$  e  $L = 1\text{mH}$ , teremos:

$$105 \cdot 10^3 = \frac{R}{2\pi \cdot 1 \cdot 10^{-3}}$$



$$R = 659,73 \, \Omega \cong 660 \, \Omega$$

O valor foi aproximado para  $660 \, \Omega$  para poder projetar o circuito.



Com isso, o filtro será implementado de acordo com a figura

Figura 108 - Circuito exemplo Filtro Passa-Baixa RL

Com uma variação de frequência de  $10\text{kHz}$  até  $1\text{MHz}$ , obtém-se a seguinte curva de resposta em frequência:

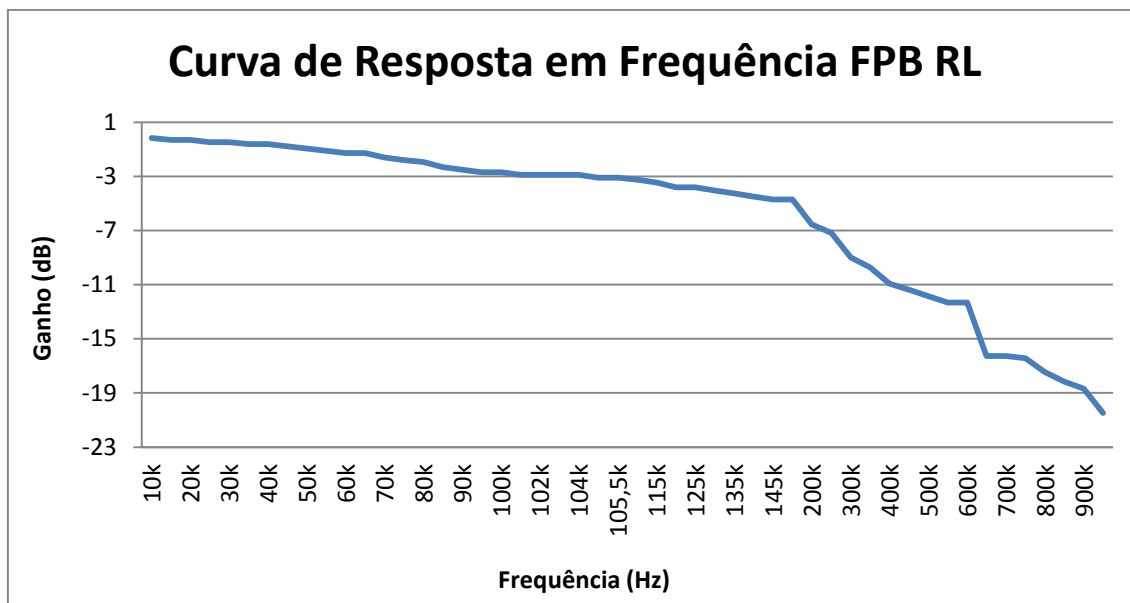


Figura 109 - Curva de Resposta em Frequência Filtro Passa-Baixa RL

Como podemos notar, a queda não é abrupta como em um filtro ideal, porém na frequência de corte (105kHz), a curva apresenta um ganho de -3dB e com uma década a mais, aproximadamente 1MHz, o ganho é de -20dB, o que condiz com o esperado.

### 2.1.3 Filtro Passa-Baixa RC

Um circuito RC apresentado como na figura 9, pode funcionar como um filtro passa-baixa.

Para sinais de baixa frequência, o capacitor apresentará uma alta reatância,  $X_c \gg R$  e se comportará como um circuito aberto. Assim, a maior parte da tensão de entrada estará sobre o capacitor de saída.

Para sinais de alta frequência, o capacitor apresentará uma baixa reatância,  $X_c \ll R$ , e se comportará como um curto circuito. Assim, a maior parte da tensão de entrada estará sobre o resistor.

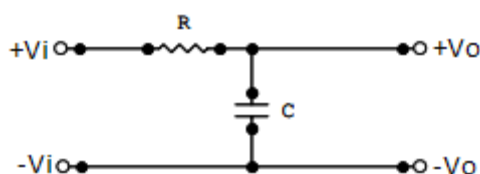


Figura 110 - Filtro Passa-Baixa RC

### 2.1.3.1 Ganho e Fase

Para este circuito, a tensão de saída em função da tensão de entrada pode ser dada através da seguinte expressão:

$$V_o = \frac{X_c}{R + X_c} \cdot V_i = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}} \cdot V_i$$

Assim:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}}$$

Se fatorarmos a expressão, dividindo tanto o numerador quanto o denominador por R, teremos:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}} \cdot \frac{R}{R} = \frac{1}{1 + j\omega RC}$$

Assim, essa é a função de transferência de um filtro passa-baixa RC na forma fatorada:

$$H(2\pi f) = \frac{1}{1 + j\omega RC}$$

Ao fazermos o módulo da função de transferência, obtemos o ganho e a fase.

Portanto, a expressão para o ganho é dada por:

$$Av = \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi fRC)^2}}$$

E a expressão da fase é dada por:

$$\alpha = -\arctg(2\pi fRC)$$

### 2.1.3.2 Frequência de Corte

Sabemos que o ganho na frequência de corte é:

$$Av = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707$$

Assim,

$$\frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi f_c RC)^2}}$$

Isolando  $f_c$ , teremos a equação para a frequência de corte:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

Na frequência de corte, a fase será:

$$\alpha = -45^\circ$$

### 2.1.3.3 Curvas Características

Com a expressão do ganho e da fase é possível traçar as curvas de resposta em frequência do filtro passa-baixa RL, como indicado nas figuras 10 e 11.

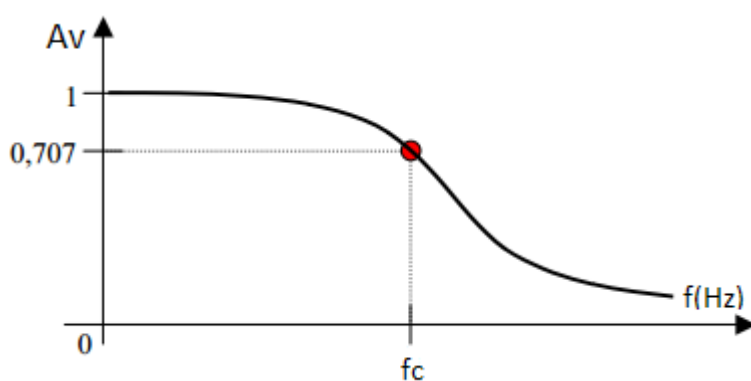


Figura 111 - Curva de Resposta em Frequência do Filtro Passa-Baixa RC - Ganho de Tensão

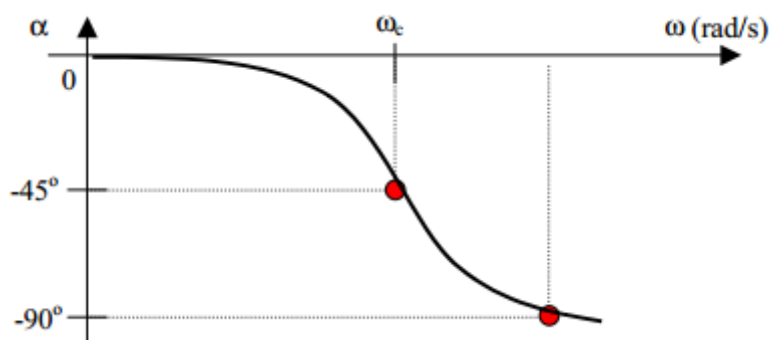


Figura 112 - Curva de Resposta em Frequência do Filtro Passa-Baixa RC - Fase

Ganho:

$$f = 0: A_v = 1$$

$$f = f_c: A_v = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707$$

$$f \rightarrow \infty: A_v = 0$$

Fase:

$$f = 0: \alpha = -\arctg(0^\circ) = 0^\circ$$

$$f = f_c: \alpha = -\arctg(1) = -45^\circ$$

$$f \rightarrow \infty: \alpha = -\arctg(\infty) = -90^\circ$$

Também é possível traçar a curva de resposta em frequência do ganho em dB de um filtro passa-baixa RL usando a escala logarítmica, como mostrado na figura 12.

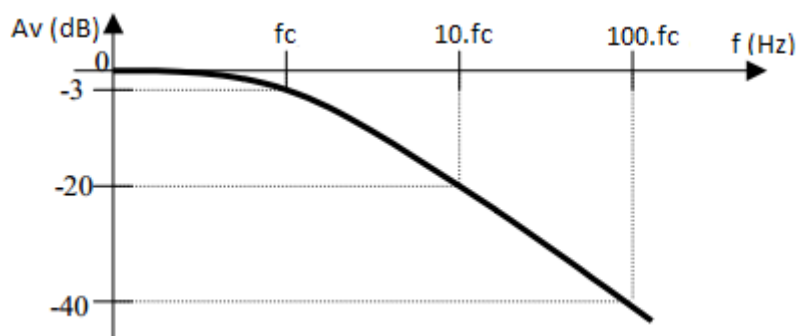


Figura 113 - Curva de Resposta em Frequência do Filtro Passa-Baixa RC - Ganho de Tensão em dB

#### 2.1.3.4 Exemplo de Filtro Passa-Baixa RC

Para exemplificar o funcionamento e os cálculos para projetar um filtro passa-baixa RC, é apresentado um passo-a-passo.

Montar um filtro passa-baixa RC com frequência de corte 700Hz e  $C = 100\text{nF}$ . Calcular o valor de resistor.

Resolução:

Sabe-se que o valor de frequência de corte é de 700Hz e o valor do capacitor é de 100nF. Com isso, coloca-se esses valores na fórmula de frequência de corte para obter o valor de resistor necessário para implementar o circuito, portanto:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

Substituindo  $f_c = 700\text{Hz}$  e  $C = 100\text{nF}$ :

$$700 = \frac{1}{2\pi R \cdot 100 \cdot 10^{-9}}$$

$$R = 2273,65 \cong 2,2\text{k}\Omega$$

O valor foi aproximado para 2,2kΩ para poder projetar o circuito.

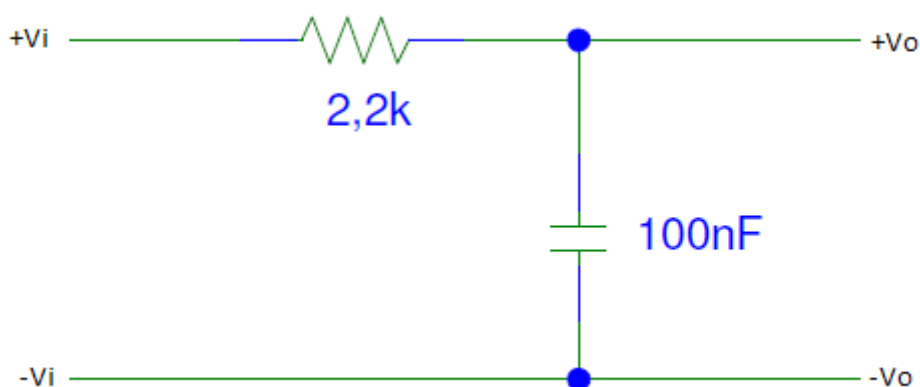


Figura 114 - Circuito exemplo Filtro Passa-Baixa RC

Com isso, o filtro a ser implementado será de acordo com a figura

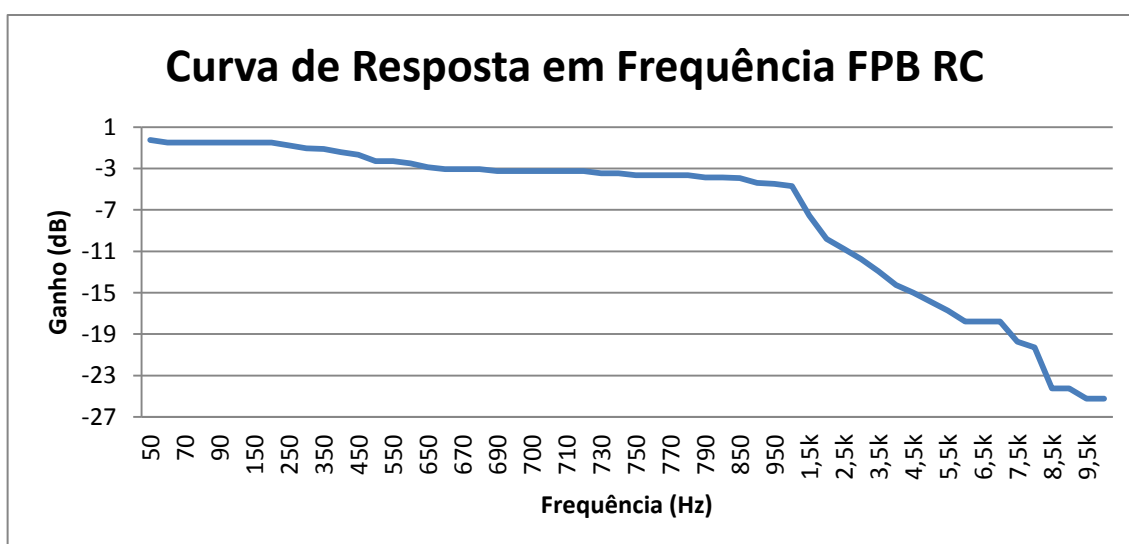


Figura 115 - Curva de Resposta em Frequência Filtro Passa-Baixa RC

A curva de resposta em frequência mostra um comportamento condizente com esperado, visto que apresenta, na frequência de corte (700Hz) um ganho de -3dB e uma década acima (7kHz) um ganho de -20dB.

## 2.2 Filtro Passa-Alta (FPA)

Um filtro passivo passa-alta é um circuito que permite a passagem de sinais com frequência acima da frequência de corte, atenuando os sinais cujas frequências estiverem abaixo desse valor.

### 2.2.1 Filtro Passa-Alta Ideal

No filtro ideal, para sinais de frequência acima da frequência de corte o ganho é unitário, ou seja, o sinal de saída é igual ao sinal de entrada, e abaixo desse valor, o ganho é zero, ou seja, o sinal de saída é atenuado até zero.

Porém na prática não é possível se obter um filtro ideal como apresentado na figura 15.

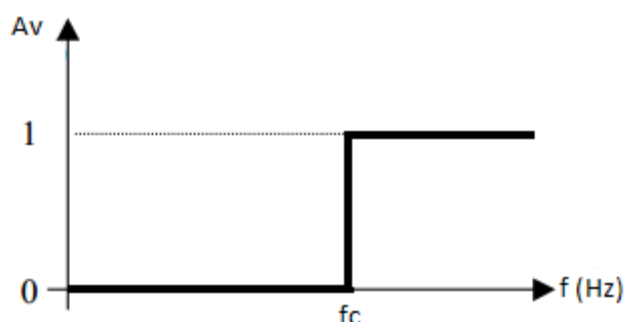


Figura 116 - Curva de resposta em frequência de um filtro passa-alta ideal

As simbologias usuais para a representação desse filtro são as mostradas na figura 16.

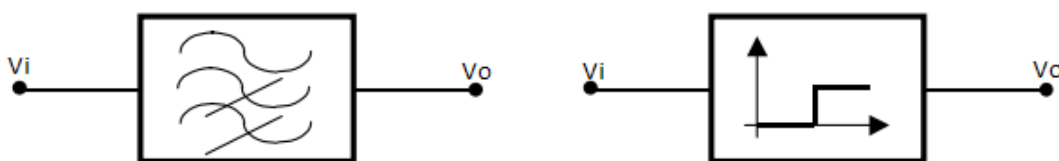


Figura 117 - Simbologias usuais para filtro passa-alta

### 2.2.2 Filtro Passa-Alta RL

Um circuito como mostrado na figura 17, pode comportar-se como um filtro passa-alta RL.

Para sinais de baixa frequência, o indutor apresenta baixa reatância,  $X_L \ll R$ , e se comporta como um curto-circuito. Assim, a maior parcela da tensão de entrada estará sobre o resistor e a tensão sobre o indutor de saída será muito pequena.

Para sinais de alta frequência, o indutor apresenta alta reatância,  $X_L \gg R$ , e se comporta como um circuito aberto. Assim, a maior parcela da tensão de entrada estará sobre o indutor de saída.

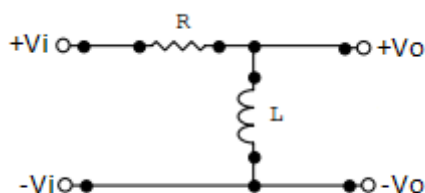


Figura 118 - Circuito de um filtro passa-alta RL



### 2.2.2.1 Ganho e Fase

Um filtro como o da figura 18, comporta-se como filtro passa-alta RL. Para este circuito, a tensão de saída em função da tensão de entrada pode ser dada por:

$$V_o = \frac{X_L \cdot V_i}{R + X_L} = \frac{j\omega L}{R + j\omega L} \cdot V_i$$

Assim,

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{j\omega L}{R + j\omega L}$$

Se fatorarmos essa expressão, dividindo tanto o numerador quanto o denominador por  $j\omega L$ , teremos:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{\frac{j\omega L}{j\omega L}}{\frac{R + j\omega L}{j\omega L}} = \frac{1}{1 + \frac{R}{j\omega L}}$$

Assim, essa é a função de transferência de forma fatorada:

$$H(2\pi f) = \frac{1}{1 + j \frac{R}{2\pi f L}}$$

Se fizermos o módulo da função de transferência, obteremos o ganho e a fase, como mostrados nas equações:

$$Av = \sqrt{\frac{1}{1 + \left(\frac{R}{2\pi f L}\right)^2}}$$

$$\alpha = +\arctg\left(\frac{R}{2\pi f L}\right)$$

### 2.2.2.2 Frequência de Corte

Sabemos que o ganho na frequência de corte é:

$$Av = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707$$

Assim, para um filtro passa-alta RL:

$$\frac{1}{\sqrt{2}} = \sqrt{\frac{1}{1 + \left(\frac{R}{2\pi f_c L}\right)^2}}$$

Isolando  $f_c$ , teremos a equação para a frequência de corte:

$$f_c = \frac{R}{2\pi L}$$

Na frequência de corte, a fase será:

$$\alpha = +45^\circ$$

### 2.2.2.3 Curvas Características

Com a expressão do ganho e da fase podemos traçar as curvas de resposta em frequência do filtro passa-alta RL:

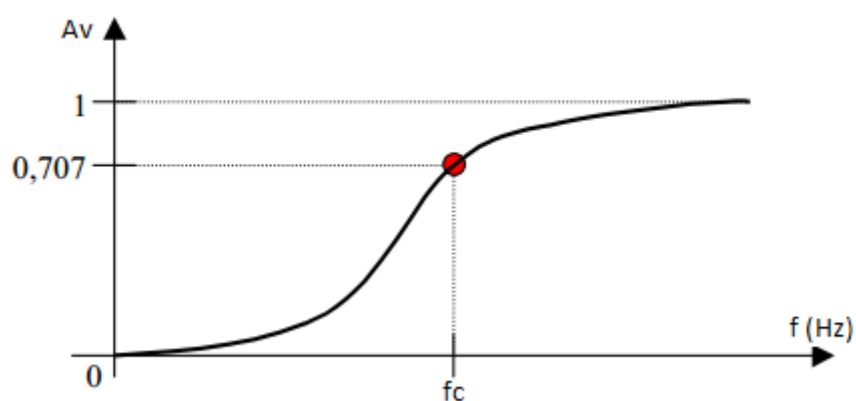


Figura 119 - Curva de resposta em frequência do filtro passa-alta RL – Ganho de Tensão

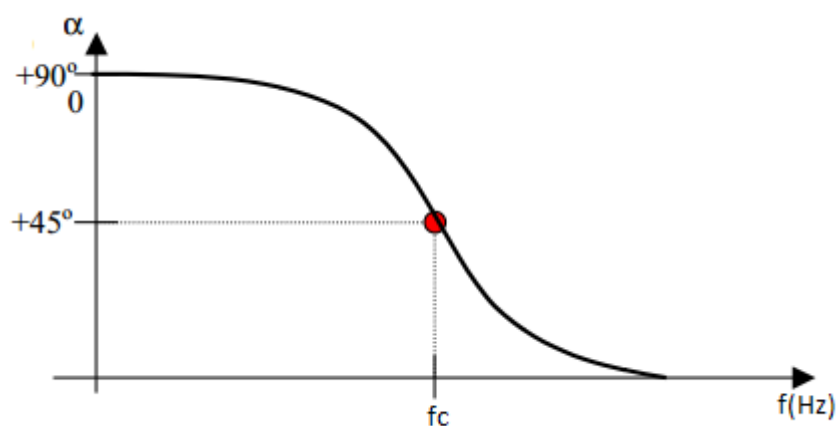


Figura 120 - Curva de resposta em frequência do filtro passa-alta RL – Fase

Ganho:

$$f = 0: A_v = 0$$

$$f = f_c: A_v = 0,707$$

$$f \rightarrow \infty: A_v = 1$$

Fase:

$$f = 0: \alpha = \arctg(\infty) = +90^\circ$$

$$f = f_c: \alpha = \arctg(1) = +45^\circ$$

$$f \rightarrow \infty: \alpha = \arctg(0) = 0^\circ$$

Também é possível traçar a curva de resposta em frequência do ganho em dB de um filtro passa-alta RL usando a escala logarítmica, como mostrado na figura 20.

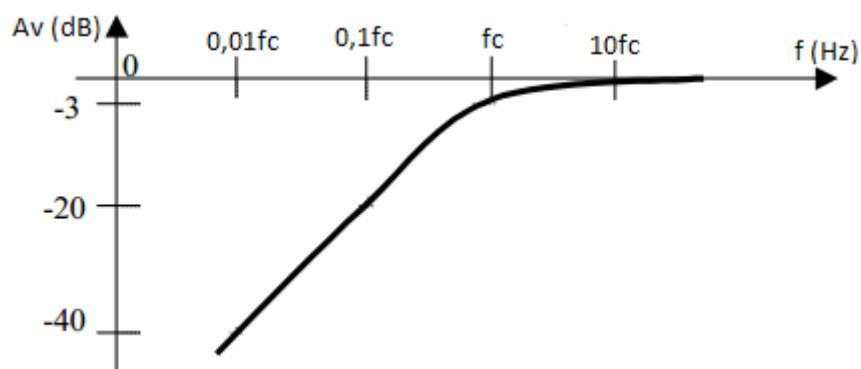


Figura 121 - Curva de resposta em frequência do filtro passa-alta RL - Ganho de tensão em dB

#### 2.2.2.4 Exemplo de Filtro Passa-Alta RL

Para exemplificar o funcionamento e os cálculos para projetar um filtro passa-alta RL, é apresentado um passo-a-passo.

Montar um filtro passa-alta RL com frequência de corte 105kHz e  $L = 1\text{mH}$ . Calcular o valor de resistor.

Resolução:

Sabe-se que o valor de frequência de corte é de 105kHz e o valor do indutor é de 1mH. Com isso, coloca-se esses valores na fórmula de frequência de corte para obter o valor de resistor necessário para implementar o circuito, portanto:

$$f_c = \frac{R}{2\pi L}$$

Substituindo  $f_c = 105\text{kHz}$  e  $L = 1\text{mH}$ , teremos:

$$105 \cdot 10^3 = \frac{R}{2\pi \cdot 1 \cdot 10^{-3}}$$

$$R = 659,73 \Omega \cong 660 \Omega$$

O valor foi aproximado para 660Ω para poder projetar o circuito.

Com isso, o filtro será implementado de acordo com a figura.

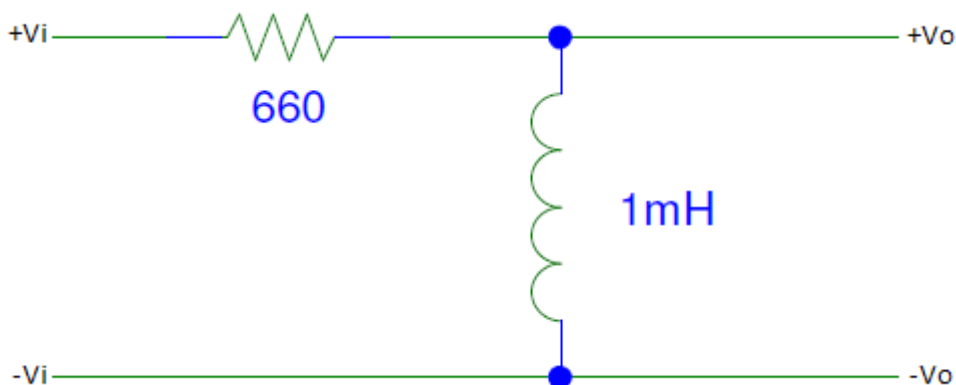
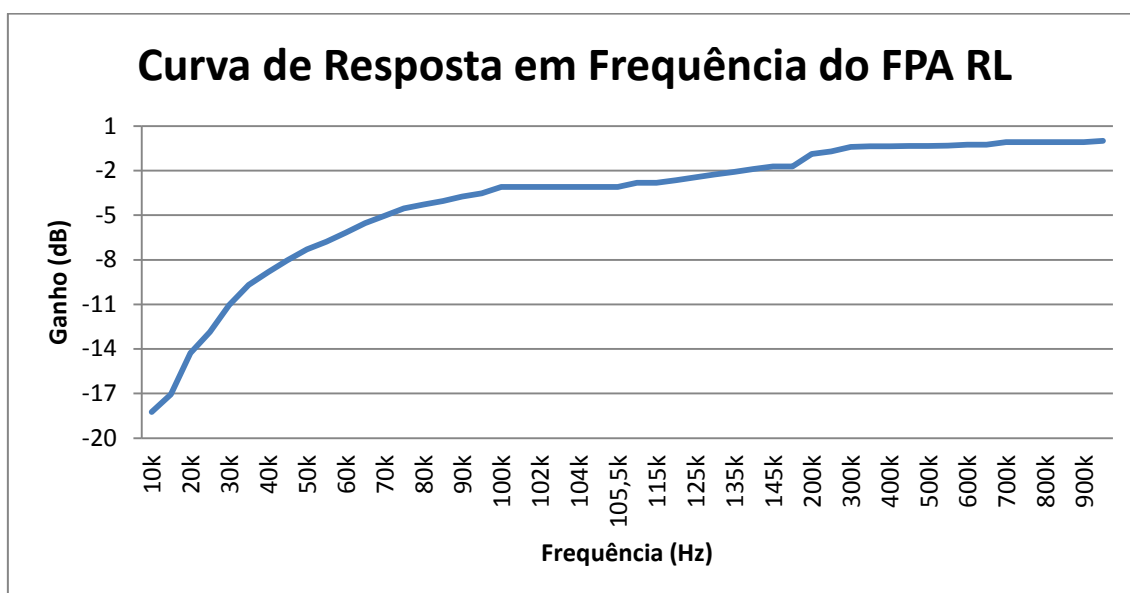


Figura 122 - Exemplo de filtro Passa-Alta RL



### 2.2.3 Filtro Passa-Alta RC

Um circuito como apresentado na figura 22, pode comportar-se como um filtro passa-alta RC.

Para sinais de baixa frequência, o capacitor apresenta uma alta reatância capacitiva,  $X_c \gg R$ , e se comportará como um circuito aberto. Assim, a maior parte da tensão de entrada estará sobre o capacitor e a tensão sobre o resistor de saída será muito pequena.

Para sinais de alta frequência, o capacitor apresenta baixa reatância capacitiva  $X_c \ll R$ , e se comportará como um curto circuito. Assim, a maior parte da tensão de entrada estará sobre o resistor de saída.

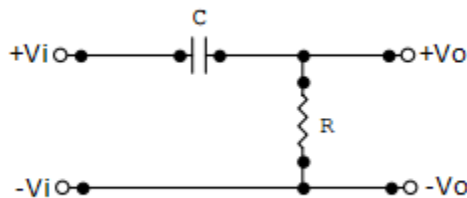


Figura 123 - Circuito de um filtro passa-alta RC

### 2.2.3.1 Ganho e Fase

Um filtro como o da figura 22, comporta-se como filtro passa-alta RC. Para este circuito, a tensão de saída em função da tensão de entrada pode ser dada por:

$$V_o = \frac{R \cdot V_i}{R + X_c} = \frac{R}{R + j\omega C} \cdot V_i$$

Assim:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{R}{R + j\omega C}$$

Se fatorarmos a expressão, dividindo tanto o numerador quanto o denominador por R, teremos:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{\frac{R}{R}}{\frac{R + \frac{1}{j\omega C}}{R}} = \frac{1}{1 + j \frac{1}{\omega RC}}$$

Assim, a função de transferência do filtro passa-alta RC é:

$$H(2\pi f) = \frac{1}{1 + j \frac{1}{2\pi f RC}}$$

Se fizermos o módulo da função de transferência, obteremos o ganho e a fase, como mostrados nas equações:

$$Av = \sqrt{\frac{1}{1 + \left(\frac{1}{2\pi f RC}\right)^2}}$$

$$\alpha = \arctg\left(\frac{1}{2\pi fRC}\right)$$

### 2.2.3.2 Frequência de Corte

Sabemos que o ganho na frequência de corte é:

$$Av = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707$$

Assim, para um filtro passa-alta RC:

$$\frac{1}{\sqrt{2}} = \sqrt{\frac{1}{1 + \left(\frac{1}{2\pi f_c RC}\right)^2}}$$

Isolando  $f_c$ , teremos a equação da frequência de corte:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

Na frequência de corte, a fase será:

$$\alpha = +45^\circ$$

### 2.2.3.3 Curvas Características

Com a expressão do ganho e da fase podemos traçar as curvas de resposta em frequência do filtro passa-alta RC:

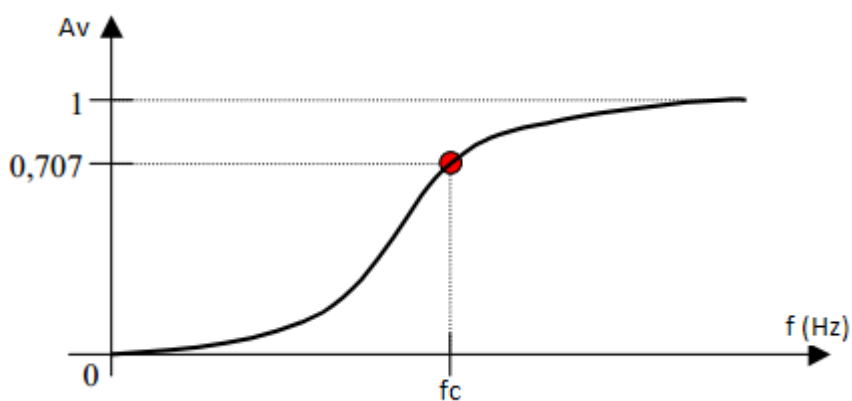


Figura 124 - Curva de resposta em frequência do filtro passa-alta RC – Ganho de Tensão

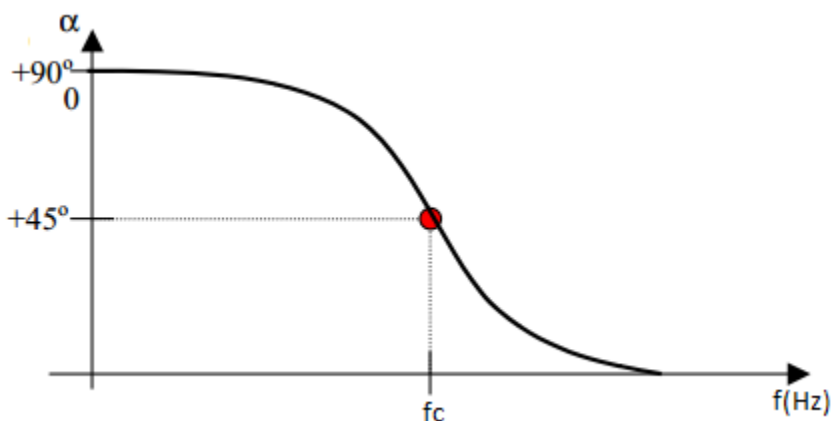


Figura 125 - Curva de resposta em frequência do filtro passa-alta RC – Fase

Ganho:

$$f = 0: A_v = 0$$

$$f = f_c: A_v = 0,707$$

$$f \rightarrow \infty: A_v = 1$$

Fase:

$$f = 0: \alpha = \arctg(\infty) = +90^\circ$$

$$f = f_c: \alpha = \arctg(1) = +45^\circ$$

$$f \rightarrow \infty: \alpha = \arctg(0) = 0^\circ$$

Também é possível traçar a curva de resposta em frequência do ganho em dB de um filtro passa-alta RC usando a escala logarítmica, como mostrado na figura 24.

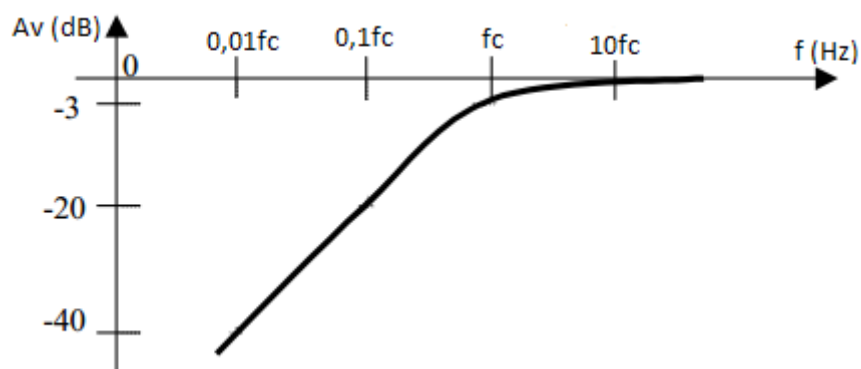


Figura 126 - Curva de resposta em frequência do filtro passa-alta RC - Ganho de tensão em dB

Como podemos notar, as formas de onda para os filtros passa-alta RC e RL são as mesmas.

### 2.2.3.4 Exemplo de filtro passa-alta RC

Para exemplificar o funcionamento e os cálculos para projetar um filtro passa alta RC, é apresentado um passo-a-passo.

Montar um filtro passa-alta RC com frequência de corte 700Hz e  $C = 100\text{nF}$ . Calcular o valor de resistor.

Resolução:

Sabe-se que o valor de frequência de corte é de 700Hz e o valor do capacitor é de 100nF. Com isso, coloca-se esses valores na fórmula de frequência de corte para obter o valor de resistor necessário para implementar o circuito, portanto:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

Substituindo  $f_c = 700\text{Hz}$  e  $C = 100\text{nF}$ :

$$700 = \frac{1}{2\pi R \cdot 100 \cdot 10^{-9}}$$

$$R = 2273,65 \cong 2,2\text{k}\Omega$$

O valor foi aproximado para 2,2kΩ para poder projetar o circuito.

Com isso, o filtro será implementado de acordo com a figura.

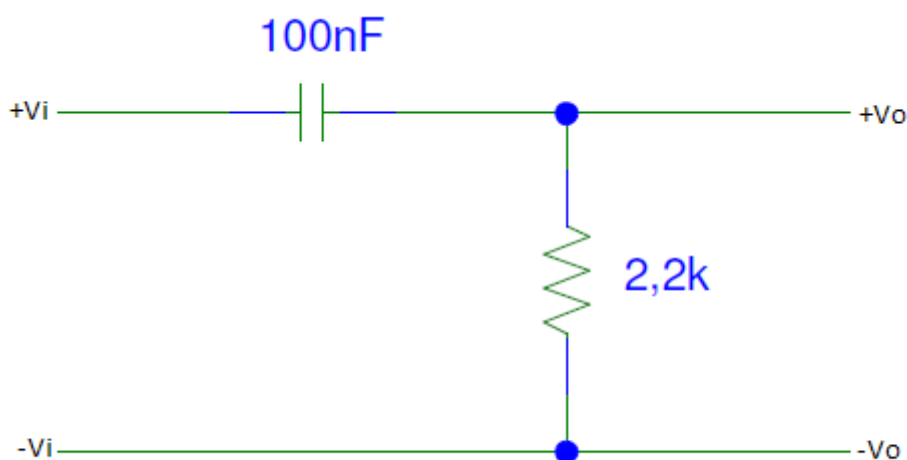


Figura 127 - Filtro Passa-Alta RC



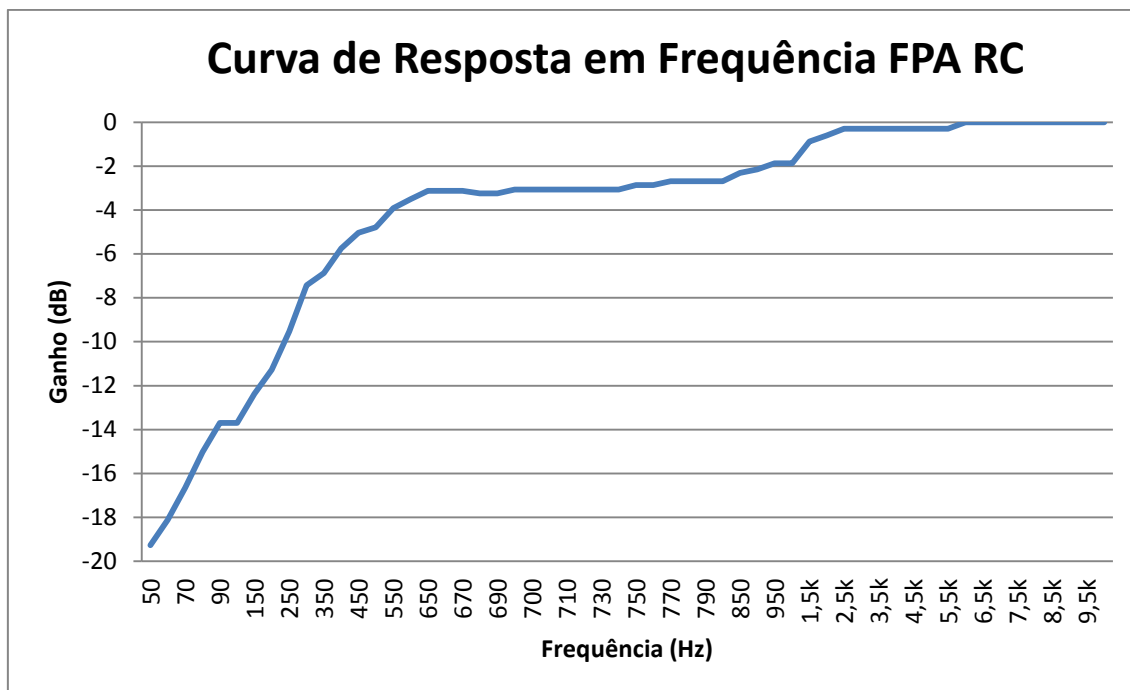


Figura 128 - Curva de Resposta em Frequência Filtro Passa-Alta RC

## 2.3 Filtro Passa-Faixa

O filtro passa-faixa é um circuito que permite a passagem de sinais com frequências situadas em uma faixa intermediária, atenuando frequências abaixo ou acima dessa faixa.

A faixa intermediária é delimitada por uma frequência de corte inferior ( $f_{ci}$ ) e uma frequência de corte superior ( $f_{cs}$ ).

### 2.3.1 Filtro Passa-Faixa Ideal

Os sinais que apresentam frequência intermediária, ou seja, acima da frequência de corte inferior e abaixo da frequência de corte superior, possuem ganho unitário, portanto o módulo do sinal de saída é igual ao sinal de entrada.

Para os sinais que apresentam frequência abaixo da frequência de corte inferior ou acima da frequência de corte superior, o ganho é nulo, ou seja, o módulo do sinal de saída é totalmente atenuado.

Porém, na prática, não é possível se obter uma resposta em frequência de um filtro passa-faixa ideal, como mostrado na figura 28.



Figura 129 - Curva de resposta em frequência de um filtro passa-faixa ideal

Simbologia usual:

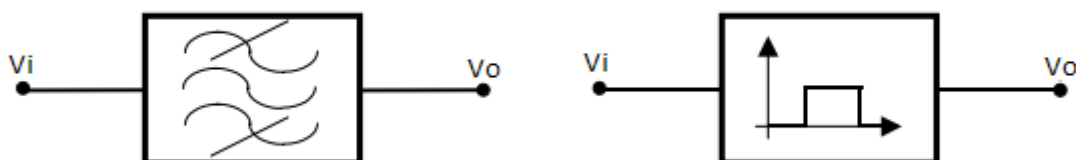


Figura 130 - Simbologia usual para filtro passa-faixa

### 2.3.2 Filtro Passa-Faixa Série

Um circuito RLC, como mostrado na figura 30, pode comportar-se como um filtro passa-faixa série.

O filtro passa-faixa é baseado na ressonância que ocorre entre indutores e capacitores em circuitos CA.

Para sinais de baixa frequência o indutor apresenta baixa reatância indutiva e seu comportamento é de um curto-circuito, e o capacitor apresenta alta reatância capacitiva e seu funcionamento é de um circuito aberto. Assim, a maior parte da tensão de entrada estará sobre o capacitor, e a tensão sobre o resistor de saída será muito baixa, ou seja, o sinal será atenuado.

Para sinais de alta frequência o capacitor apresenta baixa reatância capacitiva e seu comportamento é de um curto-circuito, e o indutor apresenta alta reatância indutiva e seu comportamento é de um circuito aberto. Assim, a maior parte da tensão de entrada estará sobre o indutor, e a tensão sobre o resistor de saída será muito baixa, ou seja, o sinal será atenuado.

Para os sinais com frequência intermediárias, ou seja, sinais cujas frequências estiverem numa faixa próxima à frequência de ressonância do circuito, o indutor e o capacitor apresentarão baixa reatância e se comportarão como um curto-

circuito. Assim, a maior parcela da tensão de entrada estará sobre o resistor de saída.

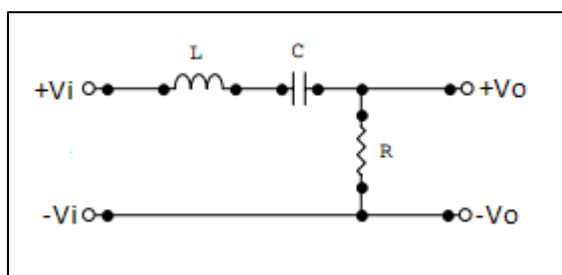


Figura 131 - Circuito Filtro Passa-Faixa série

### 2.3.2.1 Ganho e Fase

Para o circuito da figura 30, a tensão de saída em função da tensão de entrada pode ser dada pela expressão:

$$V_o = \frac{R \cdot V_i}{R + X_L + X_C} = \frac{R}{R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}} \cdot V_i$$

Então:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{R}{R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}}$$

Fazendo o mínimo múltiplo comum e fatorando, obtemos:

$$\begin{aligned} \frac{V_o}{V_i} &= \frac{R}{\frac{j\omega RC + j^2\omega^2 LC + 1}{j\omega C}} = \frac{j\omega RC}{1 - \omega^2 LC + j\omega RC} = \frac{\frac{j\omega RC}{j\omega RC}}{\frac{1 - \omega^2 LC + j\omega RC}{j\omega RC}} \\ &= \frac{1}{1 - j\left(\frac{1 - \omega^2 LC}{\omega RC}\right)} \end{aligned}$$

Assim, a função de transferência na forma fatorada é:

$$H(2\pi f) = \frac{1}{1 - j\left(\frac{1 - (2\pi f)^2 LC}{2\pi f RC}\right)}$$

Se fizermos o módulo da função de transferência, obteremos o ganho e a fase, como mostrados nas equações:

$$Av = \sqrt{\frac{1}{1 + \left(\frac{1 - (2\pi f)^2 LC}{2\pi f RC}\right)^2}}$$

$$\alpha = \arctg\left(\frac{1 - (2\pi f)^2 LC}{2\pi f RC}\right)$$

### 2.3.2.2 Frequência de Corte

Sabemos que o ganho na frequência de corte é:

$$Av = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707$$

Então, para um filtro passa-faixa série, teremos:

$$\frac{1}{\sqrt{2}} = \sqrt{\frac{1}{1 + \left(\frac{1 - (2\pi f_c)^2 LC}{2\pi f_c RC}\right)^2}}$$

Desenvolvendo essa igualdade, como a expressão é de segunda ordem, obteremos duas equações:

$$\begin{cases} (2\pi f_c)^2 LC + 2\pi f_c - 1 = 0 \\ (2\pi f_c)^2 LC - 2\pi f_c - 1 = 0 \end{cases}$$

Obtemos duas expressões de segundo grau, cada uma com duas soluções que corresponderão a frequência de corte superior e a frequência de corte inferior do filtro passa-faixa série:

$$f_{ci} = \frac{-RC \pm \sqrt{(RC)^2 + 4LC}}{4\pi LC}$$

$$f_{cs} = \frac{RC \pm \sqrt{(RC)^2 + 4LC}}{4\pi LC}$$

Ou em frequência angular, obtemos:

$$\omega_{ci} = \frac{-RC \pm \sqrt{(RC)^2 + 4LC}}{2LC} \text{ [rad/s]}$$

$$\omega_{cs} = \frac{RC \pm \sqrt{RC^2 + 4LC}}{2LC} [\text{rad/s}]$$

### 2.3.2.3 Frequência Central

A frequência central de um filtro passa-faixa ocorre na frequência de ressonância.

Para haver ressonância série, é necessário que as reatâncias capacitiva e indutiva do circuito se anulem e se comportem como um curto-circuito, ou seja:

$$X_{eq} = 0$$

$$|X_C| = |X_L|$$

Assim, o ganho será unitário pois toda a tensão de entrada estará na saída. Então:

$$Av = 1$$

$$\sqrt{\frac{1}{1 + \left(\frac{1 - (2\pi f_r)^2 LC}{2\pi f_r RC}\right)^2}} = 1$$

$$\sqrt{1 + \left(\frac{1 - (2\pi f_c)^2 LC}{2\pi f_c RC}\right)^2} = 1$$

$$1 + \left(\frac{1 - (2\pi f_r)^2 LC}{2\pi f_r RC}\right)^2 = 1$$

$$\left(\frac{1 - (2\pi f_r)^2 LC}{2\pi f_r RC}\right)^2 = 0$$

$$1 - (2\pi f_r)^2 LC = 0$$

$$(2\pi f_r)^2 LC = 1$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Ou em frequência angular:

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} [\text{rad/s}]$$

A frequência central também pode ser calculada através da média geométrica da frequência de corte superior e a frequência de corte inferior. Portanto:

$$f_r = \sqrt{f_{cs} \cdot f_{ci}}$$

### 2.3.2.4 Curvas Características

A partir das expressões de ganho e fase, podemos traçar as curvas de resposta em frequência para o ganho e a fase de um filtro passa-faixa RLC série, como mostrados nas figuras 31 e 32.

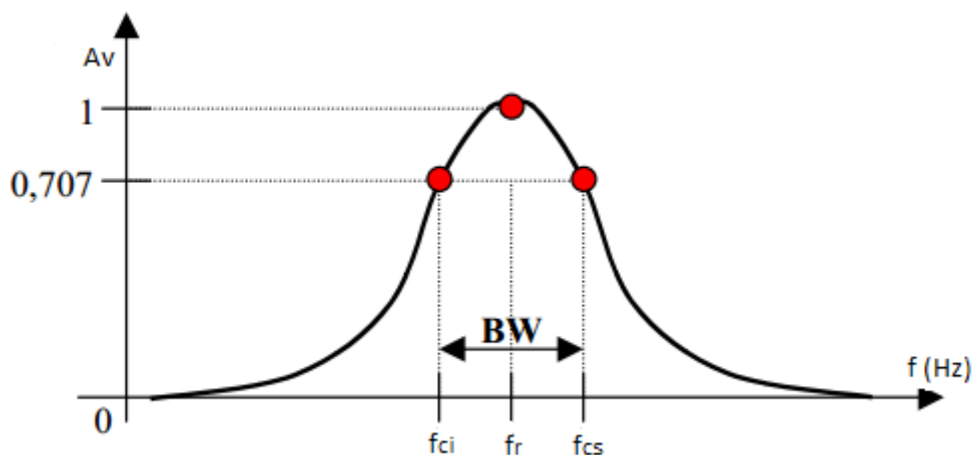


Figura 132 - Curva de resposta em frequência filtro passa-faixa RLC série - Ganho de tensão

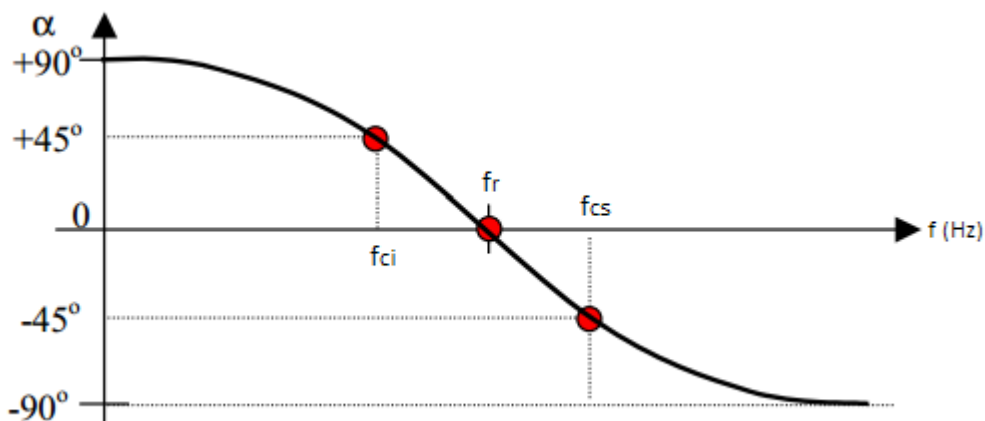


Figura 133 - Curva de resposta em frequência do filtro passa-faixa RLC série – Fase

Ganho:

$$f = 0: A_v = 0$$

$$f = f_r: A_v = 1$$

$$f \rightarrow \infty: A_v = 0$$

Fase:

$$f = 0: \alpha = \text{arctg}(\infty) = +90^\circ$$

$$f = f_r; \alpha = 0^\circ$$

$$f \rightarrow \infty; \alpha = \arctg(-\infty) = -90^\circ$$

A curva do ganho de tensão em dB é apresentada na figura 33.

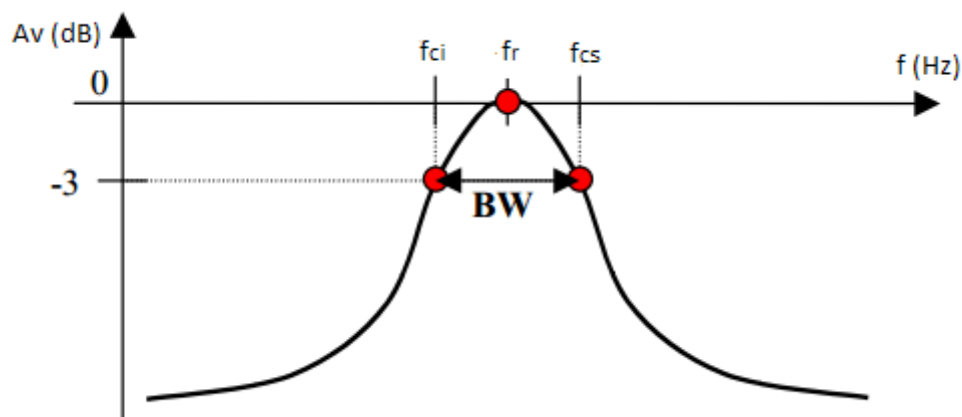


Figura 134 - Curva de resposta em frequência do filtro passa-faixa RLC série - ganho de tensão em dB

### 2.3.2.5 Banda e Fator de Qualidade

A largura de banda (BW) de um filtro passa-faixa é a parte da resposta em frequência do filtro que está situada na faixa de -3dB, ou seja, ela é a diferença entre a frequência de corte superior e a frequência de corte inferior.

$$BW = f_{cs} - f_{ci}$$

O cálculo da largura de banda também pode ser feito através da frequência angular:

$$BW = \omega_{cs} - \omega_{ci}$$

Substituindo  $\omega_{cs}$  e  $\omega_{ci}$ :

$$BW = \frac{RC + \sqrt{RC^2 + 4LC}}{2LC} - \left( \frac{-RC + \sqrt{RC^2 + 4LC}}{2LC} \right)$$

$$BW = \frac{RC + \sqrt{RC^2 + 4LC}}{2LC} + \frac{RC - \sqrt{RC^2 + 4LC}}{2LC}$$

$$BW = \frac{2RC}{2LC} = \frac{R}{L}$$

O fator de qualidade (Q) pode ser entendido como precisão da curva do filtro. Quando Q é baixo, a curva de ressonância é larga, quando Q é alto, a curva é estreita, e o circuito é mais preciso.

O fator de qualidade pode ser calculado da seguinte forma:

$$Q = \frac{\omega_r}{BW} = \frac{1}{\frac{R}{L}} = \sqrt{\frac{L}{CR^2}}$$

O fator de qualidade também pode ser calculado como:

$$Q = \frac{\omega_r}{BW} = \frac{2\pi f_r}{2\pi f_{cs} - 2\pi f_{ci}} = \frac{f_r}{f_{cs} - f_{ci}}$$

### 7.1.1.1

### 2.3.2.6 Exemplo de filtro passa-faixa RLC série

Para exemplificar o funcionamento e os cálculos para projetar um filtro passa-faixa RLC série, é apresentado um passo-a-passo.

Montar um filtro passa-faixa RLC com largura de banda de 100kHz a 300kHz.

Resolução:

$$f_r = \sqrt{f_{cs} \cdot f_{ci}}$$

$$f_r = \sqrt{100 \cdot 10^3 \cdot 300 \cdot 10^3} = 173205,08 \text{ Hz} = 173,2 \text{ kHz}$$

Escolhemos o valor de um dos componentes e calculamos o outro. Neste caso, foi escolhido um indutor de 1mH.

$$C = \frac{1}{(2\pi f_r)^2 L} = \frac{1}{(2\pi \cdot 173205,08)^2 \cdot 1 \cdot 10^{-3}} = 8,44 \cdot 10^{-10}$$

No caso, consideraremos o valor comercial mais próximo que é 680pF.

$$Q = \frac{f_r}{f_{cs} - f_{ci}} = \frac{173205,08}{300 \cdot 10^3 - 100 \cdot 10^3} = 0,866$$

Com este valor, podemos calcular o valor do resistor:

$$Q = \sqrt{\frac{L}{CR^2}}$$

$$R = \sqrt{\frac{L}{CQ^2}} = \sqrt{\frac{1 \cdot 10^{-3}}{680 \cdot 10^{-12} \cdot 0,866^2}} = 1,4 \text{ k}\Omega$$



Portanto, o circuito ficará como mostrado na figura 34.

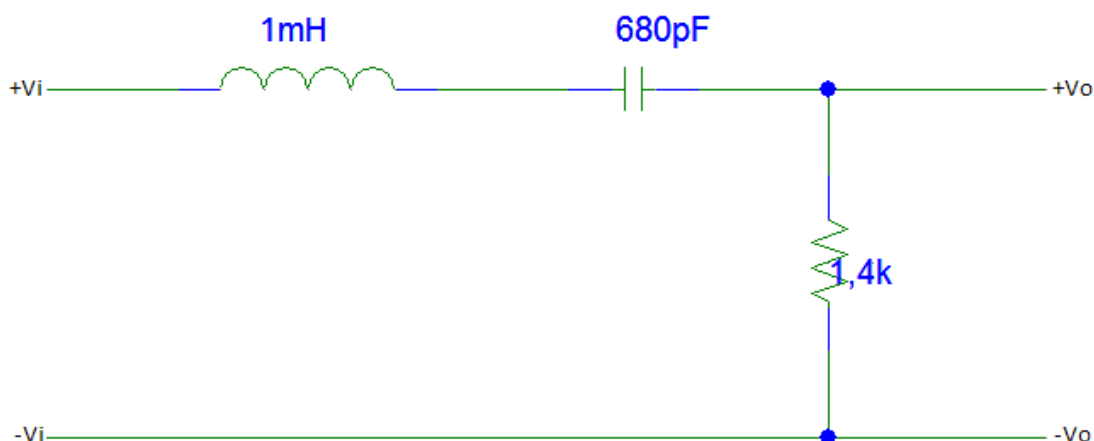


Figura 135 - Circuito filtro passa-faixa RLC série

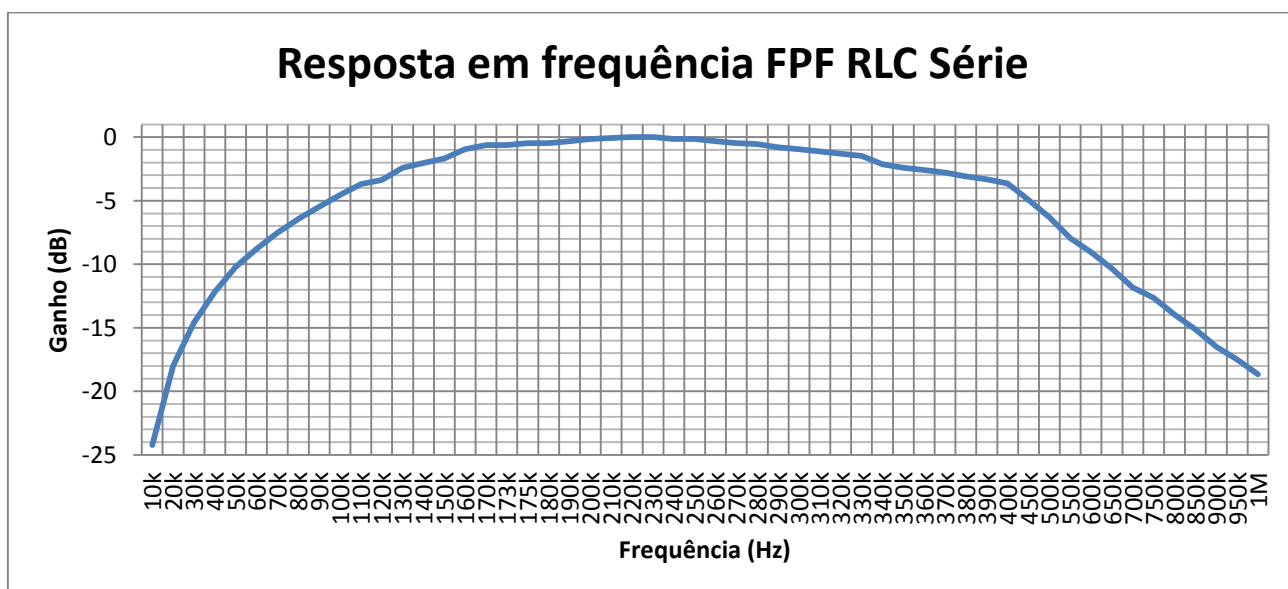


Figura 136 - Resposta em frequência Filtro Passa-Faixa RLC série

Como podemos observar, a resposta em frequência condiz com a curva esperada para este filtro.

### 2.3.3 Filtro Passa-Faixa Paralelo

O circuito RLC apresentado na figura 36 pode comportar-se como um filtro passa-faixa.

Para os sinais de baixa frequência, o capacitor apresentará uma alta reatância e se comportará como um circuito aberto. O indutor apresentará uma baixa reatância e se comportará como um curto circuito. Assim, a maior parte da tensão de entrada estará sobre o resistor e a tensão de saída será muito baixa, ou seja, o sinal será atenuado. Então, o circuito impede a passagem de sinais de baixa frequência.

Para os sinais de alta frequência, o indutor apresentará uma alta reatância e se comportará como um circuito aberto. O capacitor apresentará uma baixa reatância e se comportará como um curto circuito. Assim, a maior parte da tensão de entrada estará sobre o resistor e a tensão de saída será muito baixa, ou seja, o sinal será atenuado. Então, o circuito impede a passagem de sinais de alta frequência.

Porém, para sinais de frequência intermediárias, ou seja, frequências entre a frequência de corte inferior e superior, o indutor e o capacitor apresentarão alta reatância e seus comportamentos tenderão a um circuito aberto. Assim, a maior parte da tensão de entrada estará sobre o circuito LC. Portanto, o circuito “deixa passar” sinais com frequências dentro dessa faixa.

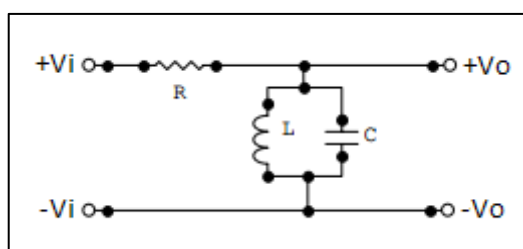


Figura 137 - Filtro Passa-Faixa RLC paralelo

### 2.3.3.1 Ganho e Fase

Para o circuito da figura 36 a tensão de saída pela tensão de entrada pode ser dada pela expressão:

$$\begin{aligned} \frac{V_o}{V_i} &= \frac{\frac{X_L \cdot X_C}{X_L + X_C}}{R + \frac{X_L \cdot X_C}{X_L + X_C}} = \frac{\frac{X_L \cdot X_C}{X_L + X_C}}{\frac{R(X_L + X_C) + X_L \cdot X_C}{X_L + X_C}} = \frac{X_L \cdot X_C}{R(X_L + X_C) + X_L \cdot X_C} \\ &= \frac{j\omega L \cdot \frac{1}{j\omega C}}{R\left(j\omega L + \frac{1}{j\omega C}\right) + j\omega L \cdot \frac{1}{j\omega C}} = \frac{\frac{L}{C}}{R\left(\frac{1 - \omega^2 LC}{j\omega C}\right) + \frac{L}{C}} \\ &= \frac{\frac{L}{C} \cdot \frac{C}{L}}{R\left(\frac{1 - \omega^2 LC}{j\omega C}\right) \cdot \frac{C}{L} + \frac{L}{C} \cdot \frac{C}{L}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{R - \omega^2 RLC}{j\omega L}\right)} = \frac{1}{1 - j\left(\frac{R - \omega^2 RLC}{\omega L}\right)} \end{aligned}$$

Assim, a função de transferência para o filtro passa-faixa paralelo é:

$$H(2\pi f) = \frac{1}{1 - j\left(\frac{R - (2\pi f)^2 RLC}{2\pi f L}\right)}$$

As expressões para ganho e fase serão:

$$Av = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{R - (2\pi f)^2 RLC}{2\pi fL}\right)^2}}$$

$$\alpha = \arctg\left(\frac{R - (2\pi f)^2 RLC}{2\pi fL}\right)$$

### 2.3.3.2 Frequência de Corte

Sabemos que o ganho na frequência de corte é:

$$Av = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707$$

Então:

$$\frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{R - (2\pi f_c)^2 RLC}{2\pi f_c L}\right)^2}}$$

Esta equação nos fornece uma equação de segundo grau:

$$(2\pi f_c)^2 LC \pm \frac{2\pi f_c L}{R} - 1 = 0$$

Cada uma das duas soluções correspondem à frequência de corte superior e à frequência de corte inferior:

$$f_{ci} = \frac{-\frac{L}{R} \pm \sqrt{\left(\frac{L}{R}\right)^2 + 4LC}}{4\pi LC}$$

$$f_{cs} = \frac{\frac{L}{R} \pm \sqrt{\left(\frac{L}{R}\right)^2 + 4LC}}{4\pi LC}$$

Ou em frequência angular:

$$\omega_{ci} = \frac{-\frac{L}{R} \pm \sqrt{\left(\frac{L}{R}\right)^2 + 4LC}}{2LC} [\text{rad/s}]$$

$$\omega_{cs} = \frac{\frac{L}{R} \pm \sqrt{\left(\frac{L}{R}\right)^2 + 4LC}}{2LC} [\text{rad/s}]$$

### 2.3.3.3 Frequência Central

A frequência central de um filtro passa-faixa ocorre na frequência de ressonância.

Para haver ressonância paralela, é necessário que a impedância equivalente do circuito ressonante seja infinita, ou seja, um circuito aberto. Para que isso ocorra é preciso que as reatâncias capacitivas e indutivas se anulem.

$$|X_C| = |X_L|$$

Tal que:

$$X_{eq} = \frac{X_L \cdot X_C}{X_L + X_C} = \infty$$

Na situação da figura 36, o ganho é unitário, então:

$$A_v = 1$$

$$\frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{R - (2\pi f_r)^2 RLC}{2\pi f_r L}\right)^2}} = 1$$

$$\sqrt{1 + \left(\frac{R - (2\pi f_r)^2 RLC}{2\pi f_r L}\right)^2} = 1$$

$$1 + \left(\frac{R - (2\pi f_r)^2 RLC}{2\pi f_r L}\right)^2 = 1$$

$$\frac{R - (2\pi f_r)^2 RLC}{2\pi f_r L} = 0$$

$$R - (2\pi f_r)^2 RLC = 0$$

$$(2\pi f_r)^2 = \frac{R}{RLC}$$

$$(2\pi f_r)^2 = \frac{1}{LC}$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Ou, em frequência angular:

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} [\text{rad/s}]$$

Como esperado, a equação é a mesma obtida para o filtro passa-faixa RLC série.

A frequência central também pode ser calculada através da média geométrica da frequência de corte superior e a frequência de corte inferior. Portanto:

$$f_r = \sqrt{f_{cs} \cdot f_{ci}}$$

#### 2.3.3.4 Curvas Características

Com a expressão do ganho e da fase, podemos traçar a curva de resposta em frequência para o Ganho, a fase e o ganho em dB de um filtro passa-faixa paralelo.

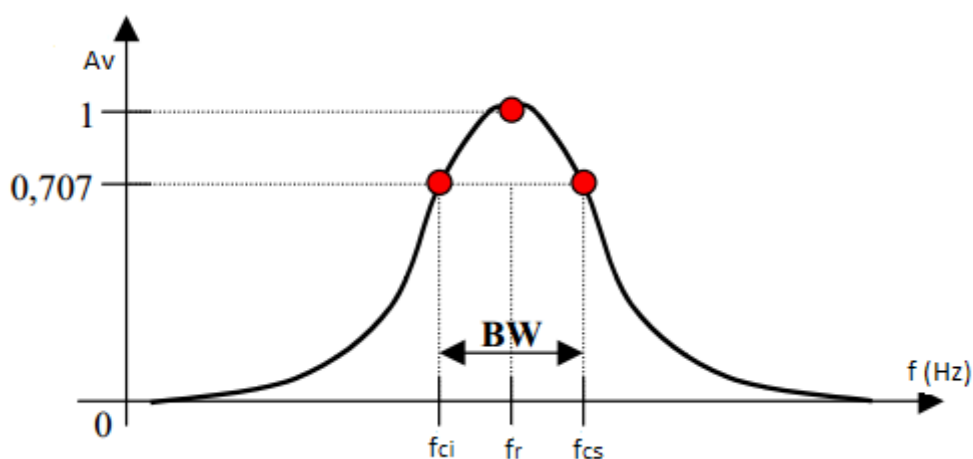


Figura 138 - Curva de resposta em frequência do filtro passa-faixa RLC paralelo - Ganho em tensão

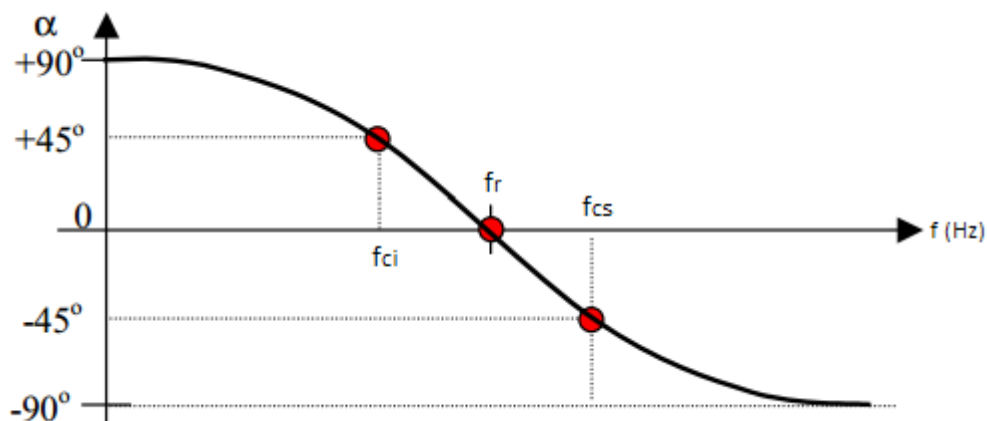


Figura 139 - Curva de resposta em frequência do filtro passa-faixa RLC paralelo - Fase

Ganho:

$$f = 0: A_v = 0$$

$$f = f_r: A_v = 1$$

$$f \rightarrow \infty: A_v = 0$$

Fase:

$$f = 0: \alpha = \arctg(\infty) = +90^\circ$$

$$f = f_r: \alpha = 0^\circ$$

$$f \rightarrow \infty: \alpha = \arctg(-\infty) = -90^\circ$$

A curva do ganho de tensão em dB é apresentada na figura 39.

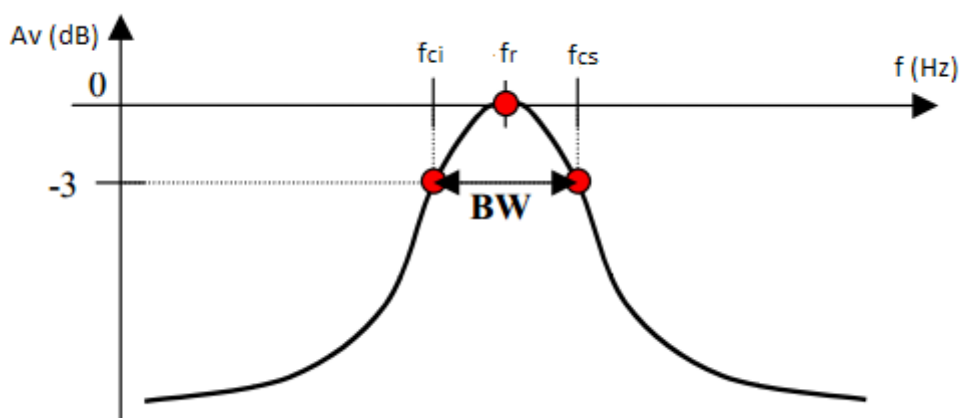


Figura 140 - Curva de resposta em frequência do filtro passa-faixa RLC paralelo - Ganho em dB

Como podemos observar, as curvas características são as mesmas para o filtro passa-faixa RLC série e o filtro passa-faixa RLC paralelo.

### 2.3.3.5 Largura de Banda e Fator de Qualidade

A largura de banda (BW) de um filtro passa-faixa é a parte da resposta em frequência do filtro que está situada na faixa de -3dB, ou seja, ela é a diferença entre a frequência de corte superior e a frequência de corte inferior.

$$BW = f_{cs} - f_{ci}$$

O cálculo da largura de banda também pode ser feito através da frequência angular:

$$BW = \omega_{cs} - \omega_{ci}$$

$$BW = \frac{\frac{L}{R} + \sqrt{\left(\frac{L}{R}\right)^2 + 4LC}}{2LC} - \left( \frac{-\frac{L}{R} + \sqrt{\left(\frac{L}{R}\right)^2 + 4LC}}{2LC} \right)$$

$$BW = \frac{\frac{L}{R} + \sqrt{\left(\frac{L}{R}\right)^2 + 4LC}}{2LC} + \frac{\frac{L}{R} - \sqrt{\left(\frac{L}{R}\right)^2 + 4LC}}{2LC}$$

$$BW = \frac{2 \cdot \frac{L}{R}}{2LC} = \frac{2L}{R} \cdot \frac{1}{2LC} = \frac{1}{RC}$$

O fator de qualidade (Q) pode ser entendido como precisão da curva do filtro. Quando Q é baixo, a curva de ressonância é larga, quando Q é alto, a curva é estreita, e o circuito é mais preciso.

O fator de qualidade pode ser calculado da seguinte forma:

$$Q = \frac{\omega_r}{BW} = \frac{\frac{1}{\sqrt{LC}}}{\frac{1}{RC}} = \sqrt{\frac{R^2 C}{L}}$$

O fator de qualidade também pode ser calculado como:

$$Q = \frac{\omega_r}{BW} = \frac{2\pi f_r}{2\pi f_{cs} - 2\pi f_{ci}} = \frac{f_r}{f_{cs} - f_{ci}}$$

### 2.3.3.6 Exemplo de filtro passa-faixa RLC paralelo

Para exemplificar o funcionamento e os cálculos para projetar um filtro passa-faixa RLC paralelo, é apresentado um passo-a-passo.

Montar um filtro passa-faixa RLC com largura de banda de 100kHz a 260kHz.

Resolução:

$$f_r = \sqrt{f_{cs} \cdot f_{ci}}$$

$$f_r = \sqrt{100 \cdot 10^3 \cdot 260 \cdot 10^3} = 161245,15 \text{ Hz} = 161,25 \text{ kHz}$$

Escolhemos o valor de um dos componentes e calculamos o outro. Neste caso, foi escolhido um indutor de 1mH.

$$C = \frac{1}{(2\pi f_r)^2 L} = \frac{1}{(2\pi \cdot 161245,15)^2 \cdot 1 \cdot 10^{-3}} = 9,74 \cdot 10^{-10} = 974 \cdot 10^{-12} \text{ F}$$

No caso, consideraremos o valor comercial mais próximo que é 1nF.

$$Q = \frac{f_r}{f_{cs} - f_{ci}} = \frac{161245,15}{260 \cdot 10^3 - 100 \cdot 10^3} = 1$$

Com este valor, podemos calcular o valor do resistor:

$$Q = \frac{\omega_r}{BW} = \frac{1}{\frac{1}{RC}} \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$1 = \frac{1}{\frac{1}{RC}} \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$\frac{1}{RC} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$\frac{1}{R \cdot 1 \cdot 10^{-9}} = \frac{1}{\sqrt{1 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 10^{-9}}}$$

$$\frac{1}{R \cdot 1 \cdot 10^{-9}} = 1 \cdot 10^6$$

$$1 = 0,001 \cdot R$$

$$R = 1k\Omega$$

Portanto, o circuito ficará como mostrado na figura 40.

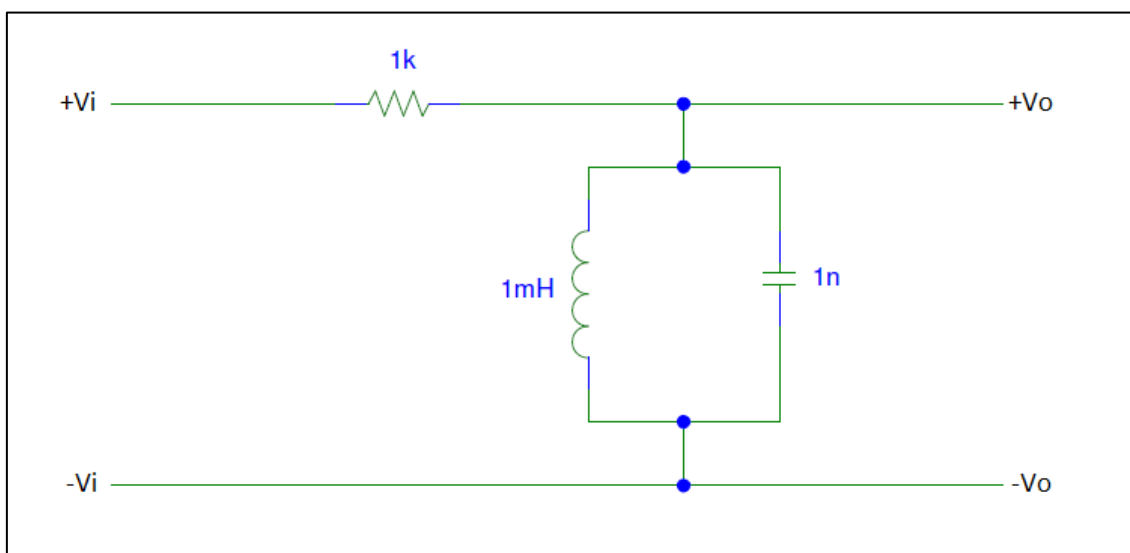


Figura 141 - Filtro Passa-Faixa RLC paralelo



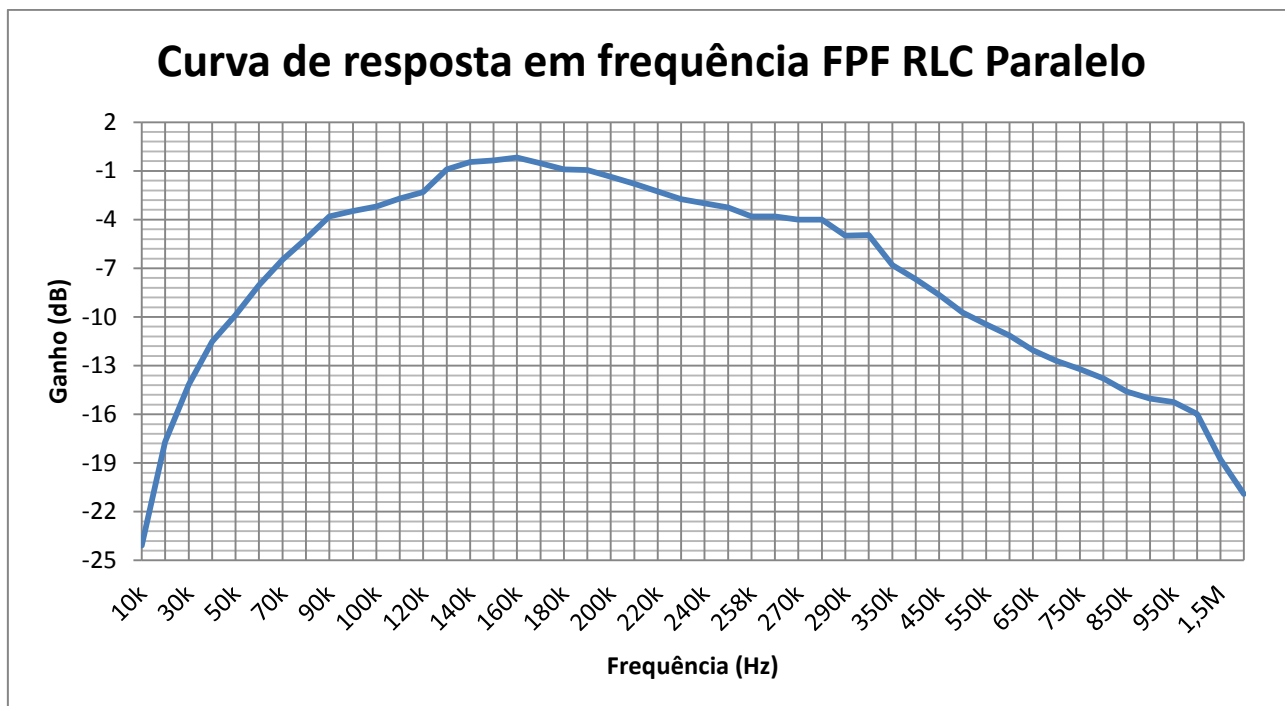


Figura 142 - Curva de Resposta em frequência Filtro Passa-Faixa RLC Paralelo

Como podemos observar, a curva de resposta em frequência condiz com o esperado, visto que o ganho entre as frequências de corte superior e inferior está situada na faixa de -3dB, e na frequência central o ganho é máximo.

### 2.3.4 Filtro Passa-Faixa RC

Um circuito, como mostrado na figura 42, pode comportar-se como um Filtro Passa-Faixa RC.

Este filtro é projetado colocando um filtro passa-alta em série com um filtro passa-baixa. Diferentemente de um filtro passa-baixa, que só permite a passagem de sinais com frequências mais baixas que a frequência de corte, e de um filtro passa-alta, que só permite a passagem de sinais com frequências mais altas que a frequência de corte, o filtro passa-faixa permite a passagem de sinais dentro de uma determinada faixa de valores.

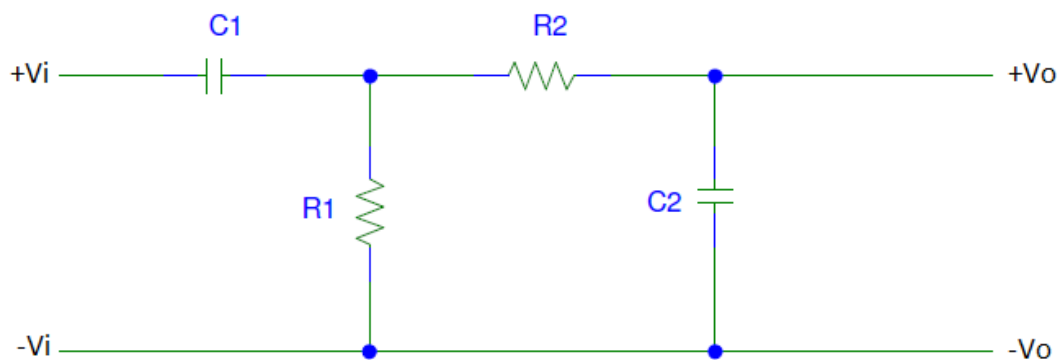


Figura 143 - Filtro Passa-Faixa RC

### 2.3.4.1 Frequência de Corte

O cálculo da frequência de corte para este circuito, é o mesmo utilizado para os filtros passa-baixa e passa-alta RC. Porém, neste caso, a frequência de corte do filtro passa-alta será a frequência de corte inferior e a frequência de corte do filtro passa-baixa será a frequência de corte superior.

Assim:

$$f_{ci} = \frac{1}{2\pi \cdot R1 \cdot C1}$$

$$f_{cs} = \frac{1}{2\pi \cdot R2 \cdot C2}$$

### 2.3.4.2 Frequência Central

A frequência central também pode ser calculada através da média geométrica da frequência de corte superior e a frequência de corte inferior. Portanto:

$$f_r = \sqrt{f_{cs} \cdot f_{ci}}$$

### 2.3.4.3 Exemplo de Filtro Passa-Faixa RC

Para exemplificar o funcionamento e os cálculos para projetar um filtro passa-faixa RC, é apresentado um passo-a-passo.

Calcule as frequências de corte, frequência central e a banda do filtro passa-faixa RC da figura 43 com resistores  $R1=R2= 10k\Omega$  e com capacitores de  $C1= 22nF$  e  $C2=680pF$ . Apresente a curva de resposta em frequência do ganho em dB.

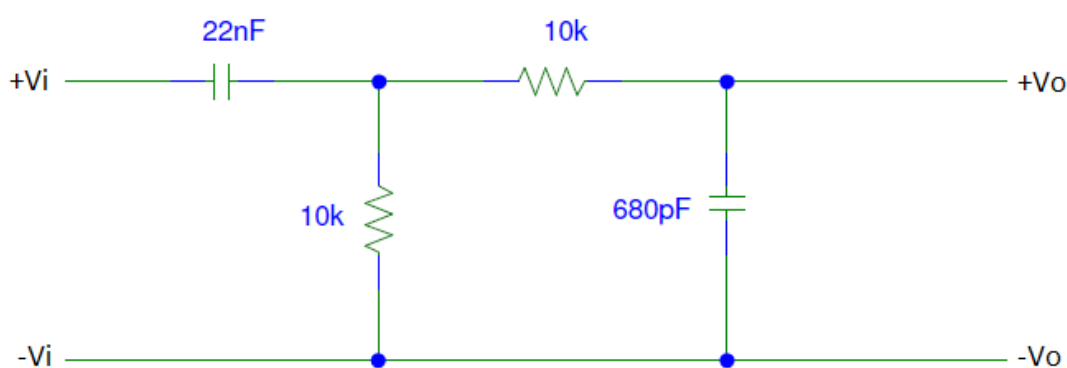


Figura 144 - Filtro passa-faixa RC

Resolução:

Para o cálculo da frequência de corte inferior utilizamos a equação:

$$f_{ci} = \frac{1}{2\pi \cdot R1 \cdot C1}$$

$$f_{ci} = \frac{1}{2\pi \cdot 10 \cdot 10^3 \cdot 22 \cdot 10^{-9}} = 723,4\text{Hz}$$

E para o cálculo da frequência de corte superior, utilizamos a mesma equação:

$$f_{cs} = \frac{1}{2\pi \cdot R2 \cdot C2}$$

$$f_{cs} = \frac{1}{2\pi \cdot 10 \cdot 10^3 \cdot 680 \cdot 10^{-12}} = 23405,1\text{Hz} = 23,4\text{kHz}$$

Para calcularmos a frequência central utilizamos a equação:

$$f_r = \sqrt{f_{cs} \cdot f_{ci}}$$

$$f_r = \sqrt{23405,1 \cdot 723,4} = 4114,7 \cong 4,11\text{kHz}$$

Finalmente, para calcularmos a banda, fazemos a diferença entre a frequência de corte superior e a inferior:

$$BW = f_{cs} - f_{ci}$$

$$BW = 23405,1 - 723,4 = 22681,7 \cong 22,7\text{kHz}$$

Portanto, a frequência de corte inferior é, aproximadamente, 720Hz. A frequência de corte superior é, aproximadamente, 24kHz. A frequência central é, aproximadamente, 4kHz. E a banda é, aproximadamente, 23kHz.

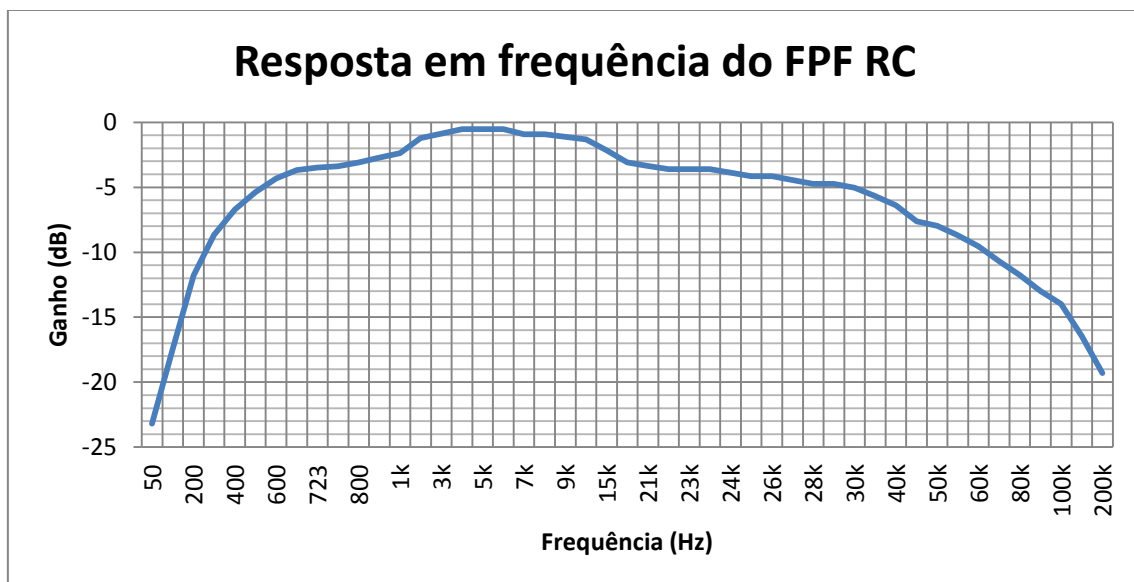


Figura 145 - Resposta em frequência do filtro passa-faixa RC

## 2.4 Filtro Rejeita-Faixa (FRF)

O filtro rejeita-faixa é um circuito que atenua sinais com frequências situadas numa região intermediária e permite a passagem de sinais com frequências abaixo

ou acima dessa faixa. Essa faixa intermediária é delimitada pela frequência de corte inferior ( $f_{ci}$ ) e pela frequência de corte superior ( $f_{cs}$ ).

### 2.4.1 Filtro Rejeita-Faixa Ideal

Para os sinais com frequências acima da frequência de corte inferior e abaixo da frequência de corte superior, o ganho é nulo. Portanto, o módulo do sinal de saída é totalmente atenuado.

Para os sinais com frequência abaixo da frequência de corte inferior ou acima da frequência de corte superior, o ganho é unitário. Portanto, o módulo do sinal de saída é igual ao de entrada.

Porém, na prática não é possível obter a resposta em frequência de um filtro rejeita-faixa como na teoria, como mostrado na figura 45.

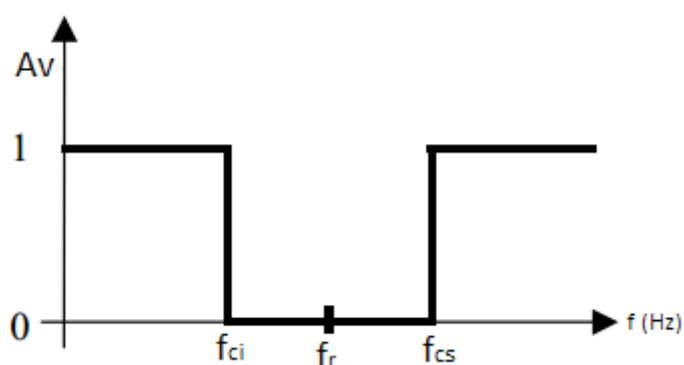


Figura 146 - Resposta em frequência de um filtro rejeita-faixa ideal

Simbologia usual:

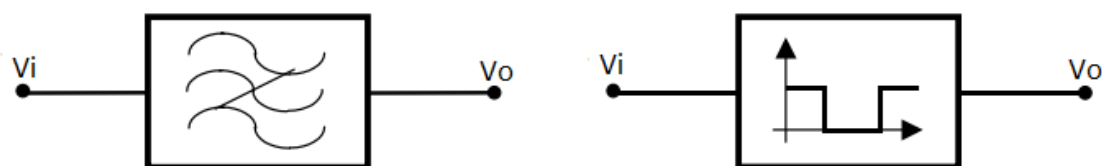


Figura 147 - Simbologia usual para filtro rejeita-faixa

### 2.4.2 Filtro Rejeita-Faixa Série

Um circuito RLC como o apresentado na figura 47 pode comportar-se como um Filtro Rejeita-Faixa.

Para os sinais de baixa frequência o indutor apresenta baixa reatância, seu comportamento é de um curto-circuito, porém o capacitor apresenta alta reatância e seu comportamento é de um circuito aberto. Assim, a maior parte da tensão de entrada estará sobre o capacitor e a tensão sobre o resistor será muito baixa, ou

seja, a tensão de saída será praticamente igual à tensão de entrada. Podemos dizer que o circuito permite a passagem de sinais com frequência baixa.

Para os sinais de alta frequência o capacitor apresenta baixa reatância e seu comportamento é de um curto-circuito, porém o indutor apresenta alta reatância e seu comportamento é de um circuito aberto. Assim, a maior parte da tensão de entrada estará sobre o indutor e a tensão sobre o resistor será muito baixa, ou seja, a tensão de saída será praticamente igual a tensão de entrada. Podemos dizer que o circuito permite a passagem de sinais com frequência alta.

Para os sinais com frequência entre a frequência de corte inferior e a frequência de corte superior, o indutor e o capacitor apresentarão baixa reatância e se comportarão como um curto-circuito. Assim, a maior parte da tensão de entrada estará sobre o resistor e a tensão de saída será praticamente nula, ou seja, o sinal será atenuado. Podemos dizer que o circuito impede a passagem de sinais dentro de uma determinada faixa de frequências.

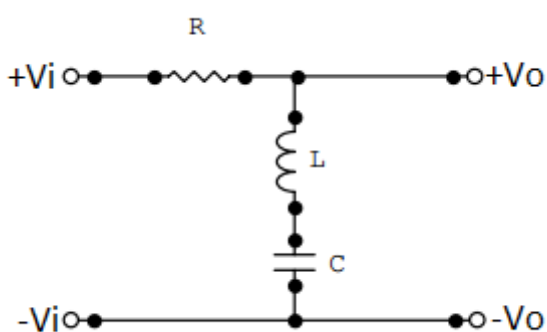


Figura 148 - Filtro Rejeita-Faixa RLC Série

#### 2.4.2.1 Ganho e Fase

Para o circuito da figura 47, a tensão de saída em função da tensão de entrada pode ser dada como:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{(XL + XC)}{R + (XL + XC)}$$

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{j\omega L + \frac{1}{j\omega C}}{R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}}$$

Fatorando a expressão, obtemos:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1 + \left( \frac{R}{j\omega L + \frac{1}{j\omega C}} \right)} = \frac{1}{1 + \left( \frac{\frac{R}{-\omega^2 LC + 1}}{j\omega C} \right)} = \frac{1}{1 + \left( \frac{j\omega RC}{1 - \omega^2 LC} \right)}$$

Portanto, a função de transferência para um filtro rejeita-faixa série, na forma fatorada é:

$$H(2\pi f) = \frac{1}{1 + j\left(\frac{\omega RC}{1 - \omega^2 LC}\right)}$$

As equações para ganho e fase serão:

$$Av = \sqrt{\frac{1}{1 + \left(\frac{\omega RC}{1 - \omega^2 LC}\right)^2}}$$

$$\alpha = \arctg\left(\frac{\omega RC}{1 - \omega^2 LC}\right)$$

#### 2.4.2.2 Frequência de corte

Sabemos que o ganho de tensão na frequência de corte é:

$$Av = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707$$

Então, para um filtro rejeita-faixa RLC série:

$$\frac{1}{\sqrt{2}} = \sqrt{\frac{1}{1 + \left(\frac{\omega_c RC}{1 - \omega_c^2 LC}\right)^2}}$$

$$1 + \left(\frac{\omega_c RC}{1 - \omega_c^2 LC}\right)^2 = 2$$

$$\frac{\omega_c RC}{1 - \omega_c^2 LC} = \pm\sqrt{1}$$

$$\pm\omega_c RC = 1 - \omega_c^2 LC$$

$$\omega_c^2 LC \pm \omega_c RC - 1 = 0$$

Esta igualdade nos fornece duas equações do segundo grau:

$$\omega_c^2 LC + \omega_c RC - 1 = 0$$

$$\omega_c^2 LC - \omega_c RC - 1 = 0$$

$$f_{ci} = \frac{-RC \pm \sqrt{(RC)^2 + 4LC}}{4\pi LC}$$

$$f_{cs} = \frac{RC \pm \sqrt{(RC)^2 + 4LC}}{4\pi LC}$$

Ou em frequência angular:

$$\omega_{ci} = \frac{-RC \pm \sqrt{(RC)^2 + 4LC}}{2LC} [\text{rad/s}]$$

$$\omega_{cs} = \frac{RC \pm \sqrt{(RC)^2 + 4LC}}{2LC} [\text{rad/s}]$$

### 2.4.2.3 Frequência Central

A frequência central ocorre justamente na frequência de ressonância.

Para haver ressonância série, é necessário que as reatâncias capacitiva e indutiva do circuito se anulem e se comportem como um curto-circuito, ou seja:

$$|X_C| = |X_L|$$

Nesta situação, o ganho será nulo, pois a reatância total da saída será zero, seu comportamento tenderá a um curto-circuito, a tensão de saída será nula e toda a tensão de entrada estará sobre o resistor.

Assim, para que a expressão do ganho seja igual a zero, é necessário que o termo do denominador seja igual a um valor infinito, então:

$$Av = 0$$

$$\sqrt{\frac{1}{1 + \left(\frac{\omega_r RC}{1 - \omega_r^2 LC}\right)^2}} = 0$$

$$\frac{1}{\infty} = 0$$

Para que esta igualdade seja verdadeira, o denominador deve ser infinito. Para isso, o denominador do termo dentro da raiz quadrada deve ser igual a zero. Então:

$$1 - \omega_r^2 LC = 0$$

$$\omega_r^2 LC = 1$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Ou em frequência angular:

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} [\text{rad/s}]$$

A frequência central também pode ser calculada através da média geométrica da frequência de corte superior e a frequência de corte inferior. Portanto:

$$f_r = \sqrt{f_{cs} \cdot f_{ci}}$$

#### 2.4.2.4 Curvas Características

Com as equações para ganho e fase, podemos traçar as curvas de resposta em frequência para o ganho e a fase de um filtro rejeita-faixa série.

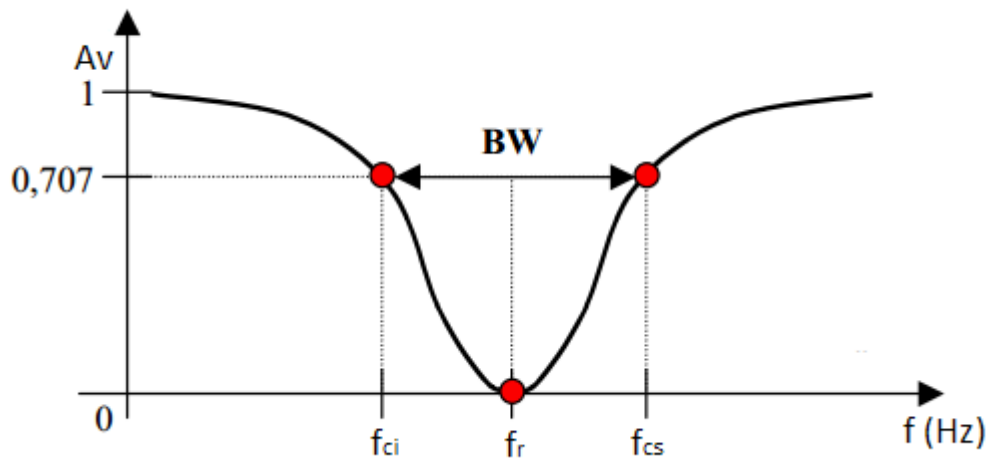


Figura 149 - Resposta em frequência filtro rejeita-faixa RLC série - Ganho em tensão

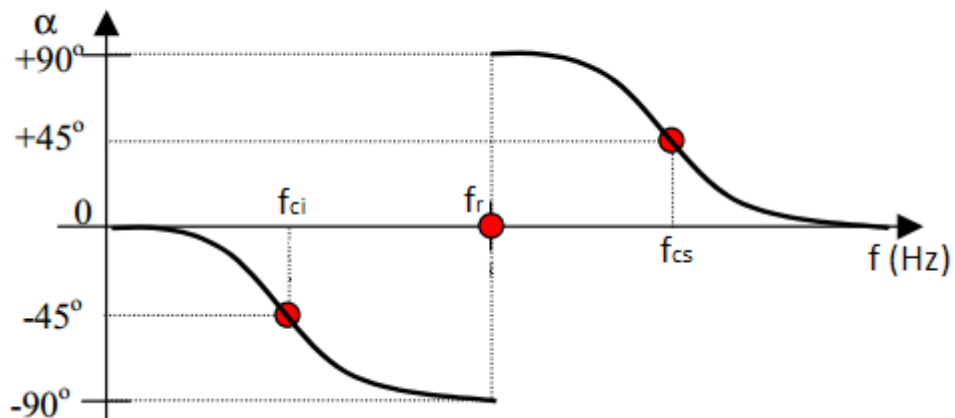


Figura 150 - Resposta em frequência filtro rejeita-faixa RLC série - Fase

Ganho:

$$f = 0: A_v = 1$$

$$f = f_r: A_v = 0$$



$$f \rightarrow \infty: A_v = 1$$

Fase:

$$f = 0: \alpha = \arctg(0) = 0^\circ$$

$$f = f_r: \alpha = \arctg\left(\frac{\omega_r RC}{\pm 0}\right) = \pm 90^\circ$$

$$f \rightarrow \infty: \alpha = \arctg(0) = 0^\circ$$

A resposta em frequência para o ganho em dB é apresentado na figura 50.

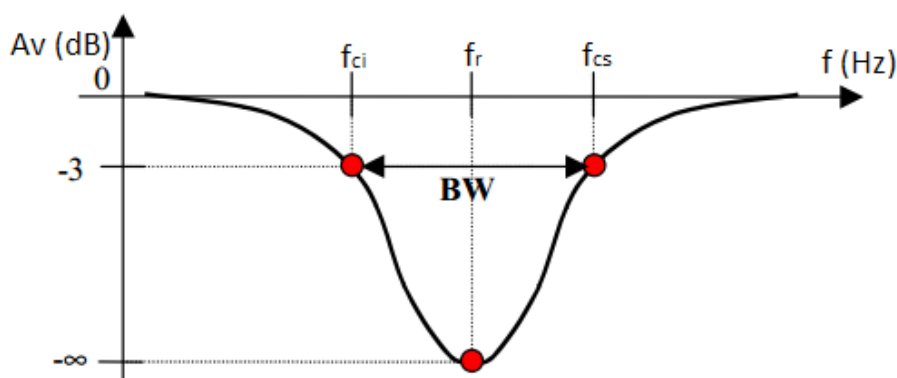


Figura 151 - Curva de resposta em frequência filtro rejeita-faixa RLC série - Ganho em dB

#### 2.4.2.5 Largura de Banda e Fator de Qualidade

A largura de banda (BW) de um filtro rejeita-faixa é a parte da resposta em frequência do filtro que está situada na faixa de -3dB, ou seja, ela é a diferença entre a frequência de corte superior e a frequência de corte inferior.

$$BW = f_{cs} - f_{ci}$$

O cálculo da largura de banda também pode ser feito através da frequência angular:

$$BW = \omega_{cs} - \omega_{ci}$$

Substituindo  $\omega_{cs}$  e  $\omega_{ci}$ :

$$BW = \frac{RC + \sqrt{(RC)^2 + 4LC}}{2LC} - \left( \frac{-RC + \sqrt{(RC)^2 + 4LC}}{2LC} \right)$$

$$BW = \frac{RC + \sqrt{(RC)^2 + 4LC}}{2LC} + \frac{RC - \sqrt{(RC)^2 + 4LC}}{2LC}$$

$$BW = \frac{2RC}{2LC} = \frac{R}{L}$$

O fator de qualidade (Q) pode ser entendido como precisão da curva do filtro. Quando Q é baixo, a curva de ressonância é larga, quando Q é alto, a curva é estreita, e o circuito é mais preciso.

O fator de qualidade pode ser calculado da seguinte forma:

$$Q = \frac{\omega_r}{BW} = \frac{1}{\frac{R}{L} \sqrt{LC}} = \sqrt{\frac{L}{CR^2}}$$

O fator de qualidade também pode ser calculado como:

$$Q = \frac{\omega_r}{BW} = \frac{2\pi f_r}{2\pi f_{cs} - 2\pi f_{ci}} = \frac{f_r}{f_{cs} - f_{ci}}$$

#### 2.4.2.6 Exemplo de Filtro Rejeita-Faixa RLC Série

Para exemplificar o funcionamento e os cálculos para projetar um filtro rejeita-faixa RLC série, é apresentado um passo-a-passo.

Montar um filtro rejeita-faixa RLC com largura de banda de 100kHz a 260kHz.

Resolução:

$$f_r = \sqrt{f_{cs} \cdot f_{ci}}$$

$$f_r = \sqrt{100 \cdot 10^3 \cdot 260 \cdot 10^3} = 161245,15 \text{ Hz} = 161,25 \text{ kHz}$$

Escolhemos o valor de um dos componentes e calculamos o outro. Neste caso, foi escolhido um indutor de 1mH.

$$C = \frac{1}{(2\pi f_r)^2 L} = \frac{1}{(2\pi \cdot 161245,15)^2 \cdot 1 \cdot 10^{-3}} = 9,74 \cdot 10^{-10} = 974 \cdot 10^{-12} \text{ F}$$

No caso, consideraremos o valor comercial mais próximo que é 1nF.

$$Q = \frac{f_r}{f_{cs} - f_{ci}} = \frac{161245,15}{260 \cdot 10^3 - 100 \cdot 10^3} = 1$$

Com este valor, podemos calcular o valor do resistor:

$$Q = \sqrt{\frac{L}{CR^2}}$$

$$1 = \sqrt{\frac{1 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 10^{-9} R^2}}$$

$$1 = \frac{1 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 10^{-9} R^2}$$

$$R^2 = 1 \cdot 10^6$$

$$R = \sqrt{1 \cdot 10^6}$$

$$R = 1k\Omega$$

Portanto, o circuito ficará como mostrado na figura 51.

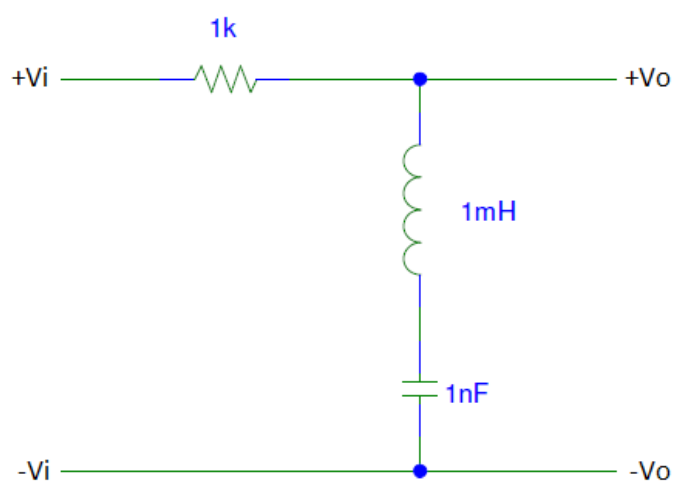


Figura 152 - Filtro Rejeita-Faixa RLC Série

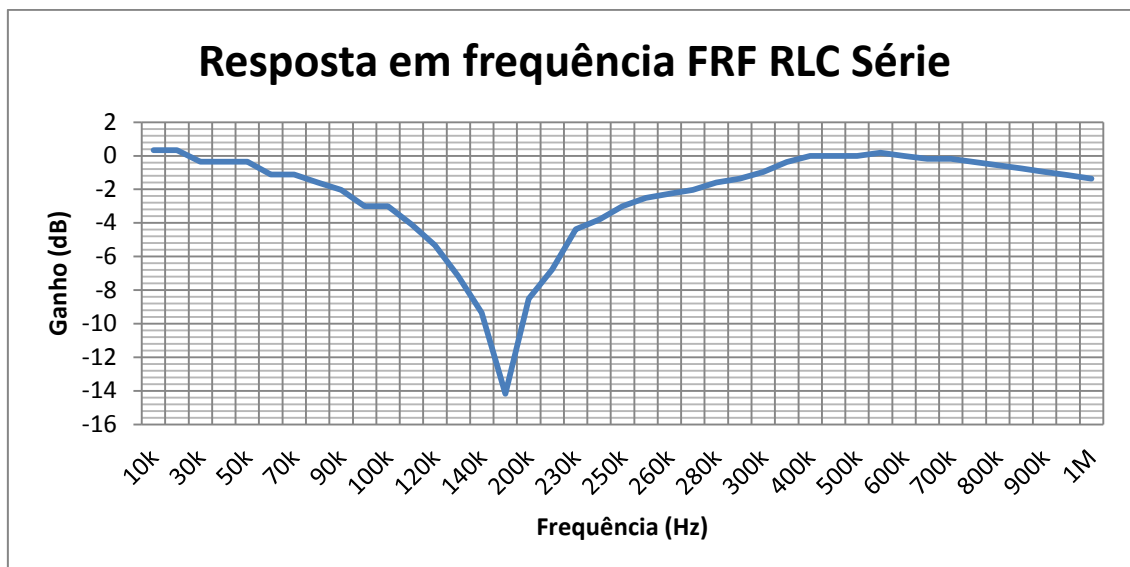


Figura 153 - Resposta em frequência do filtro rejeita-faixa RLC série

### 2.4.3 Filtro Rejeita-Faixa Paralelo

Um filtro RLC como o da figura 53 pode comportar-se como um filtro rejeita-faixa.

Para sinais de baixa frequência, o capacitor apresenta reatância elevada, se comportando como um circuito aberto. Porém, o indutor apresenta baixa reatância indutiva, se comportando como um curto-circuito. Assim, a maior parte da tensão de entrada estará sobre o resistor de saída. O circuito permite a passagem de sinais de baixa frequência.

Para sinais de alta frequência, o indutor apresenta reatância indutiva elevada, se comportando como um circuito aberto. Porém, o capacitor apresenta baixa reatância capacitiva, se comportando como um curto-circuito. Assim, a maior parte da tensão de entrada estará sobre o resistor de saída. O circuito permite a passagem de sinais de alta frequência.

Poré, para sinais que apresentem frequências maior que a frequência de corte inferior e menor que a frequência de corte superior, o indutor e o capacitor apresentarão alta reatância e ambos se comportarão como um circuito aberto. Assim, a maior parcela de tensão de entrada estará sobre o circuito LC e a tensão sobre o resistor de saída será praticamente nula, ou seja, o sinal será atenuado. O circuito impede a passagem de sinais em uma determinada faixa de frequência.

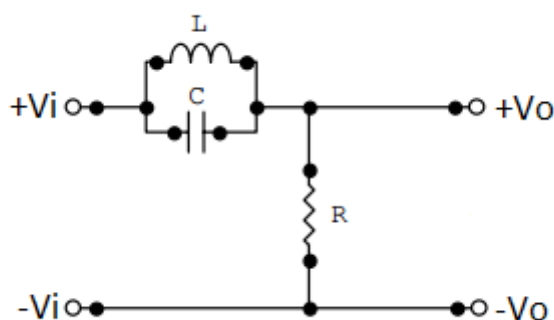


Figura 154 - Circuito filtro rejeita-faixa RLC paralelo

### 2.4.3.1 Ganho e Fase

Para o circuito da figura 53, a tensão de saída em função da tensão de entrada pode ser dada como:

$$\begin{aligned} \frac{V_o}{V_i} &= \frac{R}{R + \left(\frac{X_L \cdot X_C}{X_L + X_C}\right)} = \frac{\frac{R}{R}}{\frac{R}{R} + \frac{\left(\frac{X_L \cdot X_C}{X_L + X_C}\right)}{R}} = \frac{1}{1 + \frac{X_L \cdot X_C}{R(X_L + X_C)}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{j\omega L \cdot \frac{1}{j\omega C}}{R \cdot \left(j\omega L + \frac{1}{j\omega C}\right)}\right)} \\ &= \frac{1}{1 + \frac{\frac{L}{C}}{R \cdot \left(\frac{-\omega^2 LC + 1}{j\omega C}\right)}} = \frac{1}{1 + \frac{\left(\frac{L}{C}\right) \cdot j\omega C}{R - \omega^2 RLC}} = \frac{1}{1 + j\left(\frac{\omega L}{R - \omega^2 RLC}\right)} \end{aligned}$$

A função de transferência de um filtro rejeita-faixa paralelo será:

$$H(2\pi f) = \frac{1}{1 + j\left(\frac{\omega L}{R - \omega^2 RLC}\right)}$$

As expressões para o ganho e a fase são:

$$Av = \sqrt{\frac{1}{1 + \left(\frac{\omega L}{R - \omega^2 RLC}\right)^2}}$$

$$\alpha = \arctg\left(\frac{R - \omega^2 RLC}{\omega L}\right)$$

### 2.4.3.2 Frequência de corte

Sabemos que o ganho na frequência de corte é:

$$Av = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707$$

Então para um filtro rejeita-faixa paralelo:

$$\frac{1}{\sqrt{2}} = \sqrt{\frac{1}{1 + \left(\frac{\omega_c L}{R - \omega_c^2 RLC}\right)^2}}$$

$$1 + \left(\frac{\omega_c L}{R - \omega_c^2 RLC}\right)^2 = 2$$

$$\frac{\omega_c L}{R - \omega_c^2 RLC} = \pm 1$$

$$\pm \omega_c L = R - \omega_c^2 RLC$$

$$\omega_c^2 RLC \pm \omega_c L - R = 0$$

$$\omega_c^2 LC \pm \omega_c \frac{L}{R} - 1 = 0$$

Como a expressão do ganho é de segunda ordem, obtemos duas equações de segundo grau, cada uma com duas soluções que correspondem à frequência de corte inferior e à frequência de corte superior para o filtro rejeita-faixa paralelo:

$$f_{ci} = \frac{-\frac{L}{R} \pm \sqrt{\left(\frac{L}{R}\right)^2 + 4LC}}{4\pi LC}$$

$$f_{cs} = \frac{\frac{L}{R} \pm \sqrt{\left(\frac{L}{R}\right)^2 + 4LC}}{4\pi LC}$$

Ou em frequência angular:

$$\omega_{ci} = \frac{-\frac{L}{R} \pm \sqrt{\left(\frac{L}{R}\right)^2 + 4LC}}{2LC} [\text{rad/s}]$$

$$\omega_{cs} = \frac{\frac{L}{R} \pm \sqrt{\left(\frac{L}{R}\right)^2 + 4LC}}{2LC} [\text{rad/s}]$$

### 2.4.3.3 Frequência Central

A frequência central ocorre exatamente na frequência de ressonância.

Para haver ressonância paralela é necessário que as reatâncias equivalentes do circuito sejam infinitas para se comportarem como um curto-circuito:

$$\frac{X_L \cdot X_C}{X_L + X_C} = \infty$$

Ou seja, é necessário que as reatâncias capacitivas e indutivas do circuito se anulem, então:

$$|X_L| - |X_C|$$

Nesta situação, o ganho do circuito é nulo, então:

$$Av = 0$$

$$\frac{1}{\sqrt{1 + \left(1 + \left(\frac{\omega_r L}{R - \omega_r^2 RLC}\right)^2\right)}} = 0$$

$$\frac{1}{\infty} = 0$$

$$R - \omega_r^2 RLC = 0$$

$$\omega_r^2 LC = 1$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Ou em frequência angular:

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} [\text{rad/s}]$$

A frequência central também pode ser calculada através da média geométrica da frequência de corte superior e a frequência de corte inferior. Portanto:

$$f_r = \sqrt{f_{cs} \cdot f_{ci}}$$

### 2.4.3.4 Curvas Características

Com as equações para ganho e fase, podemos traçar as curvas de resposta em frequência para o ganho e a fase de um filtro rejeita-faixa série.

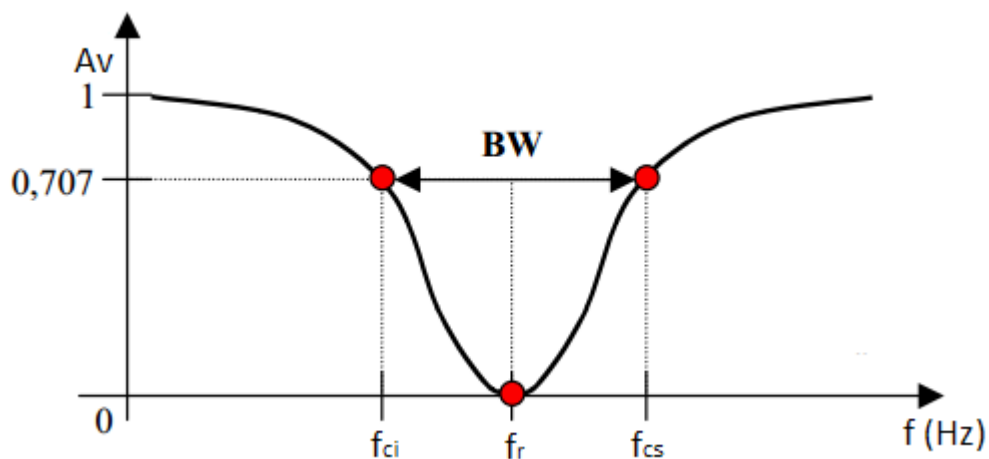


Figura 155 - Resposta em frequência filtro rejeita-faixa RLC série - Ganho em tensão

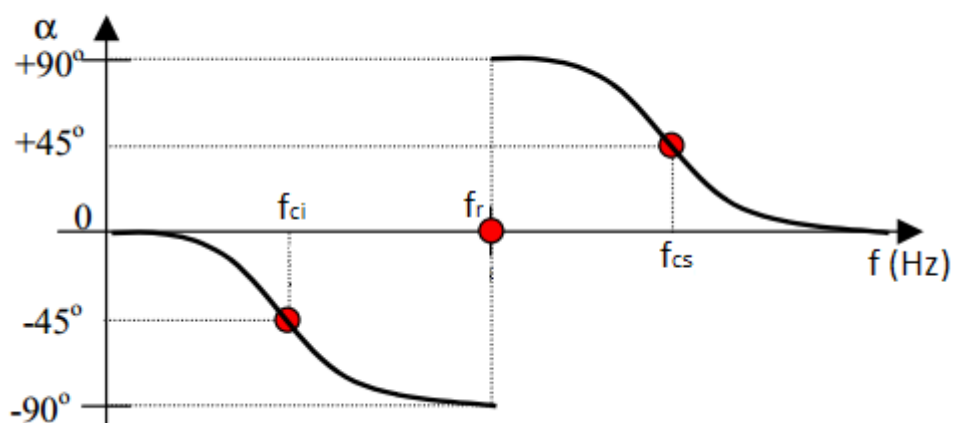


Figura 156 - Resposta em frequência filtro rejeita-faixa RLC série - Fase

Ganho:

$$f = 0: A_v = 1$$

$$f = f_r: A_v = 0$$

$$f \rightarrow \infty: A_v = 1$$

Fase:



$$f = 0: \alpha = \arctg(0) = 0^\circ$$

$$f = f_r: \alpha = \arctg\left(\frac{\omega_r RC}{\pm 0}\right) = \pm 90^\circ$$

$$f \rightarrow \infty: \alpha = \arctg(0) = 0^\circ$$

A resposta em frequência para o ganho em dB é apresentado na figura 50.

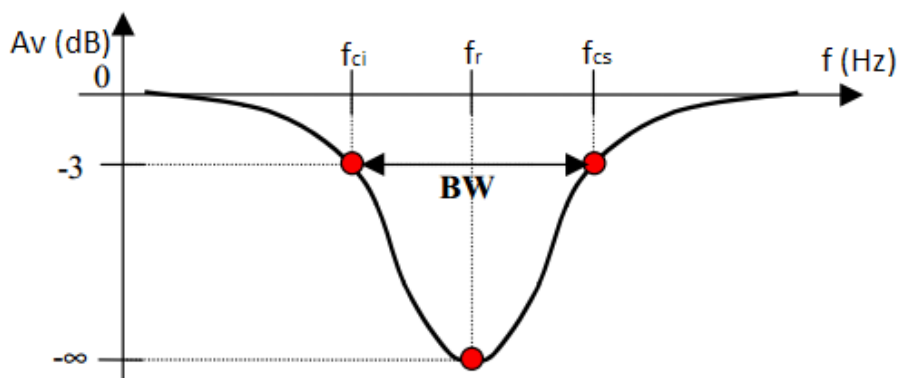


Figura 157 - Curva de resposta em frequência filtro rejeita-faixa RLC série - Ganho em dB

### 2.4.3.5 Largura de Banda e Fator de Qualidade

A largura de banda (BW) de um filtro rejeita-faixa é a parte da resposta em frequência do filtro que está situada na faixa de -3dB, ou seja, ela é a diferença entre a frequência de corte superior e a frequência de corte inferior.

$$BW = f_{cs} - f_{ci}$$

O cálculo da largura de banda também pode ser feito com a frequência angular:

$$BW = \omega_{cs} - \omega_{ci}$$

$$BW = \frac{\frac{L}{R} + \sqrt{\left(\frac{L}{R}\right)^2 + 4LC}}{2LC} - \left( \frac{-\frac{L}{R} + \sqrt{\left(\frac{L}{R}\right)^2 + 4LC}}{2LC} \right)$$

$$BW = \frac{\frac{L}{R} + \sqrt{\left(\frac{L}{R}\right)^2 + 4LC}}{2LC} + \frac{\frac{L}{R} - \sqrt{\left(\frac{L}{R}\right)^2 + 4LC}}{2LC}$$

$$BW = \frac{2 \cdot \frac{L}{R}}{2LC} = \frac{2L}{R} \cdot \frac{1}{2LC} = \frac{1}{RC}$$

O fator de qualidade (Q) pode ser entendido como precisão da curva do filtro. Quando Q é baixo, a curva de ressonância é larga, quando Q é alto, a curva é estreita, e o circuito é mais preciso.

$$Q = \frac{\omega_r}{BW} = \frac{\frac{1}{\sqrt{LC}}}{\frac{1}{RC}} = \sqrt{\frac{R^2C}{L}}$$

O fator de qualidade também pode ser calculado como:

$$Q = \frac{\omega_r}{BW} = \frac{2\pi f_r}{2\pi f_{cs} - 2\pi f_{ci}} = \frac{f_r}{f_{cs} - f_{ci}}$$

#### 2.4.3.6 Exemplo de Filtro Rejeita-Faixa RLC Paralelo

Para exemplificar o funcionamento e os cálculos para projetar um filtro rejeita-faixa RLC paralelo, é apresentado um passo-a-passo.

Montar um filtro rejeita-faixa RLC com largura de banda de 100kHz a 260kHz.

Resolução:

$$f_r = \sqrt{f_{cs} \cdot f_{ci}}$$

$$f_r = \sqrt{100 \cdot 10^3 \cdot 260 \cdot 10^3} = 161245,15 \text{ Hz} = 161,25 \text{ kHz}$$

Escolhemos o valor de um dos componentes e calculamos o outro. Neste caso, foi escolhido um indutor de 1mH.

$$C = \frac{1}{(2\pi f_r)^2 L} = \frac{1}{(2\pi \cdot 161245,15)^2 \cdot 1 \cdot 10^{-3}} = 9,74 \cdot 10^{-10} = 974 \cdot 10^{-12} \text{ F}$$

No caso, consideraremos o valor comercial mais próximo que é 1nF.

$$Q = \frac{f_r}{f_{cs} - f_{ci}} = \frac{161245,15}{260 \cdot 10^3 - 100 \cdot 10^3} = 1$$

Com este valor, podemos calcular o valor do resistor:

$$Q = \frac{\omega_r}{BW} = \frac{\frac{1}{\sqrt{LC}}}{\frac{1}{RC}}$$

$$1 = \frac{\frac{1}{\sqrt{LC}}}{\frac{1}{RC}}$$

$$\frac{1}{RC} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$\frac{1}{R \cdot 1 \cdot 10^{-9}} = \frac{1}{\sqrt{1 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 10^{-9}}}$$

$$\frac{1}{R \cdot 1 \cdot 10^{-9}} = 1 \cdot 10^6$$

$$1 = 0,001 \cdot R$$

$$R = 1k\Omega$$

Portanto, o circuito ficará como mostrado na figura 57.

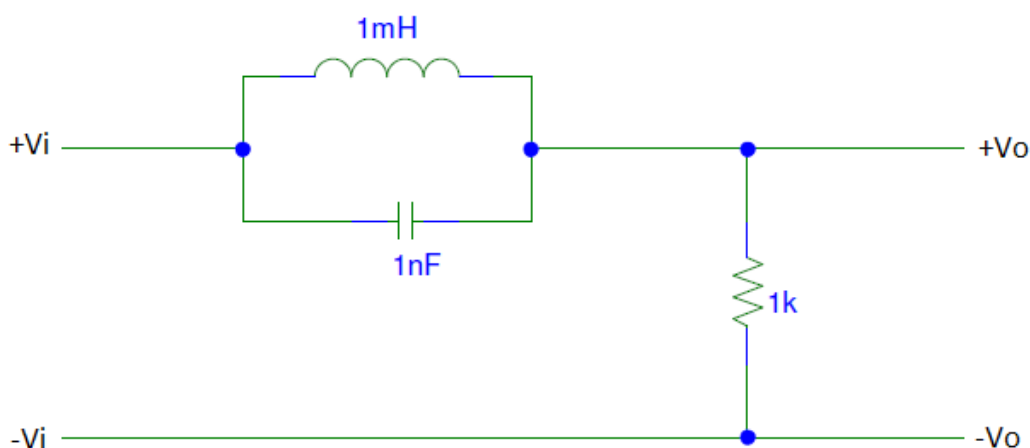


Figura 158 - Filtro Rejeita-Faixa RLC Paralelo

#### 2.4.4 Filtro Rejeita-Faixa duplo T

Um circuito como mostrado na figura 58, pode comportar-se como um filtro rejeita-faixa RC. Enquanto um filtro passa-faixa seleciona apenas uma faixa de frequências que pode chegar a sua saída, o filtro rejeita-faixa faz o inverso, ou seja, ele determina uma faixa de frequências que não pode passar pela saída. As frequências abaixo da frequência de corte inferior e acima da frequência de corte superior não são bloqueadas pelo filtro.

Um arranjo possível para se formar um filtro rejeita-faixa pode ser visto na figura 58. Trata-se de uma combinação chamado “duplo T”, devido ao posicionamento dos componentes lembrarem duas letras T. Este circuito também é conhecido como filtro notch, por (idealmente) apresentar uma banda de rejeição muito estreita, como mostrado na figura 59.

Nas baixas frequências, os capacitores apresentam uma reatância capacitiva muito elevada, e seu comportamento é de um circuito aberto, e apenas os dois resistores  $R_2$  ficam no caminho do sinal.

Nas altas frequências, a reatância capacitiva dos capacitores C1 será muito baixa, e seu comportamento é de um curto-circuito.

As frequências entre a frequência de corte inferior e a frequência de corte superior não poderão passar. Elas serão bloqueadas nos capacitores C1 (com reatância capacitiva alta) ou desviadas em C2 (com reatância capacitiva baixa).

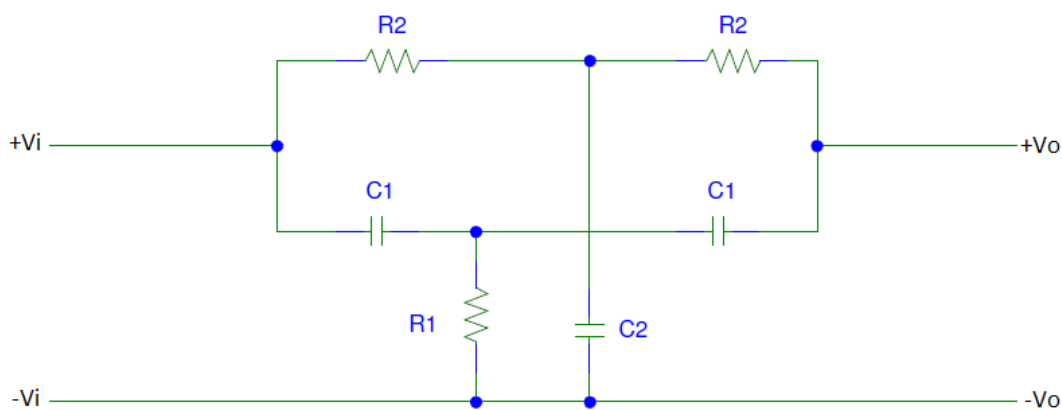


Figura 159 - Filtro Rejeita-Faixa - duplo T

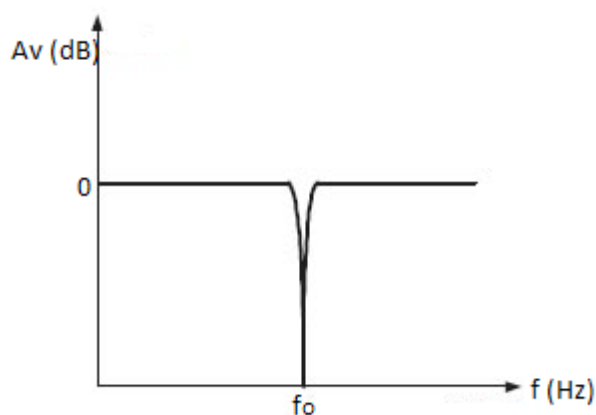


Figura 160 - Resposta em Frequência Filtro Rejeita-Faixa duplo T

Outra maneira equivalente de configurar esse circuito é mostrado na figura 60.

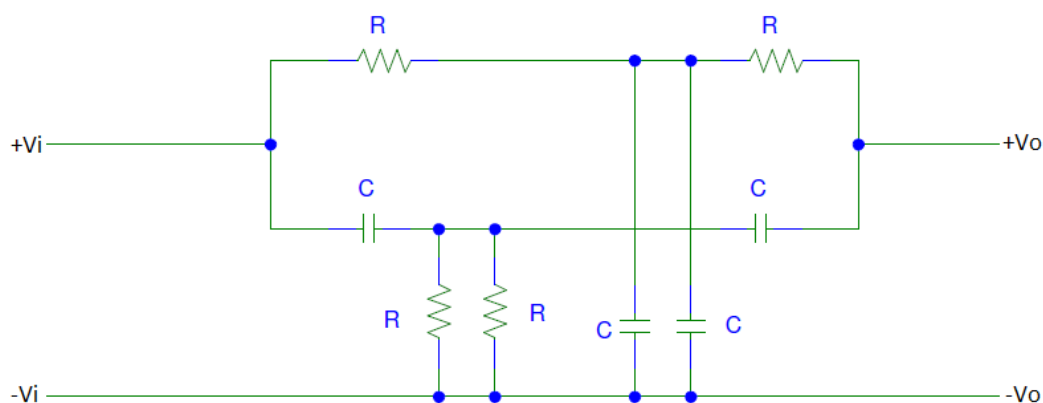


Figura 161 - Filtro rejeita-faixa duplo T

Esta configuração é equivalente à da figura 59, visto que a resistência equivalente do ramo que é ligado ao terra é  $\frac{R}{2}$ , e o valor do capacitor equivalente do ramo que também está ligado ao terra é  $2C$ .

Como veremos na seção 2.4.4.1, o cálculo do resistor  $R_1$  da figura 59 é:

$$R_1 = \frac{R_2}{2}$$

E o cálculo do capacitor  $C_2$  é:

$$C_2 = 2 \cdot C_1$$

O que nos prova que os circuitos são equivalentes.

#### 2.4.4.1 Máxima Rejeição

Se analisarmos este circuito, poderemos perceber que ele é uma junção de um filtro passa-baixa em paralelo com um filtro passa-alta, portanto a frequência onde ocorrerá a máxima rejeição poderá ser calculada utilizando a mesma fórmula dos filtro passa-baixa e passa-alta, fazendo algumas considerações.

Fazendo:

$$R_2 = 2 \cdot R_1$$

E

$$C_2 = 2 \cdot C_1$$

A máxima rejeição ocorrerá na frequência:

$$f_o = \frac{1}{2\pi R_1 \cdot C_2}$$

### 2.4.4.2 Exemplo de filtro duplo T

Para exemplificar o funcionamento e os cálculos para projetar um filtro duplo T, é apresentado um passo-a-passo.

Montar um filtro duplo T, como o da figura 60, com frequência de máxima rejeição de 1,6kHz e  $C=100\text{nF}$ . Calcular o valor do resistor e traçar a curva de resposta em frequência.

Resolução:

Sabemos que  $f_o = 1,6\text{kHz}$  e que  $C = 100\text{nF}$ , então:

$$f_o = \frac{1}{2\pi \cdot R \cdot C}$$

$$1,6 \cdot 10^3 = \frac{1}{2\pi \cdot R \cdot 100 \cdot 10^{-9}}$$

$$R = \frac{1}{2\pi \cdot 1,6 \cdot 10^3 \cdot 100 \cdot 10^{-9}}$$

$$R = 994,7\Omega \cong 1\text{k}\Omega$$

Portanto, o circuito ficará como a figura 61.

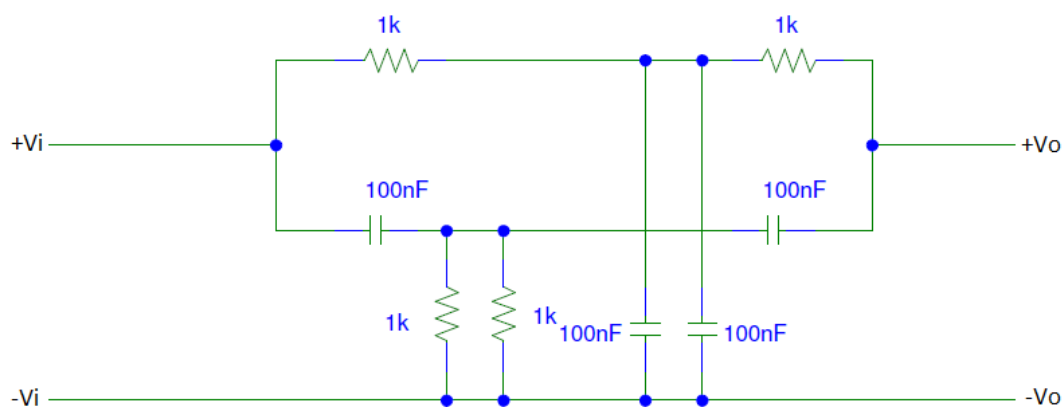


Figura 162 - Filtro Rejeita-Faixa Duplo T

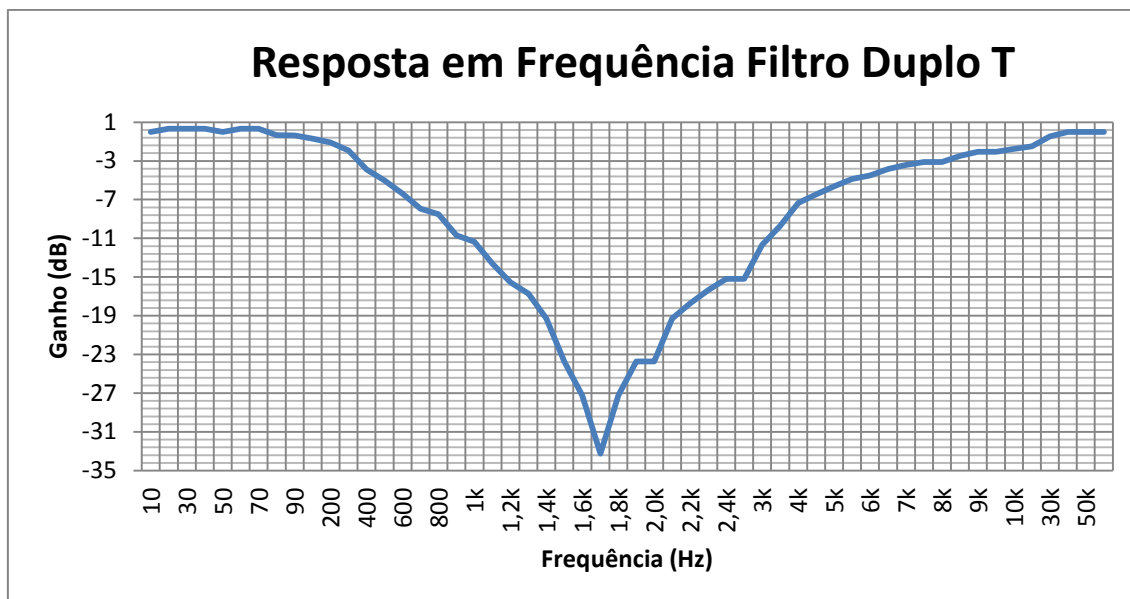


Figura 163 - Resposta em frequência do filtro rejeita-faixa duplo T

Como podemos observar pelo gráfico de resposta em frequência, a máxima rejeição ocorre muito próximo do valor esperado, porém a queda não é brusca como a teoria propõe. Porém, este filtro apresenta um resultado satisfatório.

### 3. FILTROS ATIVOS

Os filtros ativos são assim chamados por apresentam componentes ativos, ou seja, que necessitam de alimentação, associados aos componentes passivos (resistores e capacitores). Assim, ao contrário dos filtros passivos, os ativos apresentam também um amplificador a fim de produzir uma amplificação de tensão (ganho) e buferização ou isolamento do sinal. Os indutores raramente são utilizados em projetos de filtros ativos devido ao seu tamanho e alto custo.

Os elementos ativos citados anteriormente podem ser: válvulas, transistores ou amplificadores operacionais. A evolução dos filtros ativos pode ser dividida em três gerações, tendo esses três componentes como elementos ativos.

A primeira geração era implementada com as válvulas. Porém, os resultados não eram muito satisfatórios, uma vez que apresentavam alta margem de ruído, elevado consumo de potência e baixo ganho. Os transistores fazem parte da segunda geração. Apesar de apresentarem evolução considerável nos resultados de implementação dos filtros ativos, ainda deixavam muito a desejar. Por fim, a terceira geração é caracterizada pela utilização dos amplificadores operacionais. Esses componentes possuem alta resistência de entrada e baixa resistência de saída que,

combinadas com outras características, proporcionam ótimos resultados na implementação dos filtros. E o foco do estudo e dos projetos aqui apresentados serão os filtros ativos implementados com o amplificador operacional.

Os filtros ativos possuem diversas aplicações e atualmente têm sido cada vez mais utilizados em diversas áreas de eletrônica. Dentre elas, as telecomunicações, a bioengenharia e a instrumentação (principalmente a eletromedicina ou bioeletrônica) podem ser citadas como aquelas nas quais eles são mais utilizados.

Como mencionado anteriormente, os filtros podem ser classificados de acordo com a função executada (filtros passa-baixa, passa-alta, passa-faixa ou rejeita-faixa) e quanto à função-resposta (ou aproximação) utilizada (filtros Butterworth, Chebyshev e Cauer). Nesta seção, serão abordadas as implementações dos filtros ativos de acordo com essas duas classificações.

### **3.1 Vantagens e Desvantagens dos filtros ativos**

Comparando os filtros passivos e ativos, estes apresentam diversas vantagens em relação àqueles:

- Possibilidade de amplificação elevada (alto ganho) do sinal de entrada, mesmo quando se trata de sinal de nível muito baixo;
- Possibilidade de implementar de maneira fácil a associação em cascata de estágios simples a fim de projetar filtros mais complexos;
- Grande flexibilidade de projetos;
- O uso de indutores é dispensável. Isto se torna positivo, visto que, em baixas frequências, esses componentes são volumosos e pesados, além de caros.

Apesar de possuírem muitas vantagens, os filtros ativos apresentam também algumas limitações, tais como:

- Necessidade de fonte de alimentação, devido aos componentes ativos (amplificadores operacionais);
- A resposta em frequência se limita à capacidade de resposta dos próprios amplificadores operacionais;
- Impossibilidade de serem utilizados em sistemas de média e alta potência (por exemplo, filtros para conversores e inversores, os quais são usados em acionamentos industriais).

### **3.2 Amplificador Operacional**

Como os filtros ativos são caracterizados pelos componentes ativos, é preciso entender como esses dispositivos funcionam. O componente que será estudado e



com o qual serão implementados os projetos dos filtros ativos será o amplificador operacional.

O amplificador operacional é um dispositivo extremamente versátil e eficiente, cuja atuação se encontra em diversos ramos industrial, especialmente na eletrônica. Também conhecido como amp-op, o operacional é um amplificador diferencial que apresenta uma alta impedância de entrada e uma baixa impedância de saída e, por conta disso, apresenta um ganho muito alto. Além disso, é um circuito integrado projetado para operar sob alimentação simétrica. Esse componente oferece muitas vantagens, tais como: baixo custo, tamanho reduzido, alta confiabilidade, tensão pequena e corrente de deslocamento (*offset*).

Os amp-ops possuem uma série de aplicações, sendo muito utilizados em sistemas eletrônicos de controle industrial, em instrumentação médica, em instrumentação nuclear, em computadores analógicos, nos equipamentos de telecomunicações, em filtros, em osciladores e entre outros.

A Figura 63 apresenta a simbologia de um amp-op básico com duas entradas - sendo uma inversora e outra, não inversora - e uma saída, que corresponde a um valor múltiplo (fator A) da diferença entre as duas entradas, conforme a equação 1. Este valor corresponde ao ganho de tensão do amplificador. A entrada inversora resulta em uma saída com a mesma polaridade (ou fase) e, por outro lado, a entrada não-inversora resulta em uma saída com polaridade (ou fase).

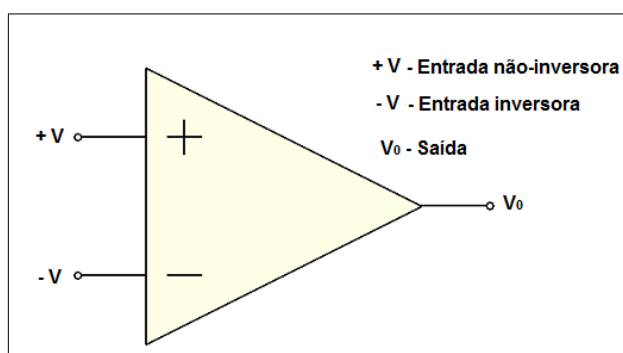


Figura 63 - Simbologia do amplificador operacional

$$V_o = [(+V) - (-V)] \quad (1)$$

### 3.2.1 Ganho de Tensão de um Amplificador

Os AmpOps se caracterizam por apresentar um ganho de tensão, que corresponde ao fator pelo qual a tensão de entrada é multiplicada, resultando, assim, na tensão de saída do componente.

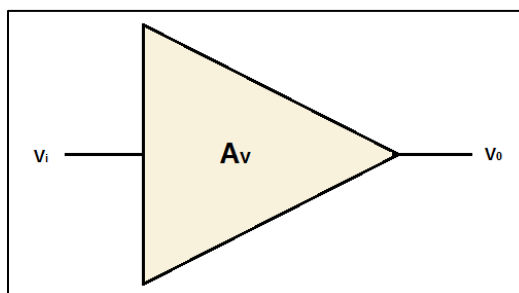


Figura 64 - Símbolo de um amplificador genérico

Considerando o símbolo genérico de um amplificador apresentado na figura 64, onde:

$V_i$ : sinal de entrada

$V_o$ : sinal de saída

$A_v$ : ganho de tensão do amplificador

Pode-se definir o fator de ganho  $A_v$  como sendo:

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} \quad (2)$$

Convertendo para decibéis:

$$G(dB) = 10 \log G \quad (3)$$

Como, em se tratando de tensão, o ganho em decibéis é calculado como razão do quadrado. Portanto,

$$A_v(dB) = 10 \log \frac{V_o^2}{V_i^2} \longrightarrow A_v(dB) = 2 * 10 \log \frac{V_o}{V_i}$$

Tem-se que o ganho de tensão em decibéis corresponde a:

$$A_v(dB) = 20 \log \frac{V_o}{V_i} \quad (4)$$

### 3.2.2 Ganho Largura de Banda

O AmpOp é um componente com a finalidade de funcionar como amplificador de alto ganho e com uma banda-passante ampla. Devido aos efeitos de realimentação dos operacionais, essa operação tende a oscilar. Para evitar esse instabilidade, os operacionais apresentam circuitos de compensação interna, que acabam por reduzir o ganho de malha aberta à medida que a frequência aumenta. Essa redução é conhecida como *roll-off*. Em frequências baixas, o ganho geralmente corresponde a um valor muito alto ( $A_v$ ). À medida que a frequência aumenta, o ganho de malha aberta reduz, até que atinja o valor unitário, como pode ser verificado na figura 65. A frequência referente ao ganho unitário é especificada pelo fabricante como largura de banda de ganho unitário,  $B1$ .

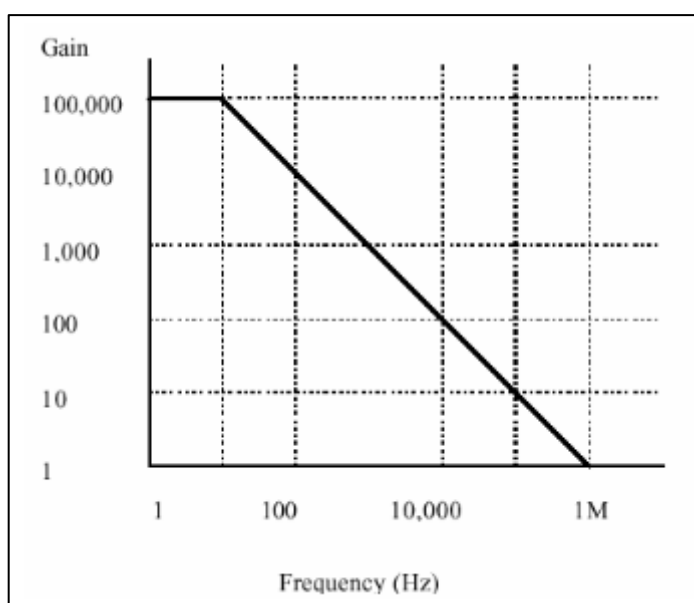


Figura 65 - Gráfico ganho versus frequência de um ampop.

FONTE: Lamar University

Outro aspecto importante em relação à frequência é que o ganho referente à frequência de corte  $f_c$  do operacional corresponde à 3 dB abaixo que o ganho máximo. Em se tratando de ganho CC, esse valor corresponde à 0,707 do ganho. Pode-se observar isso na Figura 66.

A frequência de ganho unitário e a frequência de corte de um ampop obedecem à seguinte relação:

$$f1 = Avd.fc \quad (5)$$

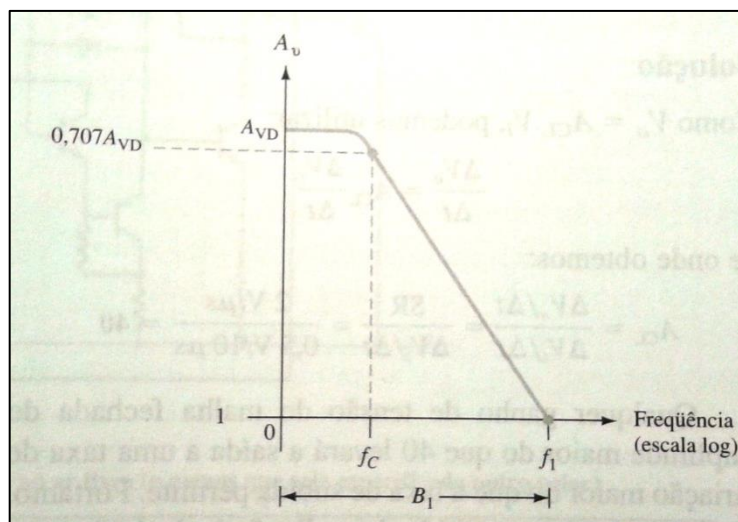


Figura 66 - Gráfico frequência versus ganho  
 FONTE: Boylestad; Nashelsky (2004).

### 3.2.3 Amplificador Operacional LM741

Na bancada didática, o amplificador operacional utilizado será o LM741. Trata-se de um amp-op genérico e seu funcionamento consiste basicamente na subtração de uma tensão se entrada aplicada à entrada inversora em relação à uma tensão de entrada aplicada à entrada não-inversor, sendo que o resultado dessa diferença é amplificada em 100.000 vezes. O amplificador operacional 741 opera sob uma alimentação simétrica. Na figura a seguir é possível observar as pinagens do CI e suas respectivas funções.

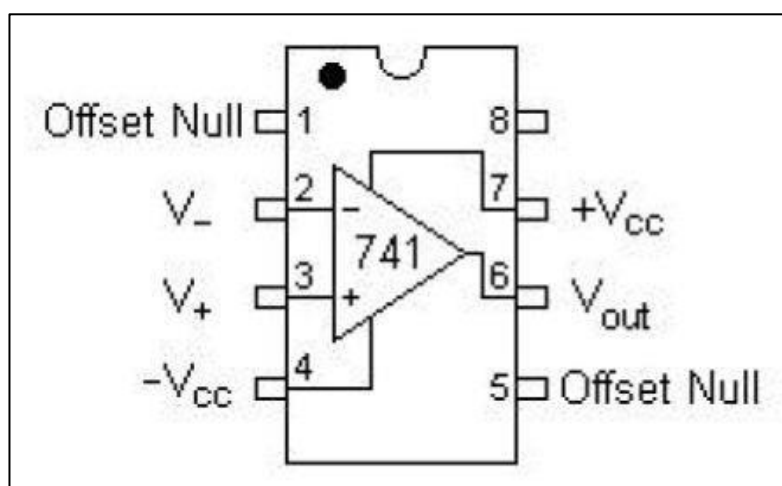


Figura 67 – Pinagem do amp-op lm741.

### 3.3 Tipos de filtros quanto à função-resposta

Nesta seção serão abordados dois tipos de filtros classificados quanto à aproximação usada para projetá-los. A respeito dos filtros de Butterworth, Sedra (2000) afirma:

“Essas funções têm como vantagem o fato de expressões completamente analíticas estarem disponíveis com seus parâmetros. Portanto, podem ser usadas no projeto de filtros sem a necessidade de um computador ou tabelas. Sua

utilidade, porém, é limitada a aplicações relativamente simples.” (Sedra, Adel S., 2000, p. 820)

### 3.3.1 Filtro Butterworth

Um filtro que utiliza uma aproximação do tipo Butterworth possui a seguinte função de transferência:

$$Av(s) = \frac{Avo}{Bn(s)} \quad (6)$$

E fazendo  $s = jw$ ,

$$|Av(s)|^2 = |Av(s)| |Av(-s)| = \frac{Avo^2}{1 + \left(\frac{w}{wo}\right)^{2n}} \quad (7)$$

Pelas equações (6) e (7), tem-se que o módulo de  $Bn(s)$  é descrito como:

$$Bn(w) = \sqrt{1 + (w/wo)^{2n}} \quad (8)$$

A resposta do filtro Butterworth para diversos valores de  $n$  está mostrada na Figura 4168. Nota-se que as respostas se aproximam a da resposta de um filtro ideal à medida que  $n$  aumenta.

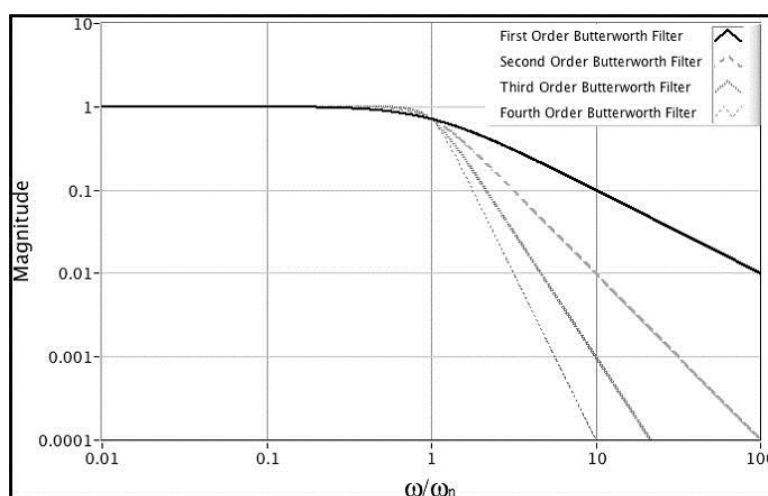


Figura 68 - Frequência normalizada  $w/wo$   
 FONTE: UtahState University (2010).

Para um filtro ativo de segunda ordem, tem-se:

$$Av(s) = \frac{Avo \left(\left(\frac{1}{RC}\right)^2\right)}{s^2 + \left(\frac{3-Avo}{RC}\right)s + \left(\frac{1}{RC}\right)^2} \quad (9)$$

A Tabela 1 apresenta os polinômios de Butterworth para filtros de até ordem 8, para  $\omega_o = 1$  rad/s. É possível notar que quando  $n$  é um número par, os polinômios correspondem aos produtos de formas quadráticas e, quando é um número ímpar, o fator  $(s + 1)$  é acrescentado. O valor dos zeros dos polinômios normalizado de

Butterworth são apenas -1 e são determinados pelos círculos de Butterworth de raio igual a 1. O fator de amortecimento  $k$  (onde,  $k = \cos\theta$ ) corresponde à metade do coeficiente de  $s$  de cada fator quadrático da tabela.

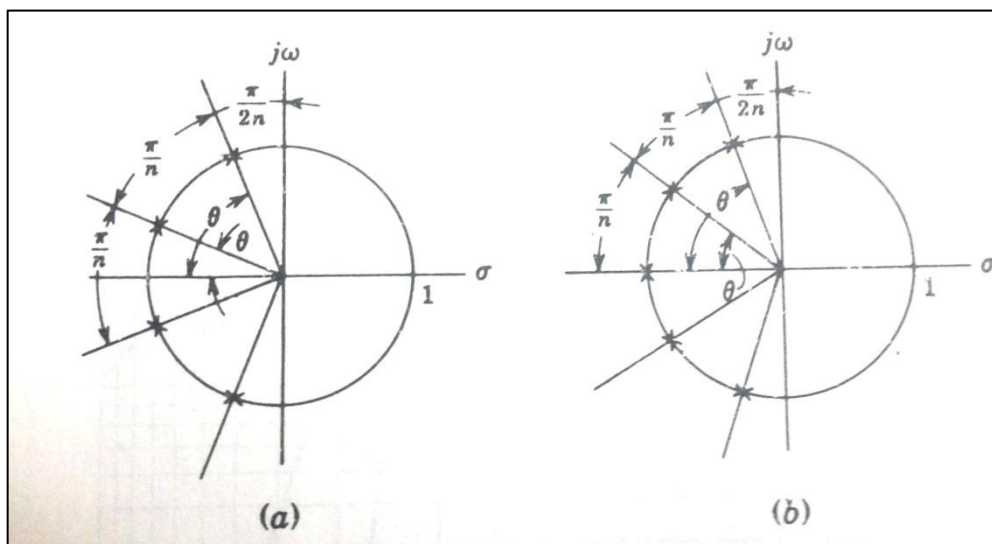


Figura 69 - Círculo de Butterworth, para  $n$  igual a um número par (a) e para  $n$  igual a um número ímpar (b)  
 FONTE: Millman (1988).

Tabela 6 - Polinômios normalizados de Butterworth

FONTE: Millman (1981)

$n$	Fatores de polinomiais $B_n(s)$
1	$(s + 1)$
2	$s^2 + 1.414s + 1$
3	$(s + 1)(s^2 + s + 1)$
4	$(s^2 + 0.7654s + 1)(s^2 + 1.8478s + 1)$
5	$(s + 1)(s^2 + 0.6180s + 1)(s^2 + 1.6180s + 1)$
6	$(s^2 + 0.5176s + 1)(s^2 + 1.414s + 1)(s^2 + 1.9318s + 1)$
7	$(s + 1)(s^2 + 0.4450s + 1)(s^2 + 1.247s + 1)(s^2 + 1.8022s + 1)$
8	$(s^2 + 0.3986s + 1)(s^2 + 1.111s + 1)(s^2 + 1.6630s + 1)(s^2 + 1.9622s + 1)$

Mais à diante, serão apresentados cálculos para a construção de filtros ativos do tipo Butterworth. Para isso, serão necessários valores dos parâmetros  $a$  e  $b$ , que variam de acordo com o polinômio de Butterworth mostrado na tabela anterior. Os valores desses parâmetros podem ser consultados na tabela a seguir:

Tabela 2 – Parâmetros para filtros Butterworth  
 FONTE: Adaptado de Pertence (2014).

<i>n</i>	<i>a</i>	<i>b</i>
2	1,414214	1
3	1	1
	-	1
4	0,765367	1
	1,847759	1
5	0,618034	1
	1,618034	1
	-	1
6	0,517638	1
	1,414214	1
	1,931852	1
7	0,445042	1
	1,24698	1
	1,801938	1
	-	1
8	0,390181	1
	1,11114	1
	1,662939	1
	1,961571	1

### 3.4 Tipos de Filtro quanto à função executada

Há diversas configurações de implementação de filtros ativos. Abordaremos duas mais usuais na prática:

- Estrutura de realimentação Múltipla (MFB, em inglês, *Multiple Feedback*);
- Estrutura da fonte de tensão controlada por tensão (VCVS, em inglês, *Voltage-Controlled Voltage Source*). Pode também ser conhecida como estrutura de Sallen e Key.

Ambas configurações apresentam algumas vantagens, como facilidade para ajustar o ganho e a frequência, alta estabilidade, impedância de saída baixa, alta estabilidade, entre outros. Por outro lado, o fator de seletividade *Q* é limitado no valor máximo de 10, quando implementados filtros nessas estruturas.

A seguir, serão descritos os quatro tipo de filtros.

#### 3.4.1 Filtros Passa-Baixa

##### 3.4.1.1 Primeira ordem

Para a implementação do filtro passa-baixa de primeira ordem, será abordada a estrutura VCVS, a qual pode ser vista na Figura 4370.

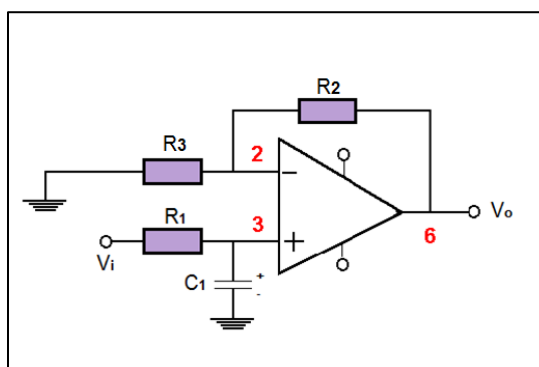


Figura 70 - Projeto de filtro ativo passa-baixa de 1ª. Ordem  
FONTE: Adaptado de Boylestad (2014).

O ganho  $A_v$  correspondente pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$A_v = 1 + \frac{R_2}{R_3} \quad (10)$$

O valor do capacitor pode ser calculado por:

$$C = \frac{10}{f_c} \text{ (uF)} \quad (11)$$

Na realidade, o valor do capacitor pode ser escolhido arbitrariamente. A equação 9 é uma regra empírica para projetos ativos. Isto é para evitar que sejam usados resistores de valores muito baixos e capacitores de valores muito alto, devido à limitação dos operacionais em relação aos valores de capacitores e correntes que podem apresentar em sua saída. Se isso acontecer, eles não conseguem fornecer as correntes adequadas para esse tipo de carga. Os valores dos resistores conectados aos operacionais não devem ser muito menores que  $300\Omega$  para evitar que puxem muita corrente e acabem queimando o CI.

Continuando com a determinação dos valores dos componentes, como

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC},$$

$$R_1 = \frac{1}{b2\pi f_c C_1} \quad (12)$$

Onde coeficiente  $b$  é uma constante usada para determinar o tipo de função resposta quando a ordem do filtro é maior ou igual a 2. Neste caso, seu valor deve ser consultado na respectiva tabela da função-resposta desejada. No caso de filtro de primeira ordem, o coeficiente  $b$  recebe valor unitário ( $b = 1$ ), pois não importa qual é o tipo de função-resposta.

Por fim,  $R_3$  é calculado pela fórmula:



$$R3 = \frac{Av}{Av - 1} R1 \quad (13)$$

O gráfico resposta em frequência de ganho de tensão e fase estão representados pelas Figura 44 e Figura 45, respectivamente:

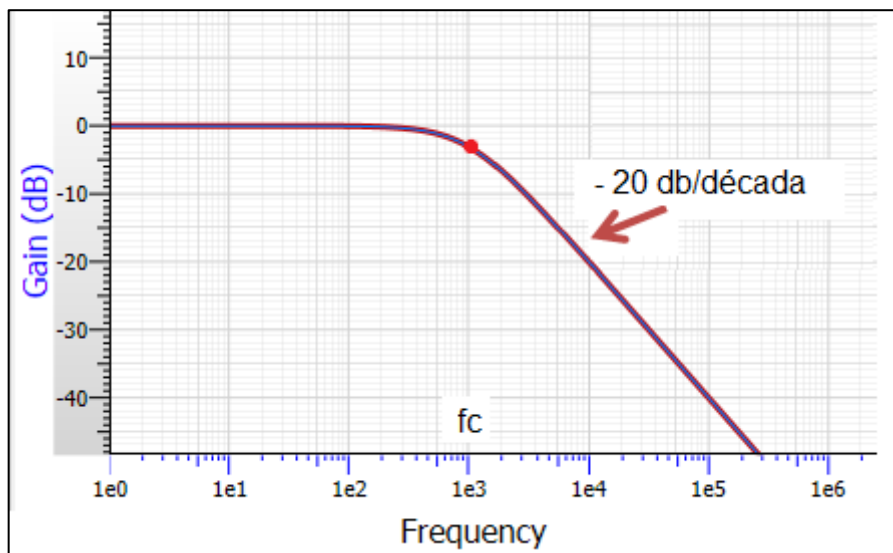


Figura 71 - Curva de resposta em frequência (Ganho de tensão) do filtro PB de 1ª. Ordem  
 FONTE: FilterPro (2014).

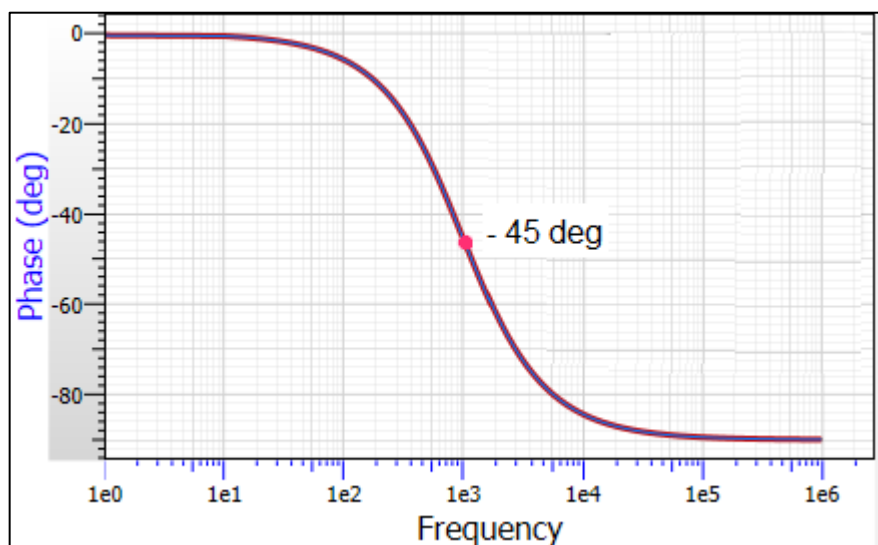


Figura 72 - Curva de resposta em frequência (fase) do filtro PB de 1ª. Ordem  
 FONTE: FilterPro (2014).

### Projeto de Filtro Ativo PB – 1ª. Ordem

Para a construção de um filtro ativo PB de primeira ordem, existem alguns passos que facilitam na determinação dos valores dos componentes:

- A. Estipular o valor do ganho  $Av$  ( $Av > 1$ )
- B. Estipular o valor de  $f_c$

- C. Determinar o valor de C (equação 11)
- D. Determinar o valor de R1 para  $b=1$  (equação 12)
- E. Determinar o valor de R3 (equação 13)
- F. Determinar o valor de R2 (equação 10)
- G. Montar o circuito de acordo com a figura 70

### Exemplo de projeto PB -1ª. Ordem

Montar um filtro passa-baixa de primeira ordem com  $f_c = 1$  kHz e  $A_v = 15$ .

Seguindo os passos mencionados, os valores calculados para o capacitor e resistores e seus respectivos valores comerciais mais próximos se encontram na tabela a seguir:

Tabela 3 – Valores dos parâmetros e componentes do filtro passa-faixa de 1ª. ordem

Primeira Ordem					
$A_v$	$F_c$ (Hz)	$C_1$ (F)	$R_1$ ( $\Omega$ )	$R_2$ ( $\Omega$ )	$R_3$ ( $\Omega$ )
15	1000	1E-08	1,59E+04	1,40E+04	1,00E+03
Valores comerciais		1E-08	1,60E+04	1,50E+04	1,00E+03

A curva de resposta em frequência do circuito montado será semelhante ao da figura a seguir:

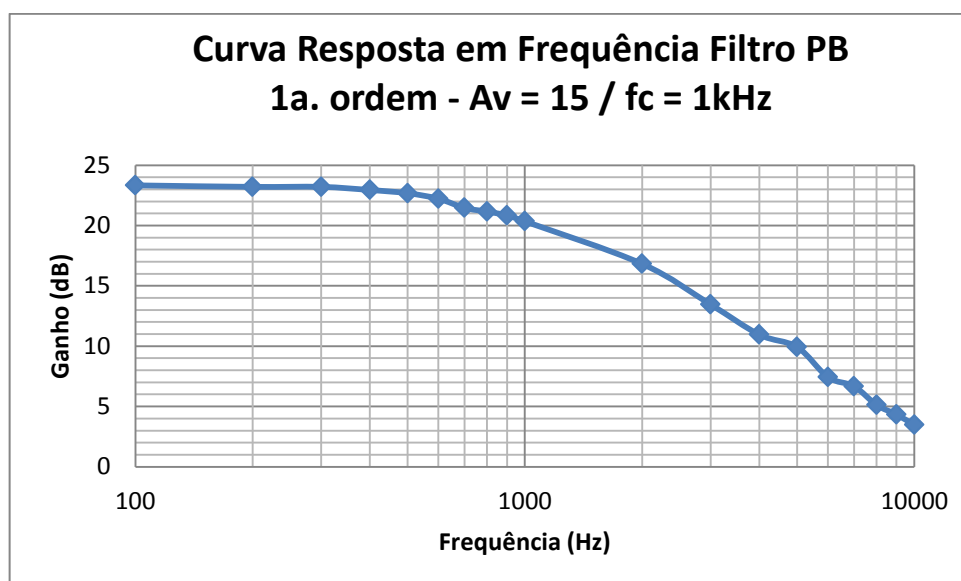


Figura 73 – Curva de resposta em frequência de um PB de ordem 2.

#### 3.4.1.2 Segunda Ordem

O esquemático do filtro ativo passa-baixa de segunda ordem, na configuração VCVS, está representado na Figura 4674 a seguir:

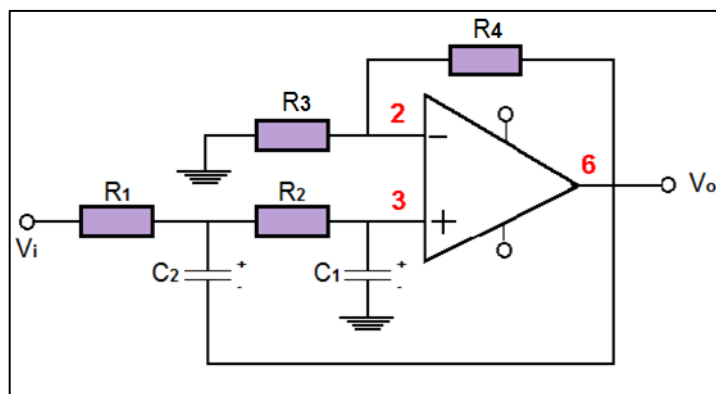


Figura 74 - Projeto de filtro ativo passa-baixa de 2ª. Ordem  
 FONTE: Adaptado de Boylestad (2014).

Os cálculos dos componentes são feitos pelas equações seguintes:

$$A_v = 1 + \frac{R_4}{R_3} \quad (14)$$

$$R_1 = \frac{2}{\left[ aC_2 + \sqrt{[a^2 + 4b(A_v - 1)]C_2^2 - 4bC_1C_2} \right] \omega c}, \quad (15)$$

lembrando que  $\omega c = 2\pi f c$ .

$$R_2 = \frac{1}{bC_1C_2R_1\omega c^2} \quad (16)$$

$$R_3 = \frac{A_v(R_1 + R_2)}{A_v - 1} \quad (A_v > 1) \quad (17)$$

$$R_4 = A_v(R_1 + R_2) \quad (18)$$

Para obter os valores das constantes  $a$  e  $b$ , deve-se consultar às tabelas apropriadas, referentes ao tipo de função-resposta se deseja projetar. Quando se trata do filtro Butterworth, os valores de  $a$  e  $b$  podem ser encontrados na tabela 2, do item Filtros de Butterworth.

O valor de  $C_2$  deve ser próxima de

$$C_2 = \frac{10}{f c} \quad (19)$$

Depois que determinado o valor de  $C_2$ , o próximo e último passo é calcular o valor de  $C_1$  pela equação 20:

$$C_1 \leq \frac{[a^2 + 4b(A_v - 1)]C_2}{4b} \quad (20)$$

O gráfico resposta em frequência de ganho de tensão e fase estão representados pelas Figura 4775 e Figura 4876, respectivamente:

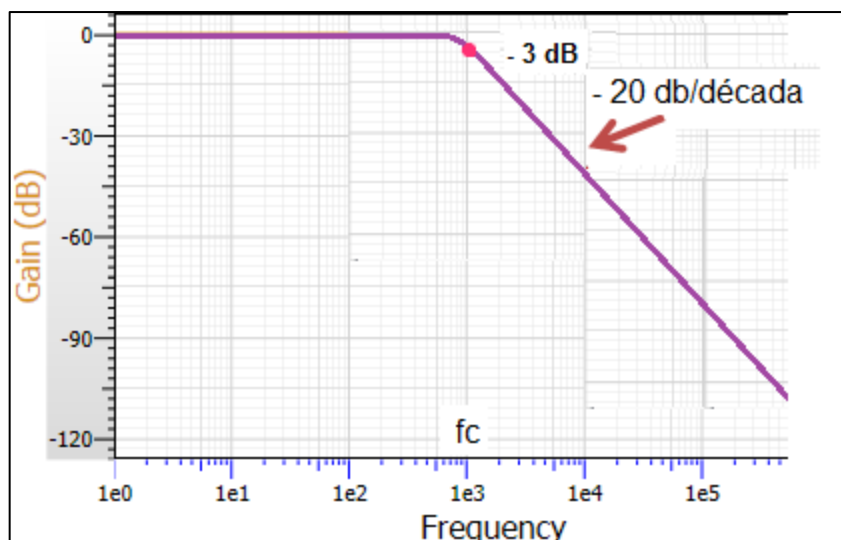


Figura 75 - Curva de resposta em frequência (Ganho de tensão) do filtro PB de 1ª. Ordem  
 FONTE: FilterPro (2014).

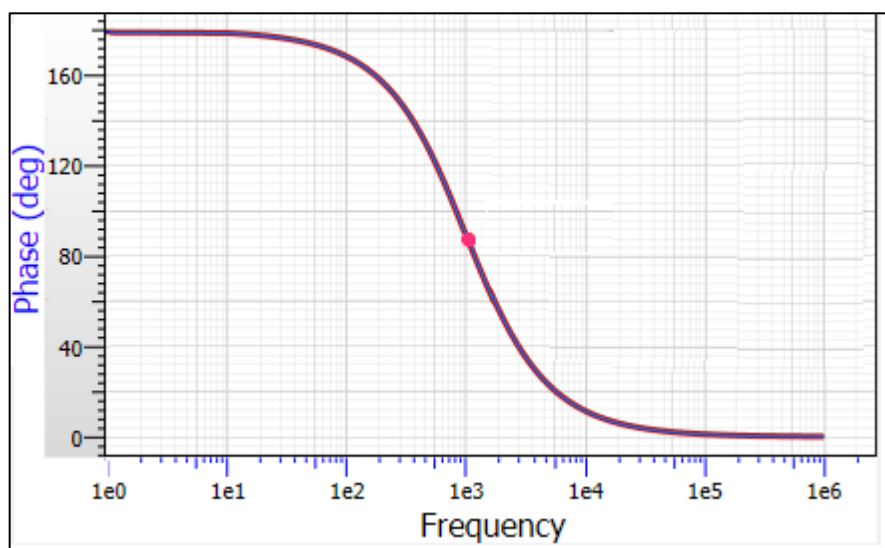


Figura 76 - Curva de resposta em frequência (fase) do filtro PB de 2ª. Ordem  
 FONTE: FilterPro (2014).

### Projeto de Filtro Ativo PB – 2ª. Ordem - Butterworth

Para a construção de um filtro ativo PB de segunda ordem, existem alguns passos que facilitam na determinação dos valores dos componentes:

- A. Estipular o valor do ganho  $A_v$
- B. Estipular o valor de  $f_c$
- C. Determinar os parâmetros de a e b por meio da tabela 2
- D. Determinar o valor de  $C_2$  (equação 19)
- E. Determinar o valor de  $C_1$  (equação 20)

- F. Determinar o valor de R1 (equação 15)
- G. Determinar o valor de R2 (equação 16)
- H. Determinar o valor de R3 (equação 17)
- I. Determinar o valor de R4 (equação 18)
- J. Montar o circuito de acordo com a figura 74

### Exemplo de projeto PB -2ª. Ordem - Butterworth

Montar um filtro passa-baixa de segunda ordem com  $f_c = 1$  kHz e  $A_v = 5$ .

Seguindo os passos mencionados, os valores calculados para o capacitor e resistores e seus respectivos valores comerciais mais próximos se encontram na tabela a seguir:

Tabela 4 – Valores dos parâmetros e componentes do filtro passa-faixa de 2ª. ordem

Segunda Ordem										
$A_v$	$F_c$ (Hz)	$\omega_o$	$a$	$b$	C2 (F)	C1 (F)	R1 ( $\Omega$ )	R2 ( $\Omega$ )	R3 ( $\Omega$ )	R4 ( $\Omega$ )
5	1000	6283,185	1,41	1	1E-08	4,50E-08	2,26E+04	2,50E+03	3,13E+04	1,25E+05
Valores comerciais usados					1E-08	4,70E-08	2,26E+04	2,40E+03	3,00E+04	1,20E+05

A curva de resposta em frequência do circuito montado será semelhante ao da figura a seguir:

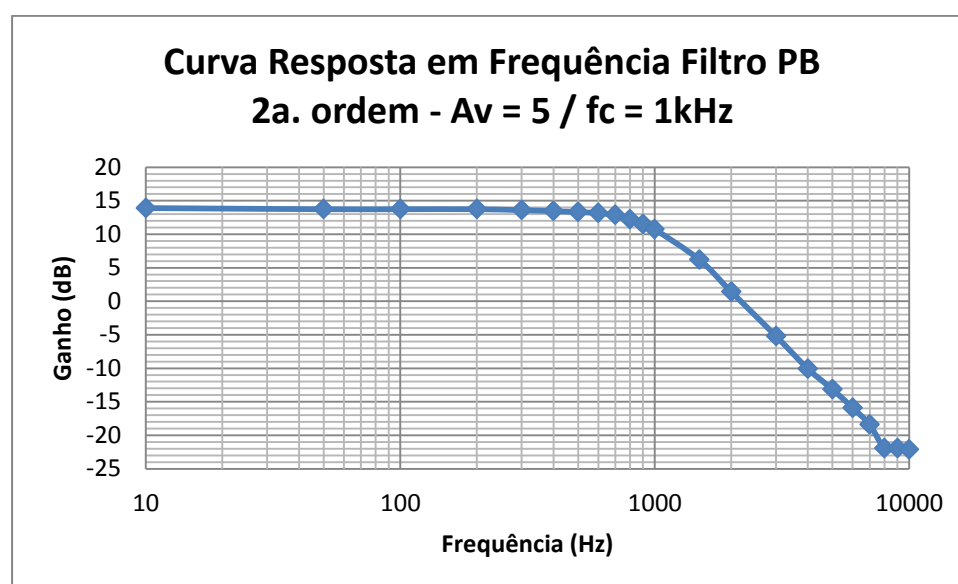


Figura 77 – Curva de resposta em frequência de um PB de ordem 2.

#### 3.4.1.3 Ordem maior que 2

Para se obter filtro PB ativo passa-baixa com ordem maior que a segunda, é feita uma associação em cascata de primeira e segunda ordem. Por exemplo, se deseja projetar um filtro de 3ª. ordem, pode associar 2 estágios de filtro ativo PB, sendo um de primeira ordem e outro de segunda ordem. Da mesma forma, é

possível projetar um filtro PB de 4ª. ordem, cascadeando dois filtros PB de 2ª. ordem (PERTENCE, 1988, p.229). Isto pode ser visualizado na Figura 4978:

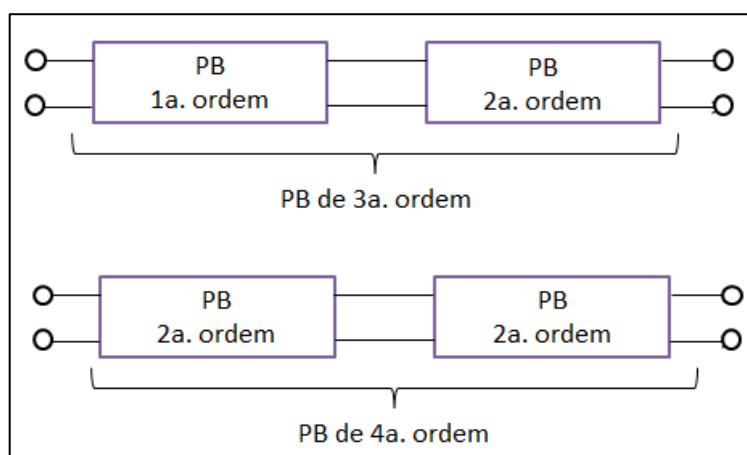


Figura 78 - Cascateamento de filtros PB para obter filtros PB de ordem maior que 2  
 FONTE: Adaptado de Pertence (2014).

### Projeto de Filtro Ativo PB – 3ª. Ordem - Butterworth

O projeto de um filtro PB de 3ª. ordem, por exemplo, pode ser feito através de uma associação em cascata utilizando um filtro PB de 1ª. ordem e um PB de 2ª. ordem. É válido lembrar que ambos devem ter a mesma frequência de corte e cada estágio será projetado como se fosse um estágio independente. O valor do ganho total corresponde ao produto dos ganhos de cada estágio.

#### Exemplo de projeto PB -3ª. Ordem - Butterworth

Montar um filtro passa-baixa de primeira ordem com  $f_c = 1$  kHz e  $A_v = 7,5$ .

Fazendo cada estágio como um estágio independente e estipulando o ganho do primeiro estágio como  $A_{v1} = 1,5$  e do segundo estágio como  $A_{v2} = 5$ , os valores calculados para o capacitor e resistores e seus respectivos valores comerciais mais próximos se encontram na tabela a seguir:

Tabela 5 – Valores dos parâmetros e componentes do filtro passa-faixa de 3ª. ordem

Terceira Ordem										
Primeira Ordem										
		$A_v$	$F_c$ (Hz)	$C_1$ (F)	$R_1$ ( $\Omega$ )	$R_2$ ( $\Omega$ )	$R_3$ ( $\Omega$ )			
		1,5	1000	1E-08	1,59E+04	510	1,00E+03			
Valores comerciais				1E-08	1,60E+04	5,10E+02	1,00E+03			
Segunda Ordem										
$A_v$	$F_c$ (Hz)	$\omega_0$	$a$	$b$	$C_2$ (F)	$C_1$ (F)	$R_1$ ( $\Omega$ )	$R_2$ ( $\Omega$ )	$R_3$ ( $\Omega$ )	$R_4$ ( $\Omega$ )
5	1000	6283,185	1	1	1E-08	4,25E-08	3,18E+04	1,87E+03	4,21E+04	1,69E+05
Valores comerciais usados					1,00E-08	4,40E-08	3,00E+04	2,00E+03	4,30E+04	1,50E+05

A seguinte figura mostra um filtro PB de 3ª. ordem projetado por cascata de filtros PB de primeira e segunda ordens.

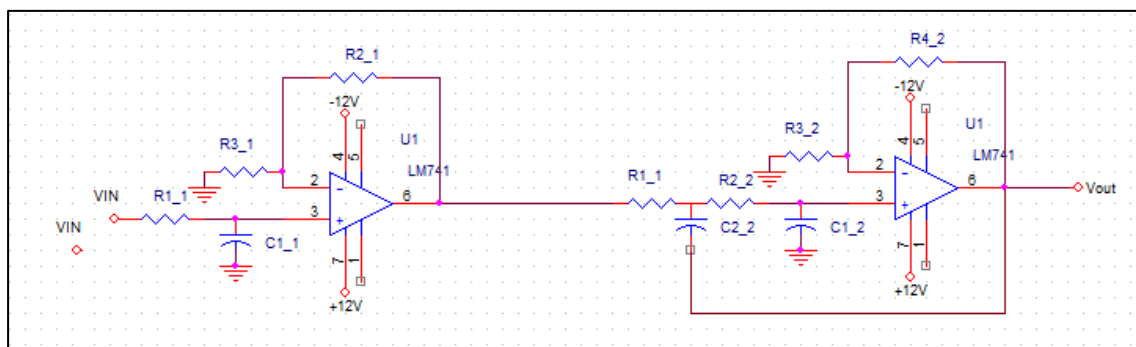


Figura 79 – Esquemático do filtro PB 3ª. ordem

A curva de resposta em frequência do circuito montado será semelhante ao da figura a seguir:

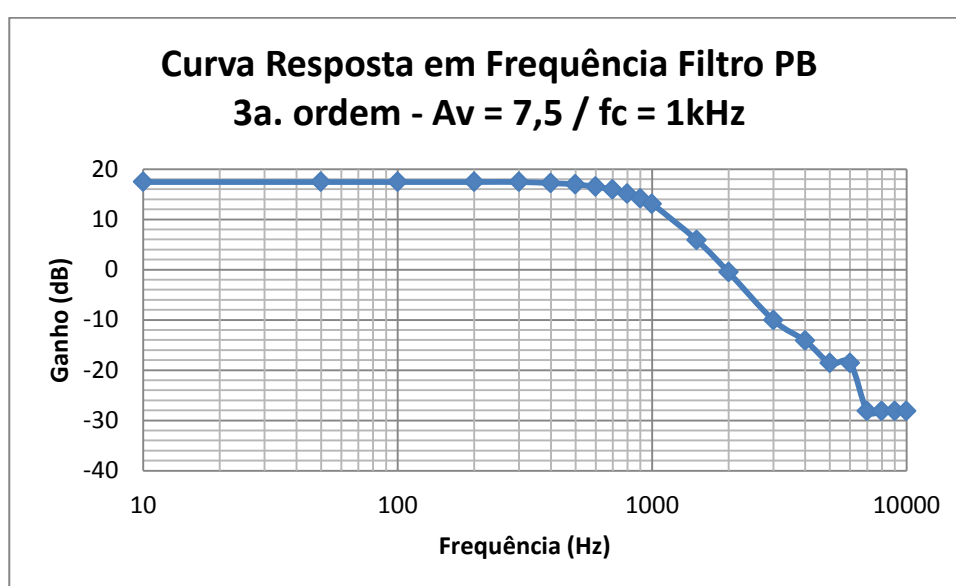


Figura 80 – Curva de resposta em frequência de um PB de ordem 3.

### 3.4.2 Filtro Passa-Alta

Os procedimentos para obter um filtro passa-alta é semelhante aos do passa-baixa. Porém, a diferença está na permutação dos resistores por capacitores e vice-versa. Isto é chamada de transformação RC -> CR.

#### 3.4.2.1 Primeira Ordem

Aplicando a transformação RC -> CR do circuito passa-baixa, é obtido um filtro passa-alta, conforme a Figura 50:

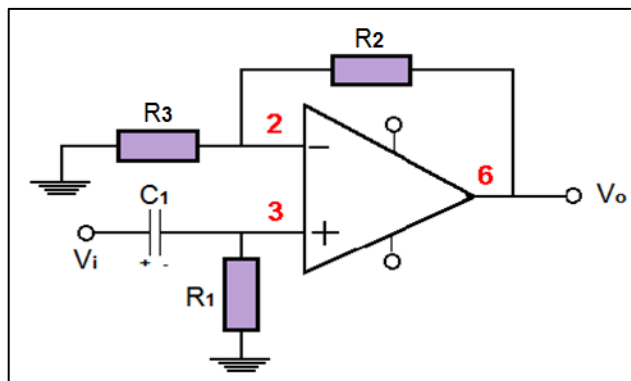


Figura 81 - Projeto de filtro ativo passa-alta de 1ª. Ordem

FONTE: Adaptado de Boylestad (2014).

Os valores dos componentes são obtidos por meio de cálculo das seguintes equações:

$$A_v = 1 + \frac{R_2}{R_3} \quad (21)$$

$$R_1 = \frac{1}{2\pi f_c C_1} \quad (22)$$

$$R_2 = \frac{A_v R_1}{A_v - 1} \quad (A_v > 1) \quad (23)$$

$$R_3 = \frac{A_v}{A_v - 1} R_1 \quad (24)$$

Da mesma forma que no filtro passa-baixa, o capacitor do filtro passa alta de 1ª. ordem é calculado pela equação:

$$C = \frac{10}{f_c} (\mu\text{F}) \quad (25)$$

### Projeto de Filtro Ativo PA – 1ª. Ordem

Para a construção de um filtro ativo PA de primeira ordem, os passos que facilitam na determinação dos valores dos componentes são semelhantes aos do filtro ativo PB:

- A. Estipular o valor do ganho  $A_v$  ( $A_v > 1$ )
- B. Estipular o valor de  $f_c$
- C. Determinar o valor de  $C$  (equação 25)
- D. Determinar o valor de  $R_1$  para  $b=1$  (equação 22)
- E. Determinar o valor de  $R_2$  (equação 23)
- F. Determinar o valor de  $R_3$  (equação 24)
- G. Montar o circuito de acordo com a figura 81



### Exemplo de projeto PA -1ª. Ordem

Montar um filtro passa-baixa de primeira ordem com  $f_c = 1 \text{ kHz}$  e  $A_v = 5$ .

Seguindo os passos mencionados, os valores calculados para o capacitor e resistores e seus respectivos valores comerciais mais próximos se encontram na tabela a seguir:

Tabela 6 – Valores dos parâmetros e componentes do filtro passa-alta de 1ª. ordem

Primeira Ordem					
$A_v$	$F_c$ (Hz)	$C_1$ (F)	$R_1$ ( $\Omega$ )	$R_2$ ( $\Omega$ )	$R_3$ ( $\Omega$ )
20	100	1E-07	1,59E+04	1,90E+04	1,00E+03
Valores comerciais		1E-07	1,60E+04	2,00E+04	1,00E+03

A curva de resposta em frequência do circuito montado será semelhante ao da figura a seguir:

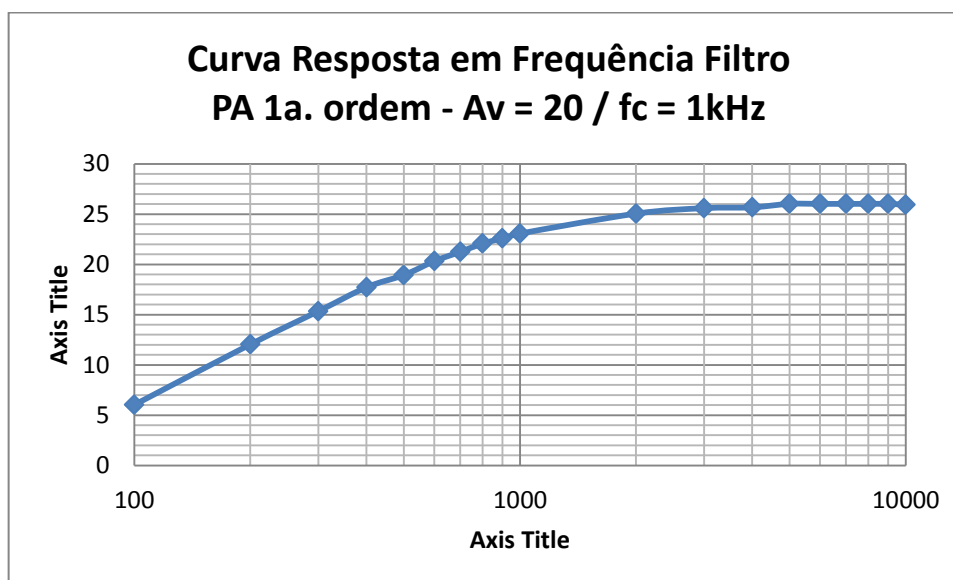


Figura 82 – Curva de resposta em frequência de um PA de ordem 1.

#### 3.4.2.2 Segunda Ordem

Assim como no filtro ativo PA de primeira ordem, a transformação RC  $\rightarrow$  CR também é válida para filtros PA de segunda ordem, obtendo, assim, o circuito na configuração VCVS da Figura 5183.

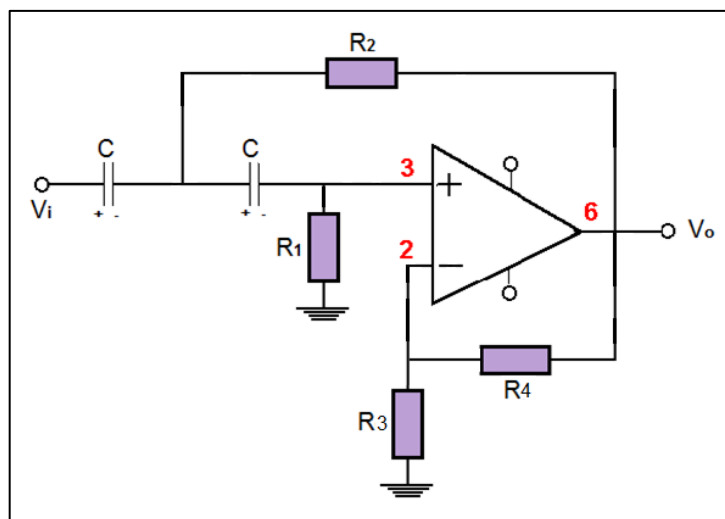


Figura 1643 - Projeto de filtro ativo passa-alta de 2ª. Ordem  
 FONTE: Adaptado de Boylestad (2014).

Utilizando as equações seguintes, é possível obter os valores dos componentes:

$$A_v = 1 + \frac{R_4}{R_3} \quad (26)$$

Para o filtro ativo de segunda ordem, os valores dos capacitores C1 e C2 são iguais. Portanto,

$$C_1 = C_2 = C \quad (27)$$

$$R_1 = \frac{4b}{\left[ a + \sqrt{a^2 + 8b(A_v - 1)\omega c C} \right]} \quad (28)$$

$$R_2 = \frac{b}{\omega c^2 C^2 R_1} \quad (29)$$

$$R_3 = \frac{A_v R_1}{A_v - 1} \quad (A_v > 1) \quad (30)$$

$$R_4 = A_v R_1 \quad (31)$$

### Projeto de Filtro Ativo PA – 2ª. Ordem - Butterworth

Para a construção de um filtro ativo PA de segunda ordem, existem alguns passos que facilitam na determinação dos valores dos componentes:

- A. Estipular o valor do ganho  $A_v$
- B. Estipular o valor de  $f_c$
- C. Determinar os parâmetros de  $a$  e  $b$  por meio da tabela 2
- D. Determinar o valor de  $C$  (equação 25)
- E. Determinar o valor de  $R_1$  (equação 28)

- F. Determinar o valor de R2 (equação 29)
- G. Determinar o valor de R3 (equação 30)
- H. Determinar o valor de R4 (equação 31)
- I. Montar o circuito de acordo com a figura 83

### Exemplo de projeto PA -2ª. Ordem - Butterworth

Montar um filtro passa-alta de segunda ordem com  $f_c = 1$  kHz e  $A_v = 5$ .

Seguindo os passos mencionados, os valores calculados para o capacitor e resistores e seus respectivos valores comerciais mais próximos se encontram na tabela a seguir:

Tabela 7 – Valores dos parâmetros e componentes do filtro passa-alta de 2ª. ordem

Segunda Ordem										
$A_v$	$F_c$ (Hz)	$\omega_0$	$a$	$b$	$C_2$ (F)	$C_1$ (F)	$R_1$ ( $\Omega$ )	$R_2$ ( $\Omega$ )	$R_3$ ( $\Omega$ )	$R_4$ ( $\Omega$ )
5	1000	6283,185	1	1	1E-08	1E-08	9,44E+03	2,68E+04	1,18E+04	4,72E+04
Valores comerciais usados					1,00E-08	1,00E-08	1,00E+04	2,70E+04	1,20E+04	4,70E+04

A curva de resposta em frequência do circuito montado será semelhante ao da figura a seguir:

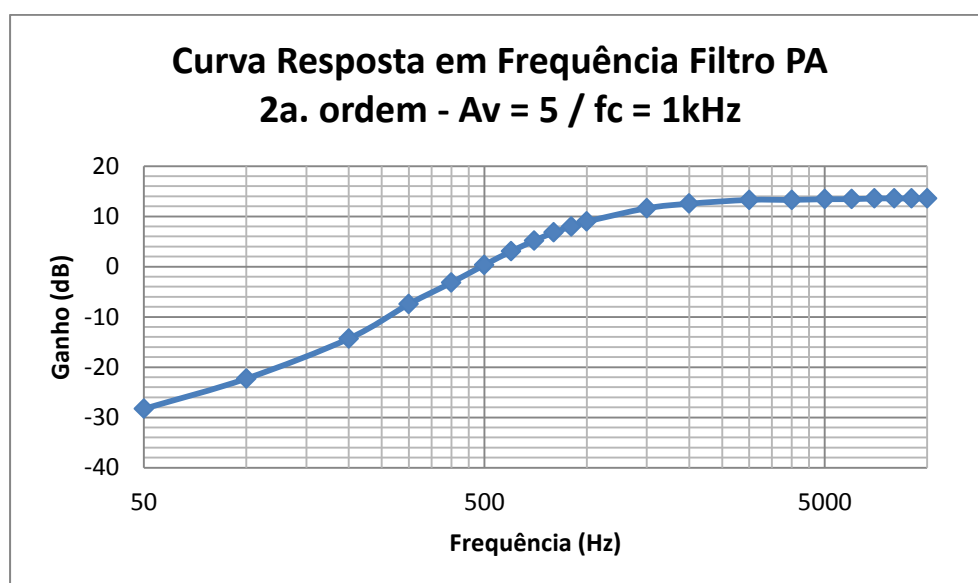


Figura 84 – Curva de resposta em frequência de um PA de ordem 2.

#### 3.4.2.3 Ordem maior que 2

A lógica utilizada para construir filtros ativos passa-baixa de ordem maior que 2 também é válida para os filtros ativos passa-alta. Para se obter filtros PA de ordem maior, deve-se combinar filtros PA de primeira e segunda ordem, fazendo associação em cascata.

## Projeto de Filtro Ativo PA – 3ª. Ordem - Butterworth

Da mesma forma que no caso do filtro PB de 3ª. ordem, o projeto do filtro PA de 3ª. ordem pode ser feito através de uma associação em cascata utilizando um filtro PA de 1ª. ordem e um PA de 2ª. ordem, lembrando que ambos devem ter a mesma frequência de corte e cada estágio será projetado como se fosse um estágio independente. O valor do ganho total corresponde ao produto dos ganhos de cada estágio.

### Exemplo de projeto PA -3ª. Ordem - Butterworth

Montar um filtro passa-baixa de primeira ordem com  $f_c = 1$  kHz e  $A_v = 7,5$ .

Fazendo cada estágio como um estágio independente e estipulando o ganho do primeiro estágio como  $A_{v1} = 1,5$  e do segundo estágio como  $A_{v2} = 5$ , os valores calculados para o capacitor e resistores e seus respectivos valores comerciais mais próximos se encontram na tabela a seguir:

Tabela 8 – Valores dos parâmetros e componentes do filtro passa-faixa de 3ª. ordem

Terceira Ordem										
Primeira Ordem										
		Av	Fc (Hz)	C1 (F)	R1 (Ω)	R2 (Ω)	R3 (Ω)			
		1,5	1000	1E-08	15915,49	510	1000			
Segunda Ordem										
Av	Fc (Hz)	Wo	a	b	C2 (F)	C1 (F)	R1 (Ω)	R2 (Ω)	R3 (Ω)	R4 (Ω)
5	1000	6283,185	1	1	1E-08	1E-08	9,44E+03	2,68E+04	1,18E+04	4,72E+04

A seguinte figura mostra um filtro PA de 3ª. ordem projetado por cascadeamento de filtros PA de primeira e segunda ordens.

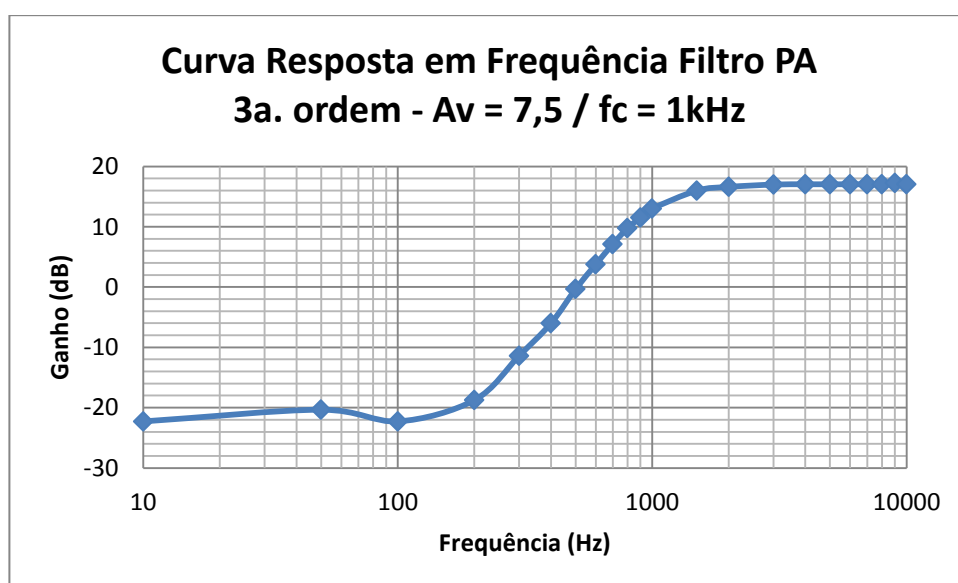


Figura 85 – Esquemático do filtro PA 3ª. ordem

### 3.4.3 Filtros Passa-Faixa

A configuração mais usual na prática para projetar filtro PF é a estrutura MFB. A menor ordem de um filtro do tipo PF é 2 e pode-se projetar de duas formas.

A primeira seria cascatear um filtro PA com um filtro PB, como está representado pela Figura 16. O ganho dos dois filtros devem ser iguais e a frequência de corte do PB deve ser maior que o do PA. Os filtros devem ser projetados independentemente.

A ordem do filtro PF resultante será o dobro da ordem dos filtros PB e PA.

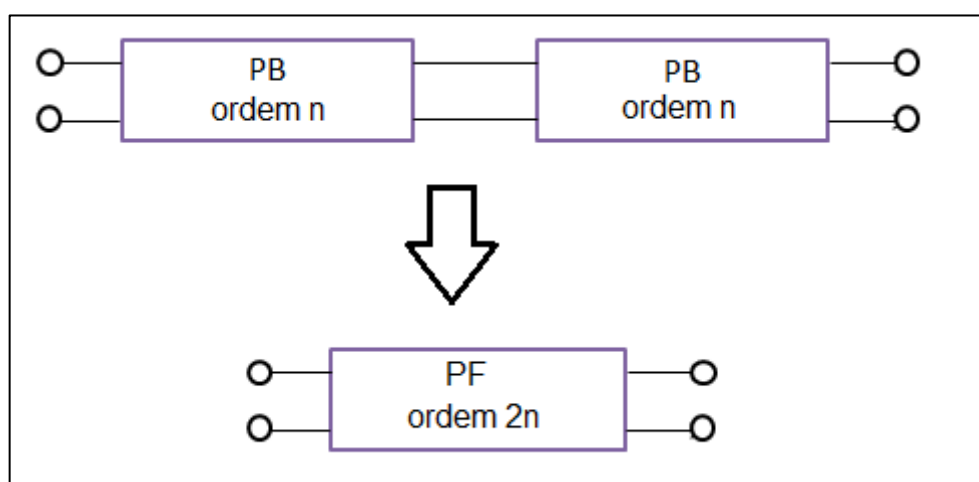


Figura 86 - Cascateamento de filtros PB e PA de ordem  $n$  para obter um filtro PF de ordem  $2n$ .  
 FONTE: Adaptado de Pertence (2014).

Porém, essa alternativa nem sempre pode apresentar boa precisão em se tratando de filtro PF por conta dos problemas que podem surgir em relação ao fator de seletividade  $Q$ , com a largura de banda resultante da associação e com o ganho do circuito correspondente à faixa de passagem.

A outra maneira de projetar o filtro PF é por meio de cálculos que serão apresentados a seguir. Será possível observar que os valores dos componentes estão diretamente relacionados com o fator  $Q$ .

A estrutura MFB para um filtro passa-faixa está representada na Figura 5387.

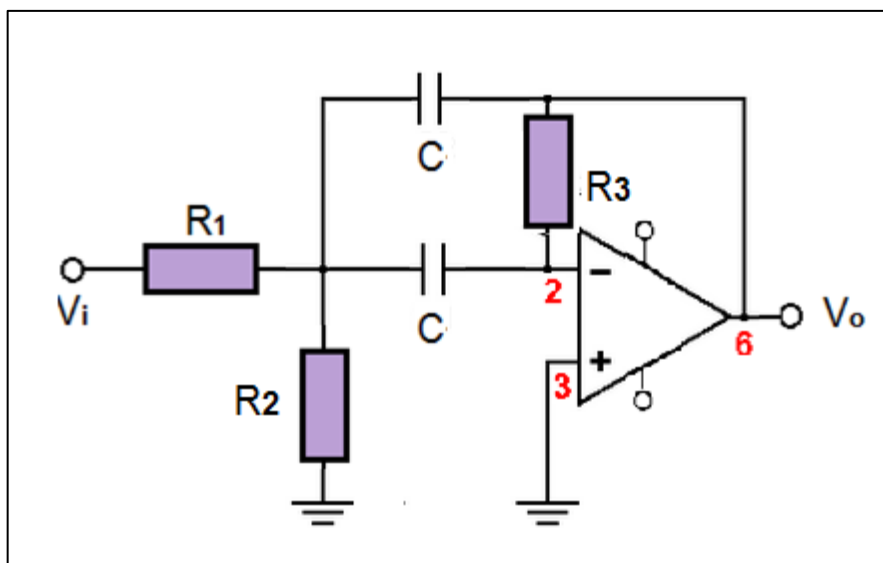


Figura 87 - Projeto de filtro ativo passa-faixa  
 FONTE: Adaptado de Boylestad (2014).

Geralmente, as frequências de corte inferior e superior são escolhidas pelo projetista.

Assim, tem-se o valor da largura de banda e a frequência central:

$$BW = fc2 - fc1 \quad (32)$$

$$fo = \sqrt{fc1 * fc2} \quad (33)$$

O ganho  $A_v$  também é estabelecido pelo projetista. Pela equação  $Q = \frac{fo}{BW}$ , obtém-se o fator  $Q$ , lembrando que este não deve exceder o valor de 10:

$$A_v < 2Q^2 \quad (34)$$

Assim como os demais filtros apresentados anteriormente, o valor  $C$  do filtro PF é estabelecido por um valor comercial perto de  $10/fo$ .

Para obter os valores dos resistores, são utilizadas as seguintes equações:

$$R1 = \frac{Q}{\omega o C A_v} \quad (35)$$

$$R2 = \frac{Q}{\omega o C (2Q^2 - A_v)} \quad (36)$$

$$R3 = \frac{2Q}{\omega o C} \quad (37)$$

Um exemplo de resposta em frequência de ganho de tensão e fase são representadas pelas Figura 5488 e Figura 5589:

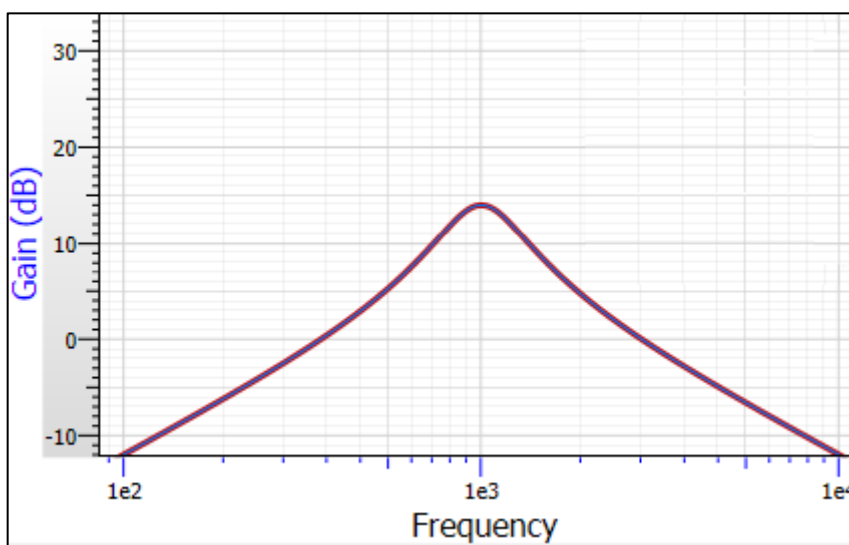


Figura 88 - Curva de resposta em frequência (Ganho de tensão) do filtro PF  
 FONTE: FilterPro (2014).

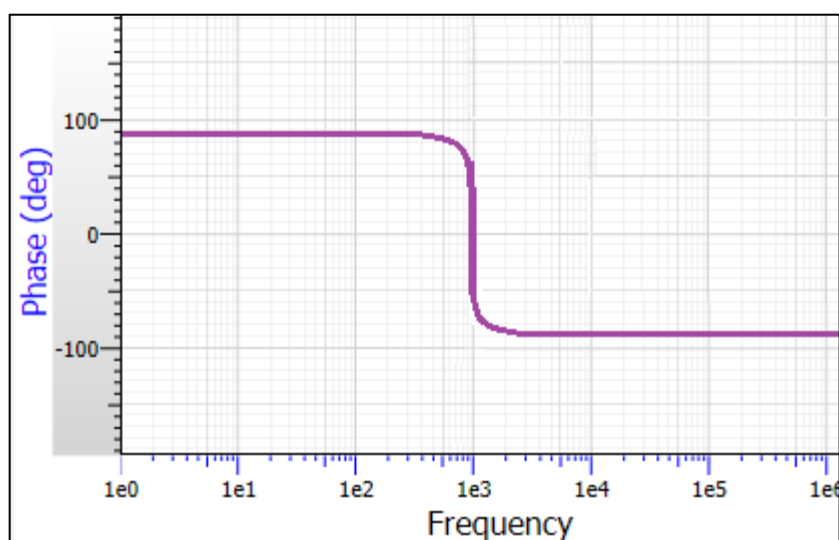


Figura 89 - Curva de resposta em frequência (fase) do filtro PF  
 FONTE: Adaptado de FilterPro (2014).

### Projeto de Filtro Ativo PF – 2ª. Ordem - Butterworth

Para a construção de um filtro ativo PF de segunda ordem, existem alguns passos que facilitam na determinação dos valores dos componentes:

- A. Estipular os valores de  $f_{c1}$  e  $f_{c2}$
- B. Determinar  $f_o$  e  $\omega_o$  (equação 33)
- C. Determinar o valor de  $Q_o$
- D. Determinar o valor de  $A_v$  (equação 34)
- E. Determinar o valor de  $C$  (equação 25)
- F. Determinar o valor de  $R_1$  (equação 35)
- G. Determinar o valor de  $R_2$  (equação 36)

- H. Determinar o valor de R3 (equação 37)
- I. Montar o circuito de acordo com a figura 87

### Exemplo de projeto PF -2ª. Ordem - Butterworth

Montar um filtro passa-faixa de segunda ordem com  $f_c = 1 \text{ kHz}$  e  $A_v = 1,5$ .

Seguindo os passos mencionados, os valores calculados para o capacitor e resistores e seus respectivos valores comerciais mais próximos se encontram na tabela a seguir:

Tabela 9 – Valores dos parâmetros e componentes do filtro passa-faixa de 2ª. ordem

Av	Fo (Hz)	Fc1 (Hz)	Fc2 (Hz)	Wo	Q	C1 (F)	R1 ( $\Omega$ )	R2 ( $\Omega$ )	R3 ( $\Omega$ )
1,5	979,7959	800	1200	6156,239	2,449489743	1,02E-08	2,60E+04	3,71E+03	7,80E+04
Valores comerciais usados						10n	2,70E+04	4,00E+03	7,50E+04

A curva de resposta em frequência do circuito montado será semelhante ao da figura a seguir:

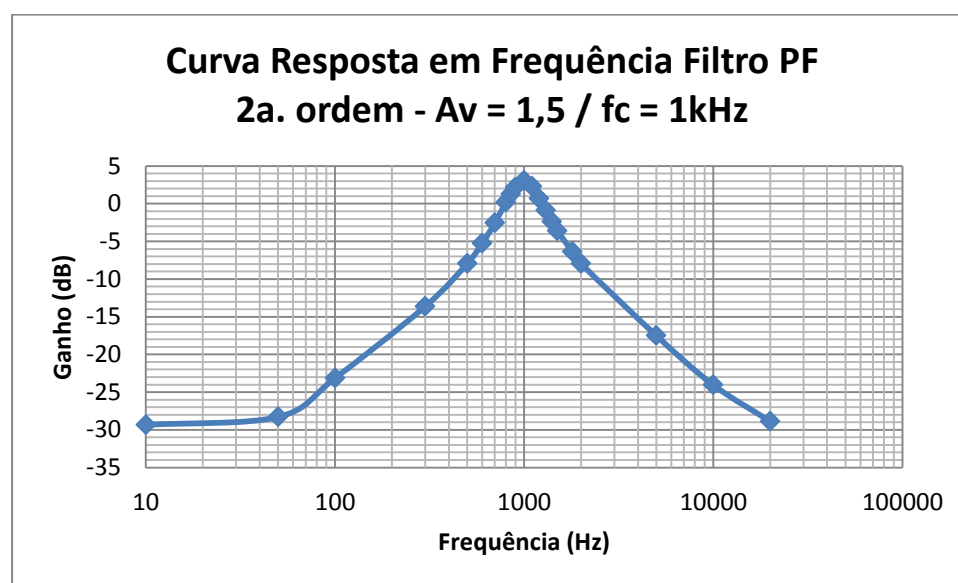


Figura 90 – Curva de resposta em frequência de um PF de ordem 2.

#### 3.4.3.1 Ordem maior que 2

Como já citado, a menor ordem que um filtro passa-faixa pode apresentar é 2. Para projetar filtros PF de ordem maior pela configuração MFB, é preciso fazer a associação em cascata de filtros PF. É válido observar que os filtros ativos PF apresentarão sempre ordem par.



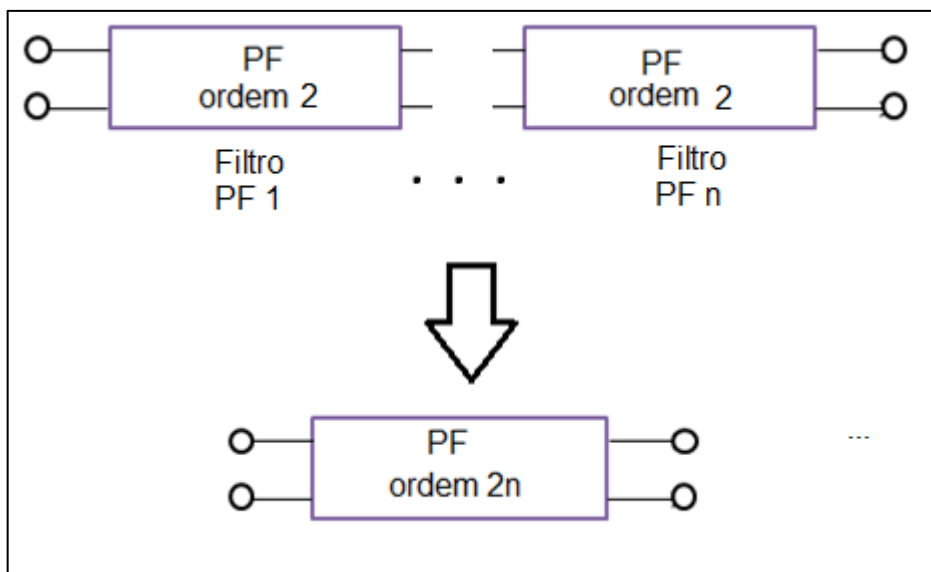


Figura 91 - Cascateamento de filtro PF para projetar um filtro de ordem maior que 2  
 FONTE: Adaptado de Pertence (2014)

### Projeto de Filtro Ativo PF – Ordem maior que 2 - Butterworth

Para projetar filtros PF de 4ª. ordem, além de cascatear filtros PF de 2ª. ordem, é possível cascatear filtros PB de ordem maior que dois com filtros PA também de ordem maior que dois, contanto que ambos tenham a mesma ordem. No entanto, os cálculos utilizados para este projeto são os mostrados no item Filtro Butterworth. Um exemplo deste caso será mostrado a seguir.

#### Exemplo de projeto PF - Ordem maior que 2 - Butterworth

Montar um filtro passa-faixa de oitava ordem com  $f_{c1} = 1 \text{ kHz}$  e  $f_{c2} = 10 \text{ kHz}$ .

Para projetar um filtro PF com essas características, pode-se cascatear dois filtros PA de 2ª. ordem ( $f_c = 1 \text{ kHz}$ ) e dois filtros PB de 2ª. ordem ( $f_c = 10 \text{ kHz}$ ), como mostra a figura a seguir:

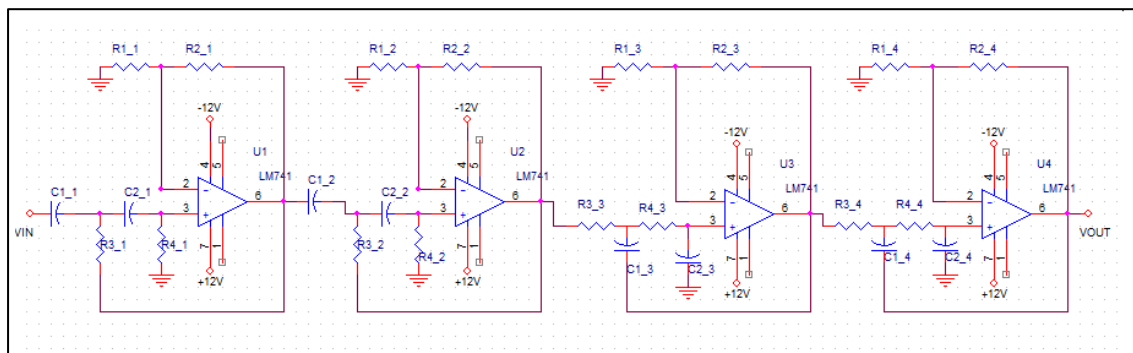


Figura 92 – Esquemático do filtro PF 4ª. ordem

Para calcular os valores dos componentes, primeiro é feito o projeto do filtro PA de 4ª. ordem:

Pela equação 6 e pela tabela 1, tem-se:

$$\frac{Av(s)}{Avo} = \frac{1}{\left(\frac{s}{\omega o}\right)^2 + 2k\left(\frac{s}{\omega o}\right) + 1}$$

Comparando a equação acima com a equação 9, obtém-se

$$\omega o = \frac{1}{RC} \quad e \quad 2k = 3 - Avo \quad ou \quad Avo = 3 - 2k$$

Pela tabela 1, k assume o valor de 0,3825 ou 0,924.

Assim, tem-se dois valores de Av. Como,

$$Av1 = \frac{R1 + R2}{R1}$$

E tomando o valor de R1 como 10kΩ, é possível obter o valor de R2. O mesmo é feito para Av2. Os valores dos capacitores e demais valores de resistores podem ser calculados pelas fórmulas 25 e 22, respectivamente.

Todo esse processo deve ser feito para o filtro passa-baixa de quarta ordem. Calculando tudo, obtém-se os valores dos componentes, conforme a tabela a seguir:

Tabela 10 – Valores dos parâmetros e componentes do filtro passa-faixa de 2ª. ordem

Filtro Passa Faixa													
Filtros Passa-alta (ordem 2 cada um) - Fc = 1 kHz / Av = 2,5													
Av	fc (Hz)	C1_1(F)	C2_1(F)	R1_1(Ω)	R2_1(Ω)	R3_1(Ω)	R4_1(Ω)	C1_2(F)	C2_2(F)	R1_2(Ω)	R2_2(Ω)	R3_2(Ω)	R4_2(Ω)
2,5	1000	1,00E-08	1,00E-08	1,00E+04	1,20E+04	1,60E+04	1,60E+04	1,00E-08	1,00E-08	1,00E+04	1,50E+03	1,60E+04	1,60E+04
Filtros Passa-baixa (ordem 2 cada um) - Fc = 10 kHz / Av = 2,5													
Av	fc (Hz)	C1_3(F)	C2_3(F)	R1_3(Ω)	R2_3(Ω)	R3_3(Ω)	R4_3(Ω)	C1_4(F)	C2_4(F)	R1_4(Ω)	R2_4(Ω)	R3_4(Ω)	R4_4(Ω)
2,5	10000	1,00E-09	1,00E-09	1,00E+04	1,20E+04	1,60E+04	1,60E+04	1,00E-09	1,00E-09	1,00E+04	1,50E+03	1,60E+04	1,60E+04

A curva de resposta em frequência do circuito montado será semelhante ao da figura a seguir:

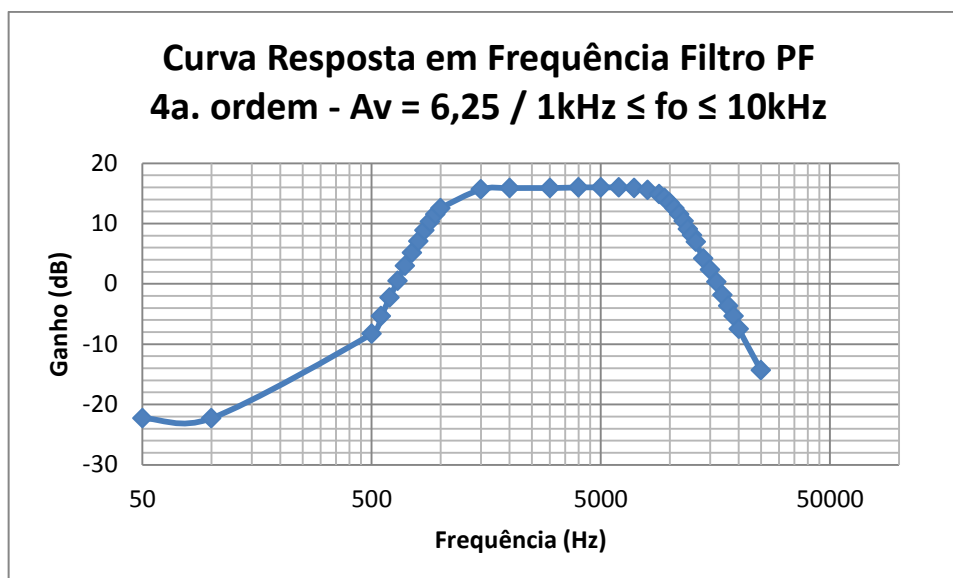


Figura 93 – Curva de resposta em frequência de um PF de ordem 4.

Tabela 11 – Valores dos parâmetros e componentes do filtro passa-faixa de 2ª. ordem

$A_v$	$F_o$ (Hz)	$F_{c1}$ (Hz)	$F_{c2}$ (Hz)	$W_o$	$Q$	$C_1$ (F)	$R_1$ ( $\Omega$ )	$R_2$ ( $\Omega$ )	$R_3$ ( $\Omega$ )
1,5	979,7959	800	1200	6156,239	2,449489743	1,02E-08	2,60E+04	3,71E+03	7,80E+04
Valores comerciais usados						10n	2,70E+04	4,00E+03	7,50E+04

A curva de resposta em frequência do circuito montado será semelhante ao da figura a seguir:

### 3.4.4 Filtro Rejeita-Faixa

As ideias apresentadas anteriormente para o filtro PF em relação aos o cascadeamento dos filtros PA ePB podem ser levadas em consideração para o filtro RF, salvo que, neste caso, a frequência de corte do PB deve ser inferior a do PA.

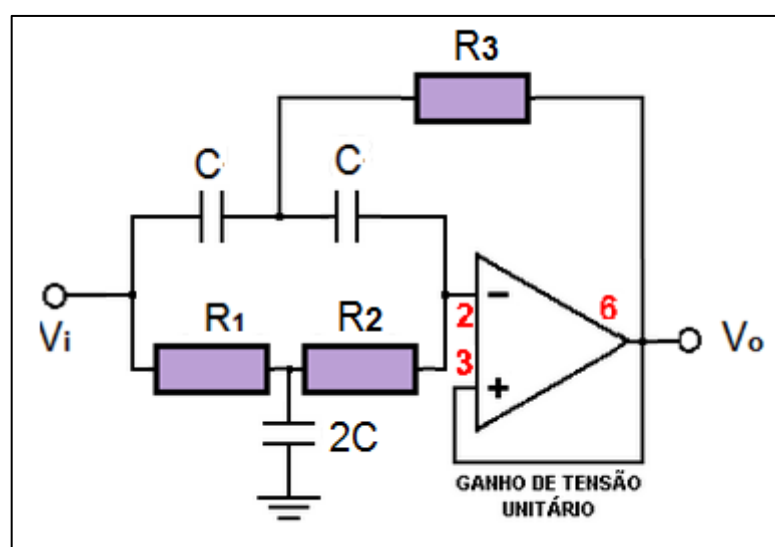


Figura 94 - Projeto de filtro ativo rejeita-faixa  
FONTE: Adaptado de Boylestad (2014).

Como se pode observar na figura anterior, este circuito só permite ganho unitário. O valor do fator de seletividade  $Q$  está diretamente relacionado aos valores dos componentes e não deve exceder ao valor de 10.

Os procedimentos para obter os valores de  $f_0$ ,  $BW$ ,  $Q$  e  $C$  de um filtro rejeita-faixa são iguais aos que foram usados para o filtro passa-faixa.

E as equações para determinar os valores dos resistores estão apresentadas a seguir:

$$R1 = \frac{1}{2Q\omega_0 C} \quad (38)$$

$$R2 = \frac{2Q}{\omega_0 C} \quad (39)$$

$$R3 = \frac{R1R2}{R1 + R2} \quad (40)$$

Um exemplo de resposta em frequência de ganho de tensão e fase são representadas pelas Figura 58 e Figura 59:

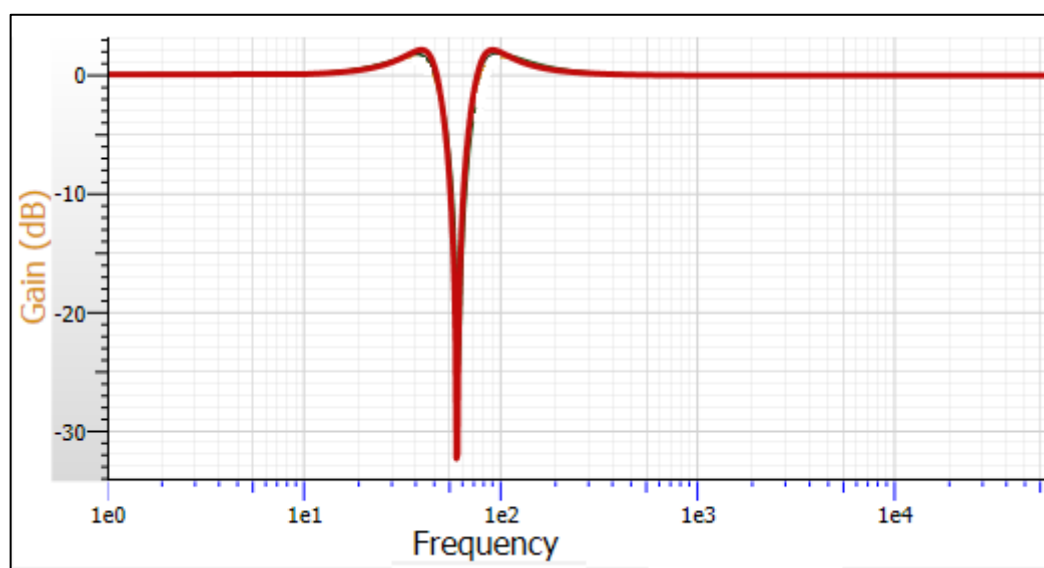


Figura 95 - Curva de resposta em frequência (Ganho de tensão) do filtro RF  
 FONTE: FilterPro (2014).

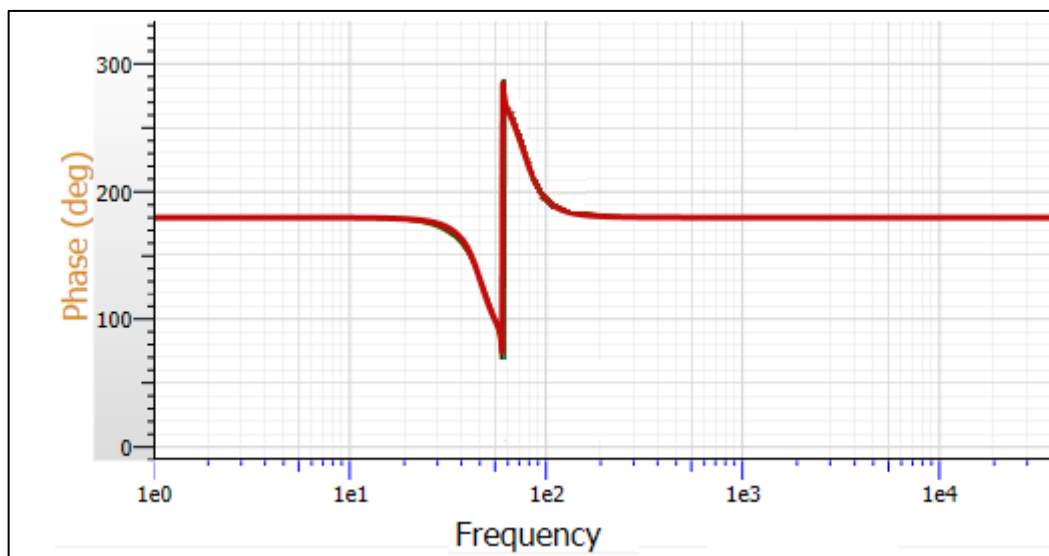


Figura 96 - Curva de resposta em frequência (fase) do filtro RF  
 FONTE: FilterPro (2014).

### Projeto de Filtro Ativo RF – 2ª. Ordem - Butterworth

Para a construção de um filtro ativo RF de segunda ordem, existem alguns passos que facilitam na determinação dos valores dos componentes:

- A. Estipular os valores de  $f_{c1}$  e  $f_{c2}$
- B. Determinar  $f_o$  e  $\omega_o$  (equação 85)
- C. Determinar o valor de  $Q_o$
- D. Estabelecer ganho  $A_v = 1$
- E. Determinar o valor de  $C$  (equação 25)
- F. Determinar o valor de  $R_1$  (equação 38)
- G. Determinar o valor de  $R_2$  (equação 39)
- H. Determinar o valor de  $R_3$  (equação 40)
- I. Montar o circuito de acordo com a figura 94

### Exemplo de projeto RF -2ª. Ordem - Butterworth

Montar um filtro passa-faixa de segunda ordem com  $f_c = 1$  kHz e  $A_v = 1$ .

Segundo os passos mencionados, os valores calculados para o capacitor e resistores e seus respectivos valores comerciais mais próximos se encontram na tabela a seguir:

Tabela 12 – Valores dos parâmetros e componentes do filtro rejeita-faixa de 2ª. ordem

$A_v$	$F_o$ (Hz)	$F_{c1}$ (Hz)	$F_{c2}$ (Hz)	$\omega_o$	$Q$	$C_1$ (F)	$R_1$ ( $\Omega$ )	$R_2$ ( $\Omega$ )	$R_3$ ( $\Omega$ )
1	1000	500	2000	6283,185	0,666667	1E-08	1,19E+04	2,12E+04	7,64E+03
Valores comerciais usados						1E-08	1,20E+04	2,20E+04	7,50E+04

A curva de resposta em frequência do circuito montado será semelhante ao da figura a seguir:

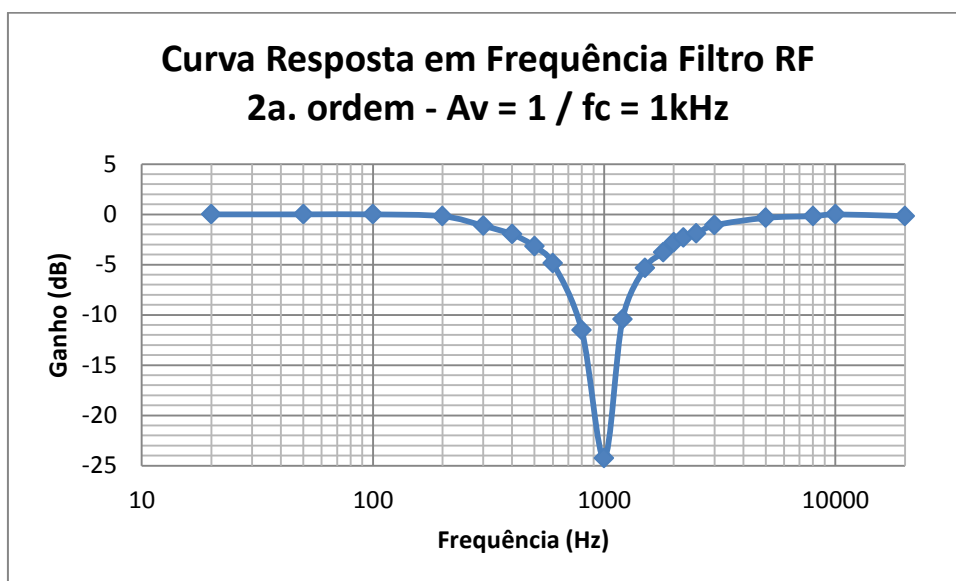


Figura 97 – Curva de resposta em frequência de um RF de ordem 2.

### 3.4.4.1 Ordem maior que 2

As considerações para projetar um filtro RF de ordem maior que 2 são as mesmas descritas para os filtros PF. Os filtros rejeita-faixa apresentam ordem par e devem ser cascateados para formar um filtro RF de ordem maior.

#### Projeto de Filtro Ativo RF – Ordem maior que 2 - Butterworth

Um filtro ativo RF pode ser projetado por meio da associação em cascata de filtros ativos RF ou como o modo apresentado para projetar filtros PF de ordem maior que dois. No entanto, há também um aplicativo da Texas Instruments, chamado Filter Pro, com o qual é possível determinar os valores dos componentes para filtros ativos de ordem 1, 2 ou mais. Este foi o caso do exemplo de filtro RF, que será descrito a seguir.

#### Exemplo de projeto RF -4ª. Ordem - Butterworth

Montar um filtro passa-faixa de segunda ordem com  $f_c = 60\text{Hz}$  e  $A_v = 1$ .

Utilizando o aplicativo Filter Pro,, os valores calculados para o capacitor e resistores e seus respectivos valores comerciais mais próximos se encontram na tabela a seguir:

Tabela 13 – Valores dos parâmetros e componentes do filtro rejeita-faixa de 4ª. ordem

Filtro RF 1					Filtro RF 1					Somador
R1 (Ω)	R2 (Ω)	R3 (Ω)	C1 (F)	C2 (F)	R1 (Ω)	R2 (Ω)	R3 (Ω)	C1 (F)	C2 (F)	R (Ω)
5,10E+04	1,50E+05	1,00E+04	1,00E-07	1,00E-07	2,70E+04	5,60E+03	8,20E+04	1,00E-07	1,00E-07	1,00E+04

A curva de resposta em frequência do circuito montado será semelhante ao da figura a seguir:

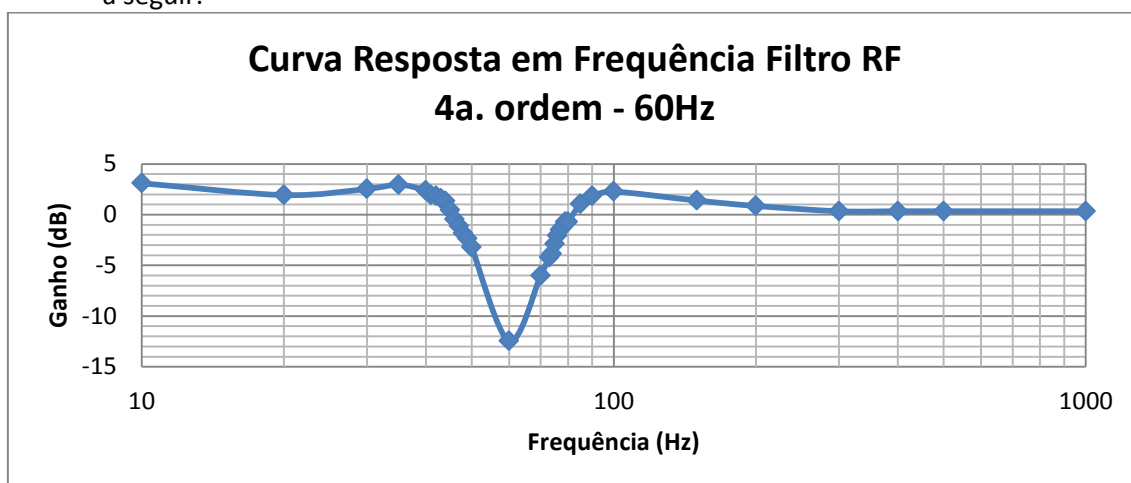


Figura 98 – Curva de resposta em frequência de um RF de ordem 4.