

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA

CAMILLA BARRETO DE SOUSA

**PROCESSAMENTO DE SINAIS DIGITAIS
RELATÓRIO - PROJETO FINAL**

São José - SC

abril/2021

SUMÁRIO

1	DESCRIÇÃO	2
2	ESPECIFICAÇÕES	3
3	PROJETO DOS FILTROS	5
3.1	Filtro Passa Baixa	5
3.2	Filtro Passa Faixa	6
4	SIMULAÇÕES	8
5	CONCLUSÕES	11

1 DESCRIÇÃO

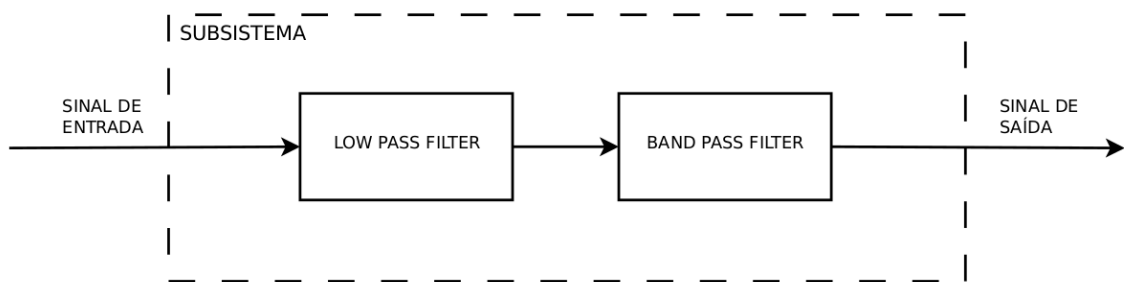
O projeto final da disciplina de PSD - Processamento de Sinais Digitais consiste em projetar e simular um sistema com 4 filtros digitais, sendo 2 deles projetados com resposta ao impulso infinita (IIR - *Infinite Impulse Response*) e os outros 2 com resposta ao impulso finita (FIR - *Finite Impulse Response*). O sistema é dividido em 2 subsistemas, ambos com um filtro passa baixa em cascata com um filtro passa faixa. Cada subsistema implementará os filtros com IIR ou FIR. O software *Simulink* foi utilizado para o projeto dos filtros e do sistema e para a simulação que também foi feita no software *Modelsim*.

No [Capítulo 2](#) as especificações do sistema e dos filtros são detalhadas. O resultado do projeto dos filtros é mostrado no [Capítulo 3](#). As simulações estão no [Capítulo 4](#), onde serão apresentados gráficos e análises de cada etapa. Por fim, no [Capítulo 5](#) são feitas as conclusões dos resultados do projeto dos subsistemas.

2 ESPECIFICAÇÕES

O sistema de processamento de sinais digitais (Sistema PSD) é composto por 2 subsistemas e cada um deles implementará os filtros com resposta ao impulso infinita (IIR) ou finita (FIR). Ambos os subsistemas possuem a estrutura mostrada no diagrama da [Figura 1](#).

Figura 1 – Diagrama lógico dos subsistemas



FONTE: Elaborada pelo autor.

O subsistema é composto por um filtro passa baixa (LPF - *Low-Pass Filter*) seguido de um filtro passa faixa (BPF - *Band-Pass Filter*). O sinal de entrada portanto será filtrado primeiro pelo LPF e o sinal resultante desse processo será filtrado pelo BPF e sairá do subsistema.

Além da resposta ao impulso, os filtros dos subsistemas utilizaram diferentes modelos de aproximação para o seu projeto. Exceto por isso, as especificações de frequência e atenuação são equivalentes nos dois subsistemas. A [Tabela 1](#) contém as especificações do filtro passa baixa e a [Tabela 2](#) do filtro passa faixa.

Tabela 1 – Especificações do Filtro Passa Baixa

Característica	Subsistema IIR	Subsistema FIR
Tipo	Digital	
Resposta em frequência	Passa Baixa	
Resposta ao impulso	IIR	FIR
Modelo de aproximação	Butterworth	Parks-McClellan
Frequência de Amostragem (f_a)	4kHz	
Frequência de Passagem (f_p)	1.5kHz	
Frequência de Rejeição (f_s)	1.8kHz	
Atenuação de Passagem (A_p)	3dB	
Atenuação de Rejeição (A_s)	40dB	

FONTE: Elaborada pelo autor.

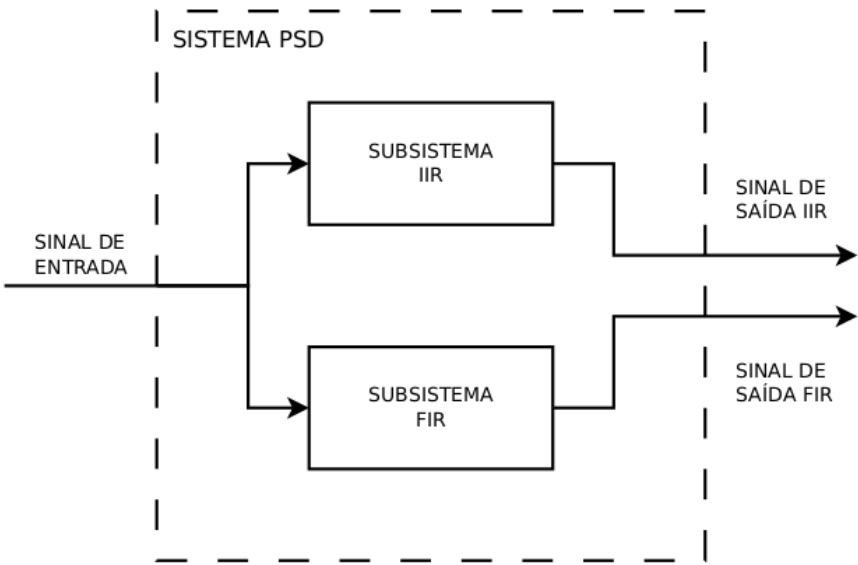
O sistema PSD contém portanto dois subsistemas estruturados conforme a [Figura 1](#). O sinal de entrada do sistema principal entra nos subsistemas IIR e FIR e cada qual produz uma saída diferente. O diagrama do sistema PSD é mostrado na [Figura 2](#).

Tabela 2 – Especificações do Filtro Passa Faixa

Característica	Subsistema IIR	Subsistema FIR
Tipo	Digital	
Resposta em frequência	Passa Faixa	
Resposta ao impulso	IIR	FIR
Modelo de aproximação	Chebyshev 2	Parks-McClellan
Frequência de Amostragem (f_a)	4kHz	
Frequência de Rejeição Inferior (f_{si})	0.4kHz	
Frequência de Passagem Inferior (f_{pi})	0.8kHz	
Frequência de Passagem Superior (f_{ps})	1kHz	
Frequência de Rejeição Superior (f_{ss})	1.4kHz	
Atenuação de Passagem (A_p)	3dB	
Atenuação de Rejeição (A_s)	40dB	

FONTE: Elaborada pelo autor.

Figura 2 – Diagrama lógico do Sistema PSD



FONTE: Elaborada pelo autor.

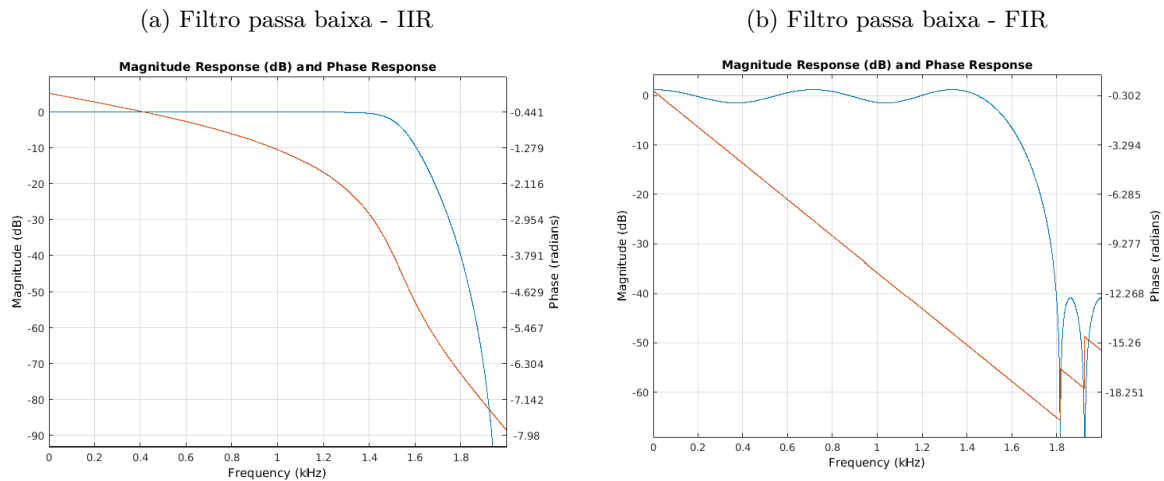
3 PROJETO DOS FILTROS

Os subsistemas especificados no [Capítulo 2](#) são compostos por filtros passa baixa e passa faixa. Para projetá-los foi utilizada a ferramenta *Filter Realization Wizard* do software *Simulink*.

3.1 Filtro Passa Baixa

Os filtros passa baixa dos subsistemas IIR e FIR foram projetados conforme as especificações da [Tabela 1](#) e os resultados em função da frequência são mostrados na [Figura 3a](#) e na [Figura 3b](#) respectivamente.

Figura 3 – Resposta em magnitude e fase dos filtros passa baixa

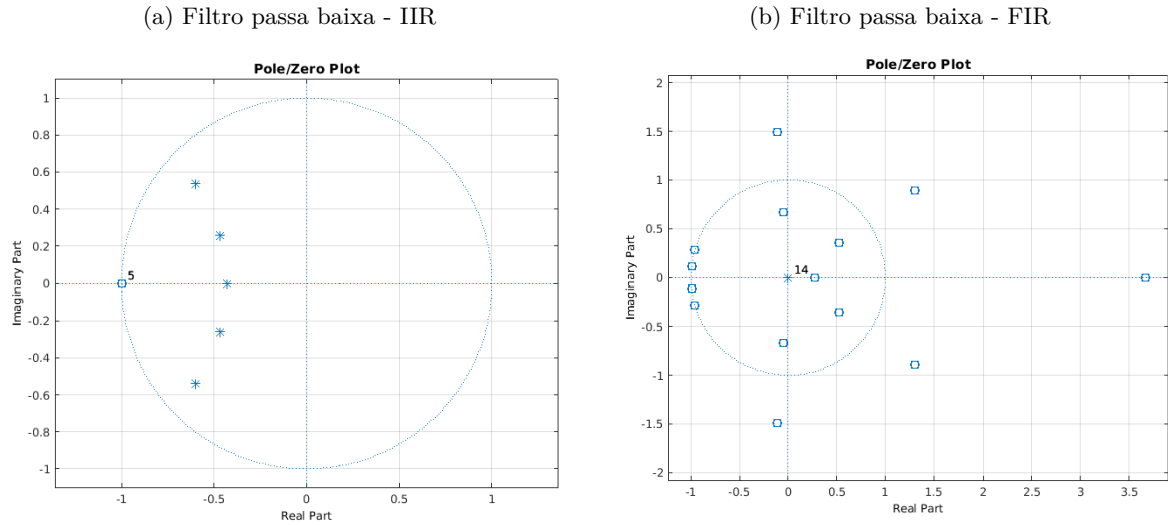


FONTE: Elaborada pelo autor.

Os gráficos mostram que tanto o filtro passa baixa do subsistema IIR quanto o do subsistema FIR estão dentro das especificações de projeto. É possível perceber diferenças tanto na magnitude quanto na fase causada pelo modelo de aproximação escolhido para cada um deles. O filtro do subsistema FIR possui ondulações nas frequências de passagem e sua fase é linear, diferente do filtro do subsistema IIR que possui ganho constante na faixa de passagem e sua fase não é linear. Outra diferença percebida é na faixa de transição, onde no IIR a transição é suave e no FIR a transição é mais abrupta.

O filtro passa baixa IIR resultou em ordem 5 e o FIR resultou em ordem 14. O diagrama de pólos e zeros dos filtros são mostrados na [Figura 4a](#) e na [Figura 4b](#). Ambos os diagramas mostram estabilidade, pois no filtro IIR os pólos estão localizados dentro do círculo unitário e no filtro FIR os pólos estão concentrados na origem.

Figura 4 – Diagrama de pólos e zeros dos filtros passa baixa

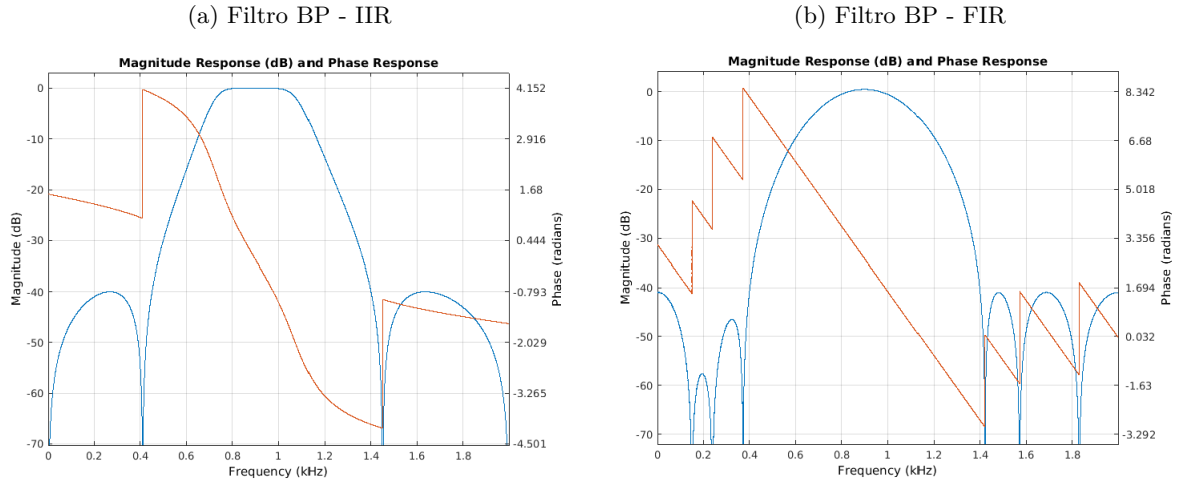


FONTE: Elaborada pelo autor.

3.2 Filtro Passa Faixa

Com base na [Tabela 2](#) foram projetados os filtros passa faixa dos subsistemas IIR e FIR, porem o filtro FIR não se encaixou nas especificações de projeto. Para resolver isso foi realizado um ajuste nas atenuações de passagem e de rejeição. Seus novos valores foram: $A_p = 1dB$ e $A_s = 41dB$. Os resultados em frequência dos filtros passa baixa IIR e FIR são mostrados na [Figura 5a](#) e [Figura 5b](#).

Figura 5 – Resposta em magnitude e fase dos filtros passa faixa

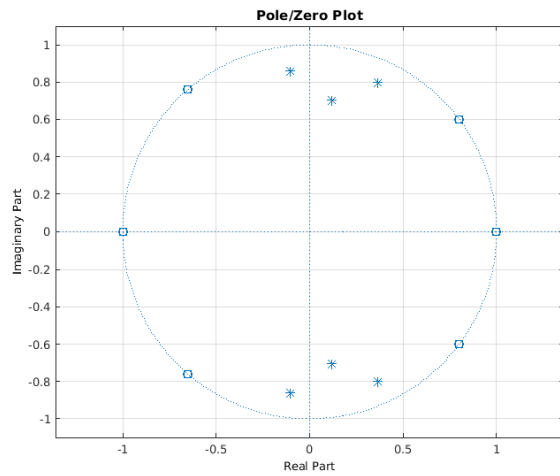


FONTE: Elaborada pelo autor.

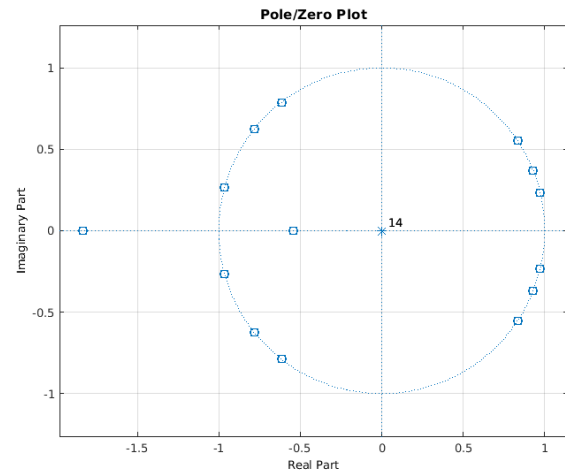
Apesar da diferença no resultado dos filtros passa faixa, os dois também se enquadram nas especificações de projeto. Da mesma forma que no projeto dos filtros passa baixa, a diferença entre as respostas em frequência dos filtros foi causada pela escolha do modelo de aproximação. Como também foi observado no projeto dos filtros passa baixa, o filtro do subsistema IIR resultou em fase não linear e faixa de passagem com ganho constante. Nesse caso o filtro do subsistema FIR também resultou em fase linear e faixa de passagem ondulada.

Figura 6 – Diagrama de pólos e zeros dos filtros passa faixa

(a) Filtro BP - IIR



(b) Filtro BP - FIR



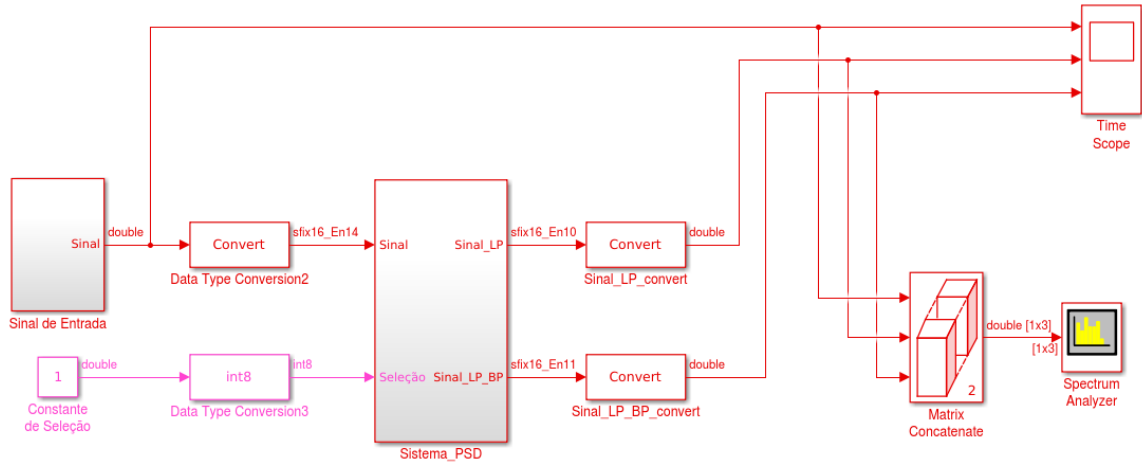
FONTE: Elaborada pelo autor.

A Figura 6a mostra que o filtro passa faixa IIR é de ordem 6 e estável, isso porque os pólos estão dentro do círculo unitário. A Figura 6b também mostra estabilidade no filtro passa faixa FIR, pois os pólos estão concentrados no zero, e sua ordem é 14.

4 SIMULAÇÕES

O projeto do sistema PSD que contém os subsistemas IIR e FIR foi simulado em um ambiente do software *Simulink*. A [Figura 7](#) mostra os blocos que compõem o ambiente de simulação.

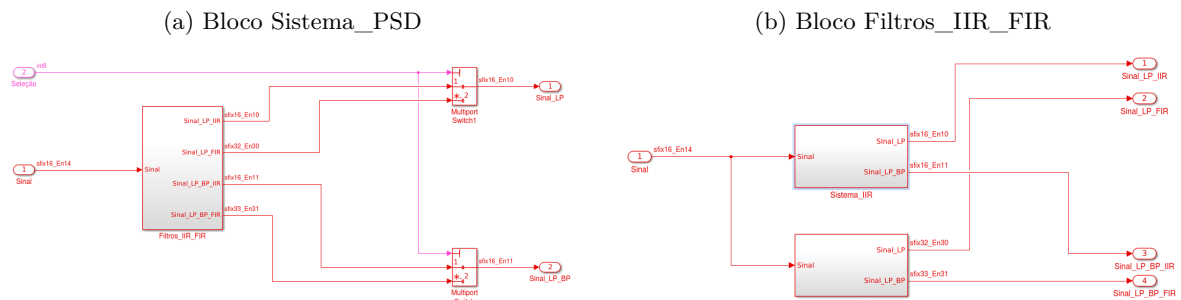
Figura 7 – Visão geral do ambiente de simulação



FONTE: Elaborada pelo autor.

O bloco **Sinal de Entrada** implementa uma fonte *Chirp* que gera um sinal oscilante na frequência entre 0 e $2kHz$ no período de 2 segundos. Esse sinal entra no bloco **Sistema_PSD** que gera o sinal de saída **Sinal_LP**, resultado do filtro passa baixa, e o sinal de saída **Sinal_LP_BP** que é o resultado final do subsistema. O **Sistema_PSD** tem um outro sinal de entrada chamado **Seleção** que define o subsistema que gerará os sinais de saída. Quando **Seleção=1** o subsistema IIR é escolhido e quando **Seleção=2** o subsistema FIR é escolhido. Os blocos **Time Scope** e **Spectrum Analyzer** são usados para analisar o sinal de entrada e os sinais de saída do bloco **Sistema_PSD** nos domínios do tempo e frequência respectivamente. Por fim os blocos **Convert** e **int8** são usados para converter o tipo de dado e o bloco **Matrix Concatenate** é usado para concatenar os sinais que são analisados no domínio da frequência.

Figura 8 – Interior dos blocos Sistema_PSD e Filtros_IIR_FIR

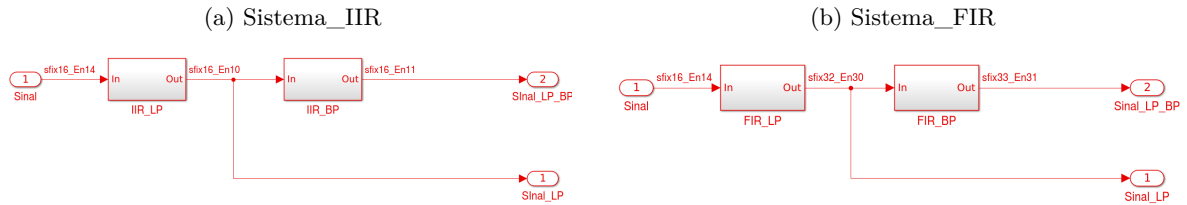


FONTE: Elaborada pelo autor.

A [Figura 8a](#) mostra o interior do bloco **Sistema_PSD**. Os subsistemas IIR e FIR estão dentro do bloco **Filtros_IIR_FIR**. As saídas requisitadas pela **Seleção** são direcionadas para as saídas do bloco **Sistema_PSD**. O bloco **Filtros_IIR_FIR** pode ser visto com mais detalhes na [Figura 8b](#). Os filtros IIR

estão dentro do Sistema_IIR e os filtros FIR dentro do Sistema_FIR. A Figura 9a e Figura 9b mostram o interior de cada subsistema.

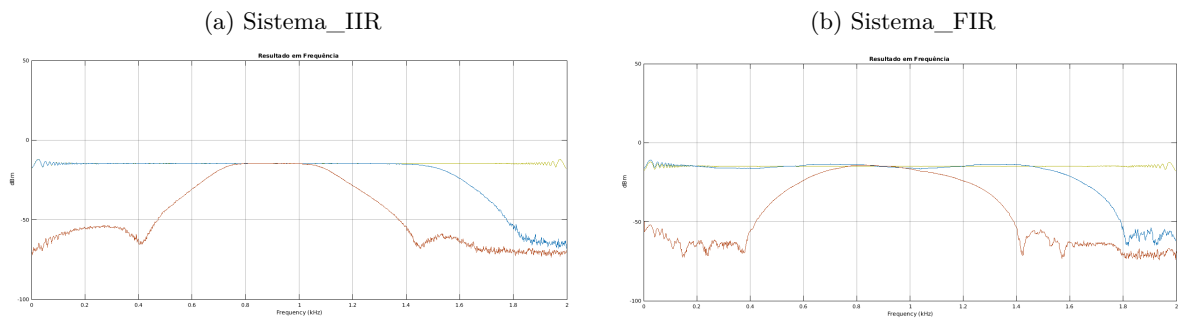
Figura 9 – Interior dos blocos dos subsistemas



FONTE: Elaborada pelo autor.

Com o ambiente pronto foi iniciada as simulações. Primeiro os subsistemas foram analisados no domínio da frequência. A Figura 10a e a Figura 10b mostram na frequência o sinal de entrada e os sinais de saída do bloco Sistema_PSD.

Figura 10 – Resultado do Simulink no domínio da frequência. O sinal amarelo representa o sinal de entrada, o azul é a saída do filtro passa baixa e o vermelho é a saída do filtro passa faixa.



FONTE: Elaborada pelo autor.

Para cada subsistema foram feitas medidas da diferença de magnitude entre o sinal que entrou e o sinal que saiu de um determinado ponto do subsistema. Os valores medidos estão na Tabela 3.

Tabela 3 – Medidas de diferença de magnitude entre sinais

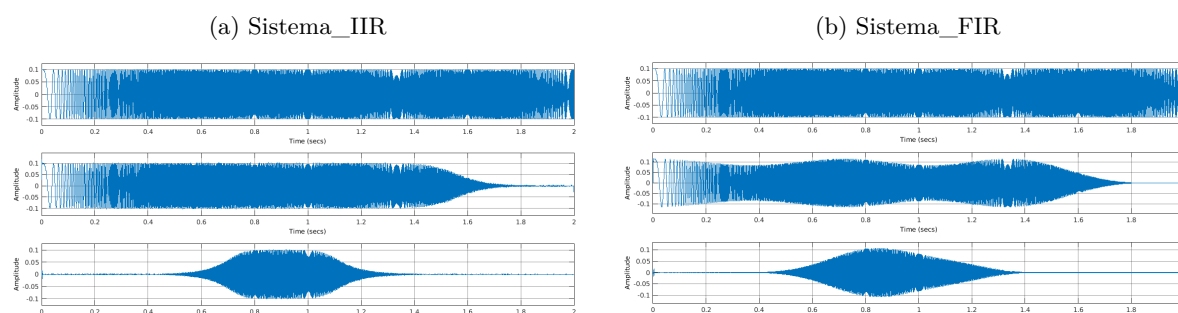
Sinais Medidos	Frequência	Δ IIR	Δ FIR
Entrada e LP	1.5kHz	2.212dB	1.464dB
Entrada e LP	1.8kHz	40.434dB	38.187dB
LP e BP	0.4kHz	48.148dB	39.856dB
LP e BP	0.8kHz	0dB	0dB
LP e BP	1kHz	0dB	0dB
LP e BP	1.4kHz	39.065dB	39.866dB

FONTE: Elaborada pelo autor.

As duas primeiras linhas da tabela mostram que o efeito do filtro passa baixa nas frequências de atenuação e de rejeição do subsistema IIR é mais eficiente do que o do subsistema FIR. As últimas linhas mostram a diferença entre as medidas do sinal que entra e que sai do filtro passa faixa nas frequências de interesse. Na frequência de rejeição inferior o subsistema IIR teve melhores resultados. Na faixa de passagem os dois subsistemas apresentaram bons resultados. O subsistema FIR teve um resultado levemente superior em comparação ao IIR na frequência de rejeição superior.

Os resultados da simulações no domínio do tempo estão na [Figura 11a](#) e na [Figura 11b](#). Como o sinal *Chirp* oscila entre 0 e 2kHz em 2 segundos, o eixo do tempo pode ser visto como um eixo da frequência. O sinal de saída do filtro passa baixa IIR mantém a mesma amplitude do sinal original até aproximadamente 1.4 segundos ou 1.4kHz, onde começa a ser atenuado. Já no filtro passa baixa FIR a amplitude do sinal sofre oscilações antes de 1.4 segundos, isso porque o filtro passa baixa FIR possui essa característica na faixa de passagem. Na saída do filtro passa faixa IIR o sinal mantém a amplitude original entre 0.8 e 1 segundos, como esperado. Nessa mesma faixa no sistema FIR a amplitude varia ainda mais a oscilação por conta do efeito em cascata dos filtros FIR.

Figura 11 – Resultado do Simulink no domínio do tempo. O primeiro sinal representa o sinal de entrada, o segundo é a saída do filtro passa baixa e o terceiro é a saída do filtro passa faixa.

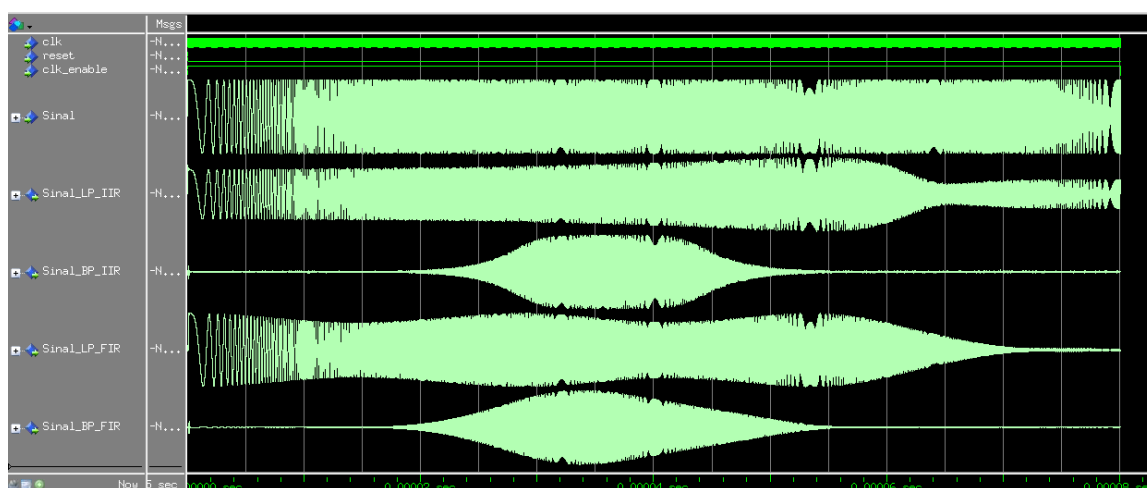


1.6 1.8 2 0 0.2 0.4

FONTE: Elaborada pelo autor.

O bloco `Sistema_PSD` foi convertido para HDL de forma que o sistema pudesse ser simulado como um componente. O resultado da simulação no *Modelsim* pode ser visto na [Figura 12](#) e se assemelha com o resultado obtido no *Simulink*.

Figura 12 – Resultado do Modelsim no domínio do tempo. Os sinais estão nomeados conforme os pinos de entrada e saída da Figura 9a e Figura 9b



FONTE: Elaborada pelo autor.

5 CONCLUSÕES

O presente relatório teve como propósito detalhar as etapas do projeto e simulação de um sistema de processamento de sinais digitais composto dois subsistemas que incluem um filtro passa baixa em cascata com um filtro passa faixa e se diferenciam pela resposta em frequência infinita (IIR) ou finita (FIR). Os softwares *Simulink* e *Modelsim* foram utilizados para realização do projeto e das simulações.

Os filtros passa baixa IIR e FIR e o filtro passa faixa IIR foram realizados conforme as especificações de projeto. Somente o filtro passa faixa FIR precisou de ajustes na realização para se enquadrar nos valores pretendidos. As simulações mostraram que o subsistema IIR teve melhor desempenho na maioria das análises, porém ambos obtiveram em geral bons resultados.