

**INSTITUTO FEDERAL
DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA**
Ceará

CAMPUS FORTALEZA

TECNOLOGIA EM TELEMÁTICA

PROCESSAMENTO DIGITAL DE SINAIS

PROFESSOR RICARDO RODRIGUES DE ARAUJO

PROJETO DE FILTROS DIGITAIS

Acadêmico: Francikelbe Freire Oliveira

Fortaleza – Ce

Junho de 2023

Sumário

1. Introdução	2
2. Fundamentação Teórica	2
2.1. Filtros FIR.....	3
2.1.1. Método das Janelas.....	3
2.1.1.1. Janela Retangular	3
2.1.1.2. Janela de Hanning.....	4
2.1.1.3. Janela de Hamming	4
2.1.1.4. Janela de Blackman	4
2.2. Filtros IIR.....	5
2.2.1. Filtros Butterworth.....	5
2.2.2. Filtros Chebyshev I e II	5
2.2.3. Filtros Elípticos	6
2.2.4. Filtros Notch	6
2.3. Método da Transformação Bilinear	6
3. Metodologia	7
4. Resultados	8
4.1. Resultados filtros IIR.....	9
4.2. Resultados filtros IIR e FIR.....	11
5. Conclusões.....	14
6. Bibliografias	15
7. Anexos	15

1. Introdução

O projeto de filtros digitais é essencial no processamento de sinais, permitindo a manipulação e a recuperação de sinais digitais para aplicações distintas. Para este projeto, serão trabalhados os dois tipos principais de filtros digitais, os filtros IIR (Infinite Impulse Response) e os filtros FIR (Finite Impulse Response).

A seguir será apresentado as características técnicas de cada filtro e suas peculiaridades, vantagens e também as desvantagens de cada um. Após, será demonstrado a metodologia aplicada ao projeto, percorrendo o passo a passo na elaboração. Em seguida, serão apresentados os resultados obtidos por meio dos gráficos gerados. Além dos gráficos, fazem parte dos resultados obtidos os códigos fonte e o arquivo de áudio filtrado, que estarão em anexo ao projeto. Por último, mas não menos importante, serão apresentadas as conclusões obtidas neste projeto.

2. Fundamentação Teórica

Filtros digitais são operações matemáticas que, aplicadas em um sinal amostrado e quantizado, eliminam e/ou atenuam os sinais indesejados, frequências que causam ruídos, obtendo-se um sinal de saída semelhante ao sinal de entrada.

Os filtros digitais comparados aos analógicos possuem diversas vantagens, dentre elas, são fáceis de projetar, programar e implementar.

Neste tipo de filtro, a amplitude é definida apenas para valores específicos da variável independente, o que o define como um sistema discreto.

Existem vários tipos de filtros, contudo, para o embasamento do projeto serão percorridos apenas os dois mais utilizados, filtros digitais FIR (Finite Impulse Response) e IIR (Infinite Impulse Response).

2.1. Filtros FIR

São sistemas lineares de tempo discreto, na qual a sequência de saída está relacionada com a sequência da entrada e a resposta ao impulso do filtro pela operação de convolução.

Suas principais características são, possuir resposta ao impulso de duração finita, isso significa que os filtros FIR possuem valores não nulos sobre um intervalo de tempo finito e zero fora deste intervalo. Eles também podem implementar resposta em frequência com fase linear, resumindo o projeto destes filtros em aproximar a resposta ao módulo desejado. Outra característica inerente a este tipo de filtro é a implementação através de equações de diferença sem recursividade, neste caso a saída depende apenas da entrada atual e de entradas anteriores. Também são BIBO estáveis, ou seja, para todo sinal de entrada com amplitude limitada, há um sinal de saída também com amplitude limitada.

2.1.1. Método das Janelas

O uso de janelas em filtros FIR tem como objetivo computar amostras do filtro ideal aumentando a eficiência destes filtros. Isso é feito multiplicando a função janela pelo sinal de entrada, criando assim um novo sinal, que contém apenas as informações presentes dentro da janela. Esse processo é realizado ao longo de todo o sinal de entrada.

O tamanho da janela escolhida está diretamente ligado a resolução em frequência, ou seja, quanto maior for a janela, maior será a resolução, porém a resolução temporal é inversamente proporcional.

As funções janelas mais utilizadas são a janela retangular, janela de Hanning, janela de Hamming e a janela de Blackman. A seguir será discorrido sobre cada uma delas.

2.1.1.1. Janela Retangular

Esta função atribui valor 1 para todos os pontos dentro da região da janela e valor 0 para todos os pontos fora dela. É o método mais simples de se implementar e amplamente utilizado entre os métodos de janela, contudo, possui algumas desvantagens, como

aparecimento de ripples (fenômeno de Gibbs), poucos parâmetros e mudança abrupta nas extremidades da resposta ao impulso.

2.1.1.2. Janela de Hanning

Ela é projetada para reduzir o vazamento espectral, um efeito indesejado que ocorre quando a energia presente em um sinal se espalha por outras frequências devido ao uso de uma janela retangular abrupta. Essa redução ocorre porque a janela de Hanning suaviza a transição entre os valores de 0 e 1. Ela preserva as características temporais do sinal e possui também boa resolução em frequência. Contudo, a janela de Hanning causa uma redução na amplitude efetiva do sinal, isso ocorre porque o valor máximo da janela é 0,5. Metade do valor máximo da janela retangular, atenuando o sinal.

2.1.1.3. Janela de Hamming

Esta janela, assim como a de Hanning é projetada para reduzir o vazamento espectral e proporcionar uma boa resolução em frequência, por meio da suavização da transição. Ela também preserva as características temporais do sinal. Uma desvantagem é que ela causa uma ligeira atenuação do sinal.

2.1.1.4. Janela de Blackman

Também projetada para reduzir o vazamento espectral e fornecer uma boa resolução em frequência, esse método possui uma formula mais complexa, em comparação com os métodos anteriores. Essa complexidade resulta em uma frequência mais precisa e um melhor controle do vazamento espectral. Como desvantagem, este método também sofre atenuação de sinal.

2.2. Filtros IIR

Os filtros IIR possuem resposta ao impulso de duração infinita. Este tipo de filtro apresenta característica de entrada e saída geridas por equações lineares de diferença com coeficientes de natureza recursiva. Outras características deste tipo de filtro é possuir memória infinita, resposta em fase não linear e a estabilidade depende da posição dos polos.

Como desvantagem eles são mais suscetíveis a problemas de estabilidade e podem apresentar distorção em relação aos filtros FIR.

Existem vários tipos de filtros IIR, os mais utilizados serão percorridos a seguir.

2.2.1. Filtros Butterworth

Possui resposta em frequência maximamente plana dentro da banda passante, ou seja, todas as frequências dentro da banda passante são atenuadas de forma igual, resultando em uma resposta em frequência mais suave em comparação com outros filtros. Porém, a banda de transição é maior se comparado com outros filtros.

A resposta em frequência deste filtro é projetada de modo que, a queda da amplitude comece a partir da frequência de corte especificada, e a taxa de queda é determinada pela ordem do filtro, ou seja, quanto maior for a ordem do filtro, menor será a banda de transição.

2.2.2. Filtros Chebyshev I e II

O Chebyshev I é projetado para apresentar uma resposta em frequência com flutuações controladas na banda passante. Tais flutuações permitem uma taxa de atenuação mais rápida fora da banda passante, contudo, possui a desvantagem de introduzir distorções ou ondulações dentro da banda passante. Sua magnitude é especificada pelo parâmetro Ripple Passband.

Já o Chebyshev II é projetado para apresentar uma resposta em frequência com flutuações controladas na banda de rejeição, deste modo, a taxa de atenuação é mais

acentuada fora da banda passante. Sua magnitude é especificada pelo parâmetro Ripple Stoband.

Ao projetar um destes filtros, é necessário especificar a frequência de corte, a ordem do filtro e a magnitude.

2.2.3. Filtros Elípticos

Este filtro nada mais é do que a junção dos filtros Chebyshev I e II, ou seja, possui oscilações tanto na banda de passagem, quanto na banda de rejeição. Ele possui a menor banda de transição entre os demais filtros.

2.2.4. Filtros Notch

Este é um filtro muito seletivo, pois elimina uma frequência específica. O seu principal objetivo é suprimir interferências causadas por uma frequência indesejada, como por exemplo interferências de rede elétrica.

Neste filtro, o espectro do sinal gerado por meio da transformada de Fourier é analisado para identificar a frequência a ser filtrada, projetando o filtro Notch em seguida com a frequência encontrada.

Existem diversos tipos de filtros Notch, os mais comuns são, filtro Notch de rejeição simples, ou seja, este filtro é projetado para atenuar uma frequência específica. Filtro Notch de Múltiplas Rejeições, projetado para várias frequências indesejadas e o filtro Notch adaptativo, como o próprio nome já diz, este filtro é capaz de adaptar sua resposta em frequência em tempo real, acompanhando e atenuando frequências variáveis.

2.3. Método da Transformação Bilinear

Consiste em uma técnica utilizada para possibilitar a conversão de filtros analógicos em filtros digitais. Isso é feito por meio do mapeamento da resposta em frequência de um filtro analógico para o domínio digital. Contudo, essa transformação causa distorção na

resposta em frequência do filtro, principalmente em frequências mais altas. Para tentar diminuir este problema utiliza-se técnicas de pré-ênfase ao projeto do filtro digital. Estas técnicas compensam a distorção da resposta em frequência introduzida pela transformação bilinear.

3. Metodologia

Utilizando o software Octave-7.3.0 foram desenvolvidos dois códigos para filtrar o mesmo áudio, um somente com filtros IIR e o outro contendo pelo menos um filtro FIR. As atividades desenvolvidas foram separadas em duas partes, ambas percorridas a seguir.

Na primeira parte foi desenvolvido um código para ler o arquivo de áudio “fala_sirene_tm0.wav”, fazer a transformada de Fourier, passar para o domínio da frequência e normalizá-la, plotando o gráfico do espectro de frequência do sinal em seguida. Foi analisado o espectro e encontrado as frequências responsáveis pelas interferências, neste caso um tom na frequência de 200Hz e uma sirene começando em 1800Hz. Com base nestas informações foi determinado que seria necessário a utilização de 2 filtros, neste primeiro caso, somente filtros IIR, um filtro Notch para fazer a remoção do tom e um filtro Butterworth passa-baixa para fazer a remoção da sirene.

Para a primeira filtragem foi desenvolvido o filtro de Butterworth passa-baixa de ordem 18 e frequência de corte de 1300Hz. Foi estabelecida esta frequência para que o início da frequência de rejeição ficasse próximo dos 1800Hz. Em seguida foi criado o código para retornar a resposta em frequência e em seguida plotado o gráfico na mesma figura do espectro de frequência. Em seguida foi realizado a filtragem do sinal de áudio.

Na segunda filtragem foi desenvolvido um filtro Notch com frequência de corte de 200Hz e coeficiente de amortecimento 0.97. Logo após foi criado o código para retornar a resposta em frequência e em seguida plotado o gráfico na mesma figura anterior. Em seguida foi realizado a filtragem do sinal de áudio. Neste momento foi utilizado no sinal de entrada o sinal de saída da primeira filtragem, obtendo-se assim uma filtragem em cascata. Em seguida o sinal de saída resultante foi passado para o domínio da frequência, determinado o tamanho do vetor “Y”, normalizado e amplificado.

Com as filtrações finalizadas, foram plotados os gráficos do áudio filtrado, a resposta ao impulso para ambos os filtros e gerado o arquivo de áudio “áudio_filtrado_IIR.wav”.

Na segunda parte foi gerado um novo projeto, no qual parte do código utilizado na primeira parte foi reutilizado. Foi utilizado o código de leitura do arquivo de áudio original até a plotagem do espectro do sinal original. Em seguida foi reutilizado o código do filtro Notch, com as devidas correções de variáveis. Foi plotado o gráfico do filtro Notch e realizado a filtração do áudio em seguida.

Na segunda filtração foi desenvolvido um filtro FIR fir1 passa-baixa com frequência de corte de 1700Hz e ordem 250. Logo após foi criado o código para retornar a resposta em frequência, plotado o gráfico na mesma figura anterior e filtrado o sinal do áudio. Neste momento foi utilizado no sinal de entrada o sinal de saída da primeira filtração, obtendo-se assim uma filtração em cascata. Em seguida o sinal de saída resultante foi passado para o domínio da frequência, determinado o tamanho do vetor “Y”, normalizado e amplificado.

Com as filtrações finalizadas, foram plotados os gráficos do áudio filtrado, a resposta ao impulso para ambos os filtros e gerado o arquivo de áudio “áudio_filtrado_IIR_FIR.wav”.

4. Resultados

Os resultados serão apresentados em duas partes, conforme o desenvolvimento do projeto de implementação. Na primeira parte serão apresentados os resultados obtidos durante o desenvolvimento do projeto realizado somente com filtros de Resposta de Impulso Infinita (IIR). Na segunda parte serão apresentados os resultados do projeto desenvolvido contendo um filtro de Resposta de Impulso Infinita (IIR) e um filtro de Resposta de Impulso Finita (FIR).

Os códigos fonte utilizados de ambos os projetos se encontram em anexo.

4.1. Resultados filtros IIR

Na Figura 1 abaixo é possível identificar o pico da frequência de 200Hz referente ao tom, bem como a faixa de ruído iniciando em torno de 1800Hz, que neste caso é referente ao som da sirene.

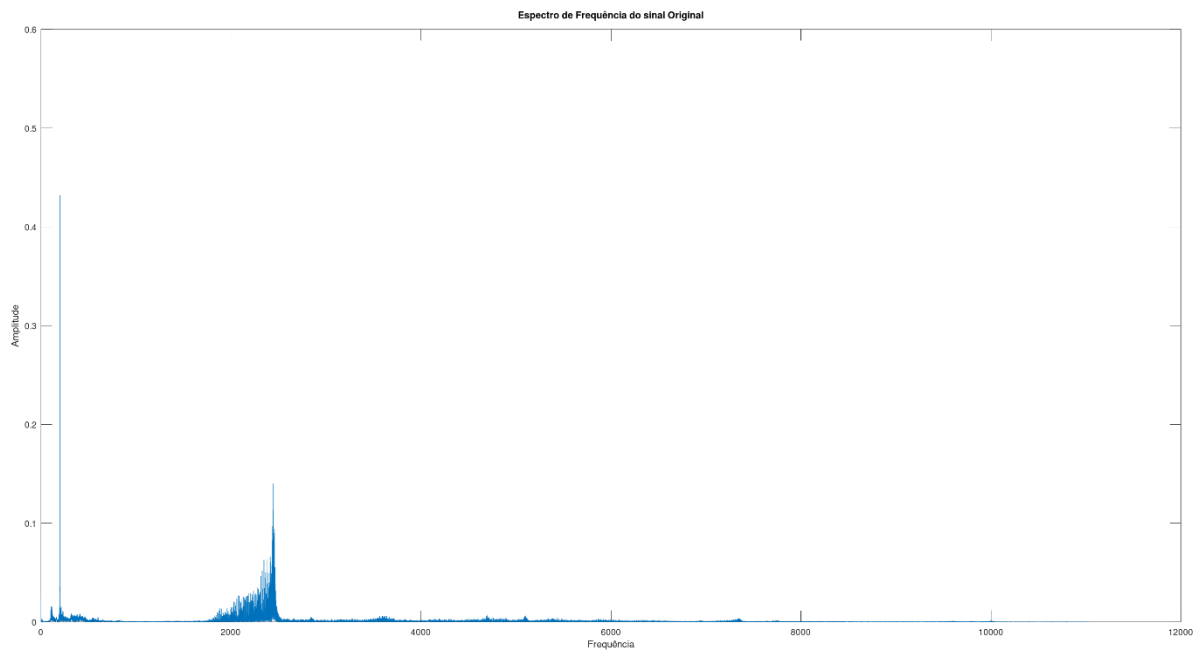


Figura 1: Espectro de frequência do sinal original.

Na Figura 2 pode-se se observar a resposta em frequência do filtro Notch na cor amarela sobre a frequência de 200Hz referente ao tom e a resposta em frequência do filtro Butterworth na cor laranja com sua banda de rejeição iniciando entorno dos 1800Hz, quando inicia-se o ruído.

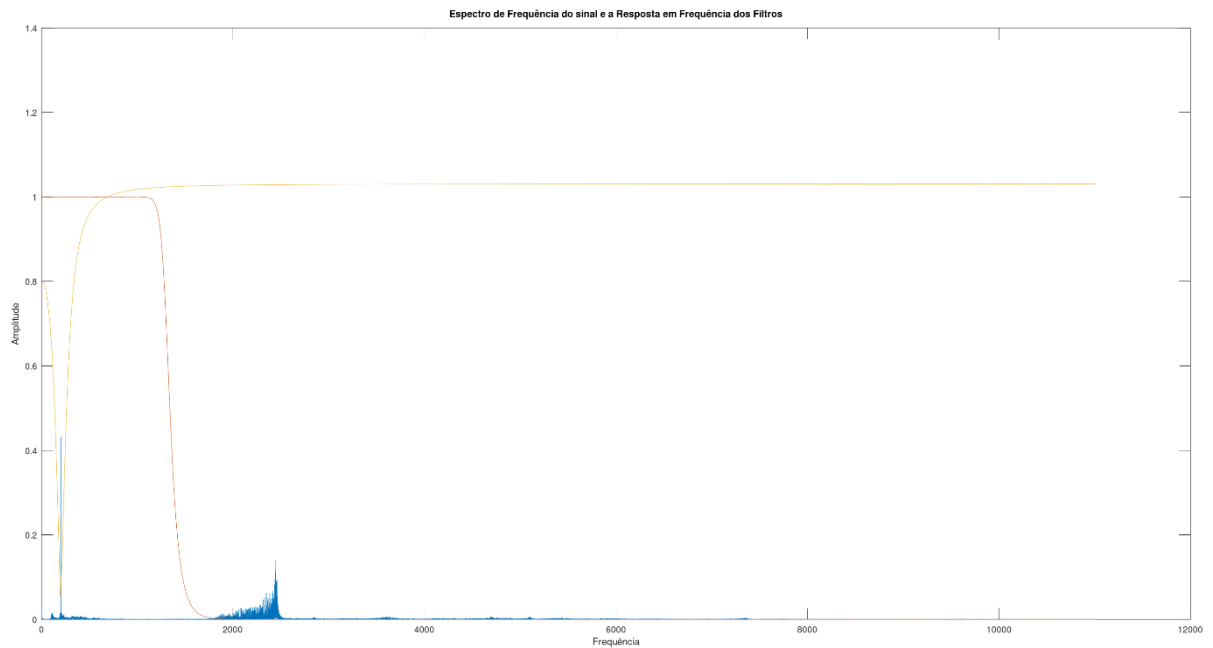


Figura 2: Espectro de frequência do sinal e a resposta em frequência dos filtros.

Na Figura 3 o espectro do sinal já se encontra filtrado. É possível observar que não existem mais frequências causadoras dos ruídos com ganhos altos nas frequências de 200Hz para o tom e acima de 1800Hz para a sirene.

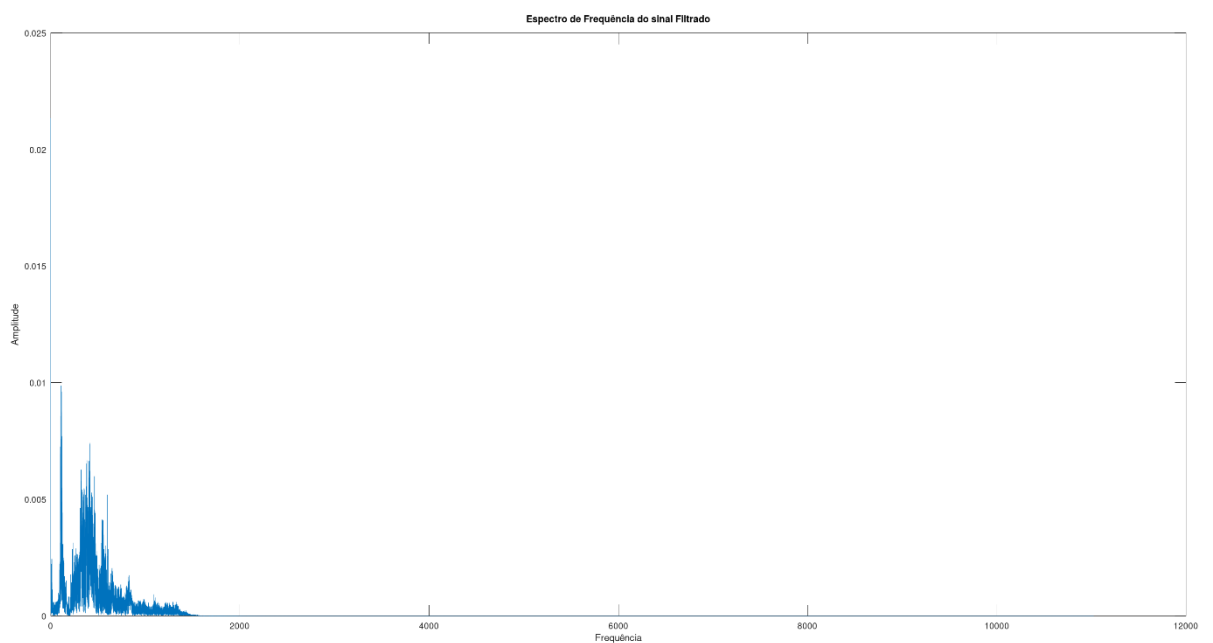


Figura 3: Espectro de frequência do sinal filtrado.

A Figura 4 mostra a resposta ao impulso do filtro Butterworth passa-baixa de ordem 18 e frequência de corte de 1300Hz.

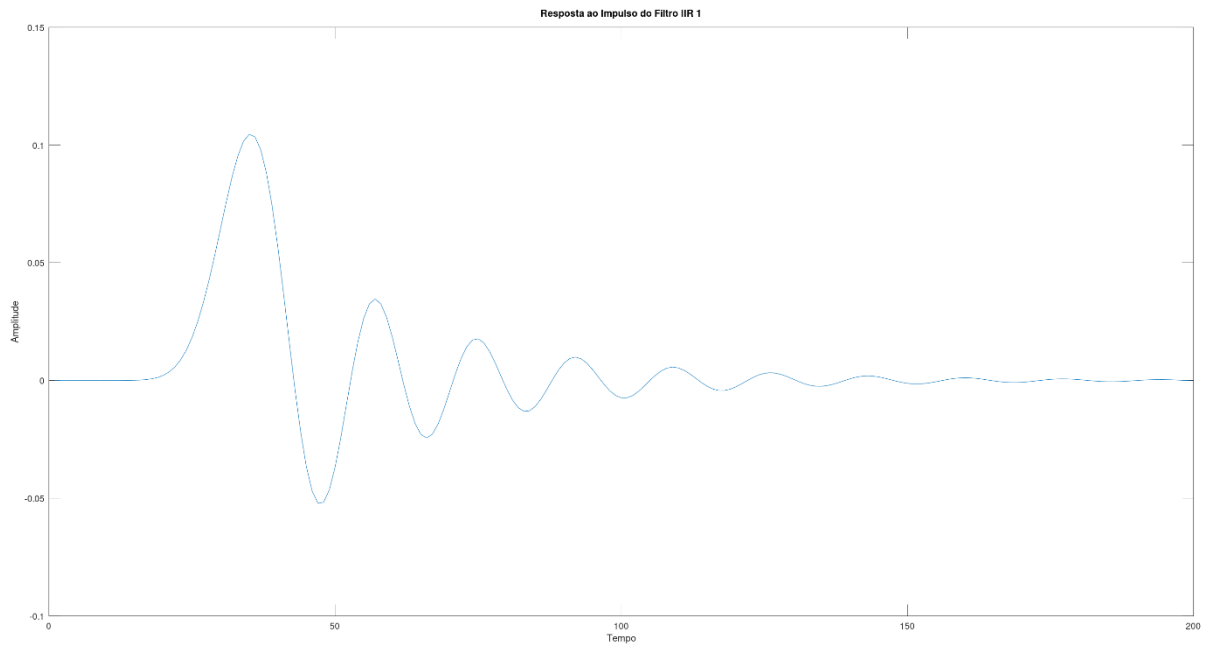


Figura 4: Resposta ao impulso do filtro Butterworth passa-baixa.

A figura 5 mostra a resposta ao impulso do filtro Notch com frequência de corte de 200Hz e coeficiente de amortecimento 0.97.

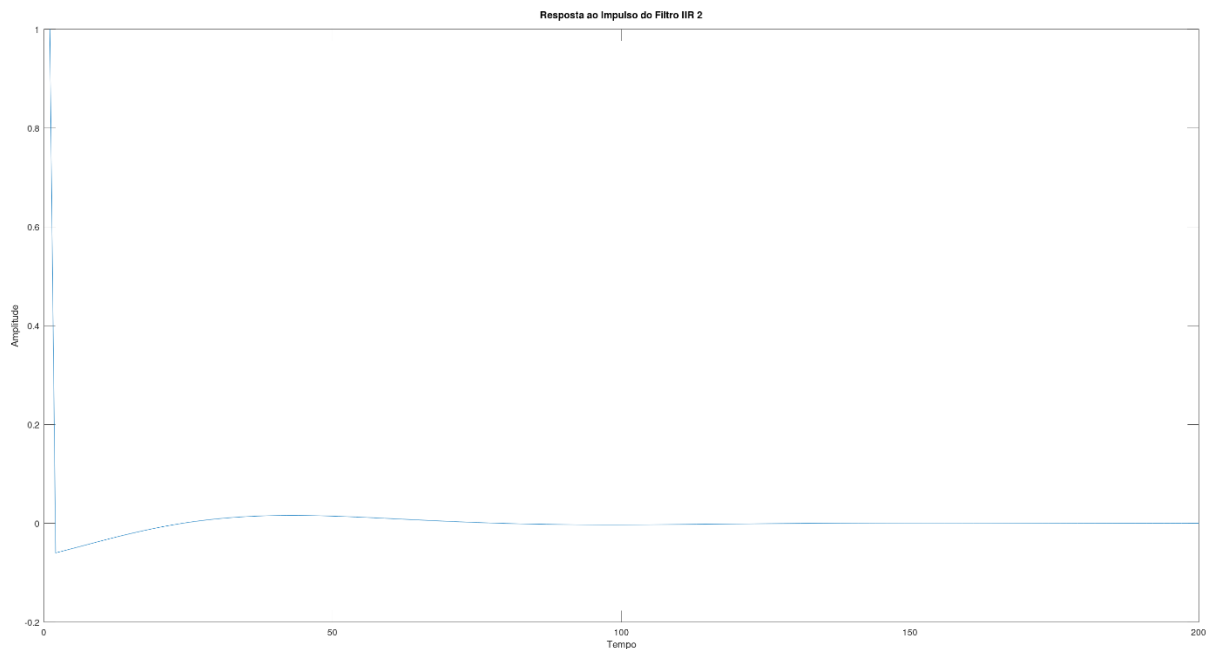


Figura 5: Resposta ao impulso do filtro Notch.

4.2. Resultados filtros IIR e FIR

Na Figura 6 identifica-se o pico da frequência de 200Hz referente ao tom, assim como a faixa de ruído iniciando em torno de 1800Hz, que neste caso é referente ao som da sirene.

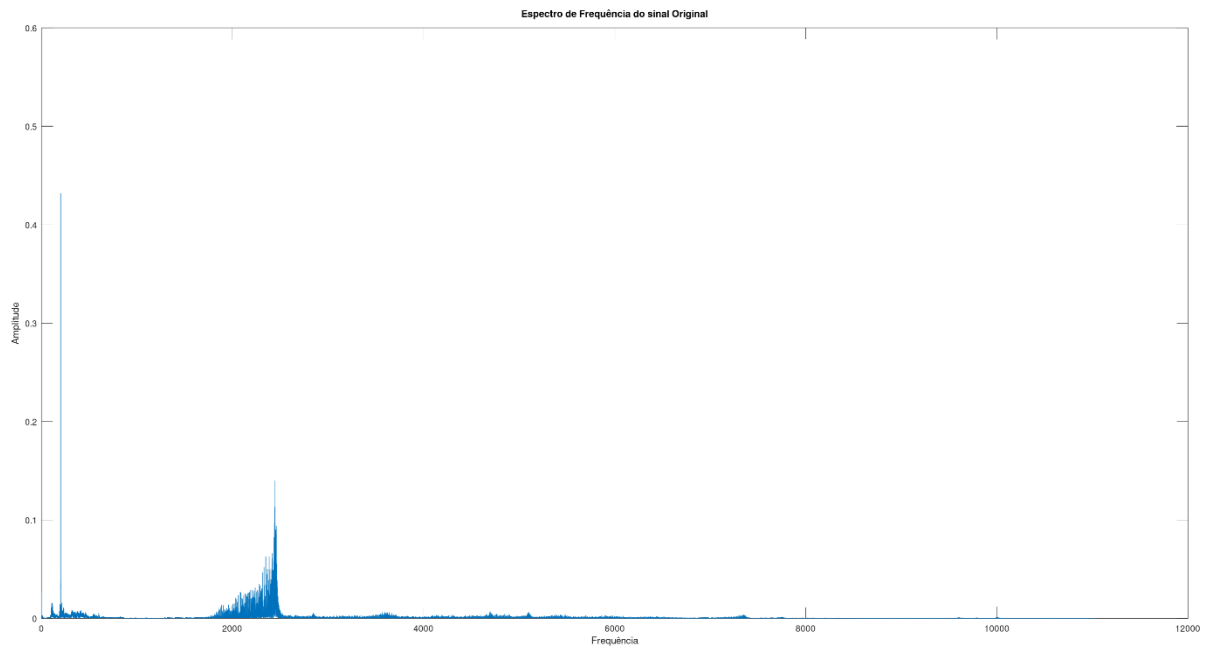


Figura 6: Espectro de frequência do sinal original.

Na Figura 7 observa-se a resposta em frequência do filtro Notch na cor laranja sobre a frequência de 200Hz referente ao tom e a resposta em frequência do filtro fir1 na cor amarela com sua banda de rejeição iniciando entorno dos 1800Hz, quando inicia-se o ruído.

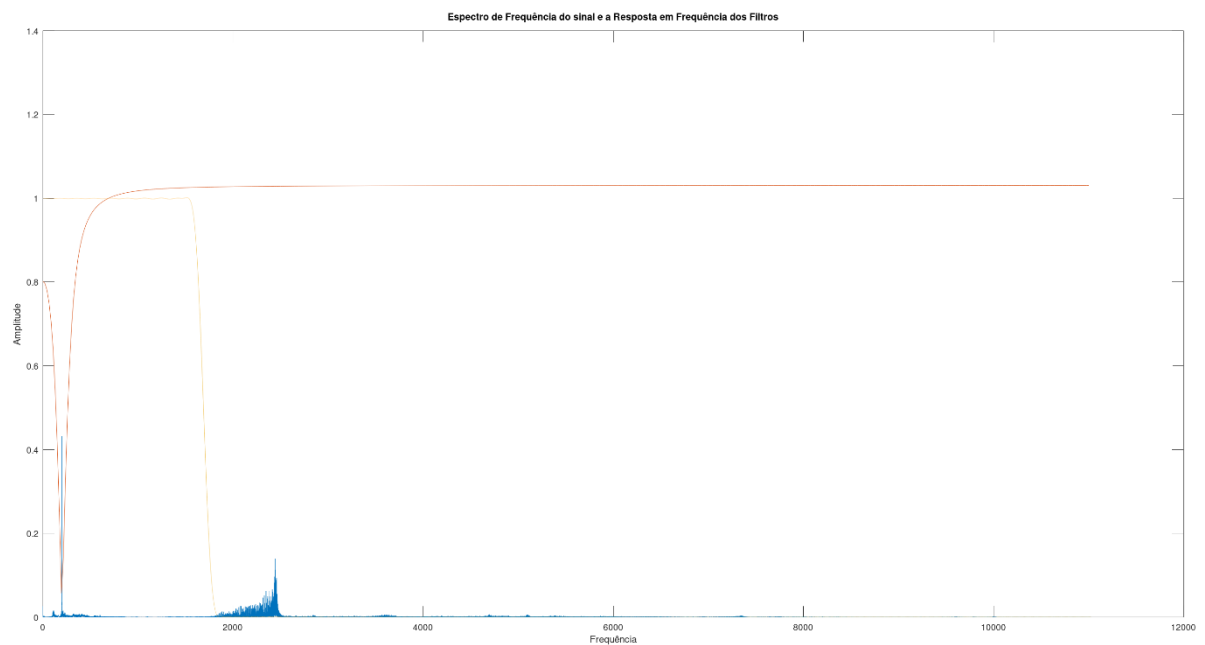


Figura 7: Espectro de frequência do sinal e a resposta em frequência dos filtros.

Na Figura 8 o espectro do sinal já se encontra filtrado. É possível observar que não existem mais frequências causadoras dos ruídos com ganhos altos nas frequências de 200Hz para o tom e acima de 1800Hz para a sirene.

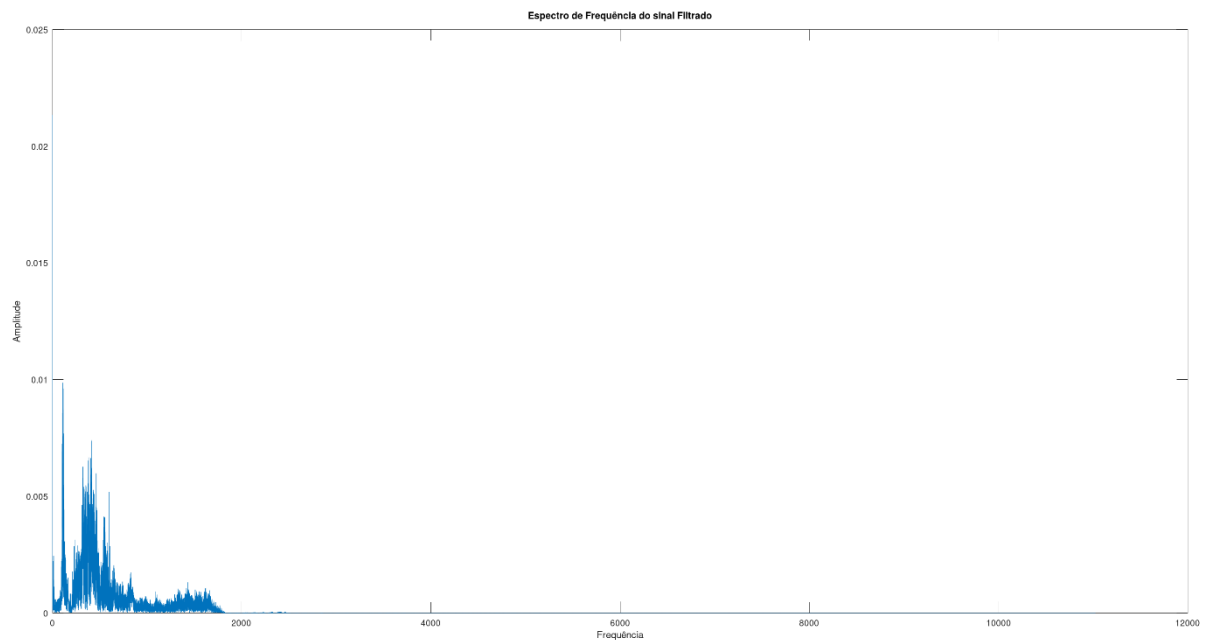


Figura 8: Espectro de frequência do sinal filtrado.

A Figura 9 mostra a resposta ao impulso do filtro Notch com frequência de corte de 200Hz e coeficiente de amortecimento 0.97.

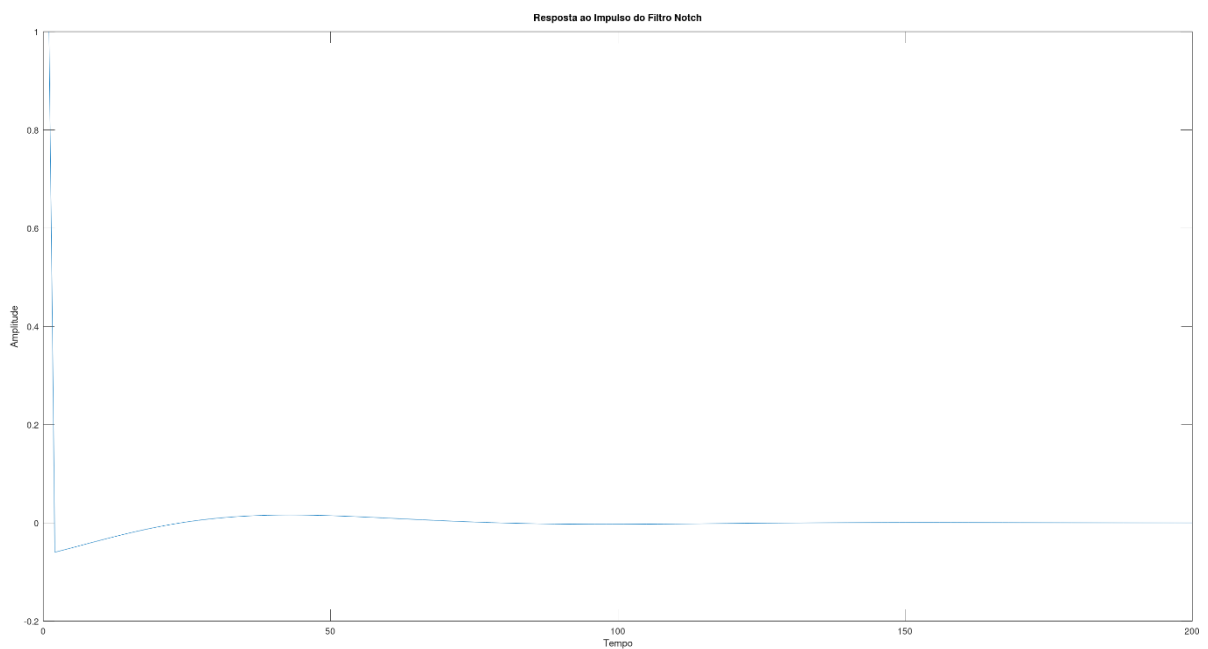


Figura 9: Resposta ao impulso do filtro Notch.

A Figura 10 mostra a resposta ao impulso do filtro fir1 passa-baixa de ordem 250 e frequência de corte de 1700Hz.

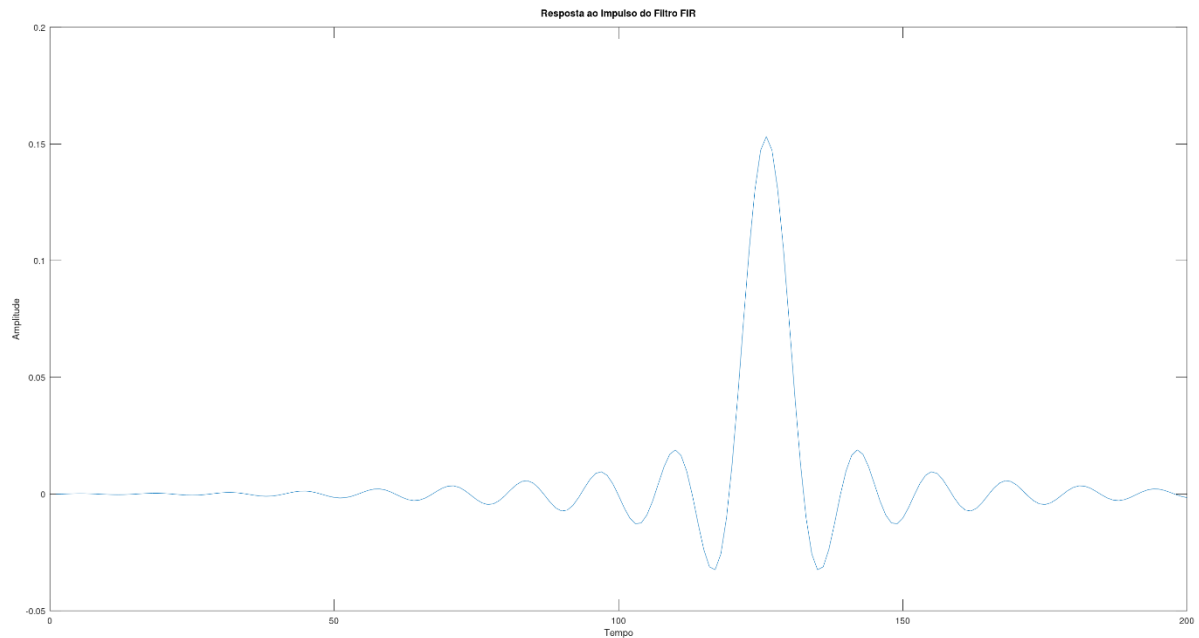


Figura 10: Resposta ao impulso do filtro fir1.

5. Conclusões

O desenvolvimento destes sistemas com filtros diferentes, pelo menos em parte, comprova a funcionalidade, a praticidade e a eficiência dos filtros digitais.

O filtro IIR conseguiu filtrar melhor o ruído, porém apresentou um som mais abafado. Já o som do filtro FIR ficou mais claro, contudo, é perceptível um nível de ruído maior que o do filtro IIR.

Os filtros IIR e FIR possuem características bem distintas, mesmo assim, ambos foram satisfatórios na filtragem dos ruídos presentes no áudio original, gerando inclusive, resultados bem semelhantes. Contudo, o filtro FIR necessitou de uma ordem extremamente alta se comparado ao filtro IIR, o que gera uma necessidade muito superior de capacidade de processamento.

6. Bibliografias

Haykin, Simon; Veen, Barry V. Sinais e Sistemas. Porto Alegre: Bookman, 2001.

Higuti, Ricardo Tokio. Filtros Digitais Tipo IIR. Feis.unesp.br. Disponível em: <
https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/ele1095_8c_filtrosiir.pdf>.
Acesso em: 23 de junho de 2023.

Filtros Digitais. Ece.ufrgs. Disponível em: <
<http://www.ece.ufrgs.br/~eng04006/aulas/aula24.pdf>>. Acesso em: 22 de junho de 2023.

Projeto de Filtro Digital. Edisciplinas.usp. Disponível em: <
https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5826204/mod_resource/content/1/APDS-Quarentena-aula6.pdf>. Acessado em: 23 de junho de 2023.

Silva, Marco Aurelio G. Filtros Digitais Aplicados em Sinais de Áudio. Gcg.ufjf.
Disponível em: <
https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5826204/mod_resource/content/1/APDS-Quarentena-aula6.pdf>. Acessado em: 21 de junho de 2023.

Sá, Marques. Processamento de Sinal. Web.fe.up.pt, 2003. Disponível em: <
<https://web.fe.up.pt/~jmsa/apsi/APSII-2.PDF>>. Acessado em: 21 de junho de 2023.

7. Anexos

Anexo A – Código Filtros IIR.pdf

Anexo B – audio_filtrado_IIR.wav

Anexo C – filtro_IIR.m

Anexo D – Código filtros FIR e IIR.pdf

Anexo E – audio_filtrado_IIR_FIR.wav

Anexo F - filtro_IIR_e_FIR.m