



ANÁLISE DE RESPOSTA PARA DIFERENTES FILTROS DIGITAIS APLICADOS EM UM MICROCONTROLADOR

RESPONSE ANALYSIS FOR DIFFERENT DIGITAL FILTERS APPLIED IN A MICROCONTROLLER

Danilo Mingotte¹

Rudson Lima²

RESUMO

Filtros são sistemas lineares invariantes no tempo, capazes de modificar as características dos sinais elétricos conectados na sua entrada, de modo que, apenas a parcela desejada dos componentes da frequência do sinal chegue à saída do filtro. Este trabalho se propôs a desenvolver um filtro digital para frequências audíveis com componentes de tecnologia amplamente acessível. Para isso, foi utilizado um microcontrolador da Microchip, um filtro digital do tipo FIR e a ferramenta *Filter Designer Tool* presente no compilador MikroC PRO for dsPIC para geração do circuito eletrônico base. Com o esquema elétrico gerado pelo *Filter Design Tool*, foi utilizado o *software* Proteus 8 Professional V8.5 para a criação da Placa de Circuito Impresso (PCI). Com o filtro digital desenvolvido, foi possível abrir a tela de interface da ferramenta e determinar o tipo de filtro e suas características que foram testadas na aplicação, sendo eles um filtro passa-baixa; filtro passa-alta; filtro passa-faixa e filtro rejeita-faixa. Com o filtro passa-baixa, ocorreu uma atenuação nas componentes do sinal maiores que a frequência de rejeição, enquanto que com o passa-alta as frequências acima da frequência de corte não sofreram atenuação. Com os filtros passa-faixa e rejeita-faixa, as componentes do sinal que deveriam ter suas amplitudes atenuadas se mantiveram constantes. O circuito desenvolvido não apresentou funcionamento dentro do esperado, porém obteve um resultado satisfatório, indicando que ele pode ser uma excelente ferramenta para demonstração da teoria de filtros digitais em cursos que ministrem disciplinas que abrangem este tema.

Palavras-chave: Filtros Digitais. Microcontrolador. Atenuação. Frequência.

¹ Pós-graduado em Sistemas Eletrônicos para Controle pela Faculdade de Tecnologia SENAI "Anchieta". E-mail: danilo.mingotte@gmail.com

² Docente e Mestre em Engenharia Elétrica da Faculdade de Tecnologia SENAI "Anchieta". E-mail: rudson.silva@sp.senai.br



ABSTRACT

Filters are linear systems time invariant capable of modifying the characteristics of the connected signals at their input, so that only the desired portion of the signal frequency components reaches the output of the filter. This work aimed at the development of a digital filter for audible frequencies with widely available technology components. For this, it was used a Microchip microcontroller, a FIR digital filter and the Filter Designer Tool present in the MikroC PRO for dsPIC compiler for generate the base electronic circuit. With the electrical scheme generated by the Filter Design Tool, the Proteus 8 Professional V8.5 software was used to create the Printed Circuit Board (PCI). With the digital filter developed, it was possible to open the tool interface screen and determine the type of filter and its characteristics that were tested in the application, being a low-pass filter; high-pass filter; band-pass filter and a reject-band. With the low-pass filter, an attenuation occurred in the signal components with more than 3500Hz, whereas with the high pass the frequencies above the cut-off frequency (3000Hz) were not attenuated. With the band-pass and reject-band filters, the components of the signal that should have their attenuated amplitudes remained constant. The developed circuit did not perform as expected, but it obtained a satisfactory result, indicating that it can be an excellent tool to demonstrate the theory of digital filters in courses where teach subjects that cover this topic.

Keywords: Digital Filters. Microcontroller. Attenuation. Frequency.

1. INTRODUÇÃO

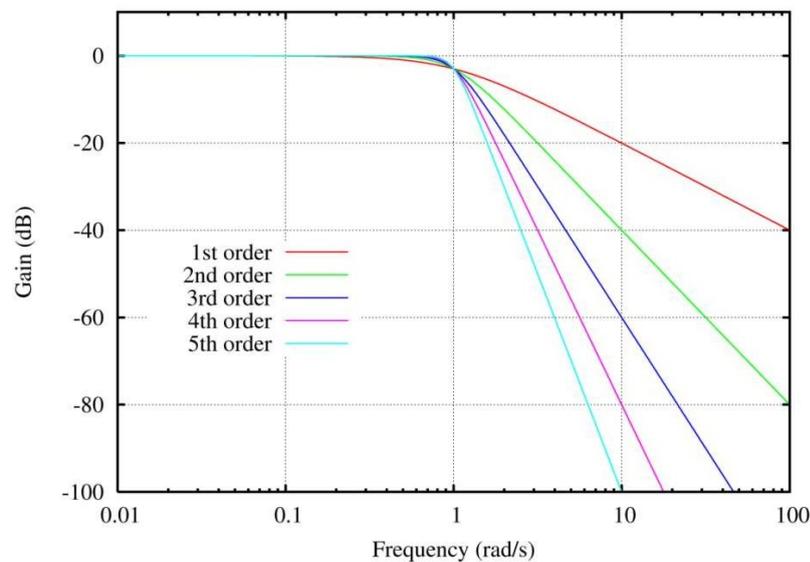
Constantemente, nos deparamos com sistemas nos quais ocorrem manipulações de sinais, sejam eles de natureza analógica ou digital. Podemos encontrar esse fenômeno em muitos equipamentos do nosso dia a dia como em equipamentos médicos, linha branca, smartphones, rádios, etc., utilizando-se disso para, por exemplo, monitorar curvas do batimento cardíaco, sintonizar canais na televisão, eliminar ruídos numa ligação, reforçar graves num sistema de áudio, entre muitas outras aplicações (HIGUTI e KITANO, 2003).

Quando se tem a necessidade de modificar um sinal conhecido no domínio da frequência, como nos exemplos acima citados, utiliza-se um filtro. Filtros são sistemas lineares invariantes no tempo capazes de modificar as características dos sinais conectados em sua entrada, de modo que, apenas a parcela desejada dos componentes da frequência do sinal chegue à saída do filtro (CIRINO, 2007).

Os filtros podem ser classificados como analógicos passivos ou ativos e digitais, dependendo dos tipos de componentes que são aplicados a eles. Estes componentes eletrônicos digitais ou analógicos têm como objetivo comum realizar a seleção ou rejeição de faixas de frequência num sinal. Para que se obtenha o sinal desejado, estão disponíveis quatro modos de filtros que podem ser aplicados de acordo com a necessidade do projeto. São eles: Filtro Passa-Baixa (FPB), Filtro Passa-Alta (FPA), Filtro Passa-Faixa (FPF) e Filtro Rejeita-Faixa (FRF). A eficiência da atenuação do sinal tanto para a seleção ou rejeição realizada pelo filtro dependerá do tipo de topologia a ser utilizada e o respectivo grau de ordem do filtro.

Na Figura 1, está exemplificado como é o nível de atenuação para as diferentes ordens de filtros, em relação ao Ganho (dB) pela frequência (rad/s), sendo que, quanto maior for a ordem do filtro, maior será a sua eficiência em eliminar a frequência anteriormente sintonizada na faixa de rejeição ou seleção do filtro projetado.

Figura 1 – Gráfico com curvas características representando a atenuação para diferentes ordens de filtros.

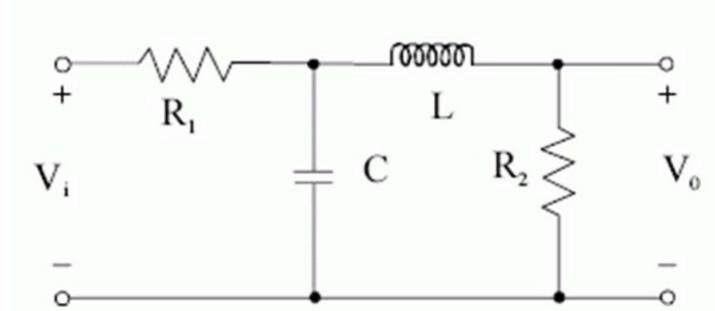


FONTE: Omegatron (2005)

1.1. Filtros Analógicos Passivos

Circuitos formados apenas por componentes analógicos passivos. Resistores, capacitores e indutores são alguns exemplos dos componentes mais utilizados nesse tipo de arquitetura. Na Figura 2, temos o exemplo de um filtro analógico passivo, na qual o sinal de entrada (V_i) sofre a atenuação desejada pelo filtro projetado e o sinal de saída (V_o) é disponibilizado na saída do circuito.

Figura 2 – Esquema elétrico de um filtro com componentes analógicos passivos



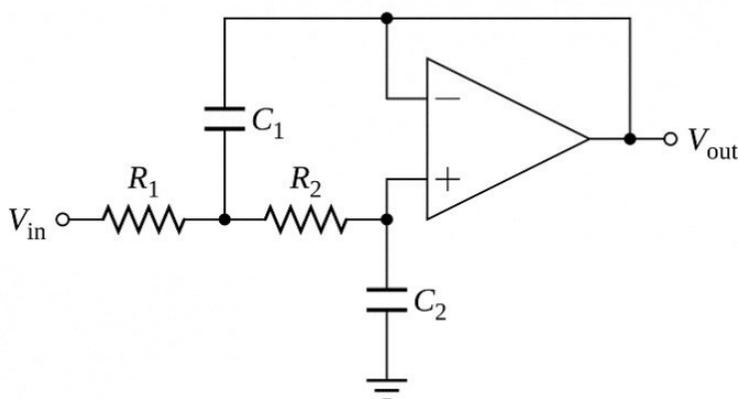
FONTE: Deckmann (2007)

Esta topologia de filtro possui a dificuldade de atender aplicações que exijam uma ordem de atenuação alta, visto que o grau da ordem da topologia está diretamente ligado ao número de estágio que o circuito terá, deixando o circuito cada vez maior e sujeito a interferências, variações com a temperatura, tolerância dos componentes, etc., no entanto, para aplicações simples, ele pode se fazer útil pela simplicidade do desenvolvimento e por possuir componentes amplamente acessíveis.

1.2. Filtros Analógicos Ativos

Nos circuitos dos filtros analógicos ativos, encontramos componentes com características ativas, ou seja, componentes que necessitam de uma fonte externa de alimentação para funcionarem. Muito usado nessas aplicações, existem os amplificadores operacionais (AOP) que, com sua versatilidade, são muito úteis não só para circuitos para filtrar, mas também podem ser utilizados para somar componentes DC ao sinal a fim de deslocar sua onda, amplificar um sinal que tenha amplitude possivelmente baixa para aplicação, entre outras. Um exemplo do circuito está demonstrado na Figura 3.

Figura 3 – Esquema elétrico de um filtro com componentes analógicos passivos e ativos.



FONTE: Deckmann (2007)



Com sua topologia mais versátil, é possível atingir ordens de atenuação maiores se comparada à topologia dos filtros analógicos passivos. Com um bom custo benefício, os filtros analógicos ativos são uma boa opção para uma grande parte dos projetos, nos quais, principalmente, não é necessário ter uma variação na janela de atenuação do filtro, ou seja, não existe a necessidade de variar o sinal atenuado no domínio da frequência.

1.3. Filtros Digitais

Com a maior versatilidade entre os tipos de filtros, temos os filtros digitais, nos quais o componente principal, na maioria dos casos, é um microcontrolador com a capacidade de processar sinais digitais. O sinal de entrada (V_i), antes de ser processado, passa pela fase de conversão de analógico para digital (ADC) para que, assim, o microprocessador possa processar o sinal através de cálculos matemáticos, levando em consideração os coeficientes e o grau de ordem do filtro pré-estipulados. Após processado, o sinal é disponibilizado para a etapa de conversão de sinal digital para analógico (DAC), podendo, então, ser reproduzido novamente no meio, entretanto, agora, só com as componentes do sinal desejadas (HIGUTI e KITANO, 2003).

A topologia dos filtros digitais é criada em forma de programação em vários tipos de linguagem. Com isso, se torna fácil simular e modificar a ordem e os coeficientes do filtro alterando apenas o programa. Se comparada às topologias dos filtros analógicos, o filtro digital pode atingir altos níveis de ordem de atenuação, mudando apenas algumas linhas do programa. Um diagrama de blocos genérico de um circuito de filtro digital é mostrado na Figura 4.

Figura 4 – Diagrama de blocos com as etapas de um circuito eletrônico de um filtro digital



FONTE: UFRGS (2006)

A ordem de um filtro digital é o número de contribuições previamente armazenadas na memória do microcontrolador utilizadas para calcular a próxima componente (CIRINO, 2007). Com isso, os filtros digitais podem ser escritos das seguintes maneiras:



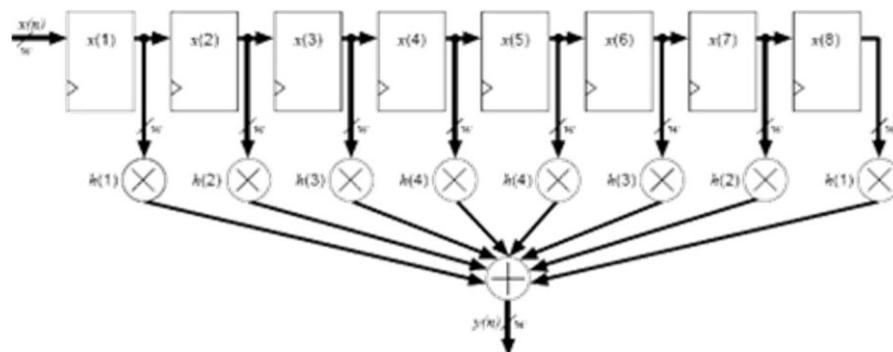
- Zero – ordem: $y_n = a_0 X_n$
- Primeira – ordem: $y_n = a_0 X_n + a_1 X_{n-1}$
- Segunda – ordem: $y_n = a_0 X_n + a_1 X_{n-1} + a_2 X_{n-2}$

Os filtros digitais podem ser subdivididos em filtros com Resposta ao Impulso Finita (FIR) e com Resposta ao Impulso Infinita (IIR). A escolha de qual tipo de filtro utilizar dependerá da sua aplicação específica.

1.3.1. Filtros com Resposta ao Impulso Finita (FIR)

Os filtros do tipo FIR (Resposta ao Impulso Finita) apresentam uma resposta linear de fase, o que faz com que eles sejam eficientes para aplicações onde sejam necessárias pequenas distorções de fase ou quando o número de coeficientes não for grande, como em aplicações de processamento digital de áudio, imagem, vídeo, biometria, etc. Um diagrama de blocos genérico de uma topologia de filtros FIR é mostrado na Figura 5.

Figura 5 – Unidades de multiplicação e acumuladores de um filtro digital com topologia do tipo FIR

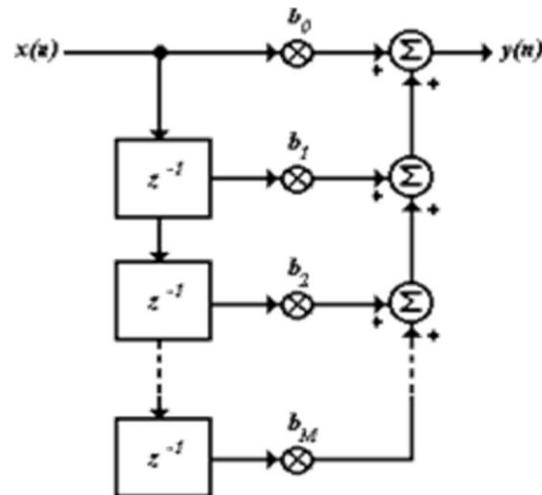


FONTE: UFRGS (2006)

1.3.2. Filtros com Resposta ao Impulso Infinita (IIR)

Os filtros do tipo IIR (Resposta ao Impulso Infinita) possuem a característica de uma atenuação bem seletiva no domínio da frequência. Podem ser usados facilmente para a conversão de filtros analógicos pelo fato de, geralmente, precisarem de menos coeficientes (CARRO, 2001). Um diagrama de blocos genérico de uma topologia de filtros IIR é mostrado na Figura 6.

Figura 6 – Unidades de multiplicação e acumuladores de um filtro digital com topologia do tipo IIR



FONTE: UFRGS (2006)

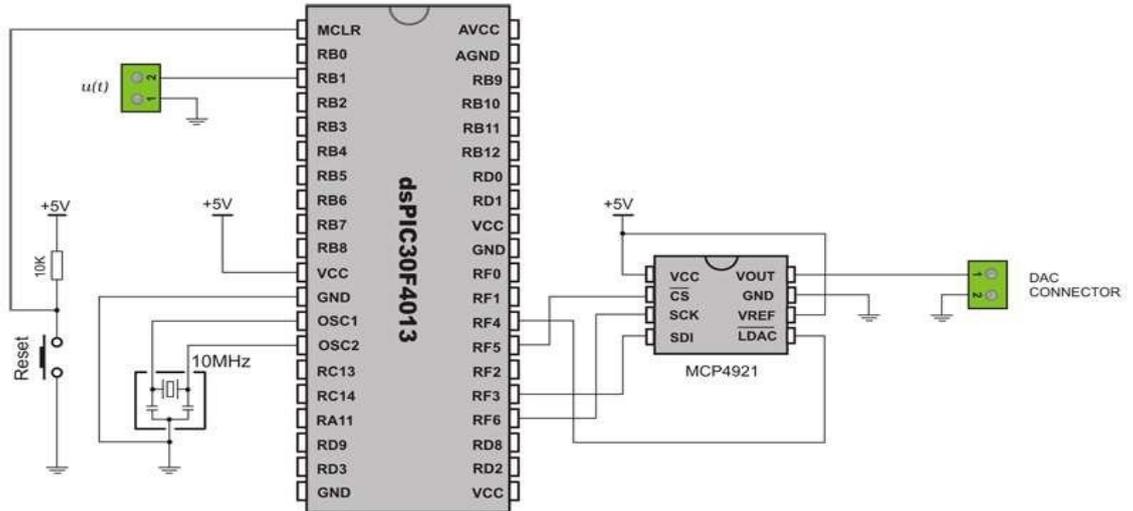
Assim sendo, este trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de um filtro digital para frequências audíveis com componentes de tecnologia amplamente acessível.

2. DESENVOLVIMENTO

Para o desenvolvimento deste trabalho, foi utilizado o microcontrolador da Microchip dsPIC30F4013 de 16bits. Os microcontroladores com as iniciais *ds* são da linha DSP (Digital Signal Processor) específicos para aplicações que exigem processamento digital de sinal. Após a escolha do microcontrolador, foi selecionado o filtro digital do tipo FIR e utilizada a ferramenta *Filter Designer Tool* presente no compilador MikroC PRO for dsPIC, a qual possui, entre outras, a finalidade de auxiliar a geração do circuito eletrônico e do código fonte para a aplicação proposta. A Figura 7 representa o circuito eletrônico base utilizado no projeto. Com o esquema elétrico gerado pelo *Filter Design Tool*, foi utilizado o *software* Proteus 8 Professional V8.5 para a criação da Placa de Circuito Impresso (PCI). Foi desenvolvido, então, um circuito específico para a aplicação, mostrado na Figura 8, no qual foi acrescentado o conector para estabelecer comunicação com a placa, o circuito para gerar uma fonte simétrica e o circuito para *offset* dos sinais de entrada do microcontrolador e saída do DAC. O DAC utilizado foi o MCP4921 também da Microchip. A comunicação entre o DAC e o microcontrolador se dá através da comunicação SPI de 20Mhz entre os pinos de controle dos dois componentes, com um *buffer* de troca de informação de 10bits.

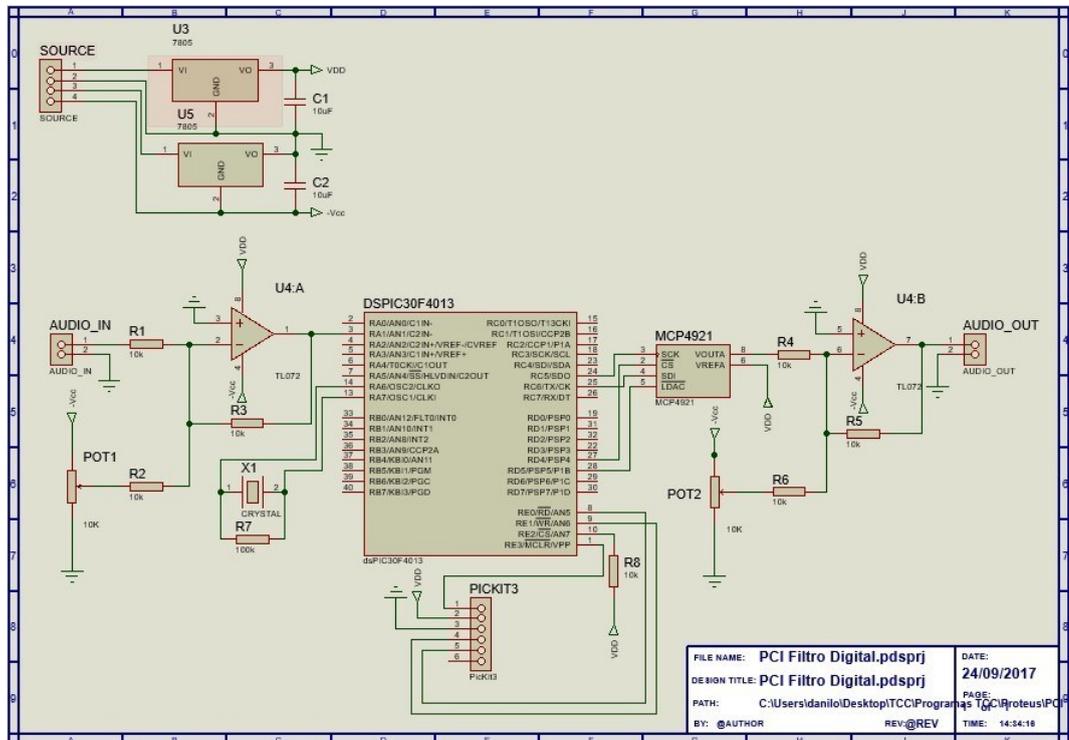


Figura 7 – Circuito eletrônico base utilizado para desenvolvimento do projeto.



FONTE: Autoria própria

Figura 8 – Circuito eletrônico final desenvolvido para o projeto.



FONTE: Autoria própria

Com o filtro digital desenvolvido, representado na Figura 9, foi possível abrir a tela de interface da ferramenta e determinar o tipo de filtro e suas características que foram testadas na aplicação. Após determinado os parâmetros do filtro desejado, a ferramenta disponibilizou o código-fonte para que o mesmo fosse descarregado no micro controlador. Com o código pronto, o mesmo foi compilado e gerado o arquivo com extensão *.hex* do programa escrito. Para realizar a gravação do código no microcontrolador, foi utilizado o *software MPLAB IPE v3.55* da Microchip e o gravador *PICKIT 3*.

Figura 9 – Imagem do circuito desenvolvido para simulação de filtros digitais.



FONTE: Autoria própria

Com o circuito eletrônico em pleno funcionamento, para criar filtros de diferentes faixas de atenuação, foi necessária a alteração de algumas linhas do programa correspondentes a ordem e aos valores dos coeficientes, demonstrado na Figura 10.

Figura 10 – Linhas do programa que demonstram a ordem e o número de coeficientes do filtro previamente projetado.

```
const unsigned BUFFER_SIZE = 32;
const unsigned FILTER_ORDER = 30;

const unsigned COEFF_B[FILTER_ORDER+1] = {
    0xFE8F, 0xFE8C, 0xFE8A, 0xFE88, 0xFE86, 0xFE84,
    0xFE82, 0xFE81, 0xFE7F, 0xFE7E, 0xFE7D, 0xFE7C,
    0xFE7C, 0xFE7B, 0xFE7B, 0x7E7B, 0xFE7B, 0xFE7B,
    0xFE7C, 0xFE7C, 0xFE7D, 0xFE7E, 0xFE7F, 0xFE81,
    0xFE82, 0xFE84, 0xFE86, 0xFE88, 0xFE8A, 0xFE8C,
    0xFE8F};
```

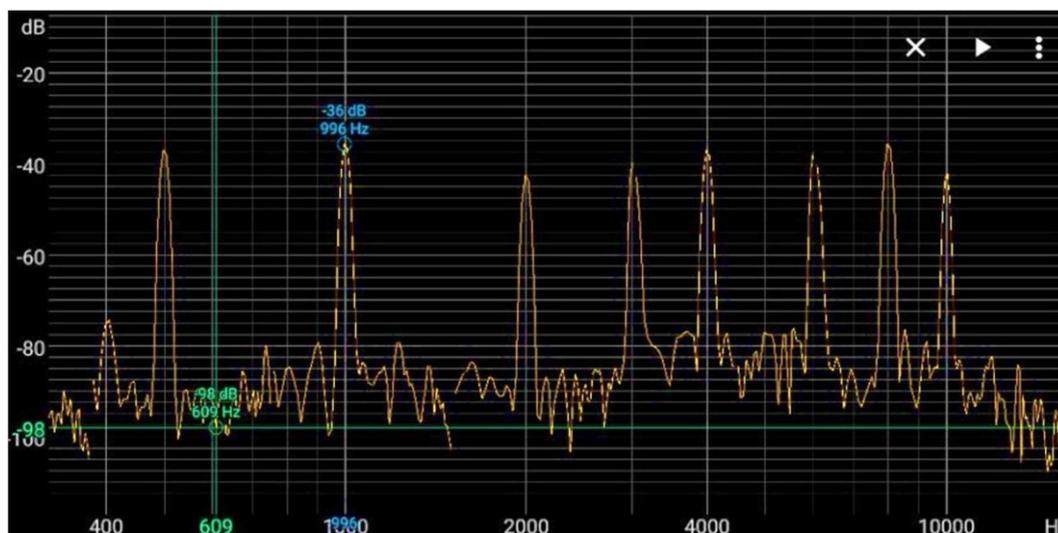
FONTE: Autoria própria

A fim de analisar a resposta do circuito de filtro digital projetado, foi criado um sinal multisenoidal com 8 componentes de frequência (500Hz + 1KHz + 2KHz + 3KHz + 4KHz + 6KHz + 8KHz + 10KHz) para ser aplicado nos filtros previamente desenvolvidos e utilizados no circuito. Para analisar a eficiência do comportamento dos filtros, foi utilizado o aplicativo de licença aberta Spectroid Versão 1.1.1. O sinal multisenoidal criado foi aplicado no circuito e captado na saída do autofalante de diferentes maneiras: sem a aplicação de nenhum filtro e com a aplicação de diferentes tipos de filtros, sendo eles um filtro passa-baixa de 3500Hz, com janela do tipo Kaiser e com uma ordem 27; filtro passa-alta de 3000Hz, com janela do tipo Kaiser e com uma ordem 40; filtro passa-faixa de 1000Hz a 8000Hz, com janela do tipo Kaiser e com uma ordem 40 e filtro rejeita-faixa de 1000Hz a 8000Hz, com janela do tipo Kaiser e com uma ordem 40.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para que se pudesse evidenciar o sinal multisenoidal base utilizado, o mesmo foi captado e ilustrado na Figura 11, sem a utilização de nenhum tipo de filtro. Isso foi necessário para se ter certeza de que o sinal não estava sofrendo atenuação por alguma outra razão desconhecida. Assim, foi constatado que o sinal multisenoidal não sofreu nenhum tipo de modificação preliminar.

Figura 11 – Sinal multisenoidal original criado com 8 componentes de frequência para ser aplicado nos filtros digitais previamente desenvolvidos.

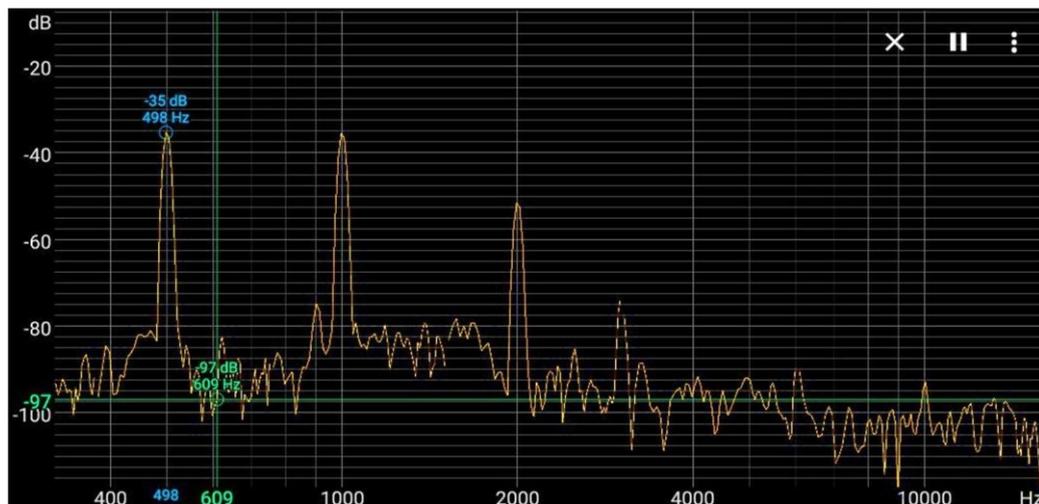


FONTE: Autoria própria

Posteriormente, foi aplicado ao sinal o filtro passa-baixa de 3500Hz, com janela do tipo Kaiser e com uma ordem 27 previamente projetado. A aplicação deste filtro gerou uma atenuação nos componentes do sinal com mais de 3500Hz, enquanto que as componentes abaixo desse valor não sofreram atenuação considerável. Frequências muito próximas a

frequência de corte não sofreram as atenuações desejadas por não se tratar de um filtro ideal (MULINARI, 2017). Na Figura 12, é mostrada a resposta em frequência capturada.

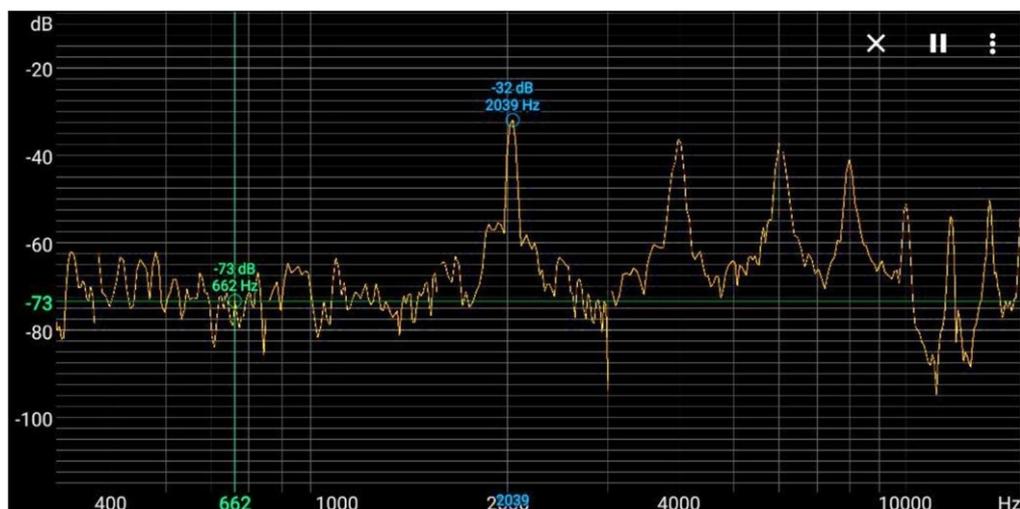
Figura 12 – Sinal filtrado através de um filtro passa-baixa de 3500hz.



FONTE: Autoria própria

Com a aplicação do filtro passa-alta de 3000Hz, com janela do tipo Kaiser e com uma ordem 40, as frequências abaixo da frequência de corte (3000Hz) sofreram atenuação, enquanto que as componentes acima da mesma não foram atenuadas. Entretanto, é possível notar que as últimas componentes do sinal multisenoidal sofreram algum tipo de distorção por motivos desconhecidos, como demonstrado na Figura 13.

Figura 13 – Sinal filtrado através de um filtro passa-alta de 3000hz.



FONTE: Autoria própria



Os dois primeiros filtros testados (passa-baixa e passa-alta) apresentaram resultados dentro do esperado para um filtro real com as limitações do projeto. Entretanto, os dois últimos filtros (passa-faixa e rejeita-faixa) não tiveram resultados satisfatórios, pois, as frequências que deveriam ter sido atenuadas se mantiveram em sua amplitude original proveniente do sinal multisenoidal. Uma das possíveis causas para tal resultado está na alta eficiência da seletividade das componentes do sinal que essas arquiteturas exigem. Da mesma maneira, uma alta seletividade na atenuação das componentes desejadas exige uma alta ordem do filtro que, por sua vez, exige um alto poder de processamento do microcontrolador (MULINARI, 2017).

A não eficiência dos dois últimos filtros testados pode apresentar outras justificativas não conhecidas, as quais poderiam ser elucidadas por meio de mais testes com outros tipos de janelas, arquiteturas e com diferentes níveis de ordem.

4. CONCLUSÃO

Os testes realizados encontraram dificuldades que tiveram que ser analisadas e superadas para que se obtivessem os resultados. A mais importante entre elas, pelo fato de impossibilitar o funcionamento do circuito, foi o erro na declaração dos pinos de controle do DAC, ou seja, a ligação do hardware não estava condizente com os pinos declarados no programa, o que fazia com que o sinal tratado não fosse corretamente enviado através da comunicação SPI. Este erro está no programa de exemplo que o Filter Design Tool gerou. Como o circuito não estava funcionando, foi revisado todo o programa e o hardware da aplicação. O erro só pode ser corrigido depois que foi feita a análise do data-sheet do microcontrolador ao cruzar as informações que estavam no programa, notando-se, assim, a declaração errônea.

O circuito desenvolvido não apresentou a seletividade desejada dentro do esperado para todos os filtros desenvolvidos, possivelmente pela capacidade de processamento do microcontrolador, visto que, para que filtros digitais apresentem uma boa seletividade, altos níveis de ordem são exigidos, o que acarreta em um alto poder de processamento. Outra razão para não eficiência de todos os filtros pode ser o tipo de filtro que foi usado ou até mesmo algum desarranjo no código do microcontrolador, sendo que uma melhoria no mesmo poderia apresentar melhores resultados.

Levando em consideração as possíveis causas citadas, testes com outros tipos de janelas, arquiteturas e números de coeficientes podem ser realizados com o objetivo de chegar a razões plausíveis do não funcionamento completo do circuito desenvolvido, os quais podem ser realizados por quem tenha interesse em dar continuidade neste trabalho.

Entretanto, o circuito evidenciou algumas das vantagens que possui comparado aos filtros analógicos, como por exemplo, a possibilidade de gerar novos coeficientes para o filtro, alterando a sua ordem e sua arquitetura, assim como a facilidade na aplicação de altos níveis de ordem, tarefa que, se realizada com filtros analógicos, demandaria, provavelmente, um circuito grande com um número considerável de componentes.

Ainda assim, o projeto obteve um resultado satisfatório, partindo do princípio que o circuito criado e testado pode ser uma excelente ferramenta com tecnologia acessível para demonstração da teoria de filtros digitais em cursos que ministrem disciplinas que abrangem este tema, além de ter possibilitado o desenvolvimento de novas habilidades em programação de microcontroladores e elaboração de hardware em sua plenitude.

REFERÊNCIAS

HIGUTI, Ricardo Tokio. Sinais e Sistemas. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Departamento de Engenharia Elétrica, 2003.

CIRINO, **Weverton dos Santos**. Filtro Digital: Estudo de Caso de Projeto e Implementação, 2007. Disponível em: <<http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialfiltrodig/default.asp>>. Acesso em: 07 jan. 2019.

CARRO, Luigi. Projeto e prototipação de sistemas digitais. 1 ed. Porto Alegre: Editora Universidade / UFRGS. 2001.

MULINARI, Bruna Machado. Filtros Digitais em Áudio. Pato Branco, UTFPR. 2017.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Faculdade de Tecnologia SENAI Anchieta pela estrutura e empenho oferecidos com a finalidade de garantir uma qualificação de excelência.

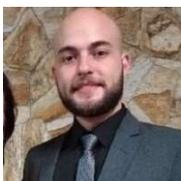
Ao coordenador de atividade técnicas Marcos Antônio Felizola e ao meu orientador Prof. Rudson Lima pela oportunidade de realizar esse trabalho.

Aos meus amigos e familiares que me acompanharam e incentivaram durante todo o período de Pós-graduação.

E, por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

Sobre os autores:

Danilo Mingotte¹



O autor Danilo Mingotte concluiu o curso de Engenharia Eletrônica em 2015 pela Universidade Padre Anchieta, com posterior conclusão no curso de Especialização em Sistemas Eletrônicos para Controle pela Faculdade de Tecnologia SENAI Anchieta em 2019. Em seu currículo lattes, os termos mais frequentes na contextualização da produção científica, tecnológica e artístico-cultural são: Eletrônica, processamento, PLC, redes industriais, automação industrial. É Engenheiro Eletrônico de Automação na empresa Joyson Safety Systems, responsável pelo desenvolvimento de projetos elétricos e programação de linhas de produção.

Rudson de Lima Silva (Orientador)²



Mestre em Engenharia Elétrica pela Faculdade de Engenharia Industrial –FEI de São Bernardo do Campo (2012), é Pós-graduado Lato Sensu com especialização em Docência para Educação Profissional pela Universidade Metodista de Piracicaba (2003) e graduado em Engenharia Elétrica pela Faculdade de Engenharia Industrial –FEI de São Bernardo do Campo (1993). Atualmente é professor da Faculdade de Tecnologia Senai “Anchieta” lecionando disciplinas nos cursos de graduação e pós-graduação. É Gerente de Manutenção e Infraestrutura no Hospital Beneficência Portuguesa de São Paulo e possui longa e sólida experiência na área de *Facilities* e Manutenção Hospitalar.