

Problema 3: Filtragem de um Sinal de Voz

1st Allan Capistrano de Santana Santos
Universidade Estadual de Feira de Santana
Feira de Santana - BA, Brasil
asantos@ecomp.uefs.br

2nd Daniel Fernandes Campos
Universidade Estadual de Feira de Santana
Feira de Santana - BA, Brasil
dfc152@gmail.com

3rd João Erick Barbosa Teixeira da Silva
Universidade Estadual de Feira de Santana
Feira de Santana - BA, Brasil
jsilva@ecomp.uefs.br

4th João Pedro Rios Carvalho
Universidade Estadual de Feira de Santana
Feira de Santana - BA, Brasil
jprcarvalho1@gmail.com

Resumo—Este relatório descreve o processo de filtragem de um sinal de voz gravado digitalmente, lidando com todo o projeto de um filtro necessário para eliminar ruídos característicos presentes numa ligação, causados pelo grande aumento de uso constante da rede.

Index Terms—filtro digital, sinal de voz, janelamento, ruídos

I. INTRODUÇÃO

O mundo atual, marcado pela globalização e pelos avanços tecnológicos, destaca um aumento considerável no número de celulares em circulação. Essa ampliação da telefonia móvel, juntamente com a falta de projetos detalhados no campo das telecomunicações, resultou em uma elevação na taxa de ligações com presença de ruído.

Dessa forma, torna-se imprescindível o desenvolvimento de soluções eficazes que possam melhorar a qualidade das ligações telefônicas, proporcionando uma experiência mais clara e agradável para os usuários.

No presente problema, o diretor da ANATEL solicitou o desenvolvimento de uma solução capaz de eliminar o ruído do sinal de áudio das ligações telefônicas. A solução deve ser de baixo custo e adequar-se aos recursos limitados de *hardware* existentes nos sistemas atuais, evitando operações que requerem grande quantidade de memória e excesso de operações matemáticas.

Este relatório apresentará as etapas de leitura do arquivo de áudio e o processamento digital do sinal através do projeto de filtros de resposta ao impulso finita (FIR) pelo método de janelamento, apresentando as diferenças qualitativas do sinal filtrado, assim como a complexidade que cada aproximação demanda para ser implementado em *hardware*. Os resultados que serão demonstrados do sinal filtrado, garantem o sucesso no que diz respeito a eliminação da presença do ruído.

Ao final deste relatório, espera-se fornecer uma visão geral sobre a solução proposta, destacando benefícios, limitações e impactos esperados na área das telecomunicações.

II. DESENVOLVIMENTO

Esta seção tem como objetivo apresentar o desenvolvimento matemático do filtro FIR projetado. Aqui, serão abordados os principais conceitos e equações utilizados na implementação

do filtro, bem como os parâmetros que influenciam o seu desempenho.

A. Filtro FIR

O filtro FIR opera em sinais digitais e é caracterizado por ter uma resposta ao impulso com duração finita. Com isso, ele é próprio para sistemas de memória limitada, BIBO (*Bounded Input - Bounded Output*) estáveis e com resposta desejada de fase linear. Sua função de transferência é definida por:

$$H(z) = \sum_{n=0}^M b_n \cdot z^{-n}$$

B. Filtragem

A filtragem consiste em processo que envolve a aplicação de uma operação sobre um sinal de entrada, com o objetivo de remover elementos indesejados, como ruídos, deixando apenas a informação desejada. Dessa forma, é possível obter um sinal mais limpo e preciso.

Como pode ser observado na Fig. 1, ao passar o sinal de entrada $x[n]$ pelo sistema $h[n]$, obtém-se o sinal filtrado $y[n]$. Essa operação pode ser representada no domínio de n como uma convolução [1]:

$$y[n] = x[n] * h[n]$$
$$y[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h[k] \cdot x[n - k]$$

Aplicando a Transformada de Tempo Discreto de Fourier, obtém-se:

$$Y(e^{j\Omega}) = X(e^{j\Omega}) \cdot H(e^{j\Omega})$$

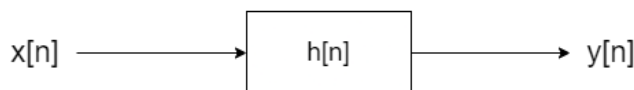


Figura 1. Diagrama de filtragem.

1) *Projeto de Filtro FIR por janelamento*: O método de janelamento é o mais simples para o projeto de filtros do tipo FIR. Esse método utiliza a resposta em frequência de um filtro ideal [1]. Essa resposta pode ser representada como:

$$D(e^{j\Omega}) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} d[n] \cdot e^{-j\Omega n}$$

E o filtro no domínio de tempo discreto é obtido pela Transformada Inversa de Fourier de Tempo Discreto, como:

$$d[n] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} D(e^{j\Omega}) e^{j\Omega n} d\Omega$$

$D(e^{j\Omega})$ é um filtro passa-baixa retangular com amplitude igual a 1 e limitado pela frequência de corte Ω_c , como pode ser visto abaixo:

$$D(e^{j\Omega}) = \begin{cases} 1, & |\Omega| \leq \Omega_c \\ 0, & \Omega_c \leq |\Omega| \leq \pi \end{cases}$$

Então, $d[n]$ será:

$$\begin{aligned} d[n] &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} D(e^{j\Omega}) e^{j\Omega n} d\Omega \\ d[n] &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\Omega_c}^{\Omega_c} 1 \cdot e^{j\Omega n} d\Omega \\ d[n] &= \frac{1}{2\pi j n} [e^{j\Omega_c n} - e^{-j\Omega_c n}] \\ d[n] &= \frac{\text{sen}(\Omega_c n)}{\pi n}, -\infty \leq n \leq \infty \end{aligned}$$

Para efeito de implementação em *hardware*, é necessário truncar a função $d[n]$, dado que a mesma apresenta duração infinita e funções dessa natureza não podem ser implementadas em meio digital [2]. O truncamento resultará em um filtro aproximado, com características distintas do filtro original.

Além disso, como filtros FIR são filtros causais, o que significa que só levam em consideração um número finito de amostras anteriores do sinal de entrada para calcular o valor do sinal de saída atual, é necessário realizar um deslocamento para que $d[n]$ tenha valores apenas a partir de $n = 0$, por conta disso:

$$\begin{aligned} h_d[n] &= d[n - \frac{M}{2}] \\ h_d[n] &= \frac{\text{sen}((n - \frac{M}{2}) \cdot \Omega_{cN})}{\pi(n - \frac{M}{2})} \end{aligned}$$

Em que M é a quantidade de coeficientes do filtro e Ω_{cN} é a frequência de corte normalizada, o cálculo de ambos serão demonstrados no próximo tópico.

Dessa forma, para resolver o problema de truncamento, a função $h_d[n]$ é limitada a partir de uma janela $w[n]$. Esse processo pode ser expresso analiticamente como:

$$\begin{aligned} h[n] &= h_d[n] \cdot w[n] \\ \mathcal{DTFT}\{h[n]\} &= \mathcal{DTFT}\{h_d[n] \cdot w[n]\} \\ H(e^{j\Omega}) &= H_d(e^{j\Omega}) * W(e^{j\Omega}) \end{aligned}$$

Então, $H(e^{j\Omega})$ representa um filtro passa-baixa aproximado no domínio da frequência.

O ideal seria que a função $h_d[n]$ fosse truncada por uma janela retangular expressa como:

$$w[n] = \begin{cases} 1, & 0 \leq n \leq M-1 \\ 0, & \text{c.c.} \end{cases}$$

Entretanto, como não é possível obter essa função na prática, é utilizada uma janela previamente calculada. Dentre

elas, as mais comuns são: *Hamming*, *Hanning*, *Bartlett*, *Blackman*. Para este trabalho, foi escolhida a janela de *Hamming*, devido a sua atenuação característica de 53 dB ser o suficiente para um bom resultado na filtragem do áudio ruidoso.

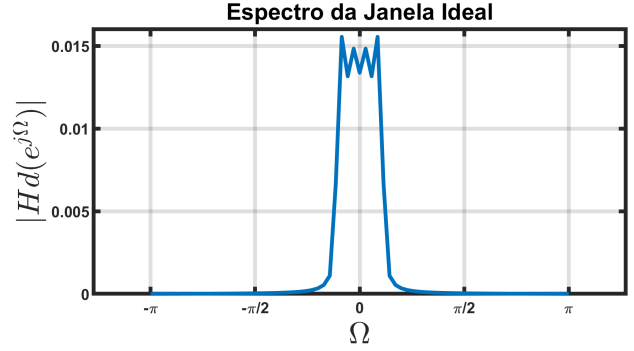


Figura 2. Espectro da função $h_d[n]$.

2) *Janela de Hamming*: A janela de *Hamming* é definida como:

$$w[n] = \begin{cases} 0,54 - 0,46 \cdot \cos(\frac{2\pi n}{M-1}); & 0 \leq n \leq M-1 \\ 0; & \text{c.c.} \end{cases}$$

Após definida a janela que será utilizada, pode-se começar o projeto do filtro. Foi identificado, a partir do espectrograma presente na Fig. 3 e do espectro do sinal de entrada (Fig. 5), que a informação do áudio está entre as frequências 0 e 4000 Hz. Com isso, definiu-se as seguintes configurações:

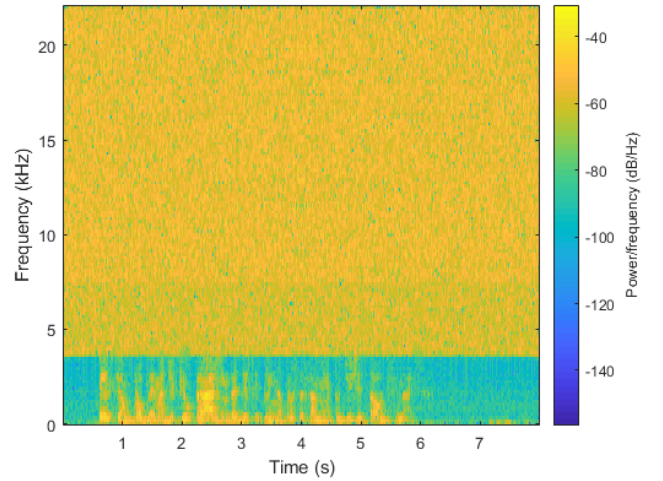


Figura 3. Espectrograma do sinal de entrada.

- Frequência de passagem: $f_p = 2600\text{Hz}$
- Frequência de rejeição: $f_r = 4000\text{Hz}$
- Frequência de amostragem: $F_s = 44100\text{Hz}$
- Faixa de transição: $f_t = f_r - f_p \Rightarrow f_t = 1400\text{Hz}$
- Frequência de corte: $f_c = \frac{f_r + f_p}{2} \Rightarrow f_c = 3300\text{Hz}$

O fator de normalização (F_N) pode variar de acordo com o projeto, dependendo das características do sistema em questão.

Por conta disso, para o filtro passa-baixa FIR desenvolvido, após uma série de testes e avaliações, definiu-se que F_N seria igual a 1,5 em vez do valor convencional de $F_N = 2$. Esse valor de $F_N = 1,5$ foi escolhido porque atendeu aos requisitos propostos e proporcionou os melhores resultados, no que se refere a minimização do ruído presente no sinal original.

Dessa forma, as frequências normalizadas foram calculadas da seguinte maneira:

$$\Omega_{tN} = F_N \cdot \pi \cdot \frac{f_t}{F_s} \Rightarrow \Omega_{tN} \cong 0.1496 \text{ rad}$$

$$\Omega_{cN} = F_N \cdot \pi \cdot \frac{f_c}{F_s} \Rightarrow \Omega_{cN} \cong 0.3526 \text{ rad}$$

Com a frequência de corte normalizada calculada, é possível então encontrar a quantidade de coeficientes e a ordem do filtro (N):

$$M = \frac{8\pi}{\Omega_{cN}} \Rightarrow M = 71,2783 \Rightarrow M \cong 71$$

$$N = M - 1 \Rightarrow N = 71 - 1 \Rightarrow N = 70$$

III. DISCUSSÕES E RESULTADOS

Nesta seção, serão discutidos os resultados obtidos pela filtragem através do *MATLAB*, na versão *R2019a*.

A partir do código desenvolvido nesse *software*, foi possível obter resultados importantes para a análise e, posteriormente, a eliminação do ruído do sinal recebido. Para tal, a Fig 4 mostra os resultados da análise no domínio de n do sinal original e filtrado. É cabível notar que o sinal filtrado possui menos variações no que diz respeito aos valores das amplitudes, o que indica a redução do ruído que antes era presente.

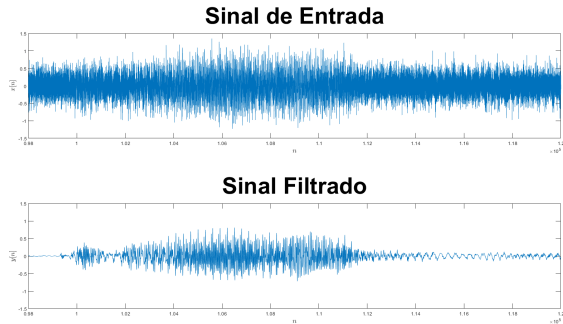


Figura 4. Comparativos de sinal no tempo, original em cima e filtrado abaixo.

A Fig. 5 apresenta o comparativo da análise em frequência do sinal original e filtrado, onde o espectro do sinal original apresenta componentes de altas frequências, ou seja, um indicativo das regiões em que o ruído encontra-se presente, pois estas faixas de frequência não incorporam a voz humana que representam frequências de até 3kHz a 4kHz [1]. Então, a partir da aplicação do filtro passa-baixa projetado e discutido na seção anterior, as componentes mencionadas foram eliminadas como forma de tornar sinal menos ruidoso.

Como dito na seção anterior, o filtro passa-baixa é obtido após a convolução do espectro da janela de *Hamming* $W(e^{j\Omega})$ com o filtro ideal $H_d(e^{j\Omega})$. Contudo, Para a implementação em um DSP (*Digital Signal Processing*), os valores do coeficientes

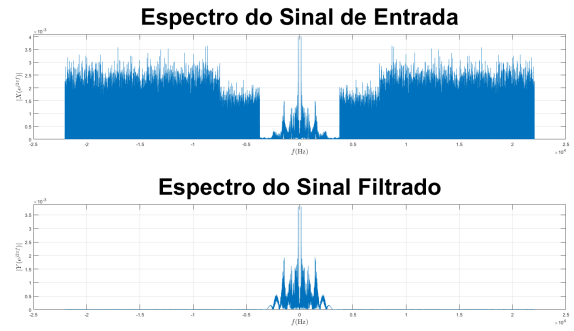


Figura 5. Comparativos do espectro dos sinais, original em cima e filtrado abaixo.

de um filtro devem ser valores inteiros, por conta disso, é realizada uma multiplicação dos coeficientes do filtro pelo número de *bits*, e depois uma aproximação para valores inteiros. Isso pode ser visto na Fig. 6, em que a linha em azul é a janela de *Hamming* após a multiplicação e a linha tracejada em vermelho é a aproximação utilizando 8 *bits*. Este filtro pode ser visto na Fig. 7, no qual é possível observar que o mesmo apresenta uma semelhança com um filtro passa-baixa ideal, porém o filtro aproximado possui mudanças mais abruptas nas bordas pelo efeito de *Gibbs* [1].

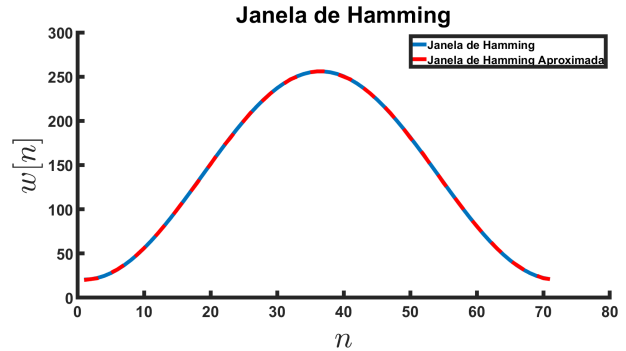


Figura 6. Janela de *Hamming* aproximada.

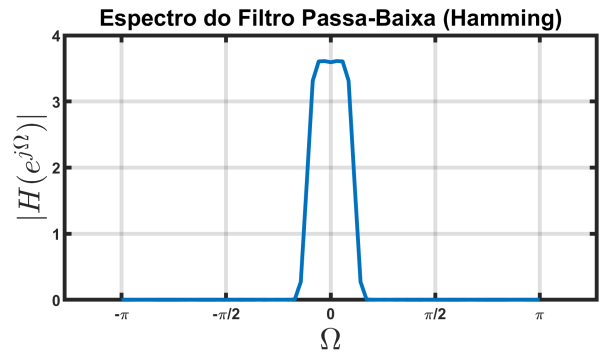


Figura 7. Filtro passa-baixa gerado pelo janelamento.

A resposta da magnitude do espectro do filtro em dB pode

ser visto na Fig. 8, na qual é perceptível uma atenuação de 53dB para a banda de rejeição em relação a banda de passagem, como esperado para um projeto de filtro com janela de *Hamming*. A partir disso, é possível analisar que quanto maior a atenuação em dB, menor será a potência do sinal. Com essa atenuação, o sinal de áudio será mais baixo nas altas frequências em termos de intensidade sonora e exigirá um esforço maior para ser ouvido.

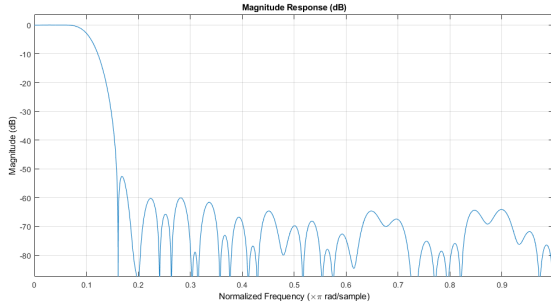


Figura 8. Magnitude do espectro do filtro.

A. Métodos usados para comparação

Para fins de comparação, foram utilizadas outras funções de janelamento, como a janela de *Blackman* (Fig. 9), *Hanning* (Fig. 10), *Bartlett* (Fig. 11), com o objetivo de avaliar o desempenho do filtro em relação a outras janelas disponíveis. Dessa forma, foi possível obter uma comparação mais abrangente e identificar qual janela proporciona os melhores resultados para o sistema em questão. Serão apresentados a seguir os resultados obtidos para cada janela avaliada.

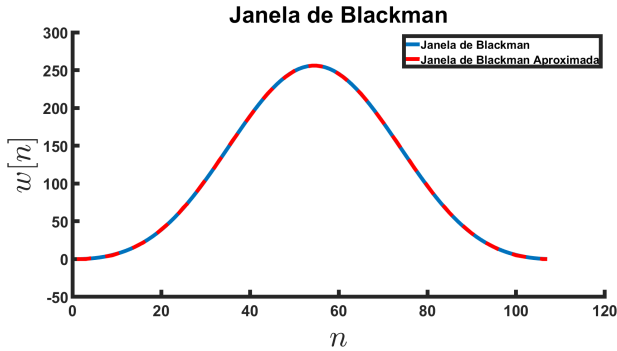


Figura 9. Janela de *Blackman* aproximada.

Após o processo de janelamento foram obtidos os respectivos espectros dos filtros.

Na Fig. 12, tem-se o espectro do filtro gerado pelo janelamento de *Blackman*, o qual tem contorno similar ao visto em *Hamming* (Fig. 7) porém com as bordas menos acentuadas e amplitude menor.

Já na Fig. 13, é encontrado o espectro do filtro gerado pelo janelamento de *Hanning* sendo vista uma maior diferença nas extremidades da banda passante, porém possui uma amplitude similar ao visto em *Hamming*.

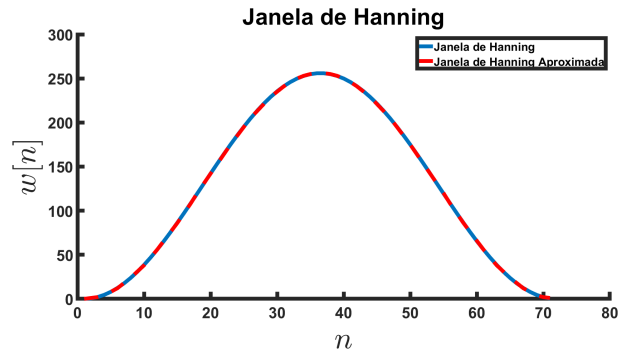


Figura 10. Janela de *Hanning* aproximada.

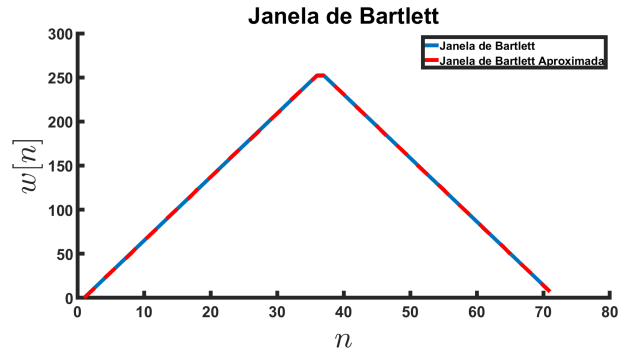


Figura 11. Janela de *Bartlett* aproximada.

Na Fig. 14, é exibido o espectro do filtro gerado pelo janelamento de *Bartlett*, apresentando uma curva mais suave na borda de passagem e com amplitude inferior ao de *Hamming*.

Como forma de comparar o resultado da filtragem, tem-se as Figuras 15 e 16 nas quais há o espectro do sinal filtrado pelos respectivos métodos. De forma geral, os espectros possuem diferenças sutis, a mudança mais expressiva se mostra na amplitude no janelamento de *Blackman*.

Na implementação desenvolvida em *software*, percebeu-se também a diferença do número de ordem gerada por cada filtro. A janela de *Blackman* resultou em uma ordem de 106 e as demais janelas forneceram a mesma ordem de valor 70. Dessa forma, para que a implementação do filtro com a janela de *Blackman* fosse realizada, seria necessário maior poder computacional para executar as operações matemáticas do filtro passa-baixas. Em contrapartida, a implementação do filtro com as outras janelas, oferece maior desempenho e economia de recursos em um *hardware* digital como os DSPs, que são dispositivos com capacidade limitada de processamento e armazenamento de dados.

IV. CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo estudar os filtros digitais anti-ruído para telecomunicações, que são dispositivos que permitem a eliminação de componentes indesejadas do sinal de voz, como ruídos oriundos de variáveis aleatórias. Para isso, podem ser utilizados filtros digitais de diferentes tipos, como

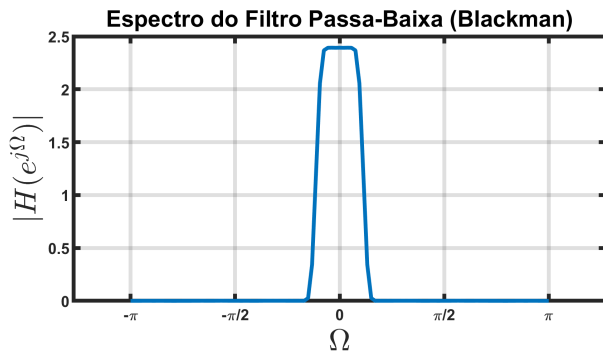


Figura 12. Espectro após o janelamento de *Blackman* aproximada.

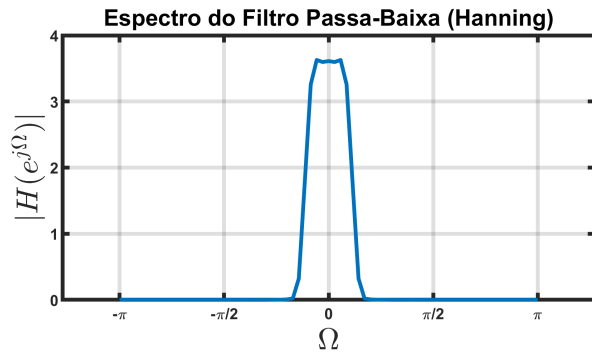


Figura 13. Espectro após o janelamento de *Hanning* aproximada.

FIR, *IIR*, dentre outros. Os filtros digitais foram avaliados quanto aos seus parâmetros e desempenho na redução do ruído e na melhoria da qualidade do sinal de voz. O trabalho também apresentou diferentes janelas que podem ser usadas para filtragem em filtros *FIR*, que influenciam na resposta em frequência do filtro. Com o desenvolvimento deste trabalho, foi possível aprofundar o conhecimento sobre os filtros digitais e suas aplicações em sistemas de comunicação.

REFERÊNCIAS

- [1] OPPENHEIM, Alan V.; SCHAFER, Ronald W. "Processamento em tempo discreto de sinais". Tradução Daniel Vieira. 3ª ed.-São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2012.
- [2] F. C. Comparsi d. C. (2001). *Processamento Digital de Sinais* [Online]. Available: <https://www.fcdecastro.com.br/pdf/DSP%20A7.pdf>. (accessed Mai 03, 2023).
- [3] F. Elnatan C. (2012). *Aula 18 Sistemas de conversão AD e DA* [Online]. Available: <https://www.dsif.fee.unicamp.br/elnatn/ee610/18a%20Aula.pdf>. (accessed Apr 13, 2023).

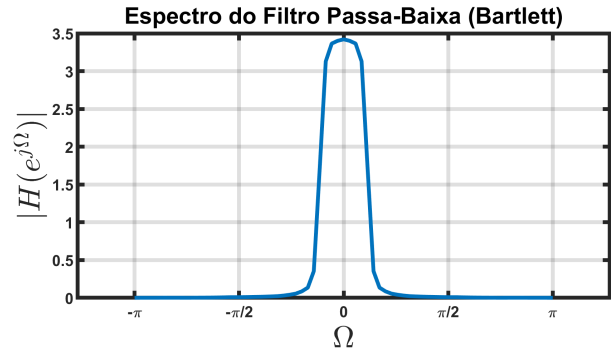


Figura 14. Espectro após o janelamento de *Bartlett* aproximada.

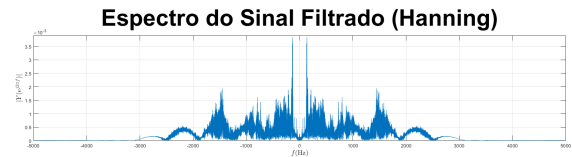
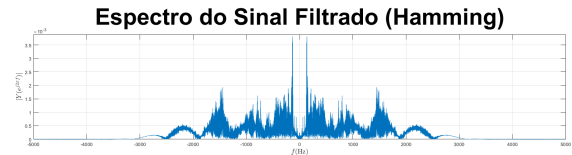


Figura 15. Sinais filtrados pelos janelamentos de *Hamming* e *Hanning*.

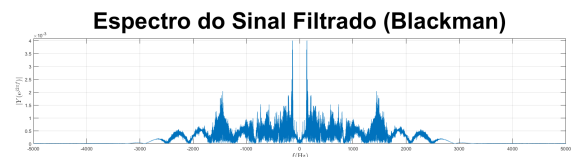
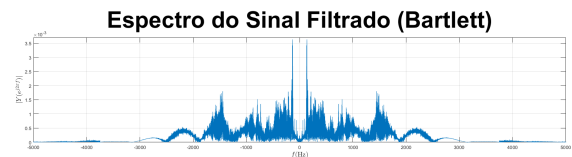


Figura 16. Sinais filtrados pelos janelamentos de *Bartlett* e *Blackman*.