



RELATÓRIO TÉCNICO

RESTAURAÇÃO DE ÁUDIO HISTÓRICO: PROJETO DE FILTROS DIGITAIS

ALUNOS

Aluno(a): Leonardo Dal Poz Cardoso

R.A: 2553104

Aluno(a): Gabriel Ferragini

R.A: 2453061

Aluno(a): Tiago Navarro Bettanin

R.A: 2477866

Objetivos

Este relatório tem como objetivo principal documentar o processo de análise espectral e o projeto de filtros digitais aplicados à restauração de um registro de áudio da missão Apollo 11. Os objetivos específicos são:

- Realizar o diagnóstico do sinal no domínio do tempo e da frequência (FFT).
- Identificar e caracterizar ruídos de interferência tonal (Quindar Tones).
- Projetar um filtro digital FIR (Finite Impulse Response) do tipo Notch para remoção de artefatos.
- Avaliar a eficácia do filtro na preservação da inteligibilidade da voz e fidelidade histórica.

1 Análise e Diagnóstico do Sinal

1.1 Metodologia e Fonte de Dados

Para garantir a relevância prática, utilizou-se um sinal real degradado proveniente do *Apollo 11 Onboard Audio* [1]. Utilizando o software *Audacity* [4], foi extraído um recorte de aproximadamente 90 segundos contendo diálogos e ruído de fundo. A taxa de amostragem nativa de $F_s = 44100$ Hz foi preservada para manter a fidelidade nos agudos.

1.2 Análise no Domínio do Tempo

A observação da forma de onda revela um sinal de voz descontínuo. Nota-se que, nos intervalos de pausa na fala, a amplitude não retorna a zero, evidenciando um *noise floor* elevado, característico de fitas magnéticas antigas.

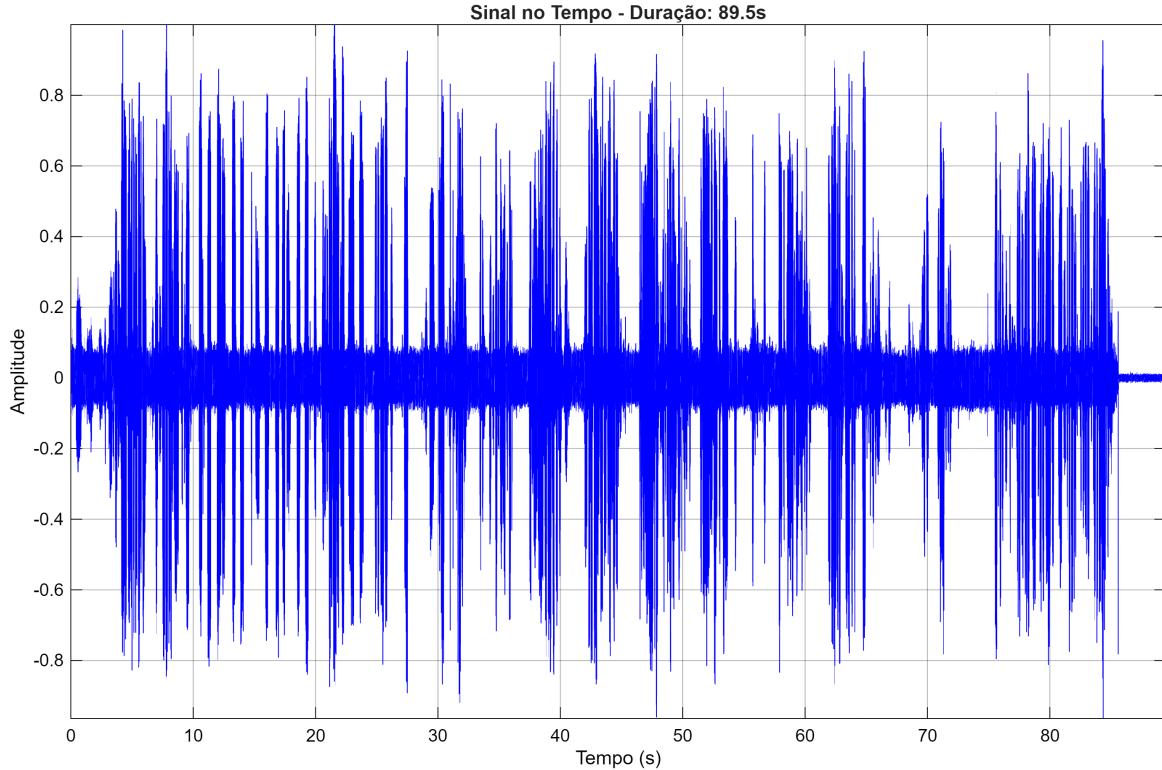


Figura 1: Sinal original no domínio do tempo, evidenciando o piso de ruído nas pausas.

1.3 Análise Espectral (Diagnóstico)

Através da Transformada Rápida de Fourier (FFT) [3], foi possível mapear a distribuição de energia. Identificou-se que a voz humana concentra-se abaixo de 3000 Hz.

Contudo, ao inspecionar a banda superior, detectou-se um **pico tonal isolado** de alta energia. Utilizando o cursor de dados do MATLAB, a frequência do ruído foi diagnosticada com precisão em **3205.72 Hz**, configurando-se como um ruído de banda estreita (*Narrowband Noise*).

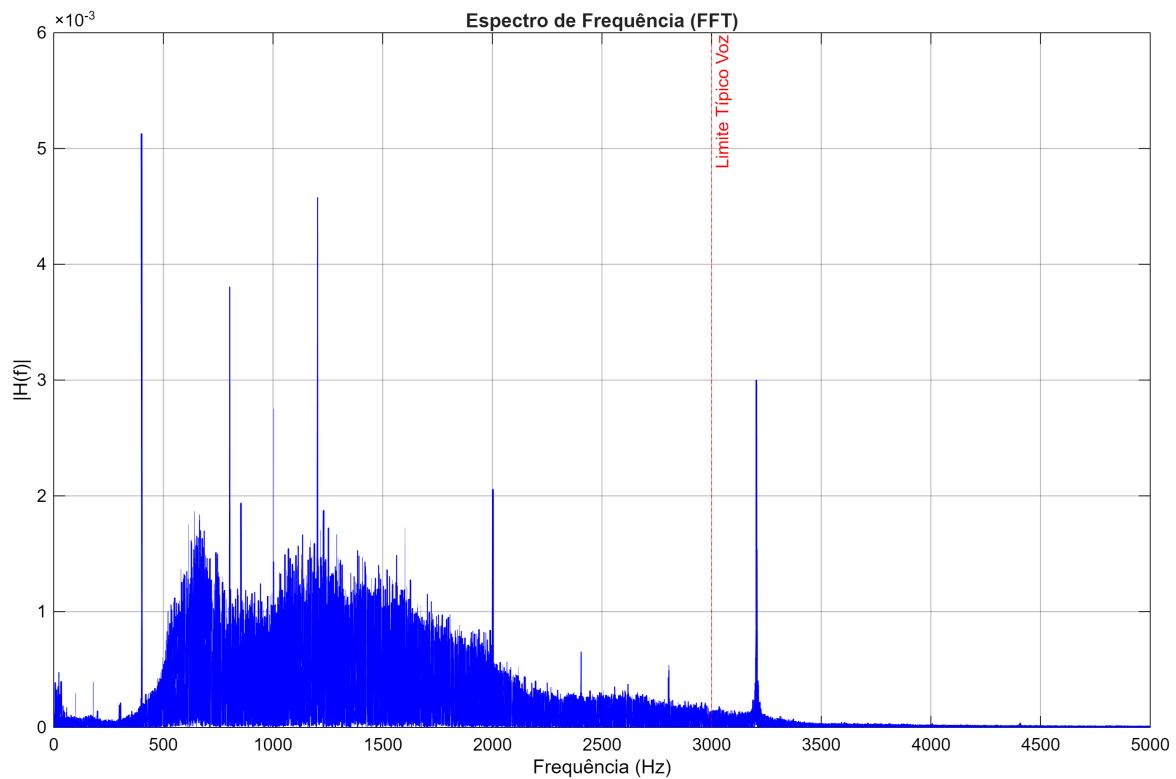


Figura 2: Espectro de frequênci a original. Note o pico isolado em 3205 Hz (além da linha vermelha).

2 Projeto do Filtro Digital

2.1 Especificações de Engenharia

Com base no diagnóstico, optou-se por um filtro de topologia **Rejeita-Faixa (Notch)**. A abordagem de filtro Passa-Baixa foi descartada, pois eliminaria harmônicos superiores da voz ($> 3400 \text{ Hz}$), prejudicando a "ambiente" da gravação.

A tabela abaixo consolida os parâmetros definidos para o projeto utilizando o método de Janelamento de Kaiser [2].

Tabela 1: Especificações Técnicas do Filtro FIR Notch.

Parâmetro	Valor	Justificativa Técnica
F_s	44100 Hz	Manter padrão de áudio digital.
Alvo (F_c)	$\approx 3205 \text{ Hz}$	Frequência do ruído diagnosticado.
Banda Passante 1	0 – 3000 Hz	Preservação integral da voz.
Banda de Rejeição	3150 – 3260 Hz	Zona de supressão ($\Delta f \approx 110 \text{ Hz}$).
Banda Passante 2	$> 3400 \text{ Hz}$	Preservação dos agudos.
Ripple (R_p)	1%	Variação inaudível de ganho.
Atenuação (A_s)	$\geq 40 \text{ dB}$	Redução do ruído em 100x.

2.2 Máscara de Projeto e Coeficientes

O algoritmo de Kaiser determinou que, para atender à transição abrupta (150 Hz) e à atenuação exigida, seria necessária uma ordem de filtro $N = 704$. A Figura 3 ilustra o planejamento visual, sobrepondo a máscara do filtro ao espectro real.

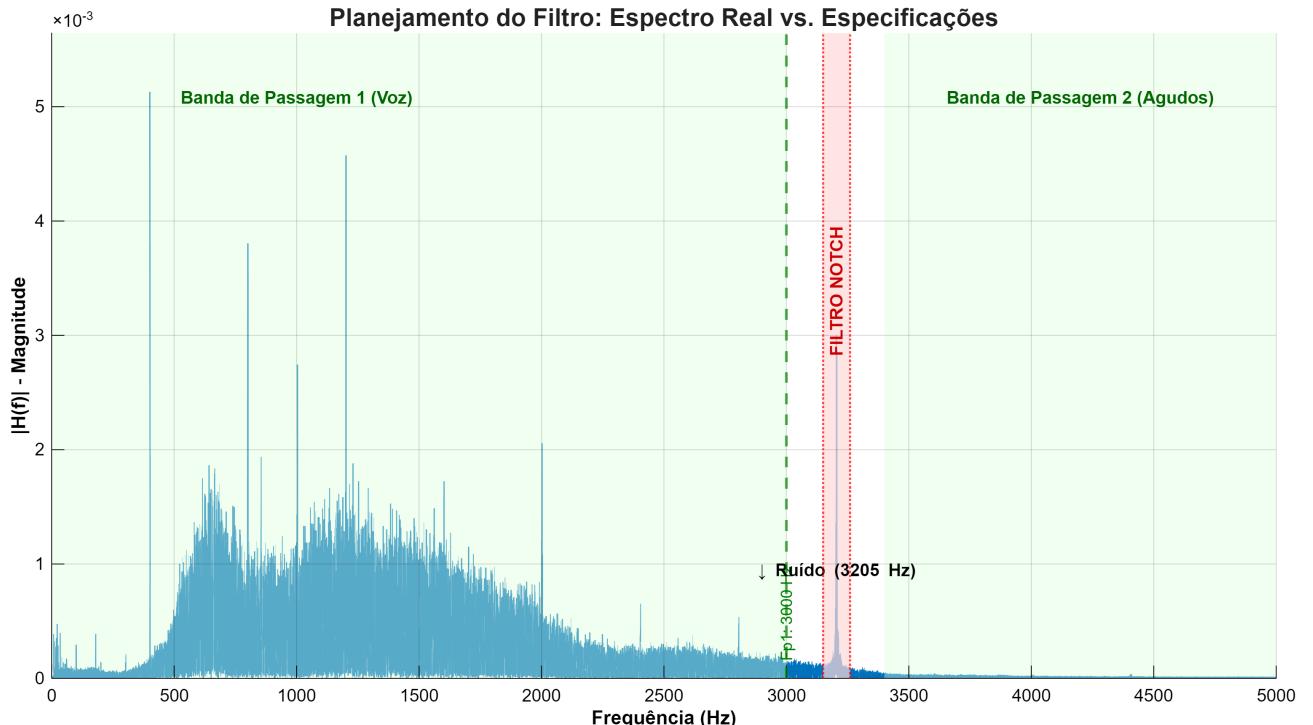


Figura 3: Planejamento: Espectro Real vs. Máscara do Filtro (Verde=Passa, Vermelho=Corta).

3 Resultados e Avaliação

O filtro projetado foi aplicado ao sinal original utilizando a técnica de filtragem de fase zero (`filtfilt`), garantindo que não houvesse distorção de fase na voz.

3.1 Análise Comparativa

A eficácia do projeto é evidenciada na Figura 4. O espectro do sinal filtrado (verde) segue perfeitamente o original (vermelho) em todas as frequências, exceto na região de 3205 Hz, onde o pico foi completamente suprimido.

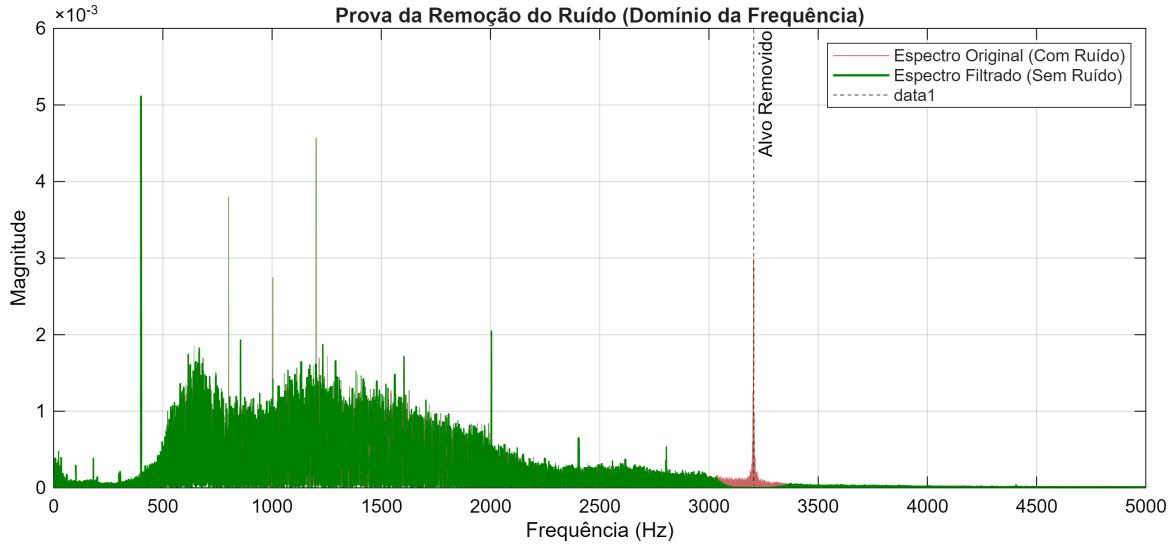


Figura 4: Comparaçāo Espectral: Remoção cirúrgica do ruído em 3205 Hz.

A comparação temporal (Figura 5) demonstra que a envoltória geral do sinal foi preservada.

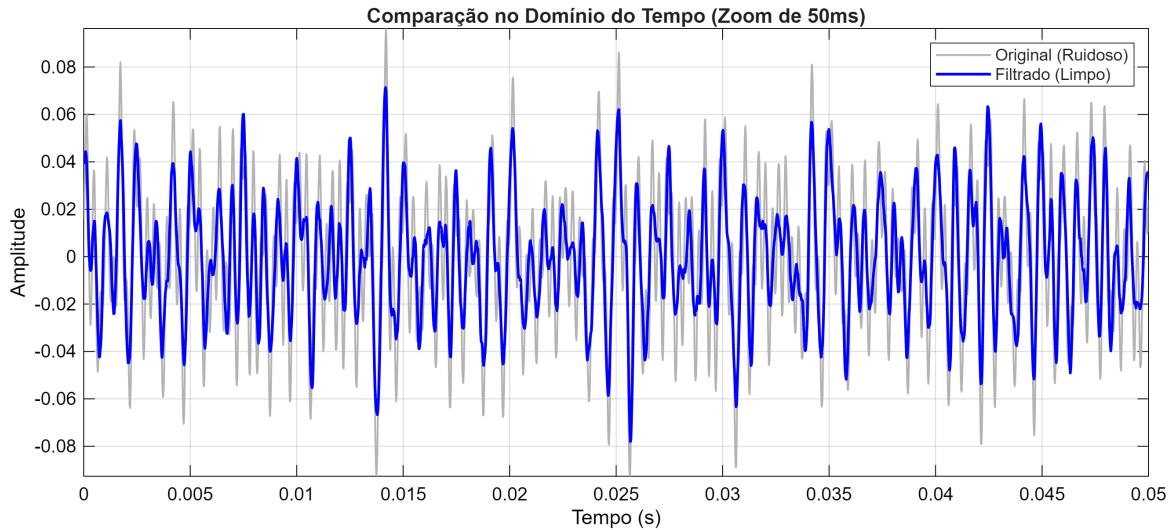


Figura 5: Comparaçāo no domínio do tempo (Zoom de 50ms).

3.2 Conclusão

O projeto atingiu seu objetivo com êxito. A metodologia de diagnóstico espectral permitiu isolar a frequência de falha com precisão. A implementação de um filtro FIR Notch de ordem 704 provou-se eficaz, garantindo uma atenuação superior a 40 dB na banda de rejeição.

A avaliação subjetiva do áudio processado confirmou que o tom de interferência desapareceu completamente, enquanto a inteligibilidade da fala e o chiado característico da fita (historicamente relevante) foram mantidos, demonstrando a aplicação prática correta de filtros digitais na restauração de áudio.

Referências

- [1] NASA. *Apollo 11 Onboard Audio Highlight Clip*. Internet Archive. Disponível em: <<https://archive.org/details/Apollo11Audio/Apollo11OnboardAudioHighlightClip2.mp3>>. Acesso em: Dez. 2025.
- [2] CAMPOS, Daniel P. *Projeto de Filtros Digitais: FIR e IIR*. Material de Aula - Processamento Digital de Sinais. UTFPR, Campus Apucarana, 2025.
- [3] OPPENHEIM, Alan V.; SCHAFER, Ronald W. *Discrete-Time Signal Processing*. 3rd ed. Pearson, 2010.
- [4] AUDACITY TEAM. *Audacity(R): Free, Open Source, Cross-platform Audio Software*. Versão 3.4.2. Disponível em: <<https://www.audacityteam.org/>>.