

SISTEMA DE EQUALIZAÇÃO DE ÁUDIO PORTÁTIL NA FORMAÇÃO DE ENGENHARIA ELETRÔNICA

NÍCOLAS SPIERING GERI¹; CAROLINE VERGARA FONSECA NUNES²; JEAN GARCIA RAMOS³ OCTAVIO JOUBER OLIVEIRA DA SILVA⁴

MARCELO LEMOS ROSSI⁵:

¹*Universidade Federal de Pelotas – nicolasspieringgeri1@gmail.com*

²*Universidade Federal de Pelotas – carolinevfn@gmail.com*

³*Universidade Federal de Pelotas – jeangarciamos@gmail.com*

⁴*Universidade Federal de Pelotas – octaviojoubert@gmail.com*

⁵*Universidade Federal de Pelotas – marcelo.rossi@ufpel.edu.br*

1. INTRODUÇÃO

O processamento digital de sinais (PDS) é uma área central da engenharia eletrônica moderna, com aplicações que vão desde telecomunicações até sistemas de áudio. Em particular, os equalizadores de áudio são ferramentas fundamentais, permitindo a manipulação seletiva da intensidade em diferentes regiões do espectro de frequência para fins de personalização sonora ou compensação de falhas de reprodução.

Segundo NALON (2009), a digitalização do sinal e a aplicação de técnicas matemáticas no domínio discreto permitem maior controle e flexibilidade quando comparados às soluções analógicas tradicionais. Além disso, a evolução do hardware possibilitou que sistemas embarcados de baixo custo, como microcontroladores, desempenhem funções antes restritas a processadores de sinais dedicados (DSPs).

DINIZ (2014) reforça que a implementação de filtros digitais, como os filtros FIR (Finite Impulse Response), é um dos pilares do PDS. Tais filtros apresentam estabilidade incondicional e previsibilidade no projeto, sendo amplamente empregados em aplicações que exigem resposta controlada em frequência.

O objetivo deste trabalho é demonstrar a implementação de um equalizador digital de 5 bandas em um microcontrolador ESP32-S3, utilizando filtros FIR para dividir o sinal de áudio em regiões espectrais distintas: graves (<150 Hz), médio-graves (150–600 Hz), médios (600 Hz–2,5 kHz), médio-agudos (2,5–7 kHz) e agudos (>7 kHz). O sistema permite o ajuste de ganho em tempo real por meio de uma interface web embarcada, destacando a integração entre PDS e plataformas embarcadas de uso geral.

2. METODOLOGIA

O desenvolvimento do equalizador foi dividido em três etapas principais: projeto dos filtros FIR, implementação no ESP32-S3 e desenvolvimento da interface de controle.

Projeto dos filtros FIR

Os filtros foram projetados com 65 coeficientes utilizando a técnica da janela de Hamming, conforme descrito por DINIZ (2014). A taxa de amostragem

escolhida foi de 22,05 kHz, o que permite representar sinais de até 11 kHz, em conformidade com o teorema de Nyquist (NALON, 2009).

A equação geral de um filtro FIR é dada por:

$$y[n] = \sum_{k=0}^{N-1} h[k] \cdot x[n-k]$$

em que $y[n]$ representa a saída filtrada, $x[n]$ o sinal de entrada, $h[k]$ os coeficientes do filtro e N o número de taps.

Após projetados em ambiente de simulação, os coeficientes foram quantizados para inteiros de 16 bits, adequados ao processamento em tempo real no ESP32-S3.

Implementação no ESP32-S3

O áudio foi armazenado em memória no formato WAV. Durante a execução, as amostras são lidas sequencialmente e processadas por cada um dos cinco filtros. O resultado de cada banda é multiplicado pelo ganho definido pelo usuário e, em seguida, todos os sinais são recombinaados.

O processamento é realizado em blocos de 256 amostras, garantindo eficiência e baixa latência. O sinal final é limitado ao intervalo de 16 bits e transmitido via interface I²S para um conversor digital-analógico externo, assegurando reprodução estéreo.

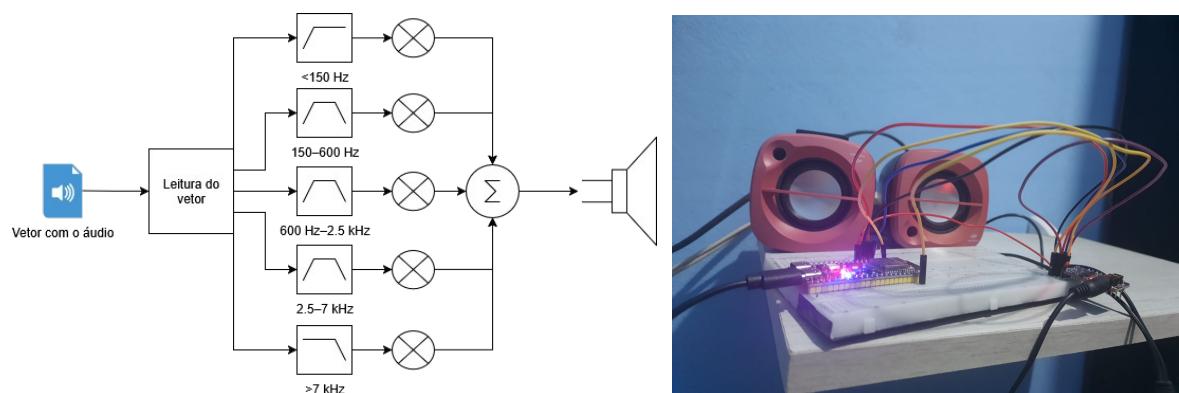


Figura 1. Diagrama de blocos do sistema e protótipo construído.

Interface de controle

Foi desenvolvido um servidor web embarcado no ESP32-S3, configurado em modo Access Point. A interface gráfica apresenta controles deslizantes para cada banda, permitindo ajustes de 0 a 2,5 vezes o ganho original. As alterações são enviadas via HTTP e aplicadas em tempo real ao processamento do áudio.



Figura 2. Interface de controle HTML.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A resposta em frequência dos filtros projetados demonstrou boa seletividade, com atenuações superiores a 20 dB nas regiões de rejeição. Isso confirma a eficiência da abordagem baseada em janelas, amplamente discutida por DINIZ (2014).

O sistema conseguiu processar o áudio em tempo real, sem sobrecarga perceptível no microcontrolador. O uso de 65 coeficientes representou um equilíbrio entre desempenho e custo computacional, em conformidade com as recomendações práticas de NALON (2009) para aplicações embarcadas de PDS. A interface web mostrou-se funcional e intuitiva, permitindo controle em dispositivos móveis e computadores. O sistema apresentou baixa latência e consumo energético reduzido, o que indica viabilidade para aplicações portáteis.

4. CONCLUSÕES

Este trabalho demonstrou a viabilidade técnica da implementação de um equalizador digital de 5 bandas em um microcontrolador de baixo custo, utilizando filtros FIR e processamento em tempo real. A solução desenvolvida alia simplicidade de hardware, flexibilidade de software e facilidade de uso por meio de interface web, mostrando-se adequada para aplicações educacionais, prototipagem rápida e sistemas de áudio embarcados.

A inovação central está em comprovar que um microcontrolador genérico pode desempenhar funções tradicionalmente associadas a DSPs dedicados, mantendo qualidade sonora satisfatória.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DINIZ, P. S. R. **Processamento digital de sinais: projeto e análise de sistemas.** 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2014. 1 recurso online. ISBN 9788582601242.

NALON, J. A. **Introdução ao processamento digital de sinais.** Rio de Janeiro: LTC, 2009. 1 recurso online. ISBN 978-85-216-2615-2.