



Universidade de Brasília – UnB
Faculdade UnB Gama – FGA
Engenharia Eletrônica

Implementação de Equipamento de Mixagem para DJs com Controle Automatizado de Filtros e Efeitos

Autor: Joselito Prado Marques da Silva
Orientador: Dr. Diogo Caetano Garcia

Brasília, DF
2025



Joselito Prado Marques da Silva

Implementação de Equipamento de Mixagem para DJs com Controle Automatizado de Filtros e Efeitos

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Eletrônica da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Universidade de Brasília – UnB

Faculdade UnB Gama – FGA

Orientador: Dr. Diogo Caetano Garcia

Brasília, DF

2025

Joselito Prado Marques da Silva

Implementação de Equipamento de Mixagem para DJs com Controle Automatizado de Filtros e Efeitos/ Joselito Prado Marques da Silva. – Brasília, DF, 2025-
79 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Dr. Diogo Caetano Garcia

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília – UnB
Faculdade UnB Gama – FGA , 2025.

1. processamento de sinais. 2. mixer. I. Dr. Diogo Caetano Garcia. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Implementação de Equipamento de Mixagem para DJs com Controle Automatizado de Filtros e Efeitos

CDU 02:141:005.6

Joselito Prado Marques da Silva

Implementação de Equipamento de Mixagem para DJs com Controle Automatizado de Filtros e Efeitos

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Eletrônica da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 20 de fevereiro de 2025:

Dr. Diogo Caetano Garcia
Orientador

Dr. Henrique Gomes de Moura
Convidado 1

Dr. Wellington Avelino do Amaral
Convidado 2

Brasília, DF
2025

*“Se você tocar uma nota errada,
é a próxima nota que você tocar
que determina se ela será boa ou ruim.”*
(Miles Davis)

Resumo

Um *disk-jockey* (DJ) é um artista que cria uma nova experiência sonora a partir de músicas pré-existentes. Devido às suas habilidades de analisar os componentes presentes na música e utilizar equipamentos específicos, esse artista é capaz de transformar a experiência de simplesmente ouvir uma sequência de músicas. A principal ferramenta do DJ para esse fim é o *mixer*, que é capaz de transformar cada música a partir de funcionalidades como filtragem e efeitos. Uma das formas de fazer a transição entre músicas de dois canais do *mixer* é utilizando um filtro passa-altas e o controle de volume. Isso requer do DJ o acionamento de até 3 botões para cada canal, o que pode ser difícil de executar manualmente. Neste trabalho, decidiu-se criar um sistema capaz de unificar esse controle, para simplificar a forma como esse processo é realizado. Com isso, a criação de um dispositivo capaz de realizar transições a partir de um único botão que controla filtros *passa-altas* para cada canal utilizado foi implementado utilizando uma *Raspberry Pi* e simples potenciômetros. Além disso, efeitos como *delay* e *reverb* foram implementados para dar mais liberdade de criação ao *DJ*. Com isso, foi possível a obtenção de um protótipo de um *mixer* que realize a transição entre duas faixas utilizando um botão de controle que modifica todo um sistema de filtros que controla de forma automática os elementos que compõem as faixas. Essa solução evidenciou, através de testes feitos nos sinais obtidos a partir da variação de parâmetros, de forma a varrer as novas possibilidades criadas a partir dessa nova configuração, a possibilidade de criação de dispositivos voltados a *DJs* criados a partir de componentes simples como *Raspberry Pi* e conceitos primordiais da teoria de processamento de sinais, estruturas que vão na contramão do que se é encontrado hoje na indústria.

Palavras-chave: processamento de sinal; áudio; mixer.

Abstract

A disk-jockey (DJ) is an artist who creates a new sound experience from pre-existing music. Due to their ability to analyze the components present in music and use specific equipment, this artist is able to transform the experience of simply listening to a sequence of songs. The DJ's main tool for this purpose is the mixer, which is capable of transforming each song using features such as filtering and effects. One way to transition between songs on two mixer channels is by using a high-pass filter and the volume control. This requires the DJ to press up to 3 buttons for each channel, which can be difficult to do manually. In this work, we decided to create a system capable of unifying this control, to simplify the way this process is carried out. With this, the creation of a device capable of performing transitions from a single button that controls high-pass filters for each channel used was implemented using a Raspberry Pi and simple potentiometers. In addition, effects such as delay and reverb were implemented to give the DJ more creative freedom. With this, it was possible to obtain a prototype of a mixer that performs the transition between two tracks using a control button that modifies an entire filter system that automatically controls the elements that make up the tracks. This solution demonstrated, through tests carried out on signals obtained from parameter variations, in order to explore the new possibilities created from this new configuration, the possibility of creating devices aimed at DJs created from simple components such as Raspberry Pi and fundamental concepts of signal processing theory, structures that go against what is found in the industry today.

Keywords: *signal processing, audio, mixer.*

Listas de ilustrações

Figura 1 – Protótipo de <i>mixer</i>	21
Figura 2 – Sinal de tempo contínuo (OPPENHEIM; WILLSKY, 2010)	26
Figura 3 – Sinal de tempo discreto (OPPENHEIM; WILLSKY, 2010)	26
Figura 4 – Espectro do sinal amostrado com $W_s > 2W_m$ (OPPENHEIM; WILLSKY, 2010)	27
Figura 5 – Quantização de amplitudes em tempo discreto (OPPENHEIM; WILLSKY, 2010)	29
Figura 6 – Janelas comumente utilizadas (OPPENHEIM; SCHAFER, 2013)	31
Figura 7 – Ciclo de propagação do som (SAAD, 2019)	32
Figura 8 – Escala de decibéis (COLE, 2025)	33
Figura 9 – Rosnie - inventado por Alex Rosner (UBBS, 2015)	35
Figura 10 – CMA-10-2DL - primeiro mixer estéreo comercial (MARQUES, 2019)	36
Figura 11 – Toca-disco SL-1200 (32BITMASCHINE, 2008)	36
Figura 12 – <i>Mixer</i> criado pela Rane (RANE, 2008)	37
Figura 13 – CDJ-300 - primeira CDJ da Pioneer (PIONEER, 2024a)	37
Figura 14 – Mixagem virtual com o <i>Apple Vision Proo</i> (CARDOSO, 2024)	38
Figura 15 – Configuração mais encontrada (PIONEER, 2024b)	38
Figura 16 – <i>Rotary mixer</i> (MIXERS, 2024)	39
Figura 17 – Espectro de áudio (GLEESON, 2024)	40
Figura 18 – Transmissão com fios desbalanceados e balanceados (NEIMAR, 2023).	42
Figura 19 – Conectores de 1/4", 1/8" e de 2,5 mm (ELECTRONICS, 2024).	43
Figura 20 – Conectores RCA e XLR (RS, 2024).	43
Figura 21 – Fluxograma geral do <i>mixer</i>	46
Figura 22 – Bloco de leitura de sinais	47
Figura 23 – Bloco de filtragem	48
Figura 24 – Bloco de efeitos	49
Figura 25 – Bloco de conversão digital-analógico	49
Figura 26 – Lógica de funcionamento do botão central no <i>PureData</i>	50
Figura 27 – Expressão para a f_{c2}	51
Figura 28 – Botão de seleção de efeito no <i>PureData</i>	51
Figura 29 – Botão de quantidade de efeito no <i>PureData</i>	52
Figura 30 – Lógica de seleção de efeito no <i>PureData</i>	52
Figura 31 – Variação da amplitude dos efeitos no <i>PureData</i>	52
Figura 32 – Implementação da variação da amplitude dos efeitos no <i>PureData</i>	53
Figura 33 – Soma dos sinais filtrados e dos efeitos no <i>PureData</i>	53

Figura 34 – Botão do tipo <i>knob</i> para frequência central e efeitos, e chave para seleção do efeito.	54
Figura 35 – Diagrama de Conexões	55
Figura 36 – Implementação em <i>hardware</i> do protótipo	55
Figura 37 – Gráfico de intervalo da Música 1 no domínio do tempo (a) e no domínio da frequência (b), ambos sem filtragem.	60
Figura 38 – Música 1 nos domínios do tempo (a) e da frequência (b), com uma frequência de corte de 300 Hz.	61
Figura 39 – Música 1 nos domínios do tempo (a) e da frequência (b), com uma frequência de corte de 4 kHz.	62
Figura 40 – Música 1 nos domínios do tempo (a) e da frequência (b), com uma frequência de corte de 22 kHz.	63
Figura 41 – Canal de efeito <i>reverb</i> isolado com música 1 a volumes de 0.0, 0.3312, 0.6625 e 1.0.	64
Figura 42 – Sinal com efeitos de <i>reverb</i> a 0, 25, 50 e 100 dB após 1 segundo.	65
Figura 43 – Sinal com efeitos de <i>delay</i> de 0, 250, 500 e 1000 ms.	66
Figura 44 – Música 1 nos domínios do tempo e da frequência, com filtro de 20 Hz. .	67
Figura 45 – Música 1 nos domínios do tempo e da frequência, com frequência de corte de 303 Hz.	68
Figura 46 – Música 1 nos domínios do tempo e da frequência, com frequência de corte de 4015 Hz.	69
Figura 47 – Música 1 nos domínios do tempo e da frequência, com frequência de corte de 22050 Hz.	70
Figura 48 – Música 1 com <i>delay</i> a valores de <i>wetness</i> de 0,0, 0,33, 0,66 e 1,0.	71
Figura 49 – Música 1 com <i>reverb</i> a valores de <i>wetness</i> de 0,0, 0,33, 0,66 e 1,0.	74

Lista de tabelas

Lista de abreviaturas e siglas

AD	Analógico para Digital
BPM	Batidas por Minuto
CD	Compact Disc
CDJ	Compact Disc Jockey
CD-R	Compact Disc-Recordable
DA	Digital para Analógico
dBu	Decibéis em relação a 1 Volt
DJ	Disc Jockey ou Discoterário
DSP	Digital Signal Processor (Processador de Sinal Digital)
DVD	Digital Versatile Disc (Disco Digital Versátil)
FLAC	Free Lossless Audio Codec
FC	Frequênciade Corte
FX	Efeitos
HPF	High-Pass Filter (Filtro Passa-Alta)
I2C	Inter-Integrated Circuit
MIDI	Musical Instrument Digital Interface
MP3	MPEG-1 Audio Layer 3 (Camada 3 de Áudio MPEG-1)
MPEG-2	Moving Picture Experts Group - Layer 2 (Grupo de Especialistas em Imagens em Movimento - Camada 2)
PCM	Pulse Code Modulation (Modulação por Código de Pulso)
RCA	Conektor Radio Corporation of America
RMS	Root Mean Square (Valor Quadrático Médio)
SPI	Serial Peripheral Interface

STFT	Short Time Fourier Transform (Transformada de Fourier de Tempo Curto)
TV	Televisão
UART	Asynchronous Receiver/Transmitter
USB	Universal Serial Bus
XLR	Conecotor XLR, usado em equipamentos de áudio profissional

Listas de símbolos

dB	Decibel, unidade de medida para a intensidade do som
Δt	Intervalo de tempo
\int	Integral
∞	Infinito
π	Pi, constante matemática aproximadamente igual a 3.14159
Σ	Somatório
$d\omega$	Diferencial angular na Transformada de Fourier
e	Base do logaritmo natural
f	Frequência (em Hz)
f_{c1}	Frequência de corte do canal 1
f_{c2}	Frequência de corte do canal 2
f_c	Frequência de corte central
j	Unidade imaginária
k	Multiplicador de 1000
n	Índice de amostragem ou sequência discreta
ω	Frequência angular
τ	Tempo de atraso
T	Período (em segundos)
W_m	Largura de banda máxima do sinal
W_s	Frequência de amostragem

Sumário

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	Justificativa	22
1.2	Objetivos	22
1.2.1	Objetivo Geral	23
1.2.2	Objetivos Específicos	23
1.3	Estrutura do Documento	23
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E ESTADO DA ARTE	25
2.1	Sinal: Conceito	25
2.2	Sinal Contínuo	25
2.2.1	Sinal Discreto	26
2.2.2	Transformada de Fourier	26
2.2.3	Teorema da Amostragem	27
2.2.4	<i>Aliasing</i>	28
2.2.5	Teorema da Quantização	28
2.3	Filtros	29
2.3.1	Filtros FIR - <i>Finite Impulse Response</i>	30
2.4	Som e Música	31
2.4.1	Conceito físico	32
2.4.2	Audição Humana	32
2.4.3	História da Gravação e Reprodução de Som	33
2.4.4	<i>Disc Jockeys (DJs)</i>	34
2.4.5	Parâmetros físicos	39
2.4.6	Equipamentos	41
2.5	Mixer	41
2.5.1	Potência de Sinal de Áudio	41
2.5.2	Cabeamento	42
2.5.3	Conectores	42
2.5.4	Amplificação de Potência	43
2.5.5	Equalização	43
2.5.6	<i>Trim</i> e Volume	44
3	METODOLOGIA	45
3.1	Proposta Geral	45
3.2	Fluxograma do Mixer	46
3.2.1	Bloco de Leitura de Sinais	46

3.2.2	Bloco de Filtragem	47
3.2.3	Bloco de Efeitos	48
3.2.4	Bloco de Conversão DA	48
3.3	Prova de Conceito	49
3.3.1	<i>PureData</i>	49
3.3.2	Leitura de arquivos	49
3.3.3	Filtragem	50
3.3.4	Efeitos	51
3.4	Sistema definitivo	53
3.4.1	<i>Hardware</i>	54
3.4.2	<i>Software</i>	56
4	RESULTADOS	59
4.1	Prova de Conceito	59
4.1.1	Filtragem	59
4.1.2	Efeitos	61
4.2	Sistema definitivo	63
4.2.1	Filtragem	63
4.2.2	Efeitos	69
5	CONCLUSÕES	75
	REFERÊNCIAS	77

1 Introdução

A música eletrônica e a cultura *DJ* têm desempenhado um papel essencial na transformação do cenário musical contemporâneo, desde o surgimento dos primeiros equipamentos de mixagem nos anos 70 até os sofisticados sistemas digitais da atualidade. A figura do *DJ*, em sua origem limitada a um curador de faixas, evoluiu para um artista completo, que utiliza a tecnologia para manipular sons em tempo real, criando experiências sonoras únicas e imersivas. No centro dessa transformação está o *mixer*, que, ao longo das décadas, se tornou uma ferramenta indispensável para performances, permitindo a combinação de múltiplos canais de áudio em uma nova e coesa composição musical.

A evolução dos equipamentos de mixagem, no entanto, não explorou as formas de compreensão de uma faixa, de forma que o entendimento da composição de uma música permanece constante desde a criação dos primeiros equipamentos, baseado no controle de ganho em 3 filtros passa-bandas. Embora as inovações tecnológicas tenham ampliado a quantidade de canais, a integração com telas digitais e a conectividade em nuvem, a lógica básica da mixagem permanece rígida, muitas vezes limitando o potencial criativo dos artistas. Atualmente, muitos DJs enfrentam desafios para personalizar suas performances de forma mais orgânica e adaptativa, sendo obrigados a trabalhar dentro das limitações dos sistemas disponíveis.



Figura 1 – Protótipo de *mixer*

Neste cenário, surge a necessidade de uma abordagem que não apenas expanda as possibilidades técnicas, mas também permita uma maior flexibilidade no controle e manipulação dos elementos sonoros. O presente projeto visa justamente explorar novas formas de explorações e controle no processo de mixagem, desenvolvendo um protótipo de *mixer* que se adapte de maneira mais natural às necessidades dos profissionais. Com o foco em oferecer uma otimização da forma como uma transição é feita, o protótipo,

presenta na Figura tal, propõe um *mixer* que unifica a forma de controle sob os canais, tradicionalmente conhecida pelo ganho em três bandas por canal, ao utilizar filtro passa-altas que deslizam ao longo de toda a banda, para que o controle dos elementos sonoros, ao invés de três botões por canal, utilize um, de forma que ambos canais sejam controlados de forma unificada, promovendo assim um novo paradigma de como se pensar a mixagem na cultura *DJ*.

1.1 Justificativa

O mercado de equipamentos para *DJs* é amplamente dominado por grandes empresas, mas existe uma crescente demanda por dispositivos que fogem à norma estabelecida. Nesse contexto, surgem pequenas empresas e *boutiques* especializadas que desenvolvem soluções inovadoras, atendendo a *DJs* que buscam mais controle criativo e flexibilidade em suas performances. Percebe-se que há uma necessidade crescente de equipamentos que ofereçam mais versatilidade e personalização, permitindo aos *DJs* explorar suas habilidades de forma mais livre, mantendo, no entanto, a praticidade e aplicabilidade. A solução proposta busca responder a essa demanda por novos recursos, oferecendo uma abordagem simples e funcional, que se adapta facilmente ao uso cotidiano de um *DJ*.

Através da análise do processo de transição entre faixas, observou-se que os *mixers* tradicionais funcionam com a manipulação independente dos controles de frequências para cada canal. A transição típica envolve a diminuição dos graves de uma faixa, enquanto aumenta-se os elementos agudos da próxima faixa, de modo a suavizar a mudança diferentes elementos para que não haja uma variação brusca nos elementos. Ao perceber esse padrão de manipulação, surgiu a ideia de unificar os controles, permitindo um controle mais intuitivo e direto, sem perder a capacidade de personalização.

Com essa unificação, a solução proposta modifica o conceito tradicional de controle de frequências. Em vez de ajustar bandas de frequência separadamente, a ideia é utilizar um controle único de corte de frequências, que atuará de forma simultânea nos dois canais, permitindo uma transição mais fluida e simplificada. Essa abordagem não só facilita o trabalho do *DJ*, mas também oferece uma nova maneira de explorar as possibilidades sonoras durante a performance. Essa inovação visa, portanto, ampliar as opções criativas disponíveis de forma que possa ser facilmente aplicável a um sistema atual.

1.2 Objetivos

Nessa seção, o objetivo geral e os objetivos específicos almejados por esse projeto são citados.

1.2.1 Objetivo Geral

Esse projeto visa a criação de um *mixer* implementado em um sistema embarcado que unifique o controle da mixagem feita por *DJs* em contrapartida ao modelo tradicional de mixagem baseado em equalização de três bandas.

1.2.2 Objetivos Específicos

Quanto aos objetivos específicos, elencou-se pontos ao longo do desenvolvimento desse sistemas que servirão como pontos de referência para garantir que o funcionamento do todo.

1. Realizar de forma automatizada o controle da frequência de corte de dois canais a partir de um controle
2. Implementar dois tipos de efeitos: *delay* e *reverb*
3. Converter o sinal obtido após o processamento para analógico para ser reproduzido por um sistema de som

O Objetivo Específico 1 envolve a obtenção dos sinais de controle, conversões de analógico para digitais, a atuação correta nos filtros passa-altas de ambos canais.

Em relação aos efeitos, o Objetivo Específico 2 visa embarcar desde a concepção matemática, implementação do código para cada efeito e sua implementação para que o efeito seja aplicado ao sinal.

Uma vez que a conclusão dos Objetivos acima garante um sinal processado no domínio digital, é necessário garantir que o sinal seja adequadamente convertido para analógico, a fim de ser reproduzido em equipamentos externos. Portanto, o Objetivo Específico 3 agrupa a conversão do sinal de saída para que o sistema de som conectado ao sistema consiga reproduzir o canal de saída.

1.3 Estrutura do Documento

O presente trabalho está organizado em capítulos que abordam os diferentes aspectos da história, desenvolvimento e implementação do protótipo de *mixer* para *DJs* com controle unificado de frequência. A seguir, é apresentada a estrutura do documento.

No segundo capítulo, **Fundamentação Teórica e Estado da Arte**, são explorados os conceitos físicos e matemáticos fundamentais, como sinais e sistemas nos domínios contínuo e discreto, bem como o som, tanto do ponto de vista físico quanto da percepção humana dessa grandeza. Também é realizada uma pesquisa histórica sobre a evolução da

mixagem e dos dispositivos utilizados, oferecendo uma compreensão sobre a magnitude e a atuação de um *DJ*, culminando nas formas contemporâneas de mixagem.

No terceiro capítulo, **Metodologia**, a proposta do projeto é descrita a partir de requisitos funcionais e não-funcionais, em duas grandes subseções: prova de conceito e proposta de implementação. Na prova de conceito, a proposta foi testada utilizando um *software* chamado *PureData*, no qual a lógica de filtragem e efeitos, bem como suas interações, foram implementadas. Na proposta de implementação, a solução final é explorada com o detalhamento dos componentes eletrônicos e da solução *software* utilizados.

Para validar tanto a prova de conceito quanto a proposta de implementação, o capítulo **Resultados** analisa os sinais obtidos a partir da variação dos parâmetros de entrada, de modo a validar o comportamento do sistema para além da simples escuta do sinal final gerado.

Com o projeto implementado, o capítulo **Conclusão** realiza uma visão geral de todo o trabalho, destacando a integração de todas as etapas que compuseram o projeto.

2 Fundamentação Teórica e Estado da Arte

Nessa seção, serão abordados conceitos básicos para a compreensão da monografia (teoria, problema e proposta), começando pela definição de um sinal segundo a literatura, representado por um sinal elétrico, tanto analógico quanto digital; conceituar música e a importância da mixagem realizada por *DJs*, culminando no equipamento utilizado, dando enfoque ao *mixer*, seja na sua história, evolução e no seu estado da arte.

2.1 Sinal: Conceito

"Os sinais, que são funções de uma ou mais variáveis independentes, contêm informações sobre o comportamento ou natureza de algum fenômeno, enquanto os sistemas respondem a algum sinal em particular, produzindo outros sinais ou algum comportamento desejado." ([OPPENHEIM; WILLSKY, 2010](#)).

Como exemplificam Oppenheim e Willsky ([OPPENHEIM; WILLSKY, 2010](#)), tensões e correntes ao longo do tempo são funções, ou seja, sinais, enquanto o circuito em si pode ser compreendido como um sistema que reage à entrada aplicada, ao produzir sinais de saída.

Sensores são dispositivos capazes de mensurar grandezas físicas através da captação de sinais elétricos. Dessa forma, a criação desses instrumentos permitiu a compreensão de fenômenos físicos. Assim, o monitoramento de grandezas permite que se atue em sistemas físicos a fim de se obter um resultado desejado.

Com o desenvolvimento de sensores na história da instrumentação, foi possível a obtenção da quantização de parâmetros físicos através de sinais elétricos. Dessa forma, a compreensão de fenômenos físicos e, consequentemente, a construção de sistemas que podem alterar os sinais conforme a resposta desejada.

2.2 Sinal Contínuo

Um sinal pode ser classificado como contínuo caso sua variável independente seja contínua, ou seja, se houver um valor para cada instante de tempo (variável independente).

Por exemplo, na Figura 2, entre o intervalo de 0 a t , há infinitos valores tanto de tempo quanto para o parâmetro em função do tempo ([OPPENHEIM; WILLSKY, 2010](#)). Um exemplo pode ser o valor de corrente em um resistor alimentado por uma tensão ou um som que gera uma pressão acústica no ar captada pelo sistema auditivo. A Figura 2

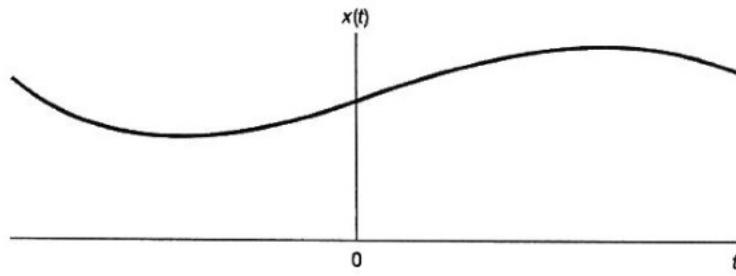


Figura 2 – Sinal de tempo contínuo (OPPENHEIM; WILLSKY, 2010)

é um exemplo de um gráfico para um sinal contínuo no tempo no qual se pode observar que para cada valor domínio há um valor correspondente.

2.2.1 Sinal Discreto

No caso de um sinal discreto, a sua variável independente é o tempo discreto, que pode ser definido por um conjunto de números inteiros, de forma que caso \$n\$ não seja inteiro, não há valor definido.

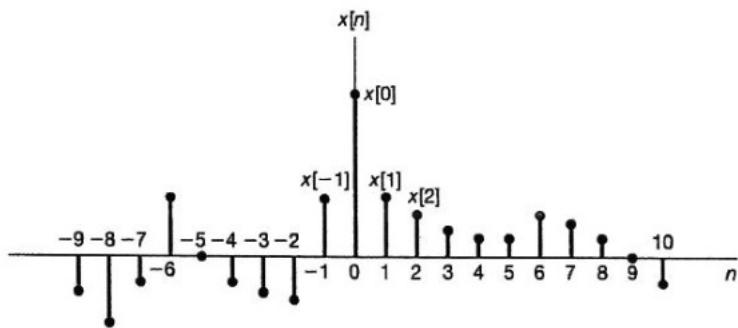


Figura 3 – Sinal de tempo discreto (OPPENHEIM; WILLSKY, 2010)

Dessa forma, entre as amostras consecutivas da Figura 3, não há infinitos valores como há no tempo contínuo.

2.2.2 Transformada de Fourier

Uma ferramenta matemática crucial para a análise de sinais na frequência é a transformada de Fourier, que realiza uma modificação do termo independente, saindo do tempo ou espaço e indo para frequências, também denominada de equação de análise, que pode ser visualizada na equação 2.1.

$$X(e^{j\omega}) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x[n]e^{-j\omega n} \quad (2.1)$$

$$x[n] = \frac{1}{2\pi} \int_{2\pi} X(e^{j\omega}) e^{j\omega n} d\omega \quad (2.2)$$

De forma análoga, a transformada inversa, ou a também chamada de equação de síntese, realiza o processo inverso, modificando o sinal representado no domínio da frequência para o seu domínio original, segundo (OPPENHEIM; WILLSKY, 2010), seja tempo ou espaço. A equação da transformada inversa pode ser visualizada na equação 2.2

2.2.3 Teorema da Amostragem

Devido ao desenvolvimento da computação nas últimas décadas e pela consequente diminuição de custos de produção e de aquisição de dispositivos capazes de realizar o processamento digital de sinais, tornou-se muito vantajoso a utilização de sinais no tempo discreto, para que possam ser trabalhados digitalmente e, posteriormente, ou não, serem convertidos novamente para o tempo contínuo, sem a perda da informação inicial.

O processo de obter um sinal discreto a partir de um sinal contínuo é denominado amostragem, e para que, a partir do sinal amostrado, reconstrua-se o sinal contínuo original, o sinal e o processo de amostragem devem preencher alguns requisitos.

Para que um sinal seja amostrado, é necessário que o intervalo de amostragem, ou seja, o espaçamento entre duas amostras, seja regular. A cada período T , uma amostra é adquirida, resultando em uma frequência de amostragem $f = 1/T$. Ao passar essa função do domínio do tempo para o domínio da frequência, obter-se-á uma banda de frequências que compõe o sinal no domínio do tempo.

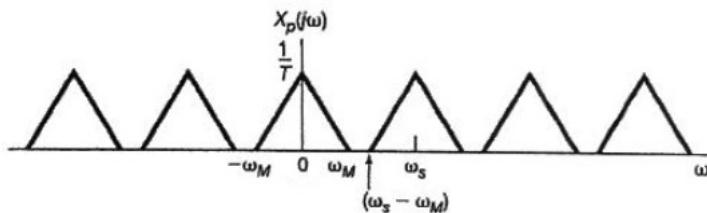


Figura 4 – Espectro do sinal amostrado com $W_s > 2W_m$ (OPPENHEIM; WILLSKY, 2010)

Ao observar a Figura 4, sendo a componente ω_M a maior frequência angular presente no sinal do tempo, ω_s a frequência de amostragem, constata-se que $\omega_M < (\omega_s - \omega_M)$ segundo Oppenheim e Willsky (OPPENHEIM; WILLSKY, 2010). Dessa forma, $\omega_s > 2\omega_M$. Caso a frequência de amostragem seja menor que ω_M , haverá sobreposição das bandas adjacentes e, por conseguinte, a reconstrução do sinal não será possível. Ao respeitar esse requisito, o sinal pode ser recuperado ao utilizar um filtro passa-baixas com a frequência de corte maior que ω_M e menor que $\omega_M - \omega_s$. Essa análise é o Teorema da Amostragem que infere que a:

$$\omega_s > 2\omega_M \quad (2.3)$$

em que

$$\omega_s = \frac{2\pi}{T} \quad (2.4)$$

O parâmetro ω_M , que deve ser menor que metade da frequência de amostragem ω_s , recebe o nome de frequência de Nyquist (OPPENHEIM; WILLSKY, 2010).

Esse teorema foi explicitado na literatura por Shannon (SHANNON, 1949), mas foi apontado anteriormente por Nyquist (NYQUIST, 1928). A partir dele, comprehende-se a suficiência da representação de um sinal pela série de Fourier por $2TW$ amostras, no qual T é a duração de uma função e W é a frequência mais alta que compõe o sinal.

2.2.4 Aliasing

Quando a frequência de amostragem não está de acordo com o critério de Nyquist, ou seja, menor que o dobro da frequência mais alta, não se tem a reconstrução do sinal, já que, ao realizar a filtragem passa-baixa, na banda ω_M haverá componentes da banda adjacente.

2.2.5 Teorema da Quantização

Após a amostragem de sinais, obtém-se um conjunto de sinais. Para que esses sinais, pertencentes ao domínio contínuo, possam ser processados, é necessário que se faça a quantização digitalmente. A quantização é um processo no qual se determina intervalos de valores, atribuindo cada valor amostrado a um valor quantizado em função do intervalo no qual o valor se insere. Para cada sinal amostrado, é atribuído um valor quantizado.

Para determinar com precisão os valores dos intervalos da quantização, o maior e o menor valor obtido pós-amostragem são os limites dos valores de amplitudes discretos. Na Figura 5, observa-se o processo a partir do qual, para cada valor obtido na amostragem, há um intervalo correspondente que passará a representar esse sinal.

O intervalo de amplitude discreta da Figura 5 varia de -32768 a +32767, totalizando 65536 possíveis amplitudes discretas, ou seja, 2^{16} possíveis amplitudes. Dessa forma, cada amplitude pode ser representada por uma palavra binária de 16 bits. A quantidade de bits a ser utilizada determinará a quantidade de intervalos possíveis, o que, por conseguinte, determinará a precisão da quantização, devido a um erro gerado.

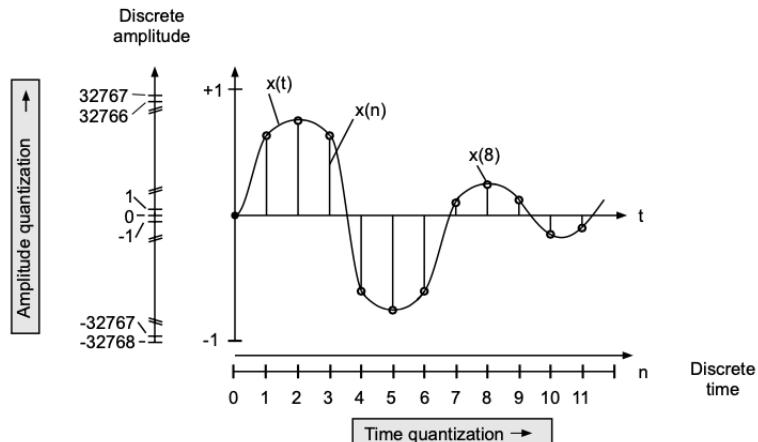


Figura 5 – Quantização de amplitudes em tempo discreto ([OPPENHEIM; WILLSKY, 2010](#))

Cada processo de quantização deve levar em conta a precisão necessária e os limites do intervalo de valores possíveis. Ao final, o procedimento de quantização é essencial para as conversões AD (análogo para digital).

A quantização, o processo de digitalizar a amplitude, é descrita pelo Teorema de Quantização de Widrow ([WIDROW; KOLLAR; LIU, 1996](#)), segundo Zölzer ([ZÖLZER, 2008](#)).

2.3 Filtros

Os filtros são sistemas essenciais que desempenham um papel de modificação seletiva de componentes durante o processamento de sinais ([OPPENHEIM; SCHAFER, 2013](#)). Um filtro ideal deixaria certas frequências passarem sem modificações (banda de passagem), enquanto bloquearia completamente outras (banda de rejeição) ([OPPENHEIM; SCHAFER, 2013](#)). No entanto, em um filtro real, a região de transição entre a banda de passagem e a de rejeição, conhecida como banda de transição, não funciona de maneira ideal, havendo atenuações e amplificações variáveis ao longo dessa faixa de frequências ([OPPENHEIM; SCHAFER, 2013](#)).

Filtros podem ser implementados de duas maneiras: por meio de circuitos analógicos ou digitais. Filtros digitais, usados no processamento de sinais digitais, possuem algumas vantagens em relação aos analógicos: são reprogramáveis, oferecem reproduzibilidade com alta precisão, são mais resistentes a ruídos, e permitem a implementação de funções mais complexas que seriam difíceis de alcançar em um sistema analógico ([OPPENHEIM; SCHAFER, 2013](#)).

A classificação dos filtros digitais pode ser feita com base na resposta no domínio da frequência, observando o comportamento das bandas de passagem e rejeição ([OPPENHEIM; SCHAFER, 2013](#)).

HEIM; SCHAFER, 2013). Os filtros podem ser categorizados como passa-baixa (LPF), passa-alta (HPF), passa-banda (BPF) e rejeita-faixa (BRF), de acordo com as frequências que permitem ou bloqueiam (OPPENHEIM; SCHAFER, 2013).

Outra classificação fundamental está relacionada à resposta do filtro a um impulso. Um filtro pode ter uma Resposta Finita ao Impulso (FIR) ou uma Resposta Infinita ao Impulso (IIR), o que influencia o comportamento do filtro em termos de linearidade da fase e eficiência computacional (OPPENHEIM; SCHAFER, 2013). A escolha entre FIR e IIR depende das características desejadas, como a necessidade de uma fase linear ou o consumo de recursos computacionais.

O projeto de filtros envolve etapas específicas. Primeiramente, é preciso determinar o tipo e a classificação do filtro com base no comportamento desejado (OPPENHEIM; SCHAFER, 2013). Em seguida, definem-se especificações detalhadas, como a banda de transição, a frequência de corte e as ondulações aceitáveis na banda de passagem e rejeição, além de considerações sobre a resposta de fase e os recursos computacionais disponíveis (OPPENHEIM; SCHAFER, 2013).

Especificações como a frequência de corte (limite entre a banda de passagem e a banda de rejeição), largura da banda de transição, erros de aproximação (diferenças entre a resposta real e a ideal), e resposta de fase (atraso de grupo e distorções de fase) são cruciais no design de um filtro (OPPENHEIM; SCHAFER, 2013). O desempenho do filtro também deve ser avaliado quanto à sua complexidade computacional, principalmente em aplicações de tempo real.

A análise da adequação de um filtro para uma aplicação específica envolve a avaliação de suas vantagens e desvantagens, bem como o uso de parâmetros quantitativos como resposta em frequência (magnitude e fase), atraso de grupo, resposta ao impulso, e frequência de corte (OPPENHEIM; SCHAFER, 2013). Esses fatores ajudam a otimizar o desempenho do sistema e garantem a melhor escolha de filtro para a aplicação.

2.3.1 Filtros FIR - *Finite Impulse Response*

Filtros com Resposta Finita ao Impulso (FIR) são uma classe de filtros que possuem diversas vantagens para aplicações de áudio e processamento de sinais. Eles são conhecidos por sua estabilidade e por oferecerem uma resposta de fase linear, o que é particularmente importante em aplicações onde a preservação da forma de onda do sinal é essencial (OPPENHEIM; SCHAFER, 2013). Além disso, ao contrário dos filtros com Resposta Infinita ao Impulso (IIR), os FIR podem ser projetados para ter um comportamento de fase exato em uma ampla faixa de frequências, o que os torna ideais para projetos que exigem alta fidelidade na reprodução do sinal.

O projeto de um filtro FIR segue etapas bem definidas, que garantem o seu desem-

penho nas aplicações desejadas. O processo começa com a especificação do filtro, onde são definidos o comportamento desejado e as faixas de frequência que devem ser passadas ou rejeitadas (OPPENHEIM; SCHAFER, 2013). Além disso, parâmetros como a tolerância de erros máximos nas faixas de passagem (δ_1) e rejeição (δ_2) são estabelecidos, e esses fatores determinam a ordem do filtro.

Com as especificações definidas, gera-se uma resposta em frequência ideal, a partir da qual se obtém a resposta ao impulso correspondente. Essa resposta ao impulso é usada como base para o restante do processo de projeto.

Na etapa seguinte, aplica-se uma janela de ponderação à resposta ao impulso ideal, como, por exemplo, as janelas retangular, *Bartlett*, *Blackman*, *Hamming*, *Hanning* ou *Kaiser*. A aplicação da janela é essencial para atenuar o efeito de *Gibbs*, que surge devido às descontinuidades na transição entre as bandas do filtro. Na Figura 6, é possível comparar o comportamento de coeficientes entre os diferentes tipos de janelas, sendo $w[n]$, o coeficiente para cada janela, enquanto M é a quantidade total de coeficientes e n é o índice dos coeficientes (OPPENHEIM; SCHAFER, 2013).

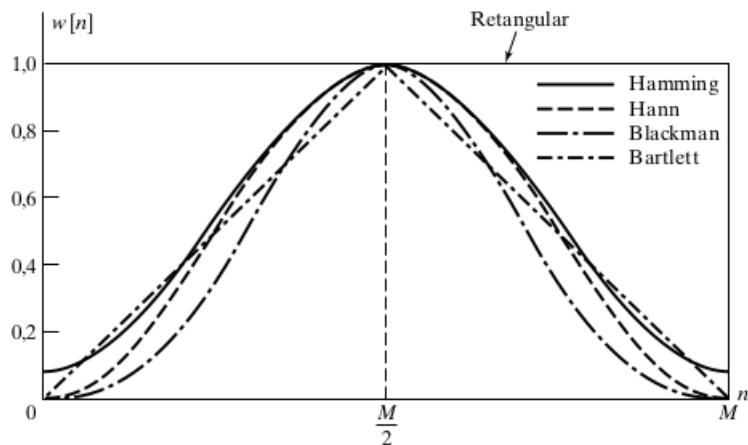


Figura 6 – Janelas comumente utilizadas (OPPENHEIM; SCHAFER, 2013)

Assim, o projeto de filtros FIR segue esse conjunto de etapas para garantir uma resposta de fase linear e preservar a forma de onda do sinal, características essenciais em muitas aplicações de processamento de áudio e sinais.

2.4 Som e Música

Nesta seção, será apresentada uma abordagem histórica, conceitual e técnica sobre a natureza do som e a mixagem realizada por um *DJ*. A partir do som, a música será definida e grandezas físicas serão abordadas. Posteriormente, serão discutidos cenários históricos e técnicos sobre o início das gravações musicais e da discotecagem. Em seguida, com um enfoque mais atual, será apresentado um contexto contemporâneo acerca da

mixagem realizada por um *DJ*, que realiza uma seleção musical com base nas características de cada música e faz transições para criar uma experiência musical única.

2.4.1 Conceito físico

Segundo Moyses ([NUSSENZVEIG, 2006](#)), "... corpos em vibração produzem sons ...". Dessa forma, é necessário que haja um meio para que o som se propague. Esse meio pode ser líquido, viscoso, sólido ou gasoso (como a atmosfera). De acordo com o mesmo autor, "... ondas sonoras na atmosfera são ondas longitudinais, associadas a variações de pressão, ou seja, compressões e rarefações ...".

Dessa forma, a oscilação de um objeto provoca constantemente compressão e rarefação, alterando a densidade na camada adjacente ao meio pelo qual o som será transmitido e gerando uma diferença de pressão que causa um deslocamento adjacente. Portanto, o ciclo de propagação de um som pode ser visualizado na Figura 7.

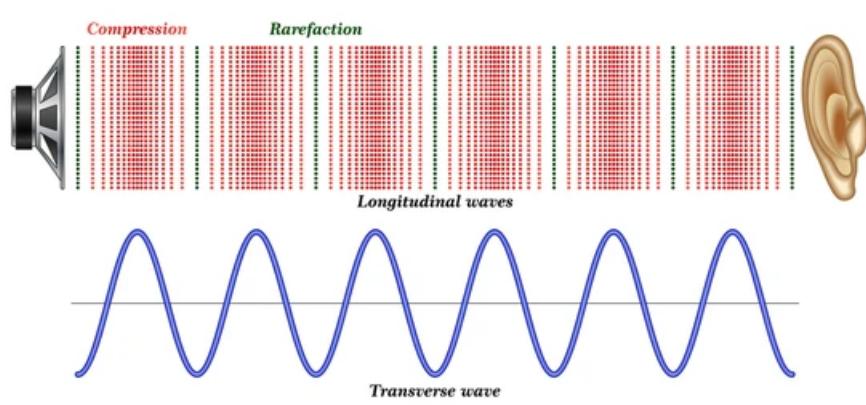


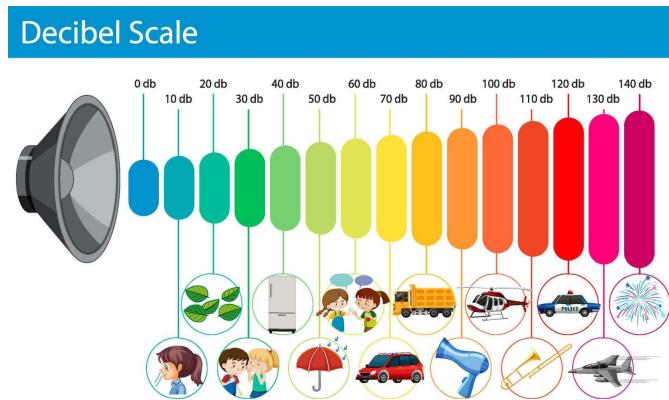
Figura 7 – Ciclo de propagação do som ([SAAD, 2019](#))

Conforme indica Moyses ([NUSSENZVEIG, 2006](#)), há parâmetros quantitativos que influenciam a percepção auditiva: intensidade, altura e timbre. A intensidade se relaciona com a amplitude da onda sonora. A altura se refere à banda na qual o som está localizado, seja nas frequências baixas (características graves) ou nas altas frequências (características agudas), em relação à faixa de frequência audível pelo ouvido humano. Já o timbre são sons que possuem a mesma frequência principal, que o autor chama de "tom fundamental da frequência", mas que possuem outras componentes em frequências superiores, tornando o som reconhecível, apesar de ter o mesmo tom fundamental.

2.4.2 Audição Humana

Como Farnell observa ([FARNELL, 2010](#)), embora o corpo humano possa sentir vibrações de 1 a 20 Hz, o ouvido humano é capaz de perceber sons a partir de 20 Hz até 10 kHz ou 20 kHz, dependendo da idade do ouvinte. A faixa normal na qual a voz humana

se localiza está entre 300 e 3000 Hz; no entanto, harmônicos provenientes de sons reais podem superar esse limite, inclusive ultrapassando os 20 kHz. Dessa forma, ao utilizar o Teorema de Amostragem, presume-se que a taxa de amostragem mínima necessária para a reconstrução perfeita de um som amostrado seja de, no mínimo, 40 kHz.



Outro parâmetro importante para a audição humana é o nível de intensidade sonora, ou nível de pressão sonora, medido em *decibel* (dB), que indica quão alto ou baixo um som é percebido. Para além da frequência, a intensidade sonora determina se aquele som poderá ser ouvido ou não, e se pode ser danoso ao sistema auditivo. Na Figura 8, há uma tabela que compara os níveis de intensidade sonora emitida por diversas fontes.

2.4.3 História da Gravação e Reprodução de Som

A partir do som, a humanidade foi capaz de criar uma expressão artística denominada música, que permite a expressão de ideias, sentimentos, identidades culturais e formas de entretenimento. Além disso, a evolução da tecnologia no século XX proporcionou uma grande difusão da música devido às novas possibilidades de gravação e reprodução.

O marco inicial da gravação de som é atribuído a Thomas Edison, conforme Roads (ROADS, 1996), que inventou o fonógrafo em 1877. Ao longo da história, a forma de gravação, armazenamento e reprodução de música foi aperfeiçoada, passando por gramofones, gravadores de fios, fita magnética e vinil. Esses dispositivos utilizavam gravação analógica.

O primeiro formato digital amplamente utilizado foi o CD. Outros formatos digitais tentaram alcançar a mesma popularidade do CD, como o MiniDisc, DVD de áudio e Blu-Ray áudio; no entanto, somente os arquivos digitais, com destaque para o MPEG-2 Audio Layer III, mais conhecido como MP3, conseguiram alcançar e superar a popularidade do CD. Esse sucesso deve-se ao uso eficiente de métodos de compressão e compartilhamento, que possibilitaram ao MP3 se tornar o principal meio de compartilhamento de música,

acompanhando a ampliação do acesso a computadores e dispositivos digitais capazes de reproduzir música de forma acessível.

2.4.4 Disc Jockeys (DJs)

Cada novo formato de mídia possibilitou novas formas de circulação da música. Cada mudança de formato provocou uma transformação na forma como a música é apreciada, começando com apresentações ao vivo, passando por reproduções via rádio, e culminando na reprodução em qualquer lugar com um aparelho adequado. Isso levou ao surgimento de especialistas em curadoria musical, que influenciaram e modificaram o consumo de música ao transmitir músicas a partir de vinis.

Segundo Brewster e Broughton (BREWSTER; BROUGHTON, 2014), houve uma grande luta para que *DJs* que transmitiam suas seleções nas rádios recebessem apoio das gravadoras. Após a Segunda Guerra Mundial, a Capital Records formalizou esse apoio ao reconhecer o potencial de divulgação dos *DJss* em rádios. O sucesso desses *DJs*, que influenciavam a população das regiões cobertas por suas rádios, teve a capacidade de desenvolver novos gêneros e tendências, pois eram criadores de tendências.

Em 1943, Jimmy Savile observou que um amigo havia conseguido conectar a saída de um gramofone a um rádio valvulado, transformando-o em uma saída de áudio. Isso inspirou Savile a criar um pequeno salão de dança onde gravações de jazz seriam tocadas, permitindo que as pessoas dançassem sem a presença de uma banda. Assim, nasceu um clube, conforme relatado por Brewster e Broughton (BREWSTER; BROUGHTON, 2014). Em seu segundo evento, Savile substituiu o rádio valvulado por um alto-falante. Com o aumento do público, ele implementou essa ideia em vários clubes na Inglaterra e, em um projeto específico, teve a ideia de usar dois toca-discos para diminuir o tempo de transição entre as músicas.

Em 1957, conforme Brewster e Broughton (BREWSTER; BROUGHTON, 2014), Bob Casey promovia festas em ginásios escolares usando um toca-discos conectado a um pequeno alto-falante. Utilizando o sistema de áudio do ginásio, ele posicionava um microfone na saída do alto-falante e transmitia o som amplificado pelo sistema de áudio. Seu pai, um engenheiro de som, desenvolveu um sistema em 1955 com dois toca-discos e controle de volume, permitindo a comutação entre discos e comentários enquanto o volume da música era reduzido.

De acordo com Brewster e Broughton (BREWSTER; BROUGHTON, 2014), em 1964, durante a Feira Mundial em Nova Iorque, Alex Rosner apresentou o primeiro sistema estéreo com dois canais de áudio, um avanço significativo na experiência de audição. Inspirados em sistemas de som da Broadway, David Mancuso e Alex Rosner criaram, para o The Loft (uma famosa festa alternativa), um sistema de som com *subwoofers*

(alto-falantes dedicados aos tons graves) e *tweeters* (alto-falantes dedicados aos médios).

Em 1971, Alex Rosner desenvolveu o primeiro *mixer* estéreo para *DJs*, o Rosnie, para o Haven Club (um clube famoso da época), como ilustrado na Figura 9. Esse equipamento contava com duas saídas: uma para fones de ouvido e outra para as caixas de som, permitindo a seleção independente de canais para o retorno da música ao *DJ* e a saída principal. Além disso, o controle *on/off* também foi implementado para o microfone.

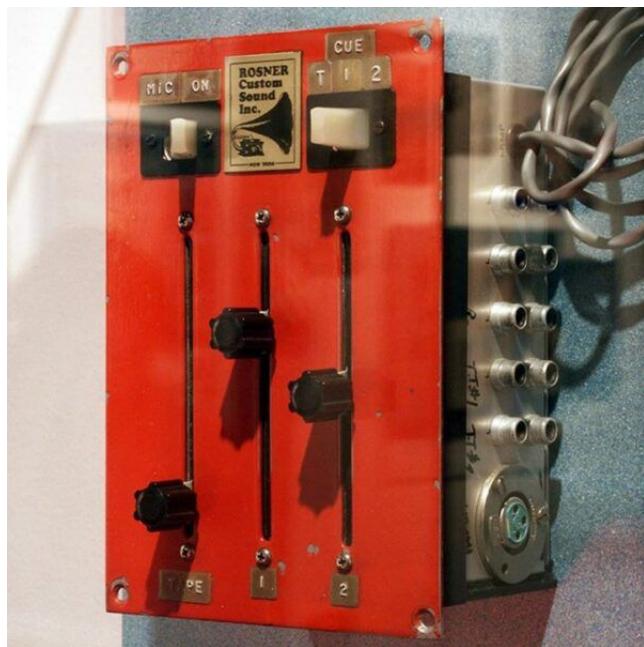


Figura 9 – Rosnie - inventado por Alex Rosner ([UBBS, 2015](#))

O Rosnie foi o primeiro *mixer* para aplicações fora de estúdios a controlar o ganho de bandas de frequência. Ao contrário das soluções anteriores que apenas controlavam o volume dos canais, esse equipamento permitiu mixar dois discos simultaneamente de forma que as transições entre músicas fossem extremamente suaves, muitas vezes não se percebendo a transição entre uma música e outra. No entanto, esse equipamento não foi criado com fins comerciais.

Louis Bozak, auxiliado por Alex Rosner, criou o CMA-10-2DL em 1971, visto na Figura 10, o primeiro *mixer* estéreo comercializado que instantaneamente se tornou padrão nos clubes da época.

Em 1972, a Technics criou o toca-disco SL-1200, como mostrado na Figura 11, que se tornou um padrão entre os clubes devido ao *driver* do motor, que proporcionava durabilidade, estabilidade e precisão, auxiliando na mudança do BPM e simplificando o *beat matching* (sincronia de batidas) entre duas músicas.

A partir de uma colaboração entre duas gigantes da indústria da música, a *Sony* e a *Philips* criaram o CD em 1979, uma nova mídia capaz de armazenar e reproduzir músicas de forma extremamente compacta, leve e mais barata do que o vinil. No ano



Figura 10 – CMA-10-2DL - primeiro mixer estéreo comercial ([MARQUES, 2019](#))



Figura 11 – Toca-disco SL-1200 ([32BITMASCHINE, 2008](#))

seguinte, a mesma colaboração desenvolveu o *Red Book Audio*, o formato de arquivo utilizado no CD, que emprega PCM (*Pulse Code Modulation*) na sua codificação. Esses avanços culminaram em 1982 com o início do consumo de CDs, que popularizou ainda mais o consumo de música ao redor do mundo.

Em 1986, a empresa Rane criou um mixer, visto na Figura 12, focado para *DJs* cuja qualidade se aproximava bastante daquela praticada em estúdios de música: o *MP 24 DJ Club Mixer*. Este desenvolvimento possibilitou um aumento significativo na qualidade do som reproduzido em clubes.

Em 1991, conforme Brewster e Broughton ([BREWSTER; BROUGHTON, 2014](#)), foi criado o MP3, um formato que permitiu a compressão de arquivos de áudio, eliminando conteúdo redundante. Rapidamente, esse método possibilitou o compartilhamento massivo de músicas pela internet.



Figura 12 – Mixer criado pela Rane ([RANE, 2008](#))

Nos anos 90, a *Pioneer*, que viria a se tornar uma gigante no mercado de equipamentos para *DJs*, começou a lançar uma série de produtos que facilitavam e ampliavam a atividade do *DJ*. Em 1992, a empresa lançou a primeira CDJ, um equipamento que integrava várias funções necessárias à mixagem, com suporte para CD. Em 2001, a *Pioneer* lançou uma CDJ com leitor de cartões de memória, e em 2007, uma CDJ capaz de ler dispositivos USB. Isso permitiu que *DJs* não precisassem mais carregar toda a sua discografia, bastando um dispositivo de memória digital para ter sua coleção à disposição.



Figura 13 – CDJ-300 - primeira CDJ da Pioneer ([PIONEER, 2024a](#))

Na década de 2010, grandes empresas possibilitaram que *DJs* tocassem músicas armazenadas na nuvem e disponíveis em plataformas de streaming. Em 2024, a *Apple* lançou o *Vision Pro*, um óculos de realidade aumentada capaz de emular equipamentos de *DJ*. Com o *Vision Pro*, um *DJ* pode demonstrar suas habilidades e sua coleção com apenas um óculos de VR. Esse equipamento pode ser visto na Figura 14.

Apesar das muitas soluções inovadoras para mixagem, a configuração mais comum atualmente é composta por duas CDJs e um *mixer*, como mostrado na Figura 15.

No entanto, ainda existem configurações que priorizam a qualidade sonora. Para esse público, continuam sendo produzidos equipamentos analógicos que remetem aos layouts de *mixers vintage*, como os *rotary mixers*, apresentados na Figura 16.



Figura 14 – Mixagem virtual com o *Apple Vision Pro* ([CARDOSO, 2024](#))



Figura 15 – Configuração mais encontrada ([PIONEER, 2024b](#))

A mixagem não se limita ao entretenimento em clubes. O papel de um curador musical remonta à época das rádios. Com a evolução da tecnologia de reprodução, armazenamento e gravação de música, a curadoria musical se tornou mais acessível.

A mixagem transcende a mera função de entretenimento. Desde a expansão do conceito de música proposta por John Cage ([CAGE, 2019](#)), no qual música se torna qualquer som, houve várias expansões conceituais tanto teóricas quanto práticas. Uma *mix* pode ser tanto o ato de um produtor musical ponderar a presença de cada instrumento ou canal em uma música quanto o ato de criar uma nova música a partir de várias, resultando em uma colagem sonora.

Uma *mix* possui estrutura e enredo, com início, meio e fim, e serve a diversos propósitos como entretenimento, relaxamento, meditação, cura, dança, apreciação e pesquisa, entre outros. Além disso, os ambientes de circulação são variados, incluindo



Figura 16 – *Rotary mixer* ([MIXERS, 2024](#))

páginas de *streaming*, festivais, festas e até mesmo sessões individuais de *bedroom djing* (*DJs* que tocam em sua própria casa, geralmente aprendendo a mixar). Nesse cenário, a liberdade do criador se estende para incluir não apenas misturas de músicas de diferentes gêneros, mas também a incorporação de trechos de áudio de entrevistas, livros, filmes, paisagens sonoras e arte sonora, resultando em uma experiência única.

Além disso, a adição de performances ao vivo, com a utilização de sintetizadores e qualquer dispositivo capaz de gerar som, amplia ainda mais as possibilidades criativas. Desde o uso de sinais elétricos provenientes de eletrodos até a integração de elementos inusitados, como performances ao vivo, as opções são verdadeiramente infinitas, limitadas apenas pela imaginação do criador.

2.4.5 Parâmetros físicos

Quando um *DJ* mixa músicas, diversos parâmetros devem ser considerados durante a execução de uma música ou no momento da transição entre duas, como batidas por minuto (BPM), tom, volume, ganho e a presença de componentes em bandas de frequência, como graves, médios e agudos.

A evolução dos equipamentos para *DJs* pode ser descrita pelo aprimoramento do controle de cada um desses parâmetros, visando um design que permita decisões rápidas com a menor latência possível na saída de áudio e, ao mesmo tempo, melhore o processamento do áudio para obter a melhor qualidade possível.

Para criar uma atmosfera musical ideal, o controle das bandas de frequência é crucial. Ele permite a adição e a subtração de elementos de uma música para criar uma

nova versão, que pode ser usada durante a transição entre músicas ou para dar uma nova roupagem a uma música existente. Por exemplo, pode-se adicionar batidas a uma música que não as possui ou adicionar vocal a uma música que é somente instrumental.

O equalizador foi criado, segundo Izhaki (IZHAKI, 2012), pelos *Bell Labs* com o objetivo de ajustar o que era transmitido ao ouvido devido à atenuação de altas frequências durante a transmissão do sinal pelos fios. No entanto, para a produção musical, o equalizador é utilizado para manipular o conteúdo das bandas de frequências dos diversos elementos musicais. A Figura 17 ilustra os dois tipos de divisões de bandas apresentados.



Figura 17 – Espectro de áudio (GLEESON, 2024)

Para a produção musical, considera-se a equalização em sete bandas:

- Subgrave: entre 20 e 60 Hz, onde estão elementos como bumbo e baixo.
- Graves baixos: entre 60 e 200 Hz, tonalidades associadas ao bumbo e ao baixo.
- Médios graves: entre 200 e 500 Hz, onde estão as frequências fundamentais que definem os tons naturais dos instrumentos.
- Médios centrais: entre 500 Hz e 2 kHz, onde estão os harmônicos de baixa ordem de vários instrumentos.
- Médios altos: entre 2 e 4 kHz, onde há harmônicos complexos.
- Presença: entre 4 e 7 kHz, onde estão pratos e brilho de vozes.
- Agudos ou Brilho: entre 7 e 22 kHz, onde há pouca energia para muitos instrumentos, mas essa banda é importante por estar associada ao brilho na música.

A quantidade de bandas e a definição dos intervalos podem variar entre teóricos e equipamentos, portanto, esses intervalos não são uma regra fixa. No entanto, para *DJs*, a maioria dos equipamentos divide o espectro de áudio em três bandas: graves (de 20 a 250 Hz), médios (de 250 Hz a 4 kHz) e agudos (de 4 kHz a 22 kHz).

Essa escolha de bandas reduzidas deve-se à necessidade de simplicidade e rapidez no uso, além de que, em cada uma dessas três bandas, há elementos semelhantes bem definidos, que auxiliam na construção de uma boa mixagem.

2.4.6 Equipamentos

Os equipamentos utilizados por *DJs* evoluíram significativamente ao longo do tempo. Inicialmente, utilizavam-se equipamentos improvisados para outras finalidades até que dispositivos específicos para mixagem foram desenvolvidos.

Existem inúmeras configurações possíveis para realizar uma mixagem, e a escolha dos equipamentos depende da fonte de música utilizada. Se a fonte for vinis, devem ser usados toca-discos. Se a fonte for um dispositivo de memória digital, como um pendrive ou cartão de memória, que armazena músicas organizadas por um *software* de gerenciamento, deve-se utilizar uma CDJ. Para performances ao vivo, onde o *DJ* produz música em tempo real, podem ser utilizados *notebooks*, sintetizadores, *samplers*, sequenciadores e muitos outros dispositivos especializados.

2.5 Mixer

Um dispositivo fundamental em qualquer *layout* de mixagem é o *mixer*, cuja função é misturar e controlar os canais de entrada de áudio. Embora existam várias possibilidades de controle, a mais comum é o ajuste das bandas de frequência para cada canal de entrada. Cada dispositivo de reprodução de música é considerado um canal de entrada. O *mixer* é capaz de controlar essas bandas de frequência, bem como somar os sinais de áudio para gerar um sinal de saída que é enviado para os alto-falantes.

2.5.1 Potência de Sinal de Áudio

É comum encontrar entradas *phono* em *mixers*, destinadas a dispositivos como toca-discos, que emitem sinais na ordem de miliVolts. Esses sinais precisam ser amplificados por um amplificador de potência antes de serem processados pelo sistema do *mixer*. Alguns dispositivos têm uma tensão de saída tão baixa que requerem um pré-amplificador para elevar o sinal ao nível de linha adequado para amplificação adicional.

Outra entrada comum é a *line*, que já apresenta sinais em nível de linha. Segundo Winer (WINER, 2012), esses sinais possuem dois níveis padrão: -10 dBV para equipamen-

tos não balanceados e +4 dBu para equipamentos平衡ados. Equipamentos de linha profissional geralmente são balanceados, com tensões RMS em torno de 1,23 V, enquanto equipamentos não balanceados, como aparelhos de som e TVs, têm tensões em torno de 0,316 V.

2.5.2 Cabeamento

Condutores desbalanceados possuem um fio para transmitir o sinal e um terra comum para referência. Por outro lado, condutores balanceados utilizam dois condutores para transmitir o sinal, cobrindo-os com uma blindagem.

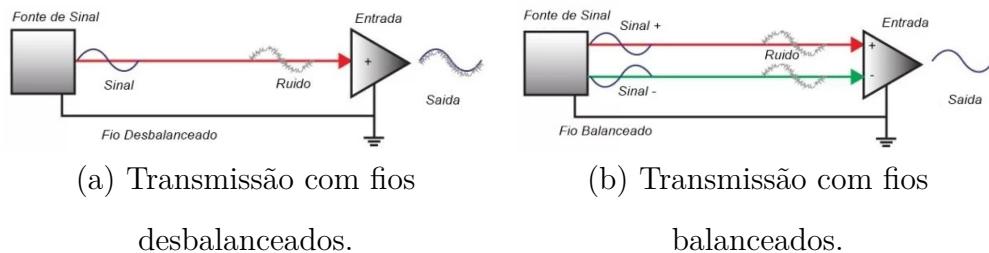


Figura 18 – Transmissão com fios desbalanceados e balanceados ([NEIMAR, 2023](#)).

Ao final da transmissão, um diferenciador é usado para reduzir o ruído adquirido durante a transmissão ([BARTLETT; BARTLETT, 2009](#)). A Figura 18 ilustra a transmissão de um sinal com ruído através de cabos desbalanceados e balanceados.

2.5.3 Conectores

Para conectar dispositivos, é necessário considerar tanto a transmissão de sinais elétricos quanto os conectores. Cada tipo de conector tem suas vantagens relacionadas a aspectos como quantidade de canais, distância, potência, blindagem e interferência.

Um dos conectores mais conhecidos é o 1/4", amplamente utilizado em instrumentos como guitarras, violões e teclados, além de amplificadores e *mixers*. Este conector pode ser usado para sinais estéreos não balanceados ou sinais mono balanceados ([BARTLETT; BARTLETT, 2009](#)). O conector 1/8", também conhecido como 3,5 mm, é muito encontrado em celulares, dispositivos de reprodução de música e alto-falantes. Internamente, ele possui a mesma construção do conector de 1/4" e pode transmitir os mesmos tipos de sinais. O conector de 2,5 mm, frequentemente utilizado em *headsets* para adicionar um microfone, possui três fios em vez de dois. A Figura 19 ilustra esses tipos de conectores.

O cabo RCA, amplamente utilizado nos primórdios dos sistemas de telefonia e também conhecido como *phono* devido ao seu uso em toca-discos, pode transmitir sinais de áudio mono de forma não-balanceada.



(a) Conector de 1/4".

(b) Conector de 1/8".

(c) Conector de 2,5 mm.

Figura 19 – Conectores de 1/4", 1/8"e de 2,5 mm ([ELECTRONICS, 2024](#)).

O conector XLR, inicialmente chamado de Cannon, foi desenvolvido pela empresa de mesmo nome para a transmissão de sinais平衡ados em aplicações profissionais, oferecendo boa rejeição a ruídos e mantendo a integridade do sinal.



(a) Conector RCA.

(b) Conector XLR.

Figura 20 – Conectores RCA e XLR ([RS, 2024](#)).

2.5.4 Amplificação de Potência

Os principais níveis de tensão e potência conectados a *mixers* são o nível *Phono* e o nível de linha. A tensão do *Phono* varia entre 0,1 e 5 mV, enquanto a tensão de um nível de linha é em torno de 2,0 V_{RMS}. É essencial que exista um intervalo adequado de níveis de tensão para garantir que o sinal se comporte corretamente dentro do amplificador ([SELF, 2013](#)). O sinal não deve ser tão baixo a ponto de os ruídos se tornarem mais proeminentes do que o próprio sinal, nem tão alto a ponto de causar saturação após a amplificação.

2.5.5 Equalização

Tradicionalmente, após a amplificação do sinal, o *mixer* permite o controle do ganho ou a atenuação dessas bandas de frequência. Durante o processo de mixagem,

diferentes combinações de ganho podem ser ajustadas conforme necessário, e, em um estágio posterior, todos os canais são somados para produzir o sinal final.

2.5.6 *Trim* e Volume

Quanto à amplitude do sinal de áudio, há dois controles que frequentemente estão presentes em *mixers*: *trim* e volume. O *trim* é um controle sobre o ganho que um sinal obtém antes de ser processado pelo *mixer* e passar pelos controles de equalização. Serve para que o usuário consiga ajustar dois tipos de sinais para que apresentem o mesmo nível ou a combinação desejada; uma mais presente que a outra.

Já o volume é geralmente visto em um controle de *fader*. Esse botão serve para controlar a amplitude do sinal enquanto o sinal é equalizado, ou seja, posteriormente à amplificação do sinal.

3 Metodologia

Essa seção é dividida em dois grandes blocos, que elucidam duas grandes etapas do projeto. Primeiramente, tem-se a prova de conceito, no qual fluxogramas visam explanar a lógica de funcionamento, apontando qual é a entrada e a saída daquele bloco, bem como, qual é o processamento realizado. A prova de conceito foi implementada em um *software* de síntese musical chamado *PureData*. Em seguida, encontra-se a seção sistema definitivo realizado em uma conjunção de *hardware* e *software*.

3.1 Proposta Geral

Este projeto propõe a criação de um *mixer* com um controle central que manipula dois arquivos de música. Em vez dos tradicionais controles de três bandas de frequência, o *mixer* utilizará filtros passa-altas. O controle central ajustará simultaneamente as frequências de corte de ambos os canais, permitindo uma transição suave entre as músicas. Além disso, o sistema incluirá dois efeitos, *delay* e *reverb*, que serão controlados através de um botão giratório, que determinará a intensidade do efeito aplicado.

Foram definidos os seguintes requisitos funcionais para o sistema:

- Realizar a leitura de arquivos de áudio no formato *.wav*;
- Permitir ao *DJ* controlar a frequência de corte;
- Permitir ao *DJ* controlar a presença dos efeitos.

Em relação ao desempenho, segurança, usabilidade e outros atributos qualitativos, temos os seguintes requisitos não-funcionais:

- Experiência de mixagem fluida, respondendo a comandos com latência mínima;
- Confiabilidade e estabilidade, operando por longos períodos sem falhas;
- Qualidade de som de alta fidelidade e com mínimas distorções;
- Interface com botões físicos ou controles táteis para ajustes;
- Organização lógica e intuitiva da interface, com controles agrupados por função;
- Indicações claras das funções dos botões de interação com o usuário;
- Interface de saída de áudio padrão *RCA*;

- Suporte a ampla gama de frequências de áudio, garantindo que os graves sejam reproduzidos com profundidade e os agudos sejam nítidos e claros;
- Mínimo risco de danos aos equipamentos de áudio conectados.

3.2 Fluxograma do Mixer

O *mixer* proposto é composto por sub-blocos de funcionamento interligados, conforme ilustrado na Figura 21.

De forma geral, o sistema opera em um ciclo contínuo de leitura de sinais, tanto das músicas quanto dos controles, e realiza modificações de parâmetros para processar os sinais, que, por fim, são reproduzidos. Cada ciclo pode ser representado na Figura 21.

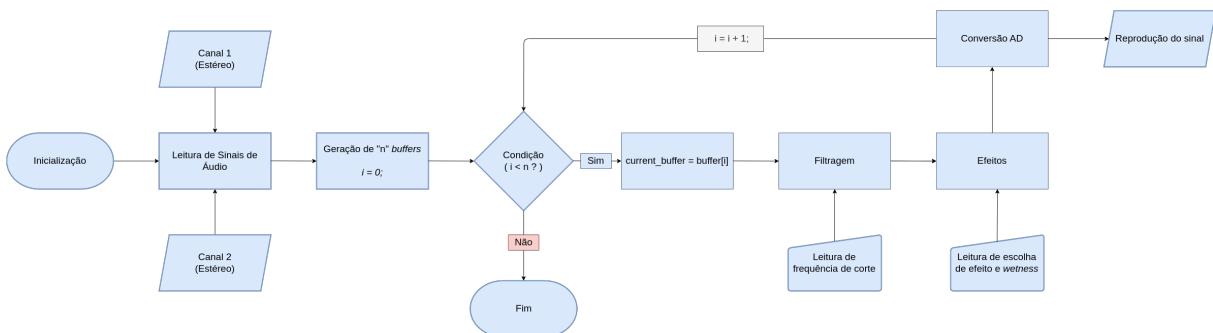


Figura 21 – Fluxograma geral do *mixer*

Os sinais provenientes de arquivos de música *.wav* locais entram no sistema e são divididos em *buffers*. Em seguida, é feita uma leitura dos valores atuais dos controles disponíveis na interface. Com os valores dos parâmetros obtidos, a filtragem dos sinais e o processamento dos efeitos são realizados novamente para ajustar o comportamento dos sinais conforme os novos valores dos controles. Os valores dos parâmetros de controle são atualizados a cada dez *buffers* lidos. Finalmente, os sinais filtrados e os efeitos são combinados e convertidos para o formato analógico, para que possam ser reproduzidos.

Nas subseções abaixo, cada bloco presente no fluxograma geral do sistema (Figura 21) será detalhado em seus aspectos conceituais e processuais por meio de um subfluxograma, que descreve o processamento interno.

3.2.1 Bloco de Leitura de Sinais

Os sinais lidos incluem os sinais provenientes de arquivos digitais e os de controle provenientes de dois potenciômetros e um botão de duas posições. Os potenciômetros são utilizados para ajustar a frequência central e a quantidade de efeito desejado, enquanto o botão de duas posições é utilizado para selecionar o efeito desejado.

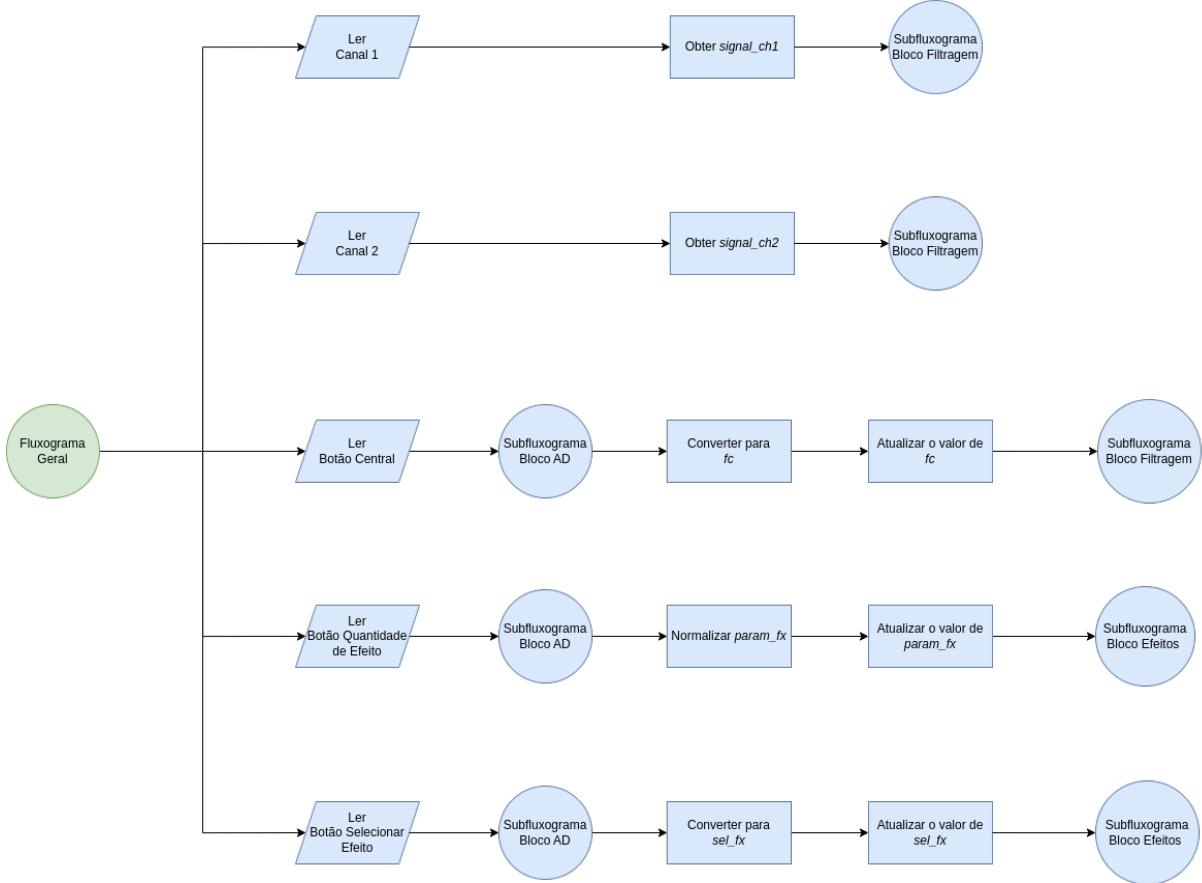


Figura 22 – Bloco de leitura de sinais

Assim, conforme a Figura 22, todos os sinais analógicos de controle passarão por uma conversão analógico-digital, para que, em seguida, algumas variáveis tenham seus valores atualizados. Enquanto isso, os sinais de música obtidos de arquivos digitais já se encontram em formato digital, mas são transformados em sequência de *buffers*.

3.2.2 Bloco de Filtragem

No bloco de filtragem, os sinais já estão no domínio digital. Primeiramente, deve-se ler a posição do botão central, que é obtida a partir da conversão de um sinal analógico proveniente de um potenciômetro, convertido de um sinal elétrico para um sinal digital. Com a posição do botão, que estará em um intervalo de valores quantizados, realiza-se a normalização e conversão para um valor de frequência de corte, variando entre 20 e 22.050 Hz. Este valor de frequência de corte é utilizado para atualizar o filtro passa-altas do canal 1, que então realiza a filtragem do sinal correspondente.

Para o canal 2, um novo valor de frequência de corte é calculado usando a expressão da Equação 3.1. O filtro passa-altas deste canal é então ajustado conforme a nova frequência de corte, conforme ilustrado na Figura 23.

No bloco de filtragem, todos os sinais analógicos já estão codificados de forma que

podem ser processados digitalmente. A frequência de corte central (fc) varia entre 20 e 22.050 Hz, e os valores são atribuídos aos parâmetros fc_1 e fc_2 .

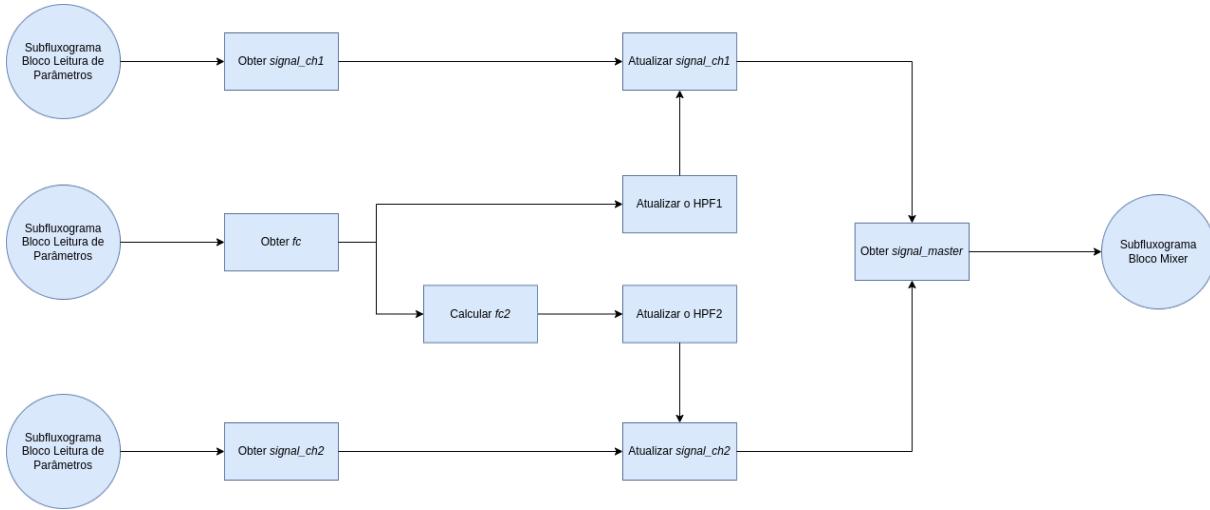


Figura 23 – Bloco de filtragem

No subfluxograma da Figura 23, fc representa a frequência de corte central, lida e convertida a partir do botão central; fc_1 é a frequência de corte para o filtro passa-altas 1 (HPF1) e fc_2 é a frequência de corte para o filtro passa-altas 2 (HPF2). Ao final deste processo, os sinais dos dois canais são combinados, resultando no sinal *signal_master*, que é enviado ao bloco de processamento de efeitos.

3.2.3 Bloco de Efeitos

Os efeitos do *mixer* podem ter seus parâmetros de reverberação e atraso configurados conforme o botão de quantidade de efeito. O parâmetro de reverberação é ajustado para 1 segundo, e o intervalo de atraso (em milissegundos) é configurado de acordo com a quantidade de efeito desejado. Além disso, o usuário pode selecionar qual efeito deseja utilizar através de um botão de duas posições, conforme ilustrado na Figura 24. Os parâmetros de seleção e quantidade de efeitos são obtidos do bloco de leitura de sinais. Ao final deste bloco, o sinal filtrado, já com o efeito aplicado, é atribuído ao *signal_master*.

3.2.4 Bloco de Conversão DA

O sinal de saída obtido pelo bloco *Efeito* precisa ser convertido de digital para analógico para que possa ser reproduzido em um sistema de som. Conforme mostrado na Figura 25, o sinal digital passará por um processo de conversão digital-analógico, para que possa ser finalmente reproduzido por caixas de som.

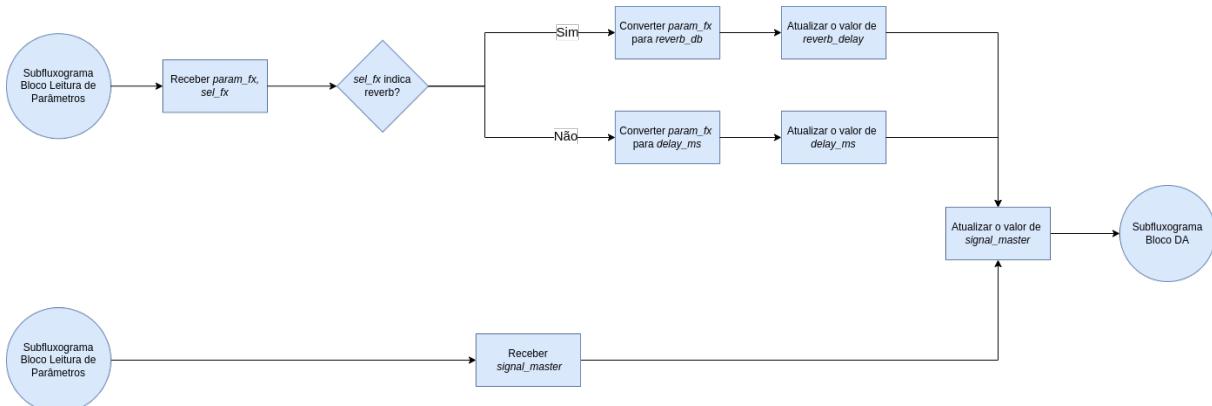


Figura 24 – Bloco de efeitos



Figura 25 – Bloco de conversão digital-analógico

3.3 Prova de Conceito

Nesta seção, é apresentada uma implementação em um ambiente virtual que simula a lógica de funcionamento do sistema.

3.3.1 PureData

O *PureData* (PUCKETTE, 2002) é um ambiente de música computacional programável, projetado para análise, síntese e processamento de áudio em tempo real através de sinais digitais. Esse ambiente permite a criação de sistemas de processamento de áudio utilizando blocos programáveis, com funções implementadas tanto pelos seus criadores quanto pela extensa comunidade de usuários.

No *PureData*, foi possível desenvolver uma prova de conceito que abrange a lógica do botão central para controle das frequências de corte, bem como o funcionamento dos efeitos (Fig. 26). Para simular os sinais de entrada, foram utilizados arquivos .wav locais. A demonstração do sistema se divide em três principais funcionalidades: leitura de arquivos, filtragem e efeitos.

3.3.2 Leitura de arquivos

Inicialmente, foi realizada a leitura de dois arquivos de música no formato WAV, utilizando as funções `open`, `start` e `stop` para localizar, iniciar e parar a reprodução, respectivamente. Em seguida, o comando `readsf~ 2 1e+06` foi utilizado para configurar

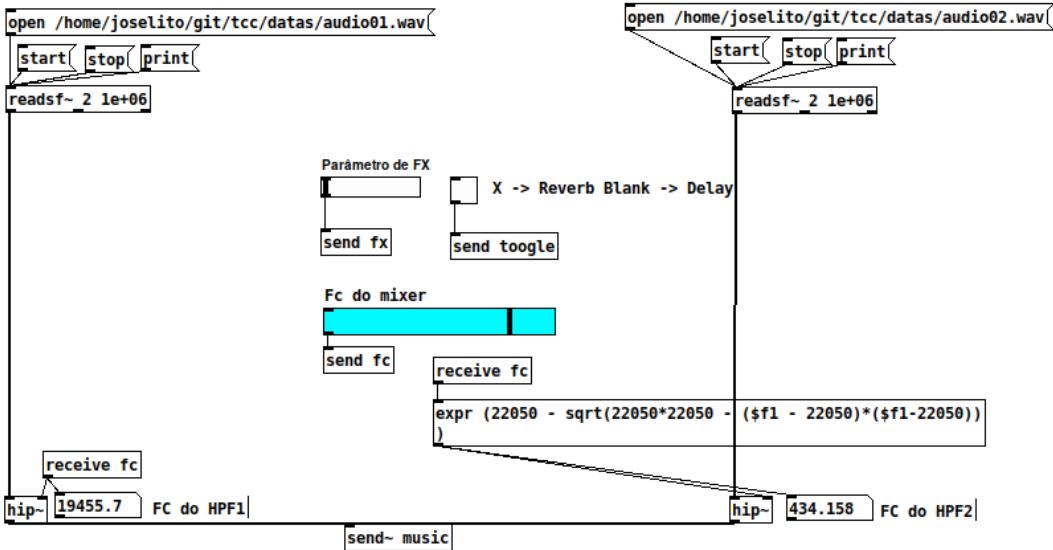


Figura 26 – Lógica de funcionamento do botão central no *PureData*

a leitura dos sinais em estéreo com um milhão de amostras no *buffer*. Este processo foi feito para ambos os arquivos.

3.3.3 Filtragem

Para aplicar a filtragem, utilizou-se a função `hip~`, que implementa um filtro passa-altas. No entanto, o argumento da função deve variar entre o canal 1 e o canal 2. Como mostrado na Figura 26, o canal 1 ("FC do HPF1") recebeu diretamente o parâmetro *fc*, proveniente do *slider* azul, e o filtro passa-altas do canal 2 ("FC do HPF2") utilizou um valor ajustado conforme a Equação 3.1, que descreve um círculo com raio igual à frequência de amostragem, com o botão centralizado no ponto (22050, 22050).

Para a obtenção dessa expressão que realiza a obtenção da frequência de corte 2 a partir da frequência de corte 1, partiu-se de uma função linear, que para fc_1 sendo 22050, a fc_2 deveria ser 0, e reciprocamente. Porém, esse comportamento linear não corresponde ao comportamento logarítmico de mudanças de frequência presente no som. Para isso, transformou-se a expressão linear em uma expressão derivada do terceiro quadrante da equação do círculo, de forma que, ao isolar a fc_2 , obteve-se a expressão 3.1.

Esse ajuste assegura que uma pequena variação em fc_1 resulte em uma grande variação em fc_2 , e vice-versa. Além disso, em frequências centrais, a variação entre os canais torna-se mais semelhante.

$$fc_2 = 22050 - \sqrt{22050^2 - (fc - 22050)^2} \quad (3.1)$$

Mudanças na ordem de centenas no canal 1 têm pouco impacto no canal 2, uma

vez que as baixas frequências têm um ganho maior em relação às altas frequências. Essa lógica também se aplica ao outro extremo do controle de frequência.

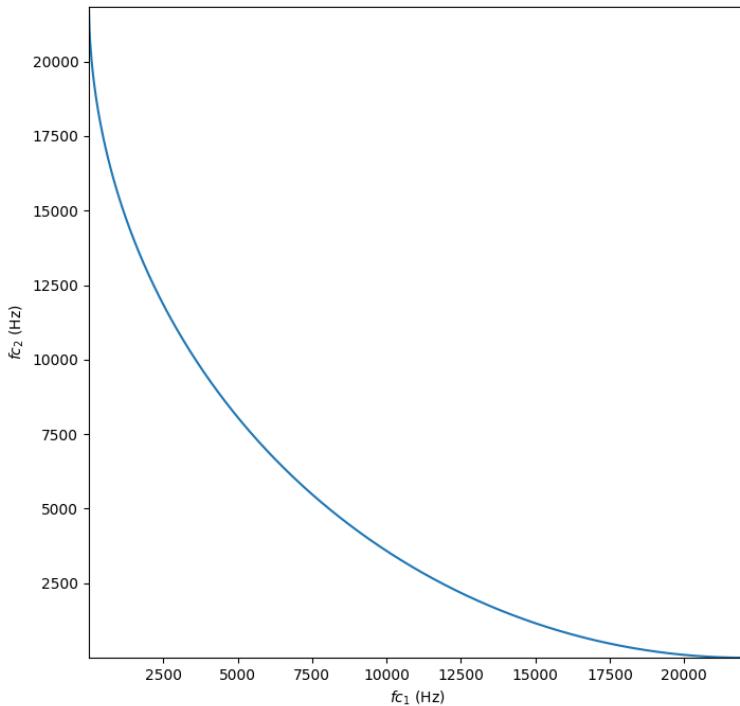


Figura 27 – Expressão para a fc_2

Assim, garante-se que, enquanto variações em baixas frequências devem ter passos lentos, simultaneamente, mudanças em frequências altas devem ter passos largos.

3.3.4 Efeitos

A implementação dos efeitos utiliza três parâmetros principais: um botão **toggle** para alternar entre os efeitos *delay* e *reverb*; um *slider* para ajustar parâmetros internos dos efeitos; e a frequência de corte do botão central, que automatiza o volume do efeito.

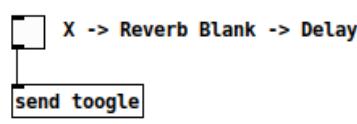


Figura 28 – Botão de seleção de efeito no *PureData*

O botão **toggle** é usado para alternar entre os efeitos. Com duas posições disponíveis, sempre um efeito está ativo. Para mudar o efeito, basta alterar a posição do botão, conforme mostrado na Figura 28. O *slider* é utilizado para ajustar os parâmetros internos de cada efeito. Seus valores variam de 0 a 1, e o botão está ilustrado na Figura 29.

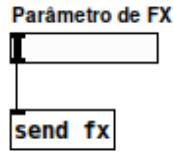


Figura 29 – Botão de quantidade de efeito no *PureData*

Cada efeito utiliza o parâmetro *fx* do *slider* e o ajusta conforme necessário. No caso do *reverb*, o valor de *fx* é multiplicado por 100 para determinar a quantidade de *dB* que permanece na música após 1s. Para o *delay*, o valor é multiplicado por 1000, transformando-se no intervalo de tempo em *ms* que o efeito permanecerá na música.

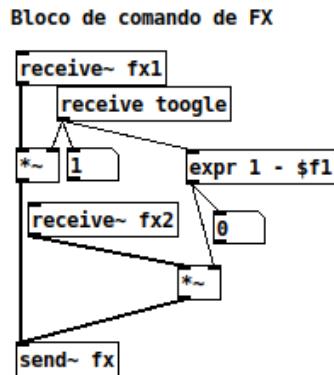


Figura 30 – Lógica de seleção de efeito no *PureData*

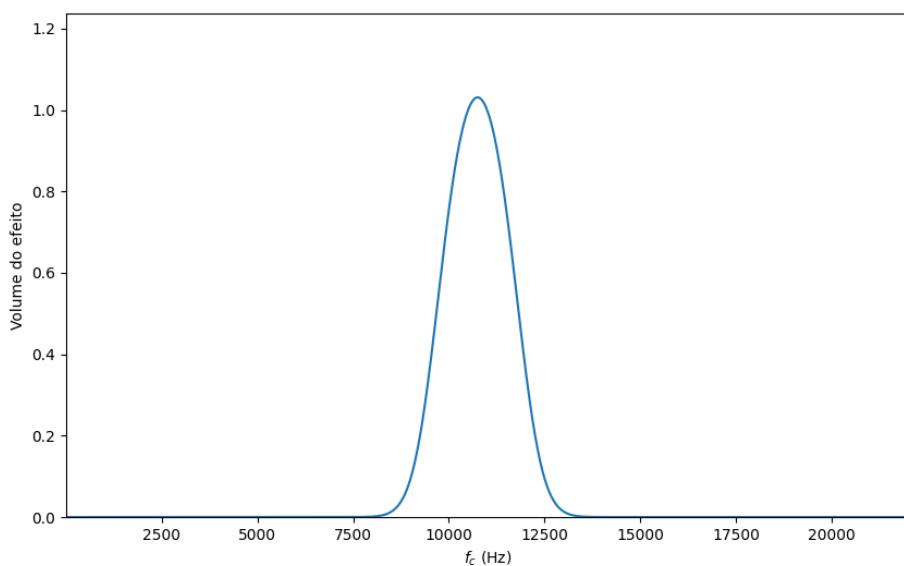


Figura 31 – Variação da amplitude dos efeitos no *PureData*.

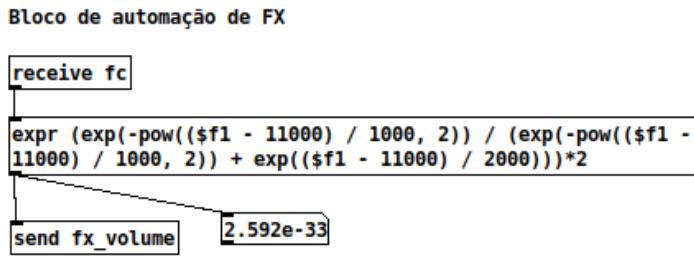


Figura 32 – Implementação da variação da amplitude dos efeitos no *PureData*

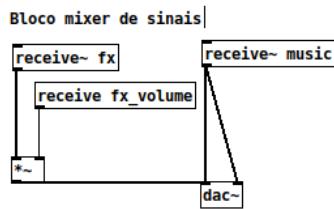


Figura 33 – Soma dos sinais filtrados e dos efeitos no *PureData*

A lógica de seleção do efeito é apresentada na Figura 30. Os comandos `receive~ fx` inserem os efeitos como entrada. Cada amplitude do efeito é multiplicado pelo valor do `toggle`; um deles é multiplicado pelo valor atual enquanto o outro é multiplicado pelo inverso, permitindo que o botão `toggle` funcione como um alternador entre os efeitos.

No sistema, a amplitude do efeito é ajustado automaticamente com base na posição do botão central, ou seja, nas frequências de corte. A Figura 31 ilustra a variação do volume dos efeitos em função da frequência central. No *PureData*, o bloco de automação da amplitude dos efeitos é implementado usando as operações mostradas na Figura 32.

Finalmente, o sinal dos efeitos é multiplicado pela amplitude dos efeitos e, em seguida, somado ao sinal filtrado, resultando no sinal de saída. Esse sinal é processado por um bloco de conversão digital-analógico e, por fim, é reproduzido. O bloco que realiza a soma dos sinais está representado na Figura 33.

3.4 Sistema definitivo

Em linhas gerais, utilizou-se uma placa *Raspberry Pi* para a escolha das músicas a serem enviadas ao *mixer*, para a aquisição de sinais analógicos responsáveis pelos controles de frequência e efeitos, além de, através do conector de 3,5 mm da placa, realizar a ligação ao equipamento de sistema de som para a reprodução.

3.4.1 Hardware

Esta seção descreve a proposta de implementação em *hardware* para o sistema de mixagem de áudio, abrangendo conectores, botões e outros componentes essenciais. Neste projeto, foram utilizados:

- 1 placa Raspberry Pi 4B;
- 1 fonte 5 VDC com cabo USB-C para alimentação da placa;
- 1 conversor AD/DA PCF8591;
- 2 potenciômetros de $10\text{ k}\Omega$;
- 1 chave HH de 2 posições;
- 1 cabo 3,5 mm.

A interação do usuário é crucial para ajustar parâmetros como frequência de corte, quantidade de efeitos e seleção do efeito desejado. Para isso, foram utilizados dois *knobs* para a escolha da frequência central e para o ajuste da quantidade de efeitos, e uma chave para a seleção de efeitos, conforme a Fig. 34. Os *knobs* oferecem uma leitura analógica, e a chave, uma leitura digital.



(a) Botão do tipo *knob*
para frequência central e
efeitos ([ROBOCORE, 2024](#)).

(b) Chave para seleção do
efeito ([EVEA, 2024](#)).

Figura 34 – Botão do tipo *knob* para frequência central e efeitos, e chave para seleção do efeito.

A conversão analógica-digital para os *knobs* foi feita utilizando um conversor PCF8591 ([SARAVATI, 2024](#)), que conta com uma resolução de 8 bits, e envia dados pelo protocolo I2C através do endereço *0x48*.

Para o processamento dos sinais, foi utilizada uma placa *Raspberry Pi* modelo 4B, que oferece um bom poder de processamento e flexibilidade em termos de linguagens

de programação suportadas. A conversão digital-analógico, necessária para que o sinal processado possa ser reproduzido por sistemas de áudio, foi feita pelo próprio *Raspberry Pi*, que conta com saída de áudio com conector de 3.5mm ([MOGNON, 2016](#)).

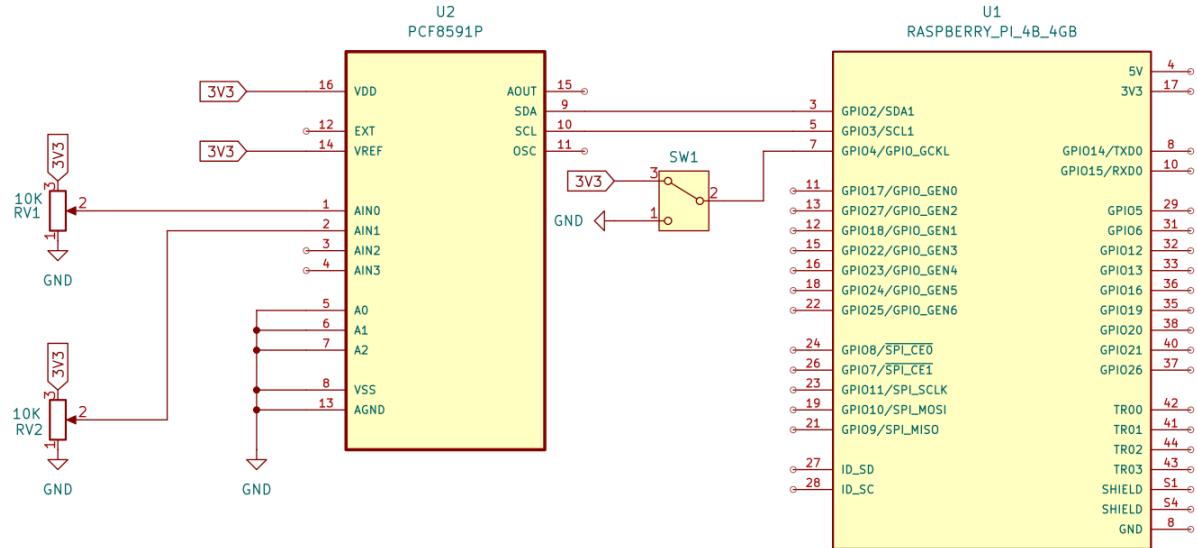


Figura 35 – Diagrama de Conexões

A Fig. 36 apresenta o esquemático do *hardware*, com as conexões necessárias para que os sinais de controle dos *knobs* sejam lidos pelo conversor PCF8591 e transferidos via I2C para a *Raspberry*. No circuito integrado PCF8591, as entradas A0, A1 e A2 definem o seu endereço I2C, que recebe o valor *0x48* quando estes pinos são aterrados. Outro componente utilizado foi a chave de duas posições, no diagrama 36, denominado de *SW1*.

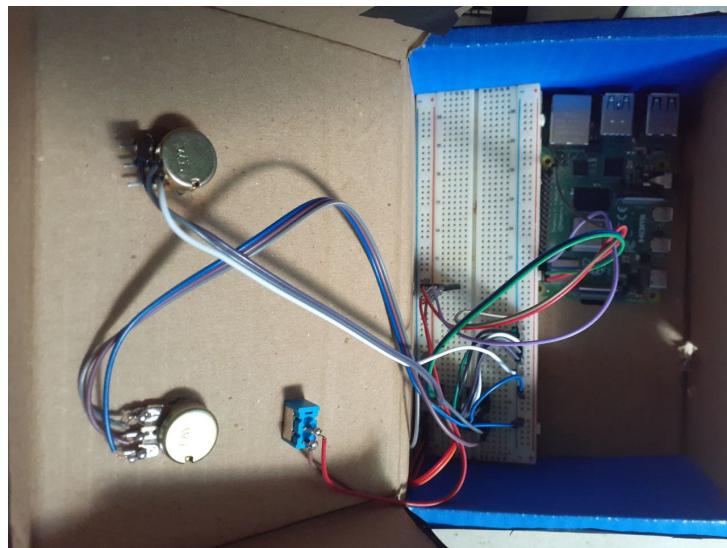


Figura 36 – Implementação em *hardware* do protótipo

3.4.2 Software

O processamento de sinais de áudio foi implementado utilizando várias bibliotecas, disponíveis na pasta *scripts*, na *branch main* no *link*: [Repositório do projeto](#), cada uma com funções específicas para cada etapa do processamento:

Alocação de memória Inicialmente, foram declarados ponteiros para armazenar os sinais de áudio e *buffers* de 1024 amostras para o processamento em blocos.

Aquisição Os sinais de áudio foram adquiridos através da leitura de arquivos *.wav* locais.

Geração dos Buffers A função *gerar_buffers_circulares* criou *buffers* circulares a partir dos sinais de áudio, permitindo um processamento contínuo. A função alocou memória para os *buffers*, e os preencheu com os sinais de áudio.

Aquisição dos Parâmetros de Controle Os parâmetros de controle, como frequência de corte e intensidade dos efeitos, foram adquiridos a cada 10 buffers, através de leituras I2C do dispositivo PCF8591.

Conversão de Frequências de Corte A frequência de corte para o canal 2 foi calculada como 255 menos a frequência de corte do canal 1, seguindo uma lógica de simetria.

Matriz de Coeficientes do Filtro FIR O filtro FIR foi carregado diretamente em memória, para evitar o recálculo a cada ciclo. Este filtro foi projetado empiricamente utilizando uma música de referência e o *software PureData*. A ordem do filtro foi determinada como 121, e o janelamento *Hamming* foi escolhido para melhor desempenho.

Aplicação do Filtro FIR A função *aplicar_filtro_FIR_buffer* aplicou o filtro FIR a cada amostra do sinal, garantindo que os valores filtrados não ultrapassem os limites de 16 bits. O projeto do filtro levou em consideração a atenuação necessária na banda de rejeição obtida através de teste no *PureData*. Com isso, obteve-se a ordem de 121 com sendo a mínima para o desempenho adequado do filtro. Além disso, testes que iteraram possíveis ordens com diferentes tipos de janela indicaram que a melhor janela a ser utilizada para essa aplicação seria a *Hamming*. Esse código de aplicação de filtro contém uma implementação de uma convolução das amostras com os coeficientes para determinada frequência de corte.

Efeito - Delay O efeito de *delay* foi implementado através de um *buffer* circular, onde o sinal era misturado com uma versão atrasada de si mesmo, controlada pelos parâmetros *wetness* e *feedback*.

Efeito - Reverb O efeito de *reverb* foi implementado de forma semelhante ao *delay*, mas com ecos mais curtos e numerosos, criando uma sensação de espacialidade. O sinal foi processado amostra por amostra, com *feedback* para intensificar os ecos.

Reprodução dos Buffers A reprodução dos buffers foi realizada utilizando a biblioteca *ALSA*. As funções `inicializar_audio` e `reproduzir_buffer` são usadas para configurar e reproduzir o áudio.

Processamento dos Buffers A função `processar_buffers_circulares` coordenou o processamento contínuo dos sinais, aplicando filtros e efeitos, e reproduzindo o áudio final.

4 Resultados

Neste Capítulo, são apresentados gráficos nos domínios do tempo e da frequência dos processamentos aplicados aos sinais de entrada, filtragem e efeitos. Esse capítulo se divide em duas partes: a primeira reune a análise dos resultados obtidos durante a prova de conceito utilizando o *PureData*. Já a segunda parte realiza os testes dos sinais obtidos a partir dos códigos implementados em C e hospedados na *Raspberry Pi*.

Uma consideração importante para as análises e visualizações dos dados é que as músicas utilizadas foram codificadas utilizando 16 *bits*. Escolheu-se trabalhar com os dados nesse formato pois é como a transmissão desses dados é realizada.

4.1 Prova de Conceito

Para validar o sistema proposto, foram realizados testes no ambiente virtual *PureData*, focando na filtragem controlada por um botão central e no funcionamento dos efeitos, incluindo o controle automático do volume e a configuração dos parâmetros de cada efeito.

O procedimento se inicia com a aquisição dos sinais advindos de arquivos de áudio. Em seguida, em função das frequências de corte, arquivos wav foram obtidos pelo PureData. Em seguida, esses arquivos foram lidos por *scripts* em *Python* para que Figuras que representem tanto o sinal no domínio do tempo quanto no domínio da frequência fossem obtidas.

4.1.1 Filtragem

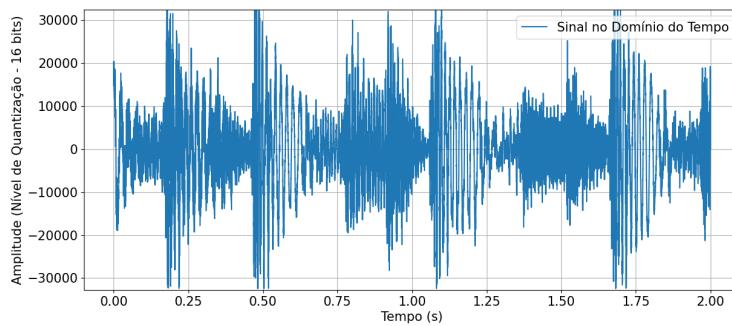
Nesta seção, são apresentados os resultados de ensaios realizados no ambiente virtual *PureData*, simulando a filtragem em diferentes frequências de corte.

Utilizaram-se duas músicas, ([JOCAFI, 2019](#)) e ([TYV, 2019](#)), das quais foram selecionadas janelas de dois segundos. A escolha desse intervalo considerou a presença de elementos de todas as bandas de frequência. A filtragem foi realizada usando filtros passa-altas com as seguintes frequências de corte: 0 Hz, 300 Hz (banda típica de filtros de baixas frequências de *mixers* convencionais), 4 kHz (localização de elementos médios, como visto no Cap. 2) e 22 kHz.

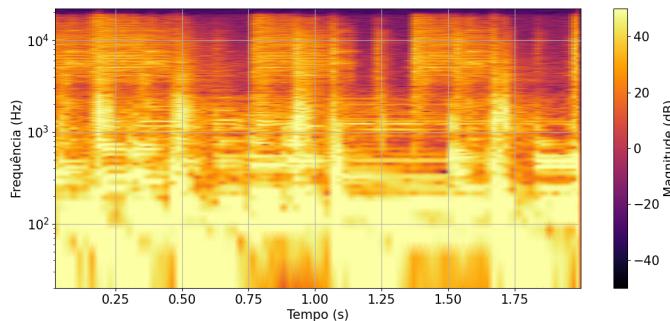
Para cada frequência de corte, foram obtidas as representações do sinal tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência, utilizando a Transformada de Fourier de Curto Prazo (STFT - *Short Time Fourier Transform*). As Figs. a seguir mostram as

representações em função da frequência de corte para ambas as músicas de referência.

Na Fig. 37a, é mostrada a janela do arquivo de áudio no domínio do tempo, evidenciando a presença de *kicks* e elementos de maiores frequências. Na mesma Fig., a STFT da mesma janela revela uma maior presença de elementos em baixa frequência. Também é possível observar a variação de elementos agudos ao longo da música.



(a) Domínio do tempo.



(b) Domínio da frequência.

Figura 37 – Gráfico de intervalo da Música 1 no domínio do tempo (a) e no domínio da frequência (b), ambos sem filtragem.

Os resultados das filtragens em 300, 4000 e 22000 Hz podem ser visualizados nas Figs. 38 a 40, mostrando que houve uma atenuação significativa dos sinais, evidenciada pelos valores máximos da amplitude. Observa-se também a ausência de sinais de baixa frequência, que estavam presentes como envelopes nos sinais não-filtrados.

A análise realizada na música 1 foi também aplicada à música 2. Os resultados obtidos no domínio do tempo e da frequência, utilizando a STFT, foram semelhantes aos observados para a música (JOCAFI, 2019). É importante notar que, conforme o botão de frequência de corte avança, a frequência de corte do filtro do canal 1 aumenta, atenuando primeiro as menores frequências e, em seguida, as maiores frequências. Em contraste, para o canal 2, a frequência de corte começa alta e diminui, ampliando as componentes de frequência do sinal da música (TYV, 2019).

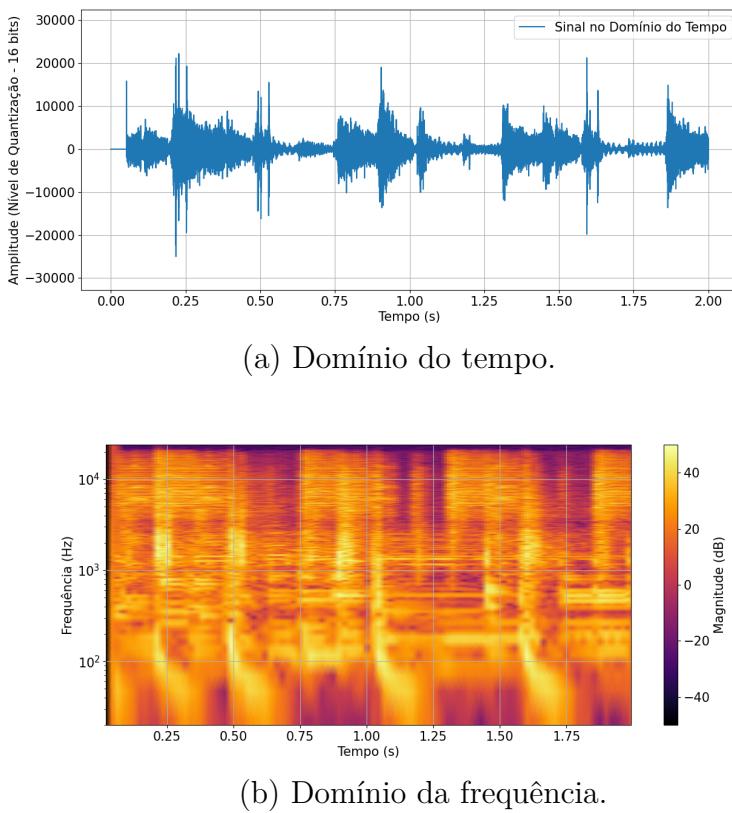


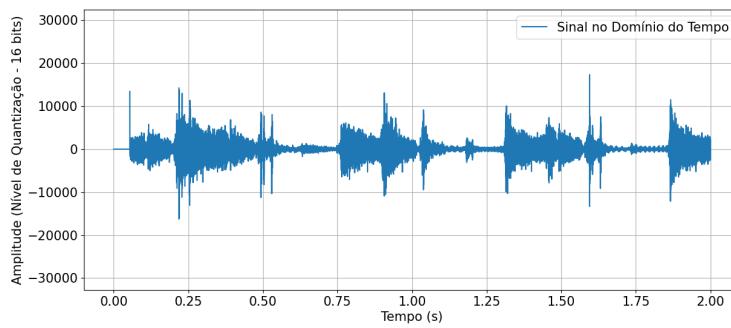
Figura 38 – Música 1 nos domínios do tempo (a) e da frequência (b), com uma frequência de corte de 300 Hz.

4.1.2 Efeitos

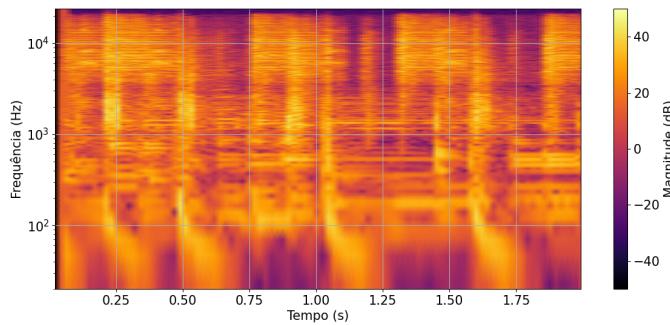
Os efeitos são controlados pela frequência central, que determina o volume do efeito, e um botão de duas posições, que seleciona o efeito a ser utilizado. Testes foram realizados para verificar essas operações. Primeiramente, simulou-se o volume do efeito em função da posição do botão central. Em seguida, foram realizadas simulações variando os parâmetros dos efeitos.

Automação de Efeitos

Para validar o controle automático do volume, isolou-se a saída dos efeitos e variaram-se as frequências, que geram diferentes volumes de efeitos, conforme mostrado na Fig. 41. A frequência central foi aumentada gradativamente, indo de um sinal constante e nulo na frequência de corte de 0 Hz, para 0,3312 (9454 Hz), 0,6625 (9875 Hz) e 1,0 (11025 Hz). Repare como as amplitudes dos sinais da Fig. 41 aumentam gradativamente.



(a) Domínio do tempo.



(b) Domínio da frequência.

Figura 39 – Música 1 nos domínios do tempo (a) e da frequência (b), com uma frequência de corte de 4 kHz.

Reverb

Para validar o controle do efeito de *reverb*, o botão central foi posicionado para garantir que a frequência selecionada resultasse no volume máximo do efeito. Em seguida, ajustou-se a posição do botão de presença do efeito para observar a variação dos parâmetros. No caso do *reverb*, a quantidade de dB presente após 1 segundo é configurada conforme o botão de parâmetro.

Nas Fig. 42, são apresentadas representações do sinal no domínio do tempo, ilustrando a variação desse parâmetro. O intervalo de dB proposto no sistema varia de 0 a 100 dB. O efeito de *reverb* foi cada vez mais pronunciado, resultando em um som com pouca definição no último gráfico, comprometendo a clareza da música.

Delay

O efeito de *delay* consiste em repetir o sinal após um determinado intervalo de tempo. A Fig. 43 ilustra o comportamento do efeito com diferentes configurações de atraso.

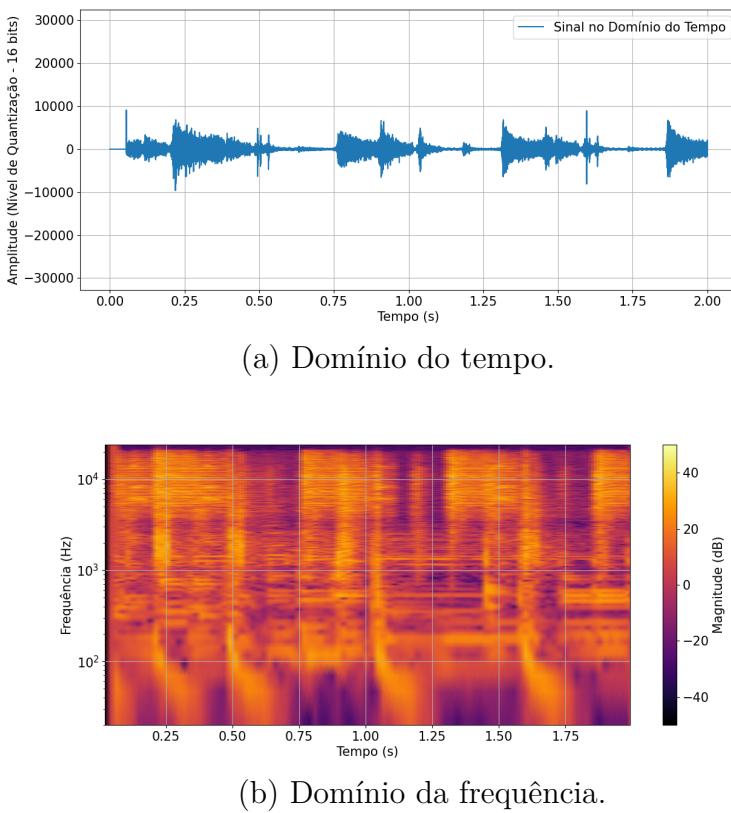


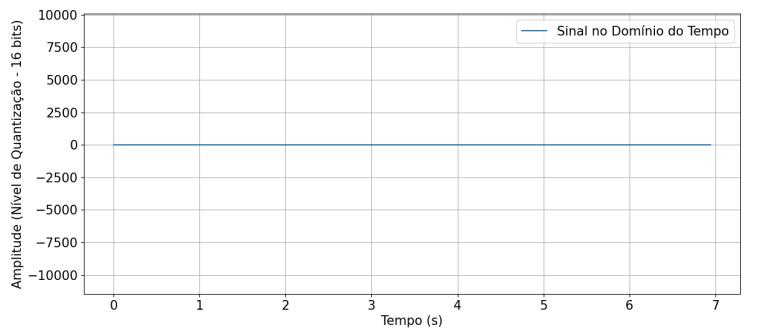
Figura 40 – Música 1 nos domínios do tempo (a) e da frequência (b), com uma frequência de corte de 22 kHz.

4.2 Sistema definitivo

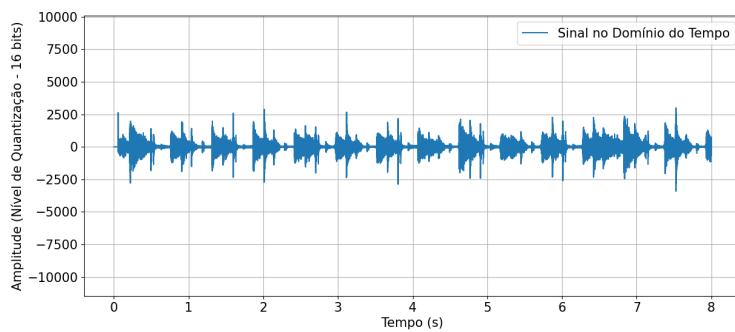
Nessa seção dos resultados, serão apresentadas as metodologias utilizadas para se obter os sinais de áudio para validar a funcionalidade da filtragem e dos efeitos. A estrutura será similar àquela feita para os sinais obtidos do *PureData* para que um paralelo seja estabelecido a fim de compreender melhor os resultados obtidos. Resultados em formato de vídeo para a visualização do pleno funcionamento do sistema estão disponíveis no *README* no *GitHub* do projeto, disponível no *link*: [Repositório do TCC](#).

4.2.1 Filtragem

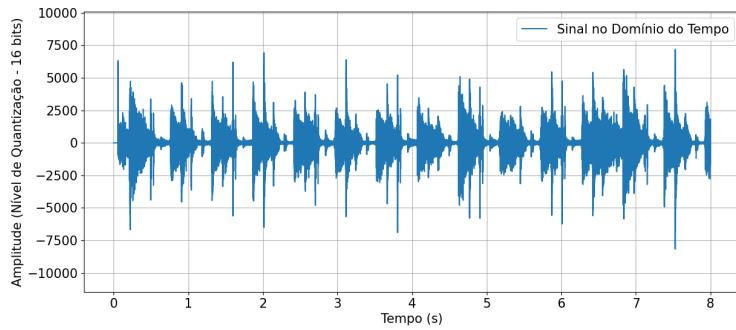
Como a conversão analógico digital de 8 *bits* das frequências de corte limita a quantidade de pontos possíveis, para que essa análise se assemelhe àquela feita na prova de conceito, utilizou-se frequências de corte que se aproximasse mais daquelas utilizadas, que foram: 20 Hz, 300 Hz, 4 kHz e 22050 Hz, de forma que as frequências de corte utilizadas nesta análise foram: 20 Hz, 303 Hz, 4015 Hz e 22050 Hz. Nos resultados da prova de conceito, a filtragem foi analisada no ponto 0 Hz, mas como o filtro foi implementado para funcionar na banda de som audível, ou seja, entre 20 e 22050 Hz, a análise neste



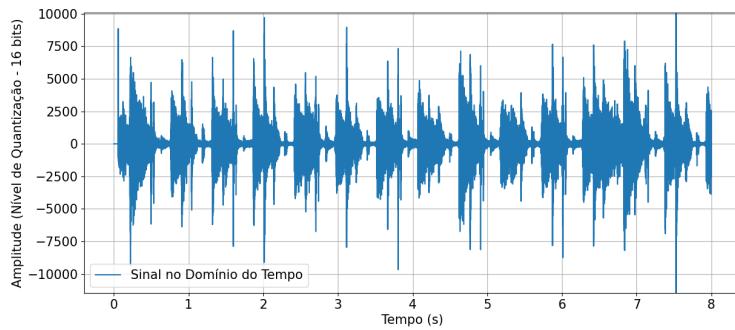
(a) Volume 0.0.



(b) Volume 0.3312.

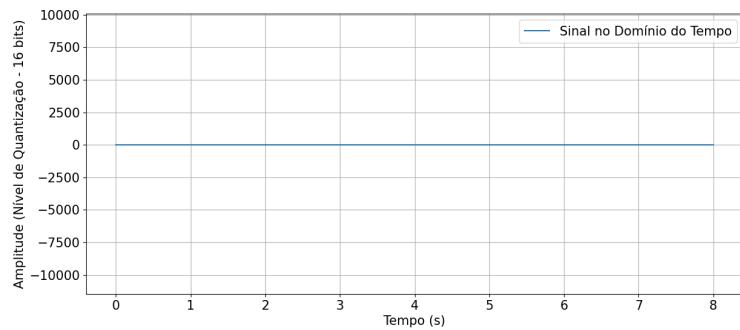


(c) Volume 0.6625.

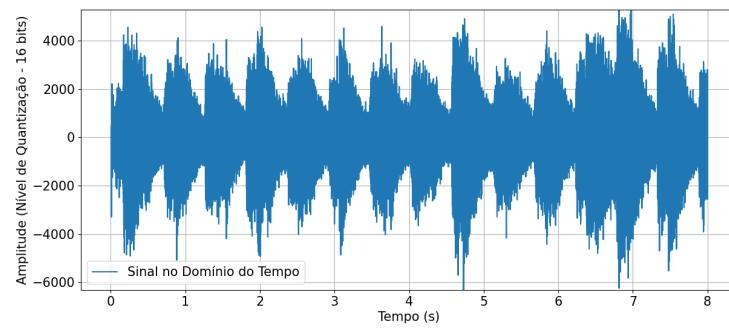


(d) Volume 1.0.

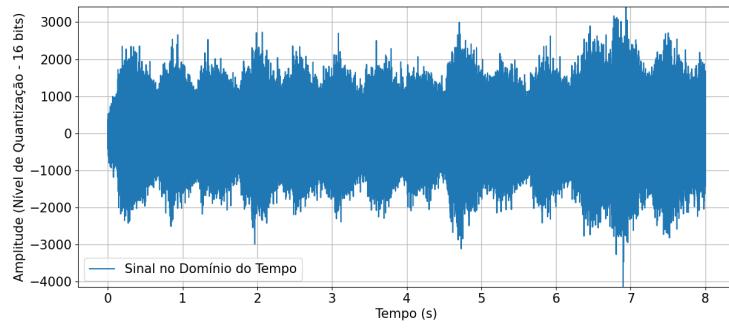
Figura 41 – Canal de efeito *reverb* isolado com música 1 a volumes de 0.0, 0.3312, 0.6625 e 1.0.



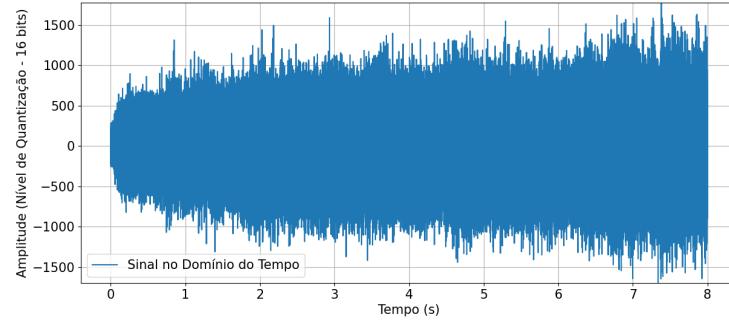
(a) 0 dB após 1 segundo.



(b) 25 dB após 1 segundo.

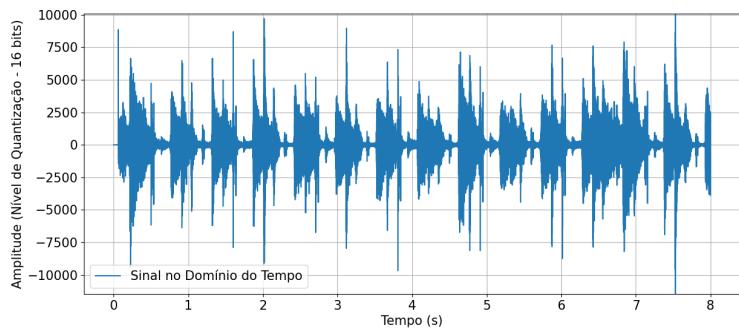


(c) 50 dB após 1 segundo.

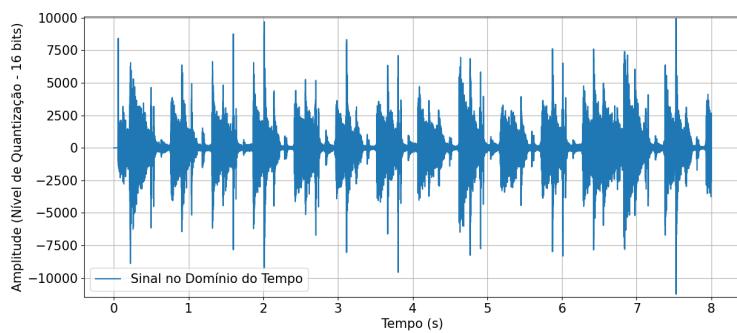


(d) 100 dB após 1 segundo.

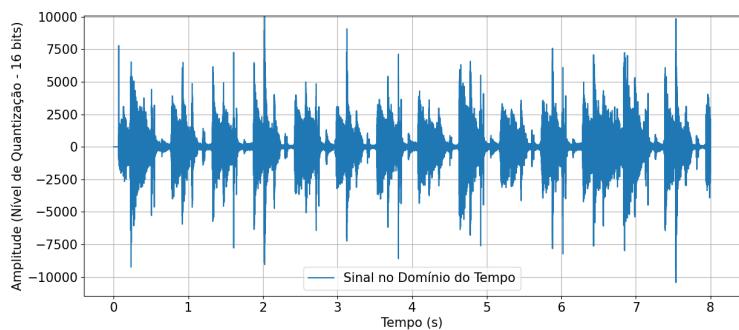
Figura 42 – Sinal com efeitos de *reverb* a 0, 25, 50 e 100 dB após 1 segundo.



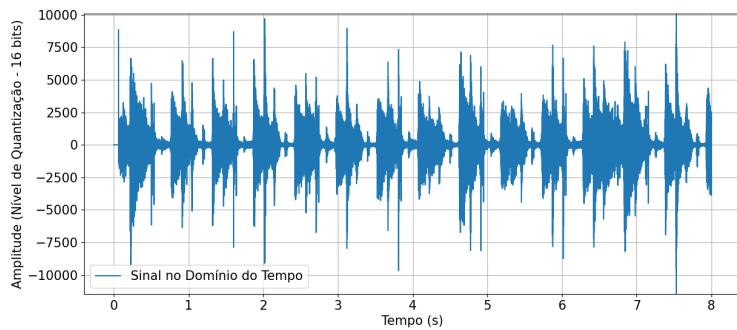
(a) Delay 0 ms.



(b) Delay 250 ms.

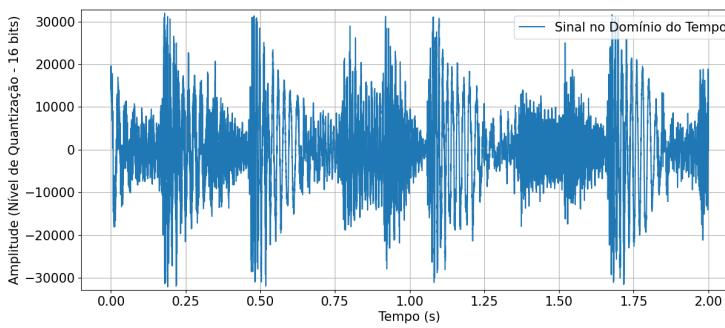


(c) Delay 500 ms.

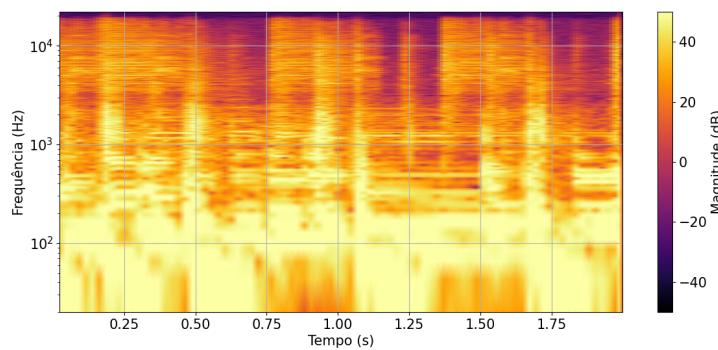


(d) Delay 1000 ms.

Figura 43 – Sinal com efeitos de *delay* de 0, 250, 500 e 1000 ms.



(a) Música 1 no domínio do tempo com filtro de 20 Hz.



(b) Música 1 no domínio da frequência com filtro de 20 Hz.

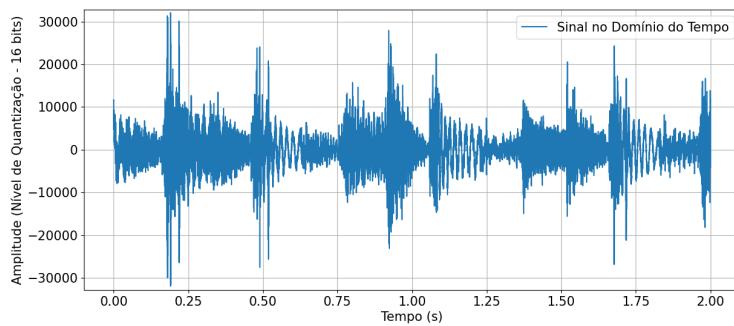
Figura 44 – Música 1 nos domínios do tempo e da frequência, com filtro de 20 Hz.

ponto não foi possível, mas como os sinais são confinados na banda de som audível, o resultado esperado para 0 Hz seria o mesmo daquele obtido para 20 Hz.

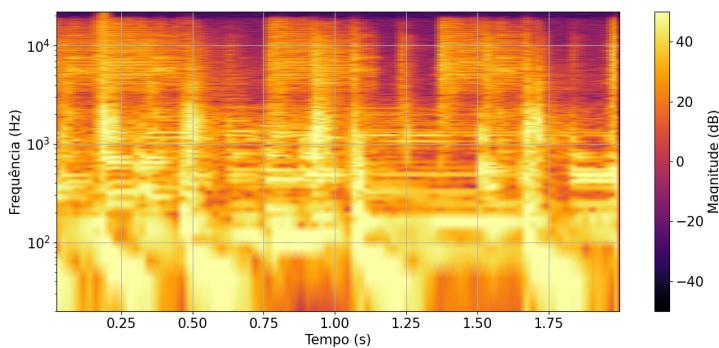
Nos resultados da prova de conceito, um sinal foi obtido após a filtragem de um canal apenas para que a análise em frequência pudesse ser realizada de forma que se pudesse analisar a efetividade da filtragem em um sinal específico. Nesta etapa, como o código filtra os dois áudios e em seguida os unifica, um áudio "branco", composto de amostras nulas, foi gerado para que apenas a influência de um canal seja percebido. Além disso, o mesmo sinal de teste utilizado para a prova de conceito foi utilizada nesses testes (JOCAFI, 2019).

A análise da filtragem foi feita elencando frequências de corte para verificar a efetividade do processamento de forma que toda a banda pudesse ser contemplada. Assim, iniciou-se com a frequência de corte mais baixa, que é a de 20 Hz (Fig. 44).

Alterando-se as frequências de corte para 303 Hz (Fig. 45), percebe-se que componentes cujas variações eram mais lentas foram eliminadas, resultado esperado após realizar uma filtragem passa-altas em 303 Hz. Ao escutar esse sinal, percebeu-se que boa parte dos sons mais graves foram bastante atenuados. Outro ponto importante para a análise da efetividade da filtragem é que a amplitude de sinais de frequências maiores foi mantida,



(a) Música 1 no domínio do tempo com frequência de corte de 303 Hz.



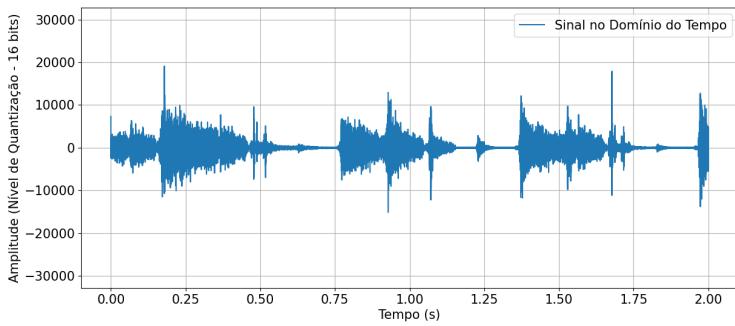
(b) Música 1 no domínio da frequência com frequência de corte de 303 Hz.

Figura 45 – Música 1 nos domínios do tempo e da frequência, com frequência de corte de 303 Hz.

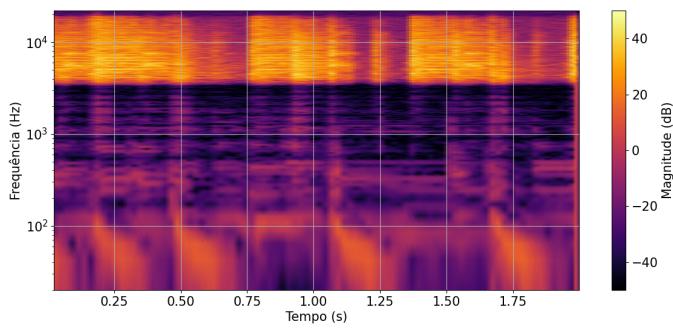
que se pode verificar com os picos presentes nessa Figura. Repare que no sinal original há uma faixa bastante definida em torno de 100 Hz (Fig. 44b), e a mesma, após a filtragem, já se encontra bastante atenuada.

Na frequência de corte em 4015 HZ (Fig. 46), pode-se ver que as componentes entre 20 e 4015 Hz foram atenuadas, restando ao sinal apenas as componentes dessa banda superior. Com isso, o sinal fica com variações de altas frequências cujas amplitudes são menores. Ao realizar a escuta do sinal resultante, a saída pode ser descrita como se um sinal estivesse apenas ecoado, com sinais estridentes, característicos de altas frequências. Na frequência de corte de 22050 Hz (Fig. 47), pode-se ver que todas as componentes do sinal são atenuadas.

Portanto, com essas análises dos sinais tanto no tempo quanto na frequência para variados pontos, atesta-se a eficiência do filtro utilizado bem como a sua configuração feita com o janelamento e a ordem dos filtros.



(a) Música 1 no domínio do tempo com frequência de corte de 4015 Hz.



(b) Música 1 no domínio da frequência com frequência de corte de 4015 Hz.

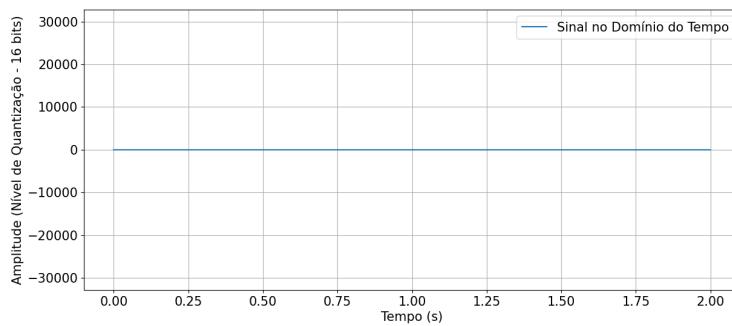
Figura 46 – Música 1 nos domínios do tempo e da frequência, com frequência de corte de 4015 Hz.

4.2.2 Efeitos

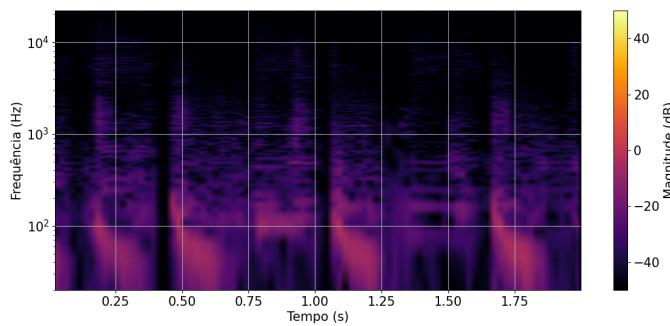
Na implementação do sistema, a lógica de presença dos efeitos foi alterada para dar mais liberdade à mixagem. Antes, o efeito era controlado pela frequência de corte, que determinava o volume do efeito a ser adicionado no sinal de saída. Porém, nesta implementação, o usuário pode escolher a intensidade através de um potenciômetro.

Quando se diz intensidade, a variável chamada *wetness* é invocada, de forma que esse parâmetro indica quanto sinal seco (sinal original) e "molhado" (sinal com efeito) estarão presentes no sinal final. Quando maior o *wetness*, mais o efeito estará presente.

Os resultados em relação aos efeitos na prova de conceito foram obtidos variando o volume do efeito, que consequentemente determina a presença do efeito no sinal final. Neste caso, o volume deu lugar ao *wetness*, de forma que os resultados para os efeitos foram obtidos para os seguintes valores de *wetness*: 0.0, 0.33, 0.66 e 1.00.



(a) Música 1 no domínio do tempo com frequência de corte de 22050 Hz.



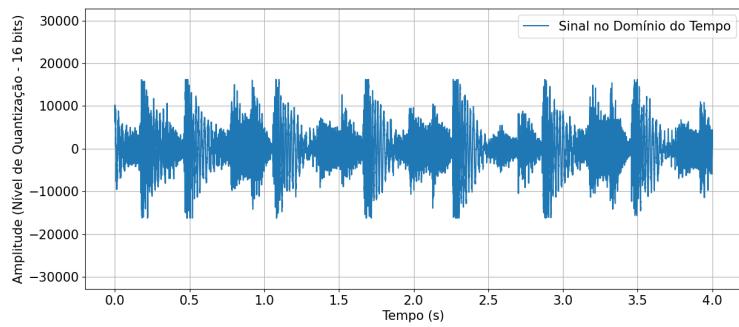
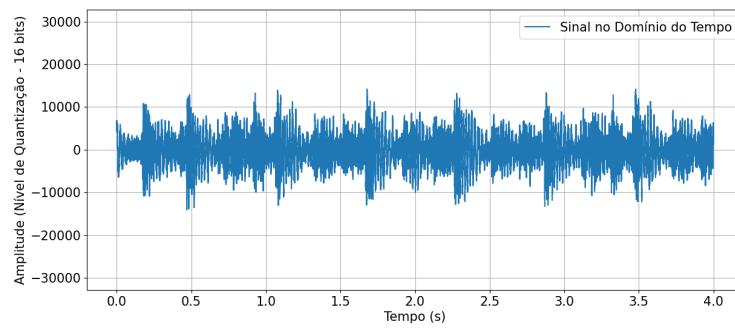
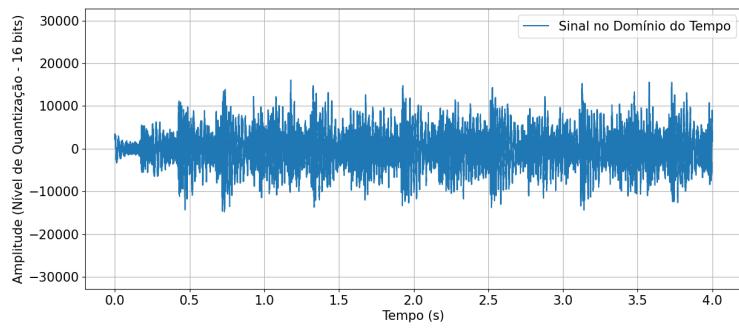
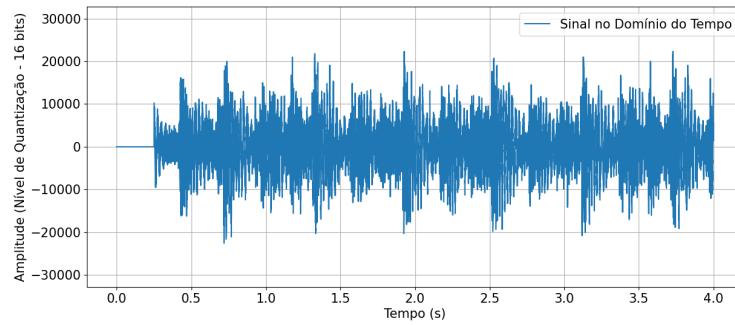
(b) Música 1 no domínio da frequência com frequência de corte de 22050 Hz.

Figura 47 – Música 1 nos domínios do tempo e da frequência, com frequência de corte de 22050 Hz.

Delay

Para atestar a efetividade da implementação do código para o *delay*, obteve-se os sinais de saída para cada valor do parâmetro *wetness*. Como esse efeito é baseado na repetição de amostras anteriores, ou o atraso de reprodução de cópias correntes, a representação no domínio do tempo se mostra suficiente para se verificar a atuação do efeito em função do parâmetro de mistura entre o sinal original e o processado pelo efeito. Para a realização desses testes, a frequência de corte utilizada na etapa de filtragem foi a de 20 Hz, mantendo praticamente o mesmo sinal que adentrava o filtro.

Ao se configurar o parâmetro de mistura como 0,00, entende-se que apenas o sinal original será transmitido pela saída do efeito. Portanto, o sinal presente na Fig. 48a nada mais é que o sinal original, também presente na Figura 44a, porém, com a amplitude dividida pela metade, visto que, ao se unificar os canais 1 e 2, realiza-se uma média entre as amostras. Como o canal 2 possui uma música com componentes nulas, a representação final é basicamente o sinal 1 pela metade. Outro ponto importante é que caso o usuário não queira a presença de efeitos, o parâmetro nulo de *wetness* funciona como uma chave liga-desliga para o efeito utilizado.

(a) Música 1 com *delay* e *wetness* 0.0.(b) Música 1 com *delay* e *wetness* 0.33.(c) Música 1 com *delay* e *wetness* 0.66.(d) Música 1 com *delay* e *wetness* 1.0.Figura 48 – Música 1 com *delay* a valores de *wetness* de 0,0, 0,33, 0,66 e 1,0.

Quando o parâmetro de mistura aumenta, uma combinação linear entre o sinal original e o sinal com efeito é realizada, de forma que se o *wetness* é 0,33, as amostras do sinal original são multiplicadas por um fator de 0,67, enquanto os sinais dos efeitos são aplicados a um fator de 0,33. Dessa forma, diferente dos resultados de efeito *delay* obtidos pelo *PureData*, nos quais era possível verificar o aumento do atraso conforme o aumento do parâmetro, nesta implementação desse efeito, o aumento do parâmetro de controle não aumenta o atraso, mas sim a presença do sinal processado com o efeito pré-configurado, e diminui os sinais originais.

Assim, no gráfico da Fig. 48b, a atenuação da amplitude do sinal original é observada, visto que o contorno principal do sinal cai para uma mesma faixa. Junto com o sinal original, encontra-se o sinal atrasado em 0,5 segundo, com uma amplitude de 0,34 do seu valor original. Dessa forma, tanto o sinal original quanto o atrasado se fazem presentes. Ao se escutar o sinal de saída, percebe-se que o efeito de *delay* foi realizado com sucesso, visto que uma sensação de eco é criada.

Ao aumentar o valor do *wetness* para 0,66, o sinal original decai mais ainda para 0,33 da sua amplitude original, enquanto o sinal com efeitos tem um fator de 0,67, e, com isso, o que se vê no gráfico da Fig. 48c é a maior presença de um sinal atrasado e a queda do sinal original. No sinal de saída, percebe-se mais ainda a sensação de eco provocada por esse efeito.

Ao se definir o valor do *wetness* para 1,00, apaga-se o sinal original, dando espaço apenas ao sinal atrasado. Porém, na implementação desse efeito, existe um fator de *feedback*, que faz com que amostras anteriores sejam realimentadas. Por isso, o sinal final não é apenas um sinal atrasado, fato comprovado na escuta dessas amostras. Então, por mais que o gráfico da Figura 48d dê a entender que o sinal está simplesmente atrasado, ainda há a presença de uma sensação de *delay* devido ao *feedback* criado. Outro ponto importante que pode ser observado é o atraso de 0,5 segundo existente na amostra com efeitos, visto que percebe-se que o sinal se inicia com esse atraso pré-estabelecido.

Assim, com esses resultados, foi possível validar a implementação do efeito *delay*, e, apesar que há inúmeras formas de se implementar esse efeito, a forma escolhida, que envolve a definição de um tempo de atraso fixo, com um parâmetro que realiza a ponderação entre o sinal original e o sinal com efeito, se mostrou eficiente para gerar o efeito desejado.

Reverb

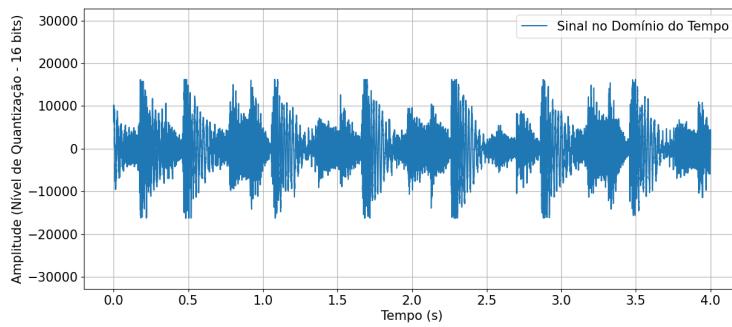
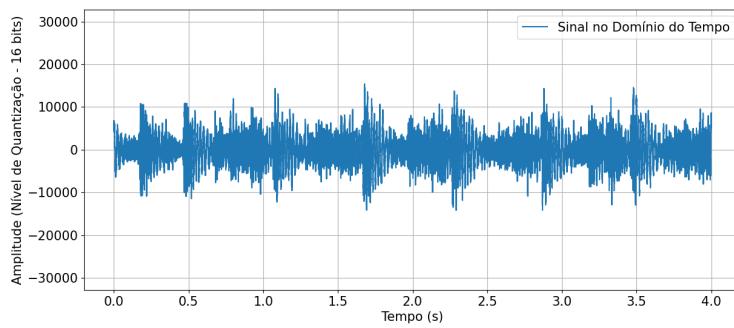
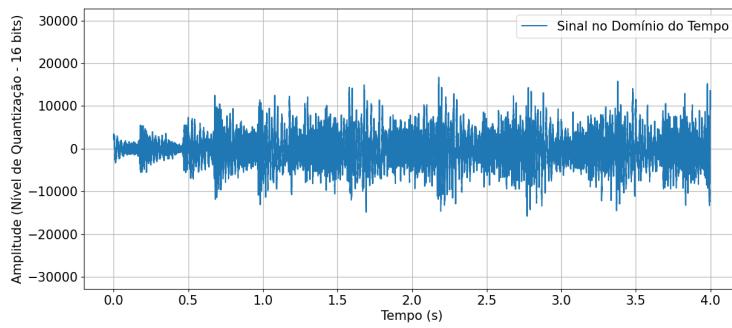
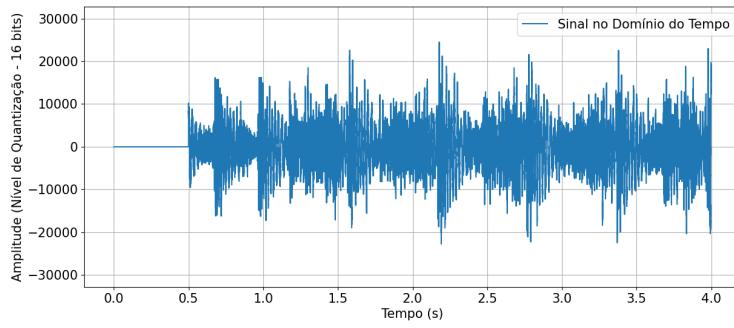
Da mesma forma como nos resultados para o *delay*, os resultados para o efeito *reverb* foram obtidos variando o valor do parâmetro de mistura *wetness* para os mesmos valores de 0,0, 0,33, 0,66 e 1,0.

Percebe-se muita semelhança entre os resultados para *delay* (Fig. 48) e *reverb* (Fig. 49) para os mesmos casos de parâmetro de mistura. Essa semelhança ocorre devido à forma com que o efeito *reverb* é construído. Enquanto *delay* é um atraso gerado nas amostras correntes, o *reverb* partilha do mesmo princípio mas em mais camadas, visto que esse efeito funciona como se fosse um banco de *delays*. Daí se entende a semelhança entre os dois. Além disso, percebe-se que conforme se aumenta o *wetness*, o sinal do *reverb* se torna menos definido, devido à maior presença do efeito, fazendo com que esse banco de *delays* atua com mais presença.

A primeira representação dos sinais processados dessa seção, Fig. 49a, novamente, é uma representação do sinal original, de forma que esse traçado é tido como referência para os demais gráficos da Fig. Devido à construção desse efeito que, em comparação com o *delay*, possui um *feedback* mais suave e distribuído, o sinal resultante não demonstra com clareza a execução do efeito. Porém, pode-se observar a atuação do parâmetro *wetness*, que faz com que a amplitude do sinal original seja atenuada. Nesse caso, como os *delays* são mais numerosos mas mais suaves, a presença do efeito se dá de forma efetiva na escuta do sinal resultante, o que foi comprovado em sua escuta.

Novamente, ao se definir o valor do *wetness* para 1.00, apenas o sinal processado pelo efeito de reverberação é aplicado ao sinal resultante, como se pode ver no gráfico da Fig. 49d. E ao se escutar o arquivo final, percebe-se com clareza o efeito de reverberação, com muitas camadas de ecos aplicadas ao sinal original.

Dessa forma, ao se analisar as representações dos sinais processados no domínio do tempo, observou-se que conforme se aumentou o parâmetro *wetness*, a música perde muita da sua definição, e não se consegue concluir visualmente a presença do efeito de reverberação. Porém, ao se realizar as escutar dos sinais resultantes, conclui-se que o efeito foi aplicado de forma satisfatória.

(a) Música 1 com *reverb* e *wetness* 0.0.(b) Música 1 com *reverb* e *wetness* 0.33.(c) Música 1 com *reverb* e *wetness* 0.66.(d) Música 1 com *reverb* e *wetness* 1.0.Figura 49 – Música 1 com *reverb* a valores de *wetness* de 0,0, 0,33, 0,66 e 1,0.

5 Conclusões

A evolução dos equipamentos relacionados à mixagem de *DJs* anda de mãos dadas com o próprio desenvolvimento da eletrônica como um campo maior, sendo as inovações feitas por pessoas que se interessavam tanto pela eletrônica quanto por música, e a partir de suas vontades e anseios, decidiam desenvolver novas soluções com o que a eletrônica oferecia.

Assim, esse trabalho visou a criação de um *mixer* que lesse dois arquivos *wav* localizados dentro de uma *Raspberry Pi*, de forma que um potenciômetro fosse o responsável pelo controle de duas frequências de corte, cada uma para um canal de áudio. Além disso, o projeto integrou dois efeitos, *delay* e *reverb*, ao processamento desses sinais. E por fim, o sinal resultante pôde ser reproduzido em um sistema de áudio através da interface de áudio via cabo 3,5 mm já integrado à placa.

Os resultados obtidos contribuíram para a validação de um sistema unificado de filtragem de sinais de áudio a partir de apenas um controle. Os sinais obtidos em relação à filtragem demonstraram um bom funcionamento visto que, para cada frequência de corte, esperava-se que determinados elementos na composição de uma música fossem atenuados, o que torna a transição entre uma música e outra mais suave e natural.

Além disso, os resultados obtidos em relação aos efeitos permitiram com que, através de um código simples, a implementação gerasse resultados satisfatórios, dando ao usuário a opção de escolher a presença do efeito ao sinal final.

Esse trabalho tem o potencial de contribuir para uma área de prototipagem de equipamentos eletrônicos que tem ganhado espaço no mercado relacionados a pequenos *makers*. Esse é um espaço que tem crescido e coexistido ao lado de grandes mercados existentes.

No entanto, essa pesquisa e desenvolvimento se limitou a utilizar sinais advindos de arquivos *wav*. Dessa forma, por não utilizar entradas de equipamentos como *CDJs* ou tocadiscos, sua utilização é menos ampla do que poderia ser. Além disso, as implementações da filtragem e efeitos utilizaram certas configurações e lógicas, de forma que esses resultados devem ser restringidos ao serem analisados a outras configurações ou plataformas.

Trabalhos futuros podem utilizar a entrada de sinais advindos de equipamentos e explorar a otimização do código ao utilizar *threads* e sincronizações de chamadas às funções. Além disso, inúmeras formas de mixagem ou efeitos podem ser desenvolvidos e encapsulados em um dispositivo portátil como uma *Raspberry Pi*.

Em suma, esse trabalho visa alimentar a inovação em um ramo da eletrônica

voltada à música cuja presença tem aumentado, modificando formas usuais através das quais se tem estabelecido do que é uma mixagem e do que ela pode ser, sendo uma ferramenta para potencializar a criatividade do artista diante da plateia.

Referências

32BITMASCHINE. *File:Technics SL-1200MK2-2.jpg*. 2008. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Technics_SL-1200MK2-2.jpg>. [Acessado em 02-09-2024]. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 36.

BARTLETT, B.; BARTLETT, J. *Practical Recording Techniques: The Step-by-step Approach to Professional Audio Recording*. Focal Press, 2009. ISBN 9780240811444. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=E0uy8adetQoC>>. Citado na página 42.

BREWSTER, B.; BROUGHTON, F. *Last Night a DJ Saved My Life: The History of the Disc Jockey*. Grove Atlantic, 2014. ISBN 9780802194367. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=MxTnBAAAQBAJ>>. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 36.

CAGE, J. *Silêncio – Conferências e escritos de John Cage*. [s.n.], 2019. (Literatura / Música). ISBN 9788555911026. Disponível em: <<https://www.cobogo.com.br/produto/silencio-conferencias-e-escritos-de-john-cage-633>>. Citado na página 38.

CARDOSO, B. *Desenvolvedor fala sobre processo de levar o app djay para o Vision Pro*. 2024. <<https://macmagazine.com.br/post/2024/01/12/desenvolvedor-fala-sobre-processo-de-levar-o-app-djay-para-o-vision-pro/>>. [Acessado em 02-09-2024]. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 38.

COLE, M. *Baixar níveis de som da escala de decibéis gratuitamente — pt.vecteezy.com*. 2025. <<https://pt.vecteezy.com/arte-vetorial/7207013-niveis-de-som-em-escala-de-decibeis>>. [Acessado em 21-02-2025]. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 33.

ELECTRONICS, M. *1/4 "(6.35mm) Plugs - Amphenol Audio*. 2024. <<https://br.mouser.com/new/amphenol/amphenol-audio-q-plugs/>>. [Acessado em 03-09-2024]. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 43.

EVEA. *Rotating Knob Button, 2 Fixed Positions*. 2024. <<https://www.evea-solutions.com/en/switchs-and-leds/1478-rotating-knob-button-2-fixed-positions-on-off-2-contacts.html>>. [Acessado em 03-09-2024]. Citado na página 54.

FARNELL, A. *Designing Sound*. [S.l.]: The MIT Press, 2010. ISBN 0262014416. Citado na página 32.

GLEESON, A. *The Audio Frequency Spectrum Explained*. 2024. <<https://www.headphonesty.com/2020/02/audio-frequency-spectrum-explained/>>. [Acessado em 02-09-2024]. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 40.

IZHAKI, R. *Mixing Audio: Concepts, Practices and Tools*. Focal Press, 2012. ISBN 9780240522227. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=f-Rz8c73xh4C>>. Citado na página 40.

JOCAFI, A. C. . *Pé de Bode (Ney Faustini Edit)*. 2019. WAV, Gop Tun Records. Disponível em: <<https://goptun.bandcamp.com/track/p-de-bode-ney-faustini-edit>>. Citado 3 vezes nas páginas 59, 60 e 67.

MARQUES, E. *Bozak CMA DL*. 2019. <<https://www.electronica-pt.com/esquema/old-tv/bozak-cma-10.2-dl-71774/>>. [Acessado em 02-09-2024]. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 36.

MIXERS, E. *E & S - AUDIO - MIDI Design and Manufacture — electronique-spectacle.com*. 2024. <<http://www.electronique-spectacle.com/>>. [Acessado em 02-09-2024]. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 39.

MOGNON, M. *NEC Displays lançará monitores com Raspberry Pi 3 integrado em 2017*. 2016. <<https://www.adrenaline.com.br/hardware/nec-displays-lancara-monitores-com-raspberry-pi-3-integrado-em-2017/>>. [Acessado em 03-09-2024]. Citado na página 55.

NEIMAR. *Qual é a diferença entre cabo Balanceado e Desbalanceado*. 2023. <<https://proaudiosp.com.br/qual-e-a-diferenca-entre-cabo-balanceado-e-desbalanceado/noticias/neimar-pro-audio/>>. [Acessado em 02-09-2024]. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 42.

NUSSENZVEIG, H. M. *Curso de física básica, 2 : fluídos, oscilações e ondas. calor*. 4.ed.. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2006. ISBN 9788521207481. Citado na página 32.

NYQUIST, H. Certain topics in telegraph transmission theory. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, v. 47, n. 2, p. 617–644, 1928. Citado na página 28.

OPPENHEIM, A.; WILLSKY, A. *Sinais e Sistemas*. 2^a. ed. São Paulo: Pearson, 2010. 592p. p. ISBN 857605504X. Citado 6 vezes nas páginas 11, 25, 26, 27, 28 e 29.

OPPENHEIM, A. V.; SCHAFER, R. W. *Processamento em Tempo Discreto de Sinais*. 3^a. ed. São Paulo, Brasil: Pearson Universidades, 2013. Capa comum. ISBN 978-8581431024. Citado 4 vezes nas páginas 11, 29, 30 e 31.

PIONEER. *CDJ-300*. 2024. <<http://www.cddj.com/ppdj/products/cdj300>>. [Acessado em 02-09-2024]. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 37.

PIONEER. *DJM-A9 - 4-channel professional DJ mixer (black) - pioneerdj.com*. 2024. <<https://www.pioneerdj.com/pt-pt/product/mixer/djm-a9/black/overview>>. [Acessado em 02-09-2024]. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 38.

PUCKETTE, M. Using pd as a score language. In: *Proceedings of the International Computer Music Conference (ICMC)*. [s.n.], 2002. p. 184–187. Disponível em: <<https://puredata.info/>>. Citado na página 49.

RANE. *MP 24 Mixer Evolution*. 2008. <<https://www.ranecommercial.com/legacy/mp24evo.html>>. [Acessado em 02-09-2024]. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 37.

ROADS, C. *The Computer Music Tutorial*. MIT Press, 1996. (Mit Press). ISBN 9780262680820. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=nZ-TetwzVcIC>>. Citado na página 33.

- ROBOCORE. *Potenciômetro 20k Deslizante com Knob*. 2024. <<https://www.robocore.net/resistor-potenciometro/potenciometro-deslizante-com-knob>>. [Acessado em 03-09-2024]. Citado na página 54.
- RS. *Product Detail*. 2024. <<https://seecommercestg.ingrammicro.com/site/productdetail?id=V933158>>. [Acessado em 03-09-2024]. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 43.
- SAAD, F. *Sound Propagation - Image Vector*. 2019. <<https://www.shutterstock.com/image-vector/sound-reflection-reverberation-260nw-1282003960.jpg>>. [Acessado em 22-10-2024]. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 32.
- SARAVATI. *Módulo Conversor A/D e D/A - 8 Bits - PCF8591*. 2024. <<https://www.saravati.com.br/modulo-conversor-a-d-e-d-a-8-bits-pcf8591.html>>. [Acessado em 30-01-2025]. Citado na página 54.
- SELF, D. *Audio Power Amplifier Design*. Focal Press, 2013. ISBN 9780240526133. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=Poh4MAEACAAJ>>. Citado na página 43.
- SHANNON, C. E. Communication in the presence of noise. *Proceedings of the IEEE*, v. 37, p. 10–21, 1949. Citado na página 28.
- TYV. *The White Calf*. 2019. WAV, Gop Tun Records. Disponível em: <<https://goptun.bandcamp.com/track/the-white-calf-tyv-edit>>. Citado 2 vezes nas páginas 59 e 60.
- UBBS. *The Story Behind the First Ever Mixer*. 2015. <<https://stoneyroads.com/2015/05/the-story-behind-the-first-ever-mixer/>>. [Acessado em 02-09-2024]. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 35.
- WIDROW, B.; KOLLAR, I.; LIU, M.-C. Statistical theory of quantization. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 45, n. 2, p. 353–361, 1996. Citado na página 29.
- WINER, E. *The Audio Expert: Everything You Need to Know about Audio*. Focal Press, 2012. ISBN 9780240821009. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=Hf0YQAUWGfgC>>. Citado na página 41.
- ZÖLZER, U. *Digital Audio Signal Processing*. [S.l.]: Wiley, 2008. ISBN 9780470997857. Citado na página 29.