

Caio da Silva Rocha
Orientador: Frank César Lopes Vêras

Analisador e Sugestor de Equalização de Áudio com Python e Streamlit

Picos - PI
13 de junho de 2025

Caio da Silva Rocha
Orientador: Frank César Lopes Vêras

Analizador e Sugestor de Equalização de Áudio com Python e Streamlit

Monografia submetida ao Curso de Bacharelado em Sistemas de Informação como requisito parcial para obtenção de grau de Bacharel em Sistemas de Informação.

Universidade Federal do Piauí
Campus Senador Helvídio Nunes de Barros
Bacharelado em Sistemas de Informação

Picos - PI
13 de junho de 2025

FICHA CATALOGRÁFICA
Serviço de Processamento Técnico da Universidade Federal do Piauí
Biblioteca José Albano de Macêdo

R672a

Rocha, Caio da Silva.

Analisador e sugestor de equalização de áudio com Python e Streamlit /
Caio da Silva Sousa – 2025.

45 f.

1 Arquivo em PDF.

Indexado no catálogo *online* da biblioteca José Albano de Macêdo, CSHNB.
Aberto a pesquisadores, com restrições da Biblioteca.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal do
Piauí, Curso de Bacharelado em Sistemas de Informação, Picos, 2025.
“Orientador: Frank César Lopes Vêras”.

1. Sistemas informacionais. 2. Processamento digital - áudio. 3. Analisador
de áudio - equalização. I. Rocha, Caio da Silva. II. Vêras, Frank César Lopes.
III. Título.

CDD 005.7

Elaborada por Maria Letícia Cristina Alcântara Gomes
Bibliotecária CRB nº 03/1835

ANALISADOR E SUGESTOR DE EQUALIZAÇÃO DE ÁUDIO COM PYTHON E STREAMLIT

CAIO DA SILVA ROCHA

Monografia aprovada como exigência parcial para obtenção do grau de Bacharel em Sistemas
de Informação.

Data de Aprovação

Picos – PI, 23 de JUNHO de 2025

Documento assinado digitalmente
 **FRANK CESAR LOPES VERAS**
Data: 24/06/2025 07:22:05-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Frank César Lopes Vêras

Documento assinado digitalmente
 **FRANCISCO AIRTON PEREIRA DA SILVA**
Data: 25/06/2025 14:15:03-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Francisco Airton Pereira da Silva

Documento assinado digitalmente
 **FREDISON MUNIZ DE SOUSA**
Data: 24/06/2025 17:20:59-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Fredison Muniz de Sousa

Agradecimentos

Expresso minha gratidão aos meus familiares pelo suporte integral necessário para o desenvolvimento de atividades pessoais e estudantis, ao meu orientador pela disposição e dedicação ao auxílio e construção desta contribuição científica, e a todos que atuaram direta ou indiretamente na minha formação acadêmica.

Resumo

Esse trabalho objetivou o desenvolvimento de uma aplicação web gratuita e de uso simples, capaz de analisar arquivos de áudios reproduzidos por fonte original, e por caixa acústica, e retornar sugestões de equalização, a fim de aproximar os decibéis das frequências presentes no som final, aos presentes no som original. Para isso, as funcionalidades da aplicação foram definidas utilizando a linguagem de programação Python e seu pacote analisador de áudio denominado Librosa, e a implantação na web ocorreu com a utilização do framework Streamlit. Ademais, os experimentos foram executados com amostras de áudios de tons puros em cenário virtual, ruído branco e fala artificial em um ambiente real de igreja, e validados mediante comparações com os resultados gráficos dos softwares Audacity e Sonic Visualiser, aplicação conjunta com o pacote verificador de similaridade de áudios do Python, denominado Audio Similarity, envolvendo métricas de taxa de cruzamento por zero, ritmo, croma, envelope de energia, contraste espectral e percepção, e análises auditivas. Como resultados próprios, a aplicação apresentou gráficos de intensidades versus frequências semelhantes aos retornados pelas ferramentas comparativas mencionadas e sugeriu ajustes de equalização que aproximam, consideravelmente, o áudio reproduzido pela caixa acústica ao áudio original, porém, com imprecisões de decibéis. Assim sendo, o desenvolvimento em questão demonstrou potencial colaborativo para os casos nos quais a equalização sonora é realizada por indivíduos com pouca experiência sobre a atividade e que não possuem auxílio tecnológico para tal, a fim de otimizar o tempo de execução da equalização.

Palavras-chaves: analisador de áudio, equalização, caixa acústica, processamento de sinal digital, Transformada de Fourier.

Abstract

This work aimed to develop a free and easy-to-use web application capable of analyzing audio files played by original source and by speaker and returning equalization suggestions, in order to approximate the decibels of the frequencies present in the final sound to those present in the original sound. For this, the application's functionalities were defined using the Python programming language and its audio analyzer package called Librosa, and the web implementation occurred using the Streamlit framework. Furthermore, the experiments were performed with pure tone audio samples in a virtual scenario, white noise and artificial speech in a real church environment, and validated through comparisons with the graphical results of the Audacity and Sonic Visualiser software, a joint application with the Python audio similarity checking package, called Audio Similarity, involving metrics of zero crossing rate, rhythm, chroma, energy envelope, spectral contrast and perception, and auditory analysis. As its own results, the application presented intensity versus frequency graphs similar to those returned by the aforementioned comparative tools and suggested equalization adjustments that considerably approximate the audio reproduced by the speaker to the original audio, however, with decibel inaccuracies. Therefore, the development in question demonstrated collaborative potential for cases in which sound equalization is performed by individuals with little experience in the activity and who do not have technological assistance for this purpose, in order to optimize the equalization execution time.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Representação da onda sonora. Fonte: (COSTA et al., 2023)	15
Figura 2 – Som composto por ondas com amplitudes e frequências distintas. Fonte: (Autorial, 2025)	16
Figura 3 – Relação entre frequências e decibéis do som. Fonte: (226, 2003)	17
Figura 4 – Representação de sinais sonoros contínuo, amostrado e digital. Fonte: (MACIEL, 2022)	18
Figura 5 – Equalizador gráfico do Audacity. Fonte: (Autorial, 2025)	25
Figura 6 – Materiais utilizados no teste real. Fonte: (Autorial, 2025)	25
Figura 7 – Representação do ambiente de teste real visto por cima. Fonte: (Autorial, 2025)	26
Figura 8 – Detalhes das gravações no teste real. Fonte: (Autorial, 2025)	26
Figura 9 – Exemplo de uso e descrição de funcionalidades da aplicação desenvolvida.	28
Figura 10 – Teste de tom puro de 20 Hz.	29
Figura 11 – Teste de tom puro de 20000 Hz.	30
Figura 12 – Teste de combinação de tons puros de 20, 1000, 5000, 10000, 15000 e 20000 Hz.	31
Figura 13 – Teste de ruído branco atenuado em 20 dB nas frequências 5000, 10000 e 16000 Hz.	32
Figura 14 – Teste de ruído branco incrementado em 20 dB nas frequências 5000, 10000 e 16000 Hz.	33
Figura 15 – Sugestões de equalização para o ruído branco atenuado.	34
Figura 16 – Sugestões de equalização para o ruído branco incrementado.	34
Figura 17 – Teste de ruído branco atenuado em 15 dB nos graves reproduzido pela caixa acústica.	35
Figura 18 – Teste de ruído branco atenuado em 15 dB nos médios reproduzido pela caixa acústica.	36
Figura 19 – Teste de ruído branco atenuado em 15 dB nos agudos reproduzido pela caixa acústica.	37
Figura 20 – Teste de ruído branco incrementado em 15 dB nos graves reproduzido pela caixa acústica.	38
Figura 21 – Teste de ruído branco incrementado em 15 dB nos médios reproduzido pela caixa acústica.	39
Figura 22 – Teste de ruído branco incrementado em 15 dB nos agudos reproduzido pela caixa acústica.	40
Figura 23 – Comparações do ruído branco antes e depois da equalização.	41

Figura 24 – Comparações da fala artificial antes e depois da equalização. 41

Lista de tabelas

Tabela 1 – Particularidades de trabalhos relacionados e do projeto em questão. . .	23
Tabela 2 – Comparações de métricas das versões de ruído branco.	28
Tabela 3 – Comparações de métricas das versões de fala artificial.	28

Lista de abreviaturas e siglas

API	Application Programming Interface (Interface de Programação de Aplicação)
dB	Decibél
HTML	HyperText Markup Language (Linguagem de Marcação de Hipertexto)
Hz	Hertz
ISO	International Organization for Standardization (Organização Internacional para Padronização)
LCD	Liquid Crystal Display (Tela de Cristal Líquido)
RTA	Real Time Analyzer (Analisador em Tempo Real)
STFT	Short-Time Fourier Transform (Transformada de Fourier de Tempo Curto)
TFT	Thin Film Transistor (Transistor de Película Fina)
WAV	Waveform Audio File Format (Formato de Arquivo de Áudio Waveform)

Sumário

1	Introdução	12
1.1	Justificativa	13
1.2	Objetivos	14
1.3	Estrutura	14
2	Referencial Teórico	15
2.1	Som	15
2.2	Áudio Digital	17
2.3	Processamento Digital de Sinais	18
3	Trabalhos Relacionados	20
4	Metodologia	24
5	Resultados	27
6	Conclusão	42
	Referências	43

1 Introdução

O som é um elemento que está presente em abundância no cotidiano dos seres humanos. Ele pode ser identificado, por exemplo, no canto de pássaros, na passagem do vento pelas folhas de árvores, na comunicação falada entre pessoas, na reprodução de música mediante aparelhos celulares e na vibração das cordas de violão. Simplificadamente, o som é gerado pelas vibrações da matéria e pode ser propagado em meios sólidos, líquidos ou gasosos (SMANIOTTO, 2023). Além disso, sua existência independe da interpretação de um sistema auditivo (LIZ et al., 2023).

Apresentações presenciais destinadas a médio ou grande público, como palestras, cinemas, atividades culturais ou religiosas, concertos musicais e shows, comumente contêm dispositivos capazes de reproduzir sons com volume amplificado, como caixas acústicas, a fim de possibilitar uma entrega satisfatória de informações a todos os ouvintes presentes nesses eventos. No entanto, a composição de um sistema de som, incluindo a caixa acústica, é suficiente para alterar a resposta sonora de um alto-falante devido às limitações de seus componentes (CONCEIÇÃO; BECCARO, 2020). Como agravante, há casos nos quais as caixas acústicas são operadas por indivíduos com diferentes faixas etárias e capacidades auditivas, pouco conhecimento sobre acústica e/ou que não possuem auxílio tecnológico para tal operação.

Nos momentos em que um operador de som, também conhecido como sonoplasta, objetiva modificar as respostas sonoras de um sistema de som mediante o uso de equipamentos que permitem o ajuste de volume de frequências graves, médias e/ou agudas, como mesas de som, entra em vigor o processo de equalização. Através da equalização, é possível aproximar os volumes de frequências sonoras reproduzidas por uma caixa acústica aos existentes em um som produzido por uma fonte original, como também estabelecer uma sonoridade específica, por exemplo (LISKI, 2020). Porém, o processo de equalizar sons baseando-se apenas nas capacidades auditivas humanas gera resultados variáveis e imprecisos, pois cada indivíduo possui uma experiência sonora particular (DUFBERG; HAMBERGER, 2024). Como alternativa de solução para essa problemática, recursos computacionais podem ser utilizados para extrair e analisar as características dos sons, simulando a atuação de profissionais experientes na área (BORATTO et al., 2022).

O estudo de sinais mediante o uso de algoritmos computacionais e cálculos matemáticos é denominado processamento digital de sinais (МИТЮХИН, 2023). No campo da acústica, por exemplo, essa prática pode auxiliar na equalização de sinais de áudio reproduzidos por um alto-falante (ARIYANI; IRAWAN; WAFI, 2021), análise da voz (JUNIOR, 2022), análise de frequências em cordas de guitarra (DELGADO, 2022), detecção de falhas em motores (VERAS et al., 2019), além de solucionar problemas nos setores de construção, transporte, biomedicina, aviação e astronáutica (МИТЮХИН, 2023).

Um dos requisitos iniciais e primordiais para o processamento digital do som é a obtenção de representações numéricas do mesmo. Isso pode ser alcançado, por exemplo, mediante o uso conjunto de equipamentos capazes de converter sinais mecânicos em elétricos e sinais elétricos em digitais, como microfones e conversores analógico-digitais, respectivamente. Todo esse procedimento de conversão é necessário, pois computadores e dispositivos eletrônicos não conseguem operar sinais analógicos (SANTOS, 2023).

Dentre os métodos existentes de processamento digital de sinais encontra-se a transformada de Fourier. Quando aplicada a sinais de áudio, essa transformada possibilita a decomposição das frequências presentes juntamente com seus respectivos volumes (MACIEL, 2022). Existem, ainda, linguagens de programação que possuem funções capazes de importar áudios e calcular a referida transformada, como Python. Além disso, essa linguagem de programação permite a disposição de conjuntos numéricos na forma gráfica, a fim de facilitar a tarefa de análise. Esses recursos são extremamente úteis e servem para a realização de equalização de sons reproduzidos por caixas acústicas com o auxílio de aplicações computacionais, por exemplo.

Factualmente, a tecnologia fornece um gigantesco potencial de agregação aos seres humanos. Ações que geralmente exigem esforços mentais e/ou físicos intensos, custos financeiros elevados e/ou tempos de execução extensos para serem concluídas quando realizadas apenas por humanos, podem ser consideravelmente simplificadas mediante o envolvimento de automações computacionais, principalmente quando essas automações abrangem gratuidade e agilidade referente ao uso.

1.1 Justificativa

O ajuste de volumes de frequências mediante a utilização de equipamentos de equalização sonora é uma funcionalidade abrangente que pode ser aplicada em sistemas de som domésticos ou veiculares, dispositivos que modulam a resposta sonora de instrumentos musicais, além de ser indispensável em ambientes com apresentações sonoras ao vivo para grande público e estúdios (SAH, 2020).

O som reproduzido por qualquer equipamento pode apresentar qualidade inferior à presente no som emitido pela fonte original (VARELA, 2021). Tal problemática surge devido às limitações das estruturas e dos componentes de um determinado equipamento reproduzidor de som ou, ainda, devido à acústica do ambiente no qual ocorre a reprodução sonora. Como alternativa de solução, a técnica de equalização pode ser aplicada para corrigir essas diferenças do som reproduzido para com o som original. Porém, o custo para incorporar equalizadores em um sistema de som é elevado em alguns casos, o que dificulta a aquisição desses equalizadores por parte de indivíduos com poucos recursos financeiros (CONCEIÇÃO; BECCARO, 2020). Por outro lado, o método de equalização baseado apenas nas capacidades auditivas humanas é ineficiente, pois cada indivíduo

possui uma experiência sonora subjetiva (DUFBERG; HAMBERGER, 2024). Além disso, o intervalo de frequências audíveis dos seres humanos varia de acordo com suas faixas etárias e exposições a sons contínuos com altos volumes (RODRIGUES, 2020).

As aplicações que processam sinais de áudio digitalmente a fim de auxiliar na atividade de equalização sonora e que estão dispostas na literatura atual apresentam medições de decibéis associadas às frequências, mas não sugerem numérica e diretamente ajustes de decibéis resultantes de comparações entre sons originais e reproduzidos para otimizar o tempo de conclusão da equalização. A análise sonora mediante recursos computacionais possibilita a extração de informações identificáveis apenas por profissionais experientes na área, favorecendo indivíduos com pouco conhecimento sobre operação de sistemas equalizadores de som, principalmente (BORATTO et al., 2022).

1.2 Objetivos

Esse trabalho objetiva analisar os dados digitais de uma onda sonora utilizando recursos computacionais para otimizar a atividade de equalização realizada por operadores de caixa ou mesa de som. Os objetivos específicos do trabalho são:

1. Demonstrar, através de técnicas com algoritmos computacionais, as análises dos áudios digitais obtidos diretamente do emissor;
2. Provar, através de análise gráfica, que as intensidades das frequências dos sinais sonoros do emissor e da caixa de som são diferentes;
3. Validar a proposta por meio da apresentação dos dados de ajuste de equalização, demonstrando a proximidade entre os sinais sonoros da caixa de som e do emissor.

1.3 Estrutura

A estrutura deste trabalho está organizada da seguinte forma: o Capítulo 2 trata sobre os referenciais teóricos necessários para a compreensão e o desenvolvimento do projeto, o Capítulo 3 apresenta os trabalhos cujos objetivos ou temáticas abrangem onda sonora, análise de áudio ou equalização, o Capítulo 4 expõe os procedimentos metodológicos utilizados no projeto, o Capítulo 5 destaca os resultados obtidos durante os testes da aplicação e o Capítulo 6 aborda as conclusões sobre a funcionalidade e eficiência da ferramenta desenvolvida.

2 Referencial Teórico

2.1 Som

O som é uma interpretação do sistema auditivo realizada sobre ondas de pressão causadas pelas vibrações das moléculas de um corpo material (MARTINS, 2022). Em meios de propagação gasosos, como o ar, essas ondas de pressão formam temporariamente regiões com maiores e menores acúmulos de moléculas, conhecidas como regiões de compressão e rarefação, respectivamente, e o deslocamento da pressão ocorre no mesmo sentido da vibração do meio, ou seja, longitudinalmente. Vale salientar, de antemão, que as ondas sonoras não são capazes de transportar a matéria de um corpo, apenas provocam oscilações em sua posição de repouso (COSTA et al., 2023). Em uma representação gráfica da onda sonora, as cristas ou os picos correspondem às regiões de compressão e os vales ou as depressões indicam as regiões de rarefação (LIZ et al., 2023). A Figura 1 apresenta um exemplo de representação da onda sonora associada com as variações de pressão de um meio de propagação. As ondas sonoras possuem atributos que merecem destaque, a saber amplitude, comprimento de onda e frequência. A amplitude é o deslocamento máximo de uma crista ou um vale em relação ao ponto de equilíbrio. O comprimento de onda é a distância percorrida por ela até o momento de ocorrência da primeira repetição de movimento de uma partícula que a compõe. Por sua vez, a frequência é a quantidade de vezes que o movimento de uma partícula se repete em um intervalo de tempo (LIZ et al., 2023). Ademais, o som pode ser composto por uma combinação de ondas com diferentes amplitudes e/ou frequências (SMANIOTTO, 2023). A Figura 2 demonstra um exemplo de som constituído por combinações de ondas distintas.

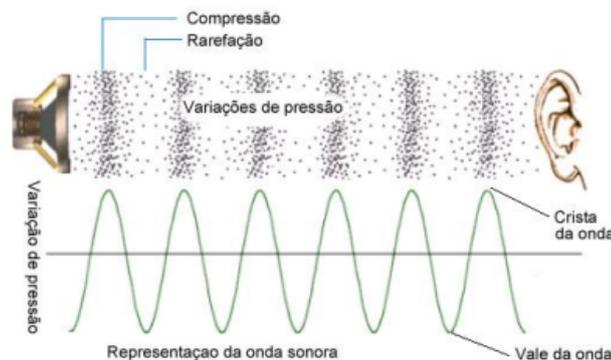


Figura 1 – Representação da onda sonora. Fonte: (COSTA et al., 2023)

As principais qualidades fisiológicas do som são altura, intensidade e timbre. A altura associa-se com a frequência em uma proporção direta e determina quão grave, médio ou agudo é um som. A intensidade associa-se com a amplitude, também em proporção

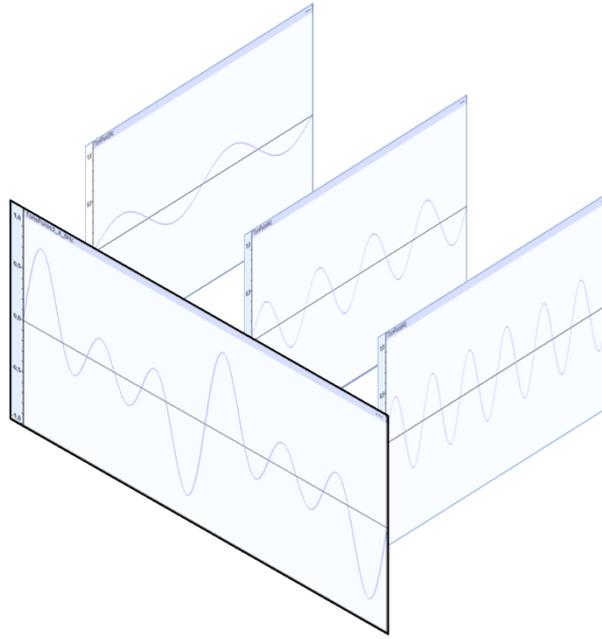


Figura 2 – Som composto por ondas com amplitudes e frequências distintas. Fonte: (Autorial, 2025)

direta, e indica os níveis de potência e energia presentes, ou seja, quão baixo ou alto é o volume sonoro. O timbre, por sua vez, relaciona-se com o formato oscilatório de um som e, portanto, é o fator que possibilita a diferenciação de sons com altura e intensidade iguais emitidos por fontes sonoras distintas (LIZ et al., 2023). Com relação às medidas representativas, a altura é comumente apresentada em hertz (Hz). A intensidade, em especial, pode ser amplamente quantificada e, por este motivo, costuma ser calculada em escala logarítmica utilizando a razão entre o valor atual medido e uma referência numérica padrão que indica o nível zero, conforme exposto pela Equação 2.1 (Бранцевич, 2022). Assim sendo, a intensidade é comumente disposta em decibel (dB).

$$Intensidade = 10 \log \frac{a}{a_0} \quad (2.1)$$

Os seres humanos geralmente são capazes de identificar sons cujas frequências estão no intervalo de 20 a 20000 Hz. Porém, o limite superior desse intervalo tende a diminuir com o aumento da idade de um indivíduo (CARDELL; JOHANSSON, 2024). Além disso, a exposição excessiva a sons com altos volumes e ininterruptos também ocasiona perdas na capacidade auditiva (RODRIGUES, 2020). Vale destacar que a Organização Internacional para Padronização (ISO) estabeleceu o padrão ISO 226:2023, o qual informa que as frequências sonoras precisam ter decibéis específicos para serem igualmente percebidas pelo sistema auditivo humano. A Figura 3 apresenta a relação entre frequências e decibéis definida pelo referido padrão, onde a linha tracejada inferior refere-se ao limiar mínimo da audição humana.

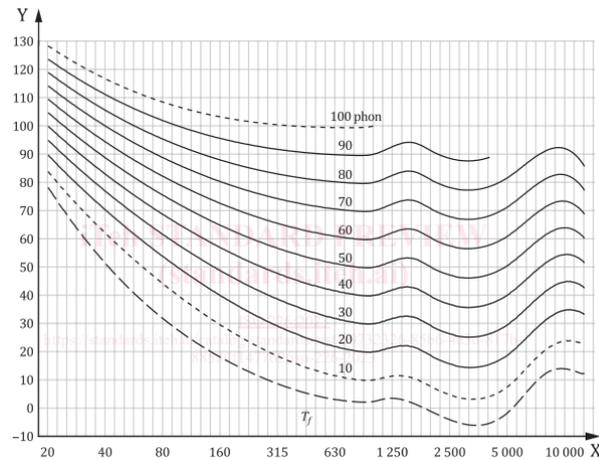


Figura 3 – Relação entre frequências e decibéis do som. Fonte: (226, 2003)

2.2 Áudio Digital

Uma das etapas principais que possibilitam a operação sobre ondas sonoras utilizando dispositivos eletrônicos e processadores computacionais é a captação do som. Essa captação pode ser realizada por transdutores que convertem energia acústica em energia elétrica, como microfones, por exemplo (FUOCO, 2023). O sinal elétrico gerado pelo microfone, por sua vez, possui característica analógica, ou seja, é composto por valores pertencentes ao conjunto dos números reais e com um intervalo de abrangência extenso, também conhecidos como valores contínuos (SMANIOTTO, 2023). No entanto, a representação contínua do som capturado precisa, ainda, ser convertida para o formato digital incluindo valores discretos, ou seja, com um intervalo de abrangência limitado, a fim de que tal representação sonora seja processada computacionalmente. Essa etapa pode ser efetuada mediante o uso de um conversor analógico-digital e envolve os processos de amostragem e quantização (SANTOS, 2023). Na amostragem, são extraídas amostras no decorrer do tempo considerando uma taxa de amostragem. Vale mencionar que essa taxa é definida de acordo com o teorema de Nyquist, o qual afirma que todas as frequências de uma representação contínua podem ser recuperadas se a taxa de amostragem for, no mínimo, duas vezes maior que a frequência mais alta presente na representação. Na quantização, por sua vez, os valores de energia elétrica de cada amostra são mensurados como números binários de tamanho fixo. Dessa forma, o som pode ser gravado como áudio digital (SMANIOTTO, 2023). A Figura 4 ilustra uma representação de sinais sonoros contínuo, amostrado e digital, os quais são compostos pelos valores delimitados pela linha azul, pelos círculos vermelhos e pelas marcações em xis, respectivamente.

Para que um áudio digital seja capaz de conter todas as frequências presentes no intervalo audível do ser humano, ele precisa ser gravado com uma taxa de amostragem de 40000 Hz no mínimo (SMANIOTTO, 2023). Além disso, quando o áudio é gravado no formato WAV (Formato de Arquivo de Áudio Waveform), há uma representação fidedigna

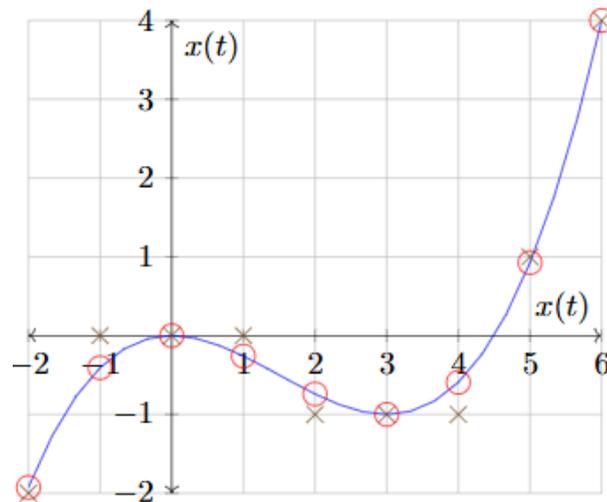


Figura 4 – Representação de sinais sonoros contínuo, amostrado e digital. Fonte: (MACIEL, 2022)

do som original, ou seja, sem perdas de dados (DELGADO, 2022). Porém, o processo de conversão de analógico para digital é incapaz de extrair todas as informações originais devido ao modo de execução da amostragem, ou seja, sempre ocasiona perdas de dados (ESPINDOLA, 2023). Vale apresentar, ainda, que a reprodução de áudio em sistemas sonoros, como alto-falantes, pode gerar sons cujas respostas de frequências e respectivas intensidades diferem das respostas dos sons originais (CONCEIÇÃO; BECCARO, 2020).

2.3 Processamento Digital de Sinais

O processamento digital de sinais é uma área que objetiva operar sobre sinais mediante o uso de cálculos matemáticos e comandos computacionais (Митюхин, 2023). Considerando o campo da acústica, a operação sobre sinais de áudio digitais ao invés de sinais de áudio analógicos pode facilitar a tarefa de extração de informações sonoras (BORATTO et al., 2022). Informações como faixas de frequências e intensidades presentes, por exemplo, podem ser dispostas na forma de espectro para serem analisadas. Esse procedimento é conhecido como análise espectral, sendo uma das principais aplicações que envolvem processamento digital de sinais (Митюхин, 2023).

A análise espectral fundamenta-se em um cálculo matemático conhecido como transformada de Fourier (Бранцевич, 2022). Essa transformada permite a extração de frequências e intensidades associadas que compõem um sinal (SANTOS, 2023). Porém, esse recurso matemático foi criado para operar sobre sinais estacionários, ou seja, sinais que possuem propriedades estatísticas constantes no tempo (REDFERN, 2020). Essa limitação pode ser solucionada mediante a divisão do sinal original em pequenos intervalos de tempo e posterior aplicação da transformada sobre tais intervalos, incluindo o método de janela deslizante. Esse conjunto de operações é conhecido como Transformada de Fourier de Tempo Curto (STFT) e representado matematicamente, conforme exposto na Equação

2.2, envolvendo tempo, frequência, integral do sinal com janela deslizante e expoente de parte imaginária (MORAES, 2023). Vale mencionar que o tamanho da janela deslizante influencia nas resoluções de frequências e temporais com uma proporção inversa. Assim sendo, quanto maior for o tamanho da janela, mais frequências são identificadas e pior será a resolução temporal. De forma análoga, quanto menor for o tamanho da janela, mais tempos são extraídos precisamente e pior será a resolução de frequência (JUNIOR, 2022). Logo, não é possível obter ótimas resoluções de frequências e temporais simultaneamente, sendo essa limitação conhecida como princípio da incerteza (GISBERT; HENRIQUES, 2023).

$$STFT(t, \omega) = \int [x(\tau)W(\tau - t)]e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (2.2)$$

Uma das atividades beneficiadas pela análise espectral é a equalização de áudio, pois tal atividade funciona através da alteração de intensidades de frequências (SAH, 2020). Conceitualmente, a equalização consiste no ajuste de uma resposta sonora com a finalidade de aproximar as características de um som reproduzido às de um som original ou produzir uma sonoridade particular. Os dispositivos capazes de realizar a equalização do som são denominados equalizadores e, normalmente, possuem um conjunto de filtros responsáveis por modificar os volumes de frequências específicas enquanto mantém os decibéis das demais frequências (LISKI, 2020). Dentre os tipos de equalizadores existentes estão o shelving, que permite o ajuste de volume de frequências graves e agudas; o gráfico, que possibilita o ajuste de volume de frequências predefinidas; e o paramétrico, que proporciona a escolha de frequências e o ajuste de seus respectivos volumes e fatores de qualidade. Vale apresentar, ainda, que esses tipos de equalizadores podem ser comumente encontrados em equipamentos como mesas de som, por exemplo (VARELA, 2021).

3 Trabalhos Relacionados

O trabalho de [Dadam \(2019\)](#) apresenta o desenvolvimento de um analisador de frequência e espectro sonoro para auxiliar o processo de alinhamento de sistemas de áudio. Os componentes desse analisador foram microfone de eletreto, circuito integrado, placa de desenvolvimento com microcontrolador e um display LCD (Tela de Cristal Líquido) gráfico com resolução de 128 por 64 pixels e que abrange o intervalo de frequências de 315 a 10000 Hz. Além disso, os comandos de programação foram definidos na linguagem C.

A contribuição de [Raharjo e Zakaria \(2019\)](#) expõe a implementação de uma aplicação capaz de analisar a resposta sonora de um alto-falante em tempo real. Essa aplicação obtém o som mediante o uso de microfone RTA (Analisador em Tempo Real) juntamente com placa de som externa ou através da importação de arquivo com formato WAV e apresenta um espectro contendo intervalo superior de frequências menor que 10000 Hz. Além disso, as funcionalidades da aplicação foram desenvolvidas com a linguagem de programação Matlab.

O estudo de [Santoso, Lim e Sulistio \(2012\)](#) aborda a construção de uma aplicação destinada ao exame da resposta de frequência de um alto-falante. Tal aplicação calcula com precisão apenas frequências múltiplas de um valor específico e exibe um espectro ausente de informações numéricas nos eixos de frequências e intensidades. Além disso, esse aplicativo foi desenvolvido mediante o uso da linguagem de programação Borland Delphi.

A pesquisa de [Поштаренко \(2024\)](#) aborda o desenvolvimento de um aplicativo capaz de analisar a resposta de frequência e amplitude de um alto-falante acústico. Esse aplicativo foi construído mediante a utilização da linguagem de marcação HTML (Linguagem de Marcação de Hipertexto) e de APIs (Interface de Programação de Aplicação) que possibilitam a captura e o processamento de sinais de áudio.

A tese de [Just \(2016\)](#) descreve um analisador portátil de espectro de áudio que opera em tempo real. Os componentes utilizados foram placas de circuito impresso, microcontrolador, microfones internos e externo, e display LCD de 3,2 polegadas com TFT (Transistor de Película Fina). Além disso, os códigos computacionais foram desenvolvidos na linguagem C.

O projeto de [Junior \(2022\)](#) abrange o desenvolvimento de uma aplicação web que possibilita o processamento e a análise acústica de voz. Essa aplicação foi desenvolvida mediante o uso do framework Streamlit e da linguagem de programação Python. Além disso, a aplicação permite a gravação e importação de áudio e retorna um espectrograma contendo as variações de intensidades das frequências no decorrer do tempo.

O material de [Delgado \(2022\)](#) estabelece a análise do espectro de frequências em cordas de guitarra mediante a utilização dos softwares Audacity e Matlab, os quais possibilitam

a exibição gráfica de frequências e seus respectivos decibéis.

O documento elaborado por [Haldankar, Vashi e Sarode \(2016\)](#) inclui o desenvolvimento de um analisador de frequência de áudio utilizando sistema de microcomputador, microcontrolador, display e linguagem de programação Python.

A publicação de [Wahyudi et al. \(2015\)](#) envolve a implementação de um aplicativo examinador da resposta de frequência da voz humana. A voz foi captada mediante o uso de microfone, a codificação foi feita na linguagem Matlab e a exibição gráfica do espectro possui um limite superior de 3500 Hz.

O produto instrucional de [Pontes \(2022\)](#) destaca um experimento de análise espectral do som emitido por um alto-falante e propagado no interior de um tubo ressonante. Tal experimento abrange um programa próprio de decomposição de frequências e suas respectivas intensidades desenvolvido com a linguagem Python.

A proposta de [Silva \(2017\)](#) relata o desenvolvimento de um sistema de avaliação e melhoria da qualidade de áudio reproduzido por alto-falante com resposta de graves deficitária, abrangendo um modelo de regressão constituído por rede neural. Esse sistema envolveu a linguagem de programação Matlab.

O artigo de [Carvalho e Albernaz \(2019\)](#) demonstra o desenvolvimento de uma interface analisadora de vibrações mecânicas. Essa interface abrangeu o uso de microcomputador, sensor e linguagem de programação Matlab. Além disso, a exibição gráfica do espectro possui um limite superior de 125 Hz.

A obra de [Redfern \(2020\)](#) aplica a análise computacional da trilha sonora de um filme utilizando a linguagem de programação Python e apresentando um espectrograma contendo as variações de intensidades das frequências no decorrer do tempo.

A pesquisa de [Ariyani, Irawan e Wafi \(2021\)](#) projeta um controle de tom digital para melhorar a qualidade de áudio utilizando microcomputador, sensor e display.

O trabalho de [Rahman \(2013\)](#) apresenta um método para cálculo de frequência de um sinal de áudio e utiliza a linguagem de programação Matlab para exibição do espectro.

A contribuição de [Jagielski \(2012\)](#) descreve uma técnica para detecção de tom em tempo real por meio de análise espectral utilizando a linguagem de programação Matlab.

O estudo de [Barbosa e Marães \(2019\)](#) apresenta um software para teste automatizado do funcionamento de caixa acústica e utiliza a linguagem de programação Matlab para exibição do espectro.

O material de [Conceição e Beccaro \(2020\)](#) apresenta o desenvolvimento de um sistema equalizador de áudio em tempo real embarcado em caixa acústica própria usando microprocessadores. Além disso, a interface de caracterização da caixa acústica foi desenvolvida no software LabVIEW.

A publicação de [Varela \(2021\)](#) projeta um equalizador paramétrico digital com cinco bandas de frequências que opera em tempo real utilizando microcontrolador, microfones digitais e display LCD-TFT.

O artigo de [Sah \(2020\)](#) cria um equalizador contendo função de controle de tom de 3 bandas de frequências e função de equalizador paramétrico de 7 bandas de frequências. As funcionalidades desse equalizador foram desenvolvidas com a linguagem de programação Matlab.

O projeto de [Langelaar, Mattsson e Natvig \(2019\)](#) constrói um equalizador de 31 bandas de frequências. As funcionalidades desse equalizador foram desenvolvidas com a linguagem de programação Matlab.

O documento elaborado por [Filgueira \(2006\)](#) propõe um equalizador automático de áudio que aplica equalização plana para auxiliar o operador de som. A simulação desse equalizador foi construída no ambiente de programação Matlab.

A obra de [Pepe et al. \(2020\)](#) apresenta um equalizador de áudio que aplica a equalização plana utilizando redes neurais artificiais. Os métodos desse equalizador foram implementados na linguagem de programação Python.

O trabalho de [Bodanese \(2008\)](#) almeja o desenvolvimento de um equalizador digital de oito bandas de frequências que opere em tempo real utilizando filtros digitais. A simulação do equalizador ocorreu na plataforma de programação Matlab e, posteriormente, sua construção foi efetivada mediante o uso de um conjunto de desenvolvimento com processador e placa de áudio.

O projeto deste trabalho destaca-se entre os mencionados anteriormente devido sua abrangência concomitante sobre suporte para equalização de caixas acústicas, capacidade de operação sobre a faixa de frequências audíveis dos seres humanos, indicações numéricas referentes a ajustes de decibéis para aproximar as intensidades frequenciais de um som modificado às de sua versão original, gratuidade e simplicidade de uso, apesar de não possuir uma funcionalidade de gravação de áudio em sua versão inicial.

A Tabela 1 apresenta as particularidades dos trabalhos relacionados e, comparativamente, o projeto em questão, possibilitando uma melhor visualização e análise dos mesmos. Para cada trabalho abordado nessa tabela foram especificados critérios que avaliam seu custo financeiro, sua abrangência de frequências e sua sugestão de equalização, a saber: I - "Dispensa custos financeiros?", II - "Abrange todo o espectro audível do ser humano?", e III - "Sugere dados de equalização?".

Tabela 1 – Particularidades de trabalhos relacionados e do projeto em questão.

Autores	I	II	III
Dadam (2019)	Não	Não	Não
Raharjo e Zakaria (2019)	Não	Não	Não
Santoso, Lim e Sulistio (2012)	Sim	Não	Não
Помтаре́нко (2024)	Sim	Sim	Não
Just (2016)	Não	Sim	Não
Junior (2022)	Sim	Sim	Não
Delgado (2022)	Sim	Sim	Não
Haldankar, Vashi e Sarode (2016)	Não	Não	Não
Wahyudi et al. (2015)	Sim	Não	Não
Pontes (2022)	Sim	Sim	Não
Silva (2017)	Sim	Sim	Não
Carvalho e Albernaz (2019)	Não	Não	Não
Redfern (2020)	Sim	Sim	Não
Ariyani, Irawan e Wafi (2021)	Não	Sim	Não
Rahman (2013)	Sim	Não	Não
Jagielski (2012)	Sim	Não	Não
Barbosa e Marães (2019)	Sim	Não	Não
Conceição e Beccaro (2020)	Não	Sim	Não
Varela (2021)	Não	Sim	Não
Sah (2020)	Sim	Sim	Não
Langelaar, Mattsson e Natvig (2019)	Sim	Sim	Não
Filgueira (2006)	Sim	Sim	Não
Pepe et al. (2020)	Sim	Não	Não
Bodanese (2008)	Não	Sim	Não
Este projeto	Sim	Sim	Sim

4 Metodologia

Este trabalho abrangeu uma pesquisa de tipos bibliográfica e experimental. Os materiais científicos de estudo foram coletados no ambiente de pesquisa Google Scholar, seguindo critérios de similaridade temática e tempo de publicação não inferior a seis anos para referenciais teóricos, porém sem limitação temporal para trabalhos relacionados. Os testes, por sua vez, foram realizados com amostras¹ sonoras criadas artificialmente e reproduzidas por uma caixa acústica, envolvendo sons de frequência única ou tons puros, combinação de tons puros, ruído branco e fala humana. Como procedimentos de validação, os resultados dos experimentos foram comparados com as respostas gráficas de dois softwares capazes de operar sobre áudios, o Audacity² e Sonic Visualiser³, utilizados em conjunto com um pacote do Python, denominado Audio Similarity, capaz de verificar a similaridade de áudios envolvendo métricas de taxa de cruzamento por zero, ritmo, croma, envelope de energia, contraste espectral e percepção, todas calculadas através da métrica conhecida como ponderada por stent com pesos definidos pelo usuário, e submetidos a uma análise auditiva quando necessário.

As funcionalidades da aplicação web em questão foram desenvolvidas com o uso da linguagem de programação Python devido sua diversidade de bibliotecas que possibilitam a análise de sinais de modo simples e ágil. Dentre essas bibliotecas, encontra-se a *librosa*, a qual permite obtenção numérica do estado de variável ao longo do tempo, cálculo de potência das amostras de áudio, retirada de silêncios iniciais e finais, e extração de frequências com respectivos decibéis, por exemplo. Por sua vez, a interface de interação foi construída com o auxílio do framework Streamlit, o qual fundamenta-se na linguagem Python e permite tanto a criação quanto o compartilhamento facilitados de aplicativos web, sem exigir experiências sobre desenvolvimento e implantação de aplicações dos seus utilitários.

Os testes iniciais consistiram na verificação da capacidade de identificação de frequências sonoras relevantes por parte da aplicação proposta. Para isso, foram criados três arquivos de extensão WAV: um tom puro da frequência de 20 Hz, um tom puro da frequência de 20000 Hz e uma combinação de tons puros das frequências arbitrárias 20, 1000, 5000, 10000, 15000 e 20000 Hz. Os dois primeiros arquivos foram obtidos diretamente da internet. O terceiro arquivo, porém, foi construído através da extração de cada frequência pela internet e posterior unificação das mesmas com o auxílio do Audacity. Os próximos experimentos serviram para determinar o nível de precisão na quantificação da variação de decibéis em frequências sonoras, utilizando equalizadores virtual e real para a modificação

¹ <https://github.com/CaioSilvaRocha/analizadorAudio/tree/main/Audios>

² <https://www.audacityteam.org>

³ <https://www.sonicvisualiser.org>

de volumes.

No cenário virtual, foram utilizados o equalizador gráfico presente no Audacity, o qual possibilita a atenuação e o incremento de 20 dB nas frequências apresentadas pela Figura 5, e áudios de ruído branco com variações simultâneas de 20 dB nas frequências arbitrárias 5000, 10000 e 16000 Hz, gerados na mesma ferramenta. No cenário real, foram utilizados uma caixa acústica suspensa por um pedestal, uma mesa de som contendo potenciômetros para frequências graves, médias e agudas, um celular para reprodução de áudios, um celular para gravação dos sons reproduzidos pela caixa acústica, um cabo para conectar a caixa acústica na mesa de som e um cabo para conectar o celular de reprodução na mesa de som, os quais estão representados na Figura 6.

Além disso, o celular de reprodução continha áudio de ruído branco e de fala artificial sobre o texto arbitrário “Universidade Federal do Piauí”, o celular de gravação possuía um aplicativo denominado “WaveEditor” capaz de gravar áudios mono com uma taxa de amostragem máxima de 48000 Hz no formato WAV e o experimento foi realizado em uma igreja, cujo ambiente visto por cima está representado na Figura 7. Vale mencionar ainda que foram reproduzidos pela caixa acústica os áudios originais e as versões do ruído branco com atenuação e incremento de 15 dB para cada banda de frequência da mesa de som, sendo as gravações efetuadas a aproximadamente 45 centímetros de distância da caixa acústica, conforme representado pela Figura 8. Por fim, os sons de ruído branco e de fala artificial reproduzidos pela caixa acústica foram equalizados no Audacity, conforme as sugestões de decibéis da aplicação proposta.

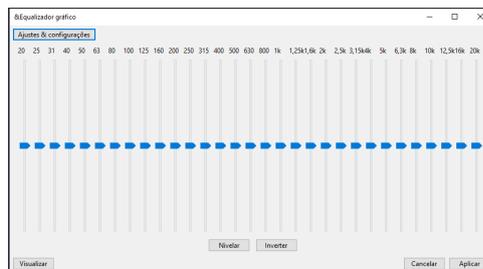


Figura 5 – Equalizador gráfico do Audacity. Fonte: (Autoral, 2025)



Figura 6 – Materiais utilizados no teste real. Fonte: (Autoral, 2025)

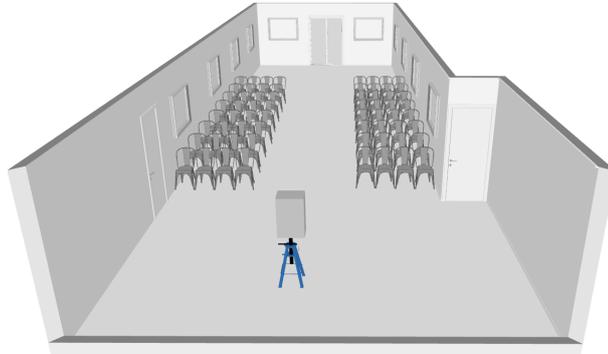


Figura 7 – Representação do ambiente de teste real visto por cima. Fonte: (Autorial, 2025)

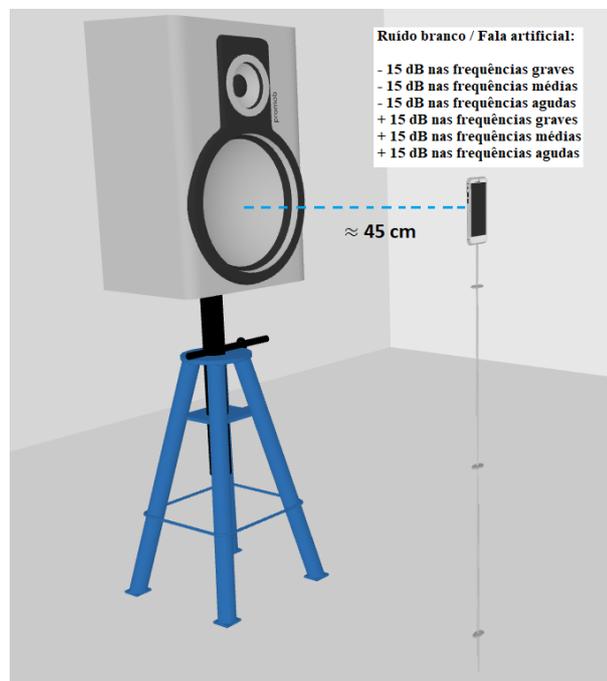


Figura 8 – Detalhes das gravações no teste real. Fonte: (Autorial, 2025)

5 Resultados

A aplicação¹ desenvolvida, cujos exemplo de uso e descrição de funcionalidades estão dispostos na Figura 9, conseguiu identificar frequências individuais e combinadas que compõem o limiar auditivo do ser humano, a partir dos testes realizados com os tons puros de 20 e 20000 Hz e a combinação de tons puros 20, 1000, 5000, 10000, 15000 e 20000 Hz, conforme apresentado pelas Figuras 10, 11 e 12, respectivamente. Em relação à quantificação das variações de decibéis utilizando equalizador gráfico virtual sobre o áudio de ruído branco atenuado e incrementado em 20 dB nas frequências 5000, 10000 e 16000 Hz, a aplicação apresentou resultados gráficos satisfatórios, conforme exposto pelas Figuras 13 e 14, obteve erros mínimos de 5 decibéis para o ruído branco atenuado e 8 decibéis para o ruído branco incrementado e identificou variações de decibéis nas frequências vizinhas às frequências de teste, em um intervalo arbitrário de 500 Hz, conforme ilustrado pelas Figuras 15 e 16. Nos testes de quantificação das variações de decibéis utilizando equalizador real sobre o áudio de ruído branco atenuado e incrementado em 15 dB nos intervalos frequenciais graves de 20 a 300 Hz, médios de 300 a 5000 Hz e agudos de 5000 a 20000 Hz, os resultados gráficos também foram satisfatórios, conforme destacado pelas Figuras 17 a 22. Nos experimentos finais, as sugestões de equalização retornadas pela aplicação foram suficientes para aproximar consideravelmente os áudios de ruído branco e de fala artificial reproduzidos pela caixa acústica às suas respectivas versões originais, conforme exposto pelas Figuras 23 e 24, considerando as limitações do equalizador gráfico do Audacity e os decibéis de frequências vizinhas nos intervalos arbitrários de 100, 500 e 1000 Hz para as faixas de frequências 20 a 1000, 1000 a 10000 e 10000 a 20000 Hz, respectivamente. Ademais, os comparativos entre as métricas de taxa de cruzamento por zero para a forma sonora geral, ritmo para a estrutura rítmica, croma para as frequências existentes, envelope de energia para as variações de decibéis, contraste espectral, percepção e ponderada por stent referentes aos áudios em suas versões originais, reproduzidas por caixa acústica e equalizadas encontram-se nas Tabelas 2 e 3. A métrica de ponderada por stent, em especial, combina as métricas anteriores utilizando seus respectivos pesos e varia de 0 a 1, indicando similaridades mínima e máxima respectivamente. Vale mencionar ainda que a aplicação retorna mensagens de erro nos casos de fornecimento de arquivos com extensões ou tamanhos não permitidos, ausência de som no áudio e uso de tamanho de janela de análise incompatível com a quantidade de dados presentes nos áudios.

¹ <https://suporteequalizacao.streamlit.app/>



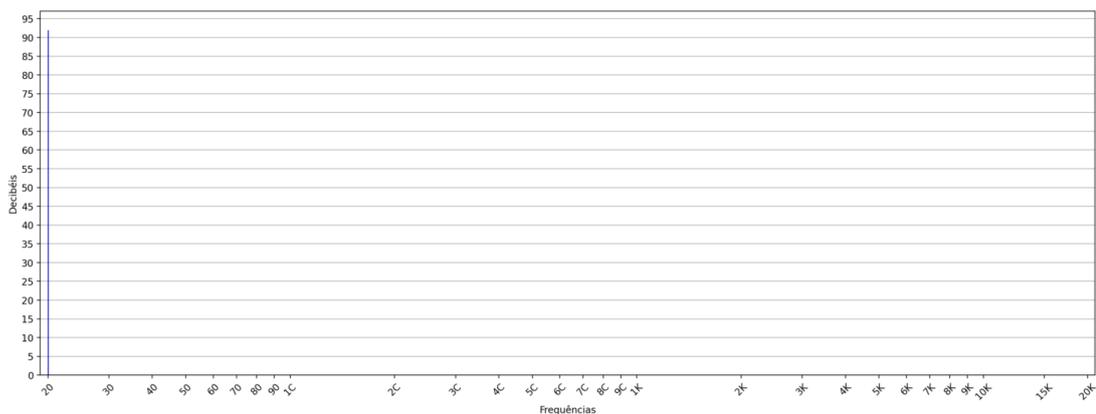
Figura 9 – Exemplo de uso e descrição de funcionalidades da aplicação desenvolvida.

Tabela 2 – Comparações de métricas das versões de ruído branco.

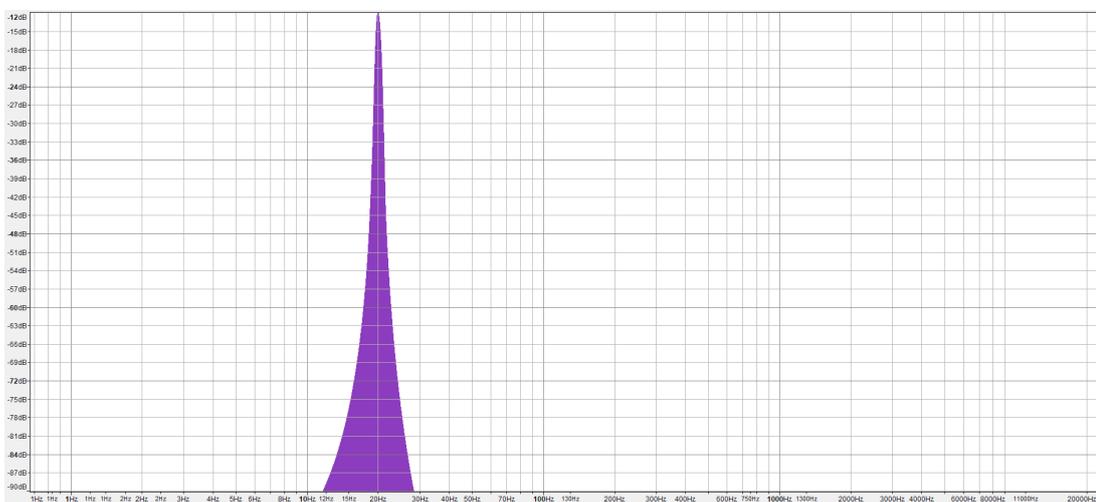
Métricas (%)	Ruído branco original versus reproduzido por caixa acústica	Ruído branco original versus reproduzido por caixa acústica equalizado
Taxa de Cruzamento por Zero (5)	0.8220	0.9795
Ritmo (5)	0.5000	0.5000
Croma (5)	0.8253	0.8372
Envelope de Energia (40)	0.5002	0.4997
Contraste Espectral (5)	0.8724	0.8859
Percepção (40)	0.5048	0.5039
Ponderada por Stent	0.5530	0.5616

Tabela 3 – Comparações de métricas das versões de fala artificial.

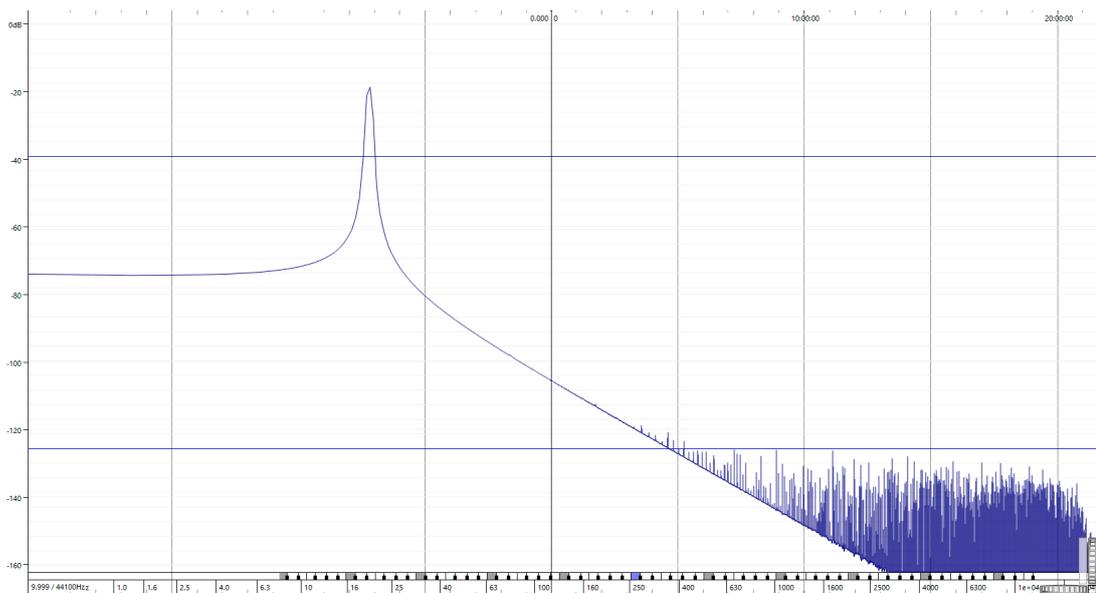
Métricas (%)	Fala artificial original versus reproduzida por caixa acústica	Fala artificial original versus reproduzida por caixa acústica equalizada
Taxa de Cruzamento por Zero (5)	0.9661	0.9267
Ritmo (5)	0.4999	0.5349
Croma (5)	0.7150	0.7097
Envelope de Energia (40)	0.4385	0.4479
Contraste Espectral (5)	0.8536	0.8723
Percepção (40)	0.5622	0.5622
Ponderada por Stent	0.5520	0.5562



(a) Autoral

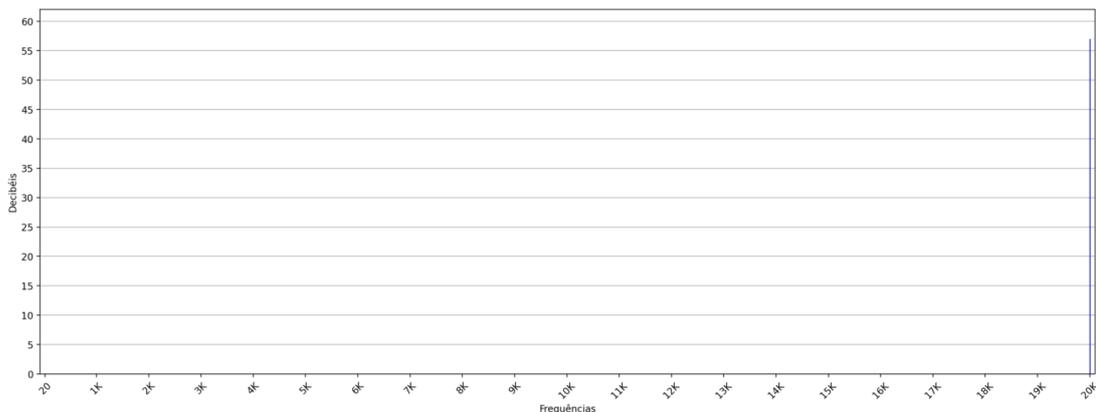


(b) Audacity

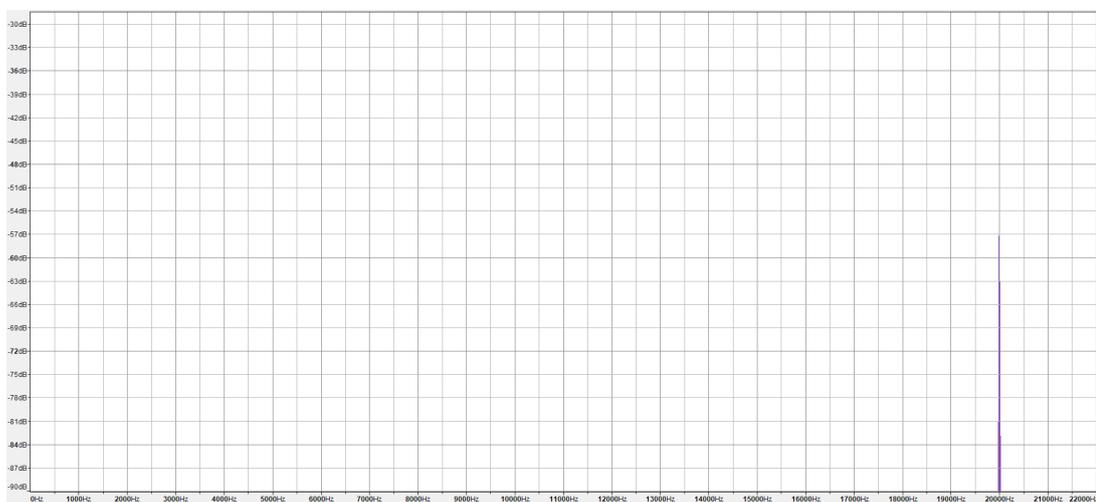


(c) Sonic Visualiser

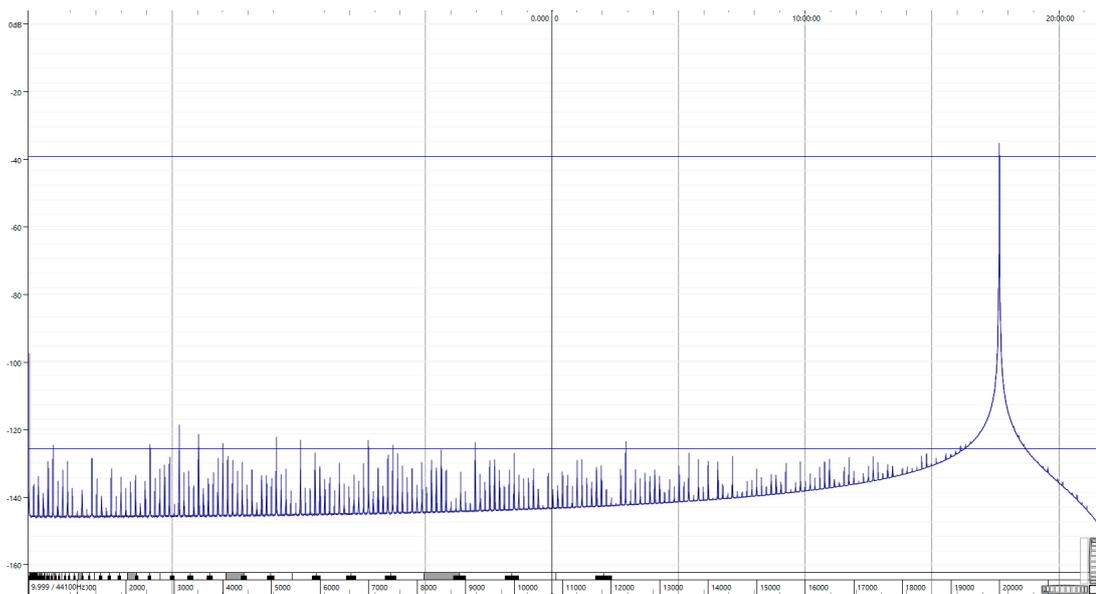
Figura 10 – Teste de tom puro de 20 Hz.



(a) Autoral

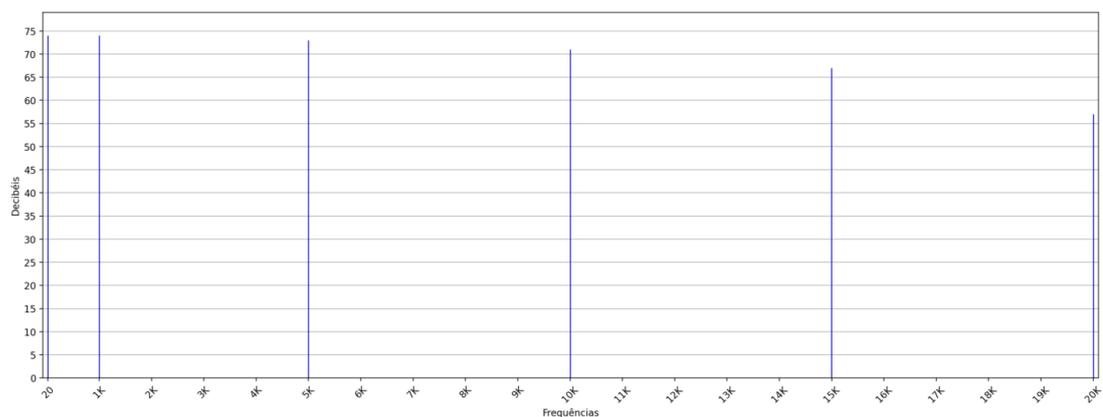


(b) Audacity

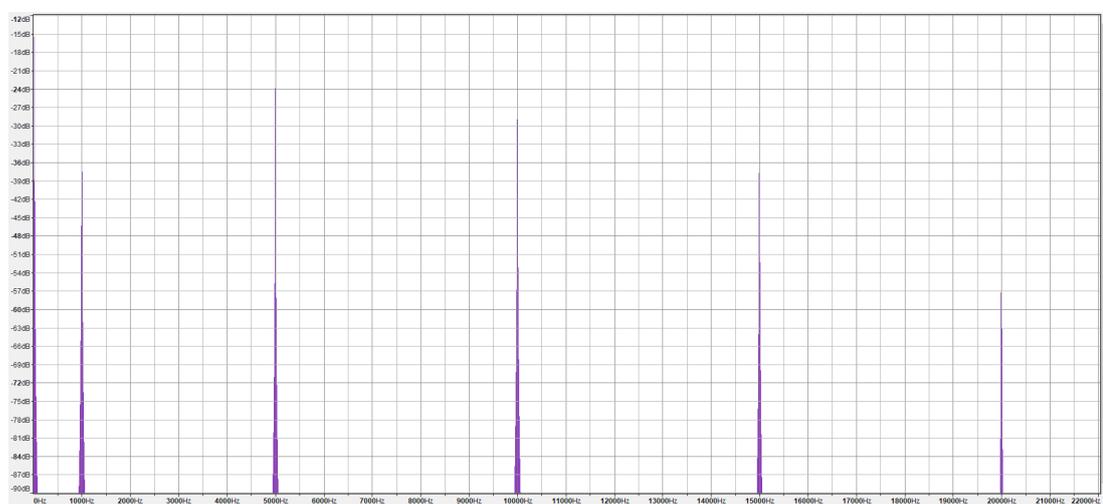


(c) Sonic Visualiser

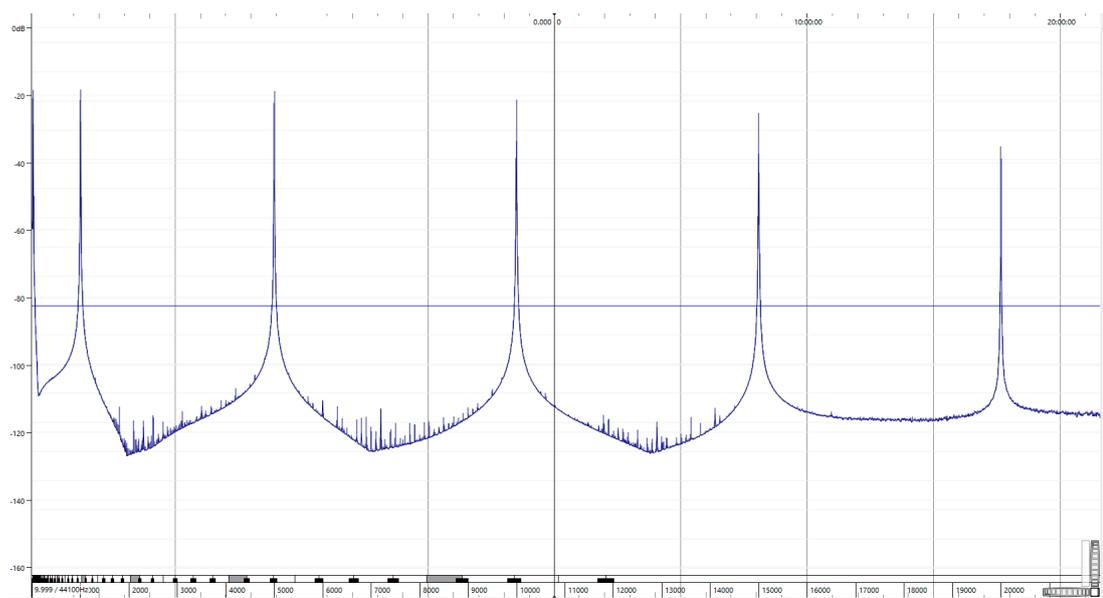
Figura 11 – Teste de tom puro de 20000 Hz.



(a) Autoral

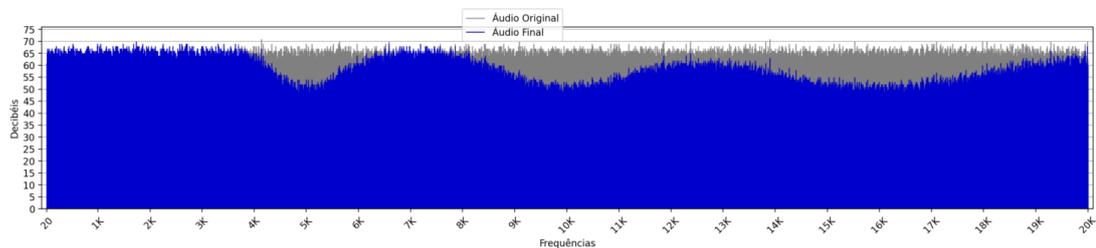


(b) Audacity

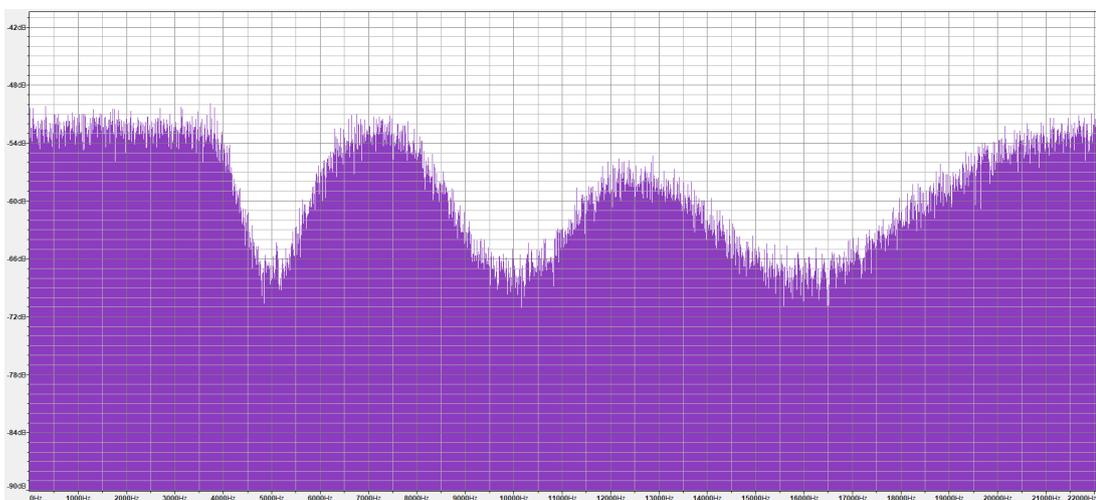


(c) Sonic Visualiser

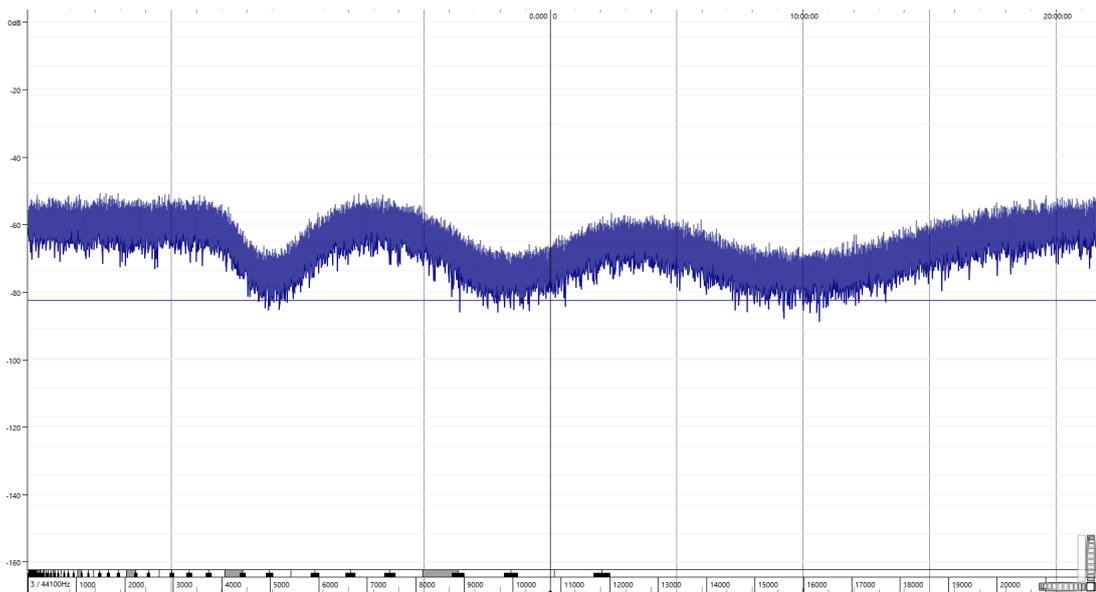
Figura 12 – Teste de combinação de tons puros de 20, 1000, 5000, 10000, 15000 e 20000 Hz.



(a) Autoral (Ruído atenuado na cor azul)

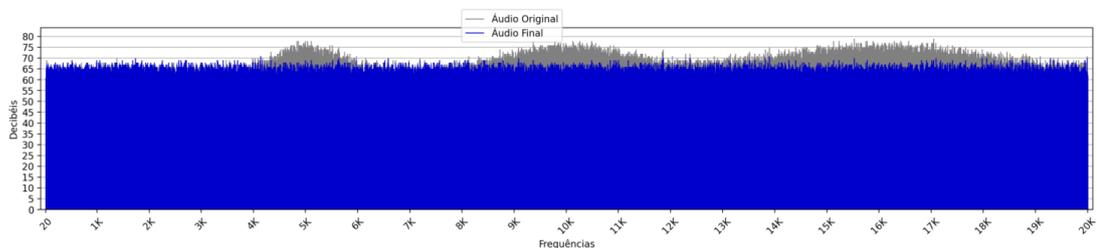


(b) Audacity

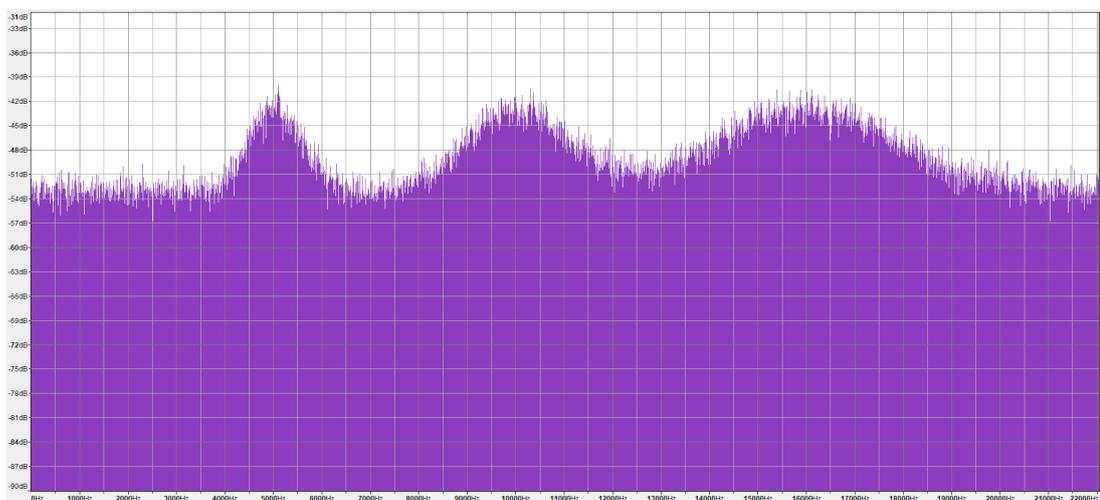


(c) Sonic Visualiser

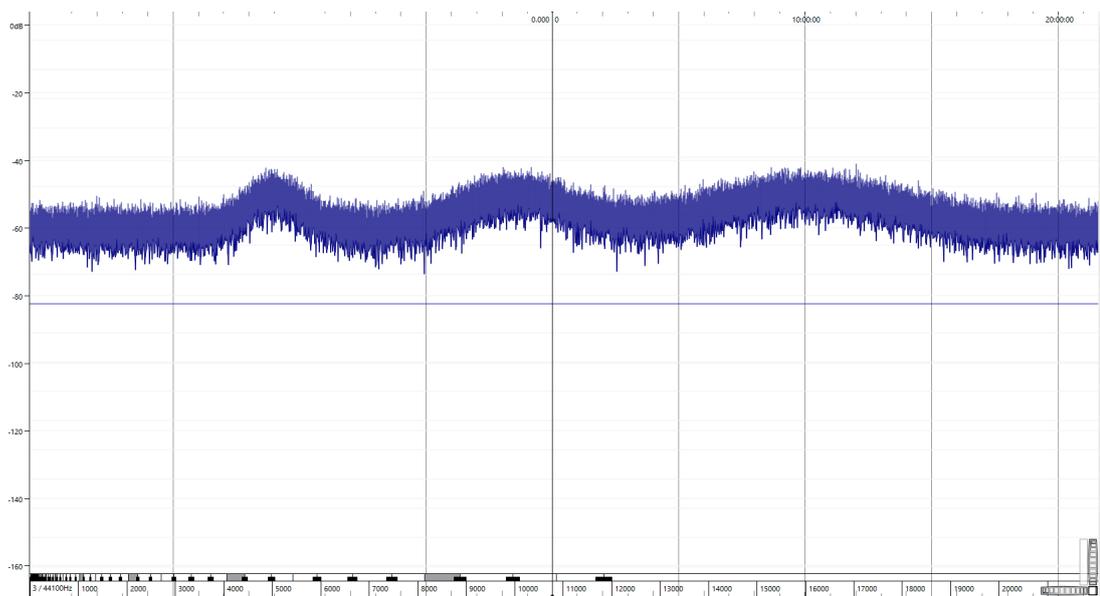
Figura 13 – Teste de ruído branco atenuado em 20 dB nas frequências 5000, 10000 e 16000 Hz.



(a) Autoral (Ruído incrementado na cor cinza)



(b) Audacity



(c) Sonic Visualiser

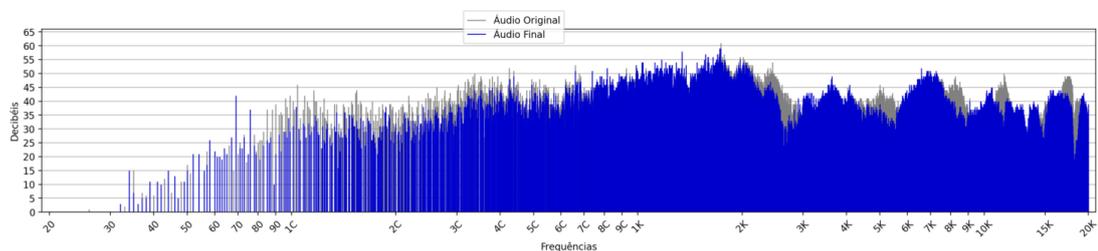
Figura 14 – Teste de ruído branco incrementado em 20 dB nas frequências 5000, 10000 e 16000 Hz.

Frequências	Decibéis Originais	Decibéis Finais	Sugestões de Equalização	Erro de Decibéis
4500	67	57	Aumentar 10 dB	- 5 dB
5000	65	50	Aumentar 15 dB	
5500	65	54	Aumentar 11 dB	
9501	59	45	Aumentar 14 dB	- 6 dB
10000	65	51	Aumentar 14 dB	
10501	62	48	Aumentar 14 dB	
15500	51	36	Aumentar 15 dB	- 5 dB
16000	60	45	Aumentar 15 dB	
16500	66	51	Aumentar 15 dB	

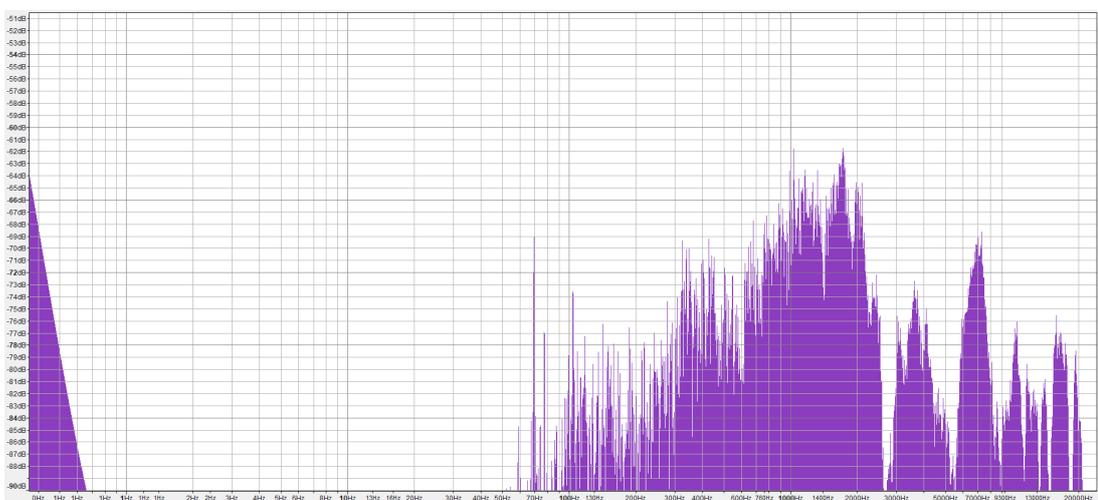
Figura 15 – Sugestões de equalização para o ruído branco atenuado.

Frequências	Decibéis Originais	Decibéis Finais	Sugestões de Equalização	Erro de Decibéis
4500	73	67	Aumentar 6 dB	- 10 dB
5000	75	65	Aumentar 10 dB	
5500	73	65	Aumentar 8 dB	
9501	67	59	Aumentar 8 dB	- 8 dB
10001	72	60	Aumentar 12 dB	
10501	72	62	Aumentar 10 dB	
15501	73	62	Aumentar 11 dB	- 11 dB
16001	74	65	Aumentar 9 dB	
16500	76	66	Aumentar 10 dB	

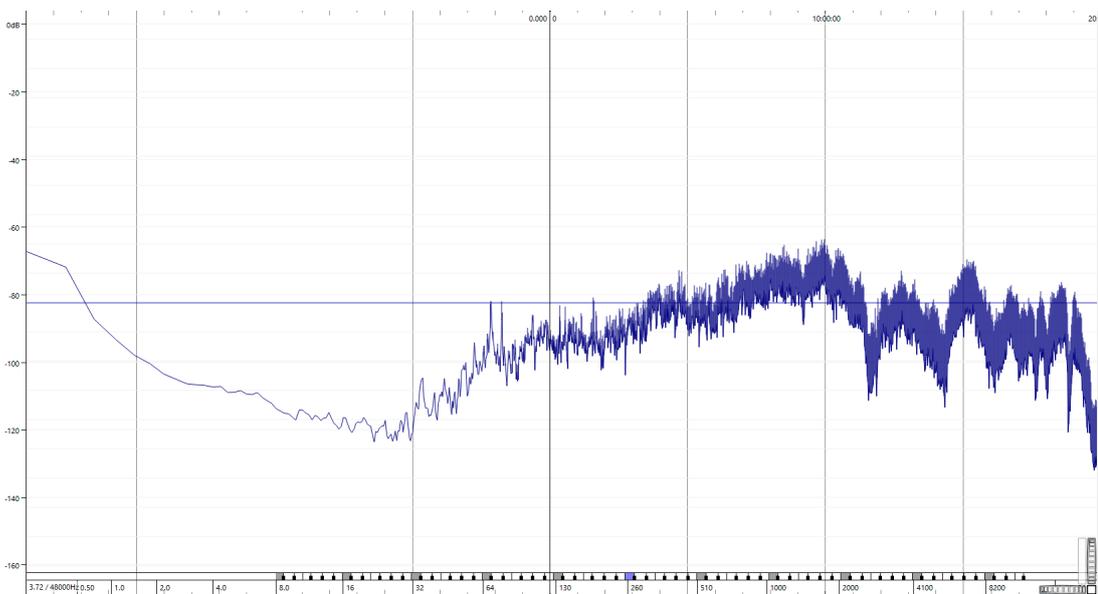
Figura 16 – Sugestões de equalização para o ruído branco incrementado.



(a) Autoral (Ruído atenuado na cor azul)

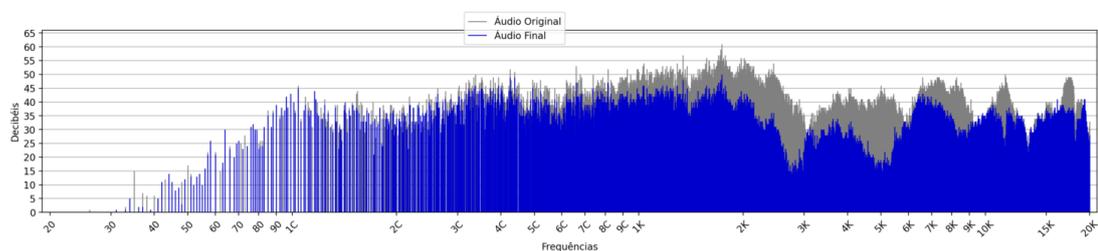


(b) Audacity

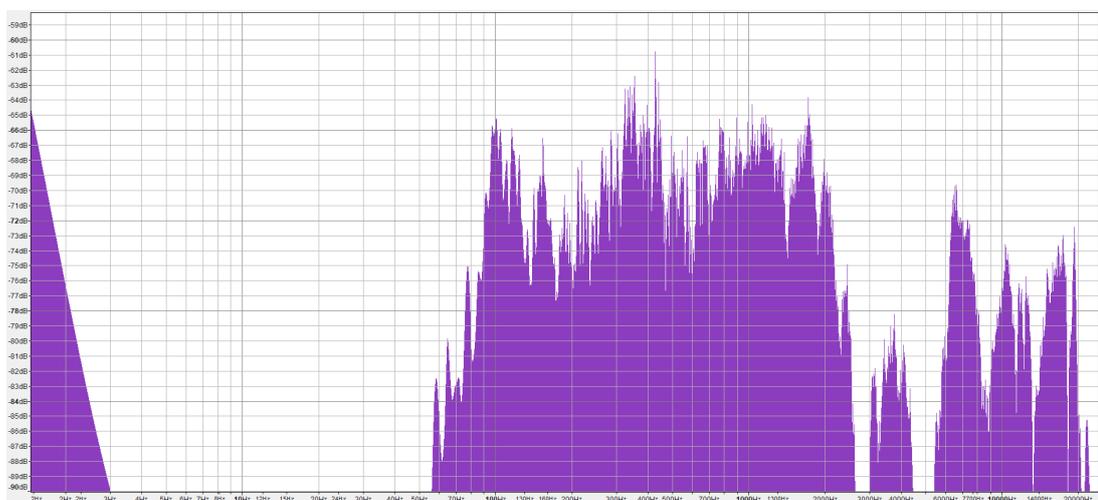


(c) Sonic Visualiser

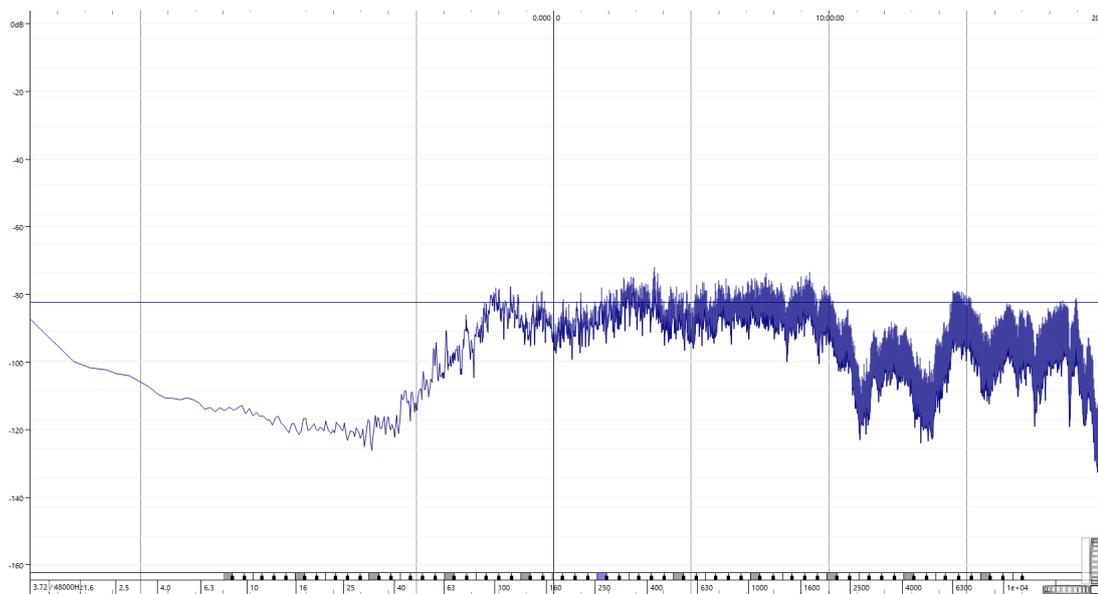
Figura 17 – Teste de ruído branco atenuado em 15 dB nos graves reproduzido pela caixa acústica.



(a) Autoral (Ruído atenuado na cor azul)

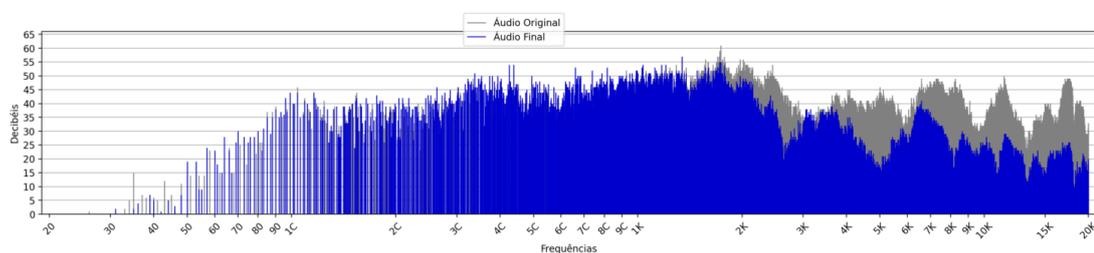


(b) Audacity

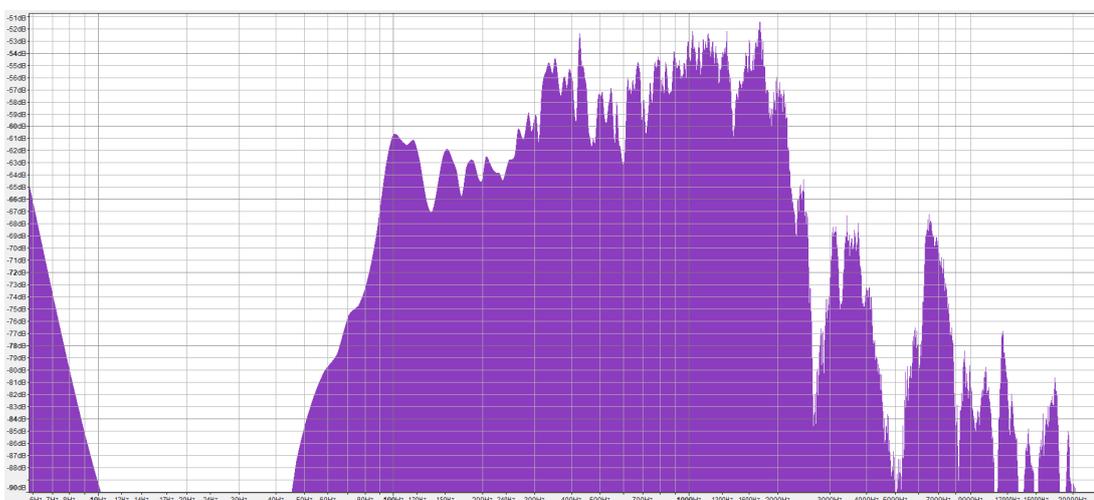


(c) Sonic Visualiser

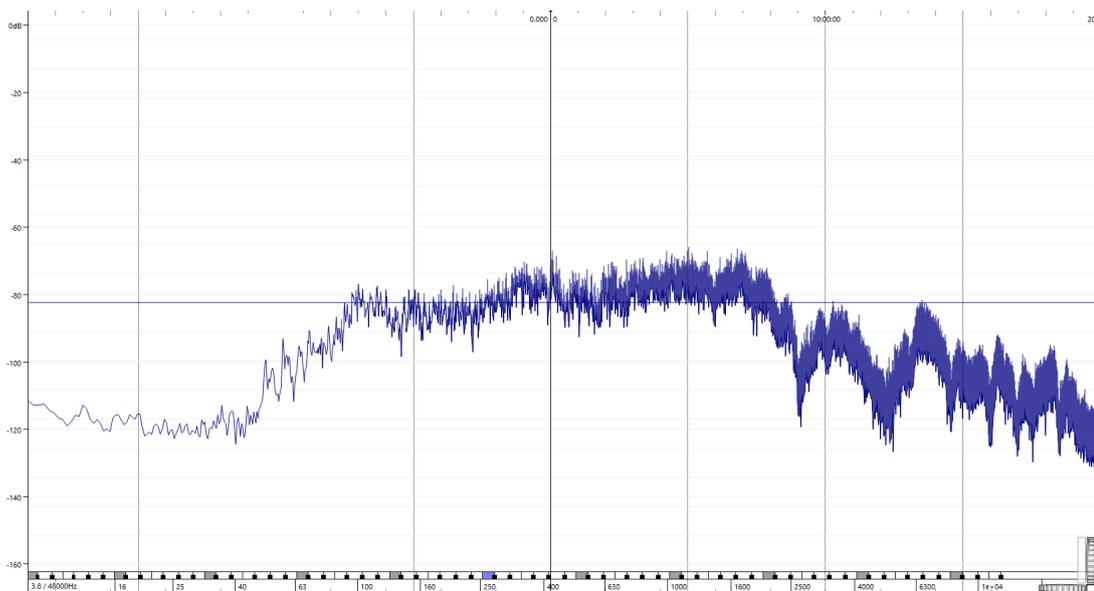
Figura 18 – Teste de ruído branco atenuado em 15 dB nos médios reproduzido pela caixa acústica.



(a) Autoral (Ruído atenuado na cor azul)

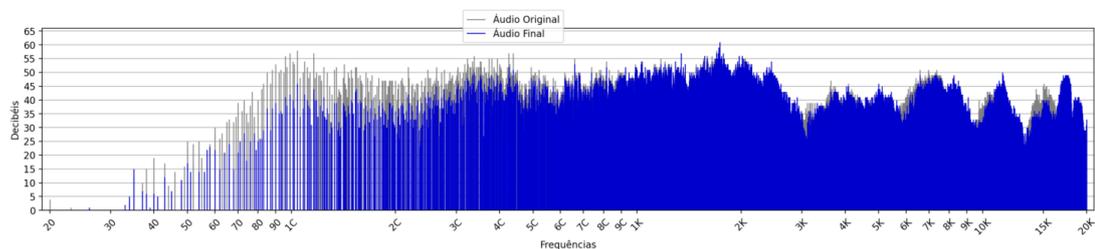


(b) Audacity

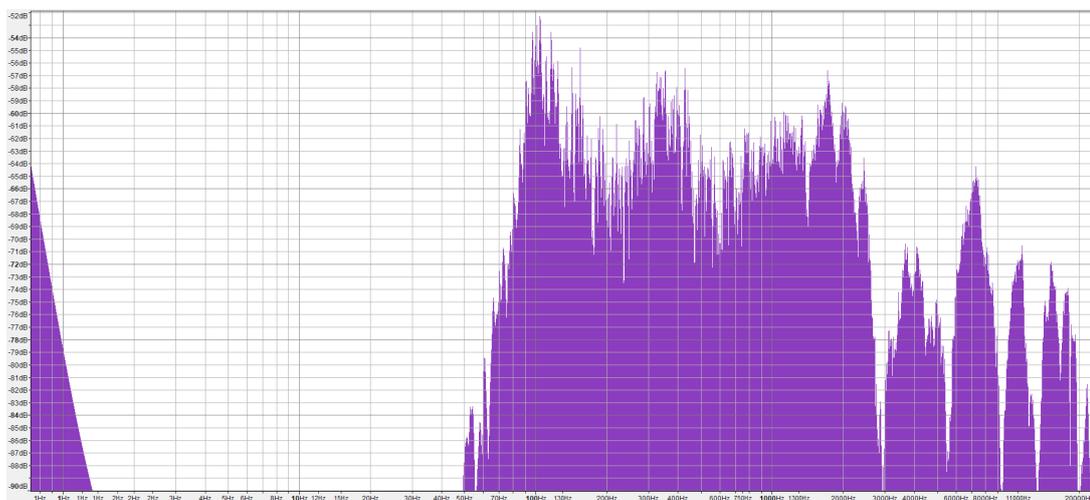


(c) Sonic Visualiser

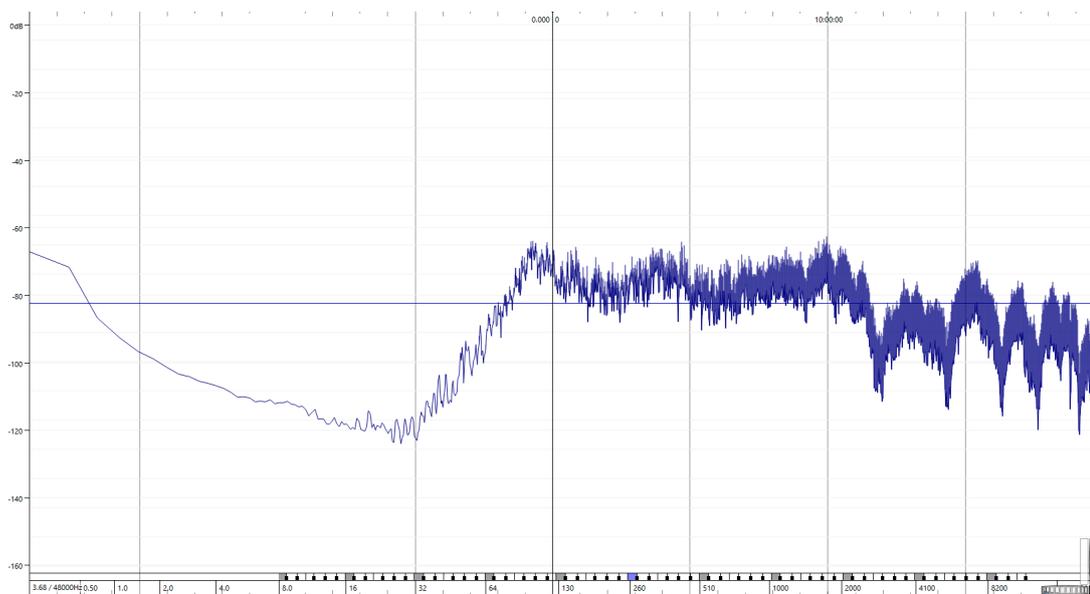
Figura 19 – Teste de ruído branco atenuado em 15 dB nos agudos reproduzido pela caixa acústica.



(a) Autoral (Ruído incrementado na cor cinza)

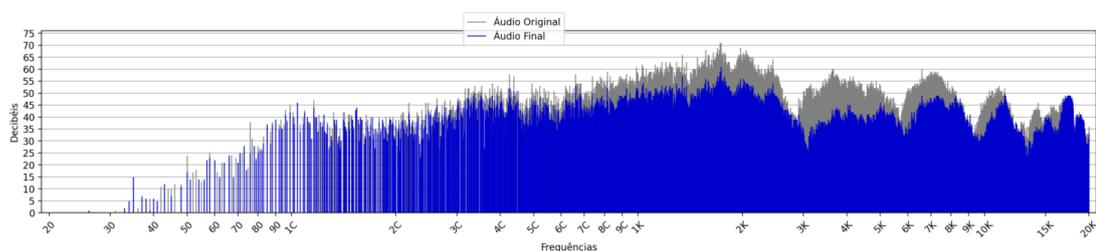


(b) Audacity

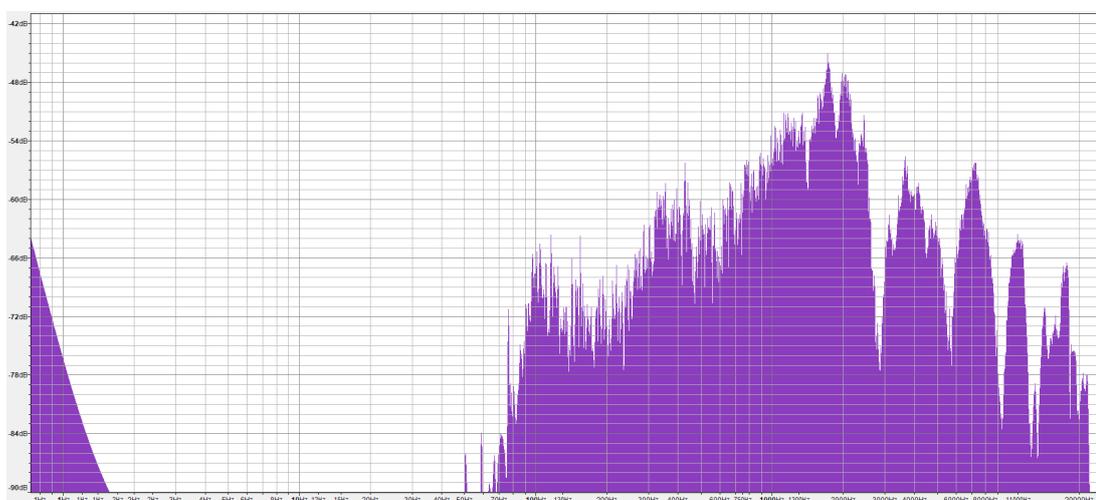


(c) Sonic Visualiser

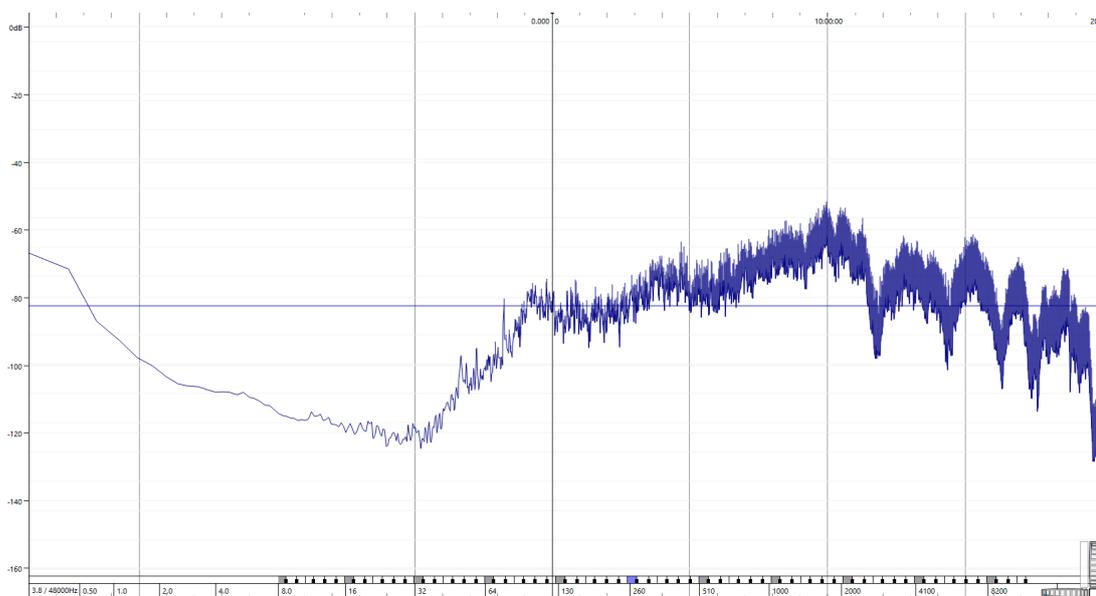
Figura 20 – Teste de ruído branco incrementado em 15 dB nos graves reproduzido pela caixa acústica.



(a) Autoral (Ruído incrementado na cor cinza)

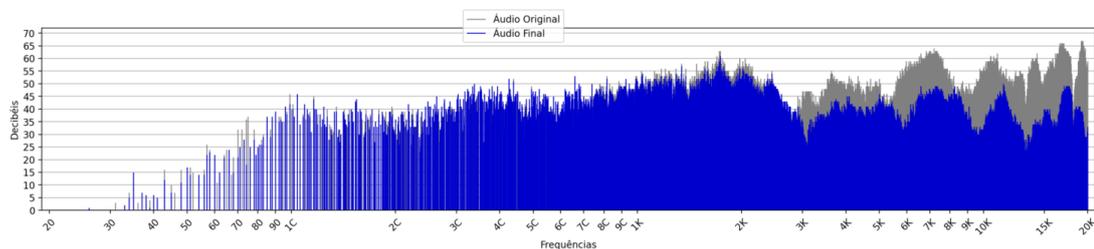


(b) Audacity

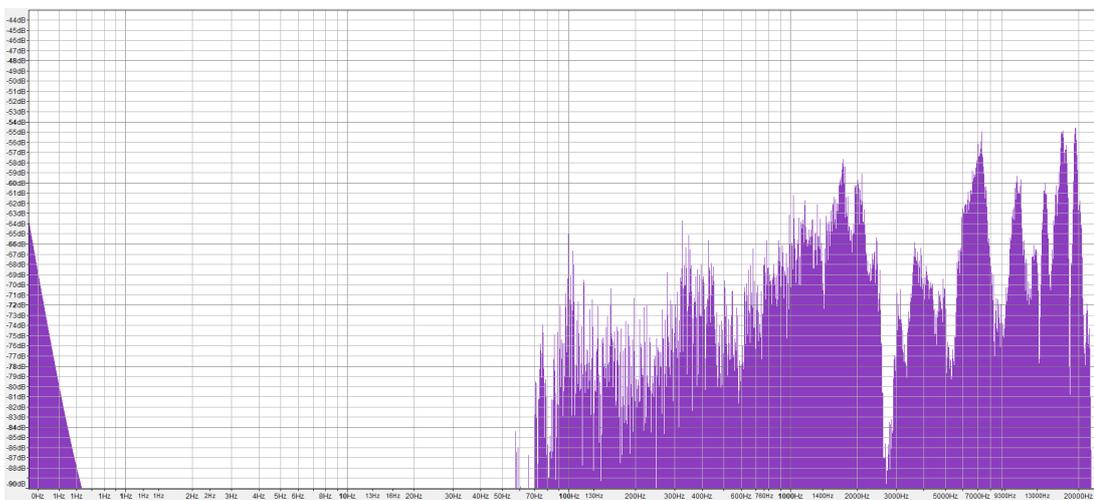


(c) Sonic Visualiser

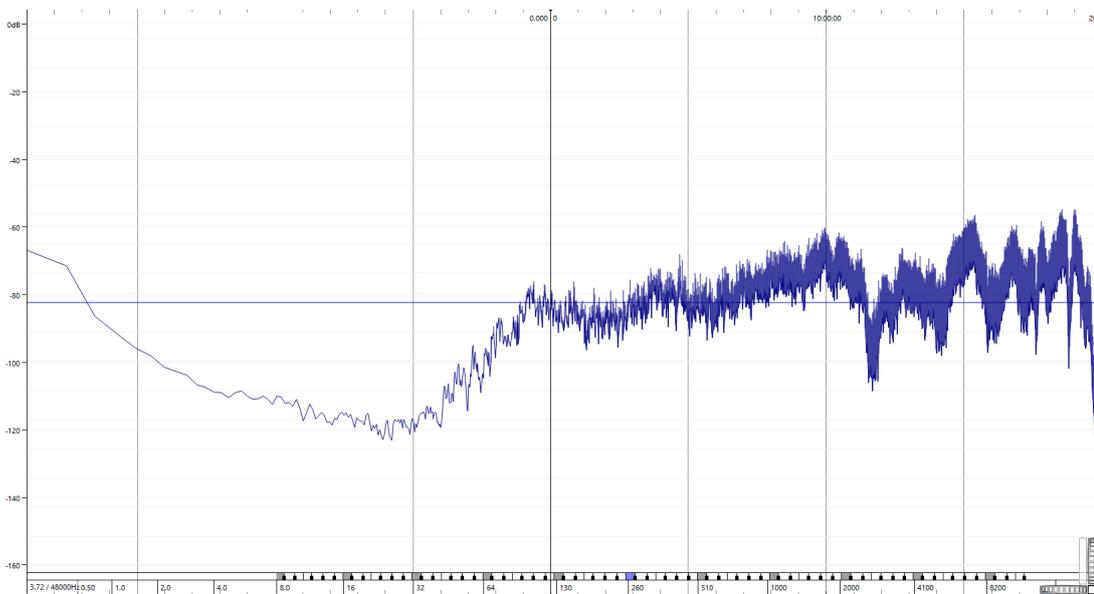
Figura 21 – Teste de ruído branco incrementado em 15 dB nos médios reproduzido pela caixa acústica.



(a) Autoral (Ruído incrementado na cor cinza)

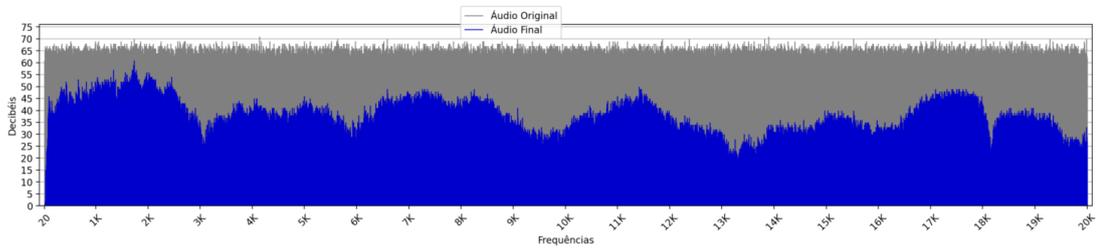


(b) Audacity

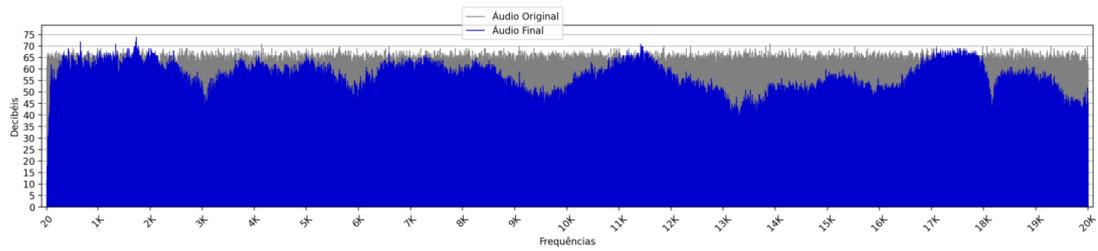


(c) Sonic Visualiser

Figura 22 – Teste de ruído branco incrementado em 15 dB nos agudos reproduzido pela caixa acústica.

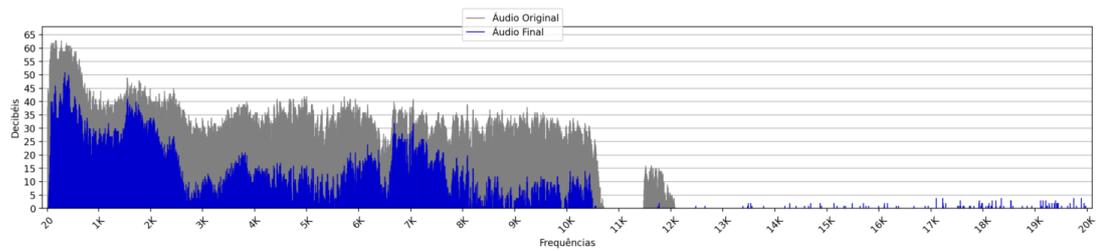


(a) Áudio original versus áudio reproduzido pela caixa acústica

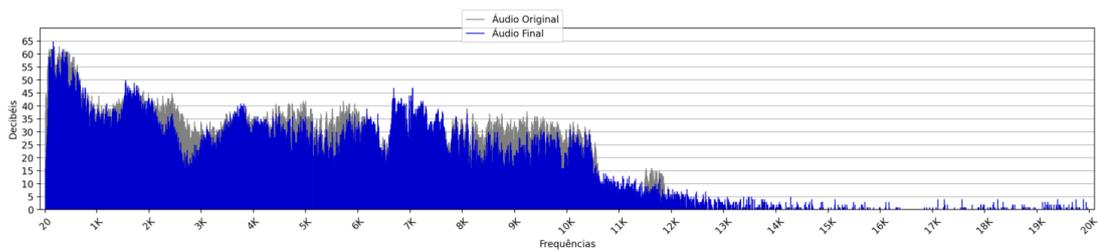


(b) Áudio original versus áudio reproduzido pela caixa acústica equalizado

Figura 23 – Comparações do ruído branco antes e depois da equalização.



(a) Áudio original versus áudio reproduzido pela caixa acústica



(b) Áudio original versus áudio reproduzido pela caixa acústica equalizado

Figura 24 – Comparações da fala artificial antes e depois da equalização.

6 Conclusão

Conforme apresentado nos resultados anteriores, os objetivos específicos definidos foram alcançados pela aplicação desenvolvida ao executar a análise de áudios originais e reproduzidos por caixa acústica, permitir a comparação de decibéis das frequências presentes nos áudios de entrada exibindo gráficos separados e sobrepostos semelhantes aos retornados por outras ferramentas de teste, e apresentar ajustes de equalização capazes de aproximar consideravelmente os decibéis das frequências do áudio reproduzido pela caixa acústica aos presentes no áudio original, aproximando suas percepções sonoras consequentemente. Como vantagens adicionais, a aplicação não exige custos financeiros para sua utilização e possui uma usabilidade simples.

Apesar do potencial colaborativo da ferramenta, vale destacar que seu funcionamento está condicionado ao fornecimento de arquivos de áudios previamente gravados, não permitindo a coleta de sons em tempo real. Além disso, suas sugestões de equalização não apresentam valores exatos de decibéis, retornando erros maiores de diferença entre valor real e valor detectado principalmente quando o áudio reproduzido pela caixa acústica possui prevalência de volumes superiores aos presentes no áudio original. Tais limitações ocasionam retardo temporal no objetivo geral de otimização da atividade de equalização desenvolvida por operador de caixa ou mesa de som em cenários reais.

Contribuições futuras podem ser implementadas a fim de aperfeiçoar a usabilidade, o desempenho e os resultados da aplicação para a equalização de áudio como, por exemplo, a utilização de linguagem e lógica de programação mais adequadas, inclusão de funcionalidade própria de gravação de áudios considerando a taxa de amostragem e o formato do arquivo, modificação de sua apresentação gráfica considerando a experiência do usuário, além da utilização de ferramentas mais sofisticadas e profissionais para teste e validação, incluindo dispositivo que possibilite a modificação de decibéis de maiores quantidades de faixas de frequências.

Referências

- 226, I. Acoustics—Normal equal-loudness-level contours. [S.l.]: International Organization for Standardization Geneva, Switzerland, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 17.
- ARIYANI, S.; IRAWAN, D.; WAFI, M. A. Perancangan dan implementasi perbaikan kualitas dari sinyal audio menggunakan ic tda7439. 2021. Citado 3 vezes nas páginas 12, 21 e 23.
- BARBOSA, V. dos S.; MARÃES, P. A. Teste automatizado de sinais acústicos utilizando matlab. 2019. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 23.
- BODANESE, J. P. Implementação de um equalizador de áudio em dsp. 2008. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 23.
- BORATTO, T. et al. Recuperação de informação musical como ferramenta para análise sonora: uma inicialização. 2022. Citado 3 vezes nas páginas 12, 14 e 18.
- CARDELL, E.; JOHANSSON, E. Loudspeaker concept design. 2024. Citado na página 16.
- CARVALHO, J. M. C.; ALBERNAZ, C. M. R. M. Interface didática para análise de vibrações mecânicas. *Exatas & Engenharias*, v. 9, n. 26, p. 22–34, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 23.
- CONCEIÇÃO, F. C.; BECCARO, W. Equalização de sistemas sonoros baseada em filtros inversos: metodologia de projeto e implementação em tempo real em plataforma dsp. 2020. Citado 5 vezes nas páginas 12, 13, 18, 21 e 23.
- COSTA, R. G. et al. Acústica para engenheiros. 2023. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 15.
- DADAM, A. P. Analisador de frequência e espectro sonoro para alinhamento de sistemas de áudio. 2019. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 23.
- DELGADO, L. A. P. Análise do espectro de frequências em cordas de guitarras quando excitadas em diferentes posições. 2022. Citado 4 vezes nas páginas 12, 18, 20 e 23.
- DUFBERG, F.; HAMBERGER, V. Design investigation of passive radiators in loudspeakers. 2024. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 14.
- ESPINDOLA, R. T. Transferência de dados via ondas sonoras. 2023. Citado na página 18.
- FILGUEIRA, J. d. O. Equalizador automático de áudio. 2006. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 23.
- FUOCO, T. M. C. Possibilidades praticas de ensino musical atraves de tecnologias de estudio. Universidade Estadual Paulista (Unesp), 2023. Citado na página 17.
- GISBERT, B. M.; HENRIQUES, F. d. S. Implementação em python de detecção de onset e estimação da frequência central. 2023. Citado na página 19.

- HALDANKAR, G.; VASHI, H.; SARODE, J. Audio frequency analyzer using expeyes and raspberry pi. Sri Venkateswar College of Engineering and Technology Srikakulam, Andhra Pradesh, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 23.
- JAGIELSKI, C. DESIGN OF A REAL-TIME DIGITAL SIGNAL PROCESSING AUDIO PROCESSING TECHNIQUE. Tese (Doutorado), 2012. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 23.
- JUNIOR, J. L. M. P. Desenvolvimento de um software web para processamento e análise acústica da voz. 2022. Citado 4 vezes nas páginas 12, 19, 20 e 23.
- JUST, S. A. Real-time audio spectrum analyser. 2016. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 23.
- LANGELAAR, J.; MATSSON, A. S.; NATVIG, F. Development of real time audio equalizer application using Matlab App Designer. 2019. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 23.
- LISKI, J. Equalizer design for sound reproduction. Aalto University, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 19.
- LIZ, V. d. et al. Física do som: uma sequência didática através dos 3 momentos pedagógicos. 2023. Citado 3 vezes nas páginas 12, 15 e 16.
- MACIEL, C. D. Processamento de sinais. 2022. Citado 3 vezes nas páginas 7, 13 e 18.
- MARTINS, A. Construção e análise de um microfone com circuito de amplificação diferencial. 2022. Citado na página 15.
- MORAES, R. B. de. Estimativa de tons e acordes musicais mediante análise espectro-temporal. REVISTA FOCO, v. 16, n. 02, p. e948–e948, 2023. Citado na página 19.
- PEPE, G. et al. Designing audio equalization filters by deep neural networks. Applied Sciences, MDPI, v. 10, n. 7, p. 2483, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 23.
- PONTES, V. A. Sequência de atividades sobre acústica utilizando análise espectral do som. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2022. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 23.
- RAHARJO, B.; ZAKARIA, M. Real-time audio spectrum analyzer to analyze loudspeaker. In: IOP PUBLISHING. Journal of Physics: Conference Series. [S.l.], 2019. v. 1413, n. 1, p. 012005. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 23.
- RAHMAN, N. An efficient method for frequency calculation of an audio signal. Presidency, v. 2, p. 41–45, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 23.
- REDFERN, N. Computational analysis of a horror film trailer soundtrack with python. nd, at https://www.academia.edu/43289938/Computational_analysis_of_a_horror_film_trailer_soundtrack_with_Python, 2020. Citado 3 vezes nas páginas 18, 21 e 23.
- RODRIGUES, C. G. Ondas, acústica, psicoacústica e poluição sonora. Goiânia: do Autor, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 16.

- SAH, H. V. 3-band tone control/7-band parametric equalizer. 2020. Citado 4 vezes nas páginas 13, 19, 22 e 23.
- SANTOS, D. S. d. Desenvolvimento de um conversor analógico-digital por aproximações sucessivas assíncrono para aplicações biomédicas em cmos180nm. 2023. Citado 3 vezes nas páginas 13, 17 e 18.
- SANTOSO, L. W.; LIM, R.; SULISTIO, R. Aplikasi Spectrum Analyser untuk Menganalisa Loudspeaker. Tese (Doutorado) — Petra Christian University, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 23.
- SILVA, A. D. S. Desenvolvimento de sistema de avaliação da qualidade de reprodução de áudio em alto-falantes com resposta pobre em baixas frequências. 2017. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 23.
- SMANIOTTO, G. C. Super-resolucao de audio utilizando redes neurais artificiais. 2023. Citado 3 vezes nas páginas 12, 15 e 17.
- VARELA, J. N. Equalizador paramétrico de áudio digital com cinco bandas, interface gráfica touch screen e operação em tempo real. 2021. Citado 4 vezes nas páginas 13, 19, 21 e 23.
- VERAS, F. C. et al. Eccentricity failure detection of brushless dc motors from sound signals based on density of maxima. IEEE Access, IEEE, v. 7, p. 150318–150326, 2019. Citado na página 12.
- WAHYUDI, S. T. et al. Aplikasi spectrum analyzer untuk menganalisa frekuensi sinyal audio menggunakan matlab. Tese (Doutorado) — Riau University, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 23.
- Бранцевич. Цифровая обработка вибрационных сигналов. Бестпринт, 2022. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 18.
- Митюхин. АЛГОРИТМЫ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ. 2023. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 18.
- Поштаренко. Програмна система вимірювання амплітудно частотної характеристики акустичного динаміка. КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 23.



TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA PUBLICAÇÃO DIGITAL NA BIBLIOTECA “JOSÉ ALBANO DE MACEDO”

Identificação do Tipo de Documento

- () Tese
- () Dissertação
- (X) Monografia
- () Artigo

Eu, **Caio da Silva Rocha**, autorizo com base na Lei Federal nº 9.610 de 19 de Fevereiro de 1998 e na Lei nº 10.973 de 02 de dezembro de 2004, a biblioteca da Universidade Federal do Piauí a divulgar, gratuitamente, sem ressarcimento de direitos autorais, o texto integral da publicação “Analisador e Sugestor de Equalização de Áudio com Python e Streamlit” de minha autoria, em formato PDF, para fins de leitura e/ou impressão, pela internet a título de divulgação da produção científica gerada pela Universidade.

Picos-PI 08 de julho de 2025.



Documento assinado digitalmente
CAIO DA SILVA ROCHA
Data: 08/07/2025 12:28:20-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Assinatura