

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

JOÃO EDUARDO ALVES BRAUNERT

**ANÁLISE QUANTITATIVA DO USO DE UM COMPRESSOR ANALÓGICO
UNIVERSAL ÁUDIO LN1176 E UM COMPRESSOR DIGITAL, UA 1176
CLASSIC LIMITER, EM PRODUÇÕES MUSICAIS**

CURITIBA

2023

JOÃO EDUARDO ALVES BRAUNERT

**ANÁLISE QUANTITATIVA DO USO DE UM COMPRESSOR ANALÓGICO
UNIVERSAL ÁUDIO LN1176 E UM COMPRESSOR DIGITAL, UA 1176
CLASSIC LIMITER, EM PRODUÇÕES MUSICAIS**

**Qualitative analysis of the use of an analogic compressor Universal Audio
LN1176 and a digital compressor, UA 1176 Classic Limiter, in music
production**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Elétrica do
Curso de Engenharia Elétrica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos Pinho

CURITIBA

2023



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

JOÃO EDUARDO ALVES BRAUNERT

**ANÁLISE QUANTITATIVA DO USO DE UM COMPRESSOR ANALÓGICO
UNIVERSAL ÁUDIO LN1176 E UM COMPRESSOR DIGITAL, UA 1176
CLASSIC LIMITER, EM PRODUÇÕES MUSICAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Elétrica do
Curso de Engenharia Elétrica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 27/novembro/2023

Antonio Carlos Pinho
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Adriano Ruseler
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Daniel Flores Cortez
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Marcelo de Oliveira Rosa
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**CURITIBA
2023**

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo comparar os resultados do tratamento de uma onda sonora ao ser tratada por um equipamento analógico e um equipamento digital. Sendo, inicialmente, realizado um levantamento teórico sobre os equipamentos que seriam utilizados e posteriormente a realização do experimento junto à análise dos resultados obtidos. Para o experimento foram utilizados dois microfones colocados de forma paralela e próxima um do outro, de modo a captarem a fonte sonora, as quais foram tocadas em frente a ambos os microfones, com a maior semelhança possível. Um dos sinais passou então, por uma compressão utilizando um equipamento analógico enquanto o outro passou por um processo semelhante porém usando de uma compressão por um equipamento digital. Os equipamentos utilizados foram o compressor analógico LN1176 da Universal Audio e o compressor digital UA 1176 CLASSIC LIMITER, também da Universal Audio. Ambos os resultados foram, por fim, comparados de forma matemática utilizando do Excel para localizar seus respectivos picos de energia e correlações entre ondas sonoras.

Palavras-chave: compressor analógico; compressor digital; correlação de ondas sonoras.

ABSTRACT

This paper had as a goal comparing the sound waves' treatment results when using an analog and a digital equipment. First, a theoretical assessment of the equipment that would be used was made. Then, the experiment was conducted with the results' analysis. For the experiment, two microphones were used. They were parallel, next to each other, in a way that both had the same ability to capture the sounds made by the source that played in front of both microphones. One of the signals would pass through an analog compressor, while the other one would pass through a digital compressor. The equipment used was an analog compressor LN1176 and a digital compressor UA 1176 Classic Limiter, both made by Universal Audio. The results were then compared using Excel to find their related energy peaks and correlations between sound waves.

Keywords: analogic compressor; digital compressor; correlations between sound waves.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
1.1	Tema	8
1.1.1	DELIMITAÇÃO DO TEMA	8
1.2	PROBLEMAS E PREMISSAS	9
1.3	OBJETIVOS	9
1.3.1	Objetivo Geral	9
1.3.2	Objetivos Específicos	9
1.4	Justificativa	9
1.5	METODOLOGIA DA PESQUISA	10
2	EQUIPAMENTOS	11
2.1	Microfones	11
2.1.1	Padrões de captação	11
<u>2.1.1.1</u>	<u>Microfones Ominidirecionais.</u>	12
<u>2.1.1.2</u>	<u>Microfones Bidirecionais.</u>	13
<u>2.1.1.3</u>	<u>Microfones Unidirecionais.</u>	13
2.1.2	Tipos de Transdução	14
<u>2.1.2.1</u>	<u>Microfones Dinâmicos</u>	14
<u>2.1.2.2</u>	<u>Microfones condensadores</u>	15
2.2	Interfaces de áudio	17
2.2.1	Focusrite™ Scarlett 2i2	17
<u>2.2.1.1</u>	<u>Resposta de frequência</u>	19
<u>2.2.1.2</u>	<u>Ruídos residuais</u>	19
<u>2.2.1.3</u>	<u>Distorção harmônica</u>	20
<u>2.2.1.4</u>	<u>Distorção de intermodulação</u>	21
2.3	Compressores	22
2.3.1	Parâmetros de compressão	23
<u>2.3.1.1</u>	<u>Limite de compressão (<i>Threshold</i>)</u>	23
<u>2.3.1.2</u>	<u>Razão de compressão (<i>Ratio</i>)</u>	23
<u>2.3.1.3</u>	<u>Largura do joelho (<i>Knee Width</i>)</u>	24
<u>2.3.1.4</u>	<u>Tempo de ataque</u>	25

2.3.1.5	Tempo de soltura	25
3	CONVERSÃO ADC	27
3.1	Aspectos de conversão	27
3.1.1	Taxa de amostragem	28
3.1.2	Resolução (<i>bit depth</i>)	29
3.2	Tipos de conversão	29
3.2.1	Conversão por Aproximação Sucessiva (SAR)	30
3.2.2	Conversão pelo método delta-sigma	31
4	EXPERIMENTO	33
4.1	Desenvolvimento	33
4.1.1	Gravação	33
4.2	Estudo	35
5	RESULTADOS	41
5.1	Violão	41
5.1.1	Trecho 1	41
5.1.2	Trecho 2	42
5.2	Caixa	43
5.2.1	Trecho 1	43
5.2.2	Trecho 2	44
5.3	SURDO	45
5.3.1	Trecho 1	45
5.3.2	Trecho 2	46
5.4	TAMBORIM	47
5.4.1	Trecho 1	47
5.4.2	Trecho 2	48
5.5	CHOCALHO	49
5.5.1	Trecho 1	49
5.5.2	Trecho 2	50
6	DISCUSSÃO	52
6.1	Trabalhos futuros	53
7	CONCLUSÃO	54

REFERÊNCIAS 55

1 INTRODUÇÃO

1.1 Tema

Da mesma forma que hoje podemos ouvir uma música em qualquer lugar, a qualquer momento, e tratamos isso como algo totalmente natural em nosso dia a dia, gravar um som e enviar para outra pessoa também se tornou algo comum. Afinal qualquer celular moderno possui gravadores de áudio integrados e de fácil utilização. Entretanto, apesar da naturalidade com que estes processos são feitos em nossas vidas, nem sempre eles estiveram presentes, podendo ser considerados práticas recentes dentro de toda a história da humanidade.

O primeiro registro de um som a ser gravado data do ano de 1877, tendo como responsável o inventor norte-americano Thomas Edison (1847-1931). O então denominado Fonógrafo armazenava apenas de três a quatro gravações, fazendo este registro de forma totalmente mecânica. Foi então na década de 20 que os sistemas mecânicos caíram em desuso, dando espaço aos métodos elétricos de gravação, partindo das fitas magnéticas, que tornaram o processo mais fácil e barato, além de possuírem uma qualidade superior de som. (BLOG-SOM-MAIOR, 2015)

A partir daí a tecnologia de gravação e reprodução de som avançou rapidamente, com o advento do LP (*Long Play*), a breve passagem das fitas cassetes e do *Walkman*, a ascensão dos CDs durante os anos 90, até a chegada da era moderna com o aparecimento das mídias digitais.

A facilidade de acesso a internet tornou as mídias digitais extremamente populares, possibilitando que qualquer pessoa com acesso mínimo a um celular ou computador pudesse ouvir músicas ou realizar gravações. Porém, apesar desta facilidade, muito é discutido sobre a qualidade dos sons gravados e tratados de forma digital quando comparados ao que era feito através de fitas magnéticas e LP's, ou seja, de forma analógica. Estudiosos mais conservadores defendem que tais tecnologias possuíam maior qualidade, tanto de gravação, quanto de tratamento de áudio, porém o custo de se ter tais equipamento e, portanto, de um estúdio profissional é muito alto, podendo custar dezenas de milhares de reais. Tal fator somado ao avanço das softwares de áudio digitais tornou os métodos digitais ainda mais populares. (FRANCISCO, 2020).

1.1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA

O seguinte trabalho foi feito com base na fomentação da discussão a respeito da qualidade de tratamento de áudio em equipamentos analógicos em comparação a equipamentos digitais. Sendo realizado um embasamento teórico a respeito dos sistemas e equipamentos de gravação. Posteriormente de forma prática foi realizado um experimento, no qual foram feitas duas gravações de diversas fontes sonoras em um estúdio, sendo uma tratada em um equi-

pamento analógico e a outra será tratada em um simulador digital do mesmo equipamento. A partir disso se utilizou de softwares tais como o *Audacity* e o *MatLab* para se realizar uma análise qauntitativa das diferenças entre os sinais.

1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

A utilização de simuladores digitais divide opiniões dentro do meio da música e da produção musical, há quem diga que os equipamentos analógicos trazem uma qualidade que não pode ser replicada, enquanto outros defendem que, quando bem utilizados, os *plugins* podem obter resultados tão bons quanto suas versões emuladas. É claro que não se pode descartar a qualidade do *software* utilizado, uma vez que um equipamento analógico com peças de qualidade duvidosa podem causar ruídos e distorcer o áudio.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Fazer a comparação da qualidade de uma onda sonora ao ser tratada por um equipamento analógico, e da mesma onda ao ser tratada por um simulador digital do mesmo equipamento, analisando as diferenças entre ambos os sinais posteriormente.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Realizar gravações utilizando equipamentos analógicos e digitais.
- Fazer o tratamento das ondas sonoras através de um equipamento analógico com parâmetros pré-determinados.
- Realizar o tratamento das ondas sonoras através de um simulador digital do equipamento analógico, utilizando os mesmos parâmetros e configurações.
- Analisar de forma matemática utilizando softwares como o *Audacity* e o *MatLab* para identificar diferenças entre as ondas.

1.4 Justificativa

A análise da qualidade dos simuladores pode ser muito benéfica para áreas de atuação diversas. Produtores e músicos poderão utilizar os resultados para decidir se vale, ou não, a pena realizar o investimento em um equipamento analógico de alto custo. Além disso fabricantes

de *softwares* de réplica digital terão uma melhor base para estudo dos efeitos que seu produto causam na onda sonora quando comparados a versão original.

1.5 METODOLOGIA DA PESQUISA

- Processo de coleta de informações.
- Estudo e escolha de materiais.
- Processo do desenvolvimento prático da pesquisa.
- Processo de coleta e análise de dados da pesquisa.
- Processo de redação e apresentação do desenvolvimento, dos dados e conclusões obtidas na pesquisa.

2 EQUIPAMENTOS

Este capítulo tem como objetivo destrinchar diversos tipos de equipamentos de áudio utilizados nesta pesquisa.

2.1 Microfones

Microfones são equipamentos eletroacústico que, a partir do movimento de um diafragma, ou superfície móvel, transformam energia sonora em energia elétrica. Toda e qualquer onda sonora tem suas próprias características, sua forma de onda, resposta de frequência e alcance dinâmico, por exemplo, que variam de sinal para sinal, portanto se torna plausível entender que nenhum microfone é capaz de reproduzir todos os tipos de som captados de forma perfeita. Na realidade, microfones diferentes com parâmetros diferentes serão capazes de reproduzir de forma melhor, ou pior, diversos tipos de som.

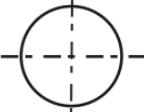
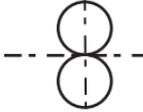
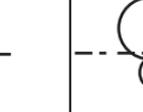
Os microfones presentes hoje no mercado são divididos em dois grupos maiores, os dinâmicos e os condensadores. Microfones dinâmicos possuem o diafragma exposto de somente um lado, portanto a saída corresponde diretamente a pressão sonora recebida. Esses microfones são considerados microfones de gradiente zero e são associados a características omnidirecionais (BALLOU; CIAUDELLI; SCHMITT, 2008). O segundo tipo de microfones, os condensadores, por sua vez são considerados microfones de gradiente de primeira classe, no qual a onda sonora é dada pela diferença entre a onda que atinge a parte frontal e a parte traseira do diafragma, sendo o sinal elétrico de saída correspondente a velocidade instantânea imprimida pela onda sonora.

2.1.1 Padrões de captação

A partir dessas duas divisões primárias, os microfones passam a ser diferenciados de acordo com o padrão de captura de som de seus respectivos diafragmas. Os padrões de resposta que classificam os microfones são relacionados a direcionabilidade apresentada e como o diafragma responde a ondas sonoras, sendo as classificações:

- Ominidirecionais: Captam o som de forma igual de todas as direções.
- Bidirecionais: Captam o som de forma igual em duas direções distintas separadas por 180°, enquanto a captação lateral, ou seja 90° da frente ou traseira do microfones, é zero.
- Unidirecional: Captam somente de uma direção.

Figura 1 – Resposta polar de microfones diversos.

Microfone	Ominidirecional	Bidirecional	Direcional	Supercardioide	Hipercardioide
Característica de resposta direcional					
Tensão de saída	$E = E_0$	$E = E_0 \cos \theta$	$E = \frac{E_0}{2}(1 + \cos \theta)$	$E = \frac{E_0}{2}[(\sqrt{3}-1) + (3\sqrt{3}-3)\cos \theta]$	$E = \frac{E_0}{4}(1 + 3 \cos \theta)$
Eficiência de saída aleatória	100	33	33	27	25
Resposta frontal	1	1	∞	3.8	2
Resposta traseira					
Resposta frontal aleatória	0.5	0.5	0.67	0.93	0.87
Resposta aleatória total					
Resposta frontal aleatória	1	1	7	14	7
Resposta traseira aleatória					
Distância equivalente	1	1.7	1.7	1.9	2
Ângulo de captação (2θ) para atenuação de 3 dB	—	90°	130°	116°	100°
Ângulo de captação (2θ) para atenuação de 6 dB	—	120°	180°	156°	140°

Fonte: Adaptade de (BALLOU; CIAUDELLI; SCHMITT, 2008)

Tendo em vista estas três classificações, os microfones passam a se diferir de acordo com sua forma polar de resposta, sendo estas apresentadas na figura 1 com suas respectivas informações, equações de tensão de saída e respostas frontais, laterais e traseiras.

2.1.1.1 Microfones Ominidirecionais.

Também chamados de microfones esféricos, este tipo de microfone tem por característica principal a captação de som de forma igual em todas as direções. Isto se dá devido ao fato de somente a parte frontal do diafragma ficar exposta a onda sonora, porém não existe nenhum tipo de cancelamento de sinal caso a onda atinja a parte traseira do mesmo.

Ominidirecionais se tornam levemente direcionais conforme o diâmetro do microfone se aproxima de determinada frequência, portanto o microfone deve ter o menor tamanho possível para que as características omnidirecionais se mantenham para altas frequências.

Por possuir um padrão de captura esférico, esse tipo de microfone possui uma eficiência energética de cem por cento. Portanto sons emitidos que venham pelas laterais ou pela traseira do microfone terão a mesma captura que um som emitido diretamente a frente do mesmo. Por esta razão o microfone pode captar bem a característica da sala em que está sendo feita a gravação, ou de uma conversa entre várias pessoas sentadas envolta do mesmo, também pode ser utilizado para gravar uma sinfonia.

2.1.1.2 Microfones Bidirecionais.

Diferente dos microfones omnidirecionais, os bidirecionais possuem uma eficiência energética de 33%, em outras palavras, sons que não são emitidos diretamente na parte frontal ou traseira do microfone serão 67% mais baixos do que em um microfone omnidirecional. Este efeito ocorre em detrimento da forma polar do diafragma, que para este caso possui o formato chamado de figura 8 conforme ilustrado na Figura 2. Assim a atenuação da onda sonora captada é maior conforme a fonte se aproxima das laterais do microfone.

Figura 2 – Resposta polar de microfones bidirecionais.



Fonte: BALLOU, CIAUDELL, SCHMITT, 2008 in BALLOU, 2008

Esse tipo de resposta pode ser muito útil para realizar uma gravação de um dueto por exemplo, em que cada um dos cantores fica em um lado do microfone. Em função da capacidade direcional deste microfone a distância de captura do som é 1.7 vezes maior do que a de um omnidirecional

2.1.1.3 Microfones Unidirecionais.

Também chamados de microfones direcionais, os unidirecionais possuem um padrão de resposta em formato de cardióide, supercardiíde ou hipercardiíde, tendo estes nomes por sua similaridade com a forma de um coração. Um microfone unidirecional possui uma razão de resposta *front-to-back* de 20-30dB, isto é, a sensibilidade de resposta ao som captado pela parte frontal do microfone é de 20-30dB maior do que pela parte traseira.

Em função de sua característica de captação, este tipo de microfone possui uma distinção natural entre o sinal a ser captado e barulhos não desejados, gerando assim grandes vantagens como: menos ruído ambiente, maior ganho antes do *feedback* (principalmente se apontado na direção do som desejado), melhor distinção entre fontes sonoras.

2.1.2 Tipos de Transdução

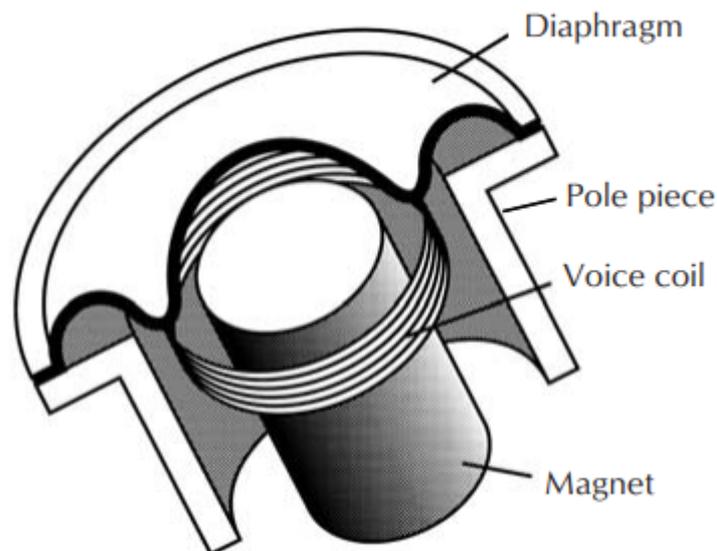
Transdução diz respeito a toda e qualquer forma de transformação de energia, na qual o equipamento é excitado por uma fonte e gera uma resposta em outro tipo de grandeza, neste caso, o recebimento de energia acústica sendo transformada em energia elétrica.

Ao longo dos anos, vários tipos de transdutores foram utilizados em microfones: os transdutores de carbono, por exemplo, eram usados em telefones antigos, porém contavam com uma resposta de frequência limitada e carregavam muito ruído. Os microfones de cerâmica e de cristal por sua vez possuem uma resposta melhor, alcançando faixas de 80 a 6500Hz, no entanto apresentam uma impedância de saída muito alta e necessitam de uma carga mínima extremamente alta para produzir níveis de sinal na faixa de -30dB. Portanto para o seguinte tópico será apresentado de forma detalhada apenas o funcionamento dos microfones dinâmicos e condensadores, uma vez que estes são os modelos mais utilizados no mercado na atualidade. (BALLOU; CIAUDELLI; SCHMITT, 2008)

2.1.2.1 Microfones Dinâmicos

O microfone dinâmico, também conhecido como microfone de pressão ou microfone de bobina móvel, utiliza um pequeno diafragma junto de uma bobina de voz que se movimentam ao longo de um campo magnético permanente para gerar uma tensão proporcional a pressão sonora recebida.

Figura 3 – Corte simplificado de um microfone dinâmico



Fonte: BALLOU, CIAUDELL, SCHMITT, 2008 in BALLOU, 2008

Conforme ilustrado na figura 3, o microfone dinâmico utiliza um ímã como fonte de campo magnético, o qual em conjunto com suas partes associadas, produz um fluxo magnético con-

centrado de aproximadamente 10 kG no entreferro. O diafragma é usado como suporte para a bobina de voz, a qual se localiza no meio do espaço de entreferro

Microfones antigos possuíam o diafragma feito de alumínio extremamente fino, por se tratar de um material de fácil acesso, que não se deforma quando aplicado a temperaturas extremas ou à umidade. Porém a espessura necessária para que o equipamento funcionasse tornava este material frágil, causando sua ruptura quando exposto a pressão sonora excessiva ou quando tocado. Mais tarde os diafragmas passaram a serem feitos de *Mylar™*, um tecido filme de poliéster, cujo o processo de fabricação sobre altas condições de temperatura e pressão fazem com que o material possua uma memória dimensional a nível molecular. Desta forma o *Mylar™*, diferente do alumínio, retém sua forma original mesmo após ser exposta a uma grande deformação momentânea (BALLOU; CIAUDELLI; SCHMITT, 2008). O composto plástico também possui uma gravidade específica menor que a do alumínio, em outras palavras, o filme de poliéster é mais leve, possibilitante que o diafragma seja mais grosso, aumentando sua resistência.

O conjunto formado pelo diafragma e a bobina de voz passam a atuar dentro do circuito acústico do microfone como algo similar a impedância elétrica, enquanto a complacência se torna algo análogo a capacitância elétrica. Estas estruturas quando agrupadas fazem com que o conjunto entre em ressonância a uma dada frequência, a qual para um equipamento padrão é na região de 350Hz. Desta forma, caso o microfone seja exposto a um sinal que possua componentes nesta faixa haverá um pico de forma indevida. Esta característica ressonante pode ser amortecida se utilizado um resistor acústico, um anel de feltro que cobre as aberturas do anel central envolta do diafragma, sendo que tal item pode ser comparado a um resistor elétrico no caso de um circuito elétrico funcional. Fazendo a análise da resposta de frequência do microfone ainda é possível notar um decaimento na resposta para faixas abaixo dos 200Hz (BALLOU; CIAUDELLI; SCHMITT, 2008). Tal fator pode ser corrigido adicionando uma cavidade oca atrás do conjunto diafragma-bobina de voz, ajudando na ressonância de ondas sonoras de baixa frequência, agindo de forma análoga a de uma capacitância.

2.1.2.2 Microfones condensadores

De forma similar ao microfone dinâmico, o microfone condensador, ou capacitor, possui um diafragma que se movimenta conforme a pressão sonora é aplicada a ele. Neste caso a membrana móvel é utilizada como uma das duas placas do capacitor, enquanto a outra placa, maior e mais pesada, se mantém fixa dentro do equipamento. A placa traseira é então isolada, e mantida paralela a uma distância de aproximadamente 1mm da parte posterior do diafragma. Desta forma a o sinal elétrico de saída varia conforme a pressão sonora incide no sistema. O sinal de saída do conversor pode ser calculado como sendo:

$$[E_0 = \frac{E_p \cdot a^2 \cdot P}{8 \cdot d \cdot t}] \quad (1)$$

No qual,

E_0 é o sinal de saída em volts,

E_p é a tensão de alimentação do capacitor em volts,

a é o raio da área ativa do diafragma em centímetros,

P é a pressão sonora aplicada em dina por centímetro quadrado,

d é a distância entre a placa traseira do capacitor e o diafragma em centímetros,

t é a tensão do diafragma em dina por centímetro

Condensadores tem por característica possuírem um nível de ruído na faixa de 15-30db SPL, o qual não pode ser sobreposto, e assim disfarçado, pelo ruído da sala, uma vez que este abrange as frequências baixas, enquanto o ruído do microfone se passa pelas faixas de alta frequência (BALLOU; CIAUDELLI; SCHMITT, 2008). No entanto tais ruídos eram mascarados em gravações analógicas, uma vez que a qualidade de gravação da fita analógica e dos demais equipamentos sobrepujam o mesmo. Além disso o processo de saturação da fita gerava sinais harmônicos e componentes de distorção no sinal, afetando a fidelidade do som nas faixas altas de frequência.

Por mais que apresentem altos níveis de ruídos, condensadores se mostram adequados para gravação quando utilizados com equipamentos analógicos, uma vez que estes mascaram suas características não lineares de distorção de resposta para altas frequência. Porém, ao se utilizar um equipamentos de gravação digital, estes problemas passam a ser mais visíveis. Devido ao processo de linearização dos conversores analógico-digitais, o nível de distorção inerente ao equipamento diminui drasticamente, principalmente para altas taxas de amostragem, tornando assim as características de distorção do microfone mais óbvias.

Quando comparados aos dinâmicos, os microfones condensadores possuem um tempo de resposta do diafragma muito menor, isto se da pela diferença de peso entre as partes móveis (diafragma vs conjunto diafragma e bobina de voz). Além disto condensadores geram um sinal de saída em fase com o sinal acústico recebido.

Por dependerem diretamente do funcionamento do capacitor, microfones condensadores necessitam de uma fonte de alimentação, a qual é providenciada por um sistema de *phantom power*, o qual é proporcionado por um dispositivo, seja este um pré-amplificador, um *mixer* ou um console, sendo a maioria fornecido por um pré-amplificador. Pré-amplificadores abastecem o capacitor com a tensão necessária para sua polarização, além de possuírem uma impedância que condiz com a baixa impedância de saída.

2.2 Interfaces de áudio

As interfaces de áudio, ou placas externas de processamento de áudio, como são chamadas, são dispositivos eletrônicos que fazem o intermédio entre o equipamento de gravação, microfones, e seu destino final de armazenamento, o computador.

A partir da gestão dos sinais de entrada e de saída do computador, a interface oferece um processamento de qualidade, baixa latência e alta taxa de amostragem para realização de gravações, tendo cada um desses itens ligados diretamente a qualidade da placa utilizada. Por exemplo, uma interface da *Solid State Logic™*, a SSL 2+, possui duas entradas de áudio e 4 saídas, podendo realizar processamentos com uma taxa de amostragem de até 192kHz.

2.2.1 Focusrite™ Scarlett 2i2

A interface a ser utilizada durante os experimentos será da marca Focusrite™, modelo Scarlett 2i2 de 3ª geração. Este modelo de entrada da Focusrite™ possui duas entradas de linha híbridas, para cabos XLR ou cabos P10, na qual podem ser ligados microfones balanceados ou instrumentos de alta impedância, como guitarras e baixos. Cada uma das entradas conta com pré-amplificadores nativos da interface, além de um circuito *phantom power*, permitindo a utilização de microfones condensadores. A interface trás também duas saídas de áudio, além da saída para monitoração direta por fones de ouvido.

As taxas de amostragem suportadas pelo equipamento vão de 44,1 kHz a 192 kHz, sendo as demais especificações técnicas fornecidas pela marca em seu site oficial expostas nas tabelas 1, 2, 3, 4 e 5.

Tabela 1 – Especificações técnicas de entradas de microfone

ENTRADAS DE MICROFONE	
Resposta de frequência	20Hz - 20kHz ± 0.1dB
Faixa Dinâmica	111dB (A-ponderado)
THD+N	<0.0012%
Ruído EIN	-128dBu (A-ponderado)
Nível Máximo de Entrada	9dBu (no ganho mínimo)
Faixa de Ganho	56dB
Impedância	3kΩ

Fonte: SCARLETT 2i2. **Focusrite**, 2022.

<https://focusrite.com/pt-br/usb-audio-interface/scarlett/scarlett-2i2>.

Acesso em: 19, maio de 2022.

Tabela 2 – Especificações técnicas de entradas de linha

ENTRADAS DE LINHA	
Resposta de frequência	20Hz - 20kHz \pm 0.1dB
Faixa Dinâmica	110.5dB (A-ponderado)
THD+N	<0.002%
Nível Máximo de Entrada	22dBu (no ganho mínimo)
Faixa de Ganho	56dB
Impedância	60k Ω

Fonte: SCARLETT 2i2. **Focusrite**, 2022.

<https://focusrite.com/pt-br/usb-audio-interface/scarlett/scarlett-2i2>.

Acesso em: 19, maio de 2022.

Tabela 3 – Especificações técnicas de entradas de instrumentos

ENTRADAS DE INSTRUMENTO	
Resposta de frequência	20Hz - 20kHz \pm 0.1dB
Faixa Dinâmica	110dB (A-ponderado)
THD+N	<0.03%
Nível Máximo de Entrada	12.5dBu (no ganho mínimo)
Faixa de Ganho	56dB
Impedância	1.5M Ω

Fonte: SCARLETT 2i2. **Focusrite**, 2022.

<https://focusrite.com/pt-br/usb-audio-interface/scarlett/scarlett-2i2>.

Acesso em: 19, maio de 2022.

Tabela 4 – Especificações técnicas de saídas de linha

SAÍDAS DE LINHA/MONITOR	
Faixa Dinâmica (Saídas de Linha)	108dB
THD+N	<0.002%
Nível Máximo de Saída (0 dBFS)	15.5dBu
Impedância	430 Ω

Fonte: SCARLETT 2i2. **Focusrite**, 2022.

<https://focusrite.com/pt-br/usb-audio-interface/scarlett/scarlett-2i2>.

Acesso em: 19, maio de 2022.

Tabela 5 – Especificações técnicas de saída de fones de ouvido

SAÍDAS DE FONE DE OUVIDO	
Faixa Dinâmica	104dB (A-ponderado)
THD+N	<0.002%
Nível Máximo de Saída	7dBu
Impedância	< 1 Ω

Fonte: SCARLETT 2i2. **Focusrite**, 2022.

<https://focusrite.com/pt-br/usb-audio-interface/scarlett/scarlett-2i2>.

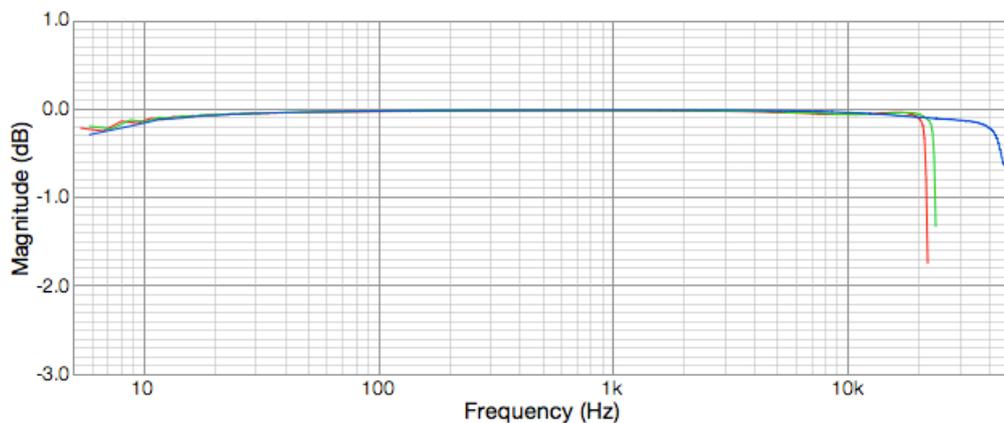
Acesso em: 19, maio de 2022.

(REEKIE, 2022) realizou diversos testes de qualidade envolvendo a interface Scarlett 2i2, entre os quais apresentam as respostas de frequência, distorção harmônica e ruídos residuais obtidos de forma experimental.

Utilizando os resultados obtidos por Reekie é possível se ter uma noção de como o funcionamento da interface pode vir a interferir nos resultados da pesquisa. Sendo os mesmos apresentados abaixo.

2.2.1.1 Resposta de frequência

Figura 4 – Resposta de frequência Scarlett 2i2.

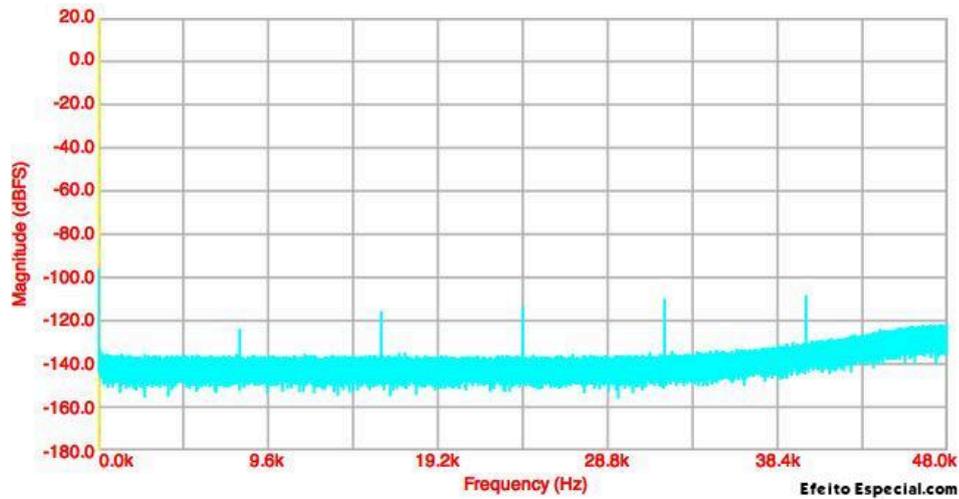


Fonte: JOHN REEKIE, 2022.

A primeira medição realizada, exposta na figura 4, diz respeito a resposta de frequência da interface, quando delimitado o nível de saída em -10dB e operando com uma taxa de amostragem de 96kHz. As curvas encontradas apontam para uma resposta suave para o espectro entre 10Hz à aproximadamente 40kHz, tendo um rápido decaimento após ultrapassado o segundo valor. (REEKIE, 2022)

2.2.1.2 Ruídos residuais

Figura 5 – Sons residual proveniente pela interface Scarlett 2i2.



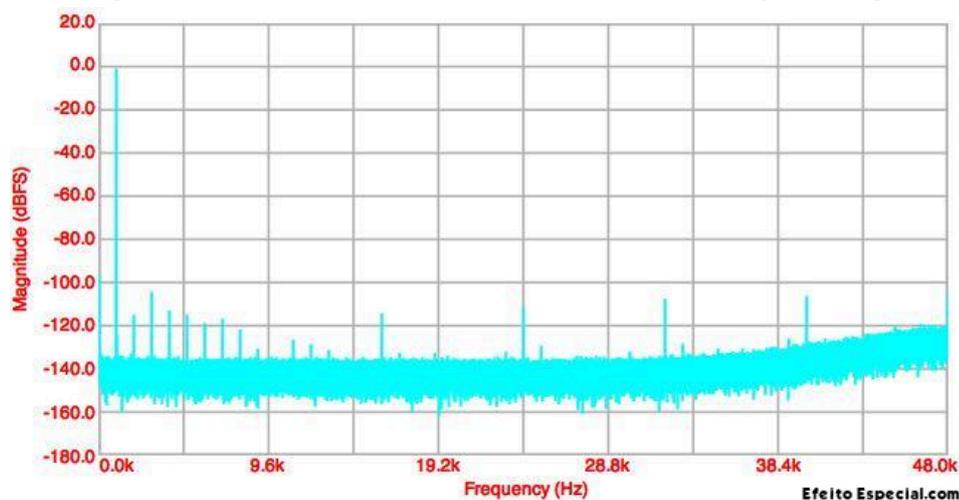
Fonte: JOHN REEKIE, 2022.

O teste para obtenção de ruídos residuais foi feito operando sem sinal de entrada, o sinal de saída com um ganho de -10dB, realizando medições para cada uma das taxas de amostragem providas pela interface. Os resultados obtidos possuem níveis de ruídos similares entre si, possuindo maior concentração na faixa de -140dB. Um resultado notável é um conjunto de picos encontrados nos múltiplos de 8kHz, indicando a existência de harmônicos para tal frequência.

2.2.1.3 Distorção harmônica

Para a aquisição das distorções harmônicas inerentes ao equipamento foi utilizado um sinal de entrada de 1kHz, com um ganho de -1dBV.

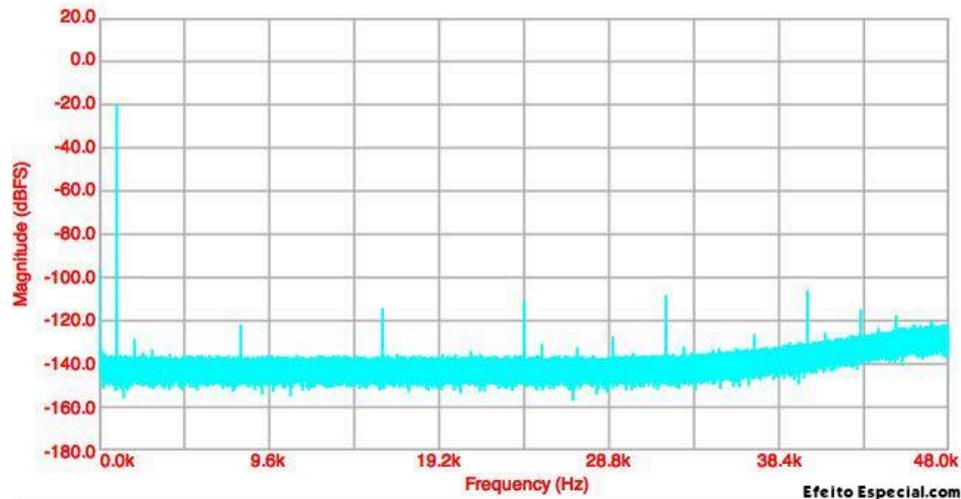
Figura 6 – Distorções harmônicas inerentes da interface Scarlett 2i2 para um ganho de -1dBV



Fonte: JOHN REEKIE, 2022.

Em seguida foi realizada a mesma aquisição, porém utilizando um ganho de -20dBV.

Figura 7 – Distorções harmônicas inerentes da interface Scarlett 2i2 para um ganho de -20dBV



Fonte: JOHN REEKIE, 2022.

Nesta segunda condição é possível notar como a maior parte dos resultados da distorção harmônica desaparece em meio aos ruídos residuais da interface, deixando os harmônicos de 8kHz, que já haviam sido identificados, mas a mostra que os demais.

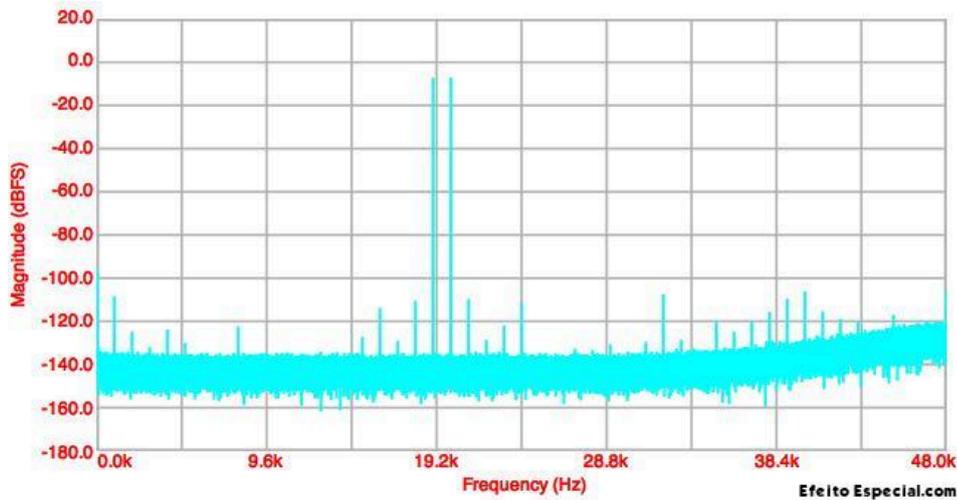
A partir desses resultados foi calculado o THD para ambos os sinais, obtendo o valor de -102 dB para o ganho de -1 dBV, e -105 dB pra o ganho de -20 dBV. Estes valores podem ser considerados excelentes, garantindo uma alta qualidade de performance.

2.2.1.4 Distorção de intermodulação

Distorção de intermodulação, ou apenas intermodulação, é o efeito causado pela criação de um sinal de saída a partir da combinação não-linear de dois ou mais sinais de entrada. Este efeito ocorre basicamente em função da não-linearidade do processo de amplificação de sinais, sendo a ordem do sinal gerado dependente da quantidade de sinais de entrada e dos harmônicos existentes nestes (PEREZ, 1998).

Utilizando o método CCIF pra obtenção da distorção, (REEKIE, 2022) conseguiu os resultados acima apresentados: todas as componentes de distorção se encontram abaixo da faixa de -110 dB para uma entrada de -1 dBV. Caso se realize a análise para -20 dBV as distorções desaparecem em meio aos ruídos.

Figura 8 – Distorção de intermodulação CCIF - Scarlett 2i2.



Fonte: JOHN REEKIE, 2022.

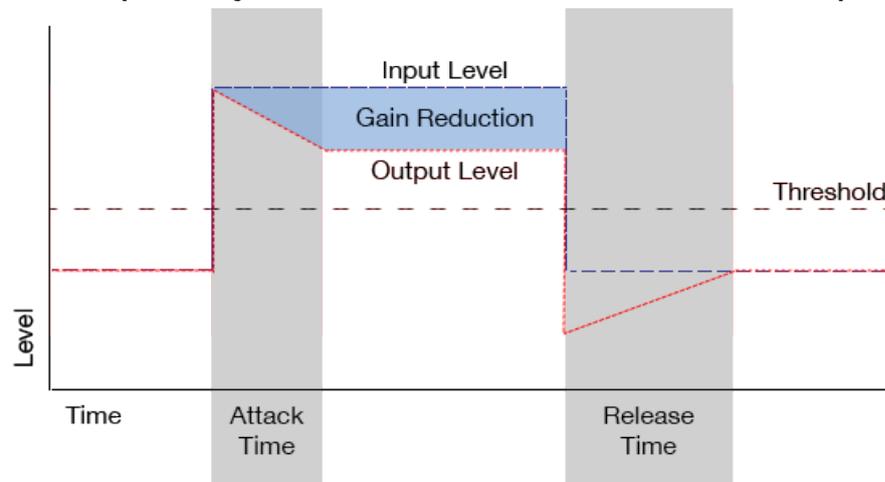
2.3 Compressores

Quando se fala em tratamento de som em produções musicais vários tipos de equipamentos e técnicas podem ser utilizadas para se obter os mais diversos resultados. Durante o processo de mixagem de som o engenheiro de áudio emprega seu conhecimento para fazer com que cada instrumento musical soe conforme o desejado, despertando emoções e sensações naqueles que escutam, respeitando o estilo da música e objetivo a ser alcançado.

Dentre os equipamentos empregados no tratamento de áudio em uma produção os mais utilizados são os compressores, equalizadores e *reverbs*. O equalizador tem por função primária manipular o espectro de frequência de uma onda sonora, adicionando ou reduzindo graves, médios e agudos, com o objetivo de tornar aquele som mais agradável à audição. Uma boa equalização pode mascarar ruídos, reduzir harmônicos, tornar sons mais "afiados" ou mais suaves. Os chamados *reverbs* são aplicações artificiais de um efeito de reverberação sonora. Tais efeitos geram, principalmente, maior naturalidade ao som, uma vez que todo e qualquer som que escutamos é um resultado do sinal direto emitido pelo fonte, e de todas as reflexões deste no ambiente em que nos encontramos.

Os compressores por sua vez atuam como controladores de faixa dinâmica, reduzindo o intervalo entre a amplitude máxima e mínima do áudio, evitando estouros repentinos de volume e mantendo a consistência de nível da totalidade do som. Compressores causam, essencialmente, uma distorção no sinal de entrada durante seu processamento, cabendo ao utilizador manipular seus parâmetros em busca de um resultado transparente e de alta performance.

Figura 9 – Representação do controle de alcance dinâmico de um compressor



Fonte: (HOMESTUDIORECORDINGS, 2022)

2.3.1 Parâmetros de compressão

Os *Dynamic Range Compressors* (DRC) possuem como propósito fornecer amplificações ao sinal de entrada de acordo com os seus parâmetros. Após a amplificação o DRC comprime, ou reduz o ganho, para sons que ultrapassem um limite pré-determinado, atuando de forma igual para qualquer faixa de frequência aplicada. Por se tratar de uma operação não linear de manipulação de sinal, é muito importante que o operador do DRC saiba manter a qualidade e inteligibilidade do sinal de entrada.

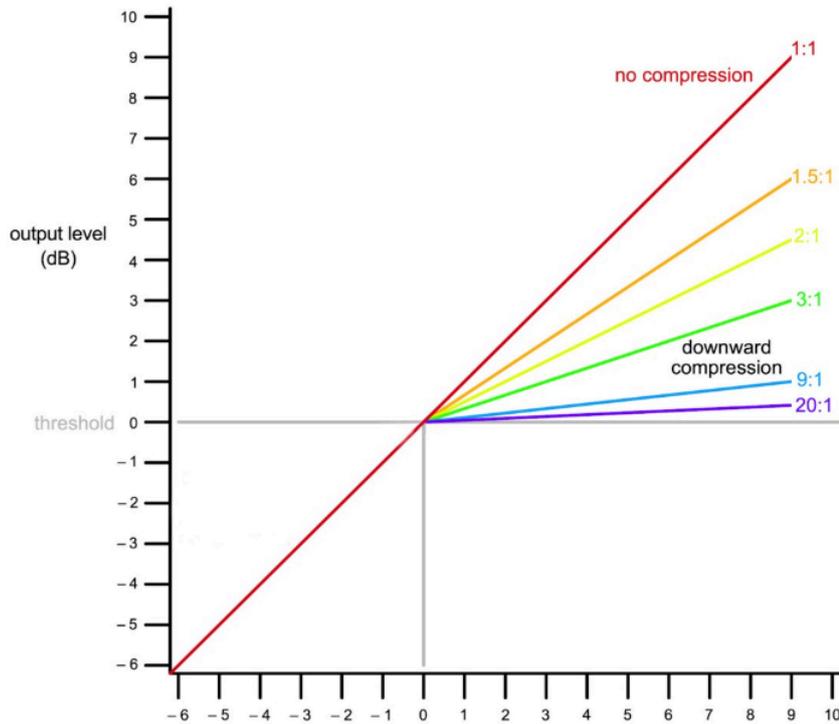
Parâmetros como o limite de compressão (*threshold*, a razão de compressão e o ganho adicionado garantem a audibilidade e o nível de conforto do som. Enquanto o tempo de ataque e o tempo de soltura sustentam um papel vital em manter a qualidade e a nitidez do sinal de entrada. (PATEL; PANABI, 2019)

2.3.1.1 Limite de compressão (*Threshold*)

Comumente chamado pelo seu nome em inglês, *Threshold*, o limite de compressão atribuí o nível máximo ao qual um sinal pode atingir antes de começar a ser comprimido. Uma vez ultrapassado o valor definido o compressor passará a atuar conforme os demais parâmetros.

2.3.1.2 Razão de compressão (*Ratio*)

Figura 10 – Gráfico de razão de compressão



Fonte: IZOTOPE, 2022.

O *ratio* ou razão de compressão, é o que determina a quantidade de redução de ganho que será aplicado no sinal uma vez que este ultrapasse o *threshold*. Para um compressor padrão, um *ratio* de x:1 atenua o nível do sinal numa razão de 1 dB para cada X dB que ultrapasse o *threshold*. (BROWN, 2021)

O gráfico acima apresenta de forma simples o funcionamento da razão de compressão, onde *ratio* de 1:1 significa não compressão. Enquanto cada uma das demais linhas representa um fator de compressão diferente. O valor do sinal de saída pode ser calculado usando,

$$output = \begin{cases} input; & input \leq T \\ \frac{input-T}{R} + T; & input > T \end{cases} \quad (2)$$

sendo, T o valor delimitador do *threshold*, R a razão de compressão a ser aplicada.

2.3.1.3 Largura do joelho (*Knee Width*)

O joelho (*knee*) é o ponto do *threshold* no qual a relação entre entrada e saída muda seu declive. Esta transição pode ser feita de forma abrupta ou suave, fazendo com que o efeito

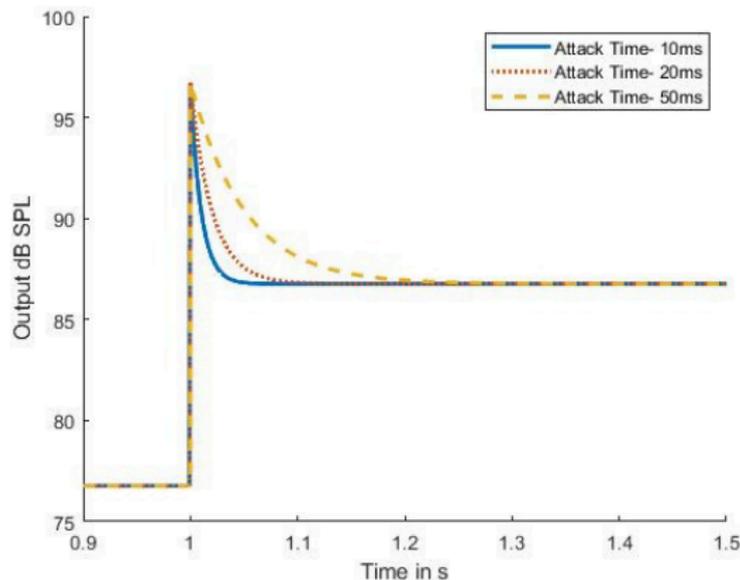
da compressão seja mais ou menos facilmente notada. O chamado *knee width* ou largura do joelho, se refere a área de propagação desta região suave de transição.

A escolha entre uma transição dura ou suave é unicamente dependente do tipo de som que deseja alcançar. Uma transição dura resulta em sons mais recortados devido a rápida transição entre o sinal não comprimido e comprimido, além disto este efeito produz distorções em faixas de alta frequência. Esta abordagem se sai melhor na preservação de sons de maior intensidade em uma faixa. Enquanto uma transição mais suave produz tons mais suaves.

2.3.1.4 Tempo de ataque

Tempo de ataque ou *attack time* é definido como sendo o tempo de atraso entre o instante em que o sinal ultrapassou a linha do *threshold*, causando a ativação do compressor, e o momento em que a compressão alcançou seu valor máximo.

Figura 11 – Representação gráfica do tempo de ataque

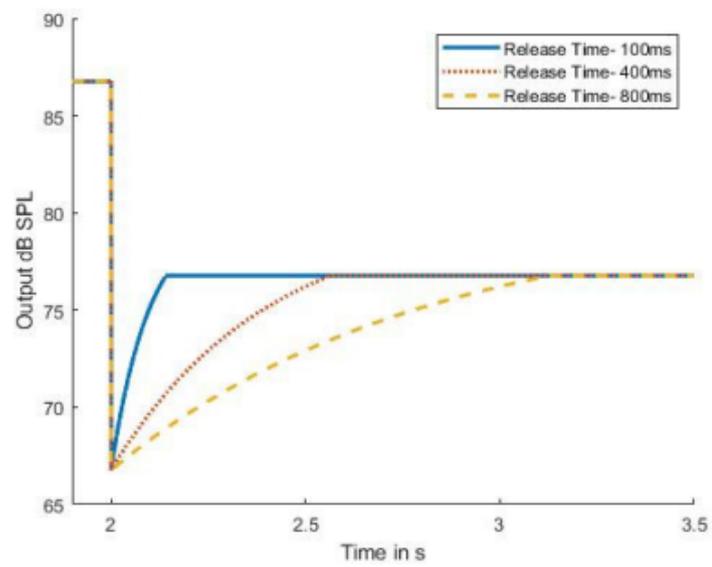


Fonte: PANEL, PANABI, 2019.

2.3.1.5 Tempo de soltura

Em contrapartida ao tempo de ataque, o tempo de soltura (*release time*), diz respeito ao intervalo de tempo no qual a compressão continua atuando, por mais que a onda sonora já tenha baixado da linha do *threshold*, até que o sinal alcance seu valor padrão não comprimido.

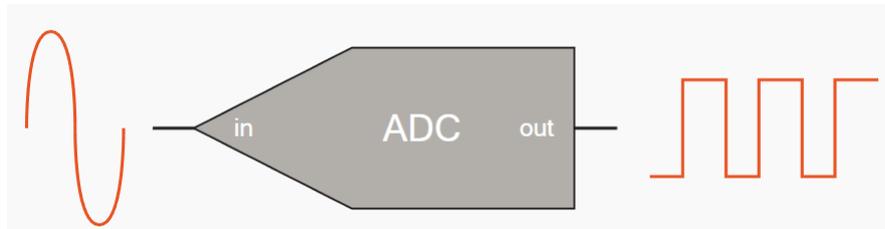
Figura 12 – Representação gráfica do tempo de soltura



Fonte: PANEL, PANAHI, 2019.

3 CONVERSÃO ADC

Figura 13 – Conversão analógico-digital



Fonte: (DEWESOFT, 2020)

Quando falamos de áudio, qualquer sinal audível emitido, independente de sua fonte de produção, este terá o formato de uma onda analógica. Como os softwares de computador só são aptos a trabalhar com sinais digitais, qualquer som gravado necessita ser convertido. Então a menos que trabalhe a moda antiga, e possua um equipamento de fita magnética para realizar gravações, você precisará ser capaz de converter um sinal analógico em digital.

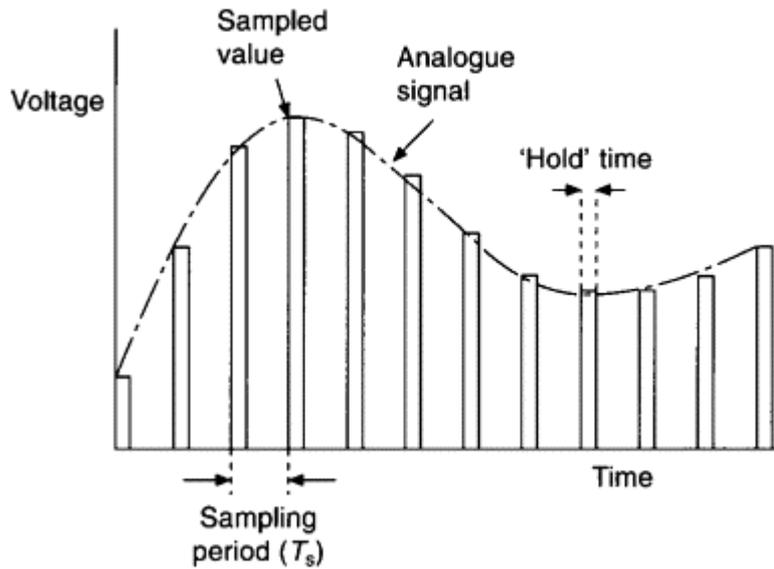
O conceito de conversão analógica-digital surgiu ao longo do século 20, com o desenvolvimento de telefones e computadores e a partir disto a dependência do uso de tecnologias mecânicas e analógicas diminuiu, dando espaço ao armazenamento de transmissão de dados provido pelos sinais digitais.

A diferença crucial entre estes tipos de sinais está em sua continuidade. O sinal analógico é contínuo em toda sua extensão, sendo criado por vibrações mecânicas ou circuitos elétricos, assim como os sons emitidos por instrumentos musicais como o violino, ou pela voz humana. Em contrapartida o sinal digital é discreto, e portanto possui uma limitação do número de valores que pode representar em faixas específicas de tempo. Isto tem como implicação o fato de que, por mais que sejam mais precisos, sinais analógicos contínuos também carregam mais ruídos e são mais difíceis de se armazenar, enquanto sinais digitais uma vez que são gravados nunca perdem qualidade.

3.1 Aspectos de conversão

Ao se realizar a conversão de um sinal elétrico, analógico, para um sinal ao qual o computador consiga compreender, digital, alguns parâmetros devem ser levados em consideração. Os principais aspectos da conversão A/D são a taxa de amostragem (*sample rate*) e a resolução do sistema (*bit depth*). Enquanto um se refere ao número de amostras retiradas por segundo o outro diz respeito a quantidade de detalhes de informação cada amostra captura.

Figura 14 – Conversor A/D sample rate



Fonte: MEDDINS, 2000

3.1.1 Taxa de amostragem

A taxa de amostragem, ou *sample rate* diz respeito a quantidade de medições feitas por segundo durante a tradução do sinal analógico. O conversor retira do sinal amostras instantâneas da onda sonora, sendo a frequência com que essas amostras são medidas o valor da taxa. (MEDDINS, 2000)

Este sistema pode ser facilmente comparado ao funcionamento de gravações de filmes antigos, no qual a câmera tirava fotos das pessoas e objetos enquanto se moviam. Por mais que cada foto fosse uma representação estática do momento em que foi tirada, a reprodução rápida e sequencial dos quadros gerava o efeito de movimento. Conforme se aumenta o número de quadros exibidos mais fielmente o movimento captado é representado. Quando utilizamos esta ideia para a conversão A/D fica simples de entender a taxa de amostragem, na qual ao se apresentar as amostras instantâneas do som uma após a outra, tendo estas sido captadas com intervalos de medição entre si pequenos o suficiente, se torna possível recriar uma representação do sinal original do áudio.

Para se obter uma gravação fidedigna de um som é necessário que a taxa de amostragem seja maior do que a frequência apresentada por este. Como a capacidade auditiva do ser humano abrange frequências contidas entre 20 Hz e 20 kHz, a gravação de uma música necessita incorporar todo este espectro.

As mídias de reprodução na qual uma música pode ficar armazenada possuem taxas de amostragem padrões ao qual estas funcionam. Por exemplo, um CD tem *sample rate* de gravação de 44,1 kHz, isto quer dizer, que durante o processo de conversão do áudio que foi

gravado neste se utilizou pouco mais de 44.000 amostras por segundo. Este valor atende ao mínimo necessário para se capturar todo o espectro audível humano.

3.1.2 Resolução (*bit depth*)

Assim que cada amostra é obtida baseado na frequência da taxa de amostragem, a amplitude representada pela corrente elétrica naquele instante precisa ser medida e armazenada digitalmente através de um processo de quantização. Esta captura não é perfeita, uma vez que o sistema só tem uma quantia limitada de valores discretos para trabalhar. A resolução do sistema, ou *bit depth*, determina o alcance dos valores que podem ser usados para representar a amplitude do sinal em termos digitais. Uma maior quantidade de bits resulta em menos erros de quantização, que ocorrem quando a amplitude do sinal analógico e sua representação digital não são adequadas. O *bit depth* também pode ser descrito como a quantidade de detalhamento da captura de cada amostra.

3.2 Tipos de conversão

Ao se gravar uma música devemos realizar a microfonação (posicionamento do microfone em relação ao instrumento captado visando obter um determinado resultados) do instrumento, que então transforma o sinal sonoro em energia elétrica na forma de um sinal analógico. O sinal é recebido pela interface de áudio, onde passa por um tratamento (pré-amplificação) e é então enviado para o computador. Porém para que o computador possa ler devidamente o sinal recebido este deve ser convertido em um sinal digital. Este processo é realizado pela placa de processamento de áudio da interface ou computador, um microprocessador lógico que codifica o sinal conforme onda recebida. A forma com que a codificação deste sinal é feita pode variar de equipamento para equipamento, a tabela 6 apresenta os principais tipos de conversores A/D existentes no mercado.

Tabela 6 – Comparação entre os principais tipos de A/D

Tipo de A/D	Resolução	Taxa de Amostragem Máx.
Inclinação dupla	20 bits	100 Hz
Flash	12 bits	10 GHz
Pipeline	16 bits	1 GHz
SAR	18 bits	10 MHz
Delta-sigma	32 bits	1 Mhz

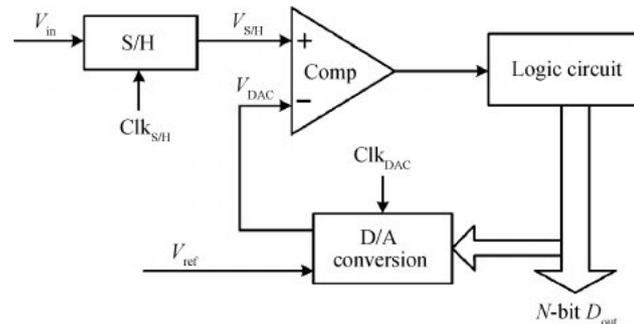
Fonte: DEWESOFT, 2020.

No caso da transformação de sinais analógicos para digitais de ondas sonoras são o SAR (Aproximações sucessivas) e o Delta-Sigma, portanto iremos nos concentrar nestes.

3.2.1 Conversão por Aproximação Sucessiva (SAR)

O chamado A/D SAR é uma opção de conversor de baixo custo, estável e confiável na transformação de sinais. O sistema utiliza um circuito comparador, um algoritmo binário de indagação para realizar a conversão. Em função deste algoritmo de aproximações sucessivas o circuito pode atuar a vários MHz de frequência, enquanto a taxa de amostragem na realidade é muito menor.

Figura 15 – Circuito simplificado de um conversor SAR



Fonte: (TONG; ZHU; YANG., 2012)

O circuito deste tipo de conversor consiste basicamente de um comparador, um conversor analógico-digital e um registrador de aproximações junto com o circuito de controle. Uma vez que a conversão se inicie o circuito de registro reterá amostras do sinal de entrada, as quais serão comparadas com um sinal específico de saída.

Se o valor de entrada for maior do que o sinal de saída do A/D, o valor do bit mais significativo da saída será mantido, enquanto o bit seguinte será alterado para que uma nova comparação ocorra. Caso o valor de entrada for menor que o de saída, o bit mais significativo será definido para zero e a comparação será reiniciada a partir do bit seguinte, o qual terá valor estabelecido em 1.

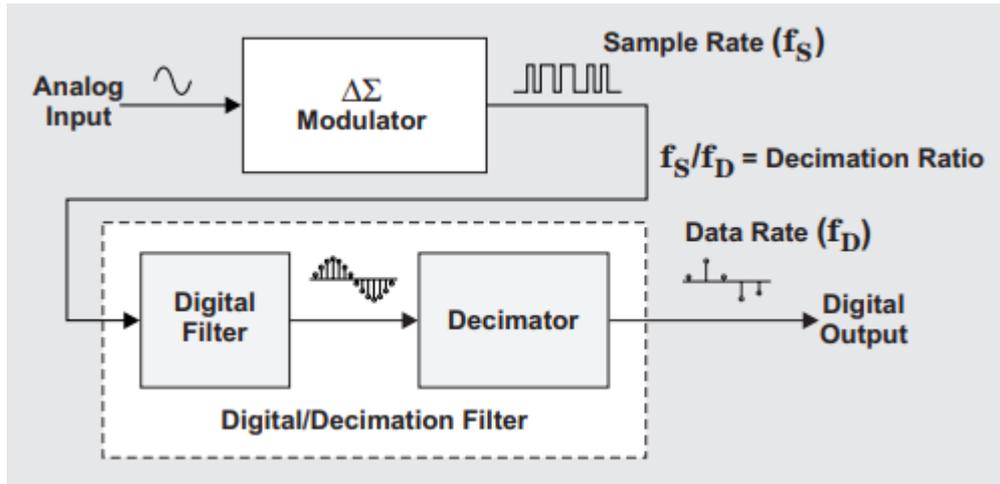
Este processo se mantém por “n” comparações, no qual o valor de “n” é a resolução de bits do conversor, até que o valor do sinal de saída seja o mais próximo possível do sinal de entrada.

Os conversores SAR não possuem nenhum filtro de *anti-aliasing*, por isso caso sejam utilizados com taxas de amostragem muito baixas poderão resultar na digitalização de sinais falsos. Por trabalharem com uma resolução limitada no eixo de amplitude, este tipo de conversor não são adequados para aplicações de alta dinâmica, processamento de sinais senoidais e de áudio. Para tais aplicações o mais recomendado é a utilização de A/D delta-sigma, que serão explicitados a seguir.

3.2.2 Conversão pelo método delta-sigma

No caso da conversão de sinal de áudio se faz necessário trabalhar com a maior resolução possível afim de preservar a qualidade do som gravado. Para isso o conversor delta-sigma se mostra o mais eficiente, sendo inclusive o tipo de conversor utilizado pela placa de áudio da Focusrite™ Scarlett 2i2, anteriormente apresentada neste trabalho.

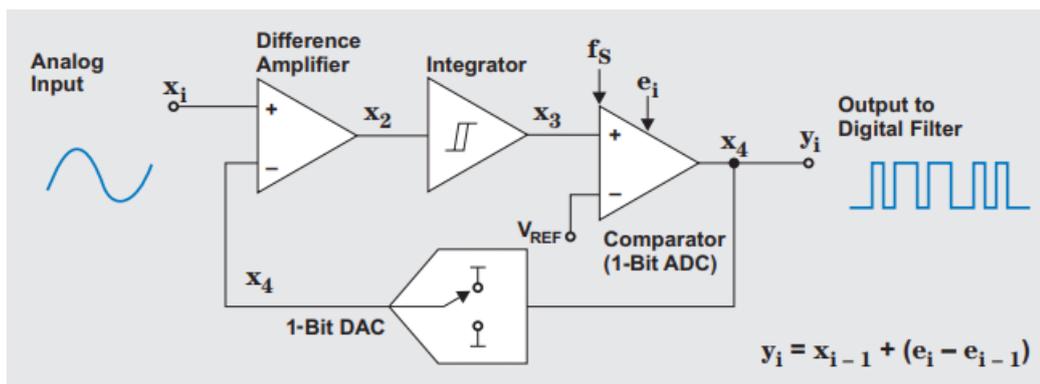
Figura 16 – Diagrama em blocos do conversor ADC Delta-Sigma



Fonte: (BAKER, 2011)

O ADC delta-sigma é construído usando um modulador delta-sigma e um filtro digital. O modulador realiza a conversão da entrada analógica em um fluxo de dados (*bit stream*), enquanto o filtro digital traduz este fluxo em dados que representem a magnitude do sinal analógico.

Figura 17 – Circuito de um modulador DS de primeira ordem



Fonte: (BAKER, 2011)

O modulador DS é a parte principal do conversor, sendo responsável por digitalizar o sinal analógico de entrada e reduzir o ruído em frequências baixas. Através da função de modelagem de ruído, o modulador empurra sinais de baixa frequência, fora da faixa desejada, para frequências mais alta.

A composição da arquitetura deste modulador é feita por um amplificador diferencial, um integrador e um comparador. O amplificador funciona subtraindo o sinal de *feedback* do sinal de entrada. O resultado da subtração é então passado pelo integrador, ao qual realiza a função de um filtro de passa-baixa, além de gerar um atraso no sinal ao qual é relacionado ao erro do *feedback*. Por fim o sinal passa pelo comparador cujo sinal de *clock* é o taxa de amostragem do sistema, desta forma o sinal de analógico entrada é convertido em um pulso modulado de alta velocidade de único bit. Portanto o *clock* utilizado no sistema é o que implementa a taxa de amostragem do mesmo.

O sinal de saída obtido na modulação é dado por

$$y_i = x_{i-1} + (e_i - e_{i-1}) \quad (3)$$

na qual, y_i é o sinal de saída para o instante (i), x_{i-1} é o sinal de entrada para o instante ($i - 1$), e_i é o erro quantizado para o instante (i), e_{i-1} é o erro quantizado para o instante ($i - 1$).

Assim como outros moduladores, o modulador delta-sigma produz um fluxo de dados de valores digitais que representam a tensão aplicada na entrada, neste caso de 1-bit, tendo como resultado a razão de zeros e uns que representam tal tensão. Porém, diferente de outros moduladores, o delta-sigma inclui um integrador em sua arquitetura, o que tem como efeito a modelagem da quantização de ruídos, fazendo com que estes passem a ter frequências mais altas, as quais são filtradas do sistema em seu estágio de filtro digital. Essa quantização dos ruídos faz, também, com que o espectro de frequência da saída do conversor não seja plana.

4 EXPERIMENTO

Neste capítulo serão apresentados os passos realizados ao longo da pesquisa, tanto em fator prático de desenvolvimento, gravação e tratamento do áudio, quanto na manipulação matemática dos resultados obtidos para posterior análise.

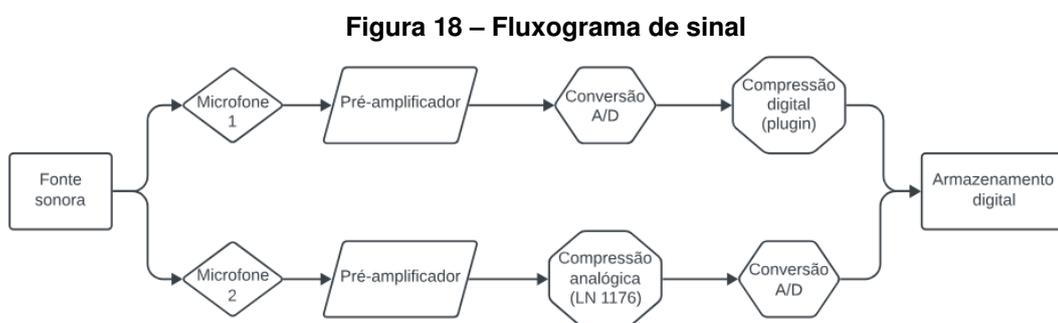
4.1 Desenvolvimento

Para iniciar a fase experimental da pesquisa se fez necessário a definição de um equipamento de base, o qual seria utilizado no tratamento das ondas sonoras. Realizou-se então uma pesquisa acerca dos modelos de compressores de áudio disponíveis no mercado, tendo como parâmetro de seleção os seguintes critérios: A acessibilidade ao equipamento e sua utilização; a existência de um *plugin* que simule o tratamento feito pelo compressor.

O alto valor monetário necessário para se adquirir um compressor tornou a procura ainda mais difícil, uma vez que um equipamento novo pode variar de R\$500,00 a R\$30.000,00. Portanto se concluiu que a melhor alternativa seria encontrar um estúdio de gravação que tivesse o equipamento disponível para utilização durante o aluguel do espaço. A partir destes pontos foi encontrado o compressor *1176LN Limiting Amplifier* da *Universal Audio™*, marca conhecida e estabelecida dentro do mercado musical. Além da qualidade no resultado entregue pelo equipamento o LN1176 conta com um *plugin* oficial desenvolvido pela própria *Universal Audio*, trazendo, assim, mais confiabilidade para a análise posterior dos sinais sonoros tratados.

Foi então localizado em Curitiba o estúdio de produção musical *Click Audioworks*, o qual possui em um de seus estúdios de gravação dois exemplares do compressor LN1176, tendo como valor de locação e uso da sala R\$200,00 a hora.

4.1.1 Gravação



Fonte: autor, 2023

Após conversar com o responsável pelo estúdio, a utilização do espaço ficou marcado para dia 25/05/2023, sendo locado por apenas uma hora devido ao custo elevado. Com auxílio

de um profissional do estúdio foi estabelecido o fluxo o qual os sinais gravados deveriam percorrer visando minimizar distorções causadas por múltiplas conversões A/D e D/A, conforme figura 18.

Figura 19 – Microfone *Neumann TLM 103*



Fonte: (NEUMANN, 2023)

Para a captação dos sons utilizou-se dois microfones condensadores de modelo *Neumann™ TLM 103* (Figura 19), os quais foram dispostos em posição paralela, com espaçamento de aproximadamente 40cm um do outro, de forma a manterem uma distância igual da fonte sonora. Uma vez captados os sinais são dirigidos à um pré-amplificador analógico *4-710d Four-Channel Mic Pre* (Figura 20) da *Universal Audio™*, o qual foi selecionado por indicação do técnico de som que auxiliou na montagem dos equipamentos, sendo considerado o pré-amplificador cuja amplificação causaria menor distorção no sinal de entrada dentre os aparelhos disponíveis.

Figura 20 – Pré-amplificador *4-710d Four-Channel Mic Pre - Universal Audio*



Fonte: (AUDIO, 2023)

A partir deste ponto os sinais vindos de cada um dos microfones passam por processos diferentes. O primeiro deles sendo o que chamaremos de sinal analógico, o qual após a pré-amplificação é enviado diretamente para o LN1176 para ser comprimido. Os parâmetros de compressão foram definidos de forma arbitrária visando uma utilização mais próxima à da realidade, sendo estes:

- *Threshold: 24dB.*

- *Ratio*: 4:1.
- Tempo de ataque: 4ms.
- Tempo de soltura: 4ms.

No caso do LN1176, o parâmetro da Largura do Joelho é intrínseco ao equipamento, portanto não era passível de alteração.

Em seguida o sinal já tratado passou pelo processo de conversão digital e foi então armazenado no formato de um arquivo *.wav*.

O sinal digital, por outro lado, após a pré-amplificação passa diretamente pelo processo de conversão A/D sendo armazenado sem tratamento de compressão nenhum. Em um segundo momento utilizou-se de um software de edição de áudio do tipo DAW, *Digital Audio Workstation*, para processar o arquivo e realizar o tratamento de forma digital. As DAW's são programas comumente utilizados no meio da produção musical por possibilitarem a montagem de arranjos complexos com múltiplos instrumentos musicais, além da aplicação de *plugins*, extensões digitais que emulam equipamentos analógicos, efeitos sintéticos ou outros instrumentos musicais, de forma simultânea.

Neste estudo foi utilizada a DAW *Studio One* em conjunto com o *plugin UA 1176 Classic Limiter Collection*, software oficial da *Universal Audio™*, para realizar o tratamento do sinal digital, sendo usados os mesmo parâmetros de compressão aos quais o sinal analógico foi submetido.

Figura 21 – Interface compressor digital UA 1176 Classic Limiter Collection



Fonte: (NADA, a)

4.2 Estudo

Para início dos estudos dos resultados obtidos foi utilizado uma codificação simples no *MatLab*, a qual está mostrada na Figura 22, para realizar uma análise visual das ondas sonoras no domínio do tempo, uma vez que o *software* nos permite ver trechos extremamente pequenos de forma precisa.

Figura 22 – Código MatLab

```

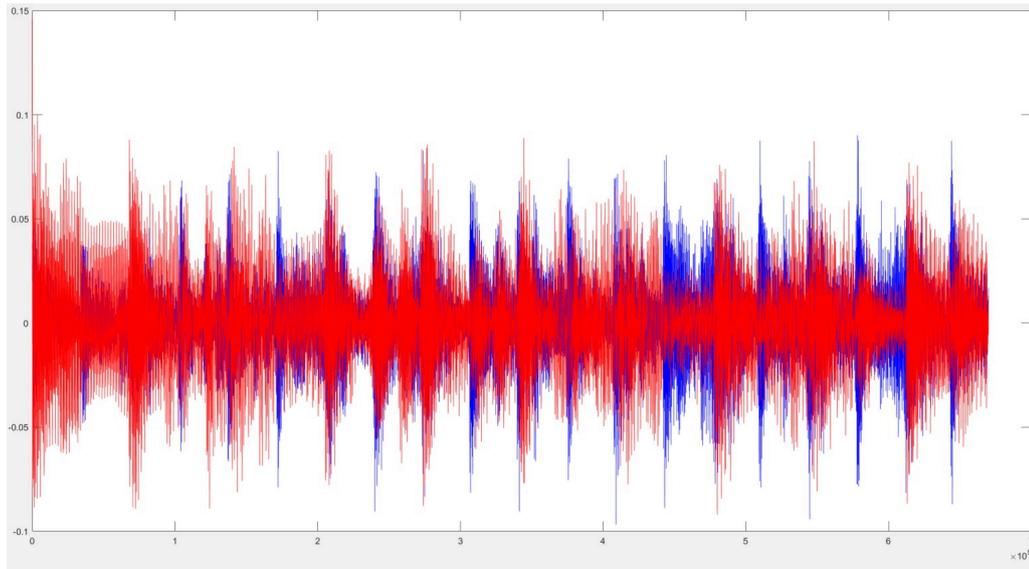
Violao.m x +
1  clc;
2  clear;
3  close all
4  format long;
5
6  %Sinal Analógico: Azul
7
8  [y,Fs] = audioread('Violao - Analógico.wav');
9  y1D(1:670000)=y(1:670000);
10
11 % Sinal Digital: Vermelho
12
13 [x,Fs] = audioread('Violao - Digital.wav');
14 x1D(1:670000)=x(1:670000);
15
16
17 %Plotando Lumixcana
18 plot(1:670000,y1D(1:670000),'blue',1:670000,x1D(1:670000),'red')
19
20 %subplot(2,1,1);
21
22 % Identificação do atraso
23 D1=finddelay(y(1:670000,1),x(1:670000,1));
24
25
26 % final do atraso

```

Fonte: autor, 2023

Uma vez que o código foi rodado no *MatLab* foi percebida uma dessincronização dos sinais, na qual o sinal digital se inicia antes do sinal analógico, como pode ser vista na Figura 23. Foram utilizados então artifícios matemáticos manuais, como a comparação de distância entre picos, para manipular a posição destes sinais, visando gerar uma sobreposição exata de ambos. Apesar das diversas tentativas de sincronização das ondas, nenhuma foi bem sucedida, levando ao abandono desta abordagem de análise no domínio do tempo, passando então, para uma análise somente no domínio da frequência. A razão pela qual este processo de dessincronização ocorre é desconhecida.

Figura 23 – Plotagem MatLab - Comparação no Domínio do Tempo



Fonte: autor, 2023

Utilizou-se então o *software Audacity* para iniciar o processo de análise das ondas sonoras no domínio da frequência, programa realiza a leitura de arquivos do tipo .WAV e apresenta, de forma gráfica, o sinal no domínio do tempo. Visando obter um detalhamento mais preciso foi necessário diminuir o tamanho dos áudios, que possuíam entre 12 e 40 segundos, para faixas de até no máximo 2 segundos. Para isso foram então selecionados, de forma arbitrária, duas faixas de tempo para cada instrumento musical, sendo uma mais no começo e outro mais para o final do áudio. Os tempos recortados foram os mesmos para as gravações analógicas e digitais, uma vez que ambos os sinais possuem exatamente a mesma duração e serão posteriormente comparados entre si, os tempos selecionados podem ser encontrados na tabela 7.

Tabela 7 – Comparação entre os principais tipos de A/D

Instrumento	Início	Fim
Violão 1.	1,30 s	2,0 s
Violão 2.	21,80 s	22,80 s
Caixa 1.	3,30 s	4,60 s
Caixa 2.	11,58 s	12,58 s
Surdo 1.	3,20 s	4,80 s
Surdo 2.	7,70s	8,80 s
Tamborim 1.	1,10 s	2,5 s
Tamborim 2.	8,50 s	9,50 s
Chocalho 1.	0,66 s	1,80 s
Chocalho 2.	9,00 s	10,00 s

Fonte: autor, 2023.

Para cada uma das faixas de tempo foi utilizada a função “Analisar espectro de frequência” do *Audacity*, a qual aplica a transformada de Fourier no trecho escolhido, de forma a retornar um gráfico no domínio da frequência, da intensidade do sinal, em dB. A partir deste ponto é pos-

sível utilizar a opção de exportação para se obter os valores ponto a ponto do gráfico, resultando em uma planilha de duas colunas, no qual são apresentados os valores de frequência e o seu respectivo nível em dB. Os resultados obtidos para os níveis de sinal analógico e digital foram colocados lado a lado para serem então manipulados, conforme está mostrado na figura 24.

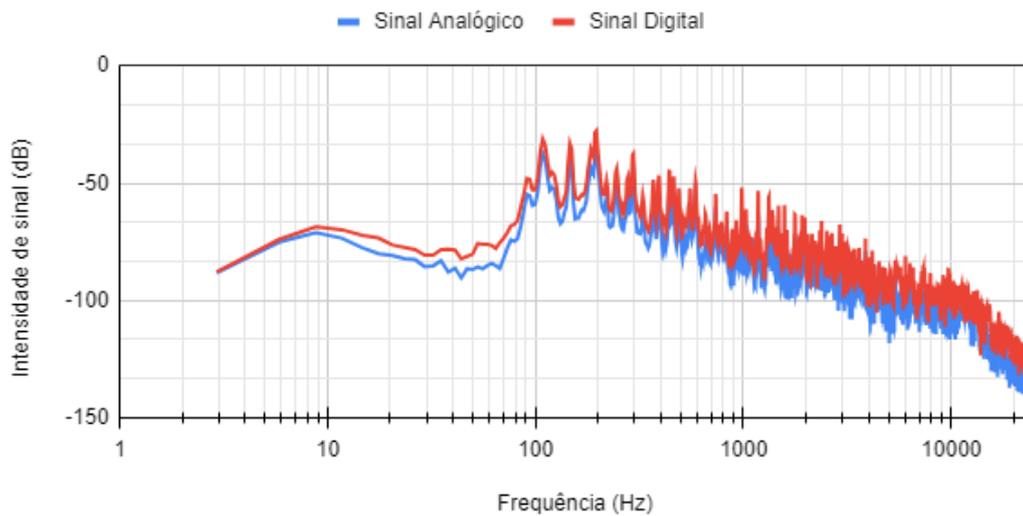
Figura 24 – Planilha de Valores de Sinais

	Sinal Analógico	Sinal Digital
Frequência (Hz):	Nível (dB):	Nível (dB):
2,929688	-88,307487	-87,82959
5,859375	-75,105423	-73,977196
8,789062	-71,069504	-68,570862
11,71875	-73,469917	-69,855438
14,648438	-77,487274	-72,20665
17,578125	-80,10524	-73,399628
20,507812	-80,834557	-76,338188
23,4375	-82,132462	-77,389717
26,367188	-82,635292	-78,287804
29,296875	-85,565857	-80,741287

Fonte: autor, 2023

Em seguida foi utilizado o excel para gerar um gráfico sobreposto com ambos os sinais de forma a ser possível uma comparação visual simples, como pode ser visto no exemplo da figura 25.

Figura 25 – Gráfico de Sinais Sobreposto



Fonte: autor, 2023

De forma inicial foi possível perceber uma disparidade na posição dos gráficos, uma vez que o gráfico do sinal digital estava levemente deslocado no eixo Y. Esse deslocamento pode ser explicado pelo ganho aplicado ao sinal durante o tratamento no *Studio One*. Visando gerar uma melhor sobreposição dos gráficos foi realizada uma manipulação dos valores utilizando o cálculo da média da diferença entre os sinais. O qual consiste em subtrair o valor do nível em dB do sinal digital do nível do sinal analógico, e em seguida aplicar uma média simples para se obter um valor único em dB.

Figura 26 – Planilha de Valores de Sinais Manipulados

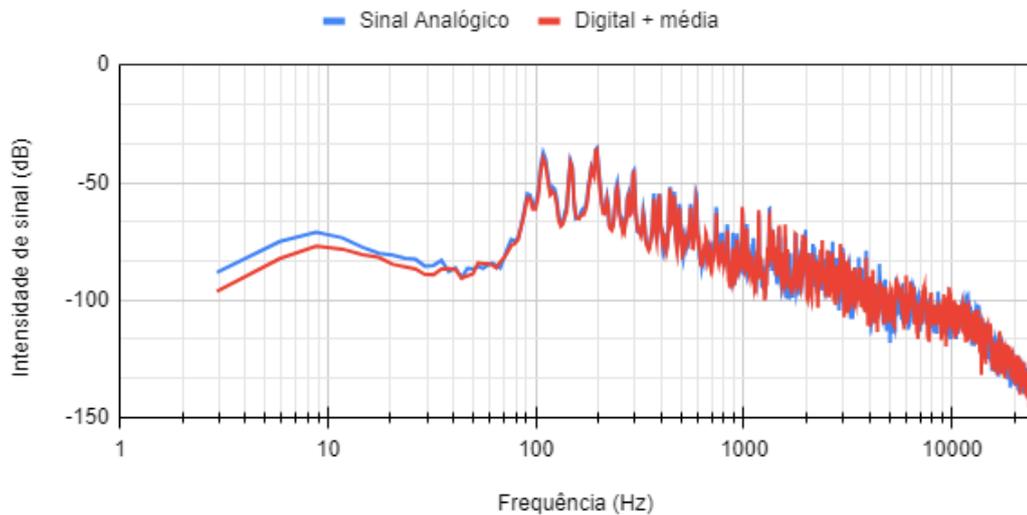
Frequência (Hz):	Sinal Analógico Nivel (dB):	Sinal Digital Nivel (dB):	Diferença (Anlg - Dig):	Digital Corrigido Dig. + Média (dB):
2,929688	-88,307487	-87,82959	-0,477897	-87,82959
5,859375	-75,105423	-73,977196	-1,128227	-73,977196
8,789062	-71,069504	-68,570862	-2,498642	-68,570862
11,71875	-73,469917	-69,855438	-3,614479	-69,855438
14,648438	-77,487274	-72,20665	-5,280624	-72,20665
17,578125	-80,10524	-73,399628	-6,705612	-73,399628
20,507812	-80,834557	-76,338188	-4,496369	-76,338188
23,4375	-82,132462	-77,389717	-4,742745	-77,389717
26,367188	-82,635292	-78,287804	-4,347488	-78,287804
29,296875	-85,565857	-80,741287	-4,82457	-80,741287

Fonte: autor, 2023

Este valor foi então somado a cada um dos pontos do sinal digital, gerando assim uma nova coluna de valores, o sinal digital corrigido.

Em seguida foi gerado um novo gráfico, utilizando os valores do sinal digital corrigido, o qual pode ser visto na Figura 27.

Figura 27 – Gráfico de Sinais Corrigidos Sobrepostos



Fonte: autor, 2023

Em seguida foi utilizada a função =CORREL() do excel nas duas colunas de intensidade de sinal, a qual nos retorna o valor de correlação entre os dois intervalos de células a partir do cálculo indicado na equação. A partir do valor de correlação temos um valor numérico que expressa de forma direta a similaridade entre os sinais.

$$Correl_{(X,Y)} = \frac{\Sigma(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\Sigma(x - \bar{x})^2 \Sigma(y - \bar{y})^2}} \quad (4)$$

É importante salientar que o valor da correlação se mantém constante caso a conta seja feita usando o valor do sinal analógico e digital ou usando os valores do sinal analógico e digital corrigido. Isso se dá pelo fato do cálculo da correlação analisar da variação entre os pontos,

portanto a adição de um valor constante a todos os pontos da curva não gera uma alteração em sua variação.

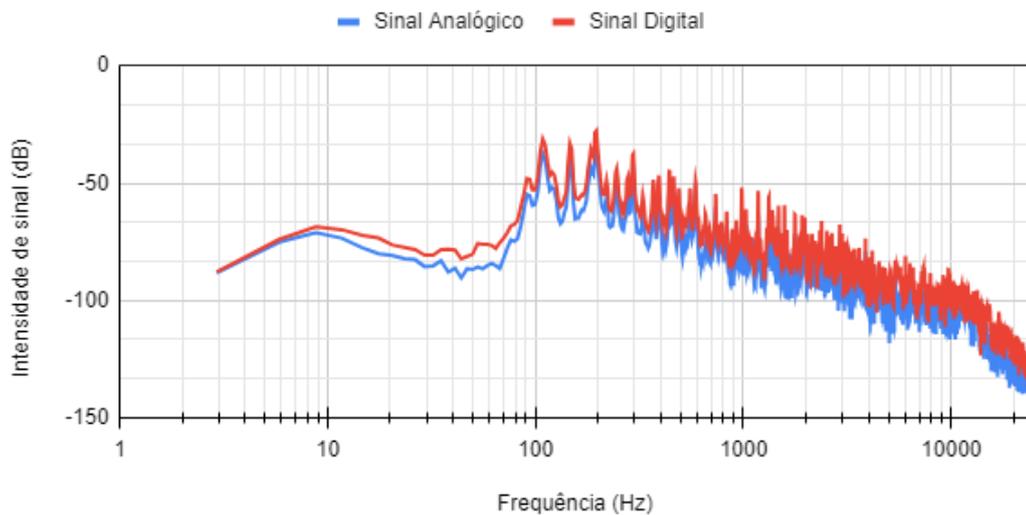
5 RESULTADOS

Este capítulo tem como objetivo apresentar todos os valores e gráficos obtidos durante o experimento assim como discutir sobre os resultados, uma vez que os passos apresentados no capítulo 4 foram aplicados a cada um dos conjuntos de sinais e instrumentos.

5.1 Violão

5.1.1 Trecho 1

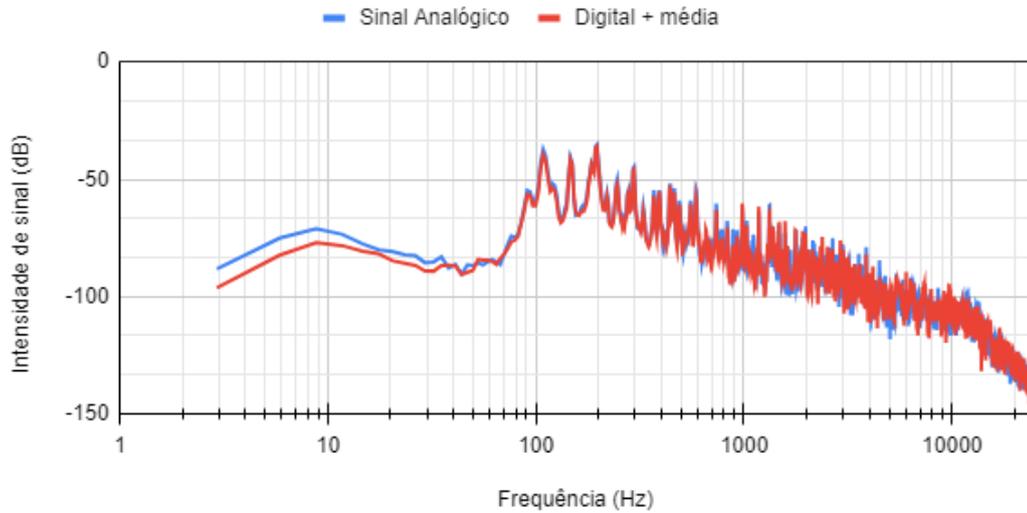
Figura 28 – Gráfico de Sinais Sobrepostos - Violão 1



Fonte: autor, 2023

O primeiro trecho analisado do violão teve início em 1,3 s e fim em 2,0 s, tendo uma diferença média entre o sinal analógico e digital igual a -7,57 dB, sendo o valor de pico de energia do sinal analógico de -35,29 dB e de -27,72 dB para o sinal digital, ambos para uma frequência de 196,29 Hz, além uma correlação igual a 96,16%. O valor obtido para a correlação pode ser facilmente verificado de forma visual a partir da análise do gráfico, este também expressa que, matematicamente falando, as ondas sonoras possuem alto grau de similaridade em seus tratamentos.

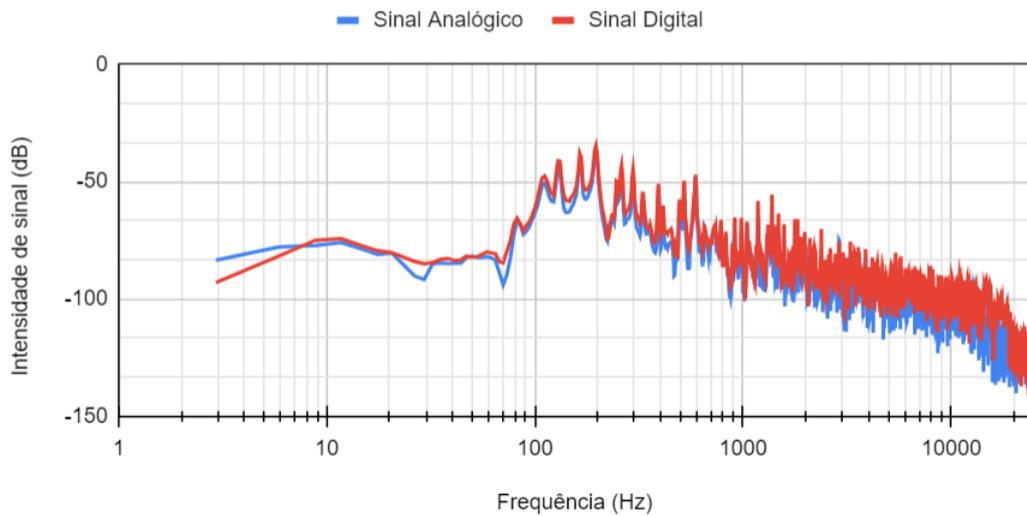
Figura 29 – Gráfico de Sinais Sobrepostos Corrigidos - Violão 1



Fonte: autor, 2023

5.1.2 Trecho 2

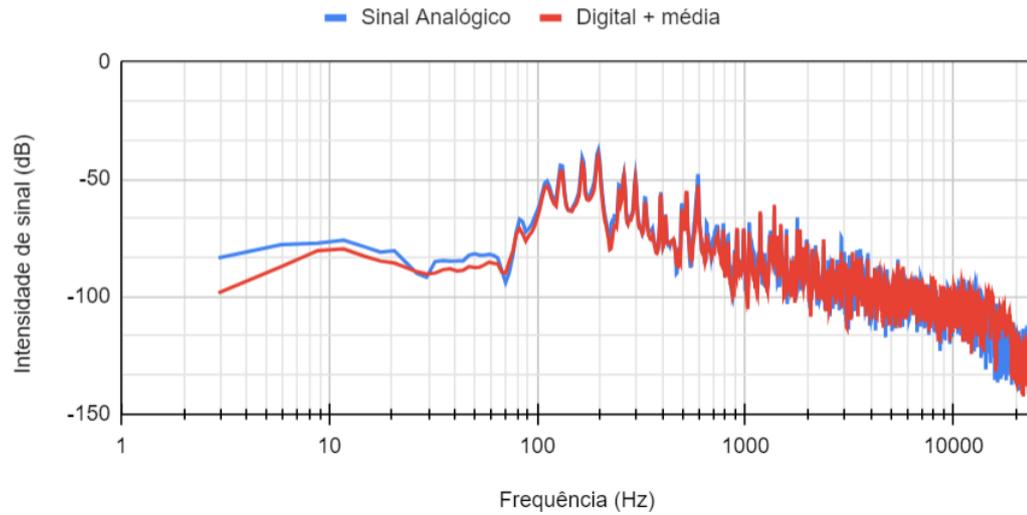
Figura 30 – Gráfico de Sinais Sobrepostos - Violão 2



Fonte: autor, 2023

O segundo trecho analisado do violão, por sua vez, teve início em 21,8 s e término em 22,8 s, obtendo uma diferença média entre os sinais de -5,39dB e uma correlação de 86,39%. Assim como no primeiro trecho do violão a frequência de pico ficou em 196,29 Hz, para ambos os sinais porém os valores de pico foram de -37,66 dB para o sinal analógico e -34,74 dB para o digital.

Figura 31 – Gráfico de Sinais Sobrepostos Corrigidos - Violão 2

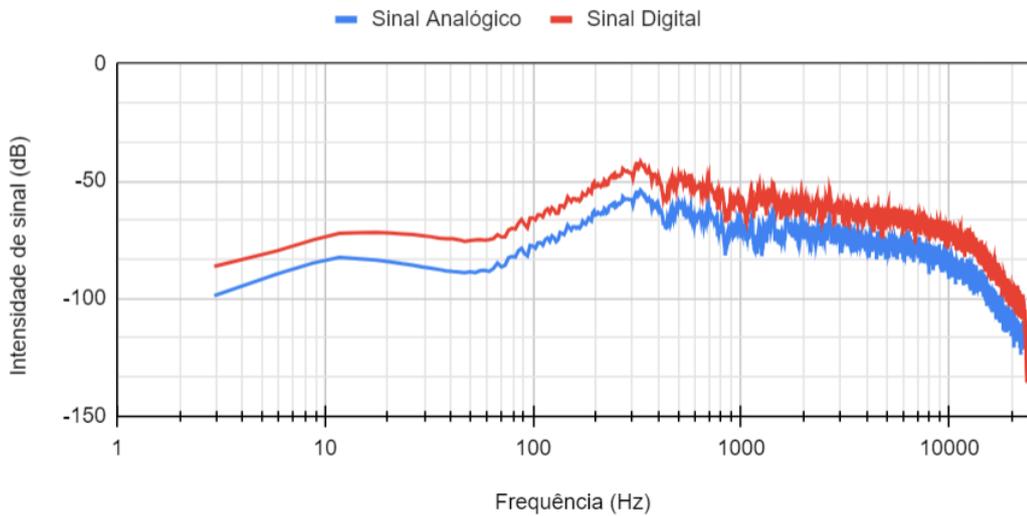


Fonte: autor, 2023

5.2 Caixa

5.2.1 Trecho 1

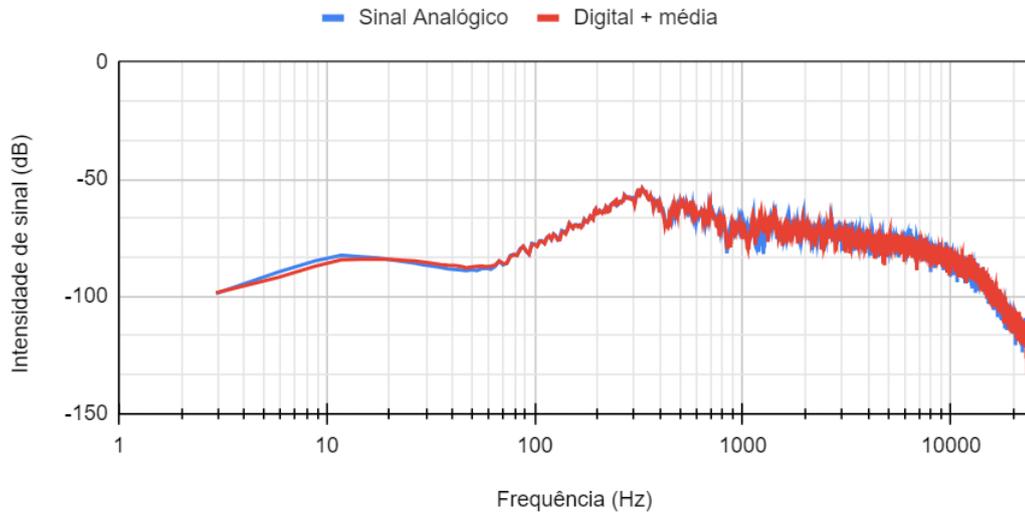
Figura 32 – Gráfico de Sinais Sobrepostos - Caixa 1



Fonte: autor, 2023

O trecho selecionado para o primeiro recorte da gravação da caixa se inicia em 3300ms e termina em 4,6 s, sendo o valor da diferença média obtida de -12,15 dB e a frequência de pico de energia foi em 328,13 Hz para ambos os sinais, tendo o sinal analógico um pico de -53,96 dB e de -41,87 dB para o sinal digital. A correlação obtida entre os sinais foi de 94,86%.

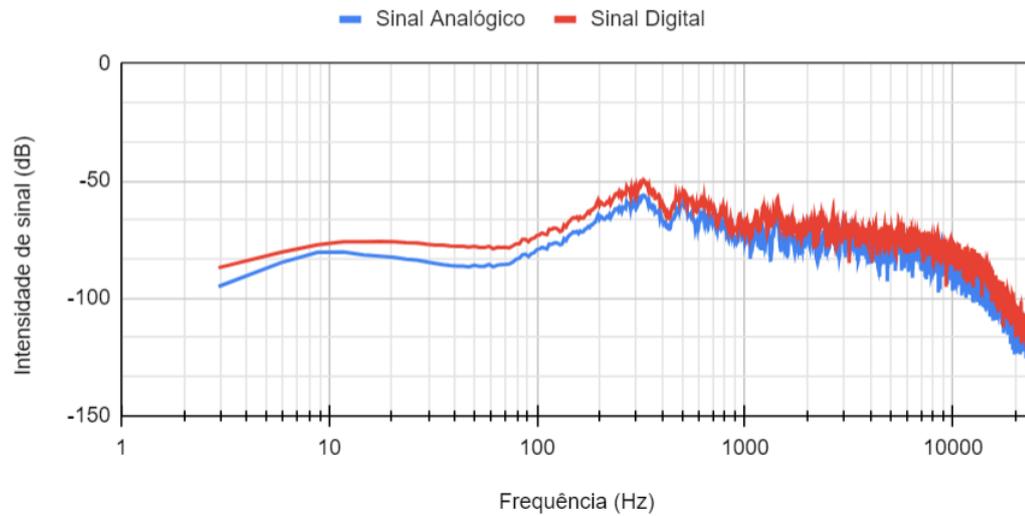
Figura 33 – Gráfico de Sinais Sobrepostos Corrigidos - Caixa 1



Fonte: autor, 2023

5.2.2 Trecho 2

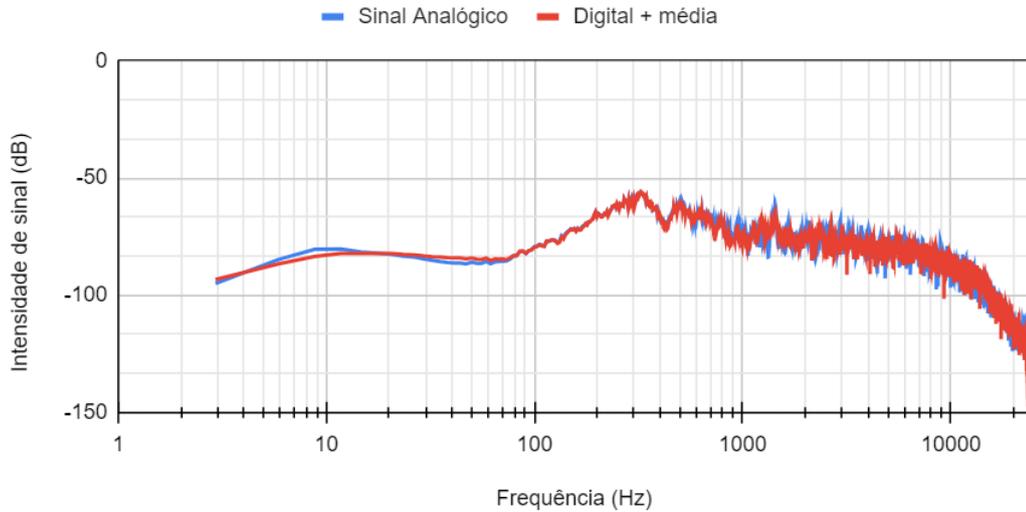
Figura 34 – Gráfico de Sinais Sobrepostos - Caixa 2



Fonte: autor, 2023

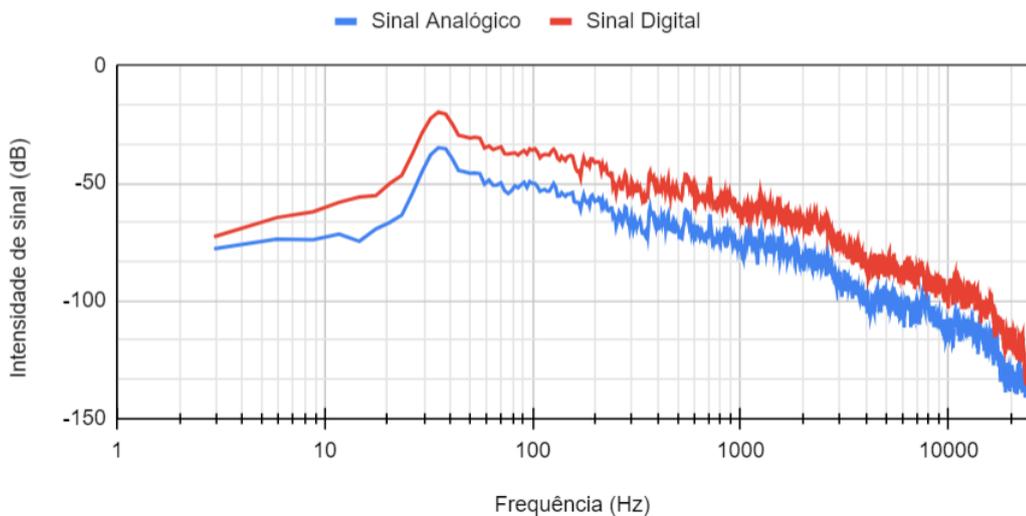
O segundo trecho da caixa foi iniciado em 11,58 s tendo fim em 12,58 s, resultando em uma diferença média de -6,44 dB, possuindo um pico de energia na frequência de 325,20 Hz nos 2 sinais, sendo o pico do sinal analógico de -56,11 dB e de -49,67 dB no sinal digital. Foi obtido também uma correlação de 94,79%.

Figura 35 – Gráfico de Sinais Sobrepostos Corrigidos - Caixa 2



Fonte: autor, 2023

Figura 36 – Gráfico de Sinais Sobrepostos - Surdo 1



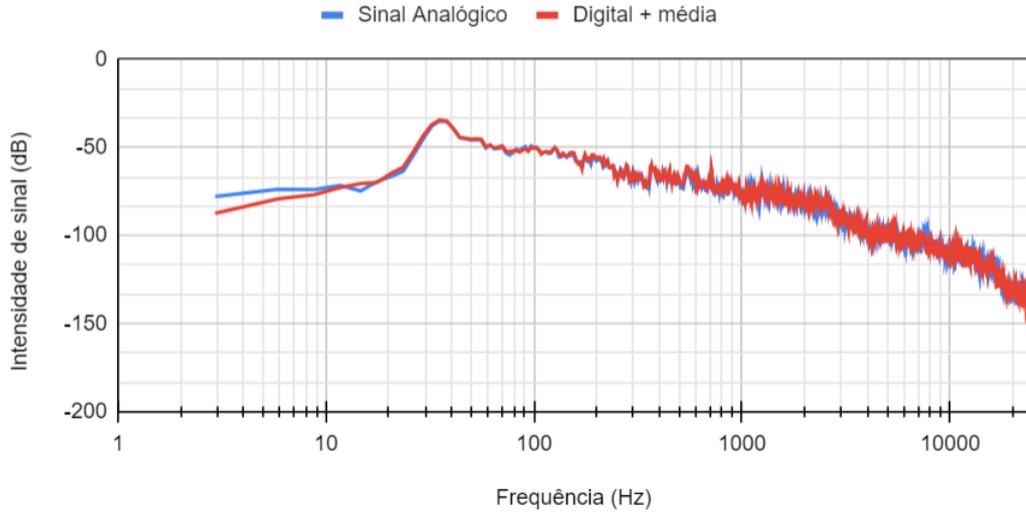
Fonte: autor, 2023

5.3 SURDO

5.3.1 Trecho 1

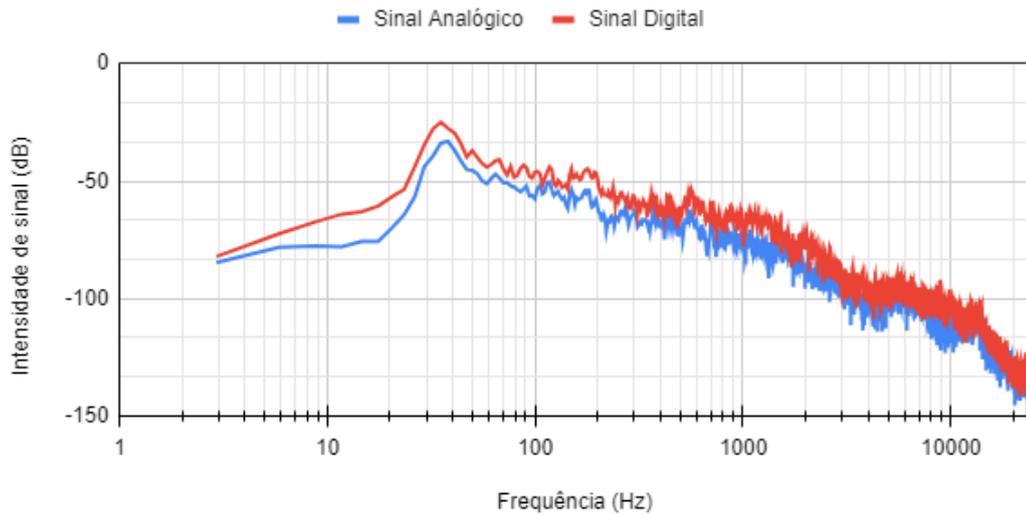
O primeiro trecho selecionado do surdo teve início em 3,2 s e fim em 4,8 s, sendo o valor da diferença da média -14,67 dB e a frequência de pico de energia para ambos os sinais de 35,16 Hz, tendo como valor máximo -34,92 dB para o sinal analógico e -19,81 dB para o sinal digital. Por fim sua correlação obtida tem valor de 97,52

Figura 37 – Gráfico de Sinais Sobrepostos Corrigidos - Surdo 1



Fonte: autor, 2023

Figura 38 – Gráfico de Sinais Sobrepostos - Surdo 2

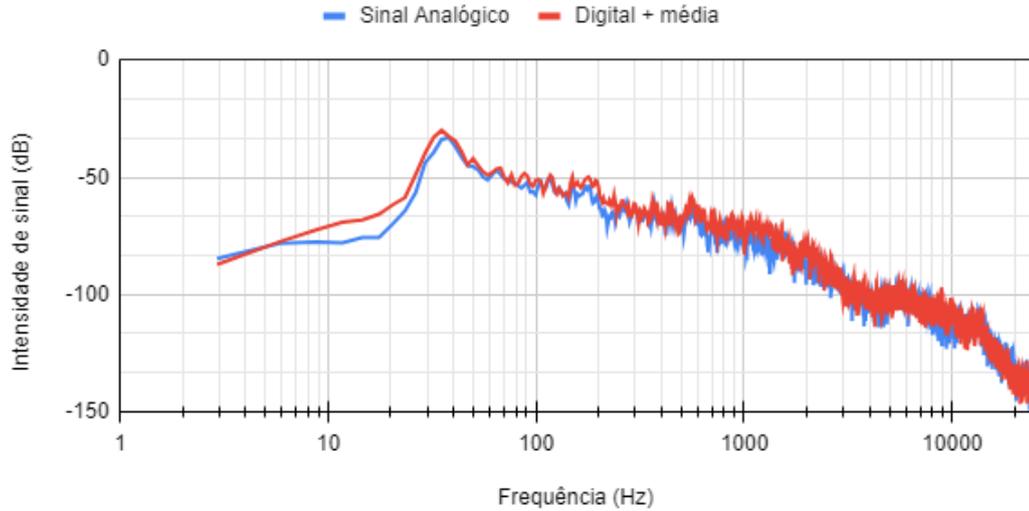


Fonte: autor, 2023

5.3.2 Trecho 2

Para o segundo trecho do surdo foi analisado o período entre 7,8 s e 8,8 s, tendo uma diferença média de -5,09 dB. Este foi o primeiro caso no qual um sinal teve frequências de pico de energia diferentes para cada sinal. Sendo o pico do sinal analógico de -33,07 dB na frequência de 38,09 Hz, e o pico digital de -24,91 dB em uma frequência de 35,16 Hz. Apesar desta desigualdade o trecho ainda obteve uma correlação de 97,22%.

Figura 39 – Gráfico de Sinais Sobrepostos Corrigidos - Surdo 2

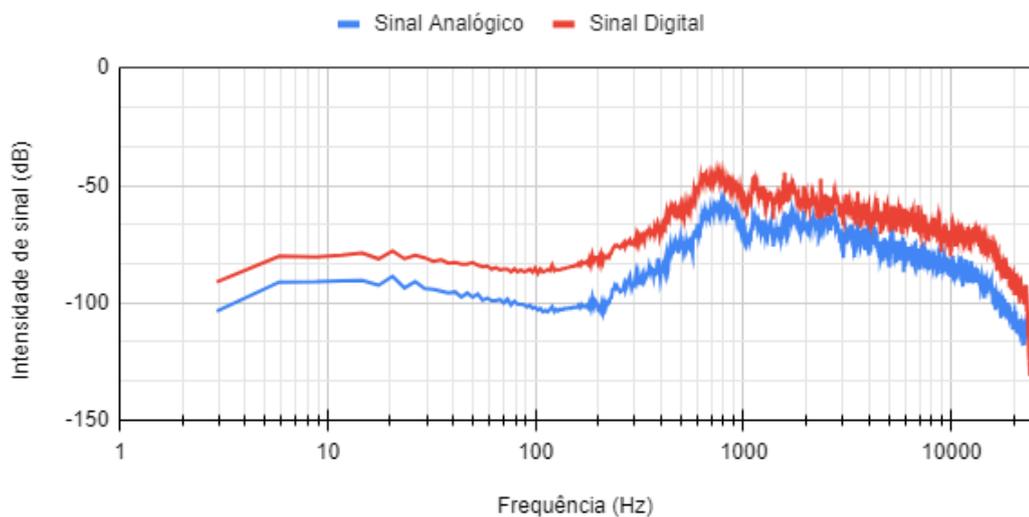


Fonte: autor, 2023

5.4 TAMBORIM

5.4.1 Trecho 1

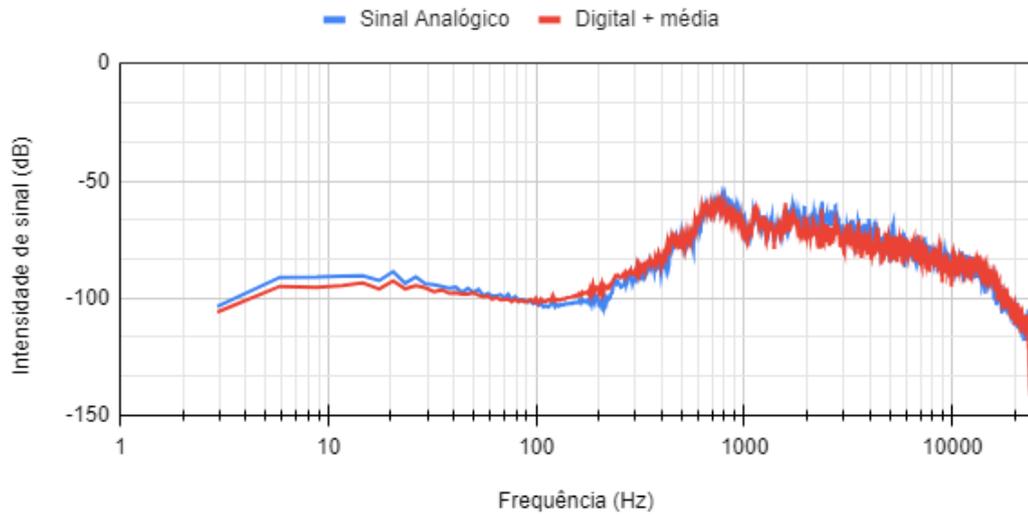
Figura 40 – Gráfico de Sinais Sobrepostos - Tamborim 1



Fonte: autor, 2023

Para análise do tamborim foi selecionado inicialmente o trecho entre 1,1 s e 2,5 s, para o qual foi encontrado uma diferença média de -14,82dB. Além disso foram encontrados valores de pico diferentes para cada sinal, sendo o pico do sinal analógico de -57,24dB na frequência de 785,16 Hz, e de -44,24 dB na frequência de 761,72 Hz para o sinal digital. Sendo por fim encontrada uma correlação de 92,31%.

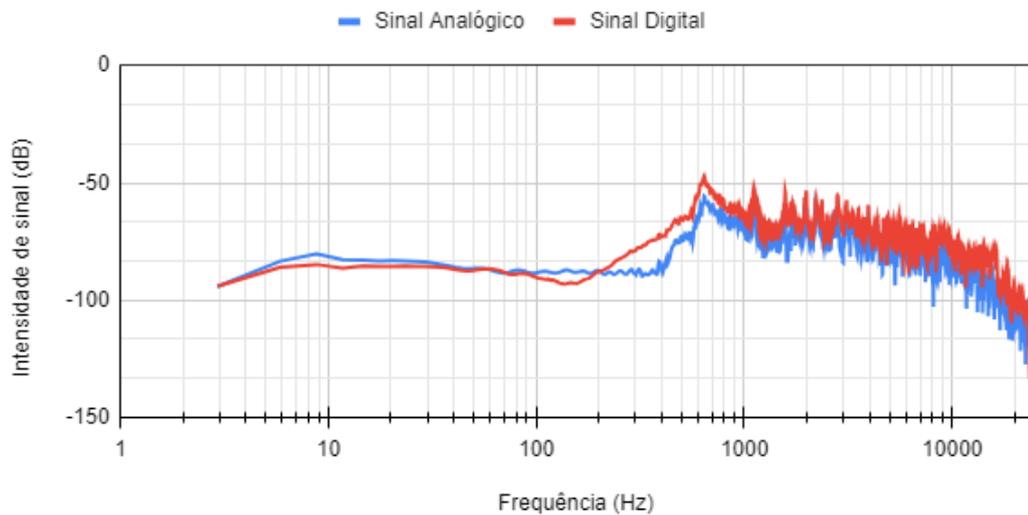
Figura 41 – Gráfico de Sinais Sobrepostos Corrigidos - Tamborim 1



Fonte: autor, 2023

5.4.2 Trecho 2

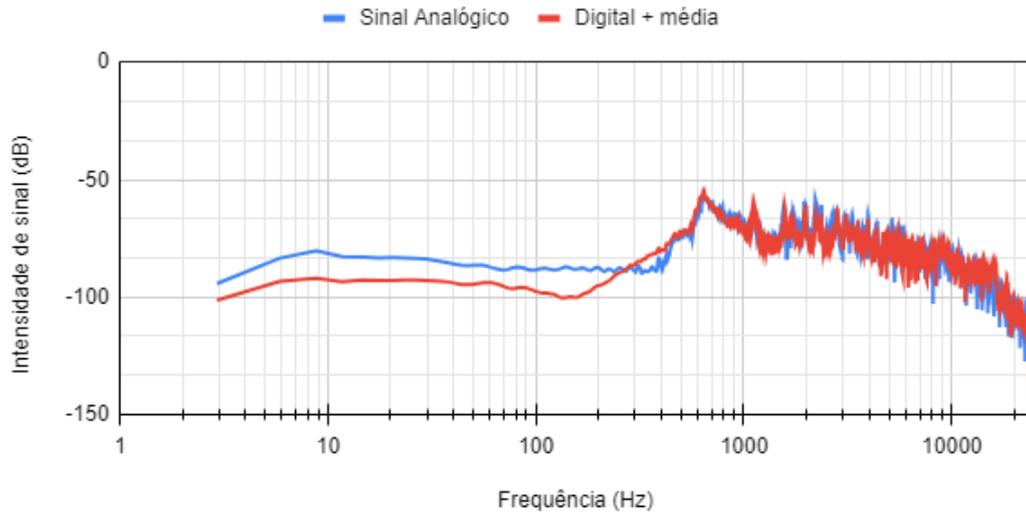
Figura 42 – Gráfico de Sinais Sobrepostos - Tamborim 2



Fonte: autor, 2023

Já o segundo trecho analisado para o tamborim teve início em 8,5 s e fim em 9,5 s, possuindo uma diferença média de -7,26 dB, ao contrário do primeiro trecho analisado examinado para o instrumento este obteve a mesma frequência de pico de energia em 641,60 Hz, sendo o pico analógico de -55,84 dB e o pico do sinal digital de -47,21 dB. Chegando por fim a uma correlação de 89,73%.

Figura 43 – Gráfico de Sinais Sobrepostos Corrigidos - Tamborim 2

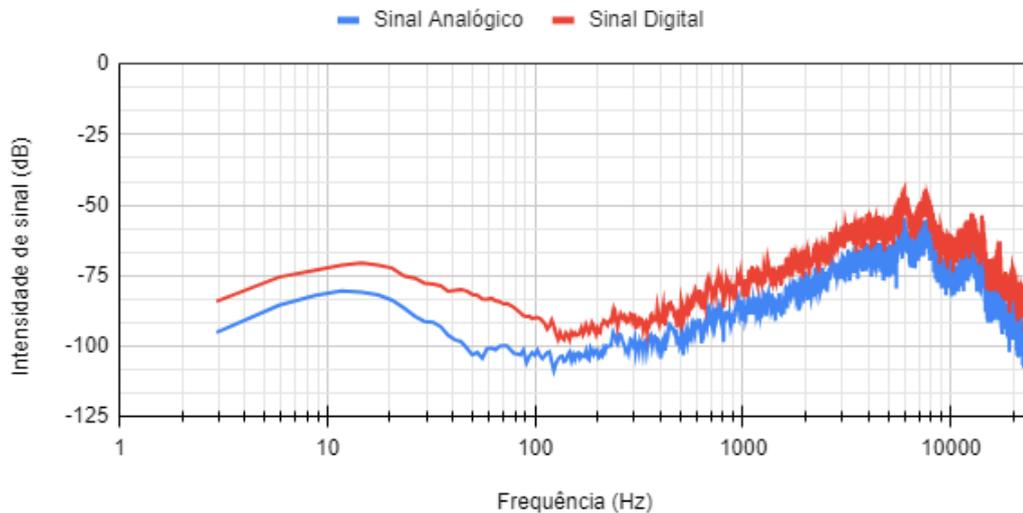


Fonte: autor, 2023

5.5 CHOCALHO

5.5.1 Trecho 1

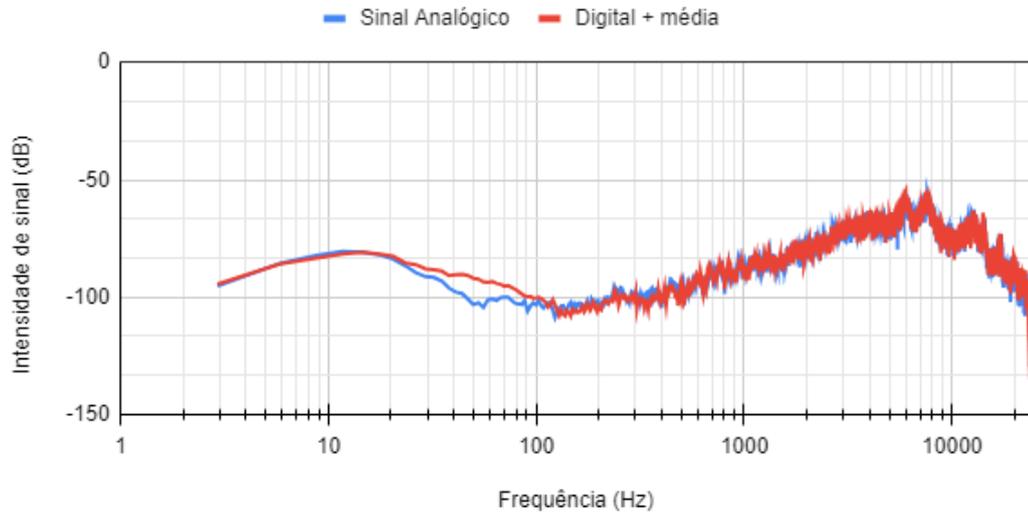
Figura 44 – Gráfico de Sinais Sobrepostos - Chocalho 1



Fonte: autor, 2023

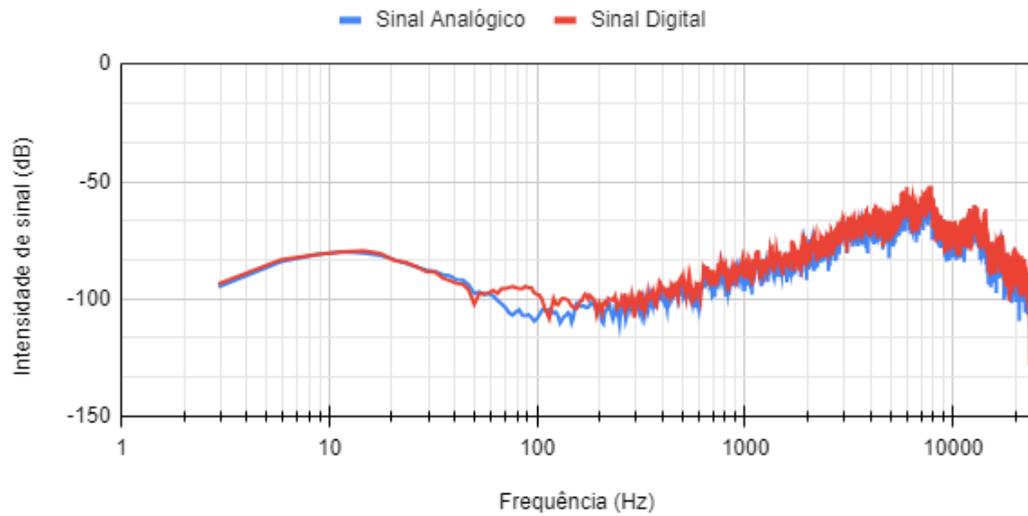
O primeiro trecho selecionado para o chocalho se inicia em 0,66 s e termina em 1,8 s, tendo um valor médio da diferença de -10,21 dB. O valor de pico encontrado para o sinal analógico foi de -54,56 dB na frequência de 5967,77 Hz, enquanto o pico do sinal digital foi de -44,36 dB na frequência de 5982,42 Hz. Sendo obtida a correlação entre sinais de 89,73

Figura 45 – Gráfico de Sinais Sobrepostos Corrigidos - Chocalho 1



Fonte: autor, 2023

Figura 46 – Gráfico de Sinais Sobrepostos - Chocalho 2

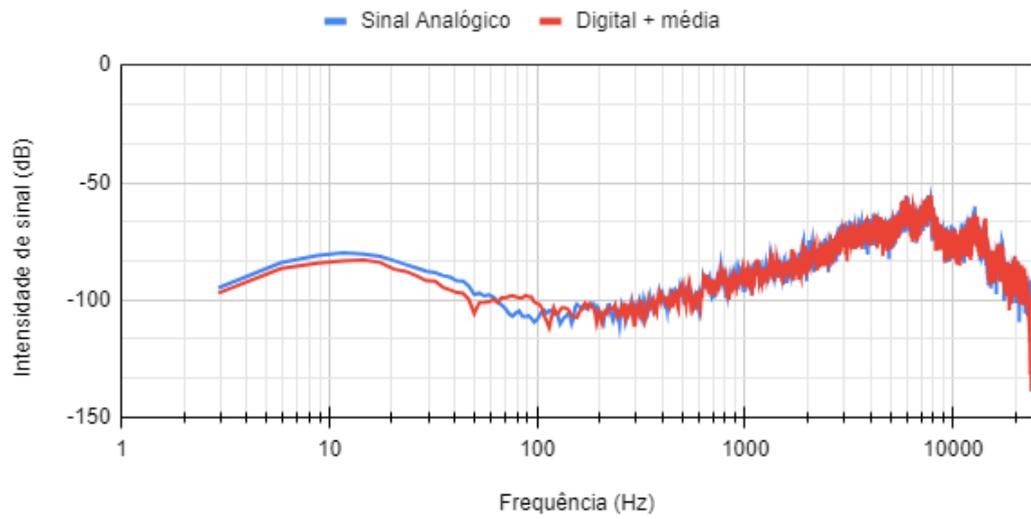


Fonte: autor, 2023

5.5.2 Trecho 2

Por fim o último trecho selecionado para o chocalho tem início em 9,0 s e fim em 10 s. Possuindo uma diferença média -3,42 dB. Tendo novamente um pico de energia diferente para cada um dos sinais, sendo o pico de -55,43 dB em 7669,92 Hz para o sinal analógico e de -51,89 dB em 7719,73 Hz no sinal digital. A correlação encontrada foi de 89,00%.

Figura 47 – Gráfico de Sinais Sobrepostos Corrigidos - Chocalho 2



Fonte: autor, 2023

6 DISCUSSÃO

A partir dos resultados apresentados no capítulo 5, e resumidos na Figura 48, é possível chegar a uma resposta para a pergunta inicial proposta neste trabalho, no fim um emulador digital *plugin* é capaz de gerar um resultado próximo, ou minimamente satisfatório, ao de um equipamento analógico? Se analisado puramente os resultados obtidos das correlações entre os sinais, os quais nos mostram a proximidade entre as ondas estudadas, temos valores entre 89,00% e 97,52%, então seria plausível concluir que sim, os *plugins* são bem fiéis ao seu equipamento de base. Até mesmo numa análise auditiva se torna quase impossível diferenciar um tratamento de áudio do outro, sendo no caso dos áudios obtidos a forma mais fácil de o fazer a partir da diferença de volume entre as ambos.

Figura 48 – Resumo dos resultados obtidos.

	Pico Anlg. (dB)	Freq. de Pico Anlg. (Hz)	Pico Dig. (dB)	Freq. de Pico Dig. (Hz)	Correlação.
surdo 1	-34,92	35,16	-19,81	35,16	97,52%
surdo 2	-33,07	38,09	-24,91	35,16	97,22%
violão 1	-35,29	196,29	-27,72	196,29	96,16%
violão 2	-37,66	196,29	-34,74	196,29	86,39%
Caixa 1	-53,96	328,13	-41,87	328,13	94,86%
Caixa 2	-56,11	325,20	-49,67	325,20	94,79%
Tamborim 1	-57,24	785,16	-44,24	761,72	92,31%
Tamborim 2	-55,84	641,60	-47,21	641,60	89,73%
Chocalho 1	-54,56	5967,77	-44,36	5982,42	89,73%
Chocalho 2	-55,43	7669,92	-51,89	7719,73	89,00%

Fonte: autor, 2023

Alguns casos estudados nos apresentaram valores diferentes para a frequência de pico de energia e ainda assim tiveram correlações satisfatórias: isto se dá pelo fato de que a correlação analisa o desvio padrão das ondas e como este valor varia ao longo de sua trajetória. Neste experimento cada faixa de sinal analisado foi constituído de 8191 frequências (Hz) diferentes e suas respectivas intensidades (dB), sendo que o ponto de pico é apenas um desses valores de forma a ter pouco impacto no resultado final da correlação.

Outra análise interessante é o fato de que, quanto maior a frequência do pico de energia menor é a correlação obtida entre os sinais, sendo as melhores correlações as do surdo, 97,52% e 97,22%, as quais possuem picos entre 35 e 38 Hz, e as piores do chocalho, 89,73% e 89,00% com picos entre 5900 Hz e 7800 Hz. Esta diferença pode ser explicada pelos ruídos intrínsecos ao equipamento analógico, uma vez que seu funcionamento gera de forma natural estes sinais, resultando em um efeito, ou chiado, próprio. Ao tentar emular tal efeito o *plugin* insere de forma artificial diversas frequências no sinal de entrada, os quais para valores mais

baixos se aproximam mais dos criados pelo compressor analógico, enquanto para frequências mais altas acaba gerando leves distorções.

6.1 Trabalhos futuros

Visando dar continuidade a esta linha de pesquisa ficam aqui listados algumas ideias de formas de se aprofundar no tema proposto:

Procurar encontrar a razão pela qual os sinais dentro do domínio do tempo não ficaram sincronizados ao serem lidos pelo MatLab e assim analisar a compatibilidade das ondas. A aplicação de correlações entre os sinais pode vir a gerar resultados interessantes.

Como foi dito anteriormente, durante a extração de dados no *Audacity* foram utilizados somente dois trechos por gravação, então a expansão da quantidade de trechos de forma a se analisar toda a extensão do áudio viria a gerar produtos diferentes. Além disso, realizar a gravação de mais instrumentos com padrões sonoros diferentes pode também resultar em dados finais mais complexos.

Por fim, a utilização de parâmetros diferentes de gravação e compressão podem mudar o resultado final também. O uso de uma taxa de amostragem maior deve resultar em dados mais precisos para a análise,

7 CONCLUSÃO

Neste trabalho foram delimitados alguns objetivos específicos junto com a definição do tema, dentre eles realizar gravações de diversos instrumentos e tratamento de ondas sonoras utilizando equipamentos analógicos e digitais, para os quais foram definidos previamente os parâmetros. Tais metas foram atingidas de forma satisfatória como apresentado no capítulo 4.1, sendo que todos os equipamentos utilizados durante a gravação eram de boa qualidade.

Apesar disso, a busca por um equipamento e seu respectivo *plugin* foi mais complicada do que o esperado, uma vez que a maioria dos estúdios não divulgam de forma aberta os equipamentos que possuem em seu acervo. Além disso a maioria dos *plugins* disponíveis no mercado são pagos, e com pouco suporte no Brasil, sendo necessário a compra dos mesmos em dolar, no caso do *UA 1176 Classic Limiter Collection*, o qual foi utilizado para esta pesquisa, havia um período de testes grátis de uma semana, permitindo assim a realização do experimento.

Quanto a análise resultados, não foi possível obter um diagnóstico melhor dos sinais, nem realizar uma comparação dos mesmos, dentro do domínio do tempo utilizando o *MatLab*, como havia sido proposto inicialmente. Entretanto a análise no domínio da frequência obteve boas conclusões a partir da utilização do *Audacity* e do *Excel*.

Por fim podemos concluir que o *plugin UA 1176 CLASSIC LIMITER*, gera um resultado muito próximo ao de seu equipamento base, o compressor *Universal Audio LN1176*, apesar de não idêntico, tendo leves perdas para instrumentos mais agudos e um ótimo desempenho para instrumentos mais graves.

REFERÊNCIAS

[S.l.: s.n.].

AUDIO, U. **Interface do Pré-amplificador 4-710d Four-Channel Mic Pre**: Interface. Universal audio, 2023. Disponível em: <https://www.uaudio brasil.com.br/loja/analogicos/4-710d-four-channel-mic-pre/>. Acesso em: 04 de dezembro de 2023.

BAKER, B. **How delta-sigma ADCs work, Part 1**. 2011. Disponível em: <https://www.ti.com/lit/an/slyt423a/slyt423a.pdf>.

BALLOU, G.; CIAUDELLI, J.; SCHMITT, V. Microphones. **Handbook for Sound Engineers**, v. 4, p. 493–594, 2008.

BLOG-SOM-MAIOR. **A evolução da gravação e reprodução do som**. 2015. Disponível em: <https://www.som maior.com.br/noticias/a-evolucao-da-gravacao-e-reproducao-do-som/>.

BROWN, G. **Audio Dynamics 101: Compressors, Limiters, Expanders, and Gates**. 2021. Disponível em: <https://www.izotope.com/en/learn/audio-dynamics-101-compressors-limiters-expanders-and-gates.html>.

DEWESOFT. **What Is ADC Converter (Analog-to-Digital Converter)?** 2020. Disponível em: <https://dewesoft.com/daq/what-is-adc-converter>.

FRANCISCO. **A evolução dos aparelhos de som**. 2020. Disponível em: <https://blog.audioprime.com.br/2020/09/24/evolucao-dos-aparelhos-de-som/>.

HOMESTUDIORECORDINGS. **What Does an Audio Compressor Do & How Do You Use It?** 2022. Disponível em: <https://homestudiorecordings.com/what-does-an-audio-compressor-do/>.

MEDDINS, B. Introduction to digital signal processing. *In*: MEDDINS, B. (Ed.). Elsevier Ltd., 2000. cap. The basics, p. 1–15. ISBN 978-0-750-65048-9. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-075065048-9/50003-9>.

NEUMANN. **Neumann TLM 103**: Microfone condensador. Neumann, 2023. Disponível em: <https://www.neumann.com/pt-br/products/microphones/tlm-103/>. Acesso em: 04 de dezembro de 2023.

PATEL, K.; PANAHI, I. M. Frequency-based multi-band adaptive compression for hearing aid application. **Acoustical Society of America**, Seattle, Washington, v. 29, Nov 2019. Disponível em: <https://asa.scitation.org/doi/abs/10.1121/2.0001247>.

PEREZ, R. Wireless communications design handbook. *In*: PEREZ, R. (Ed.). Holanda, Amsterdã: Elsevier Inc, 1998. v. 1, cap. 6 - Noise Representations in Transponders and Multiple Access, p. 202–221. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S1874-6101\(99\)80019-2](https://doi.org/10.1016/S1874-6101(99)80019-2).

REEKIE, J. **FOCUSRITE SCARLETT 2I2 MEASUREMENTS**. 2022. Disponível em: <https://johnr.hifizine.com/2012/09/focusrite-scarlett-2i2-measurements/>.

TONG, X.; ZHU, Z.; YANG., Y. An offset cancellation technique in a switched-capacitor comparator for sar adcs. **Journal of Semiconductors**, v. 33, 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1088/1674-4926/33/1/015011>.