

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

ALLAN RODRIGUES CARVALHO

**ESTUDO DE RESPOSTA IMPULSIVA APLICADO EM SINAIS DE ÁUDIO
DE GUITARRA**

**Ilha Solteira
2025**

ALLAN RODRIGUES CARVALHO

**ESTUDO DE RESPOSTA IMPULSIVA APLICADO EM SINAIS DE ÁUDIO
DE GUITARRA**

Trabalho de Graduação apresentado à
Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira –
Unesp como parte dos requisitos para
obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Prof. Dr. Ricardo Tokio Higuti.
Orientador

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

C331e Carvalho, Allan Rodrigues.
Estudo de resposta impulsiva aplicado em sinais de áudio de guitarra / Allan Rodrigues Carvalho. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2025
59 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) -
Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira,
2025

Orientador: Ricardo Tokio Higuti

Inclui bibliografia

1. Resposta impulsiva. 2. Guitarra. 3. Amplificador. 4. Alto-falante. 5.
Convolução.

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Aos vinte e quatro dias do mês de junho do ano de dois mil e vinte e cinco, o discente **Allan Rodrigues Carvalho**, matriculado sob o nº 171053541, tendo como banca examinadora o seu orientador, o Prof. Dr. Ricardo Tokio Higuti, o Prof. Dr. Cláudio Kitano e o Mestre Luis Miguel Quispe Valencia, apresentou o Trabalho de Graduação intitulado "Estudo de Resposta Impulsiva em Aplicações de Áudio", obtendo a nota 8,5 (OITO E MEIO) e conceito APROVADO.



Prof. Dr. Ricardo Tokio Higuti
- Orientador -



Allan Rodrigues Carvalho
- Discente -



Prof. Dr. Cláudio Kitano
- Membro da Banca -



Mestre Luis Miguel Quispe Valencia
- Membro da Banca -

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço aos meus pais, Marcília e Ricardo, que sempre deram suporte em minha jornada como estudante do curso de engenharia elétrica pela UNESP, instituição de muito prestígio e que está sendo fundamental em meu desenvolvimento profissional. Também dedico gratidão à minha companheira, Gabriela que, com a parceria, me ajudou em momentos delicados e também nos processos finais do curso como estágio e escrita deste trabalho. Além de ter sido uma grande referência de estudante universitária e de profissionalismo para mim.

As amizades adquiridas em todo o processo de formação acadêmica foram fundamentais em meu crescimento pessoal e, como profissional, contribuíram para que a música estivesse ainda mais inserida em minha vida tendo como consequência a escolha do tema deste projeto.

Aos ambientes de convívio, agradeço ao Mateus que me acolheu no processo de mudança para a cidade, à república Barcana, local onde muitos relatórios foram feitos e também onde permitiu que os ensaios da banda Alcoólicos Harmônicos fossem possíveis, à república Albergue, minha casa, onde foram obtidos irmãos de convívio fundamentais para o equilíbrio entre vida acadêmica e pessoal.

O meu estabelecimento como profissional e nas relações sociais foram muito por conta da Bateria do Inferno, lugar onde a música, disciplina, profissionalismo e relações interpessoais são abordadas de modo fundamental na vida dos estudantes.

Agradeço também ao meu orientador, que apresentou conceitos de processamento digital do início do curso até a finalização, os quais estão sendo fundamentais no meu direcionamento profissional.

RESUMO

Com o objetivo de estudar e disseminar o conteúdo de processamento digital de sinais aplicados a sistemas de áudio específicos, este trabalho de graduação aborda a tecnologia da resposta impulsiva (IR) utilizada na caracterização de amplificadores de guitarra, pois, no universo da guitarra, muito se fala sobre essa tecnologia no sentido comercial e nem tanto no sentido teórico. Inicialmente, abordaram-se os conceitos de conversão analógica-digital, processo necessário para que os sinais sejam manipulados computacionalmente, e o de sistema linear invariantes no tempo (SLIT). As propriedades dos SLITs validam operações matemáticas, como a convolução, utilizadas tanto nas técnicas de aquisição de IR como também no seu uso aplicado a sinais de guitarra, de modo impor as características da resposta impulsiva de um equipamento de áudio nestes sinais. O estudo foi realizado com base', primeiramente, na análise de arquivos de IR de domínio público, apresentando os resultados da convolução desses arquivos com um sinal de varredura senoidal linear, mostrando o espectro de frequência dos sinais obtidos através de gráficos. Posteriormente, foi feita a aquisição de IR de um equipamento próprio, o procedimento de extração da resposta impulsiva do amplificador MGV30 com alto-falante Jansen de 12 polegadas utilizando algoritmos em *python*, permite pontuar a teoria envolvida em cada passo da metodologia e, assim, não só fornece ferramentas para que outros sistemas possam ser modelados, como também para que seja um ponto de partida no desenvolvimento de dispositivos capazes de substituir equipamentos pouco acessíveis e de grande dificuldade de logística em apresentações musicais como alguns amplificadores de guitarra.

Palavras-chave: Resposta impulsiva, guitarra, amplificador, alto-falante, convolução

ABSTRACT

Aiming to study and disseminate content on digital signal processing applied to specific audio systems, this undergraduate thesis explores the impulse response (IR) technology used to characterize guitar amplifiers. Within the guitar community, this technology is frequently discussed from a commercial standpoint but less from a theoretical one. The work begins by addressing the concepts of analog-to-digital conversion, essential for computational signal manipulation, and Linear Time-Invariant (LTI) systems. The properties of LTI systems validate mathematical operations like convolution, which is used both to acquire IRs and to apply them to guitar signals, thereby imprinting a device's audio characteristics onto a signal. The study was initially based on analyzing public domain IR files, convolving them with a linear sine sweep, and presenting the resulting frequency spectra in graphs. Subsequently, an IR was acquired from personal equipment. This extraction procedure, performed on an MGV30 amplifier with a 12-inch Jansen speaker using Python algorithms, highlights the theory behind each methodological step. Consequently, this work not only provides tools for modeling other systems but also serves as a foundation for developing devices that can replace inaccessible and logistically complex equipment, such as certain guitar amplifiers, in musical performances.

Keywords: Impulse response, electric guitar, amplifier, speaker, convolution.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sinal de (a) tempo contínuo e (b) tempo discreto.....	16
Figura 2 - Trem de impulsos.....	17
Figura 3 - Exemplo de 4 e 2 níveis de quantização.....	18
Figura 4 - Representação da convolução.....	20
Figura 5 - Varredura linear: a) domínio do tempo b) domínio da frequência ..	23
Figura 6 - Setup para aquisição da IR.....	25
Figura 7 - Sweep logarítmico $x(t)$	26
Figura 8 - Sweep logarítmico revertido no tempo $f(t)$	27
Figura 9 - Setup gravação	29
Figura 10 - Áudio 1: guitarra clean	30
Figura 11 - Áudio 2: guitarra distorcida.....	30
Figura 12 - Gráficos do sistema AC30: a) IR $h[n]$ no tempo b) espectrograma de $h[n]$ c) entrada $h[n]$ e saída y_n na frequência	33
Figura 13 - Gráficos do sistema Fender Twin: a) IR $h[n]$ no tempo b) espectrograma de $h[n]$ c) entrada $h[n]$ e saída y_n na frequência.....	34
Figura 14 - Saída de $y(t)$ convoluída com $f(t)$	36
Figura 15 - Espectro do sistema MGV30: a) IR $h[n]$ no tempo b) espectrograma de $h[n]$ c) entrada $h[n]$ e saída y_n na frequência.....	37
Figura 16 – Áudio 1: a) espectrograma $x[n]$ b) espectrograma $y[n]$ c) comparação $x[n]$ com $y[n]$ d) comparação $y[n]$ com ampli + mic + alto-falante	39
Figura 17 – Áudio 2: a) espectrograma $x[n]$ b) espectrograma $y[n]$ c) comparação $x[n]$ com $y[n]$ d) comparação $y[n]$ com ampli + mic + alto-falante	41

Sumário

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Motivação do trabalho	12
1.2	Objetivos	13
1.3	Estrutura do trabalho	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1	Discretização de sinais	15
2.1.1	Amostragem e teorema de Nyquist.....	16
2.1.2	Quantização.....	18
2.2	Sistemas lineares invariantes no tempo (SLIT)	19
2.3	Convolução e transformada discreta de Fourier	20
3	METODOLOGIA	22
3.1	Ferramentas de software	22
3.2	Análise comparativa das IRs com sinal conhecido	22
3.3	Extração de Resposta Impulsiva	24
3.3.1	Equipamentos e setup (configuração)	24
3.3.2	Procedimento de medição	25
3.4	Gravação dos sinais de guitarra	28
4	RESULTADOS	32
4.1	Análise de IR com <i>sweep linear</i>	32
4.2	Extração da resposta impulsiva.....	36
4.3	Análise da IR aplicado ao sinal de guitarra.....	38
5	CONCLUSÃO	44
	REFERÊNCIAS	46
	APÊNDICE A – GERADOR DA VARREDURA SENOIDAL LINEAR.....	49
	APÊNDICE B – PLOTAGEM NO DOMÍNIO DO TEMPO.....	50
	APÊNDICE C – PLOTAGEM NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA	51

APÊNDICE D – CONVOLUÇÃO FFT	52
APÊNDICE E – PLOTAGEM DE DOIS SINAIS NA FREQUÊNCIA .	53
APÊNDICE F – PLOTAGEM DO ESPECTROGRAMA	55
APÊNDICE G – GERADOR DA VARREDURA SENOIDAL LOGARÍTMICA	56
APÊNDICE H – GERADOR DO SWEEP REVERTIDO NO TEMPO COM MODULAÇÃO NA AMPLITUDE	57
APÊNDICE J – TRUNCAMENTO E NORMALIZAÇÃO	58

1 INTRODUÇÃO

A guitarra elétrica surge trazendo uma nova ideia de se reproduzir sons através de um instrumento musical, une o universo acústico com o da eletricidade, proporcionando novas formas de manifestação artística através da música e, conseqüentemente, novas sensações auditivas. Antes de a fonte sonora vir de um amplificador envolvendo uma série de processamento elétrico, o som era percebido diretamente de um violão acústico, apenas pela ressonância em seu corpo em madeira (MARTINS, 2015). Após o envolvimento da eletricidade no som do instrumento, novas variáveis surgem na propagação sonora de uma apresentação musical, e este fenômeno passa a influenciar na música alterando as formas de ondas abrindo caminho para explorar-se novas texturas sonoras.

Ao longo do tempo, esses equipamentos foram se atualizando, começando pelos amplificadores utilizando válvulas que se tornaram popular na década de 50, caminhando junto com o desenvolvimento musical da época, o rock'n roll. Fomentado por Chuck Berry e Elvis Presley, a guitarra eletrificada começou a se tornar mais popular através de suas apresentações artísticas (PRADO, 2009). Após a metade do século XX, então, a tecnologia em torno do som de guitarra e da música não parou de evoluir. Figuras como Leo Fender e Les Paul são fundamentais nesse processo; o primeiro, com a criação da *stratocaster*, e o segundo, ao desenvolver a guitarra que leva seu nome e ser pioneiro nas técnicas de gravação multipista (CASTRO, 2007). Um dos artistas que consagrou o uso dos recursos tecnológicos em prol de sua arte foi Jimi Hendrix, ele explorou efeitos como *fuzz* e *wah-wah* de uma forma inovadora para a época, fazendo com que tais efeitos fossem popularizados. Além dele, vários outros artistas se destacaram no meio musical, principalmente entre os guitarristas, exaltando os equipamentos que utilizavam como suporte à sua arte. Brian May (Queen), guitarrista que, diga-se de passagem, até construiu sua própria guitarra (JUDAR, 2003) e Keith Richards (Rolling Stones), por exemplo, contribuíram para que os amplificadores Vox AC30 (BOSSO, 2012) e Fender Twin Reverb (HOCKEY, 2025), respectivamente, fossem considerados referência de timbre e características de som de guitarra.

Já em uma outra era do desenvolvimento tecnológico, a partir da década de 90, os equipamentos de áudio deixam de ser exclusivamente analógicos e passam a ter alternativas digitais, surgindo novas possibilidades de sons pela facilidade em

manipular e processar sinais de áudio (ROCHA, 2011). Para os guitarristas, profissionais ou não, essa evolução foi mais importante para que características clássicas de sons de guitarra, até então só acessíveis para grandes estúdios, artistas e gravadoras com grande poder aquisitivo, fossem democratizadas.

Segundo Castro (2007), a “guitarra elétrica” diz respeito a um conjunto de tecnologias envolvidas desde a vibração das cordas até sua reprodução sonora, ou seja, guitarra + pedais de efeito + amplificador + alto-falante e é de extrema importância levar em consideração que o musicista, o qual gera essas vibrações através de sua intenção e expressividade artística, está inserido em um contexto social, histórico, político e econômico. Conter e Gularte (2021) traz alguns relatos de guitarristas independentes os quais todos apresentam algum caso de limitação de timbre relacionado a questões financeiras e logísticas, além de mostrar a preocupação e a importância dos equipamentos na construção da identidade artística. Logo, é imprescindível que a tecnologia relacionada a arte da guitarra, a qual tem grande influência na caracterização do artista, seja desenvolvida no sentido de tornar mais acessível para que a prática musical não fique retida nas mãos de poucos.

Seguindo nessa direção, depara-se com a tecnologia de *impulse response* (IR) a qual, inicialmente, tem função de caracterizar sons de locais acusticamente agradáveis que ofereçam reverberações específicas, mas que também pode caracterizar sons de amplificadores de guitarra. Basicamente seu funcionamento consiste em capturar o comportamento acústico de um sistema de áudio através de sua resposta a um impulso, e então, gravar essa resposta em um arquivo comumente chamado de IR para que seja usado de “carimbo” em um sinal de guitarra posteriormente, sem que seja necessária a aquisição desse sistema. E dentre as várias tecnologias já desenvolvidas para simular os famigerados timbres clássicos, o uso de IR traz uma abordagem relativamente simples e barata oferecendo bons resultados.

1.1 Motivação do trabalho

No universo fonográfico encontram-se artistas e técnicos independentes buscando a melhor qualidade em suas apresentações e criações artísticas, e a dificuldade de logística e custo traz um desafio para garantir essa qualidade, principalmente para aqueles que não têm recursos financeiros e educativos

suficientes para adquirir equipamentos do mercado ou para contribuir com o desenvolvimento de opções mais baratas. A motivação deste trabalho está em torno de apresentar um estudo objetivo pontuando os conceitos teóricos envolvidos no processamento de sinais de áudio digital, mais especificamente aplicado na reprodução de timbres e características de amplificadores tidos como referência no contexto de apresentações musicais que utilizam guitarra e, até, tendo a possibilidade de expandir para outros instrumentos como contrabaixo e violão. Assim, este trabalho deve trazer informações sobre os principais conceitos em torno do uso de resposta impulsiva aplicada ao sinal de guitarra, desde sua aquisição até o processo de convolução com o sinal do instrumento, de forma democrática. Possibilitando até ser um ponto de partida para novos aprimoramentos e, principalmente, no desenvolvimento de dispositivos capazes de realizar este processamento. A ideia é concentrar informações sobre processamento digital de sinais voltados para essa aplicação, evidenciando as principais referências sobre o tema, e contribuir na melhoria do suporte tecnológico à arte.

1.2 Objetivos

Estudar a utilização da resposta impulsiva de sistemas de áudio considerados como referência de timbre aplicado a sinais de instrumentos musicais, mais especificamente da guitarra, através do conceito de convolução.

1.3 Estrutura do trabalho

Após a apresentação do contexto de aplicação da tecnologia no meio musical em relação ao uso de instrumentos musicais como guitarra, será apresentada a fundamentação teórica em torno do trabalho no capítulo 2, apresentando de forma objetiva os conceitos que permitem a manipulação de sinais de áudio por processamento computacional, então, inicia-se abordando o processo de transformar o sinal de tempo contínuo para tempo discreto pontuando os principais requisitos que contribuem para a qualidade desses sinais, tais como taxa de amostragem e quantização. Já na direção de modelagem de sistemas de amplificadores de guitarra, a seção seguinte traz as propriedades dos sistemas lineares invariantes no tempo as quais permitem o uso da resposta impulsiva para reproduzir as características desses

sistemas através do processamento de convolução. No capítulo 3 é mostrada a metodologia para se extrair a resposta impulsiva do amplificador MGV30 indicando as ferramentas, equipamentos e as técnicas utilizadas para tal feito, além da forma que serão feitas as análises dos sinais. Por fim, os resultados de todo o procedimento, é mostrado no capítulo 4, mostrando os gráficos de sinais de algumas IRs de amplificadores conhecidos de domínio público e da IR extraída.

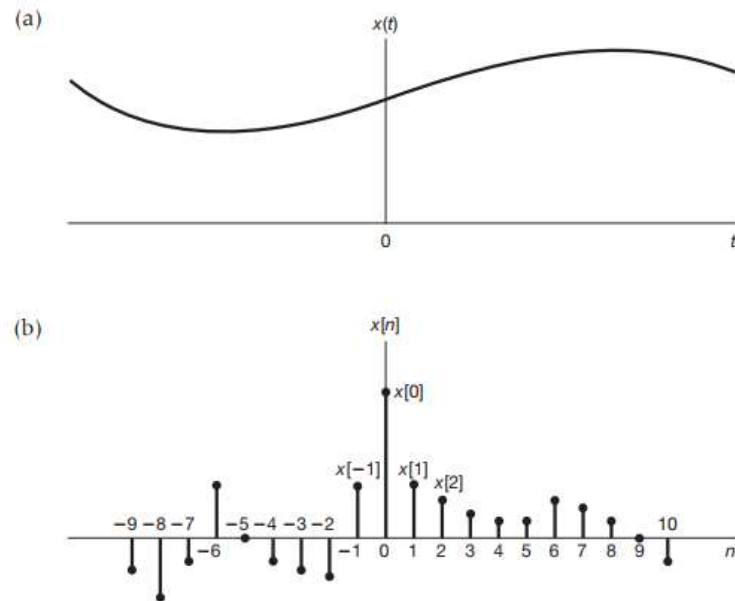
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Discretização de sinais

A conversão entre sinais analógicos e digitais é essencial para permitir que sistemas digitais interajam com o mundo físico. A digitalização possibilita a manipulação de sinais de tempo contínuo em equipamentos digitais como computadores, microcontroladores e sistemas de comunicação.

Os sinais analógicos, por sua natureza, têm variações contínuas no tempo e na amplitude. No entanto, sistemas digitais operam com dados discretos. Portanto, para que um sinal analógico possa ser processado digitalmente, ele deve passar por um processo de discretização, que compreende duas etapas principais: a amostragem, que trata da discretização no tempo, e a quantização, que trata da discretização no valor da amplitude. A amostragem transforma o sinal de tempo contínuo em um conjunto de valores em instantes definidos, enquanto que a quantização mapeia esses valores para um conjunto finito de níveis possíveis de amplitudes, ou seja, é como se fossem fotografados os pontos de um sinal contínuo, o tempo entre essas fotos diz respeito à frequência que o sinal está sendo amostrado e, para cada amostra, a amplitude identificada é atribuída a um valor binário. A Figura 1 mostra um exemplo de dois sinais, um no tempo contínuo e outro no tempo discreto, percebe-se que em (a) o sinal possui infinitos pontos, enquanto que em (b) a quantidade de pontos é limitada.

Figura 1 - Sinal de (a) tempo contínuo e (b) tempo discreto.



Fonte: OPPENHEIM, A. V.; WILLSKY, A. S, 2010

2.1.1 Amostragem e teorema de Nyquist

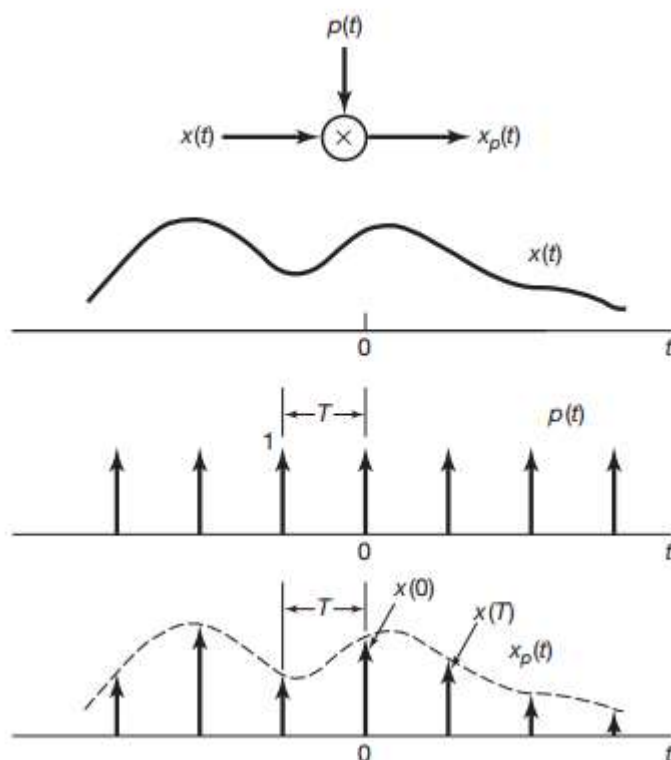
Idealmente a amostragem $x_p(t)$ de um sinal de tempo contínuo pode ser obtida multiplicando este sinal $x(t)$ por um trem de impulsos periódico $p(t)$, como sendo a função de amostragem, e T o período de amostragem. Em (1) apresenta-se matematicamente esta operação:

$$p(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT)$$

$$x_p(t) = x(t) \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT) \quad (1)$$

A Figura 2 mostra como, ao aplicar o trem de impulsos, é possível extrair os pontos amostrados do sinal de tempo contínuo.

Figura 2 - Trem de impulsos.



Fonte: OPPENHEIM, A. V.; WILLSKY, A. S, 2010

Este processo é chamado de amostragem por impulsos e, a partir dele, as manipulações e operações com sinais se tornam palpáveis.

Para que essa aquisição do sinal seja feita corretamente, deve-se respeitar o teorema de Nyquist-Shannon o qual sugere que, para reconstruir o sinal original de tempo contínuo com banda limitada, ou seja, com uma frequência máxima definida ($f_{máx}$), a frequência de amostragem (f_s) deve ser maior que o dobro da máxima frequência do sinal, como mostra em (2):

$$f_s > 2 \cdot f_{máx} \quad (2)$$

Caso essa condição não seja atendida o sinal sofrerá uma sobreposição de frequências. Esse fenômeno é chamado de *aliasing*, o que causa danos irreversíveis ao conteúdo do sinal em questão. Somado a isso, no processo de conversão AD, usualmente é aplicado um *filtro-antialiasing* no sinal de tempo contínuo antes que seja discretizado, o que irá garantir que a frequência máxima esteja devidamente definida (OPPENHEIM, A. V.; WILLSKY, A. S, 2010).

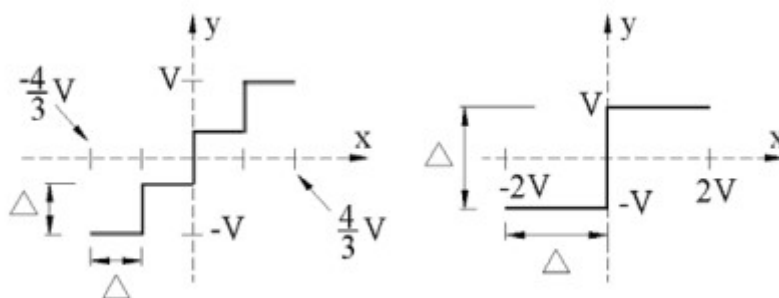
No caso de amostragem de um sinal de áudio, o intervalo de frequência é baseado na capacidade auditiva humana, ou seja, 20Hz a 20kHz, logo, a frequência

máxima será de 20kHz e, de acordo com o teorema, a frequência de amostragem deve ser maior que 40kHz. A tecnologia em CDs (*compact disc*) utiliza uma taxa de amostragem de 44.1kHz sendo este parâmetro ainda utilizado em conversões A/D a qual baseou-se este trabalho.

2.1.2 Quantização

Enquanto a amostragem faz a aquisição do sinal no tempo, a quantização é o processo que atribui cada ponto amostrado do sinal analógico a um valor binário que representa a amplitude, ou seja, cada valor de amplitude do sinal contínuo tem seu valor correspondente de modo digital em bits e, assim, é possível manipular este sinal a partir de operações computacionais. Conforme abordado por Christian Gonçalves Herrera (2004) o nível de quantização Q e a quantidade de bits de resolução N se relacionam da seguinte forma: $N = \log_2(Q)$. Em CD, por exemplo, a resolução utilizada é de 16 bits, logo, tem-se 2^{16} possibilidades de se representar a amplitude do sinal analógico. Como este processo acontece de modo discretizado, pode-se definir os espaços entre dois pontos amostrados como sendo $\Delta = 2V/(Q - 1)$, onde V é a amplitude máxima de um sinal de tempo contínuo, logo Δ será o intervalo mínimo possível de ser amostrado (Figura 3).

Figura 3 - Exemplo de 4 e 2 níveis de quantização.



Fonte: HERRERA C. (2004)

Assim, os valores de amplitude que estiverem entre esses espaços serão representados digitalmente com um valor binário acima ou abaixo deste ponto. Logo, quanto maior for a resolução em bits, maior será a qualidade deste áudio e, no caso de conversão AD/DA para sinais de guitarra, é importante preservar o máximo de

informações do seu sinal original. No caso deste trabalho, será utilizada a resolução de 24 bits, isso significa que terão 2^{24} valores possíveis de amplitude a serem representados de forma digital.

2.2 Sistemas lineares invariantes no tempo (SLIT)

Os sistemas SLIT possuem duas características fundamentais que permitem as operações de modelagem de sistemas de guitarra, sendo que tais conceitos são abordados por Oppenheim, A. V.; Willsky, A. S, (2010):

- Invariância no tempo: o sistema será invariante no tempo se seu comportamento e características forem fixos ao longo do tempo. Sendo uma entrada de tempo discreto $x[n]$ e $y[n]$ sua saída, então para $x[n - n_0]$ a saída deve ser $y[n - n_0]$.
- Linearidade: um sistema é dito linear se obedecer a propriedade de superposição, isto é, se a entrada consistir em uma soma ponderada de sinais, a saída deverá ser a soma ponderada da resposta para cada sinal. Ou seja, se a entrada $x_1(t)$ e $x_2(t)$ gerar uma resposta $y_1(t)$ e $y_2(t)$, respectivamente, então $ax_1(t) + bx_2(t) = ay_1(t) + by_2(t)$.

A propriedade de superposição permite que, se uma entrada puder ser representada linearmente, tal como a soma ponderada de impulsos $\delta[n]$ deslocados no tempo, a saída pode ser analisada em relação à resposta desse sistema à soma de impulsos inseridos. Ou seja, sabendo que sinais podem ser representados como uma combinação linear de impulsos deslocados no tempo (amostragem por trem de impulsos, por exemplo), isto é, uma soma de impulsos, conforme (3):

$$x[n] = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} x[k]\delta[n - k] \quad (3)$$

Então, sendo a entrada de um sistema, um impulso $\delta[n]$, a sua saída será a resposta desse impulso $h[n]$, e, pelas propriedades do SLIT pode-se dizer que, para a entrada do sinal $x[k]\delta[n - k]$ no sistema, a saída resultante será $x[k]h[n - k]$. Logo, para a entrada $x[n]$ correspondente à (3) a saída gerada será $y[n]$, correspondente à (4), a qual é chamada de soma de convolução:

$$y[n] = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} x[k]h[n - k] \quad (4)$$

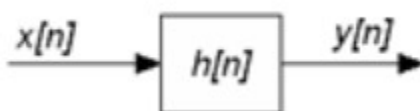
Tal equação também pode ser expressa por $y[n] = x[n] * h[n]$, onde “*” indica convolução.

Concluindo, para um SLIT, ao aplicar um impulso na entrada, sua resposta $h[n]$ será conhecida e o sistema poderá ser caracterizado. Portanto, ao aplicar qualquer outro sinal de entrada, a saída será prevista de acordo com a resposta impulsiva desse sistema. Esse conceito é crucial no processo de extração da resposta impulsiva de um sistema de áudio.

2.3 Convolução e transformada discreta de Fourier

Após a extração da resposta impulsiva de um sistema $h[n]$, para que um sinal de entrada $x[n]$ seja modelado com as características desse sistema, ocorre uma convolução entre esses sinais gerando a saída $y[n]$. Esse processo pode ser representado na Figura 4, onde o sinal de entrada interage com o sistema gerando uma saída.

Figura 4 - Sinal de entrada interagindo com uma resposta impulsiva.



Fonte: SOVIERZOSKI, 2011

Levando em consideração (4), pode-se dizer que, a operação de convolução para um sinal com uma resposta impulsiva relativamente longa será trabalhosa e demorada computacionalmente. Sendo assim, torna-se inviável o processamento de convolução direta no tempo para sistemas de áudio em tempo real o qual necessita da menor latência possível (ZÖLZER, 2011)

A solução para essa limitação está na transformada de Fourier, pois, pelo teorema da convolução, sabe-se que a convolução no domínio do tempo corresponde à multiplicação no domínio da frequência, o que torna a operação algébrica mais simples e, conseqüentemente, mais eficiente computacionalmente (OPPENHEIM, A. V.; WILLSKY, A. S, 2010).

Logo, o conceito que permite essa abordagem no domínio da frequência para um sinal discretizado é o da transformada discreta de Fourier (DFT), mostrado em (5):

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j\left(\frac{2\pi}{N}\right)k n} \quad (5)$$

A partir dessa expressão, as grandezas de frequência e de tempo estarão discretizadas, permitindo que o computador possa lidar matematicamente com os sinais. Neste caso, $X(k)$ corresponde à magnitude da frequência para o ponto k , $x[n]$ o valor do sinal no instante n , N o número total de amostras do sinal e $e^{-j\left(\frac{2\pi}{N}\right)k n}$ diz respeito às componentes de frequência que compõe o sinal a partir da transformada de Fourier.

Na prática, essas transformações, necessárias para o processamento dos sinais, são realizadas através do algoritmo denominado por FFT (*Fast Fourier Transform*) (OPPENHEIM, A. V.; WILLSKY, A. S, 2010). Então, os passos para que a convolução de sinais seja feita de forma rápida por processadores são:

1. Adição de zeros: para que uma convolução periódica de dois sinais $x[n]$ e $h[n]$ de comprimento L e M , respectivamente, seja igual à convolução linear, é necessário que o comprimento resultante da saída $y[n]$ seja $P = L + M - 1$, logo, para que os comprimentos dos sinais satisfaçam essa condição, são adicionados zeros nestes sinais, garantindo que os comprimentos estejam corretos.
2. Cálculo da FFT: os sinais serão transformados para o domínio da frequência.
3. Multiplicação: conforme abordado anteriormente, a convolução no domínio do tempo corresponde à multiplicação no domínio da frequência.
4. Cálculo da IFFT: o sinal resultante de saída retorna ao domínio do tempo.

3 METODOLOGIA

3.1 Ferramentas de software

Para a manipulação, análise e visualização dos sinais de áudio, foram utilizadas as seguintes ferramentas e bibliotecas da linguagem de programação *Python*:

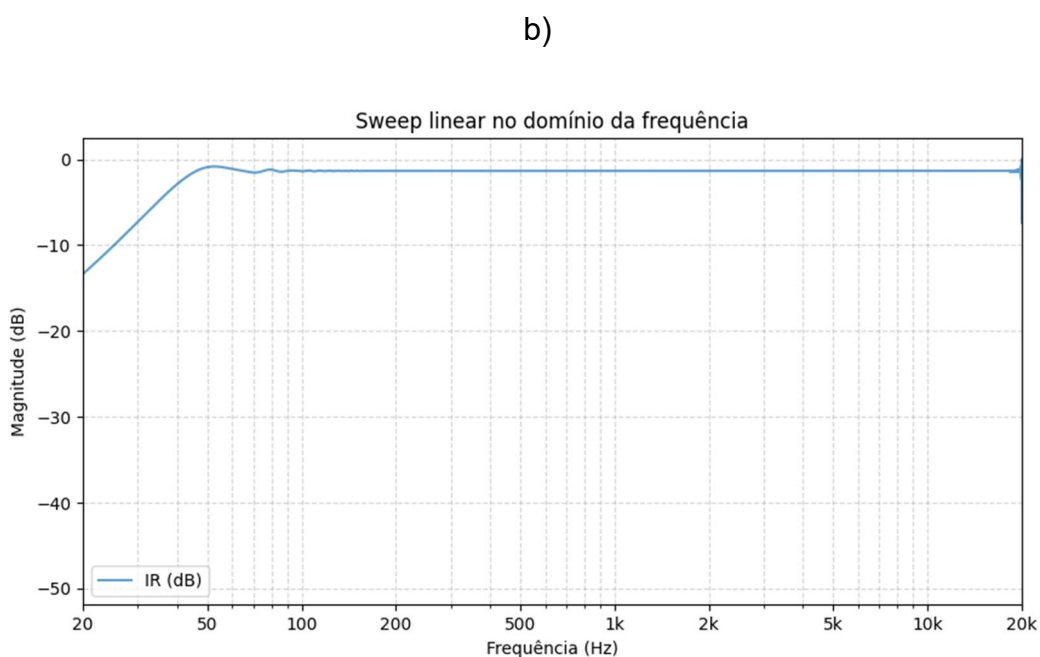
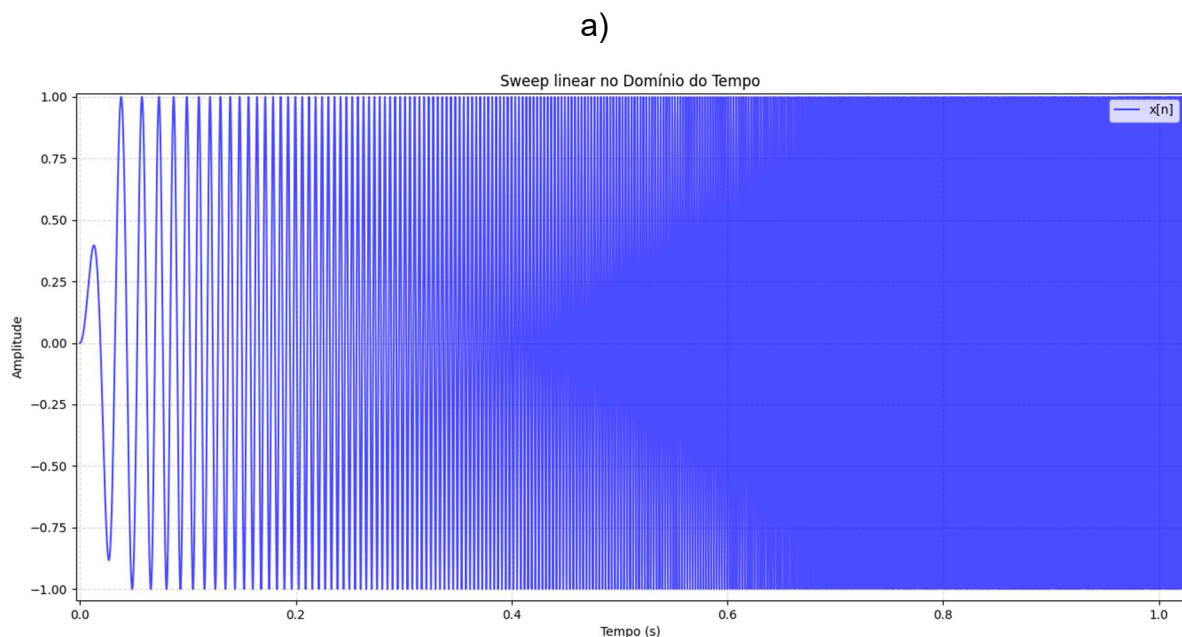
- Librosa: para carregamento e análise de arquivos de áudio.
- NumPy e SciPy: para operações matemáticas e de processamento de sinal, incluindo a convolução por FFT.
- Matplotlib: para a geração dos gráficos e espectrogramas.
- SoundFile: para o salvamento dos arquivos de áudio no formato WAV.

3.2 Análise comparativa das IRs com sinal conhecido

A primeira etapa da análise consistiu em demonstrar o efeito da convolução em um sinal de teste com características conhecidas tal como a varredura senoidal linear.

- Sinal de entrada: Foi utilizado um sinal de varredura senoidal de frequências linear (*sweep linear*) $x[n]$, gerado através do *python* (Apêndice A), com duração de 30 segundos, varrendo de 50 Hz a 20 kHz. Este sinal foi escolhido por possuir um espectro de magnitude plano, permitindo que o espectro do sinal de saída reflita as características da IR em questão, de modo a oferecer uma visualização mais “limpa”. Um trecho deste sinal é mostrado no domínio do tempo (Figura 5(a)) e também, no domínio da frequência (Figura 5(b)), de modo a visualizar seu comportamento. Os códigos em *python* utilizados para plotar os gráficos no tempo e na frequência são apresentados nos Apêndices B e C, respectivamente.

Figura 5 - Varredura linear: a) domínio do tempo b) domínio da frequência.



Fonte: autoria própria

- Respostas Impulsivas (IRs): Foram utilizadas IRs de domínio público representando sistemas de amplificação de guitarra clássicos, como o Vox AC30 e o Fender Twin. Tais equipamentos foram escolhidos por serem referências de timbres no universo da guitarra (ZÖLZER, 2011).
- Processo: Cada IR foi convoluída com o *sweep* linear (Apêndice D). Os espectros de frequência da IR original ($h[n]$) e do sinal de saída ($y[n]$) foram

então normalizados individualmente e plotados no mesmo gráfico para uma comparação visual do timbre (Apêndice E). Para complementar a análise, os espectrogramas das IRs foram plotados (Apêndice F) permitindo uma visualização dos sinais nas três dimensões: tempo, frequência e magnitude.

3.3 Extração de Resposta Impulsiva

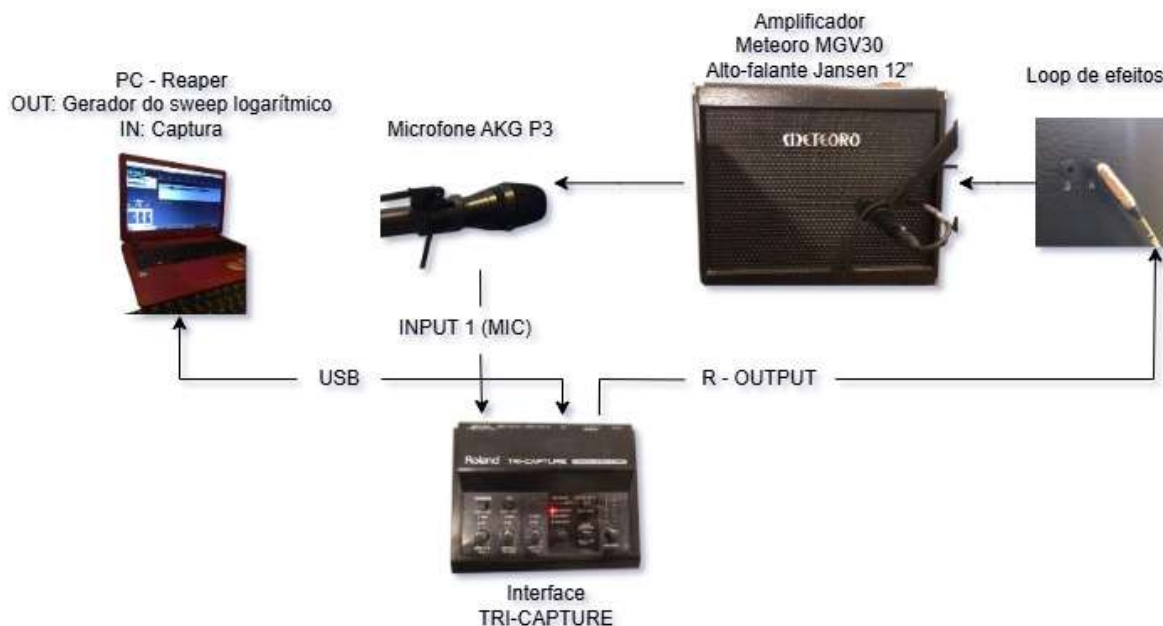
A seguir será mostrada a metodologia envolvida na extração de uma resposta impulsiva de um determinado sistema de áudio composto por amplificador, gabinete com alto-falante e microfone.

3.3.1 Equipamentos e setup (configuração)

A configuração para a aquisição da IR, (Figura 6), foi composta pelos seguintes equipamentos:

- Interface de áudio: Roland TRI-CAPTURE, responsável pela conversão D/A, A/D e comunicação com computador.
- Amplificador: Meteoro MGV30.
- Gabinete e Alto-falante: Gabinete com um alto-falante Jansen de 12 polegadas, neste caso trata-se de um combo, ou seja, o amplificador e gabinete com alto-falante se encontram na mesma estrutura.
- Microfone: AKG P3 S, microfone dinâmico posicionado em frente ao alto-falante (AKG, 2025).
- Software (DAW): Reaper, utilizado para gerar o sinal de excitação e gravar a resposta do sistema.

Figura 6 - Setup para aquisição da IR.



Fonte: autoria própria

Todos os processos foram realizados com uma taxa de amostragem de 44100 Hz e resolução de 24 bits.

3.3.2 Procedimento de medição

O método utilizado para a extração da IR foi através da aplicação do sinal de varredura senoidal logarítmica. Segundo Müller e Massarani (2001), este é o melhor método para a aquisição da resposta impulsiva de um sistema de áudio. A técnica é utilizada também para captar respostas acústicas de ambientes em relação à reverberação Farina (2007). Basicamente seu funcionamento consiste em aplicar um sinal de entrada $x(t)$ em um SLIT $h(t)$, o qual contém as características deste sistema, resultando na saída $y(t)$, sendo que isso pode ser representado pela seguinte expressão $y(t) = x(t) * h(t)$. Para extrair somente a resposta impulsiva, o processo inverso é aplicado, ou seja, uma deconvolução. Para que isso seja feito é necessário que um dos sinais seja invertido, no caso, como deseja-se extrair apenas $h(t)$ deve-se inverter o sinal de entrada $x(t)$ e aplicar uma convolução mostrada em (6) o que resulta em (7) (HAYKIN, S., VEEN, B. V., 2001):

$$y(t) * x^{-1}(t) = (x(t) * h(t)) * x^{-1}(t) \quad (6)$$

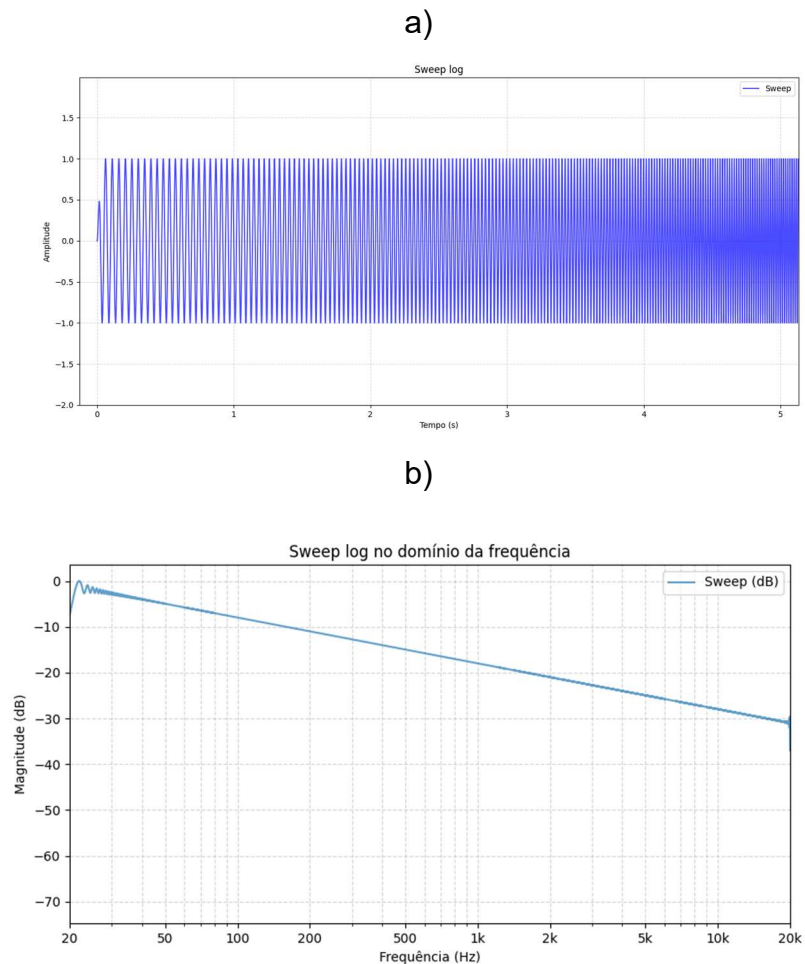
$$y(t) * x^{-1}(t) = h(t) * \delta(t)$$

$$y(t) * x^{-1}(t) = h(t) \quad (7)$$

Essas operações são possíveis por conta das propriedades dos sistemas lineares invariantes no tempo. Na metodologia adiante $x^{-1}(t)$ será indicado como $f(t)$.

1. Geração do Sinal de Excitação: Um *sweep* logarítmico ($x(t)$), varrendo de 20 Hz a 20 kHz em 30 segundos, foi gerado através do *python* (Apêndice G) e reproduzido pela saída da interface de áudio a qual converte o sinal de digital para analógico. A Figura 7(a) apresenta um trecho do sinal no tempo e (b) na frequência. Este sinal é responsável por excitar as frequências do sistema de áudio.

Figura 7 - *Sweep* logarítmico $x(t)$: a) tempo e b) frequência.



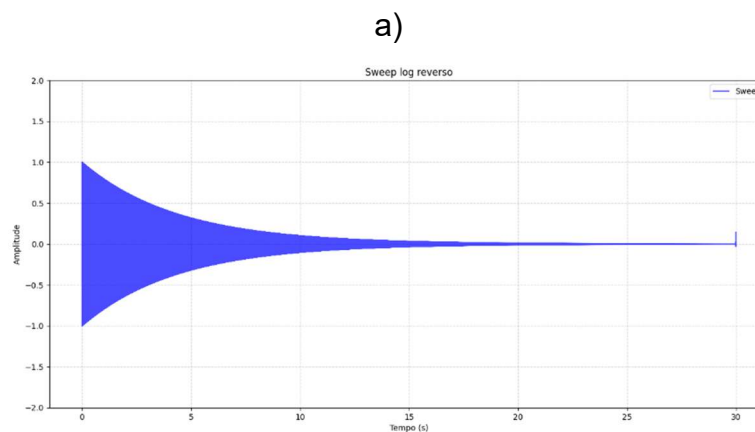
Fonte: autoria própria

2. Aplicação do Sinal: O sinal analógico então, passa pelo *loop* de efeitos do Meteoro MGV30, o que significa que o áudio entrará direto no estágio de

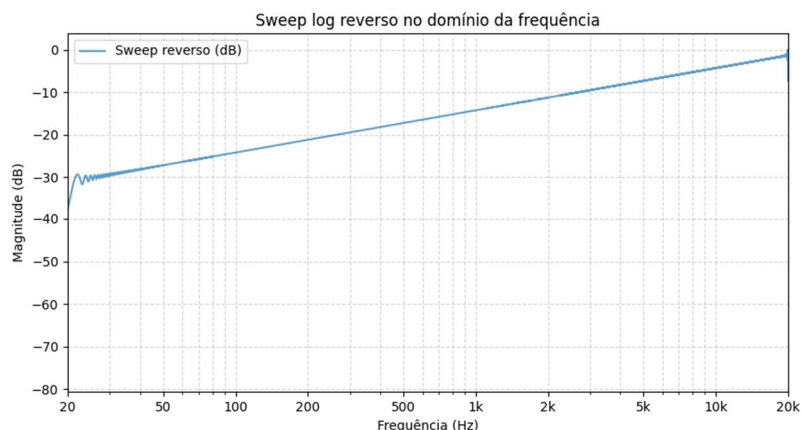
potência do amplificador, pulando a pré-amplificação. Isto se dá pelo desejo de adquirir uma resposta mais “pura”, sem conter informações de equalização e distorção. Além disso, esta parte do processamento do sinal é um campo vasto com muitas possibilidades analógicas e digitais de baixo custo no mercado e não é o objetivo do trabalho abordar esta etapa.

3. Captura da Resposta: O som emitido pelo alto-falante foi capturado pelo microfone, enviado para a entrada da interface e gravado como um novo arquivo de áudio ($y[n]$) através do *reaper*.
4. Gerador do filtro inverso: A etapa de deconvolução, como já dito, necessita que o sinal de excitação $x(t)$ seja invertido no tempo. Além disso, sua amplitude deve ser modulada (Apêndice H), ou seja, enquanto o sinal original apresenta uma queda de -3dB por oitava, o sinal invertido deve apresentar +3dB por oitava (FARINA, 2007). Para que isso ocorra, uma modulação na amplitude é aplicada para compensar o comportamento natural de um *sweep* logarítmico, o qual “gasta” mais tempo nas baixas frequências. Com isso, tem-se o sinal resultante $f(t)$ na Figura 8(a) sendo mostrado no tempo e (b) na frequência.

Figura 8 - Sweep logarítmico revertido no tempo $f(t)$: a) tempo e b) frequência.



b)



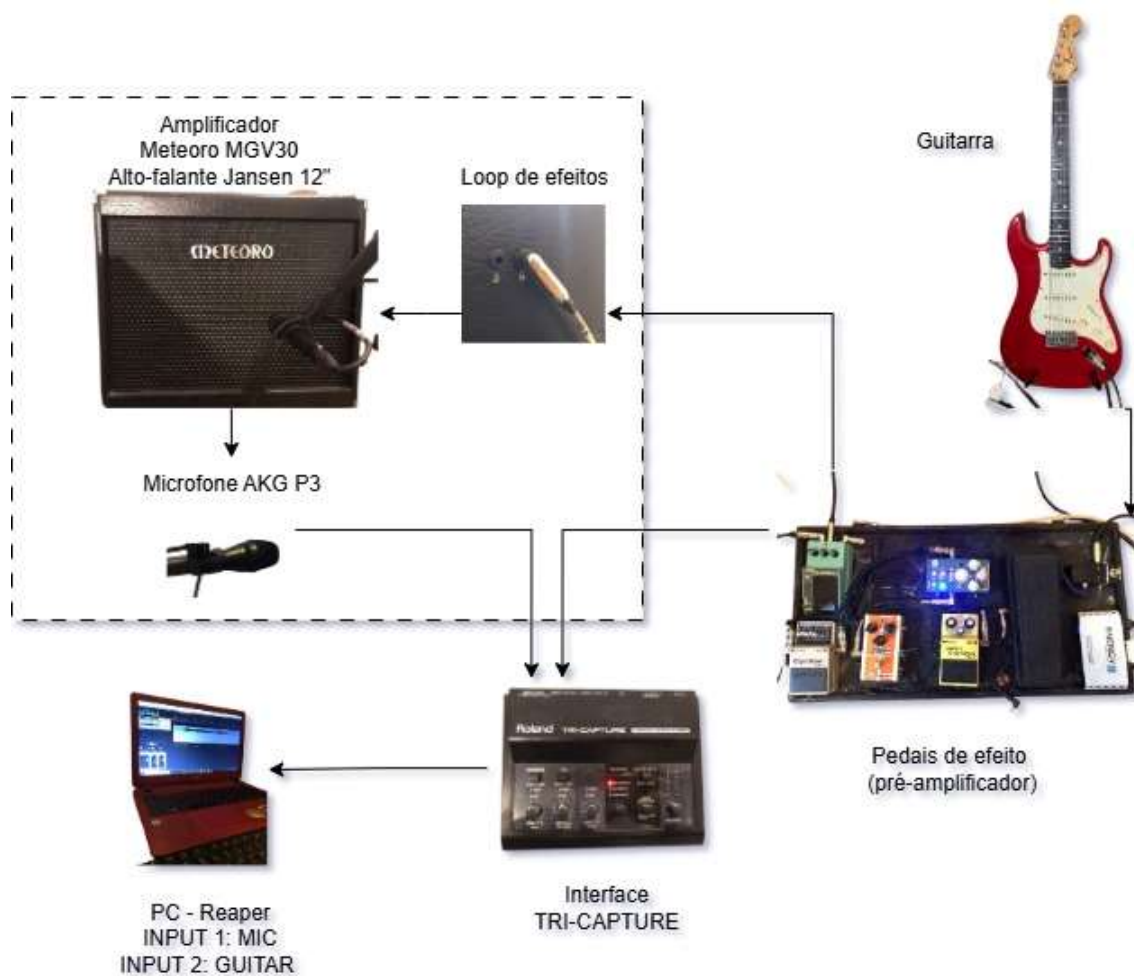
Fonte: autoria própria

5. Processo de Deconvolução: Para esta operação o sinal gravado $y(t)$ foi convoluído com um filtro inverso $f(t)$. Isto foi feito utilizando a *Fast Fourier Transform* (FFT) (Apêndice D). O resultado é uma resposta impulsiva longa, com o impulso principal ocorrendo em um atraso equivalente à duração do *sweep*, neste caso, 30 segundos.
6. Truncamento e Normalização: A resposta impulsiva longa foi truncada em um tempo de 200 ms a partir do impulso principal para capturar seu decaimento característico. O arquivo final foi normalizado para que seu pico atingisse 0 dB e salvo no formato WAV (Apêndice J).

3.4 Gravação dos sinais de guitarra

A gravação foi feita através da DAW (Digital Audio Workstation) Reaper, software utilizado para tratamento de áudio. A interface usada para capturar e converter o áudio analógico para digital foi a TRI-CAPTURE da Roland a qual se comunica com o computador via USB. No processo de gravação e reprodução utilizou-se taxa de amostragem de 44100Hz com 24 bits de resolução. A Figura 9 mostra a configuração utilizada para captura do sinal da guitarra onde, antes de chegar ao amplificador ou interface, ele passa pelos pedais de efeito sendo que o último elemento é o chorus SC10 Ibanez. Sua presença se faz necessária exclusivamente por oferecer o recurso de divisão de sinais, ou seja, permite que o mesmo sinal seja enviado em dois caminhos: amplificador e também direto para a interface.

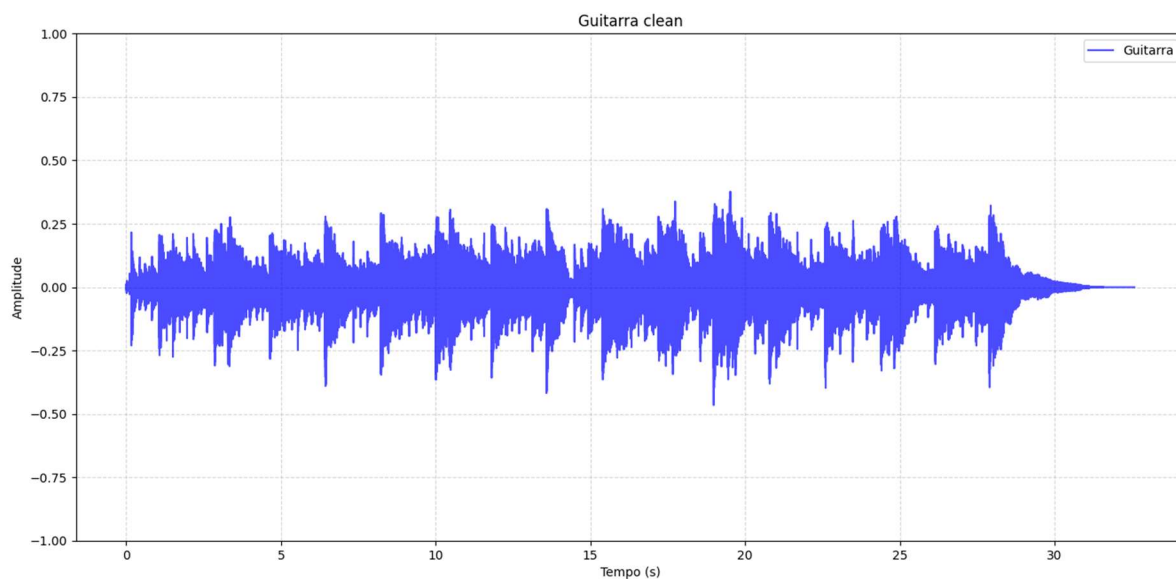
Figura 9 - Setup gravação.



Fonte: autoria própria

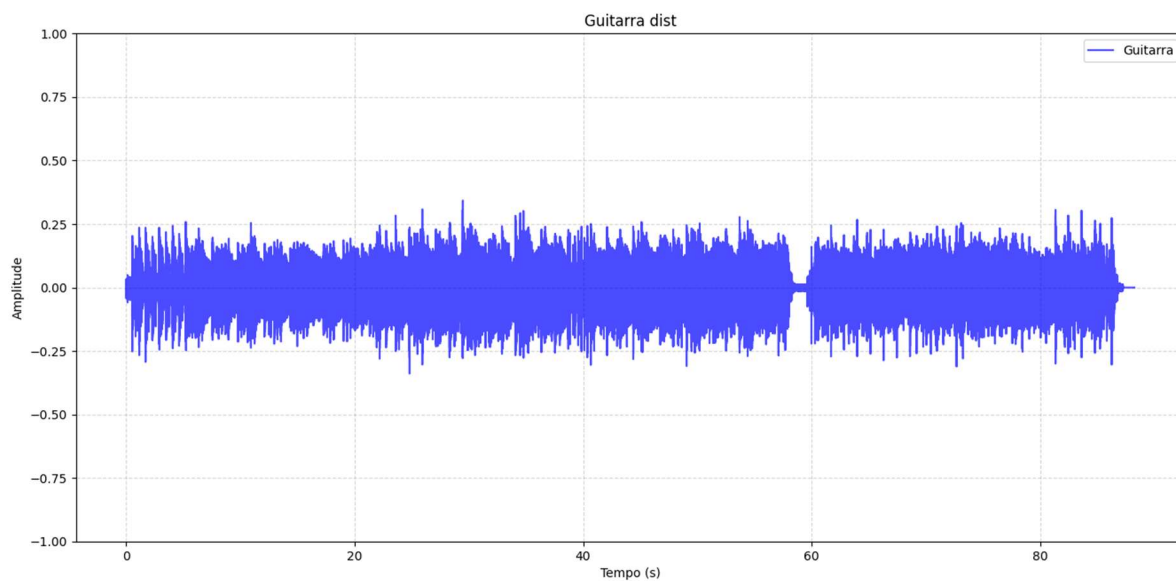
Foram feitas análises de dois áudios de guitarra: áudio 1, sendo a guitarra clean (som limpo) (Figura 10), e áudio 2, a guitarra distorcida (Figura 11).

Figura 10 - Áudio 1: guitarra clean.



Fonte: autoria própria

Figura 11 - Áudio 2: guitarra distorcida.



Fonte: autoria própria

No segundo áudio a análise foi dedicada ao som da guitarra distorcido pelo fato de este recurso sempre ter sido muito utilizado por guitarristas consagrados, tais como Jimi Hendrix, Eric Clapton, Jimy Page entre outros que atualmente o utilizam (ZÖLZER, 2011), sendo que neste caso, o pedal SD-1 da Boss foi responsável por distorcer o sinal. Qualquer outro processamento, seja analógico ou digital, desta

etapa, com intenção de preparar o timbre do instrumento aplicando o efeito de distorção já seria suficiente para a análise do sinal nessa circunstância.

4 RESULTADOS

4.1 Análise de IR com *sweep* linear

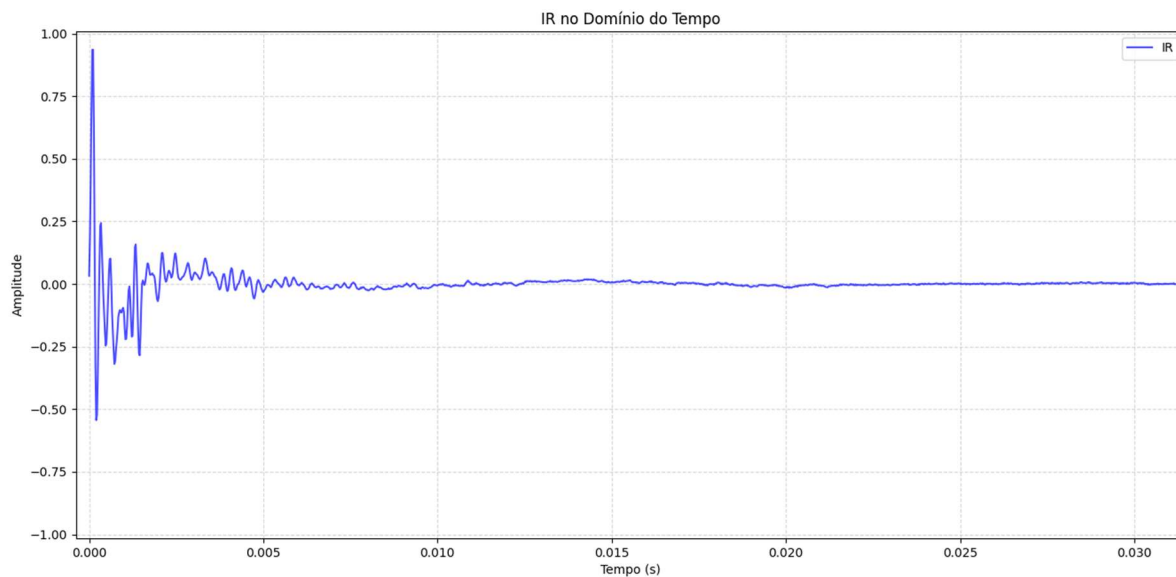
Primeiramente, para visualizar o comportamento de uma convolução no domínio do tempo de dois sinais discretizados, sendo o primeiro o que se deseja alterar $x[n]$ e o segundo a resposta impulsiva $h[n]$ de um determinado sistema, foram plotados gráficos que permitem identificar as características antes da convolução e depois dela, ou seja, o sinal de saída $y[n]$.

Com a utilização de um sinal de varredura senoidal linear identifica-se o espectro da frequência do sinal de saída $y[n]$ após a convolução com $h[n]$, refletindo o comportamento da resposta em frequências da IR.

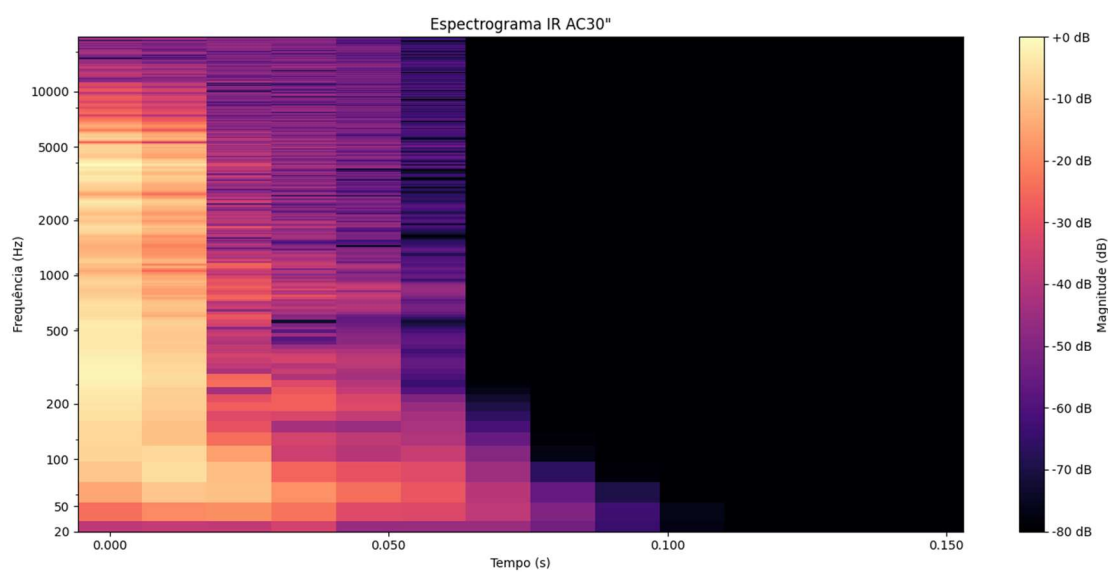
Para uma primeira análise, foram utilizadas as respostas impulsivas de alguns principais amplificadores: AC30 (Figura 12) e o Fender Twin (Figura 13). As subfiguras (a) correspondem ao sinal da IR no tempo, (b) seu espectrograma e (c) o sinal de saída $y[n]$ junto com a IR $h[n]$ para cada sistema no domínio da frequência. Uma observação importante é que cada IR representa as características lineares do sistema de áudio como um todo. Isso inclui não apenas o amplificador, mas também a influência do gabinete, do alto-falante e do microfone utilizado na captura, por isso foi feita a atribuição como sendo um sistema.

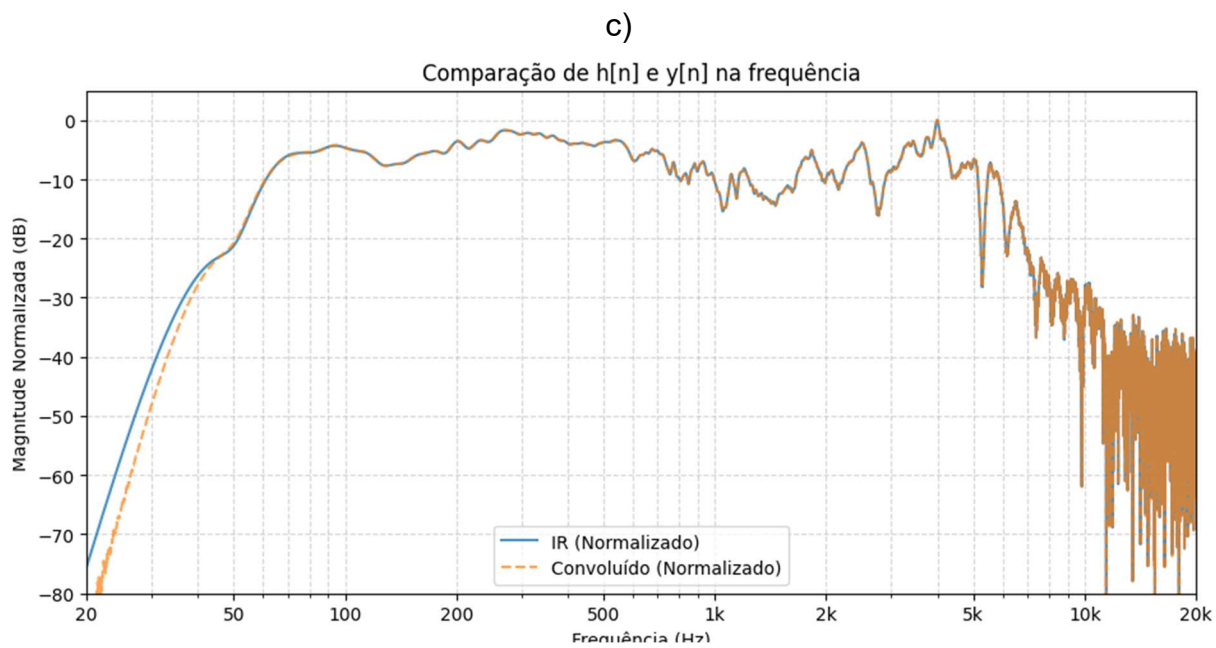
Figura 12 - Gráficos do sistema AC30: a) IR $h[n]$ no tempo b) espectrograma de $h[n]$ c) entrada $h[n]$ e saída $y[n]$ na frequência.

a)



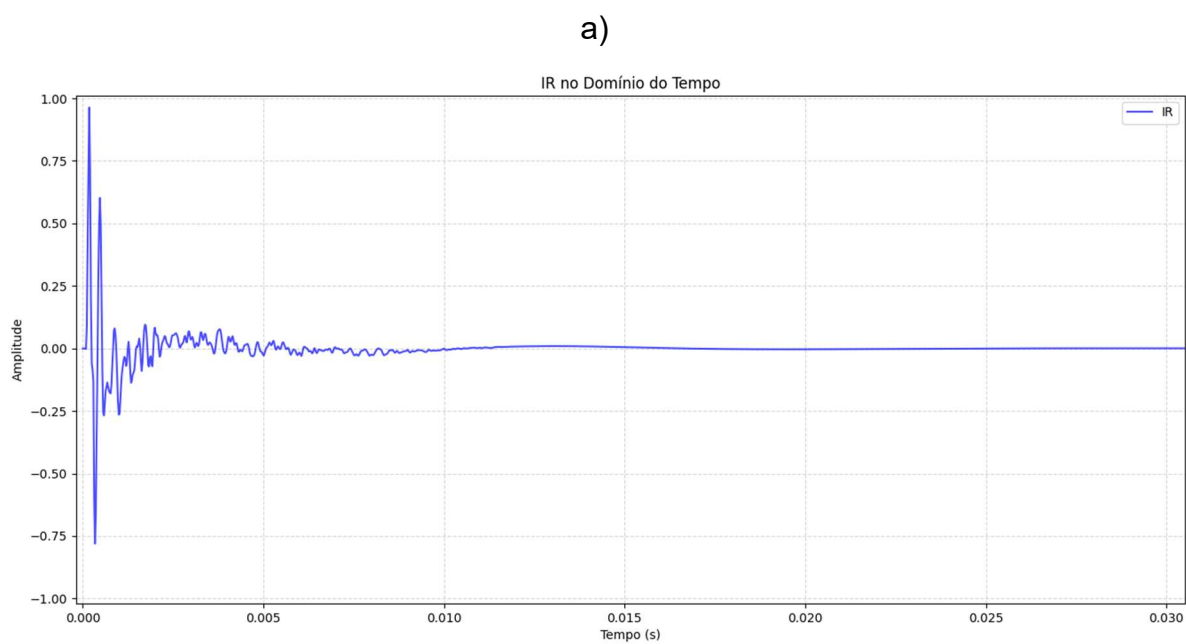
b)



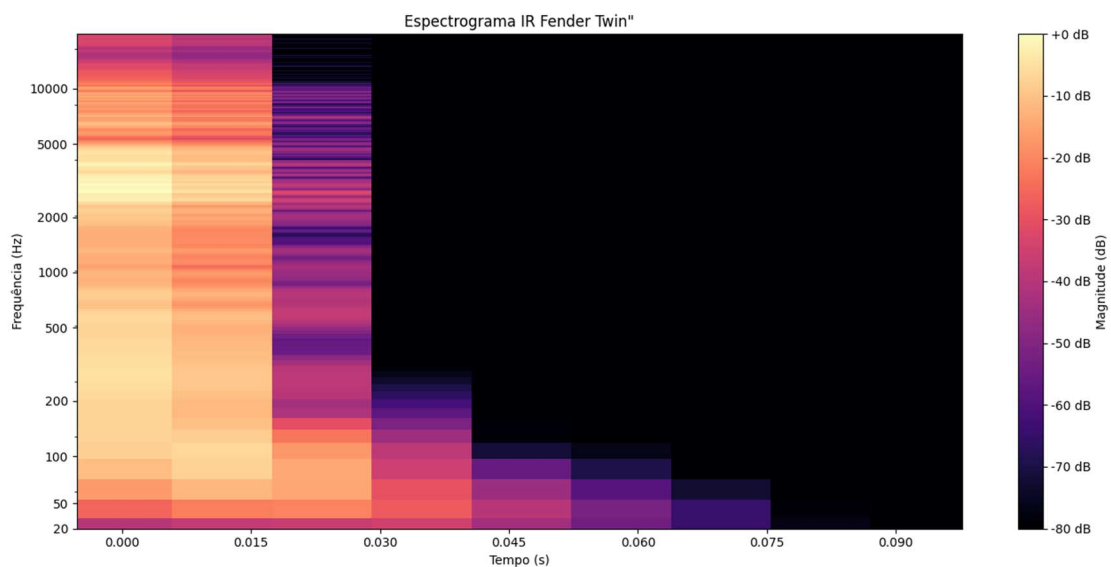


Fonte: autoria própria

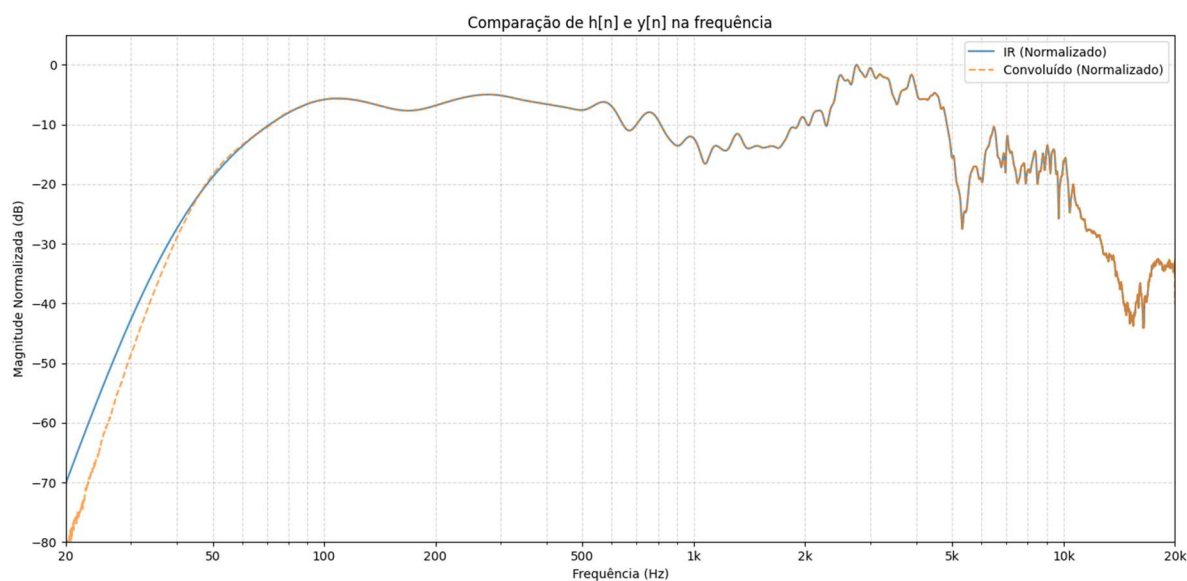
Figura 13 - Gráficos do sistema Fender Twin: a) IR $h[n]$ no tempo b) espectrograma de $h[n]$ c) entrada $h[n]$ e saída $y[n]$ na frequência.



b)



c)



Fonte: autoria própria

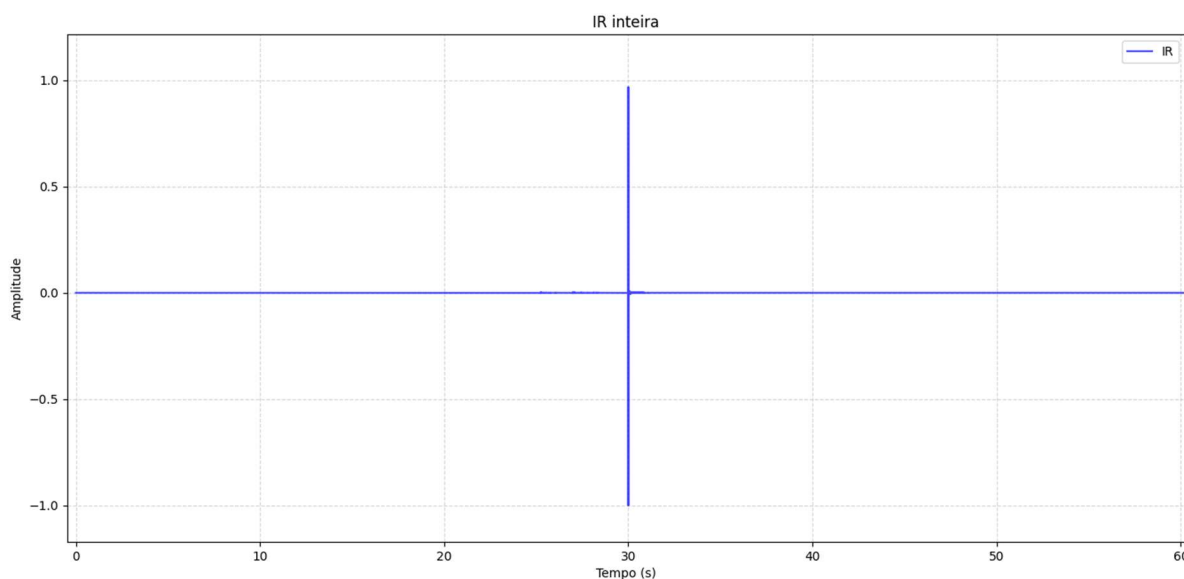
De forma objetiva, percebe-se uma diferença no espectro de cada sinal, mostrando que cada sistema tem sua particularidade, permitindo que essa característica de timbre seja utilizada dependendo do gosto subjetivo do artista.

Conforme esperado pelo teorema da convolução observa-se que a saída $y[n]$ é idêntica à resposta impulsiva $h[n]$. Tal processo acontece porque o sinal de entrada possui magnitude plana no espectro, logo, na multiplicação no domínio da frequência ($Y(f) = X(f) \cdot H(f)$) ele atua como um elemento neutro fazendo que o sinal resultante traga apenas as características de $H(f)$.

4.2 Extração da resposta impulsiva

Para uma análise mais completa, foi realizado o processo da aquisição da resposta impulsiva de um sistema de áudio de modo a mostrar todo o procedimento com detalhes. É possível visualizar o resultado do processo após a deconvolução na Figura 14.

Figura 14 - Saída de $y(t)$ convoluída com $f(t)$.



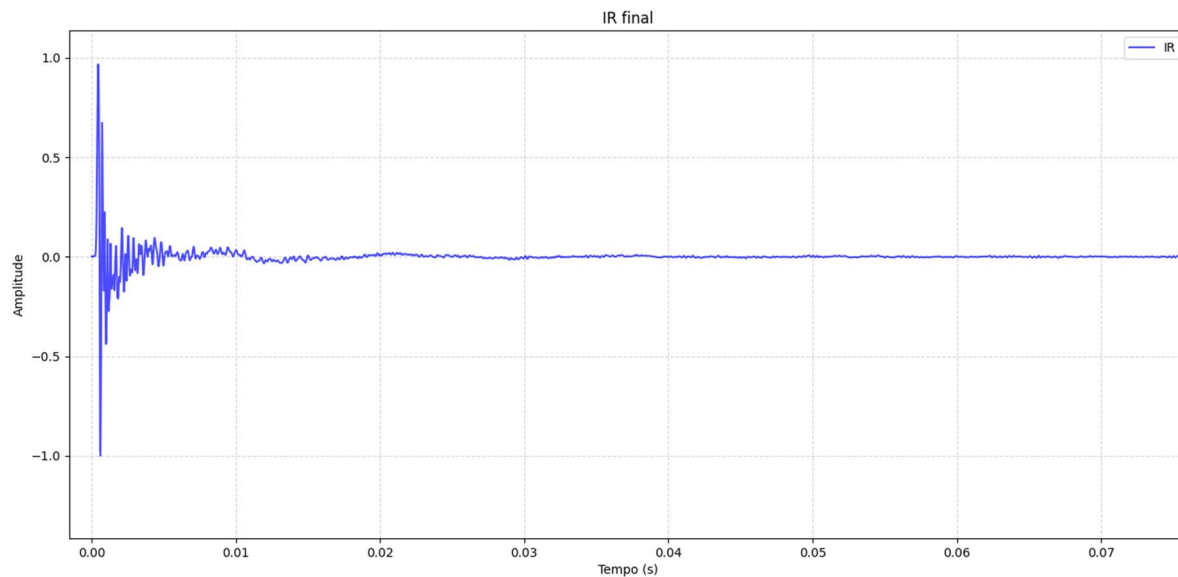
Fonte: autoria própria

Após esse processo, a IR é truncada em um tempo suficiente para se adquirir apenas o impulso inicial e seu decaimento característico (Figura 15(a)).

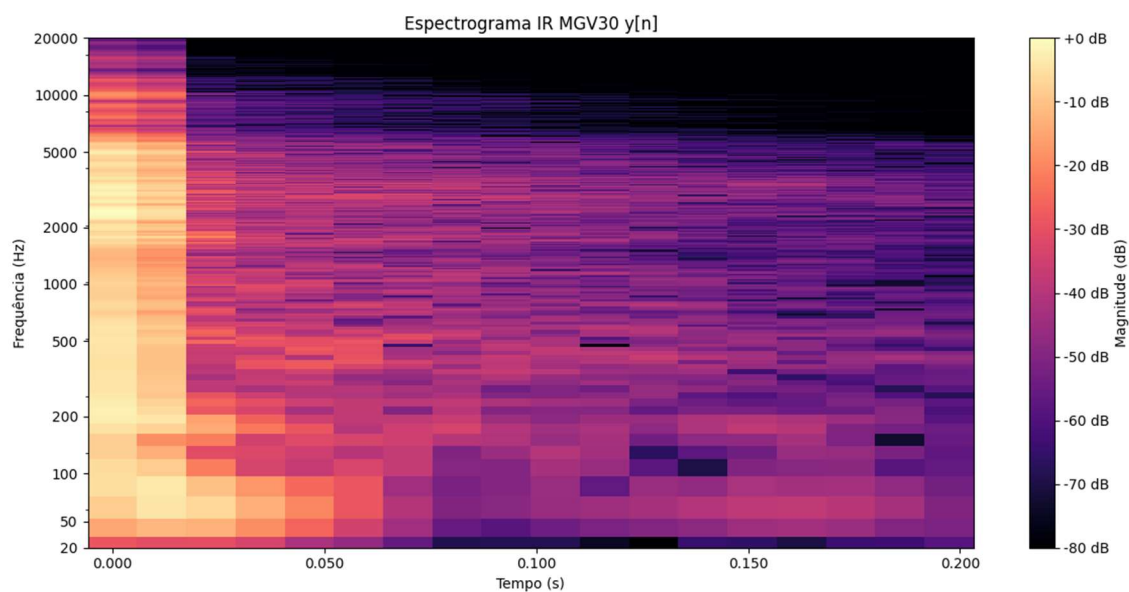
Para esta análise, foi usado o mesmo princípio do capítulo anterior, utilizando o *sweep* linear como referência. A Figura 15(b) indica o espectrograma da IR final e, por fim, tem-se o gráfico comparando a IR $h[n]$ com o sinal de saída $y[n]$ proveniente da convolução com o *sweep* linear $x[n]$ (Figura 15(c)) mostrando o sucesso no objetivo de “imprimir” as características de um sistema de áudio em um sinal de entrada arbitrário $x[n]$ através da convolução.

Figura 15 - Espectro do sistema MGV30: a) IR $h[n]$ no tempo b) espectrograma de $h[n]$ c) entrada $h[n]$ e saída $y[n]$ na frequência.

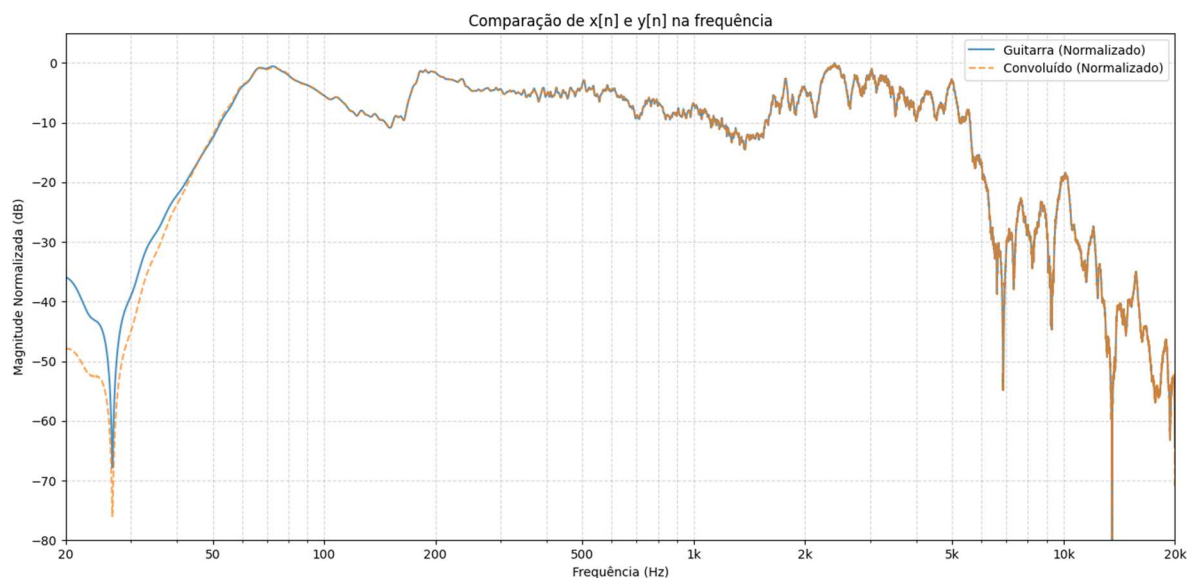
a)



b)



c)



Fonte: autoria própria

O espectrograma mostra uma “sobra” de conteúdo após 0,05s, essas informações podem surgir por conta da ressonância do amplificador e da sala utilizada, além dos ruídos externos captados durante todo o processo. Isso pode ser melhorado se a aquisição da IR for feita em um local com boa isolamento e tratamento acústico, além de uma maior pressão sonora vinda do alto-falante. Essas condutas são importantes para garantir que, dependendo do local, os ruídos externos sejam mínimos e a reverberação seja suprimida.

4.3 Análise da IR aplicado ao sinal de guitarra

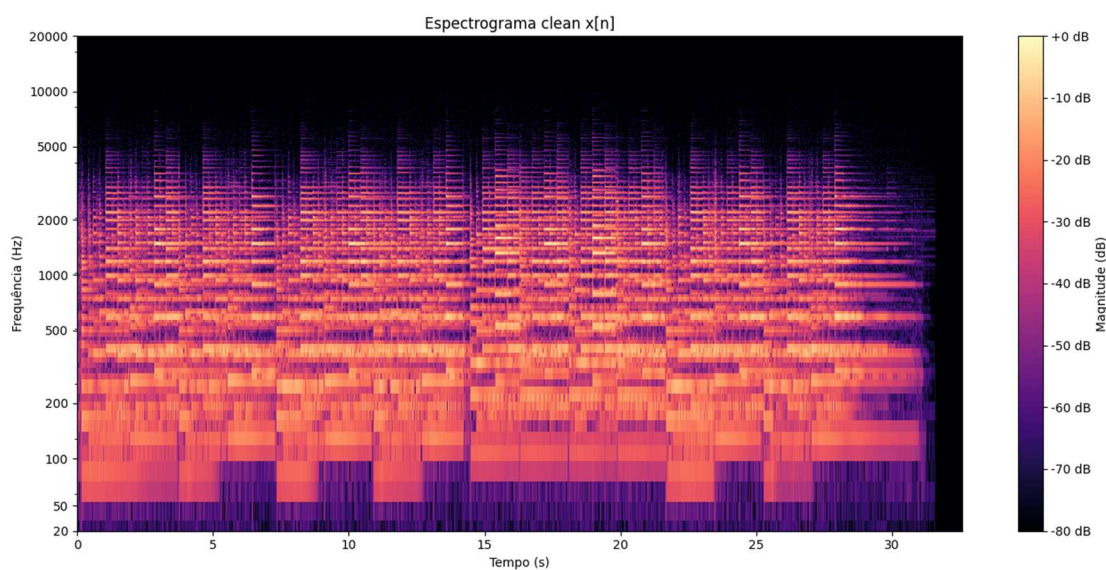
Após essa análise mais “limpa”, considerando o sinal de entrada com comportamento conhecido, tal como a varredura de frequências linear, serão mostrados os resultados das aplicações práticas em dois trechos de som de guitarra. Os sons da guitarra, então, são os sinais de entrada $x[n]$, $h[n]$ a IR extraída e $y[n]$ a saída da convolução entre os dois sinais, assim como a análise anterior.

A Figura 16 mostra a comparação do espectrograma em relação ao áudio 1, sendo (a) o sinal de entrada $x[n]$ e (b) o sinal de saída $y[n]$, assim como no áudio 2 (Figura 17(a) e (b)). A Figura 16(c) e Figura 17(c) são dedicadas às comparações destas mesmas etapas dos áudios 1 e 2, respectivamente, só que agora apenas no domínio da frequência.

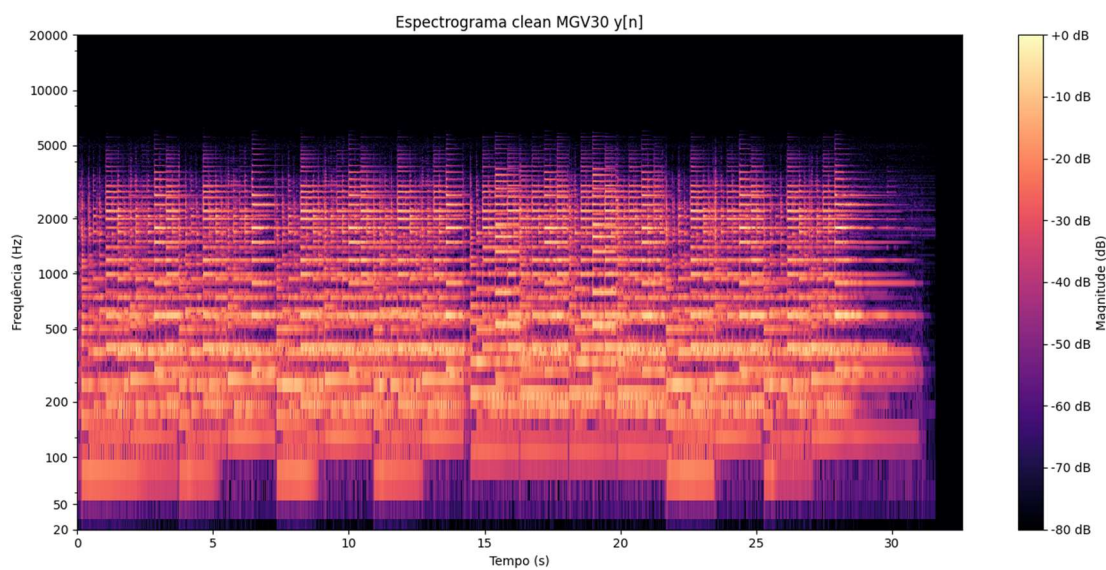
Uma análise final, no domínio da frequência, é feita comparando os áudios com a IR $y[n]$ e os áudios capturados pelo segundo caminho (amplificador + alto-falante + microfone), sendo que a Figura 16(d) referente ao áudio 1 e a Figura 17(d) ao áudio 2.

Figura 16 – Áudio 1: a) espectrograma $x[n]$ b) espectrograma $y[n]$ c) comparação $x[n]$ com $y[n]$ d) comparação $y[n]$ com ampli + mic + alto-falante.

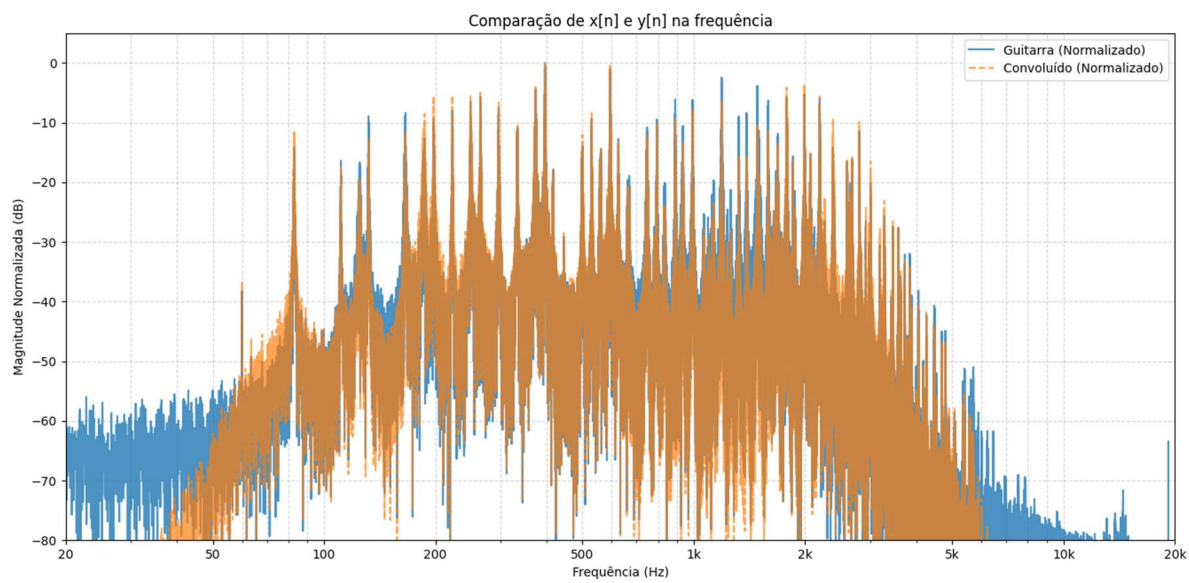
a)



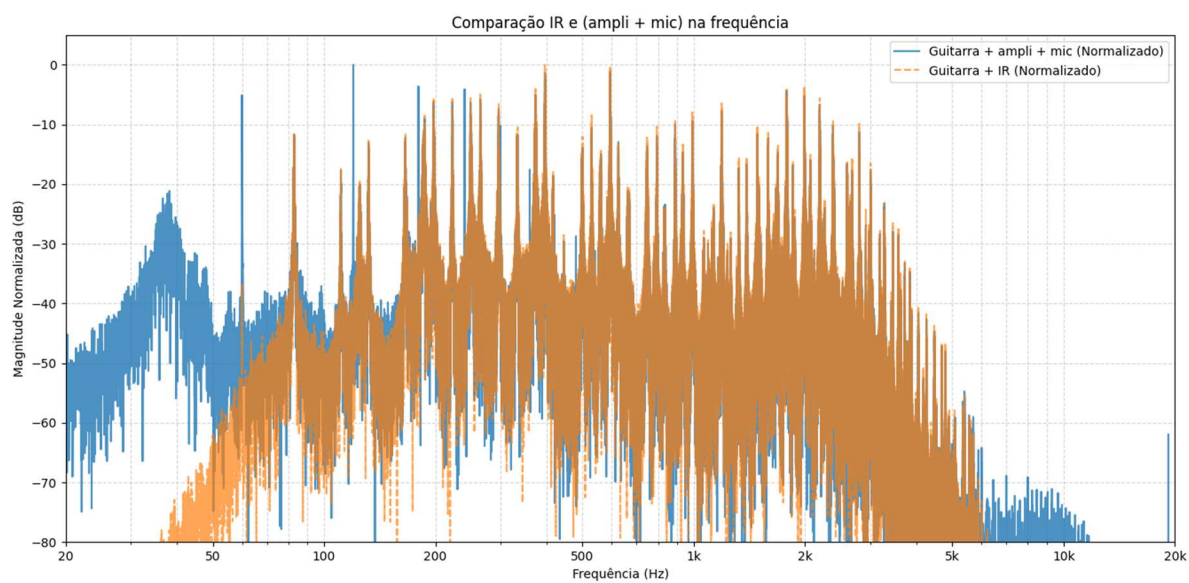
b)



c)



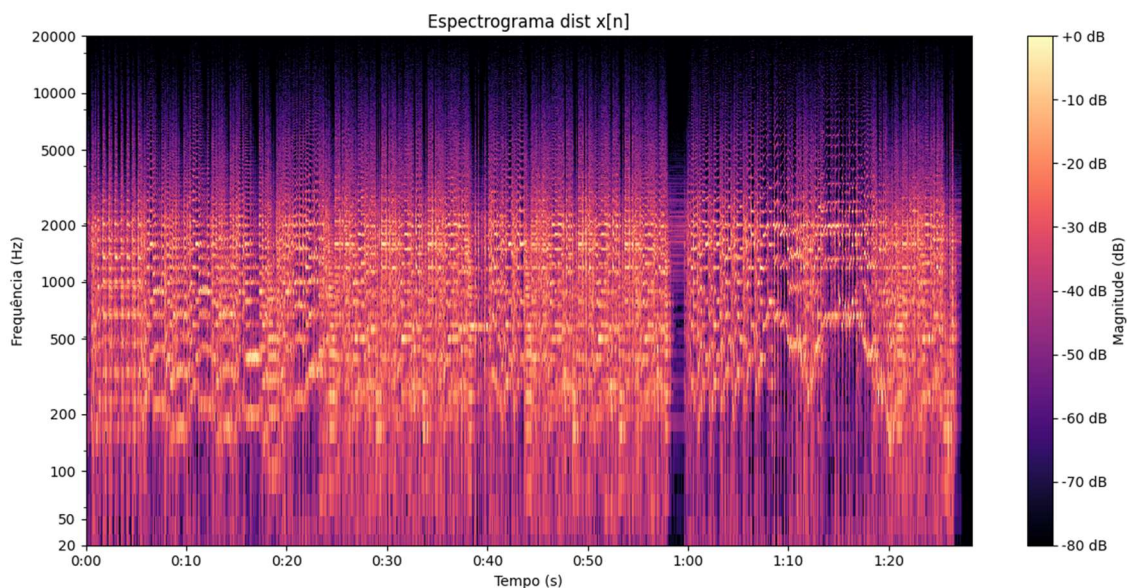
d)



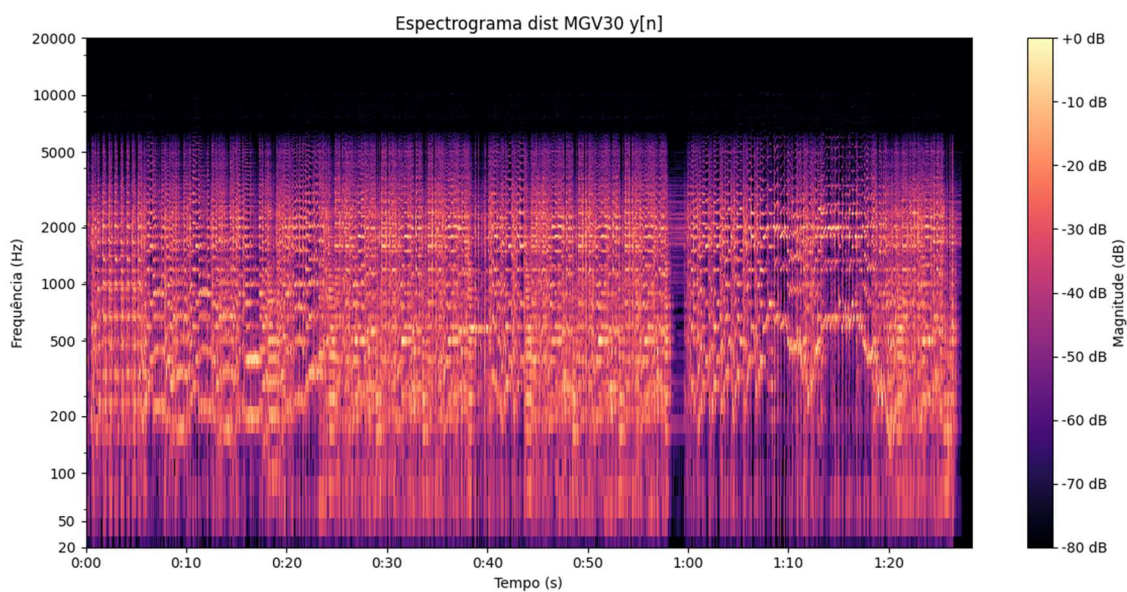
Fonte: autoria própria

Figura 17 – Áudio 2: a) espectrograma $x[n]$ b) espectrograma $y[n]$ c) comparação $x[n]$ com $y[n]$ d) comparação $y[n]$ com ampli + mic + alto-falante.

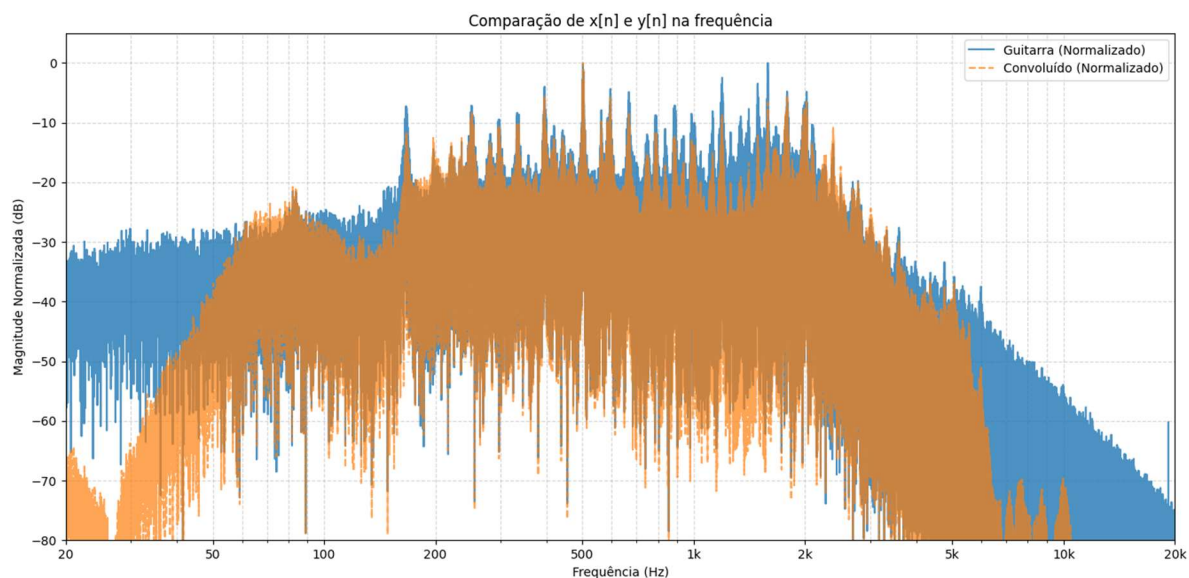
a)



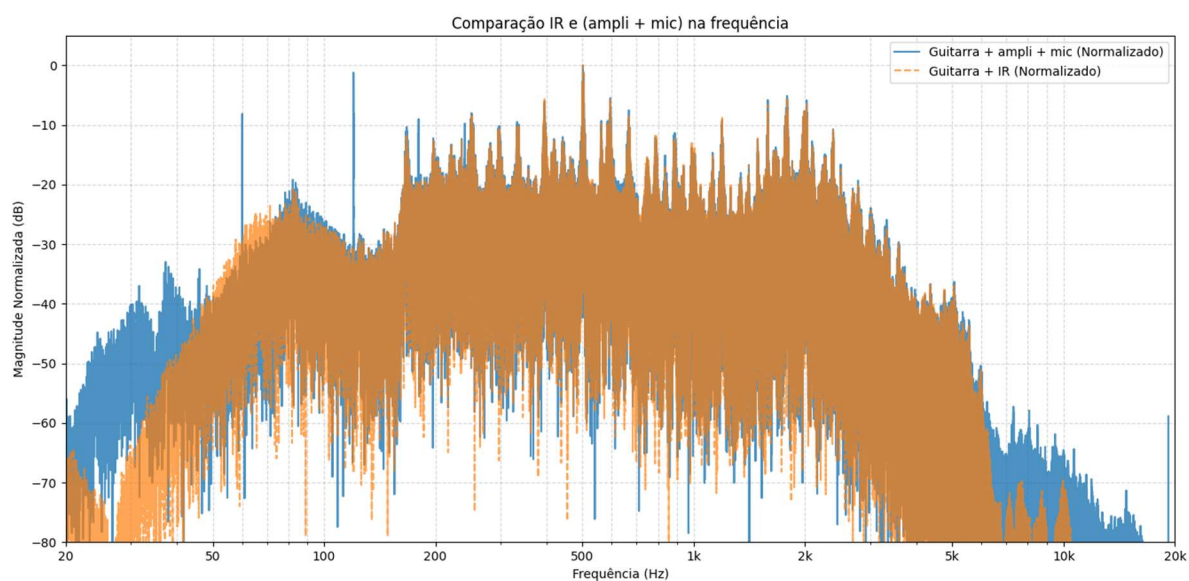
b)



c)



d)



Fonte: autoria própria

Os gráficos mostram uma certa diferença no comportamento das frequências após os sinais serem submetidos à convolução com a resposta impulsiva, principalmente nas frequências mais altas, mostrando que esses sistemas voltados para sons de guitarra oferecem um filtro passa-baixas natural (YEH; BANK; KARJALAINEN, 2008). Além disso, é possível perceber a captura de bastante ruído vindo do amplificador, já na resposta impulsiva isso já é suprimido. Pois, segundo Farina (2007), a presença de distorções harmônicas e comportamentos não-lineares são eliminados no processo de aquisição da resposta impulsiva.

Nota-se que, para o som de guitarra distorcido, o corte das frequências mais altas é ainda mais evidente, mostrando que os alto-falantes e gabinetes dedicados à amplificação de sons de guitarra possuem características específicas as quais contribuem para que o timbre de sons distorcidos sejam agradáveis (YEH; BANK; KARJALAINEN, 2008). Somado a isso, qualitativamente, o som da guitarra é percebido com maior naturalidade e soa mais agradável, em direção a uma maior similaridade com sistemas usuais de amplificação de som de guitarra. Conseqüentemente, com o resultado obtido, a experiência artística torna-se mais rica.

5 CONCLUSÃO

A tecnologia do uso de *impulse response* (IR) aplicado em sinais de guitarra, com intuito de modelagem de amplificadores e até no uso de reverberação, utiliza conceitos de processamento digital de sinais, centralizado na convolução de sinais. Os primeiros resultados utilizando um sinal de varredura senoidal linear (*sweep linear*) como entrada, o qual traz uma neutralidade que permite visualizar apenas o espectro da frequência do sinal de IR e a saída da convolução entre esses sinais, mostraram como o teorema da convolução é válido nesse tipo de aplicação.

Já no processo de extração de uma resposta impulsiva de um sistema de áudio, composto por amplificador, alto-falante e microfone de captura, foi utilizada a técnica de excitação de um sistema a partir de um sinal de varredura senoidal logarítmica (*sweep log*), o qual, além de ser um sinal com o mesmo comportamento do sistema auditivo humano, permitiu a extração da parte linear do sistema. Isso foi importante para que a técnica de convolução seja válida, uma vez que os conceitos só são aplicáveis para sistemas lineares invariantes no tempo (SLIT). Logo, com a metodologia utilizada, foi possível mostrar cada etapa do processo atrelando à teoria, sendo eles: excitação do sistema, captura do sinal de entrada passando pelos equipamentos em questão, convolução desta gravação com um sinal *sweep log* invertido no tempo e com amplitude compensada, e, por fim, truncamento do resultado desta convolução.

Utilizando o resultado obtido aplicado a um sinal de guitarra, observou-se uma mudança de comportamento em relação ao espectro de frequência dos sinais de entrada e de saída. Isto porque, diferentemente dos sistemas de amplificação de alta fidelidade (*hi-fi*), os amplificadores de guitarra, incluindo o alto-falante, possuem características específicas que se relacionam com a história do desenvolvimento tecnológico da guitarra. E uma dessas características é a presença de um filtro que corta as frequências mais altas, tornando o som da guitarra mais agradável, principalmente no caso do som distorcido. Qualitativamente, foi possível ouvir os resultados, os quais soam mais próximos à naturalidade que os amplificadores de guitarra oferecem.

Em uma análise mais visual, o espectrograma da IR mostrou um conteúdo de áudio excedente quando relacionado às IRs do AC30 e do Fender Twin, ou seja, o decaimento do sinal destes últimos foi mais abrupto enquanto que do MGV30 é mais

demorado. Apesar de não influenciar significativamente na análise auditiva dos resultados, isso pode ser melhorado se o procedimento for feito em uma sala com maior isolamento e tratamento acústico, pois eliminaria a captura de ruídos externos e da reverberação da sala em questão.

Portanto, os resultados são satisfatórios para que a tecnologia seja abordada de modo a consolidar os conceitos de IR aplicada em sons de guitarra, mostrando os principais pontos em que a teoria de processamento digital de sinais pode contribuir na modelagem de sistemas de amplificadores de guitarra.

Para dar continuidade a este estudo, é sugerida uma atenção ao desenvolvimento de dispositivos capazes de realizar a convolução em tempo real detalhando os parâmetros necessários para atingir-se baixa latência e alta qualidade com baixo custo, permitindo seu uso em apresentações ao vivo. Logo, um estudo de *hardware* em relação à capacidade de processamento, conversão analógico-digital e casamento de impedâncias, por exemplo, poderia enriquecer ainda mais o estudo da tecnologia, sendo esses fatores os mais difíceis de se encontrar informações de confiança.

Por fim, conclui-se que o procedimento da utilização de IRs para sinais de guitarra envolve algoritmos relativamente simples, podendo inclusive ser complementados com outros efeitos, como equalizadores e moduladores (*phaser*, *flanger*). O que permite que a tecnologia continue sendo explorada no sentido de tornar o acesso de timbres de qualidade e com novas texturas mais democráticos. Conseqüentemente, a manifestação artística através da guitarra pode ser mais acessível.

REFERÊNCIAS

AKG. P3 S: **Microfone dinâmico para vocal de alto desempenho**. Nova Santa Rita, 2024. Disponível em: <<https://br.akg.com/P3.html>>. Acesso em: 16 jun. 2025.

BOSSO, Joe. **Brian May: The guitar player interview**. Guitar Player, abr. 2012. Disponível em: <<https://www.guitarplayer.com/players/brian-may-discusses-queens-back-catalogue-legacy-and-his-iconic-tone>>. Acesso em: 21 jun. 2025.

CASTRO, Guilherme Augusto Soares. **Guitarra elétrica: entre o instrumento e a interface**. In: CONGRESSO DA ANPPOM, 17., 2007, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ANPPOM, 2007.

CONTER, Marcelo Bergamin; GULARTE, Gabriel Fagundes. **A composição de timbragens no rock independente brasileiro: afecções do tecnocolonialismo e da precariedade no setup dos músicos**. Passagens: Revista do Programa de Pós-Graduação em Comunicação da Universidade Federal do Ceará, [S. l.], v. 12, n. 1, p. 137–159, 2021. Disponível em: <<https://periodicos.ufc.br/passagens/article/view/70959>>. Acesso em: 21 ago 2024

FARINA, Angelo. **Advancements in impulse response measurements by sine sweeps**. In: AES CONVENTION, 122., 2007, Viena. Convention Paper... New York: Audio Engineering Society, 2007.

HAYKIN, S., VEEN, B. V., Sinais e sistemas. 1. Ed. Tradução de José Carlos Barbosa dos Santos. Porto Alegre: Bookman, 2001

HERRERA, C. G., Metodologia Para Projeto de Sistemas de Processamento Digital de Sinais de Áudio. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola de engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004. Disponível em: https://www.ppggee.ufmg.br/diss_defesas_detalhes.php?aluno=486. Acesso em: 20 ago 2024

HOCKEY, Christopher. **Gear Rundown: Keith Richards**. Mixdown Magazine, fev 2025. Disponível em: <<https://mixdownmag.com.au/features/gear-rundown-keith-richards>>. Acesso em: 21 jun. 2025.

JUDAR, Cristina V. **Toda majestade de Brian May**. Cover Guitarra. São Paulo, n106, p. 17-24, out. 2003.

MARTINS, André Lopes. **A guitarra elétrica na música experimental: composição, improvisação e novas tecnologias**. Orientador: Prof. Dr. Rogério Luiz Moraes Costa. 2015. 299 f. Tese Mestrado (Mestrado) - Universidade de São Paulo - USP -, São Paulo, 2015. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/27/27158/tde-13112015-094517/pt-br.php>>. Acesso em: 12 mai 2024.

MÜLLER, Swen; MASSARANI, Paulo. Transfer-Function Measurement with Sweeps. **Journal of the Audio Engineering Society**, New York, v. 49, n. 6, p. 443-471, jun. 2001.

OPPENHEIM, A. V.; WILLISKY, A. S. **Sinais e sistemas**. 2. ed. Tradução de Daniel Vieira e Rogério Bettoni. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2010

PRADO, Marco. **A história da guitarra - do Delta a Hendrix**. 2009. Monografia de Especialização (Especialização em História, Sociedade e Cultura) - Faculdade de Ciências Sociais da Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, São Paulo, 2009. Disponível em: <<https://repositorio.pucsp.br/jspui/handle/handle/31447>>. Acesso em: 05 dez 2024

ROCHA, Marcel Eduardo Leal. **A tecnologia como meio expressivo do guitarrista atuante no mercado musical pop**. Campinas: UNICAMP, 2011. Disponível em: <https://repositorio.unicamp.br/acervo/detalhe/796943>. Acesso em: 21 nov. 2024.

SOVIERZOSKI, Miguel Antônio. Convolução de Sinais: Definição, Propriedades e Ferramentas. **Revista Ilha Digital**, Florianópolis, v. 2, p. 81–95, 2011. Disponível

em: <<https://ilhadigital.florianopolis.ifsc.edu.br/index.php/ilhadigital/article/view/24>>.
Acesso em: 29 mai. 2025.

YEH, David T.; BANK, Balázs; KARJALAINEN, Matti. **Nonlinear modeling of a guitar loudspeaker cabinet**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DIGITAL AUDIO EFFECTS, 11., 2008, Espoo. Anais... Espoo: [s.n.], 2008.

ZÖLZER, Udo (Ed.). **DAFX: Digital Audio Effects**. 2. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2011.

APÊNDICE A – GERADOR DA VARREDURA SENOIDAL LINEAR

```

import numpy as np
import soundfile as sf

# Parâmetros do Sweep Linear
fs = 44100 # Taxa de amostragem (Hz)
T = 30     # Duração do sinal (segundos)
f1 = 20    # Frequência inicial do sweep (Hz)
f2 = 20000 # Frequência final do sweep (Hz)
fade_duration = 0.03 # Duração do fade in em segundos
output_path = r"D:\Allan R. Carvalho\Documents\REAPER
Media\TCC\sweep_linear_44100_B.wav"

# Gera o Sweep Linear
print("Gerando sweep...")
t = np.linspace(0, T, int(fs * T), endpoint=False)
sweep_signal = np.sin(2 * np.pi * (f1 * t + ((f2 - f1) / (2 * T)) * t**2))

# Aplica Fade In
print("Aplicando fade in...")
fade_samples = int(fade_duration * fs)
fade_in_window = np.linspace(0, 1, fade_samples)
window = np.ones(len(sweep_signal))
if fade_samples > 0 and fade_samples <= len(sweep_signal):
    window[:fade_samples] = fade_in_window
sweep_signal *= window

# Normaliza o sinal para que o pico seja 1.0
print("Normalizando sinal...")
peak_value = np.max(np.abs(sweep_signal))
if peak_value > 1e-9:
    sweep_signal /= peak_value
print(f"Amplitude APÓS NORMALIZAÇÃO (float): Pico Absoluto =
{np.max(np.abs(sweep_signal)):.4f}")
print(f"Salvando arquivo em: {output_path}")
try:
    # A função sf.write sabe que, ao receber um array de floats e o
    subtype='PCM_24',
    # ela deve escalar o valor 1.0 para o máximo de 24 bits (2**23 - 1).
    sf.write(output_path, sweep_signal, fs, subtype='PCM_24')
    print("Arquivo salvo com sucesso com amplitude total!")
except Exception as e:
    print(f"Erro ao salvar o arquivo: {e}")

```

APÊNDICE B – PLOTAGEM NO DOMÍNIO DO TEMPO

```

import numpy as np
import librosa
import matplotlib.pyplot as plt

INPUT_WAV = r"D:\.wav"

# Carrega os arquivos de áudio
try:
    input_audio, sr_input = librosa.load(INPUT_WAV, sr=None, mono=True)
except FileNotFoundError:
    print(f"ERRO NO PLOT: Arquivo '{INPUT_WAV}' não encontrado. Verifique o
caminho.")
    exit()
except Exception as e:
    print(f"ERRO NO PLOT ao carregar o arquivo '{INPUT_WAV}': {e}")
    exit()

# !!!!! VERIFICAÇÃO CRÍTICA NO SCRIPT DE PLOTAGEM !!!!!
print(f"--- Plot - Info do Sinal Carregado ({INPUT_WAV}) ---")
print(f"Plot - Taxa de amostragem: {sr_input} Hz")
print(f"Plot - Número de amostras: {len(input_audio)}")
print(f"Plot - Valor MÍNIMO no input_audio: {np.min(input_audio):.6f}")
print(f"Plot - Valor MÁXIMO no input_audio: {np.max(input_audio):.6f}")
print(f"Plot - PICO ABSOLUTO no input_audio: {np.max(np.abs(input_audio)):.6f}") #
Mais importante
print("--- Fim das Informações ---")

# Ajusta os tempos para o eixo X
time_input = np.linspace(0, len(input_audio) / sr_input, num=len(input_audio))

# Plota os sinais
plt.figure(figsize=(12, 7))
plt.plot(time_input, input_audio, label=f" ", color="blue", alpha=0.7)
plt.xlabel("Tempo (s)")
plt.ylabel("Amplitude")
plt.title(f" ")
plt.legend(loc="upper right")
plt.grid(True, which='both', linestyle='--', alpha=0.5)
plt.ylim([-1, 1])
plt.tight_layout()
plt.show()

```

APÊNDICE C – PLOTAGEM NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

```

import numpy as np
import librosa
import matplotlib.pyplot as plt

# Carrega o arquivo de áudio
original_filename = r"D:\.wav"
original_signal, sr = librosa.load(original_filename, sr=None, mono=True)

# Calcula a FFT do sinal
N = len(original_signal) # Tamanho da FFT
freqs = np.fft.rfftfreq(N, d=1/sr) # Escala de frequência
original_fft = np.fft.rfft(original_signal)

# Converte para módulo (espectro de magnitude)
original_magnitude = np.abs(original_fft)
reference_value = np.max(original_magnitude)
original_magnitude_db = 20 * np.log10(original_magnitude / reference_value + 1e-10)

# Plotando no domínio da frequência
plt.figure(figsize=(10, 5))
plt.plot(freqs, original_magnitude_db, label=" ", alpha=0.7)

# Configuração do eixo X
plt.xlim([20, 20000]) # Limita o eixo X de 20 Hz até 20 kHz
plt.xscale('log') # Escala logarítmica no eixo X
plt.xticks([20, 50, 100, 200, 500, 1000, 2000, 5000, 10000, 20000],
           labels=['20', '50', '100', '200', '500', '1k', '2k', '5k', '10k',
                  '20k'])

# Configurações do gráfico
plt.xlabel("Frequência (Hz)")
plt.ylabel("Magnitude (dB)")
plt.title(" ")
plt.legend()
plt.grid(True, which='both', linestyle='--', alpha=0.5)

# Exibir gráfico corretamente
plt.show()

```

APÊNDICE D – CONVOLUÇÃO FFT

```

import numpy as np
import librosa
import soundfile as sf
from scipy.signal import fftconvolve # Importado para convolução rápida

# --- Arquivos de entrada e saída ---
INPUT_WAV = r"D:\.wav"
IR_WAV = r"D:\.wav"
OUTPUT_WAV = r"D:\.wav"

# --- Carrega os arquivos de áudio com tratamento de erros ---
print("Carregando arquivos de áudio...")
try:
    input_audio, sr_input = librosa.load(INPUT_WAV, sr=None, mono=True)
    ir, sr_ir = librosa.load(IR_WAV, sr=None, mono=True)
    print("Arquivos carregados com sucesso!")
except FileNotFoundError as e:
    print(f"ERRO: Arquivo não encontrado - {e.filename}")
    print("Verifique se o caminho e o nome do arquivo estão corretos.")
    exit()
except Exception as e:
    print(f"Ocorreu um erro inesperado ao carregar os arquivos: {e}")
    exit()

# --- Garante que ambos os sinais tenham a mesma taxa de amostragem ---
if sr_input != sr_ir:
    print(f"Atenção: Taxas de amostragem diferentes! ({sr_input} vs {sr_ir})")
    print("O ideal é que ambos os arquivos tenham a mesma taxa de amostragem.")
    # Usaremos a taxa do sinal de entrada como padrão
    sr = sr_input
else:
    sr = sr_input

# --- Normaliza a resposta impulsiva ---
# Isso ajuda a controlar o nível do sinal de saída.
print("Normalizando a Resposta Impulsiva (IR)...")
ir /= np.max(np.abs(ir)) + 1e-6

# --- Convolução ---
print("Realizando a convolução (pode levar um momento)...")
convolved = fftconvolve(input_audio, ir, mode='full')

# --- Normaliza o áudio de saída para evitar clipping ---
print("Normalizando o sinal de saída...")
convolved /= np.max(np.abs(convolved)) + 1e-6

# --- Salva o arquivo processado ---
print(f"Salvando o arquivo de saída em: {OUTPUT_WAV}")
try:
    # Especificando o subtipo para garantir um arquivo PCM 24-bit padrão.
    sf.write(OUTPUT_WAV, convolved, sr, subtype='PCM_24')
    print(f"Convolução concluída! Arquivo salvo como {OUTPUT_WAV}")
except Exception as e:
    print(f"Erro ao salvar o arquivo: {e}")

```

APÊNDICE E – PLOTAGEM DE DOIS SINAIS NA FREQUÊNCIA

```

import numpy as np
import librosa
import matplotlib.pyplot as plt

# Carrega os arquivos de áudio
original_filename = r"D:\.wav"
convoluted_filename = r"D:\.wav"

try:
    original_signal, sr = librosa.load(original_filename, sr=None, mono=True)
    convoluted_signal, _ = librosa.load(convoluted_filename, sr=sr, mono=True)
except FileNotFoundError as e:
    print(f"ERRO: Arquivo não encontrado - {e.filename}")
    exit()
except Exception as e:
    print(f"Ocorreu um erro ao carregar os arquivos: {e}")
    exit()

# Ajusta os tamanhos dos sinais
max_length = max(len(original_signal), len(convoluted_signal))

# Preenche o menor sinal com zeros até atingir max_length
original_signal = np.pad(original_signal, (0, max_length - len(original_signal)))
convoluted_signal = np.pad(convoluted_signal, (0, max_length - len(convoluted_signal)))

# Calcula a FFT dos sinais
N = max_length
freqs = np.fft.rfftfreq(N, d=1/sr)
original_fft = np.fft.rfft(original_signal)
convoluted_fft = np.fft.rfft(convoluted_signal)

# ----- NORMALIZAÇÃO INDIVIDUAL -----

# Converte para módulo (espectro de magnitude)
original_magnitude = np.abs(original_fft)
convoluted_magnitude = np.abs(convoluted_fft)

# Normaliza o sinal da IR (original) pelo seu próprio pico
ref_original = np.max(original_magnitude)
if ref_original < 1e-9: ref_original = 1 # Evita divisão por zero se for silêncio
original_magnitude_db = 20 * np.log10(original_magnitude / ref_original + 1e-10)

# Normaliza o sinal CONVOLUÍDO pelo seu próprio pico
ref_convoluted = np.max(convoluted_magnitude)
if ref_convoluted < 1e-9: ref_convoluted = 1 # Evita divisão por zero
convoluted_magnitude_db = 20 * np.log10(convoluted_magnitude / ref_convoluted + 1e-10)

# -----

# Plotando no domínio da frequência
plt.figure(figsize=(12, 7))
plt.plot(freqs, original_magnitude_db, label=" ", alpha=0.8)

```

```
plt.plot(freqs, convoluted_magnitude_db, label=" ", alpha=0.7, linestyle='--')

# Configuração do eixo X
plt.xlim([20, 20000])
plt.xscale('log')
plt.xticks([20, 50, 100, 200, 500, 1000, 2000, 5000, 10000, 20000],
           labels=['20', '50', '100', '200', '500', '1k', '2k', '5k', '10k',
                  '20k'])

# Configuração do eixo Y
plt.ylabel("Magnituda Normalizada (dB)")
# O pico de ambos agora será 0 dB, então ajustamos o limite inferior para ver o
resto da curva
plt.ylim([-80, 5])

# Configurações do gráfico
plt.xlabel("Frequência (Hz)")
plt.title("Comparação na frequência")
plt.legend()
plt.grid(True, which='both', linestyle='--', alpha=0.5)
plt.tight_layout()

# Exibir gráfico corretamente
plt.show(block=True)
```

APÊNDICE F – PLOTAGEM DO ESPECTROGRAMA

```

import numpy as np
import librosa
import librosa.display
import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib.ticker as ticker # Importa o módulo para controle dos 'ticks'

# --- Parâmetros ---
AUDIO_FILENAME = r"D:\.wav"
# --- Carregar o Sinal de Áudio ---
try:
    y, sr = librosa.load(AUDIO_FILENAME, sr=None, mono=True)
    print(f"Arquivo '{AUDIO_FILENAME}' carregado com sucesso.")
    print(f"Taxa de amostragem: {sr} Hz, Duração: {len(y)/sr:.2f} segundos")
except Exception as e:
    print(f"Erro ao carregar o arquivo: {e}")
    exit()

# --- Calcular o Espectrograma (usando a STFT) ---
stft_result = librosa.stft(y)
S_db = librosa.amplitude_to_db(np.abs(stft_result), ref=np.max)
# --- Plotar o Espectrograma ---
print("Plotando o espectrograma...")
fig, ax = plt.subplots(figsize=(12, 6))

img = librosa.display.specshow(S_db,
                               sr=sr,
                               x_axis='time',
                               y_axis='log',
                               ax=ax)

# --- CONTROLE MANUAL E PRECISO DO EIXO DE FREQUÊNCIA (Y) ---

# 1. Define os limites exatos que você quer
ax.set_ylim(20, 20000)

# 2. Define os "ticks" (marcas) principais que você quer ver no eixo Y
major_ticks = [20, 50, 100, 200, 500, 1000, 2000, 5000, 10000, 20000]
ax.get_yaxis().set_major_locator(ticker.FixedLocator(major_ticks))

# 3. Define como os números dos ticks serão formatados
# Usamos ScalarFormatter para mostrar números simples (20, 50, 100...)
# em vez de notação de potência (102, 103, etc.)
ax.get_yaxis().set_major_formatter(ticker.ScalarFormatter())

# -----

# Adiciona uma barra de cores
fig.colorbar(img, ax=ax, format='%+2.0f dB', label='Magnitude (dB)')

# Configurações do gráfico
nome_arquivo_curto = AUDIO_FILENAME.split('\\')[-1].split('/')[0]
ax.set_title(f' ')
ax.set_xlabel("Tempo (s)")
ax.set_ylabel("Frequência (Hz)")

plt.tight_layout()
plt.show()

```

APÊNDICE G – GERADOR DA VARREDURA SENOIDAL LOGARÍTMICA

```

import numpy as np
import soundfile as sf

# --- Parâmetros do Sweep Logarítmico (Exponencial) ---
fs = 44100 # Taxa de amostragem (Hz)
T = 30     # Duração do sinal (segundos)
f1 = 20    # Frequência inicial do sweep (Hz)
f2 = 20000 # Frequência final do sweep (Hz)
fade_duration = 0.03 # Duração do fade in em segundos

# Define o caminho de saída para o novo arquivo logarítmico
output_path = r"D:\.wav"

# --- Geração do Sweep Logarítmico ---
print("Gerando sweep logarítmico...")
# Cria o vetor de tempo
t = np.linspace(0, T, int(fs * T), endpoint=False)

# Fórmula para o sweep senoidal exponencial (logarítmico)
# Esta fórmula é a integração da função de frequência instantânea exponencial.
#  $L = T / \log(f2/f1)$ 
#  $\phi(t) = 2 * \pi * L * f1 * (\exp(t/L) - 1)$ 
# Onde L é uma constante de tempo que define a "taxa" da varredura.
R = np.log(f2 / f1)
sweep_signal = np.sin(2 * np.pi * f1 * T / R * (np.exp(t * R / T) - 1))

```

APÊNDICE H – GERADOR DO SWEEP REVERTIDO NO TEMPO COM MODULAÇÃO NA AMPLITUDE

```

import numpy as np
import soundfile as sf
import librosa # Usado para carregar o áudio de forma consistente

# --- Parâmetros ---
# Caminho para o seu sweep logarítmico ORIGINAL (20Hz a 20kHz)
INPUT_SWEEP_PATH = r"D:\.wav"
# Caminho para salvar o filtro inverso final
OUTPUT_FILTER_PATH = r"D:\.wav"

# --- Carregar o Sweep Original ---
print(f"Carregando o sweep original de: {INPUT_SWEEP_PATH}")
try:
    sweep_signal, fs = librosa.load(INPUT_SWEEP_PATH, sr=None, mono=True)
except Exception as e:
    print(f"Erro ao carregar o arquivo: {e}")
    exit()

# --- 1. Inversão no Tempo (Time Reversal Mirror) ---
# Isso inverte a FASE do espectro, que é o necessário para a deconvolução.
# A magnitude do espectro (-3dB/oitava) ainda é a mesma do sweep original.
print("Invertendo o sweep no tempo...")
reversed_sweep = np.flip(sweep_signal)

# --- 2. Transformar para o Domínio da Frequência ---
print("Calculando a FFT do sweep invertido...")
n_samples = len(reversed_sweep)
fft_data = np.fft.rfft(reversed_sweep)
freqs = np.fft.rfftfreq(n_samples, d=1/fs)

# --- 3. Criar o Filtro de Compensação de Magnitude (+6dB/oitava) ---
# O sweep original tem -3dB/oitava. Queremos que o filtro final tenha +3dB/oitava.
# Portanto, precisamos aplicar um ganho de +6dB/oitava ao espectro atual.
# (+6dB/oitava) + (-3dB/oitava) = +3dB/oitava.
print("Criando filtro de compensação de magnitude (+6dB/oitava)...")
gain_db = np.zeros_like(freqs)
# Evita log(0) e define uma frequência de referência (ex: 20 Hz)
ref_freq = 20.0
valid_indices = freqs >= ref_freq
# A fórmula para ganho em dB por oitava é  $G_{db} = X * \log_2(f / f_{ref})$ 
gain_db[valid_indices] = 6 * np.log2(freqs[valid_indices] / ref_freq)

# Converte o ganho de dB para escala linear
gain_linear = 10 ** (gain_db / 20)

# --- 4. Aplicar o Filtro de Compensação ---
print("Aplicando o filtro de compensação no domínio da frequência...")
fft_filtered = fft_data * gain_linear

```

APÊNDICE J – TRUNCAMENTO E NORMALIZAÇÃO

```

import numpy as np
import librosa
import soundfile as sf

# --- Arquivos de entrada e saída ---
# Arquivo LONGO resultante da deconvolução (ex: 60 segundos)
DECONVOLVED_SIGNAL_PATH = r"D:\.wav"
# Arquivo final da IR CURTA e pronta para uso
OUTPUT_IR_PATH = r"D:\.wav"

# --- Parâmetros de Truncamento ---
# O impulso ocorre em t = duração do sweep original..
START_TIME_S = 30.0 # Início do corte (em segundos)
END_TIME_S = 30.2   # Fim do corte (em segundos).

# --- Carrega o arquivo de áudio longo ---
print(f"Carregando o sinal deconvolvido de: {DECONVOLVED_SIGNAL_PATH}")
try:
    long_signal, sr = librosa.load(DECONVOLVED_SIGNAL_PATH, sr=None, mono=True)
    print("Arquivo carregado com sucesso!")
except FileNotFoundError:
    print(f"✘ ERRO: Arquivo '{DECONVOLVED_SIGNAL_PATH}' não encontrado.
Verifique o caminho.")
    exit()
except Exception as e:
    print(f"✘ Ocorreu um erro ao carregar o arquivo: {e}")
    exit()

# --- Truncamento da Resposta Impulsiva ---
print(f"Truncando o sinal de {START_TIME_S}s a {END_TIME_S}s para extrair a
IR...")

# 1. Converte os tempos de início e fim para amostras
start_sample = int(START_TIME_S * sr)
end_sample = int(END_TIME_S * sr)

# 2. Verifica se o sinal é longo o suficiente
if len(long_signal) < end_sample:
    print(f"✘ ERRO: O sinal carregado tem apenas {len(long_signal)/sr:.2f}s e
não pode ser cortado até {END_TIME_S}s.")
    print("Verifique a duração do seu arquivo de entrada.")
    exit()

# 3. Corta o array para obter a IR final
ir_final = long_signal[start_sample:end_sample]
print(f"IR final extraída com {len(ir_final)} amostras (duração:
{len(ir_final)/sr:.3f}s).")

# --- Normaliza a IR Final ---
# Normaliza o PICO da IR extraída para 1.0, garantindo amplitude máxima no arquivo
final.
print("Normalizando a IR final...")
peak = np.max(np.abs(ir_final))
if peak > 1e-9:
    ir_final /= peak

```

```
# --- Salva a IR Final ---
print(f"Salvando a IR final em: {OUTPUT_IR_PATH}")
try:
    sf.write(OUTPUT_IR_PATH, ir_final, sr, subtype='PCM_24')
    print(f"IR extraída com sucesso e salva como {OUTPUT_IR_PATH}")
except Exception as e:
    print(f"Erro ao salvar o arquivo: {e}")
```