

UNIVERSIDADE DA INTEGRAÇÃO INTERNACIONAL DA
LUSOFONIA AFRO-BRASILEIRA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA NATUREZA

PROCESSADORES DE EFEITOS PARA GUITARRA ELÉTRICA: UMA
ABORDAGEM FÍSICA PARA O ENSINO DE ONDULATÓRIA

ANTONIO WELLINGTON DANTAS DA COSTA

REDENÇÃO
2023

ANTONIO WELLINGTON DANTAS DA COSTA

**PROCESSADORES DE EFEITOS PARA GUITARRA ELÉTRICA: UMA
ABORDAGEM FÍSICA PARA O ENSINO DE ONDULATÓRIA**

Monografia submetida a coordenação do curso de Graduação em Licenciatura em Física da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-brasileira como requisito parcial à obtenção do título de Licenciado em Física.

Orientador:

Prof. Dr. João Philipe Macedo Braga.

**REDENÇÃO
2023**

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira
Sistema de Bibliotecas da UNILAB
Catalogação de Publicação na Fonte.

Costa, Antonio Wellington Dantas da.

C837p

Processadores de efeitos para guitarra elétrica: Uma abordagem física para o ensino de ondulatória / Antonio Wellington Dantas da Costa. - Redenção, 2023.

64f: il.

Monografia - Curso de Física, Instituto De Ciências Exatas E Da Natureza, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Redenção, 2023.

Orientador: Prof. Dr. João Philipe Macedo Braga.

1. Física ondulatória. 2. Processadores de sinal e áudio. 3. Efeitos. I. Título

CE/UF/Dsibiuni

CDD 530.0724

ANTONIO WELLINGTON DANTAS DA COSTA

**PROCESSADORES DE EFEITOS PARA GUITARRA ELÉTRICA: UMA
ABORDAGEM FÍSICA PARA O ENSINO DE ONDULATÓRIA**

Monografia submetida a coordenação do curso de Graduação em Licenciatura em Física da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-brasileira como requisito parcial à obtenção do título de Licenciado em Física.

Data de aprovação:

13/12/2023

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **JOAO PHILIPPE MACEDO BRAGA**
Data: 19/12/2023 10:03:04-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. João Philipe Macedo Braga
Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-brasileira (Unilab)

Documento assinado digitalmente
 **SILVIA HELENA ROBERTO DE SENA**
Data: 18/12/2023 14:20:20-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Silvia Helena Roberto de Sena
Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-brasileira (Unilab)

Documento assinado digitalmente
 **ITALO PEREIRA BEZERRA**
Data: 18/12/2023 17:04:23-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Italo Pereira Bezerra
Universidade Estadual do Ceará (Uece)

A Deus, fonte inesgotável de sabedoria e fortaleza. Ao meu amado filho, símbolo do amor incondicional, a toda a minha família e a todos os que acreditaram em mim.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me guiar sempre em Seus passos nos momentos de dificuldade em que enfretei neste meu percurso pela universidade. Agradeço à Ele por todas as minhas conquistas e vitórias e por me manter firme, pois sem Ele, nada eu seria ou conseguiria.

Agradeço a alguém que me trouxe luz, amor e alegria intensa à minha vida: meu amado filho. Sua chegada foi um presente extraordinário que transformou meu mundo de maneiras indescritíveis. Agradeço por ser a razão do meu sorriso diário, por preencher meu dia com risos contagiantes e por trazer uma nova perspectiva de esperança e felicidade. Seu espírito radiante e seu amor incondicional têm sido uma fonte constante de inspiração, motivando-me a superar meus medos e a sacrificar coisas que eu nunca imaginei fazer.

Agradeço ao meu orientador Dr. João Philipe, que além professor e orientador, foi, e é, um grande amigo. Sua dedicação ao ensino da Física não apenas ampliou meus horizontes acadêmicos, mas também transformou a maneira como percebo o mundo ao meu redor. Suas palavras e seu apoio, de todas as formas, foram pilares essenciais que me impulsionaram nos momentos desafiadores. Acreditar enquanto eu duvidava de mim mesmo foi um presente inestimável, e por isso, expresso minha eterna gratidão.

Agradeço a minha melhor amiga, companheira e esposa Lílian Mayra, pessoa ao qual amo incondicionalmente, e que mesmo em meus piores momentos, me ajudou, me ensinou e me deu forças para não desistir.

Agradeço aos meus pais Helio e Maria, que mesmo em todas as circunstâncias me apoiaram em algum momento, a minha irmã Mirela por me amar incondicionalmente.

Agradeço ao meu querido amigo e irmão Luis Neto, que foi a pessoa que esteve comigo do início ao fim de minha trajetória na universidade, agradeço muito pelos inúmeros incentivos e pela amizade incondicional.

Agradeço ao professor Dr. Aristeu, pelas excelentes aulas de Física e por todo apoio ao longo de minha formação. Agradeço a todos os demais professores do curso, que foram companheiros, e que de alguma forma me ajudaram para que eu pudesse alcançar meus objetivos.

Agradeço ao professor Dr. Wesley, pelas excelentes e complicadas aulas de cálculo, pelas palavras de Deus, que me auxiliaram em um momento difícil da minha formação.

Agradeço a todos os amigos que fiz na universidade, e que fizeram parte da minha formação

Aos demais professores, secretários, alunos e colegas do Curso de Licenciatura em Física, por todo o carinho e prestação.

“O verdadeiro heroísmo está em persistir por mais um momento quando tudo parece perdido.”

W. F. Grenfell

RESUMO

O presente trabalho aborda a intersecção entre a música e a física, explorando o uso de processadores de sinal e áudio na contextura específica da guitarra elétrica. O objetivo central é investigar o funcionamento dos processadores de sinal e áudio, investigando sua relação com os princípios da física ondulatória e como eles influenciam a criação e manipulação de timbres. A pesquisa baseia-se na premissa de que a física desempenha um papel crucial na concepção e funcionamento dos processadores de sinal para guitarra, delineando a compreensão de fenômenos ondulatórios envolvidos. Cada efeito é analisado sob uma perspectiva física, destacando como variações na amplitude, frequência e fase das ondas sonoras resultam em diferentes sonoridades. A relação entre os aspectos ondulatórios e a resposta sonora é explorada, evidenciando como a física influencia a coloração e a modificação do sinal original da guitarra. Iniciamos nossa pesquisa descrevendo os conceitos básicos de ondulatória, acústica e teoria musical. Também destacamos a importância das ondas sonoras, sua relação com a música e como usar essas ferramentas para trabalhar conceitos físicos. Em seguida, analisamos os componentes e funcionamento dos processadores de sinal, incluindo pedais de efeitos, e como eles manipulam as ondas sonoras para produzir uma variedade de efeitos sonoros. Por fim, analisaremos as formas de onda para cada efeito aplicado a um sinal e seu espectro de frequência. Portanto, o presente estudo busca investigar a maneira pela qual a aplicação prática desses conceitos pode enriquecer o ensino de física ondulatória, além de demonstrar que os efeitos de guitarra podem servir como exemplos concretos e cativantes para ilustrar os princípios físicos abordados em sala de aula, tornando o aprendizado dos alunos mais envolvente com tais aplicações.

Palavras-chave: Processadores de sinal e áudio. Física Ondulatória. Efeitos.

ABSTRACT

This work addresses the intersection between music and physics, exploring the use of signal and audio processors in the specific context of the electric guitar. The central objective is to investigate the functioning of signal and audio processors, exploring their relationship with the principles of wave physics and how they influence the creation and manipulation of timbres. The research is based on the premise that physics plays a crucial role in the design and operation of guitar signal processors, outlining the understanding of wave phenomena involved. Each effect is analyzed from a physical perspective, highlighting how variations in the amplitude, frequency and phase of sound waves result in different sounds. The relationship between wave aspects and sonic response is explored, highlighting how physics influences the coloring and modification of the original guitar signal. We began our research by describing the basic concepts of wave, acoustics and music theory. We also highlight the importance of sound waves, their relationship with music and how to use these tools to work on physical concepts. We then look at the components and workings of signal processors, including effects pedals, and how they manipulate sound waves to produce a variety of sound effects. Finally, we will analyze the waveforms for each effect applied to a signal and its frequency spectrum. Therefore, the present study seeks to investigate the way in which the practical application of these concepts can enrich the teaching of wave physics, in addition to demonstrating that guitar effects can serve as concrete and captivating examples to illustrate the physical principles covered in the classroom. making students' learning more engaging with such applications.

Keywords: Signal and Audio Processors. Wave Physics. Effects.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Elementos básicos da guitarra elétrica	19
Figura 2 – Captador mini humbucker dual rail de alnico	20
Figura 3 – Pedal analógico da Boss	21
Figura 4 – Pedal digital da Strymon	22
Figura 5 – Processador multiefeitos da Boss	22
Figura 6 – Representação para um comprimento de onda e sua amplitude	27
Figura 7 – Interferências construtiva e destrutiva	29
Figura 8 – Forma de onda e espectro de frequência do som limpo	40
Figura 9 – Forma de onda antes e após o Chorus	42
Figura 10 – Espectro de frequência Chorus	43
Figura 11 – Forma de onda antes e após o Flanger	44
Figura 12 – Espectro de frequência Flanger	44
Figura 13 – Forma de onda antes e após o Phaser	45
Figura 14 – Espectro de frequência Phaser	46
Figura 15 – Forma de onda antes e após o Tremolo	47
Figura 16 – Espectro de frequência Tremolo	47
Figura 17 – Forma de onda antes e após a Distorção	48
Figura 18 – Espectro de frequência Distorção	49
Figura 19 – Forma de onda antes e após o Reverb	50
Figura 20 – Espectro de frequência Reverb	51
Figura 21 – Forma de onda antes e após o Delay	52
Figura 22 – Espectro de frequência Delay	53
Figura 23 – Forma de onda antes e após o Wah Wah	54
Figura 24 – Espectro de frequência Wah-Wah	55
Figura 25 – Forma de onda e espectro de frequência para o Equalizador	56
Figura 26 – Forma de onda antes e após o Compressor	57
Figura 27 – Espectro de frequência Compressor	58
Figura 28 – Forma de onda e espectro de frequência para o Pitch Shifter	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DAWs	Digital Audio Workstations
DC	Direct Current
LFO	Low Frequency Oscillator
WAV	Waveform Audio File Format
log	Logarítmo
dB	Decibéis
Hz	Hetz
kHz	Kilo Hetz
mA	Miliampère
$\frac{W}{m^2}$	Watt por metro quadrado

LISTA DE SÍMBOLOS

ν	Frequência
λ	Comprimento de onda
ϕ	Constante de fase
ω	Frequência angular
ν_n	Frequência fundamental
μ	Massa específica linear
k	Número de onda
L	Comprimento da corda
t	Tempo
v	Velocidade de propagação da onda
I	Intensidade da onda
T	Período
η	Nível de intensidade sonora
τ	Tensão
$\Delta\omega$	Taxa de variação da frequência angular
I_0	Intensidade sonora da frequência
a_0	Coefficiente da componente de frequência zero
a_n, b_n	Coefficientes da componente senoidal
C_n	Coefficiente da Série de Fourier
i	Número complexo
e	Exponencial
n	Número inteiro
ψ, Ψ	Letra grega psi
β	Letra grega beta

δ	Letra grega delta
α	Letra grega alfa
ρ	Letra grega rho
∞	Infinito
∂	Parcial
π	Pi
Σ	Somatório
\forall	Para todo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	A guitarra e seu funcionamento	17
1.1.1	A história	17
1.1.2	Elementos básicos	18
1.1.3	Captação eletromagnética	19
1.2	Os processadores de sinal e áudio para guitarra	20
1.2.1	Pedais analógicos	21
1.2.2	Pedais digitais	21
1.2.3	Processadores multiefeitos	22
1.2.4	Softwares	22
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	24
2.1	A música e o cérebro	24
2.2	O uso do processadores de efeitos como uma ferramenta para o ensino de Física Ondulatória	25
2.3	Noções de Física Ondulatória	26
2.3.1	Ondas progressivas	27
2.3.2	Superposição e ondas estacionárias	28
2.3.3	Interferência construtiva e destrutiva	29
2.3.4	Equação de onda	30
2.4	Noções de Acústica	31
2.4.1	Intensidade, altura e timbre	31
2.4.2	Reflexão, refração e difração	32
2.5	Noções sobre Teoria Musical	32
3	ANÁLISE DE FOURIER	34
4	OS EFEITOS E SUAS CARACTERÍSTICAS ONDULATÓRIAS	38

4.1	Som limpo	40
4.2	Modulação	40
4.2.1	Chorus	41
4.2.2	Flanger	43
4.2.3	Phaser	45
4.2.4	Tremolo	46
4.3	Ganho	48
4.3.1	Distorção	48
4.4	Ambiência	50
4.4.1	Reverb	50
4.4.2	Delay	51
4.5	Filtro	53
4.5.1	Wah-Wah	53
4.5.2	Equalizador	55
4.6	Dinâmico	56
4.6.1	Compressor	56
4.7	Frequência	58
4.7.1	Pitch Shifter	58
5	CONCLUSÕES	60
	REFERÊNCIAS	62

1 INTRODUÇÃO

A música, ao longo dos séculos, é arte pelo qual o ser humano pode expressar e transcender as fronteiras culturais e linguísticas da sociedade. A busca incessante por novas formas de criar e modificar sons levou ao desenvolvimento de uma vasta gama de tecnologias, dentre elas, os processadores de sinal e áudio. Nesse contexto, a guitarra elétrica, como um dos instrumentos mais icônicos e versáteis já criados, tem sido objeto de constante exploração e experimentação. A interação entre música e ciência tem sido uma constante ao longo da história, e a união entre física e música se tornou cada vez mais relevante à medida que a tecnologia avança. Após a criação e a constante evolução dos processadores de sinal e áudio, a compreensão profunda dos princípios físicos por trás dessas tecnologias se tornou uma ferramenta indispensável para músicos, engenheiros de áudio e fabricantes de equipamentos.

O uso de efeitos sonoros na guitarra, desde a distorção que dá origem ao som “sujo” do *rock’n’roll* até os efeitos de modulação que criam ambiências perfeitas, tornou-se uma parte inseparável do universo musical contemporâneo. No entanto, a compreensão completa dos processos físicos que sustentam esses efeitos muitas vezes permanece superficial ou subutilizada, prejudicando o potencial artístico e criativo dos músicos. A premissa subjacente é que cada efeito sonoro gerado por essas ferramentas têm características ondulatórias específicas. A compreensão desses fundamentos ondulatórios é crucial para desbloquear um espectro mais amplo de possibilidades musicais e para permitir aos músicos uma expressão verdadeiramente inovadora. Este estudo se justifica não apenas pela crescente relevância dos processadores de sinal e áudio na indústria musical contemporânea, mas também pelo potencial de avançar nosso entendimento dos fenômenos físicos que governam a geração, transmissão e modificação do som. A aplicação de princípios ondulatórios no contexto musical frequentemente revela novos horizontes de pesquisa, bem como oportunidades para inovações tecnológicas. Ao analisar esses princípios sob uma perspectiva física, podemos expandir nosso conhecimento em áreas como acústica, engenharia de som, eletrônica e física das ondas. No decorrer das análises serão verificados os mais clássicos efeitos sonoros utilizados na guitarra elétrica, buscando correlacionar cada um desses efeitos com os conceitos físicos que os sustentam. Exploraremos a relação entre frequências, amplitudes e fases das ondas sonoras e como essas características podem ser manipuladas eletronicamente para criar uma paleta rica e diversificada de timbres.

A abordagem deste trabalho parte do reconhecimento de que os músicos contemporâneos não apenas utilizam essas tecnologias para criar sonoridades, mas também podem se beneficiar imensamente ao compreender os processos físicos que moldam essas sonoridades.

Ao desvendar as interações e transformações de energia que ocorrem quando uma corda é tocada e sua vibração é processada eletronicamente, expandimos o leque de escolhas estilísticas e abrimos portas para a experimentação. Ao longo dos capítulos seguintes, iremos mergulhar em uma exploração profunda das bases físicas de diferentes efeitos sonoros utilizados na guitarra. A distorção, o *chorus*, o *delay*, a reverberação e muitos outros serão investigados sob uma perspectiva física, demonstrando como fenômenos de interferência, reflexão, refração e modulação estão intrinsecamente ligados a esses efeitos.

Em conclusão, a abordagem física adota aqui visa aprofundar a conexão entre música e ciência, proporcionando aos músicos uma compreensão mais rica e consciente das ferramentas que utilizam. É pertinente que a apreciação das nuances físicas dos processadores de sinal e áudio para guitarra elétrica não apenas enriquece o processo criativo, mas também reforça a importância da colaboração interdisciplinar na busca contínua por novas expressões artísticas e sonoras. A guitarra elétrica, um instrumento popular e versátil que tem sido usado em muitas composições marcantes ao longo dos anos, atua como nosso ponto de partida. Assim como os gregos investigavam os elementos básicos que compunham a realidade, exploramos os elementos fundamentais por trás dos processadores de sinal. Nosso objetivo é descobrir como a física ondulatória manipula as vibrações das cordas e os padrões de ondas sonoras.

Queremos explorar profundamente os processadores de sinal e áudio utilizados na guitarra, adotando uma abordagem fundamentalmente física. Buscamos compreender como os princípios físicos subjacentes, como as propriedades das ondas sonoras estão intrinsecamente ligados aos efeitos sonoros gerados por esses dispositivos. A intenção é não apenas descrever a utilização desses processadores, mas também revelar a ciência que os sustenta, capacitando músicos e entusiastas da guitarra a compreender e explorar os efeitos de maneira mais consciente e criativa.

Logo, esta investigação científica não apenas explora os processadores de efeitos utilizados na guitarra elétrica, mas também oferece a oportunidade de criar pontes interdisciplinares entre a música e a ciência, incentivando o diálogo e a colaboração entre músicos e pesquisadores. A interação entre esses dois domínios pode catalisar o desenvolvimento de tecnologias inovadoras e até mesmo abrir caminho para novos campos de pesquisa, influenciando a maneira como entendemos e manipulamos o som. Ao final deste estudo, espera-se que os leitores obtenham uma compreensão mais profunda e informada das complexidades físicas por trás dos processadores de sinal e áudio para guitarra. Essa compreensão poderá não apenas inspirar novas abordagens na criação musical, mas também pavimentar o caminho para a evolução contínua dessas tecnologias, impulsionando a inovação musical em direções ainda não exploradas.

1.1 A GUITARRA E SEU FUNCIONAMENTO

1.1.1 A história

A guitarra é um dos instrumentos musicais mais populares e versáteis já criados, capaz de evocar uma ampla gama de emoções e estilos musicais. Sua criação e evolução ao longo dos séculos refletem não apenas a busca incessante por novos meios de expressão musical, mas também a diversidade cultural e tecnológica que moldou sua forma e função. Para compreender plenamente o que é uma guitarra e o impacto que ela teve na música ao redor do mundo, é essencial explorar suas origens, seu desenvolvimento histórico e seu papel na cultura contemporânea. As raízes da guitarra podem ser rastreadas até os antigos povos da Babilônia e Assíria, que criaram instrumentos de cordas pulsantes, ancestrais dos modernos instrumentos de cordas. No entanto, o formato e a função da guitarra como a conhecemos hoje foram gradualmente moldados ao longo de muitos séculos.

Durante a Idade Média, instrumentos como a lira¹ e a guitarra mourisca² desempenharam papéis cruciais na música da época (PEREIRA, 2016). No entanto, foi somente durante o Renascimento que as primeiras formas reconhecíveis de guitarra começaram a emergir, com características mais próximas das guitarras modernas. No início, a guitarra era frequentemente associada à música popular e folclórica, sendo usada como acompanhamento para canções e danças.

Durante os séculos XVII e XVIII, a guitarra passou por várias mudanças estruturais e ganhou popularidade nas cortes reais da Europa (AFFONSO; GLOEDEN, 2015). O desenvolvimento de novas técnicas de construção e o refinamento da afinação contribuíram para a evolução do instrumento. No entanto, foi no século XIX que a guitarra passou por transformações mais significativas, incluindo a mudança para seis cordas, a introdução do braço com casas e a adoção do estilo de tocar com os dedos.

A evolução da guitarra não se limitou a um único local ou cultura. Ao longo da história, diferentes regiões contribuíram para a criação e desenvolvimento da guitarra em suas formas regionais distintas. Na Espanha, por exemplo, a guitarra clássica emergiu como um instrumento de grande prestígio, especialmente durante o século XIX. O virtuosismo dos músicos espanhóis e a técnica *flamenco*³ contribuíram para estabelecer a guitarra como um instrumento musical sofisticado. Na América Latina, a guitarra também desempenhou

¹ Instrumento de cordas associado à antiguidade clássica, conhecido por sua caixa de ressonância e cordas tensionadas. Foi utilizado na Grécia Antiga e em outras culturas do Mediterrâneo.

² Instrumento de origem árabe, caracterizado por sua forma de alaúde e cordas de tripa. Desenvolveu-se na Península Ibérica durante o período da ocupação moura, influenciando a evolução da guitarra espanhola.

³ Estilo musical e artístico espanhol caracterizado por sua intensidade emocional, expressão vibrante e fusão de canto, dança e música instrumental.

um papel fundamental nas tradições musicais. Gêneros como o samba, a bossa nova e o tango incorporaram a guitarra de maneira única, expressando as identidades culturais e emocionais dessas regiões. Em nosso cotidiano, a guitarra é uma presença onipresente na música moderna, abrangendo gêneros que vão desde o *rock* e o *pop* até o *jazz*, o *blues*, o *folk* e etc. Sua versatilidade permite que ela se adapte a uma variedade de estilos musicais, tornando-se um meio de expressão para músicos em todo o mundo. A guitarra elétrica, introduzida no século XX, revolucionou a música ao permitir amplificação e efeitos sonoros inovadores, inaugurando uma nova era de possibilidades musicais.

1.1.2 Elementos básicos

Para compreender plenamente a guitarra e sua interação com a música, é fundamental mergulhar nos elementos básicos que compõem a guitarra elétrica e como cada componente contribui para a criação do som distintivo para esse instrumento versátil e cativante. Dentre os elementos, temos:

1. **Corpo:** Principal estrutura do instrumento que abriga todos os outros componentes. Ele não apenas oferece suporte estrutural, mas também desempenha um papel crucial na ressonância e na projeção do som. O formato do corpo varia entre diferentes modelos de guitarra e pode influenciar a tonalidade geral do instrumento.
2. **Braço:** Longa peça que se estende a partir do corpo. Ele é tipicamente feito de madeira e é onde as casas (espaços entre os trastes no braço) estão localizadas, e ao pressionar as cordas nas casas, a frequência das vibrações da corda é alterada, produzindo diferentes notas musicais.
3. **Escala:** Superfície plana do braço onde as casas estão posicionadas.
4. **Cordas:** Componentes mais fundamentais, pois são responsáveis por produzir as vibrações que geram o som. Geralmente feitas de aço ou nylon, cada corda é afinada em uma nota específica. A diferença de afinação entre as cordas e sua tensão influenciam a faixa tonal da guitarra.
5. **Pestana ou capotraste:** Pequena peça localizada na extremidade superior do braço, próxima ao headstock. Ela é responsável por elevar as cordas ligeiramente, permitindo que elas vibrem livremente sobre o braço. O rastilho, localizado na extremidade oposta da guitarra, transfere a vibração das cordas para a caixa de ressonância.
6. **Captadores:** Dispositivos magnéticos localizados sob as cordas, geralmente embutidos no corpo da guitarra. Eles convertem as vibrações das cordas em sinais elétricos, que podem ser amplificados e modificados através de processadores de sinal e áudio.

7. **Ponte:** Peça onde as cordas são ancoradas na extremidade oposta do corpo da guitarra. Ela sustenta as cordas no lugar e permite ajustes de altura e entonação, afetando a afinação e a tocabilidade.
8. **Tarraxas:** Estão localizadas no *headstock* da guitarra. Elas permitem afinar cada corda individualmente, ajustando a tensão das cordas para obter as notas desejadas.
9. **Potenciômetro:** Sua principal função é ajustar a quantidade de sinal elétrico que passa pelo circuito, permitindo ao músico controlar o volume geral do instrumento ou a quantidade de agudos (tonalidade) no sinal de saída.

Figura 1 – Elementos básicos da guitarra elétrica



Fonte: Página Canone Musical⁴.

1.1.3 Captação eletromagnética

A captação eletromagnética é um dos elementos cruciais que conferem à guitarra sua versatilidade e capacidade de ser amplificada e processada de várias maneiras. Esse processo, que transforma as vibrações das cordas em sinais elétricos, é fundamental para o som característico da guitarra elétrica e sua adaptação a diferentes estilos musicais. A captação eletromagnética baseia-se nos princípios da indução eletromagnética, uma descoberta notável de Michael Faraday e Joseph Henry no século XIX. Esses princípios afirmam que uma corrente elétrica pode ser gerada por meio da variação do fluxo magnético em uma bobina de fio condutor (NUSSENZVEIG, 2015).

⁴ Disponível em: <<https://canone.com.br/guitarra/120-nome-das-cordas-e-partes-da-guitarra-e-violao>>. Acesso em: 28 out. 2023.

Figura 2 – Captador mini humbucker dual rail de alnico



Fonte: Site da Amazon⁵.

Os captadores da guitarra consistem em uma ou mais bobinas de fio enrolado várias vezes em torno de um núcleo magnético, que ampliam o campo magnético gerado pela corrente elétrica que passa por ele. Quando uma corda de metal vibra sobre esse campo magnético, ela altera o fluxo magnético na bobina (FLETCHER; ROSSING, 2012). Isso ocorre porque a variação do fluxo magnético por um circuito gera uma força eletromotriz induzida. Esse fluxo variável gera uma corrente elétrica na bobina, que é, por sua vez, enviada para o amplificador por meio dos cabos da guitarra. Existem vários tipos de captadores utilizados em guitarras, cada um com características tonais distintas. Dentre os mais clássicos estão o *Single Coil*⁶, *Humbucker*⁷ e o P-90⁸.

1.2 OS PROCESSADORES DE SINAL E ÁUDIO PARA GUITARRA

Os processadores de sinal e áudio são dispositivos essenciais na criação de efeitos sonoros e modificações timbrais para guitarristas e músicos. Eles desempenham um papel vital na moldagem do som da guitarra, oferecendo uma variedade de efeitos que vão desde a distorção clássica até modulações complexas e ambiências atmosféricas. Esses processadores podem ser encontrados em várias formas, incluindo pedais analógicos e digitais, pedaleiras e softwares de simulação de efeitos. Vale ressaltar que esses processadores são usados em vários outros instrumentos, incluindo na própria voz, mas é popularmente mais conhecido

⁵ Disponível em: <<https://www.amazon.com.br/guitarra-eletrica-captador-humbucker-reposicao/>>. Acesso em: 28 out. 2023.

⁶ Captador constituído de uma bobina simples.

⁷ Captador duplo, é praticamente a soma de dois Single Coil.

⁸ Captador Single Coil com ímãs de alnico.

na guitarra elétrica. Vamos explorar cada uma dessas categorias para entender melhor o que são e como funcionam.

1.2.1 Pedais analógicos

São dispositivos compactos que contêm circuitos eletrônicos projetados para gerar efeitos sonoros específicos. Eles geralmente são operados individualmente e são conectados em série com a guitarra, permitindo aos músicos acionar os efeitos conforme necessário durante a performance. Os pedais analógicos frequentemente preservam a qualidade sonora "quente e orgânica", característica pertinente de tonalidades suaves e rica das tecnologias mais antigas. Além disso, proporcionam uma experiência tátil única durante a execução musical.

Figura 3 – Pedal analógico da Boss



Fonte: Autor (2023).

A alimentação desses pedais é geralmente feita por uma fonte de $9V\ DC$ ⁹ com polaridade centro invertida e a maioria deles consomem em média $30mA$. Caso um músico precise montar um *setup*¹⁰ com 8 pedais e a soma da corrente de todos os pedais é igual a $280mA$, então precisaríamos de uma fonte de alimentação de pelo menos $300mA$.

1.2.2 Pedais digitais

Essa categoria usa tecnologia digital para processar o sinal da guitarra. Eles oferecem uma ampla gama de efeitos e costumam incluir presets programáveis, o que facilita a alteração rápida dos sons durante uma apresentação. Os pedais digitais podem

⁹ Fonte de alimentação que fornece uma corrente elétrica contínua (DC, do inglês Direct Current), com uma voltagem de 9 volts.

¹⁰ Combinação com vários pedais organizados para criar timbres específicos.

reproduzir uma variedade de efeitos com alta precisão e flexibilidade, incluindo simulações de amplificadores e efeitos clássicos. Esses pedais geralmente consomem mais de 100mA.

Figura 4 – Pedal digital da Strymon



Fonte: Autor (2023).

1.2.3 Processadores multiefeitos

Popularmente conhecidas como pedaleiras, são unidades multifuncionais que reúnem diversos efeitos e funcionalidades em um único dispositivo. Elas podem incluir uma variedade de pedais digitais, permitindo aos músicos criar cadeias complexas de efeitos, ajustar parâmetros e salvar configurações personalizadas. As pedaleiras são populares entre músicos que desejam uma ampla gama de opções de som em um único equipamento.

Figura 5 – Processador multiefeitos da Boss



Fonte: Autor (2023).

1.2.4 Softwares

Os *softwares* de simulação de efeitos são programas ou *plug-ins*¹¹ para computadores que permitem aos músicos replicar virtualmente os efeitos produzidos por pedais

¹¹ Refere-se a um software ou módulo que pode ser adicionado a um programa principal para adicionar funcionalidades extras ou recursos específicos.

analógicos e digitais. Eles podem ser integrados a programas de gravação e as estações de trabalho digital de áudio (DAWs, sigla em inglês para Digital Audio Workstations) para criar uma experiência completa de produção musical.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A formulação aqui desenvolvida trata, primeiramente, sobre a importância da música no ensino de física e como essas ferramentas musicais podem contribuir de alguma forma para aplicações em sala de aula. Logo após, tratamos de trazer uma abordagem básica sobre a física ondulatória, acústica e teoria musical.

2.1 A MÚSICA E O CÉREBRO

É comum que uma música nos traga a lembrança de um momento, um lugar, uma pessoa, até mesmo de sentimentos. Esta associação entre memória e uma música acontece porque ao longo de toda a vida nosso cérebro é exposto a diversas melodias, notas, padrões musicais, letras e é “treinado” para fazer associações entre eles. Enquanto ouvimos uma música, suas ondas sonoras alcançam nossos tímpanos transformando-se em impulsos nervosos elétricos que registram em nossas mentes os diferentes tipos de som que estamos ouvindo. Isso acontece porque o nosso sistema auditivo é bastante desenvolvido e possui diversas ligações com todo o nosso corpo. Estudos mostraram que o impacto da música no sistema nervoso e as mudanças emocionais provocados direta ou indiretamente pelo tálamo afetam processos tais como a frequência cardíaca, a respiração, a pressão sanguínea, a digestão, o equilíbrio hormonal, o humor e as atitudes. Conforme (MUSZKAT, 2019), os tratamentos realizados tendo como instrumento principal a música são conhecidos e utilizados já há séculos. Estimular o cérebro por meio da música promove o aprimoramento da flexibilidade mental e da coesão social. Esse estímulo é alcançado através de atividades como dança e jogos musicais, potencializando assim as técnicas de recuperação física e cognitiva. A inteligência musical é uma característica compartilhada e maleável, podendo ser observada em graus notáveis, inclusive em crianças com deficiência intelectual. As raízes dos nervos do ouvido são extensamente distribuídas e possuem mais ligações com todas as funções de nosso organismo que qualquer outro órgão sensitivo. Cada vez que nós ouvimos um padrão musical que é novo para os nossos ouvidos, nosso cérebro tenta fazer uma associação através de qualquer sinal visual, auditivo ou sensorial. Segundo (LEVITIN, 2021), nós tentamos contextualizar os novos sons e, eventualmente, criamos esses links de memória entre um conjunto particular de notas e um determinado local, hora ou conjunto de eventos. A memória também contribui para que a música seja capaz de nos emocionar e até nos fazer chorar. Ao compreender a influência da música no comportamento humano constatou-se que realmente ela exerce um papel preponderante na vida das pessoas, sendo algumas de suas vantagens a aquisição de atividades motoras, desenvolvimento da percepção musical, dos sentimentos, da personalidade, da identidade e muitas outras funções que beneficiam a memória.

2.2 O USO DO PROCESSADORES DE EFEITOS COMO UMA FERRAMENTA PARA O ENSINO DE FÍSICA ONDULATÓRIA

Uma das dificuldades mais comuns encontradas pelos estudantes ao lidar com a disciplina de Física muitas vezes estão relacionadas à falta de conexão entre os conteúdos ensinados em sala de aula e suas vidas cotidianas. A física ondulatória, por sua vez, não só proporciona uma compreensão aprofundada de diversos fenômenos ondulatórios, mas também abre portas para a compreensão de outras áreas da física. Isso ressalta mais ainda a necessidade de os professores incorporarem a contextualização ao ensinar os conceitos, de modo a tornar o aprendizado mais significativo. Ao fazer isso, os educadores podem proporcionar aos alunos uma experiência de aprendizado mais enriquecedora, o que, por sua vez, contribui para a melhoria da qualidade do ensino. Segundo (PINTO, 2011) poucos professores, principalmente os da rede pública, trabalham conteúdos de ondulatória, especialmente voltados à acústica e a instrumentos musicais.

A relação entre a música e a física é uma interconexão rica e significativa que tem sido explorada por estudiosos e cientistas ao longo da história (ABDOUNUR; PEREIRA, 2022). Muitos autores destacaram a importância da música como um campo de estudo nas escolas. Segundo (GRANJA, 2006), a música pode contribuir para reequilibrar as dinâmicas de aprendizagem na escola, aproximando, de um lado, o tácito do explícito, e de outro, o perceptivo do cognitivo.

A compreensão dos conceitos fundamentais da física ondulatória, como frequência, amplitude, fase, interferência e ressonância, é crucial para explicar a produção, propagação e modulação do som. Nesse contexto, processadores de efeitos para guitarra e outros instrumentos musicais podem desempenhar um papel essencial na manipulação e aprimoramento do som, permitindo aos músicos explorar uma variedade de efeitos sonoros, criar texturas únicas e expandir suas possibilidades expressivas durante a execução musical. A literatura acadêmica tem relatado várias experiências bem-sucedidas que incorporam o uso de instrumentos musicais para o ensino de física ondulatória. No artigo 'Propostas para o Ensino de Ondas e Acústica Utilizando Música e Instrumentos Musicais' (LOPES et al., 2005), os autores apresentam alguns instrumentos aos alunos, para que estes sirvam como ferramentas para o ensino de alguns conceitos físicos. Como resultado desta ação, os autores perceberam que alguns dos alunos que possuíam conhecimentos musicais tiveram maior interesse em aprender os conhecimentos científicos relacionados ao tema (CHIERECCI, 2013). A compreensão da música para além do fenômeno estritamente sonoro, ou como uma forma de pensamento analógico são alguns dos aspectos que podem fundamentar projetos de integração da música na escola (GRANJA, 2005).

O ensino da física ondulatória, muitas vezes percebido como abstrato e desafiador,

pode se beneficiar do uso da tecnologia para tornar os conceitos mais concretos e acessíveis (MELO et al., 2021). O uso de aplicações com o recurso dos pedais de efeitos pode permitir aos alunos explorar as mudanças nas características do som, como a distorção, a modulação e a reverberação, enquanto observam como essas alterações afetam as ondas sonoras. Essa abordagem também permite que os alunos experimentem de forma tangível os conceitos de interferência, difração e transformações espectrais, que são fundamentais na física das ondas. A interação direta com equipamentos de áudio e a audição de variações sonoras ajudam os alunos a visualizar e compreender a física ondulatória de maneira mais intuitiva. O som é uma perturbação mecânica que se propaga em todas as direções, e que os estudantes podem ouvir, sentir e experimentar, tornando a aprendizagem mais imersiva. Como resultado, os alunos poderão ser mais propensos a se envolver ativamente e a reter uma compreensão mais profunda dos princípios físicos. Além disso, essa abordagem pode fomentar a criatividade dos alunos, incentivando-os a explorar novas sonoridades e efeitos, desenvolvendo uma compreensão mais rica das possibilidades do som e da física que o governa.

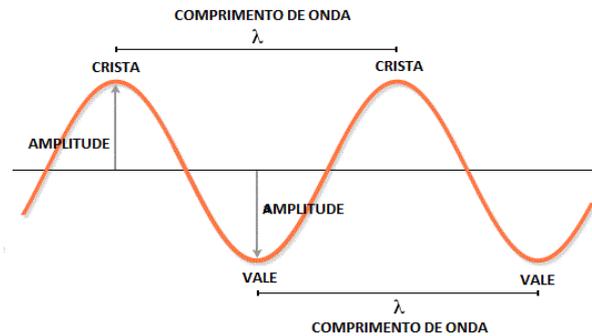
2.3 NOÇÕES DE FÍSICA ONDULATÓRIA

A ondulatória é um ramo da física que estuda as propriedades das ondas e como elas se propagam pelo espaço. O estudo de fenômenos ondulatórios, está ligado a alguns dos conceitos mais importantes da física (NUSSENZVEIG, 2018). Uma onda é uma perturbação que se propaga através do espaço, transportando energia sem transportar matéria. As ondas podem assumir diferentes formas, como ondas sonoras, ondas em cordas eletromagnéticas e ondas na água (WALKER et al., 2009). Essas perturbações podem ser descritas por suas propriedades, como amplitude, frequência e comprimento de onda. O tempo necessário para que uma onda complete um ciclo é denominado período e é representado pela letra T . Se conhecemos o período de uma onda podemos determinar a frequência ν através da relação

$$T = \frac{1}{\nu} \quad (2.1)$$

A frequência de uma onda é o número de ciclos (oscilações completas) que a onda realiza em um segundo. O comprimento de onda é a distância entre dois pontos equivalentes em ciclos consecutivos. A relação entre a frequência, o comprimento de onda e a velocidade de propagação de uma onda é dada pelo produto do comprimento de onda pela frequência (SEARS et al., 2008).

Figura 6 – Representação para um comprimento de onda e sua amplitude



Fonte: Página Infoenem¹.

A velocidade de propagação de uma onda depende das propriedades do meio através do qual ela se move. Em meios diferentes, a mesma onda pode se propagar a velocidades diferentes. Isso é importante ao considerar a propagação do som em diferentes materiais, como o ar e a madeira da guitarra.

Se considerarmos um movimento periódico, o deslocamento angular de uma volta completa 2π , e o tempo como o período T , a frequência angular pode ser escrita como

$$\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T} = kv \quad (2.2)$$

2.3.1 Ondas progressivas

Uma onda progressiva é um tipo de onda que se propaga na direção de sua frente de onda. Isso significa que as oscilações ocorrem ao longo da direção de propagação da onda. Uma forma geral de uma onda progressiva em uma dimensão é

$$y(x, t) = f(x - vt) + z(x + vt) \quad (2.3)$$

onde a expressão acima descreve a onda na direção positiva do eixo x , com contribuições de ambas as funções f e z . Uma onda transversal é um tipo de onda em que a direção de oscilação é perpendicular à direção de propagação da onda. Uma das características das ondas em uma corda vibrante é o fato de elas serem transversais. Esse tipo ocorre quando a onda se move em uma direção perpendicular à direção em que osciladores individuais se movem (BAUER et al., 2013). Já as ondas nos quais o movimento se dá ao longo da direção de propagação da perturbação são chamadas de ondas longitudinais. Um exemplo são as ondas sonoras (TIPLER; MOSCA, 2016). Para determinar a velocidade de onda em uma corda com tensão τ e densidade linear μ usamos a expressão

$$v = \sqrt{\frac{\tau}{\mu}} \quad (2.4)$$

¹ Disponível em: <<https://infoenem.com.br/conceitos-iniciais-sobre-ondas-no-enem/>>

Se uma onda periódica viaja ao longo de uma corda esticada, cada ponto ao longo do meio também irá oscilar com o mesmo período T . Ondas harmônicas são um exemplo de ondas periódicas. Quando um músico toca a corda de uma guitarra ela se oscilará a partir da sua posição de equilíbrio. Quando uma onda é gerada em uma corda, ocorrem variações nas posições das partículas, resultando em movimentos para cima e para baixo que geram regiões de compressão e rarefação. Durante esse processo, a energia é transferida, permitindo a propagação da onda ao longo da corda. Essa transferência de energia envolve perturbações ao longo do meio elástico, com a energia sendo transferida como energia cinética e potencial elástica, sendo a quantidade transportada influenciada pela amplitude e frequência da onda.

Em uma onda senoidal a amplitude é a máxima distância que uma partícula do meio se afasta da posição de equilíbrio. A intensidade da onda está diretamente relacionada à amplitude e determina a quantidade de energia transportada pela onda, por isso dizemos que sons de grande intensidade são sons fortes, enquanto sons de baixa intensidade são fracos.

$$I = \frac{1}{2} \rho \omega^2 A^2 \quad (2.5)$$

onde ρ é a densidade do meio no qual a onda está se propagando. Assim, a intensidade da onda é proporcional ao quadrado da amplitude, à velocidade da onda e ao quadrado da frequência angular (NUSSENZVEIG, 2018).

2.3.2 Superposição e ondas estacionárias

As ondas harmônicas são ondas simples que possuem uma única frequência. Por outro lado, as ondas complexas são compostas por várias frequências diferentes, resultando em um espectro de frequências mais amplo. No contexto dos pedais de guitarra, a combinação de frequências pode ser usada para criar timbres específicos. Uma onda harmônica viajando no sentido positivo do eixo x com os mesmos números de onda, amplitude e frequência é dada por (TIPLER; MOSCA, 2016)

$$f(t) = A \sin(kx - \omega t + \phi) \quad (2.6)$$

onde argumento $(kx - \omega t + \phi)$ é a fase, e ϕ é a constante de fase ou fase inicial. Quando a fase é igual a $\pi/2$ a onda começa no ponto máximo.

Considerando novamente nosso exemplo de uma guitarra, ao tocar uma nota específica, a corda vibra na sua frequência de ressonância², produzindo um som nítido e sustentado correspondente à nota tocada. Para certas frequências, padrões de onda são produzidos. A menor frequência de ressonância é a chamada frequência fundamental ν_1 , e

² Frequência que causa uma resposta vibratória mais intensa e eficiente em um sistema.

ela produz o padrão de onda estacionária chamado de primeiro harmônico. Cada frequência produzirá seu harmônico. O conjunto de todas as frequências ressonantes é chamado de espectro de ressonância (TIPLER; MOSCA, 2016). A relação entre as frequências de ressonância, velocidade e o comprimento da corda no n-ésimo harmônico é dada por

$$L = n \frac{\lambda_n}{2} \quad (n = 1, 2, 3, \dots), \quad (2.7)$$

onde L é o comprimento da corda. Toda corda vibrante possui uma frequência fundamental dada por (LAPP, 2003)

$$\nu_n = \frac{\omega_1}{2\pi} = \frac{v}{2L} = \frac{\sqrt{\tau/\mu}}{2L}, \quad (2.8)$$

e as demais são múltiplos inteiros desta frequência fundamental

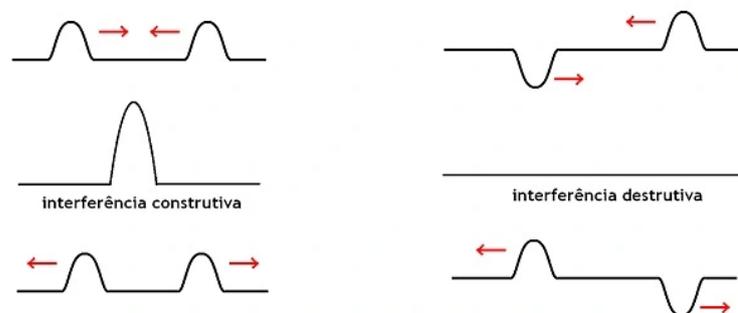
$$\nu_n = n\nu_1 \quad (n = 1, 2, 3, \dots). \quad (2.9)$$

O princípio da superposição afirma que, quando duas ou mais ondas se encontram, elas se somam para criar uma nova onda resultante. A combinação de dois pulsos separados em um mesmo ponto para obter um deslocamento resultante é um exemplo (SEARS et al., 2008). Isso é fundamental para entender como os pedais de guitarra combinam diferentes efeitos para produzir o som final. Essa interação pode levar a fenômenos de interferência de ondas.

2.3.3 Interferência construtiva e destrutiva

A interferência é um fenômeno que ocorre quando duas ou mais ondas se sobrepõem, podendo ser categorizada em dois tipos principais: construtiva e destrutiva.

Figura 7 – Interferências construtiva e destrutiva



Fonte: Blog da Matrika³

³ Disponível em: <<https://matrikablog.wordpress.com/2015/08/10/a-forca-da-interferencia-construtiva/>>.

Na interferência construtiva, as ondas estão em fase, resultando na soma de suas amplitudes individuais, onde as cristas se alinham. Matematicamente, a amplitude resultante ($A_{resultante}$) é expressa como a soma das amplitudes individuais (A_1 e A_2):

$$A_{resultante} = A_1 + A_2 \quad (2.10)$$

Por outro lado, na interferência destrutiva, as ondas estão em fases diferentes. As cristas de uma onda se alinham com os vales da outra, resultando na diferença das amplitudes individuais. Isso leva a uma amplitude resultante ($A_{resultante}$) expressa como:

$$A_{resultante} = |A_1 - A_2| \quad (2.11)$$

Se duas ondas têm características idênticas, exceto pela fase de oscilação, a amplitude resultante é nula, interrompendo o movimento oscilatório.

2.3.4 Equação de onda

Podemos escrever a equação de onda da seguinte forma

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = 0 \quad (2.12)$$

Restringindo-se ao caso de ondas harmônicas, se propagando com sentidos opostos na corda, podemos encontrar a solução em termos de ondas estacionárias (LAGO, 2015).

$$\begin{aligned} \psi(x, t) &= \frac{A}{2} \cos(kx - \omega t + \phi_1) + \frac{A}{2} \cos(kx + \omega t + \phi_2), \\ &= A \cos(kx + \beta) \cos(\omega t + \delta). \end{aligned} \quad (2.13)$$

sendo $\beta = \frac{1}{2}(\phi_1 - \phi_2)$, $\delta = \frac{1}{2}(\phi_1 + \phi_2)$ e $\omega = kv$. Note que esta onda não se propaga (não é função de $kx \pm \omega t$) (LAGO, 2015). As condições de contorno para uma corda de comprimento L com ambos os extremos fixos são expressas como $\psi(0, t) = 0$ e $\psi(L, t) = 0$. Ao impor essas condições, determinamos o valor de β e identificamos os potenciais valores para k .

$$\beta = \frac{\pi}{2}, \quad (2.14)$$

$$k_n = \frac{n\pi}{L} \quad (n = 1, 2, 3, \dots), \quad (2.15)$$

$$\omega_n = \frac{n\pi v}{L} \quad (n = 1, 2, 3, \dots), \quad (2.16)$$

de forma que os modos normais são

$$\psi_n(x, t) = A_n \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \cos\left(\frac{n\pi vt}{L} + \delta_n\right). \quad (2.17)$$

onde a solução geral será uma combinação linear de todos os modos normais (LAGO, 2015).

$$\Psi(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \psi_n(x, t). \quad (2.18)$$

2.4 NOÇÕES DE ACÚSTICA

A acústica é um ramo da física que se concentra no estudo de fenômenos ondulatórios, em especial no som e suas interações. Por sua vez, som é a percepção auditiva que nossos ouvidos conseguem detectar. Essa percepção é o resultado do movimento organizado das partículas do ar. Ao perturbar um diapasão, criamos uma oscilação no ar que se propaga até ser captada pelos nossos ouvidos, dando origem ao que chamamos de som. Na música, a acústica desempenha um papel crucial, uma vez que o desenvolvimento e o processo criativo artístico dependem dela. Sem o estudo do som, que por sua vez contribuem nas criações de combinações, harmonias, escalas, acordes e interações entre as notas musicais, a música não existiria.

2.4.1 Intensidade, altura e timbre

A intensidade é a característica que habilita o ouvido a diferenciar os sons fracos ou não. A percepção da intensidade pelo ouvido humano segue uma escala logarítmica, e a unidade utilizada para medição é o decibel (dB). Além disso, a percepção varia com a frequência, sendo mais sensível na faixa de 2 kHz a 5 kHz. Vale ressaltar que nosso ouvido só consegue perceber sons entre aproximadamente 20 Hz e 20 000 Hz. O nível de intensidade sonora η é dado pela seguinte expressão

$$\eta = (10dB) \cdot \log\left(\frac{I}{I_0}\right) \quad (2.19)$$

onde I é a intensidade sonora do som em (W/m^2), I_0 é a intensidade sonora de referência, que é comumente definida como $10^{-12} \text{ W}/\text{m}^2$, o limiar da audição humana.

A altura é a qualidade que permite ao ouvido distinguir entre sons graves e agudos e depende principalmente da frequência do som. Na música, a altura é frequentemente representada por meio dos nomes das notas musicais, que são definidos com base em sua posição em uma escala harmônica específica.

Uma outra peculiaridade a ser considerada envolve a capacidade de diferenciar os timbres produzidos por distintos instrumentos musicais. Tomemos, por exemplo, os

sons gerados pelos pedais de efeito chorus e flanger, os quais se mostram nitidamente contrastantes, apesar da ocorrência de ondas sonoras com a mesma frequência fundamental. Essa discrepância ocorre devido às características de processamento e ajustes desses pedais, que determinam as diversas frequências harmônicas presentes e a maneira como são expressas na emissão sonora. A essa característica que nos permite distinguir sons com idêntica altura e intensidade provenientes de fontes diversas damos o nome de timbre e é através dele que conseguimos reconhecer as características únicas das vozes das pessoas e distinguir uma mesma nota musical quando tocada em diferentes instrumentos. Isso se traduz como uma espécie de "assinatura" sonora. Isso ocorre devido à composição das ondas sonoras, chamadas harmônicos. A presença desses harmônicos e suas intensidades relativas na composição de cada som é única para fontes sonoras distintas. Cada fonte sonora possui uma característica específica que a distingue das demais, o que dá a ela um timbre específico. Cada categoria de instrumento musical é dotada de um caráter sonoro distintivo, caracterizado por um conjunto particular de atributos acústicos. Esses atributos, embora possam parecer subjetivos à primeira vista, possuem uma descrição matemática extremamente precisa que confere singularidade a cada instrumento. Ao emitir a mesma nota musical, um violão e um piano produzem sons distintos.

2.4.2 Reflexão, refração e difração

A reflexão ocorre quando uma onda encontra uma superfície e retorna ao meio original. Isso é observado, por exemplo, quando o som é refletido em paredes ou superfícies sólidas. A reflexão é importante na acústica de ambientes e na criação de efeitos de reverberação em pedais de guitarra. A refração acontece quando uma onda passa de um meio para outro e muda de direção devido à mudança de velocidade. Isso é evidente quando a luz passa através de um prisma, por exemplo. A refração é relevante em alguns pedais de delay, onde as ondas são refratadas para criar efeitos de eco. A difração ocorre quando uma onda encontra uma abertura ou obstáculo e se espalha em diferentes direções. Quanto maior o comprimento de onda em relação à abertura, mais pronunciada é a difração. Em pedais de guitarra, esse fenômeno pode afetar a forma como o som se propaga e é modificado.

2.5 NOÇÕES SOBRE TEORIA MUSICAL

Na música cada nota musical de um instrumento não se limita a possuir apenas uma frequência, mas sim um conjunto de frequências que se originam das características de timbre de cada instrumento (PARKER, 2009). Contudo, dentro desse conjunto, existe uma frequência que está diretamente associada à nota musical, chamada de frequência fundamental (ou frequência básica). Essa frequência fundamental representa o som mais grave entre todas as componentes de uma nota. A nota Lá (A), usada como referência

para afinar instrumentos musicais, vibra a uma frequência de 440 vezes por segundo (440 Hz). Sempre que essa frequência dobra ou diminui pela metade, a oitava sobe ou desce. Portanto, temos as seguintes relações:

$A\ 440\ \text{Hz} \rightarrow$ dobrando a frequência $\rightarrow A\ 880\ \text{Hz}$ (1 oitava acima)

$A\ 440\ \text{Hz} \rightarrow$ dividindo a frequência pela metade $\rightarrow A\ 220\ \text{Hz}$ (1 oitava abaixo)

As frequências para cada corda solta da guitarra elétrica na afinação padrão estão representadas na Tabela (1).

Tabela 1 – Tabela de frequências para cada corda solta de uma guitarra elétrica

Corda	Nota	Frequência Aproximada (Hz)	Frequência Arredondada (Hz)
1	<i>e</i>	329.781	330
2	<i>B</i>	246.832	247
3	<i>G</i>	195.831	196
4	<i>D</i>	146.823	147
5	<i>A</i>	110.000	110
6	<i>E</i>	82.200	82

Fonte: Autor (2023).

Quando a quinta corda é tocada solta, emite a nota Lá(*A*) a 110 Hz. Ao pressionar a corda 5 na casa 12, estamos dividindo a corda pela metade, e a frequência dobra para Lá será de 220 Hz, que é uma oitava acima da corda solta. Ao pressionar a corda 5 na casa 24 estamos dividindo-a em quatro partes, e a frequência quadruplica, resultando em Lá 440 Hz, duas oitavas acima da corda solta. Ao pressionar a corda em qualquer outra casa, estamos alterando o comprimento da corda e, conseqüentemente, sua frequência de vibração, o que resulta em uma nota diferente.

3 ANÁLISE DE FOURIER

O som pode ser descrito como a combinação de diferentes componentes harmônicas mais simples. Essas componentes harmônicas são representadas através da série de Fourier (FLETCHER; ROSSING, 2012), e a intensidade de cada frequência harmônica é influenciada pelas propriedades do instrumento ou da fonte sonora. Essas características individuais do instrumento são o que conferem a qualidade única do som, também conhecida como timbre.

Para um sinal periódico $f(t)$ com período T , a Série de Fourier pode ser expressa em termos da série trigonométrica na forma

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (3.1)$$

onde $\omega = 2\pi/T$ é a frequência fundamental, a_0 é o coeficiente da componente de frequência zero, a_n e b_n são os coeficientes das componentes senoidais (cossenos e senos) de frequência $\frac{n}{T}$, e n é um número inteiro que representa a ordem das componentes harmônicas.

Os coeficientes a_0 , a_n , e b_n podem ser calculados considerando a integral I ¹

$$I = \int_0^T \cos n\omega t \cos m\omega t dt \quad (3.2)$$

onde a integral escolhida representa a integração em um intervalo contínuo de T segundos (LATHI; GREEN, 2005). Usando as identidades trigonométricas podemos fazer

$$I = \frac{1}{2} \left[\int_0^T \cos [(n+m)\omega t], dt + \int_0^T \cos [(n-m)\omega t], dt \right] \quad (3.3)$$

onde a primeira expressão da equação (3.3) é nula, pois o $\cos [(n+m)\omega t]$ realiza $(n+m)$ ciclos completos em qualquer intervalo de tempo T . O mesmo acontece para a segunda expressão, exceto quando $n = m$. Logo, (3.3) é nula para todo $n \neq m$ (LATHI; GREEN, 2005). Se $n = m$, I é zero, restando apenas

$$I = \frac{1}{2} \int_0^T dt = \frac{T}{2}, \quad (3.4)$$

onde

$$\int_0^T \cos n\omega t \cos m\omega t dt = \begin{cases} 0, & \text{se } n \neq m \\ \frac{T}{2}, & \text{se } n = m \neq 0 \end{cases}$$

¹ Observe que aqui I refere-se a integral. No capítulo anterior usamos I como sendo a intensidade da onda.

e

$$\int_0^T \sin n\omega t \sin m\omega t dt = \begin{cases} 0, & \text{se } n \neq m \\ \frac{T}{2}, & \text{se } n = m \neq 0 \end{cases}$$

logo

$$\int_0^T \sin n\omega t \cos m\omega t dt = 0, \quad \forall n, m$$

Para encontrar o coeficiente a_0 na equação (3.1), é necessário integrar ambos os lados da equação para um período T . É importante lembrar que T representa o período da senoide com frequência ω . Conseqüentemente, as funções $\cos n\omega t$ e $\sin n\omega t$ completam n ciclos inteiros em qualquer intervalo de T segundos, o que implica que a área sob essas funções em um intervalo T é nula. Ao fazermos essa integração teremos como resultado que as duas últimas integrais no lado direito serão igualmente nulas (LATHI; GREEN, 2005), levando a

$$\begin{aligned} \int_0^T f(t) dt &= a_0 \int_0^T dt = a_0 T \\ a_0 &= \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt, \end{aligned} \quad (3.5)$$

Multiplicando ambos os lados da equação (3.1) por $\cos(m\omega t)$ e integrando a equação resultante ao longo do intervalo T , vemos que a primeira integral do lado direito é nula, representando a área sob um número integral de m ciclos de uma senoide. Como última integral do lado direito é anulada, ficamos apenas com a integral do meio, que também se anula para todos os $n \neq m$. No entanto, dado que n assume todos os valores de 1 até ∞ , incluindo m , quando $n = m$, esta integral é $\frac{T}{2}$ (LATHI; GREEN, 2005). Logo, dentre o infinito de termos do lado direito, apenas um sobrevive, resultando em $\frac{a_n T}{2} = \frac{a_m T}{2}$ (considerando que $n = m$). Dessa forma,

$$\int_0^T f(t) \cos m\omega t dt = \frac{a_m T}{2}$$

e como $n = m$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos n\omega t dt \quad (3.6)$$

e da mesma como fizemos multiplicando (3.1) por $\cos(n\omega t)$, fazemos para $\sin(n\omega t)$, daí

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin n\omega t dt \quad (3.7)$$

que é exatamente o que queríamos encontrar.

Podemos escrever a equação (3.1) na forma complexa. Para isso, usamos a identidade de Euler para escrever em termos de \sin e \cos . Com isso, escrevemos

$$f(t) = \frac{a_0}{2} \sum_{n=1}^{\infty} a_n \frac{e^{in\omega t} + e^{-in\omega t}}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \frac{e^{in\omega t} - e^{-in\omega t}}{2i} \quad (3.8)$$

$$f(t) = \frac{a_0}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{a_n}{2} + \frac{b_n}{2i} \right) e^{in\omega t} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{a_n}{2} - \frac{b_n}{2i} \right) e^{-in\omega t} \quad (3.9)$$

É conveniente definir (BUTKOV, 2013)

$$C_n = \begin{cases} \frac{a_n - ib_n}{2}, & \text{se } n > 0 \\ \frac{a_n + ib_n}{2}, & \text{se } n < 0 \\ \frac{a_0}{2}, & \text{se } n = 0 \end{cases}$$

Fazendo $n = -m$ no segundo somatório da equação (3.9)

$$f(t) = \frac{a_0}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{a_n}{2} + \frac{b_n}{2i} \right) e^{in\omega t} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{a_{-m}}{2} - \frac{b_{-m}}{2i} \right) e^{im\omega t}$$

Agora fazemos $n = -m$ nas equações (3.6) e (3.7)

$$a_{-m} = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(-m\omega t) dt = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos m\omega t dt = a_m$$

$$b_{-m} = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(-m\omega t) dt = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin m\omega t dt = b_m$$

daí

$$f(t) = \frac{a_0}{2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left(\frac{a_n}{2} + \frac{b_n}{2i} \right) e^{in\omega t}$$

Logo, a equação (3.1) será escrita como

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{in\omega t} \quad (3.10)$$

onde C_n é o coeficiente da série e é dado por

$$C_n = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) e^{-in\omega t} dt = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) e^{-in\omega t} dt \quad (3.11)$$

No caso de Séries de Fourier, a função C_n é frequentemente chamada de espectro de Fourier. Para um sinal periódico $f_T(t)$ representado por uma série exponencial de Fourier, fazemos T tender a infinito, com isso os pulsos no sinal irão se repetir após um intervalo infinito,

$$\lim_{T \rightarrow \infty} f_T(t) = f(t)$$

então

$$f_T(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{in\omega t} \quad (3.12)$$

em que

$$C_n = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f_T(t) e^{-in\omega t} dt \quad (3.13)$$

Para representarmos um sinal não periódico $f(t)$ por exponenciais de duração infinita, basta construirmos um novo sinal periódico que chamamos de $f_T(t)$, formado pela repetição do sinal original em intervalos de T segundos. Quando fazemos T tender a infinito evitamos que os pulsos se sobreponham. Observe que ao integrar $f_T(t)$ em $(\frac{-T}{2}, \frac{T}{2})$ estamos essencialmente realizando a mesma integração de $f(t)$ em $(-\infty, \infty)$. Sabendo disso

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[\frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) e^{-in\omega t} dt \right] e^{in\omega t} \quad (3.14)$$

$$C_n = \frac{1}{T} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-in\omega t} dt \quad (3.15)$$

o que nos dá

$$C_n = \frac{1}{T} F(n\omega) \quad (3.16)$$

daí

$$f_T(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{F(n\omega)}{T} e^{in\omega t} \quad (3.17)$$

como

$$\Delta\omega = \frac{2\pi}{T}$$

então

$$f_T(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[\frac{F(n\Delta\omega)\Delta\omega}{2\pi} \right] e^{in\Delta\omega t} \quad (3.18)$$

$$\lim_{\Delta\omega \rightarrow \infty} \frac{1}{2\pi} \sum_{n=-\infty}^{\infty} F(n\Delta\omega) e^{in\Delta\omega t} \Delta\omega \quad (3.19)$$

em que a soma do lado direito da equação (3.19) pode ser entendido como a área sob uma função $F(\omega)e^{i\omega t}$, logo

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (3.20)$$

onde o lado direito da equação (3.20) é a chamada integral de Fourier de uma dada função $f(t)$, quando a integral existir. A transformada de Fourier é então dada por

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt \quad (3.21)$$

no qual a função $F(\omega)$ é no domínio da frequência de $f(t)$.

4 OS EFEITOS E SUAS CARACTERÍSTICAS ONDULATÓRIAS

Aqui discutiremos a base para criação dos efeitos dos processadores de guitarra elétrica usando o formalismo da física ondulatória. Uma compreensão sólida dos efeitos de guitarra clássicos é fundamental para construir uma base sólida antes de adentrar a complexidade da criação e análise de novos efeitos. Nesta seção, iremos analisar e desmembrar alguns dos efeitos mais icônicos que definiram gêneros musicais inteiros e influenciaram gerações de músicos. Para isso, iremos analisar graficamente o sinal de entrada (som limpo) e o sinal após a aplicação do efeito para visualizarmos o comportamento das ondas. Para isso, foram usados os seguintes equipamentos:

Guitarra: Tagima

- Modelo: Stella.
- Captadores: ZST-CLASSIC, *Humbucker 1950's by Zaganin*.
- Cordas: NIG *signature* S.C, calibre 0.0095.

Interface de Áudio¹: Behringer UMC22.

Processador de efeitos: *Amplitube 5*²

Software de Análise: MATLAB³.

Outros Equipamentos: Afinador D'ADDARIO modelo eclipse.

A guitarra elétrica foi primeiramente conectada a interface de áudio, onde também está ligada ao computador. Daí, o sinal foi direto para amplificador clean simulado no *AmpliTube*. Esta etapa é crucial para estabelecer a base sonora, uma vez que o amplificador clean representa a sonoridade natural da guitarra sem nenhuma coloração adicional. Ao longo do experimento, o amplificador virtual permaneceu ativo. Essa decisão foi tomada para simular a prática real e comum de manter o amplificador sempre ligado, mesmo ao introduzir efeitos. Esta escolha reflete a realidade de muitos músicos que preferem manter, mesmo que sem nenhum efeito ativado enquanto exploram diferentes processadores de efeitos. Do amplificador *clean*, foi realizada uma gravação no próprio ambiente do *AmpliTube* tocando a corda solta Lá, do instrumento. O sinal foi então roteado para uma cadeia

² Este software proporciona uma plataforma virtual para experimentação, permitindo uma abordagem prática na manipulação do sinal de guitarra.

³ Ambiente de programação projetado para realizar análise de dados, visualização, modelagem matemática, simulação e implementação de algoritmos.

de pedais virtuais, cada um representando um efeito específico analisado aqui. Após aplicar todos os efeitos desejados, um por um, os ficheiros em formato de arquivo de áudio em forma de onda (WAV⁴, do inglês Waveform Audio File Format), foram exportados diretamente para o software MATLAB. A partir daí, usamos uma programação neste programa para que pudéssemos plotar e analisar a forma de onda do sinal de áudio contido no arquivo WAV para cada um dos efeitos. A escolha do intervalo de análise temporal é um aspecto crucial na avaliação dos efeitos de pedais de guitarra em amostras de áudio. Para este estudo, o intervalo de 0,0277 a 0,0458 milissegundos foi selecionado como a janela de análise primária. Esta escolha foi feita com base em critérios específicos relacionados ao início efetivo dos efeitos nas amostras de áudio. No entanto, ao investigar efeitos como *reverb*, *tremolo* e *wah-wah*, foi observado que a visualização adequada desses efeitos exigia uma expansão na escala temporal. A limitação na resolução temporal do intervalo original impediu uma observação clara e abrangente desses efeitos. Portanto, para garantir uma análise detalhada e precisa, foi necessário aumentar o intervalo de tempo para permitir uma visualização mais eficaz. Este ajuste na escala temporal não apenas aprimorou a capacidade de identificar e analisar os efeitos em questão, mas também contribuiu para uma compreensão mais abrangente de suas características dinâmicas. Vale ressaltar que a escolha do intervalo de tempo foi guiada pela necessidade de representar fielmente os efeitos em estudo, otimizando a precisão e a interpretabilidade das conclusões obtidas a partir da análise das amostras de áudio. Esta abordagem permite uma flexibilidade metodológica para a análise de diferentes efeitos, adaptando-se às características específicas de cada um e garantindo a validade e a robustez dos resultados obtidos.

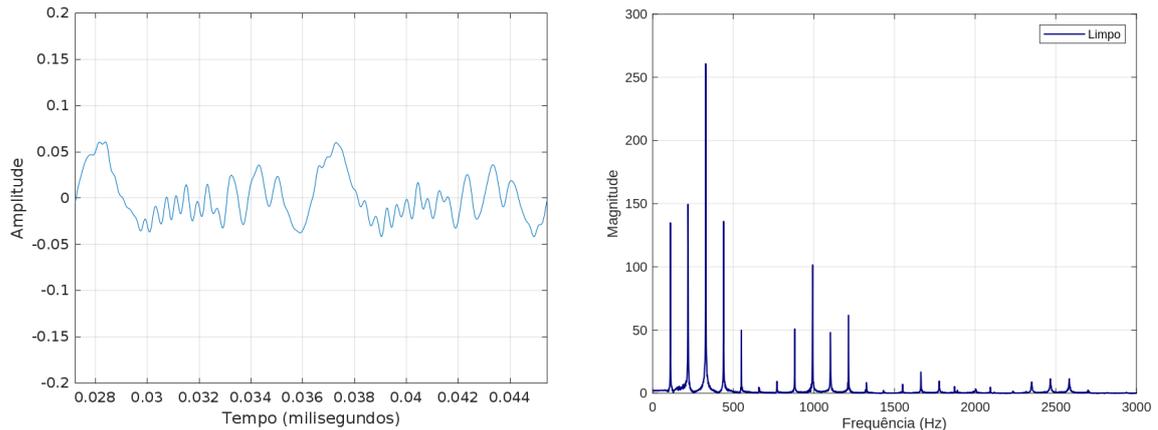
Após a análise, pudemos observar o espectro de frequência do sinal final aplicando a transformada de Fourier no próprio ambiente do MATLAB. A amplitude máxima que observamos nos gráficos referem-se ao ponto de pico na forma de onda temporal do sinal. Esse valor representa o ponto mais alto na representação gráfica da variação de pressão sonora ao longo do tempo. A amplitude máxima em um gráfico de onda está relacionada ao valor absoluto da pressão sonora em um ponto específico no tempo. No espectro de frequência, por outro lado, temos a distribuição de energia do sinal nas diferentes frequências que o compõem. A magnitude observada nos gráficos de espectros de frequências representam a intensidade das diferentes componentes de frequência do sinal. O valor não é uma medida direta da amplitude máxima na forma de onda, mas sim da intensidade em cada componente de frequência específica.

⁴ O formato WAV é conhecido por preservar a qualidade original do áudio, pois não usa compressão significativa. Ele suporta áudio em várias resoluções e taxas de amostragem.

4.1 SOM LIMPO

Ao tocar uma nota na guitarra a regularidade do sinal é evidenciada através da representação gráfica fornecida pelo MATLAB. Em contrapartida, ao mover a palheta sobre as cordas, o sinal gerado não exibe regularidade e é caracterizado como um ruído.

Figura 8 – Forma de onda e espectro de frequência do som limpo



Fonte: Autor (2023).

No lado direito da Figura (8), encontra-se o espectro de frequência do som produzido pela corda 5 da guitarra. O som emitido por essa corda será usado em todas análises de todos os efeitos aqui apresentados. Esse espectro ilustra a amplitude de cada um dos modos normais presentes na vibração da corda, levando em consideração a influência dos tipos de madeira utilizados na guitarra e dos captadores. A análise espectral fornece informações sobre os valores de A_n na equação (2.17).

4.2 MODULAÇÃO

A modulação é uma técnica que envolve a variação de certos parâmetros de um sinal, como amplitude, frequência ou fase, com base em outro sinal chamado modulante. Na música, esses efeitos são amplamente empregados para criar uma variedade de nuances sonoras, que vão desde sutis variações até efeitos mais dramáticos. Os efeitos de modulação podem ser divididos em três categorias principais: modulação de amplitude⁵, modulação de frequência⁶ e modulação de fase⁷. Cada categoria oferece uma abordagem única para modificar o sinal de áudio da guitarra.

⁵ Variação da intensidade do sinal de áudio ao longo do tempo, realizada através da multiplicação do sinal original por um sinal modulante.

⁶ Modulação onde a frequência do sinal de áudio é variada de acordo com um sinal modulante

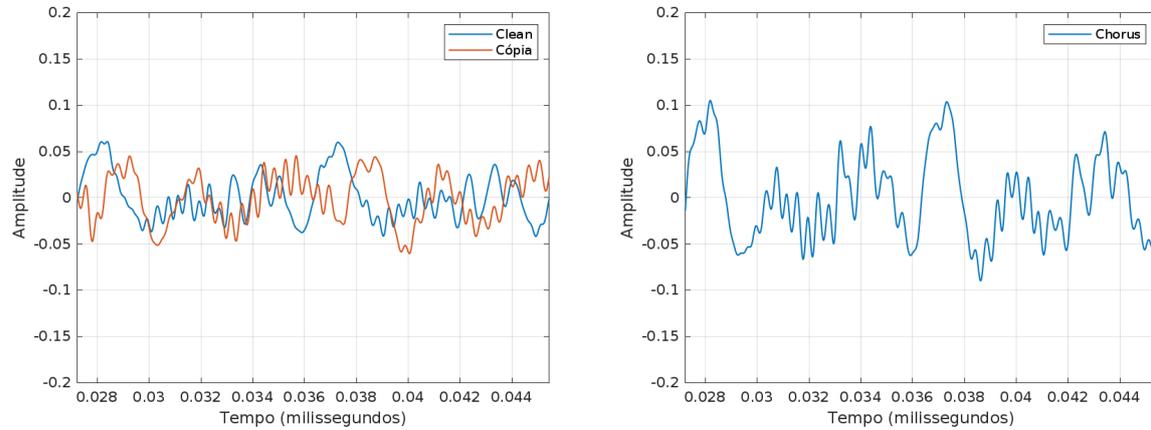
⁷ Envolve a alteração da fase do sinal de áudio, resultando em interferência construtiva ou destrutiva quando misturada com o sinal original.

4.2.1 Chorus

O *Chorus* é um dos efeitos mais populares e amplamente usados em estúdios de gravação e palcos ao redor do mundo. Ele é um tipo de modulação de fase que adiciona profundidade e caráter à música, tornando-a mais envolvente e emocionante. Seja em músicas pop, rock, eletrônica ou qualquer outro gênero, o efeito de *Chorus* desempenha um papel importante na criação de um som distintivo e agradável aos ouvidos. Este efeito é baseado no princípio de que pequenas variações no tempo e na afinação de uma nota tocada ou cantada por diferentes instrumentos ou vozes criam um som mais denso e envolvente. O processo é realizado eletronicamente e envolve a duplicação do sinal de áudio original, seguida por um atraso muito pequeno e pela modificação da frequência do sinal duplicado. Esse sinal modificado é então mesclado com o sinal original, criando uma ilusão auditiva de várias fontes sonoras simultâneas. O atraso introduzido é normalmente muito curto, geralmente na faixa de 20 a 30 milissegundos. Isso cria uma discrepância de tempo perceptível entre o sinal original e o sinal duplicado, imitando a variação natural no tempo de execução de diferentes músicos. Além disso, a frequência do sinal duplicado é ligeiramente ajustada, imitando as pequenas variações de afinação que ocorrem em performances ao vivo. Quando o sinal original e o sinal modificado são combinados, o resultado é um efeito sonoro que parece vir de várias direções, criando uma sensação de espaço e movimento. Esse efeito é particularmente eficaz quando aplicado a sons contínuos, como acordes de guitarra ou vozes, pois as pequenas variações de tempo e afinação se somam para criar um som mais denso e vibrante.

Para obtermos uma compreensão do funcionamento do efeito de chorus, consideremos a seguinte situação hipotética: Se dois guitarristas executam simultaneamente o mesmo acorde ou nota repetidamente, os sons resultantes de suas performances terão um discreto atraso devido às divergências nas execuções individuais. Além disso, as tonalidades dos dois sons estarão levemente desajustadas, uma vez que cada guitarrista possui sua técnica particular, e também os timbres serão distintos devido a variações nos equipamentos utilizados (mesmo se forem da mesma marca e modelo, uma diferença subjacente persiste, por mais sutil que seja). O efeito de *Chorus* replica esse processo eletronicamente.

Figura 9 – Forma de onda antes e após o Chorus

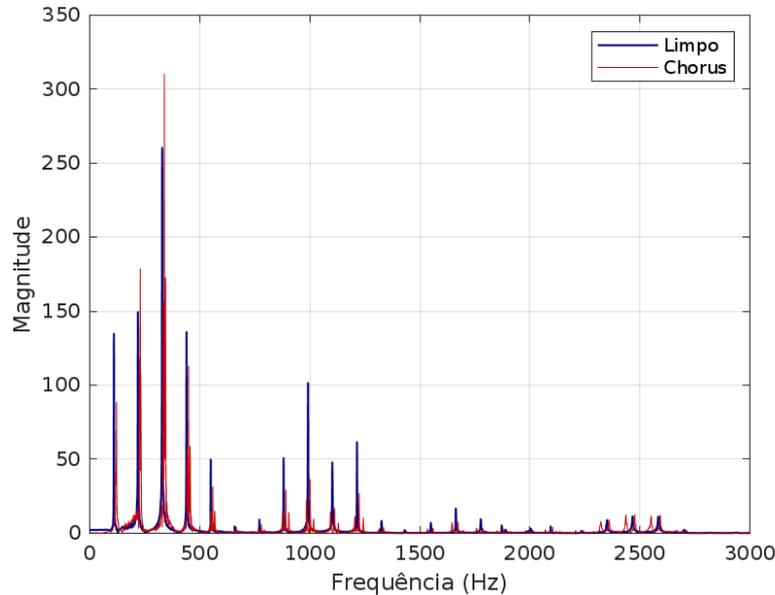


Fonte: Autor (2023).

A defasagem gerada, em torno de 20ms a 30ms, é adicionada à onda sonora original produzida pela guitarra. Essa demora é sutilmente afetada por flutuações na velocidade da onda. A variabilidade na velocidade da onda é gerada pelo oscilador de baixa frequência⁸ (LFO, sigla em inglês para Low Frequency Oscillator). Ao oscilar, o LFO incita modificações em frequências de escala diminuta, introduzindo uma leve discrepância tonal no sinal que é submetido a duplicação. Uma analogia ilustrativa pode ser traçada com a imagem de dois tocadores de fita operando simultaneamente, porém com um dos aparelhos apresentando variações ínfimas na velocidade de reprodução. Tal cenário culminaria em discrepâncias tonais, e quando as saídas sonoras desses dispositivos fossem amalgamadas, um efeito de chorus seria alcançado. Como resultado, o espectro de frequência do som modulado pelo *Chorus* será mais espalhado e terá alguns picos adicionais no espectro de frequência devido à sobreposição de cópias levemente desafinadas do sinal original. Esses picos se manifestam em frequências específicas, como em 330Hz e 250Hz. Além disso, houve alguns alargamentos no espectro de frequência, pois as cópias ligeiramente desafinadas contribuíram para uma distribuição de frequências mais amplas, conforme a Figura (10).

⁸ Dispositivo que gera uma forma de onda de baixa frequência para modular características sonoras em equipamentos de áudio, como sintetizadores e pedais de efeito, criando variações rítmicas e timbrísticas em diferentes aspectos do som, como intensidade, frequência e amplitude.

Figura 10 – Espectro de frequência Chorus

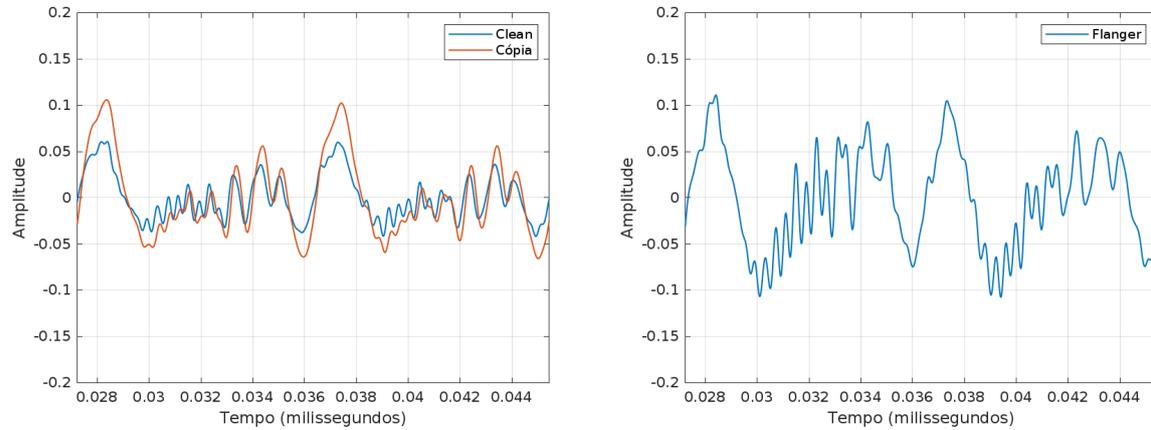


Fonte: Autor (2023)

4.2.2 Flanger

Esse efeito usa uma técnica de processamento de áudio que cria um som característico de variação de frequência ao misturar duas cópias de um sinal de áudio, uma delas levemente atrasada em relação à outra. Esse efeito adiciona um movimento "varrido" ao som, criando uma sensação de alteração de timbre que é distintiva e frequentemente utilizada na música para adicionar uma qualidade única às gravações. O efeito *Flanger* é baseado nos princípios de interferência construtiva e destrutiva de ondas sonoras. Ele envolve dois aspectos fundamentais: o atraso de tempo e a modulação de frequência. No atraso o sinal de áudio é duplicado e uma das cópias é atrasada em relação à outra por um intervalo de tempo muito curto, ocorre uma discrepância de fase entre as duas cópias. Essa discrepância causa uma interferência entre as ondas sonoras. Se as duas ondas estiverem em fase, elas se somarão construtivamente, resultando em uma amplitude maior; se estiverem em fase oposta, elas se cancelarão destrutivamente, resultando em uma amplitude menor. Já na modulação de frequência o intervalo de atraso é modulado usando um LFO. Esse oscilador gera uma flutuação periódica no intervalo de atraso, fazendo com que a interferência entre as ondas varie continuamente.

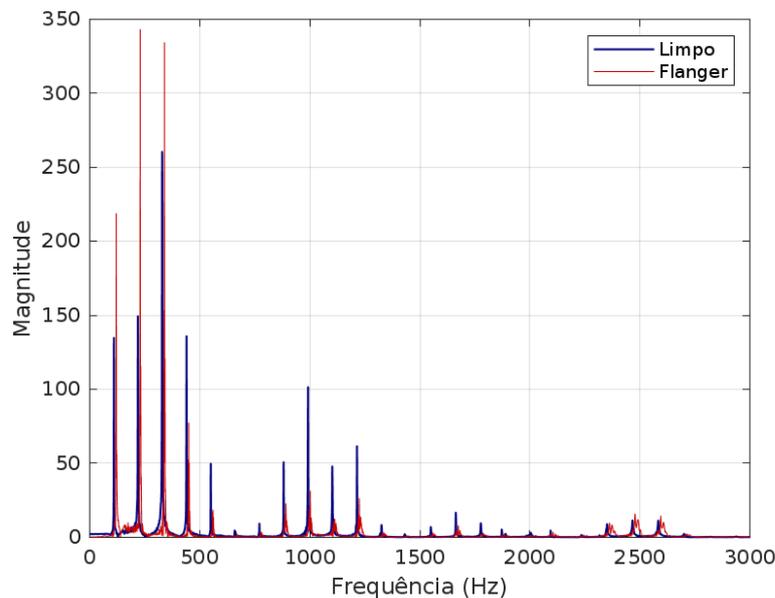
Figura 11 – Forma de onda antes e após o Flanger



Fonte: Autor (2023).

Quando as duas ondas sonoras (original e atrasada) se misturam, ocorrem áreas de reforço (interferência construtiva) e áreas de atenuação (interferência destrutiva) ao longo do tempo. Isso resulta no efeito sonoro característico de "varredura" do *Flanger*, em que certas frequências são realçadas e outras são suprimidas periodicamente. A taxa de variação introduzida pelo LFO determina a velocidade da varredura. Em termos físicos, a combinação de atraso de tempo e modulação de frequência cria padrões oscilantes de reforço e atenuação das ondas sonoras, gerando um som que parece estar em constante movimento.

Figura 12 – Espectro de frequência Flanger



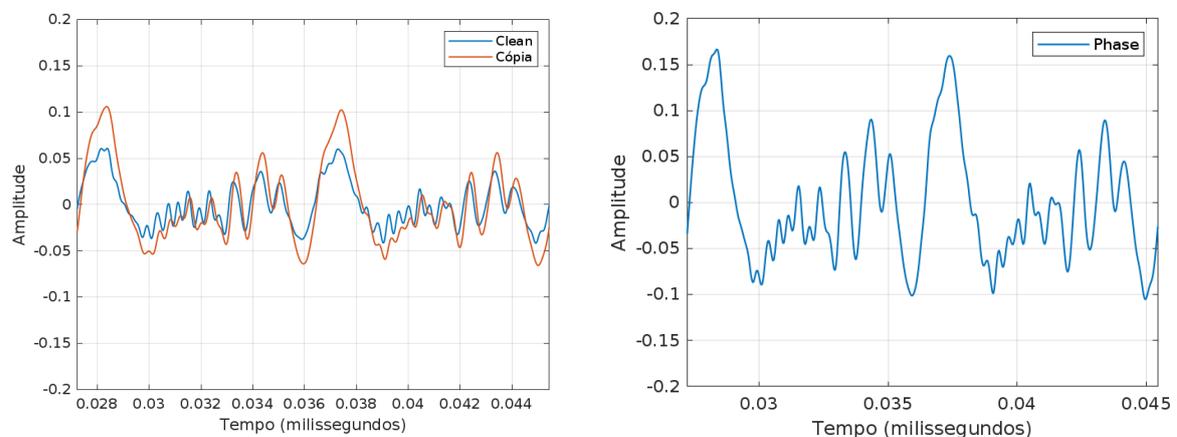
Fonte: Autor (2023)

O cérebro humano percebe essas variações como uma mudança de timbre, criando o efeito característico do *Flanger*. Essas variações no tempo ao sinal de áudio criam um espectro de frequência característico. Comparado ao som limpo, o espectro do *Flanger* pode exibir variações na amplitude em certas frequências, resultantes das variações cíclicas introduzidas pelo efeito. A presença dessas variações no tempo pode criar picos e vales no espectro. O ajuste dos parâmetros do *Flanger*, como a frequência do LFO, a profundidade e o feedback, influencia a intensidade dessas variações e, conseqüentemente, a aparência do espectro. O efeito cria variações no tempo, resultando em interferências construtivas e destrutivas nas ondas sonoras. Isso pode afetar a maneira como as frequências são percebidas e medidas no espectro. Ao analisarmos o gráfico, percebemos que o pico espectral no som limpo era em torno de 330Hz. Após aplicação do efeito, esse pico passou a estar em torno de 247Hz.

4.2.3 Phaser

O *Phaser* modifica o som criando variações cíclicas na fase das ondas sonoras. Ele produz um som distintivo "varrido" ou "giratório", adicionando uma qualidade espacial e dinâmica às gravações musicais. O efeito *Phaser* é construído sobre o princípio da interferência entre ondas sonoras. Ele envolve múltiplas etapas de processamento para criar as características sonoras desejadas. O sinal de áudio original é dividido em duas partes idênticas. Uma das partes do sinal é atrasada por um pequeno intervalo de tempo. Esse atraso é gradualmente variado, criando um efeito de variação na fase das ondas. As duas partes do sinal, uma atrasada em relação à outra, são então misturadas novamente. Por fim, um filtro de combinação é aplicado à combinação das duas partes para realçar ou atenuar certas frequências. Esse filtro ajuda a destacar o efeito de varredura sonora.

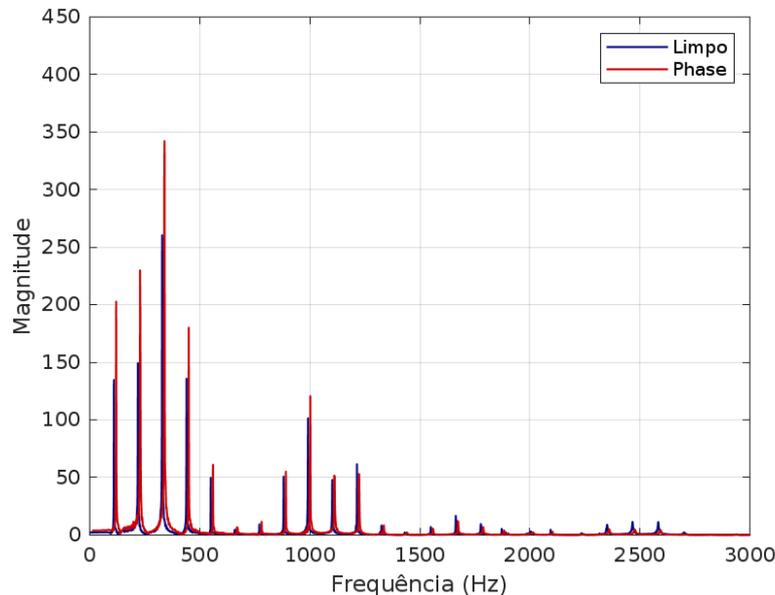
Figura 13 – Forma de onda antes e após o Phaser



Fonte: Autor (2023).

Quando as ondas sonoras combinadas são ouvidas, áreas de reforço (interferência construtiva) e áreas de cancelamento (interferência destrutiva) ocorrem em frequências específicas. À medida que o atraso é gradualmente variado, essas áreas de reforço e cancelamento se movem pela faixa de frequência, criando o efeito característico de "varredura" ou "giratório" do *Phaser*. O efeito em questão manipula a interferência entre as ondas sonoras atrasadas e as não atrasadas, gerando padrões flutuantes de reforço e cancelamento que se deslocam através de certas frequências. O cérebro humano percebe essas variações como um efeito sonoro que parece estar movendo-se ao redor do ouvinte, adicionando uma dimensão espacial ao som.

Figura 14 – Espectro de frequência Phaser



Fonte: Autor (2023)

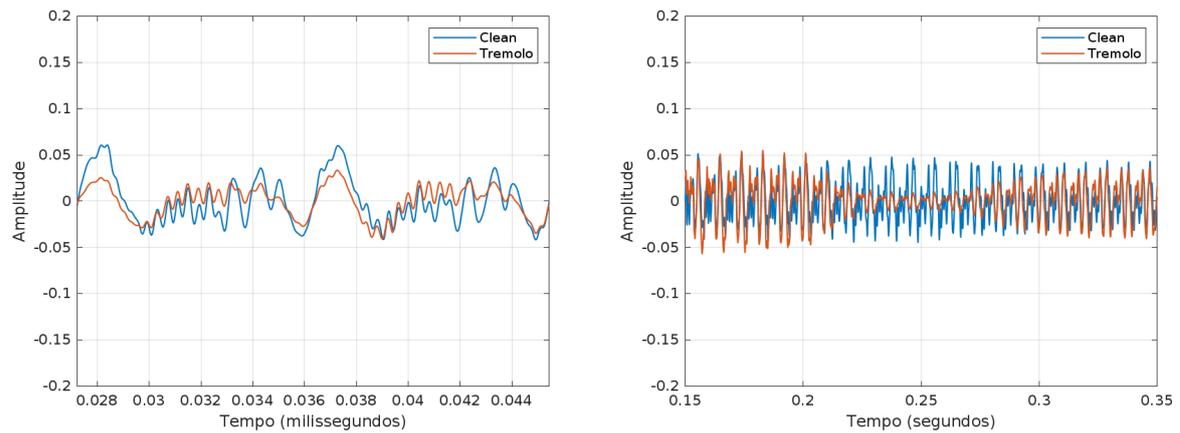
No efeito *Phaser* observamos que as frequências permanecem essencialmente as mesmas, mas a magnitude aumenta ligeiramente, e isso pode ser atribuído a alguns fatores. O aumento na magnitude pode ser resultado da componente de ganho presente no efeito *Phaser*, pois ela compensa parte da redução de amplitude causada pela modulação, que eleva a intensidade global do sinal. Além disso, à alta profundidade do efeito também impacta em uma maior amplitude, o que significa que a modulação de fase tem um impacto máximo, possivelmente criando picos mais pronunciados.

4.2.4 Tremolo

O efeito Tremolo é uma manipulação da amplitude de um sinal sonoro. Em termos simples, ele cria variações regulares e periódicas na intensidade do som, gerando um efeito de tremor ou pulsação. Esse processo envolve a modulação da amplitude do sinal de

áudio ao longo do tempo. O *rate* determina a frequência dessa modulação, enquanto o *depth* controla a amplitude máxima da variação. Em dispositivos eletrônicos, o tremolo é implementado usando circuitos osciladores para gerar a forma de onda de modulação, que, por sua vez, controla a variação da amplitude.

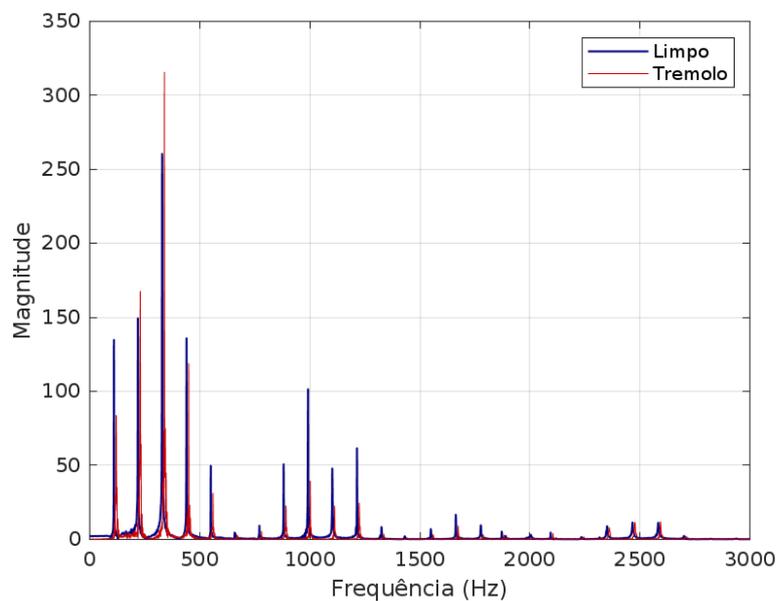
Figura 15 – Forma de onda antes e após o Tremolo



Fonte: Autor (2023).

É possível ver no lado direito da Figura (15) que a amplitude fica variando. Isso ocorre devido a técnica na qual a amplitude do sinal original é modulada periodicamente, criando variações regulares na intensidade do som ao longo do tempo.

Figura 16 – Espectro de frequência Tremolo



Fonte: Autor (2023)

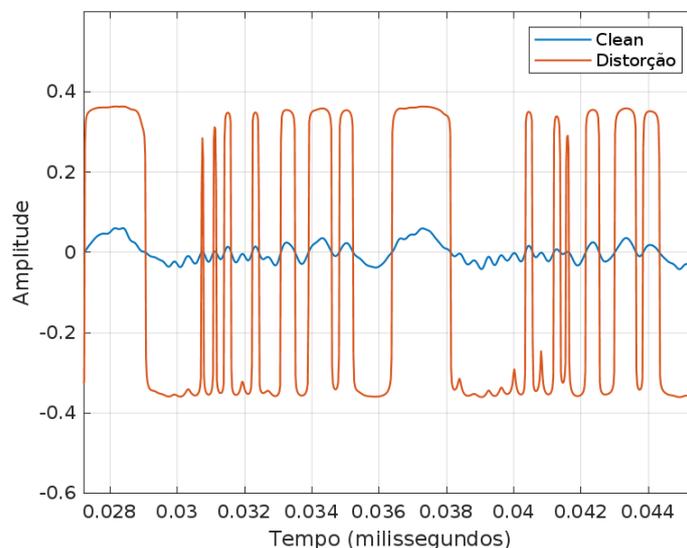
O efeito de tremolo modifica o espectro de frequência do som de maneira característica. Comparado ao som limpo, o tremolo geralmente não introduz mudanças nas frequências específicas, mas sim na magnitude. O tremolo é conhecido por modular a amplitude do sinal de áudio. Ele cria variações rítmicas na amplitude, resultando em um efeito de sobe e desce no volume do som. Após aplicado, o espectro do efeito mostras oscilações rítmicas na mgnitude. Essas variações ocorrem na taxa determinada pelas configurações do tremolo. Conforme ilustrado na Figura(16), a principal diferença entre o som limpo e o som com tremolo está na variação temporal. As oscilações na magnitude introduzidas pelo tremolo criam um efeito pulsante que pode ser visualizado no domínio do tempo e refletem nas modificações do espectro de frequência.

4.3 GANHHO

4.3.1 Distorção

Quando um sinal passa por um dispositivo de distorção, especialmente em níveis mais altos, ocorre uma limitação na intensidade máxima do sinal amplificado, causado pelo corte na saturação das válvulas presentes nos amplificadores. Isso cria uma onda distorcida, muitas vezes associada a um aumento na amplitude. O que os efeitos de ganho fazem, especificamente na distorção, é simular a saturação das valvulas dos amplificadore. Uma característica fundamental da distorção é a adição de harmônicos ao sinal original. Esses harmônicos são frequências adicionais que não estavam presentes no sinal não distorcido, criando uma sonoridade mais complexa e rica. O processo de distorção também está vinculado à compressão dinâmica, onde partes mais altas do sinal são atenuadas para evitar uma saturação extrema, enquanto partes mais silenciosas são amplificadas.

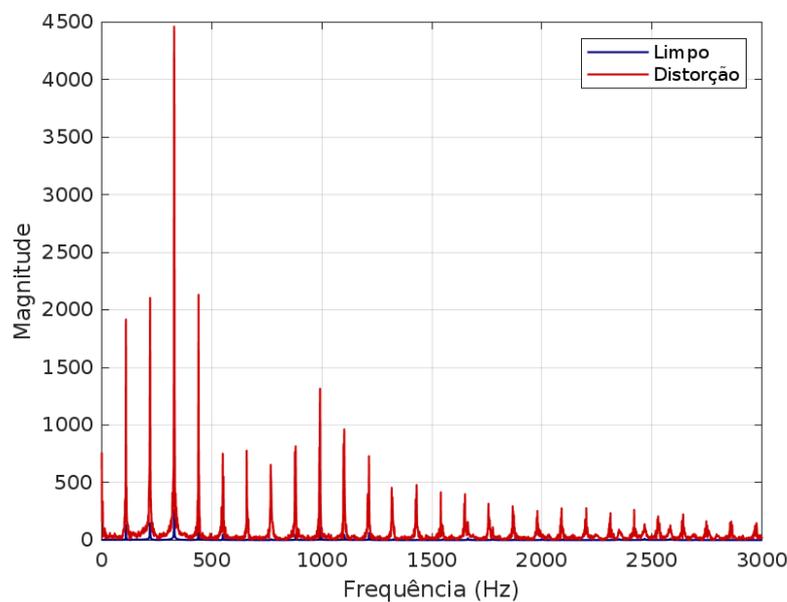
Figura 17 – Forma de onda antes e após a Distorção



Fonte: Autor (2023).

Clipping é um aspecto comum da distorção, onde partes da onda são cortadas quando atingem os limites de amplitude do sistema. Isso resulta em bordas retas ou cortes na onda, contribuindo para a distorção perceptível, como mostrado na Figura (17). Quando o sinal atinge abruptamente os limites de amplitude do sistema, esse tipo de *clipping* pode levar a formas de onda mais quadradas. Além disso, a distorção pode gerar novas frequências que não estavam presentes no sinal original. Essas novas frequências são geralmente múltiplos inteiros das frequências originais e são percebidas como harmônicos adicionais.

Figura 18 – Espectro de frequência Distorção



Fonte: Autor (2023)

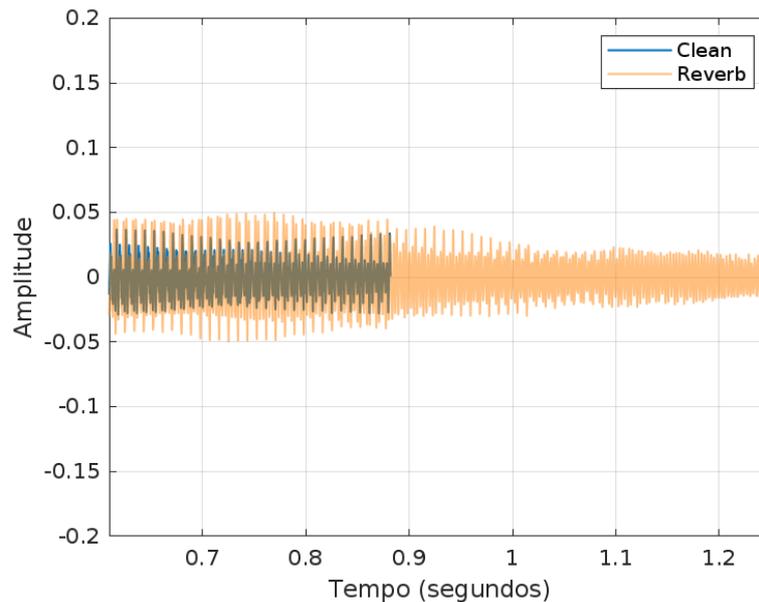
Ao analisarmos o espectro da distorção podemos perceber que, ao saturar o sinal, ela introduz harmônicos adicionais que não estavam presentes no som limpo. Esses harmônicos são múltiplos inteiros da frequência fundamental e podem se estender por todo o espectro. Na Figura (18) o aumento significativo na magnitude do espectro de frequência após a aplicação da distorção é uma resposta esperada desse processo. A distorção, especialmente com um ganho tão elevado, introduz mudanças substanciais na forma de onda original, resultando em uma expansão notável na distribuição de frequências. O aumento na magnitude é uma característica distintiva da distorção com ganho elevado e é uma parte fundamental do som saturado e enérgico associado a esse efeito. Tal efeito amplia a energia do sinal para um espectro mais amplo, distribuindo a intensidade por uma gama mais extensa de frequências. Esse alargamento do espectro contribui para um aumento geral na magnitude. Os picos associados aos harmônicos e à componente fundamental podem ser mais pronunciados e, portanto, contribuir para uma magnitude global mais alta.

4.4 AMBIÊNCIA

4.4.1 Reverb

O efeito de *Reverb*, ou reverberação, é uma resposta acústica natural ou artificial que ocorre quando um som é refletido por superfícies ao redor e se propaga pelo ambiente (WHITE; WHITE, 2014). Essa reflexão múltipla de ondas sonoras cria uma série de reflexões difusas que persistem após o som original ter cessado. Em termos físicos, principalmente no contexto do ensino de ondulatória, o funcionamento do efeito *Reverb* pode ser compreendido através do princípio da reflexão das ondas sonoras. O som emitido é refletido várias vezes por diferentes superfícies no ambiente. Cada reflexão contribui para a criação de múltiplos caminhos sonoros. Em nosso cotidiano, o efeito do reverb é causado pelas múltiplas reflexões do som nas superfícies ao redor, como paredes, pisos e tetos antes de atingir nossos ouvidos. Cada superfície reflete parte da energia sonora de volta para o ambiente, resultando em uma série contínua de reflexões que eventualmente se dissipam à medida que a energia é absorvida pelas superfícies.

Figura 19 – Forma de onda antes e após o Reverb

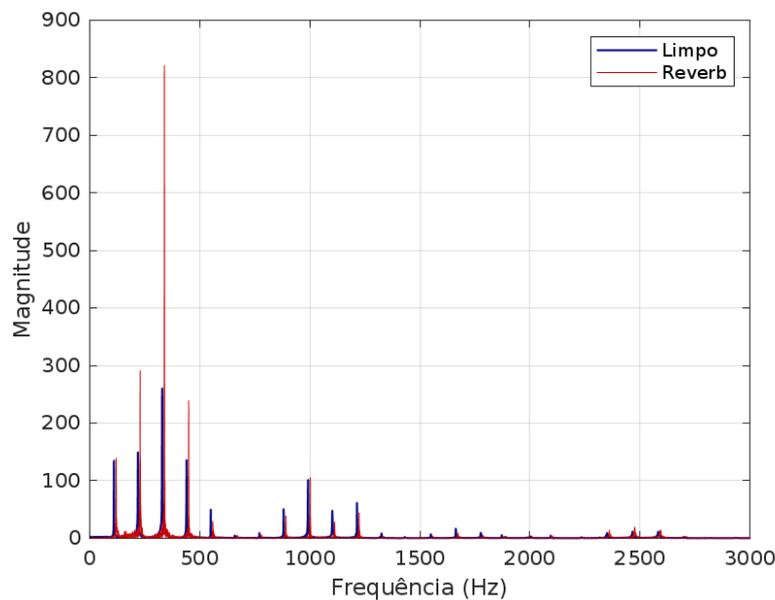


Fonte: Autor (2023).

O processamento desse efeito inclui a criação de múltiplas repetições do sinal, simulando as reflexões que ocorreriam em um ambiente físico. A cauda observada na Figura (19) é provavelmente a persistência das reflexões após o som original ter cessado. Mesmo após o corte do som original, o *Reverb* continua soando pelo tempo que o manipulador quiser, a depender das configurações empregadas. Conforme ilustrado na Figura (20), as frequências de 247 Hz, 330 Hz e 440 Hz apresentam magnitudes maiores, enquanto o

restante permanece com magnitudes aproximadamente iguais. Esse comportamento podem ser atribuídos às características específicas do processamento de reverb. Como o *Reverb* simula reflexões sonoras em ambientes acústicos, isso pode resultar em um aumento na energia nessas frequências específicas devido às reflexões mais intensas e múltiplas, em comparação com o som limpo. Além disso, o *Reverb* pode criar interferências construtivas nessas frequências, fazendo com que as ondas refletidas se alinhem de maneira a reforçar essa faixa de espectro.

Figura 20 – Espectro de frequência Reverb



Fonte: Autor (2023)

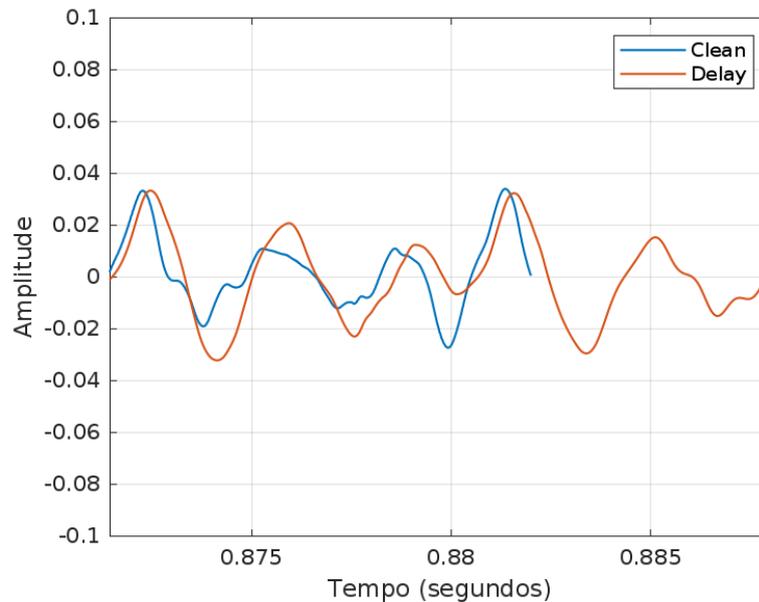
Ao ensinar ondulatória, é possível destacar como as ondas sonoras se comportam, refletem e interferem no ambiente, influenciando diretamente a experiência auditiva. Isso proporciona uma compreensão mais profunda do fenômeno da reverberação, além de ilustrar como as propriedades físicas dos materiais e a geometria do ambiente afetam a qualidade sonora percebida.

4.4.2 Delay

O *Delay* é um tipo de efeito que introduz um atraso controlado e repetições do sinal de áudio original. Esse pedal possui um circuito que captura o sinal de entrada, armazena temporariamente essa informação e, em seguida, a reproduz, criando uma série de ecos. A quantidade de atrasos, número de repetições e outras características do efeito são geralmente ajustáveis pelo usuário por meio de controles no próprio pedal. O efeito resultante é uma sensação de espaço e profundidade, que busca simular ambientes que geram ecos, pois as repetições ocorrem depois do sinal original, criando um ambiente

sonoro mais expansivo. O processo é semelhante ao *Reverb*. Entretanto, enquanto o este simula o som de reflexões múltiplas e difusas, criando uma sensação de espaço e ambiente, o *Delay* cria repetições nítidas do som original.

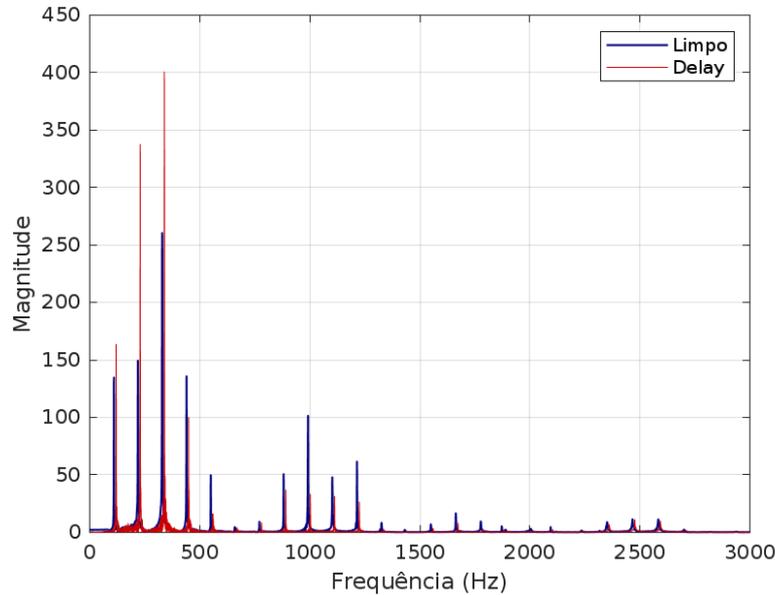
Figura 21 – Forma de onda antes e após o Delay



Fonte: Autor (2023).

Uma analogia seria pensar na reprodução das repetições no pedal de *Delay* como reflexões da onda original, onde ela retorna e é repetida várias vezes. Perceba na Figura (21) que mesmo após o corte da onda original, o *Delay* replica o sinal, fazendo o som repetir pela quantidade de vezes que o usuário preferir. Ao comparar o espectro de frequência do som limpo com aquele modificado pelo efeito de *Delay*, conforme Figura (22), observa-se que o efeito, por si só, não introduz mudanças significativas na forma geral do espectro.

Figura 22 – Espectro de frequência Delay



Fonte: Autor (2023)

O *Delay* é projetado para criar repetições do sinal original com pequenos desfaseamentos temporais sem alterar substancialmente suas características tonais. Isso pode levar a uma acumulação de energia em determinadas frequências, nesse caso, em 110, 247 e 330Hz, resultando em magnitudes um pouco maiores nessas frequências específicas. No restantes das frequências a magnitude permanece menor. Essa intensificação nas magnitudes pode ocorrer devido a fenômenos como interferência construtiva, onde as repetições do sinal se alinham de maneira a reforçar certas frequências. Esse fenômeno é mais perceptível em frequências específicas que têm um papel importante no espectro original. Em tese, o espectro de frequência do som com o *Delay* deve ser, em grande parte, semelhante ao do som limpo, só que com mudanças mais perceptíveis ocorrendo nas características temporais do sinal, em vez das características espectrais.

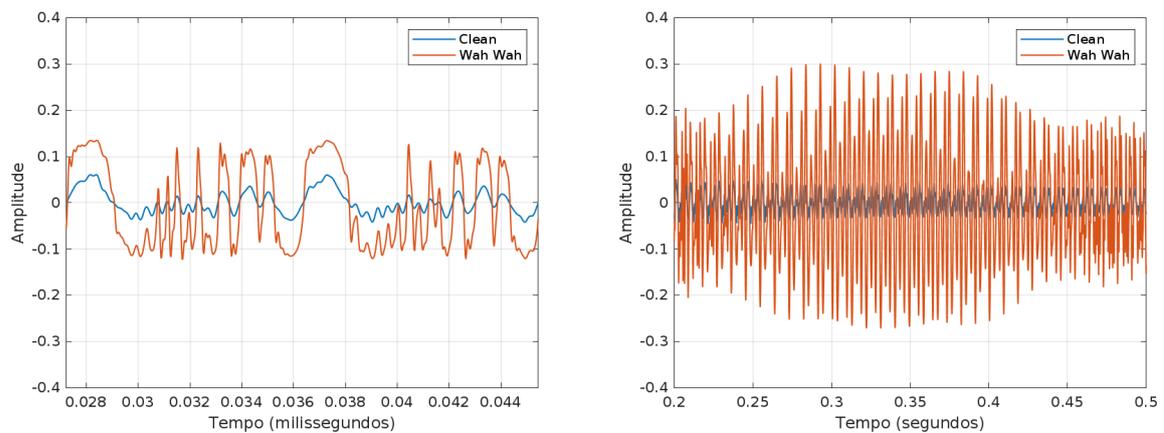
4.5 FILTRO

4.5.1 Wah-Wah

O *Wah Wah* é um efeito que modifica o espectro de frequências do sinal de áudio de maneira controlada. Esse pedal é equipado com um potenciômetro que é acionado pelo movimento do pé do músico. Esse potenciômetro varia a resposta de frequência de um filtro passa-baixas e outro passa-altas, que está incorporado no circuito do pedal. Quando o músico aciona o pedal para frente e para trás, o potenciômetro ajusta a frequência central destes filtros. Isso cria um efeito de varredura nas frequências, resultando em uma mudança tonal que lembra a pronúncia da sílaba "wah". Quando o pedal é movido para frente,

o filtro passa-alta é ativado a partir de uma certa frequência de referência, permitindo que as frequências mais altas passem livremente, enquanto as mais baixas são atenuadas, como destacado na Figura (23). Ao movê-lo para trás, o filtro passa-baixa é acionado, permitindo com que as frequências mais baixas passem livremente, enquanto as mais altas são atenuadas, gerando um som mais grave. Nesta análise foi utilizado um *AutoWah*, que é basicamente o mesmo efeito, entretanto não se faz necessário acionar nenhum pedal, pois o efeito desejado é produzido automaticamente.

Figura 23 – Forma de onda antes e após o Wah Wah

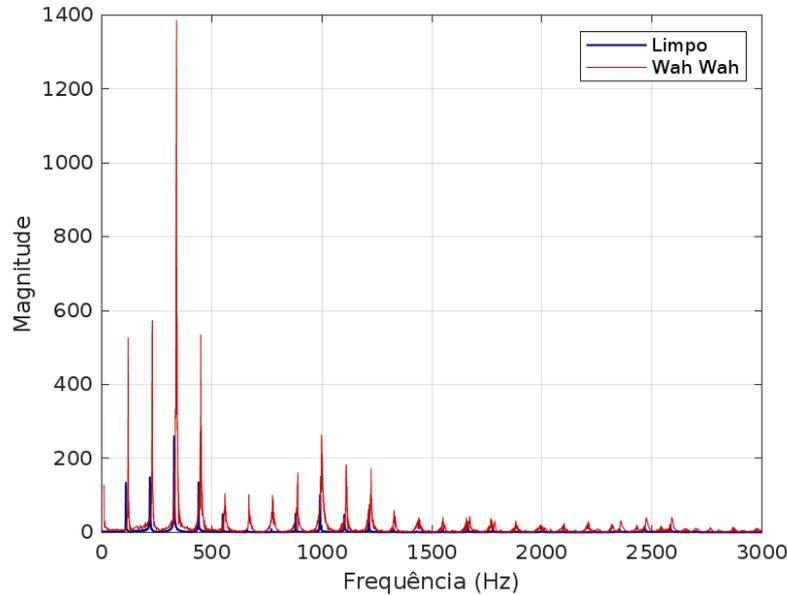


Fonte: Autor (2023).

A Figura (24) mostra o espectro deste efeito, que ao ser acionado, enfatiza frequências específicas ao longo de uma faixa variável. No decorrer do efeito, as frequências destacadas mudam, criando um efeito de varredura. As magnitudes dessas frequências podem aumentar ou diminuir, criando uma variação perceptível na resposta tonal. Como efeito de *wah-wah* é conhecido por modular as frequências de uma maneira dinâmica, criando uma variação tonal distintiva, o espectro de frequência deste, em comparação com o som limpo, pode criar mudanças nas magnitudes de certas frequências, especialmente aquelas que são acentuadas ou atenuadas pelo movimento do filtro *wah-wah*, nesse caso, em 330Hz.

A análise do espectro de frequência revelará como as características tonais do som limpo são modificadas ao longo do movimento do pedal *wah-wah*. Frequências específicas se destacam, e outras são adicionadas, dando uma dimensão adicional ao som.

Figura 24 – Espectro de frequência Wah-Wah

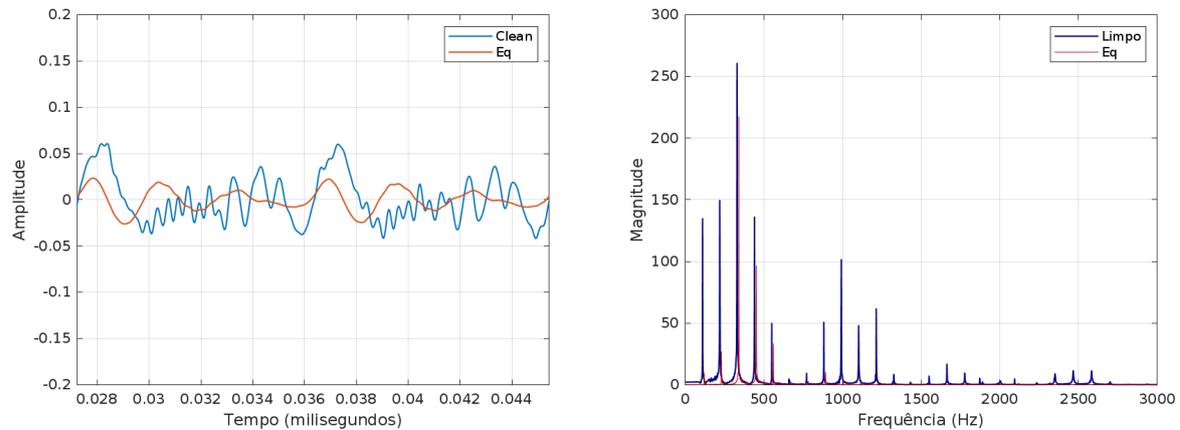


Fonte: Autor (2023)

4.5.2 Equalizador

O pedal equalizador funciona através de um conjunto de filtros que podem amplificar ou atenuar diferentes faixas de frequência, proporcionando controle sobre o espectro sonoro. O equalizador possui vários filtros de frequência que dividem o espectro de áudio em bandas específicas. Para cada uma dessas bandas temos um potenciômetro que regula uma faixa de frequência específica, e para cada banda de frequência, há outro potenciômetro de controle, o que significa que podemos controlar a quantidade de amplificação ou atenuação aplicada àquela faixa de frequência. Em nosso exemplo, foram atenuadas frequências de 0 a 250Hz, e também de 1kHz a 20kHz. Ao atenuar as frequências nessas faixas específicas, estamos reduzindo as variações de amplitude associadas a essas frequências. Isso resulta em uma curva mais suave porque as cristas e vales que podem ocorrer nessas faixas são atenuados, conforme a lado esquerdo da Figura (25).

Figura 25 – Forma de onda e espectro de frequência para o Equalizador



Fonte: Autor (2023).

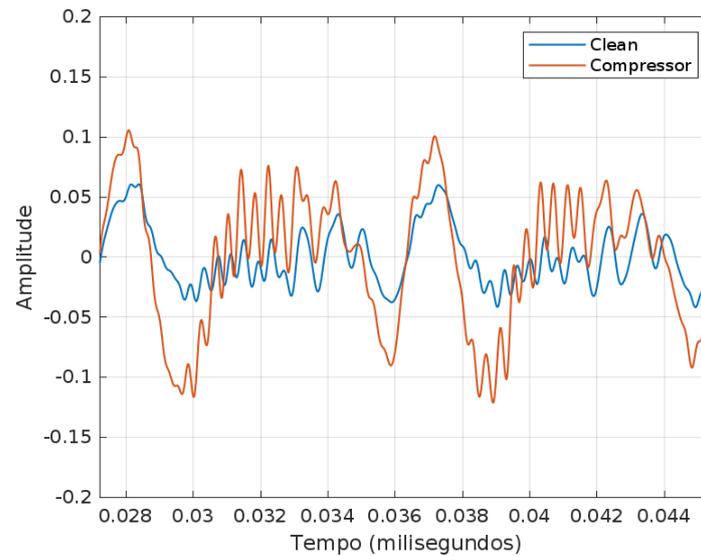
O espectro de frequência do equalizador no lado direito da Figura (25) mostra justamente o que já esperávamos. Ao equalizar o sinal limpo, atenuando as frequências nas faixas de 0 a 250 Hz resultou em uma redução notável na magnitude das regiões mais baixas do espectro. Isso cria uma resposta tonal mais suave, com menos ênfase nos graves. O mesmo acontece para as frequências médias. A suavização entre 1 kHz a 20 kHz levou a uma redução na magnitude de harmônicos nessa faixa. O resultado foi uma resposta tonal menos pronunciada nessas frequências médias e altas. Como resultado, apenas as frequências graves na faixa de de 247Hz e 440Hz são evidenciadas. Menos variações extremas na magnitude serão observadas, contribuindo para uma resposta tonal mais uniforme. Os picos associados a certas frequências harmônicas ou características tonais específicas são menos pronunciados devido à atenuação nessas faixas. Os transientes agudos podem ter uma presença reduzida devido à atenuação nas faixas de frequência específicas, resultando em uma resposta mais suave nas características tonais agudas do sinal equalizado.

4.6 DINÂMICO

4.6.1 Compressor

O compressor é um efeito projetado para modular a amplitude de um sinal. Ele opera com base em princípios físicos relacionados à dinâmica do som. Internamente, o pedal compressor possui um circuito que monitora continuamente a amplitude do sinal, no nosso caso, o som limpo. Ele detecta e mede a variação da amplitude do sinal em relação a um determinado limiar. Quando essa amplitude ultrapassa um limiar predefinido pelo usuário, o efeito reduz automaticamente o ganho do sinal. Esse controle automático de ganho é o que diferencia o compressor de outros efeitos de volume.

Figura 26 – Forma de onda antes e após o Compressor

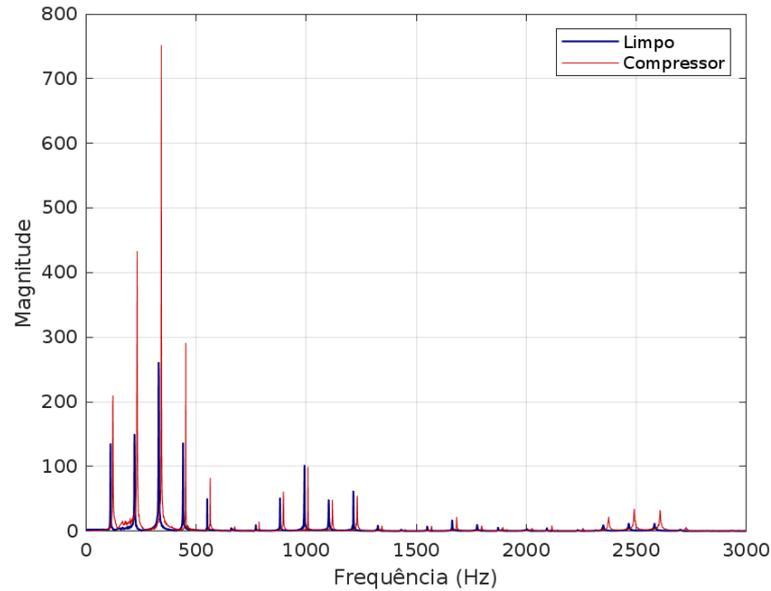


Fonte: Autor (2023).

A razão de compressão é um fator crucial. Por exemplo, uma razão de compressão de 4:1 significa que, para cada 4 dB que o sinal excede o limiar, apenas 1 dB será permitido passar. Pela Figura (26), é possível perceber que foi usada uma razão de compressão relativamente alta, onde os picos de amplitude foram fortemente reduzidos, resultando em uma curva geral mais alta, especialmente nos pontos de maior amplitude. Isso resulta em um som mais consistente, limpo e definido, tornando as notas mais suaves mais audíveis e controlando picos de volume indesejados. Na análise do espectro do compressor na Figura (27) o aumento nas magnitudes das frequências com maiores amplitudes e a atenuação das frequências mais baixas são resultados típicos da aplicação de um compressor. O compressor age para nivelar a dinâmica do sinal, reduzindo a diferença entre as partes mais silenciosas e mais altas. Esse efeito, ao reduzir a amplitude das partes mais altas do sinal, pode permitir que as frequências mais altas se destaquem mais, resultando em maiores magnitudes para essas componentes. As configurações específicas usadas também influenciam como diferentes partes do espectro são afetadas.

Em resumo, as mudanças nas magnitudes das frequências no espectro de frequência após a aplicação do compressor refletem a natureza do processo de compressão em ação, visando controlar a dinâmica do sinal de uma maneira mais uniforme.

Figura 27 – Espectro de frequência Compressor



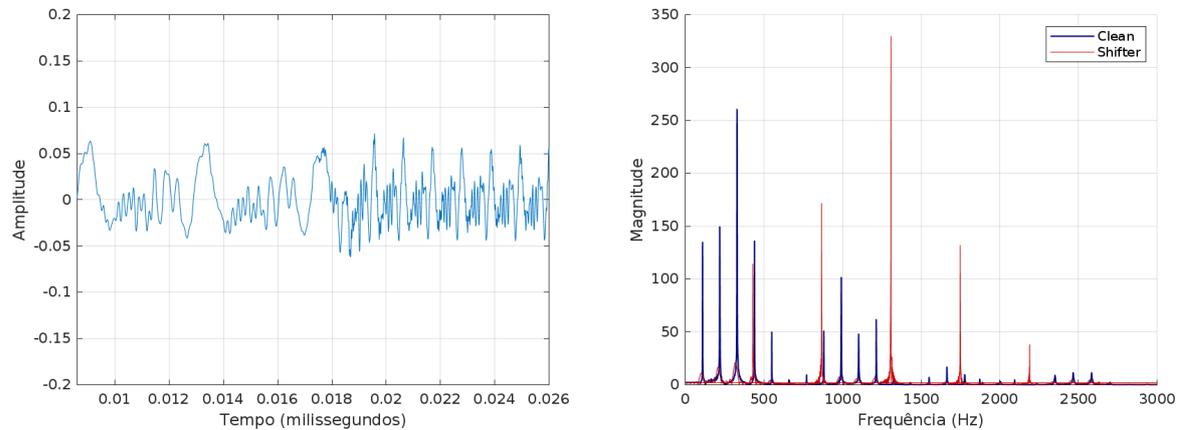
Fonte: Autor (2023)

4.7 FREQUÊNCIA

4.7.1 Pitch Shifter

O *pitch shifter* é um efeito que altera a altura das notas tocadas. Ele pode aumentar ou diminuir as frequências do sinal original. O funcionamento deste efeito não se limita apenas à alteração fixa da frequência, mas também inclui a capacidade de acionar o pedal para frente e para trás, proporcionando uma variação contínua no efeito. Quando o músico aciona o pedal para frente, ele está efetivamente aumentando a frequência do sinal de áudio, resultando em um efeito para notas mais agudas. Por outro lado, ao acionar o pedal para trás, a frequência é reduzida, gerando um efeito de notas mais graves. Em nosso caso, acionamos o pedal para frente, com ajuste de uma oitava acima da nossa nota original. O lado esquerdo da Figura (28) ilustra o momento em que o *pitch shifter* está elevando a frequência do sinal original da guitarra. O intervalo de tempo escolhido refere-se ao momento em que o efeito foi acionado. Perceba que antes, a forma de onda é a mesma para o som limpo, sendo alterado somente ao acionar o efeito, onde percebemos o aumento na frequência. O movimento do pedal controla a quantidade de efeito aplicada, proporcionando uma ampla gama de variações tonais durante a execução musical.

Figura 28 – Forma de onda e espectro de frequência para o Pitch Shifter



Fonte: Autor (2023).

O aumento na magnitude do espectro para as frequências mais altas no lado direito da Figura (28), ao usar o efeito de *pitch shifter* para duas oitavas acima da nota Lá (110 Hz), pode ser explicado pelos processos de *pitch shifting*⁹ realizados pelo dispositivo. Ao configurar o efeito para duas oitavas acima, o dispositivo realiza um processo de duplicação da frequência original (uma oitava acima) e, em seguida, duplica novamente a frequência resultante (outra oitava acima). Esse processo de duplicação de frequência contribui para o aumento na magnitude do espectro em direção às frequências mais altas. O *pitch shifting* não apenas cria cópias exatas da frequência original, mas também pode gerar componentes harmônicas adicionais. Essas harmônicas são múltiplos inteiros da frequência fundamental. No caso do pitch shifter, ao realizar o processo de pitch shift, podem ser geradas novas componentes harmônicas que contribuem para o aumento na magnitude do espectro. O resultado desse processo é um espectro mais rico e distribuído em frequências mais alta, contribuindo para uma sensação de "brilho" ou "agudo" no som, já que o espectro mais amplo e as componentes harmônicas adicionais enriquecem a qualidade sonora.

⁹ Técnica de gravação de som na qual a altura original de um som é aumentada ou diminuída.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho, analisamos como um pedal de guitarra elétrica pode modificar a forma de onda de um som. A análise do sinal limpo proporcionou uma compreensão aprofundada das características fundamentais da guitarra, permitindo-nos vislumbrar a influência dos processadores de efeitos no espectro sonoro. A decisão de manter o amplificador virtual ativo ao longo do experimento facilitou uma comparação direta entre o sinal original e as modificações introduzidas pelos diferentes efeitos. Ao explorar a aplicação de efeitos, não apenas observamos alterações na sonoridade, mas também identificamos mudanças na dinâmica, resposta tonal e nuances expressivas. Esta abordagem física, centrada nos princípios ondulatórios, enriqueceu nossa compreensão das transformações ocorridas no domínio das ondas sonoras. A utilização do software *AmpliTube* como ferramenta de simulação proporcionou uma representação precisa das variações introduzidas pelos processadores de efeitos, permitindo uma análise minuciosa dos fenômenos ondulatórios associados a cada configuração. Vale ressaltar que não é necessário usar esse software em específico, pois a preferência foi pelo fácil manuseio. Os mesmos resultados poderiam ter sido apresentados caso fossem utilizados um processador multiefeitos ou propriamente um pedal analógico ou digital. Essa abordagem metódica ofereceu uma perspectiva mais profunda sobre como os efeitos moldam não apenas o timbre, mas também a natureza física das ondas sonoras resultantes.

Neste estudo também exploramos esses processadores de sinal e áudio para guitarra elétrica como uma ferramenta dinâmica para enriquecer o ambiente de aprendizado em aulas de física. Os efeitos aplicados ao som limpo não demandam habilidades avançadas por parte dos discentes e docentes, uma vez que, só foi utilizado o som de uma corda. Considerando o interesse geral dos alunos pela música, a integração dessa abordagem pode auxiliar na assimilação de alguns conceitos físicos apresentados em sala de aula, em especial na área ondulatória. O potencial educacional se estende para além do ensino tradicional, abrindo espaço para uma aprendizagem mais envolvente e prática. Ao incorporar os pedais de efeitos como uma aliada pedagógica, criamos uma atmosfera que estimula o interesse, engajamento e compreensão dos alunos, transformando o ambiente de aprendizado em uma experiência única e impactante.

É comum encontrar alunos em uma turma que possuam conhecimento em violão ou guitarra. Nestas situações, a inclusão desses alunos como colaboradores na execução das técnicas propostas amplia a interação com a turma, promovendo uma participação mais ativa, enquanto o professor conduz a explanação.

Portanto, mesmo que o professor não tenha proficiência específica, não há motivo para desmotivação, uma vez que é possível contar com a participação de um aluno capacitado. A introdução de efeitos de distorção é benéfica para abordar discussões que envolvem frequências mais altas, uma vez que a distorção destaca essas frequências. Se for viável conectar a guitarra a um computador, além de ouvir o som, é possível visualizar o espectro sonoro, proporcionando uma abordagem inovadora para discutir conceitos de física ondulatória ao longo do curso.

REFERÊNCIAS

- ABDOUNUR, O. J.; PEREIRA, R. A. A física da música no ensino médio: uma abordagem histórico-epistemológica. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 1, p. 7601–7618, 2022.
- AFFONSO, G. d. C. B.; GLOEDEN, E. A guitarra dos séculos xvii e xviii em seus aspectos técnicos e estilístico-históricos através da tradução comentada e análise do instruccion de musica sobre la guitarra española de gaspar sanz, 1697. 2015.
- BAUER, W.; WESTFALL, G. D.; DIAS, H. **Física para Universitários: Relatividade, Oscilações, Ondas e Calor**. [S.l.]: AMGH Editora, 2013.
- BUTKOV, E. **Física matemática**. 1. ed. [S.l.]: LTC, 2013.
- CHIERECCI, R. **O som da Física: a presença essencial da música no aprendizado da acústica**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2013.
- FLETCHER, N. H.; ROSSING, T. D. **The physics of musical instruments**. 2^a. ed. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2012.
- GRANJA, C. E. d. S. C. **Música, conhecimento e educação: harmonizando os saberes na escola**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2005.
- GRANJA, C. E. S. C. **Musicalizando a escola: música, conhecimento e educação**. [S.l.]: Escrituras Editora e Distribuidora de Livros Ltda., 2006.
- LAGO, B. A guitarra como um instrumento para o ensino de física ondulatória. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, SciELO Brasil, v. 37, 2015.
- LAPP, D. R. **The physics of music and musical instruments**. [S.l.]: Wright Center for Innovative Science Education, Tufts University, 2003.
- LATHI, B. P.; GREEN, R. A. **Linear systems and signals**. edition. [S.l.]: Oxford University Press New York, 2005. v. 2.
- LEVITIN, D. J. **A música no seu cérebro: A ciência de uma obsessão humana**. [S.l.]: Objetiva, 2021.
- LOPES, F. S.; BELLAN, C. L.; TAGLIATI, J. R. **JR Proposta para o ensino de ondas e acústica utilizando música e instrumentos musicais**. 2005.
- MELO, R. B. de F.; NASCIMENTO, G. K. M. do; PIMENTEL, P. S.; NEVES, J. E. da S.; BARRETO, F. R.; BARBOSA, O. V.; LIMA, A. da S.; CANDIDO, D. A. S. O uso do smartphone no ensino de física: relato de uma experiência em ondulatória. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 4, p. 37366–37380, 2021.
- MUSZKAT, M. Música e neurodesenvolvimento: em busca de uma poética musical inclusiva. **Literartes**, v. 1, n. 10, p. 233–243, 2019.
- NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de Física Básica: eletromagnetismo**. [S.l.]: Editora Blucher, 2015. v. 3.

NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de Física Básica: fluidos, oscilações e ondas, calor.** [S.l.]: Editora Blucher, 2018. v. 2.

PARKER, B. **Good vibrations: The physics of music.** [S.l.]: The Johns Hopkins University Press, 2009.

PEREIRA, D. Conheça 10 instrumentos da idade media. 2016. Disponível em: <<https://proddigital.com.br/musica/conheca-10-instrumentos-da-idade-media>>. Acesso em: 08 nov. 2023.

PINTO, M. M. A utilização de instrumentos musicais e aparatos computacionais como estratégia de promoção da aprendizagem significativa no campo conceitual da física ondulatória, na educação de jovens e adultos. 2011.

SEARS, F.; YOUNG, H. D.; ZEMANSKY, M. W. **Física II: Termodinâmica e Ondas.** 12. ed. São Paulo: Pearson, 2008. v. 2.

TIPLER, P. A.; MOSCA, G. P. **Física para cientistas e engenheiros.** 6. ed. [S.l.]: LTC, 2016. v. 1.

WALKER, J.; HALLIDAY, D.; RESNICK, R. **Fundamentos de física: volume 2: gravitação, ondas e termodinâmica.** 2. ed. [S.l.]: LTC, 2009. v. 2.

WHITE, H. E.; WHITE, D. H. **Physics and music: the science of musical sound.** [S.l.]: Courier Corporation, 2014.