

Marcos Ramos dos Santos

DESENVOLVIMENTO DE UM THEREMIN
ÓPTICO DIGITAL COM SÍNTESE DE
ÁUDIO E INTERFACE GRÁFICA

Toledo

2021

Marcos Ramos dos Santos

DESENVOLVIMENTO DE UM THEREMIN ÓPTICO
DIGITAL COM SÍNTESE DE ÁUDIO E INTERFACE
GRÁFICA
OPTICAL DIGITAL THEREMIN WITH AUDIO SYNTHESIS
AND GRAPHIC INTERFACE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do Curso de Engenharia Eletrônica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR Campus Toledo, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Orientador(a) Prof. Dr. Andrés Eduardo Coca Salazar

Toledo
2021



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

Esta licença permite que outros remixem, adaptem e criem a partir do trabalho licenciado para fins não comerciais, com crédito atribuído ao autor. Os usuários não têm que licenciar os trabalhos derivados sob os mesmos termos estabelecidos pelo autor do trabalho original.

Marcos Ramos dos Santos

DESENVOLVIMENTO DE UM THEREMIN ÓPTICO DIGITAL COM SÍNTESE DE ÁUDIO E INTERFACE GRÁFICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do Curso de Engenharia Eletrônica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR Campus Toledo, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Trabalho aprovado. Toledo, 26 de setembro de 2021:

Prof. Dr. Alberto Yoshihiro Nakano
UTFPR

Prof. Dr. Luis Carlos Mathias
UTFPR

**Prof. Dr. Andrés Eduardo Coca
Salazar**
Orientador

Toledo
2021

A folha de aprovação assinada encontra-se na coordenação do curso

RESUMO

O Theremin, além de ser um dos primeiros instrumentos musicais eletrônicos, conta com a particularidade de não necessitar contato físico para executá-lo, visto que, para tal, é necessário apenas aproximar ou afastar as mãos das antenas do instrumento, em que a antena posicionada à direita controla a frequência e a da esquerda a sua intensidade do som. Contudo, por utilizar antenas como sensores capacitivos e o ar como dielétrico, está sujeito a interferências elétricas e pode se descalibrar devido a sua alta sensibilidade às mudanças climáticas. Portanto, o desenvolvimento de um Theremin capaz de manter-se estável e livre de interferências torna-se necessário. Dado isso, [Gomes et al. \(2009\)](#) desenvolveram um Theremin com sensores ultrassônicos, utilizando um DSP para mapear a distância das mãos em relação aos sensores, aplicando uma síntese FM para gerar o som e, ainda relacionando cores com notas musicais através de Diodos Emissores de Luz (LEDs) Vermelho-Verde-Azul (RGB). Neste projeto, foi desenvolvido um Theremin digital óptico com interface gráfica, com bom custo-benefício, diversidade tímbrica e facilidade de interação. Para tal, foram utilizados dois sensores ópticos, responsáveis por mensurar a distância em relação ao instrumento. Mediante um microcontrolador, os dados capturados são tratados e enviados via porta serial; seguidamente, a partir de um PC é aplicado o método de síntese subtrativa para gerar e modificar o timbre do instrumento. Além disso, foi desenvolvida uma interface gráfica para permitir a visualização dos parâmetros do instrumento, bem como disponibilizar opções para sua configuração. Após a finalização do protótipo, foram realizados experimentos com intuito de verificar a relação distância-frequência, diversidade tímbrica e análise de custo, para os quais o protótipo apresentou erro relativo baixo para a relação distância-frequência, capacidade de criação de diferentes timbres e relação custo benefício alta. Por fim, também foi apresentada uma demonstração do protótipo através da execução de duas peças musicais. Com isso, verificou-se que o instrumento poderá ser utilizado por músicos iniciantes na introdução à musicalização e no desenvolvimento da percepção musical e, ainda, por músicos profissionais em gravações e apresentações.

Palavras-chave: Sensores ópticos. Microcontrolador. Instrumentos musicais eletrônicos.

ABSTRACT

The Theremin, in addition to being one of the first electronic musical instruments, has the particularity of not requiring physical contact to perform it, since, to do so, it is only necessary to bring your hands closer or farther away from the instrument's antennas, in which the antenna positioned on the right controls the frequency and the left controls its loudness. Given this, [Gomes et al. \(2009\)](#) developed a Theremin with ultrasonic sensors, using a DSP to map the distance of the hands about the sensors, applying an FM synthesis to generate the sound, and even relating colors to musical notes through Emitting Diodes of Light (LEDs) Red-Green-Blue (RGB). In this project, an optical digital Theremin with a graphical interface was developed, with good cost-effectiveness, timbre diversity, and ease of interaction. For this, two optical sensors were used, responsible for measuring the distance about the instrument. Through a microcontroller, the captured data is processed and sent via the serial port; then, from a PC, the subtractive synthesis method is applied to generate and modify the instrument's timbre. In addition, a graphical interface was developed to allow the visualization of the instrument's parameters, as well as providing options for its configuration. After completion of the prototype, experiments were carried out to verify the distance-frequency relationship, timbre diversity, and cost analysis, for which the prototype had a low relative error for the distance-frequency relationship, ability to create different timbres, and relationship high-cost benefit. Finally, a demonstration of the prototype was also presented through the execution of two musical pieces. With this, it was verified that the instrument can be used by beginner musicians in the introduction to musicalization and the development of musical perception, and also by professional musicians in recordings and presentations.

Keywords: Optical sensors. Microcontroller. Electronic musical instruments.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Diagrama comparativo entre o formato de onda, a característica subjetiva do timbre e o instrumento musical	17
Figura 2 – Representação em pauta de (a) escala diatônica de Dó e (b) escala cromática ascendente	18
Figura 3 – Figuras utilizadas para representação de dinâmica na pauta	19
Figura 4 – Foto do Theremin original	20
Figura 5 – Forma de interpretação do Theremin demonstrada pelo seu criador	21
Figura 6 – Diagrama de blocos de um módulo BFO gerador de frequências	22
Figura 7 – Circuito esquemático de um oscilador Colpitts com destaque para os componentes responsáveis pelo ajuste de frequência	23
Figura 8 – Efeito causado pela aproximação da mão do músico à antena de frequência	23
Figura 9 – Frequência da nota Lá em diferentes oitavas vs. a distância entre a mão e a antena de frequência	24
Figura 10 – Mecanismo para a afinação do Theremin	25
Figura 11 – Protótipo desenvolvido por Gomes et al. (2009)	26
Figura 12 – Protótipo desenvolvido por Hanindhito et al. (2015)	26
Figura 13 – Protótipo desenvolvido por Xiao et al. (2019)	27
Figura 14 – Sensores de proximidade comerciais	28
Figura 15 – Exemplos de microcontroladores comerciais	29
Figura 16 – Estrutura proposta para o Theremin óptico	30
Figura 17 – Diagrama de blocos do Theremin desenvolvido	30
Figura 18 – Sensor de distância laser VL53L0X	31
Figura 19 – Plataforma Arduino Nano V3.0	31
Figura 20 – Diagrama de blocos do processo de síntese subtrativa	32
Figura 21 – Monitor de áudio Edifier R1100	33
Figura 22 – Conexões elétricas do protótipo de Theremin proposto	33
Figura 23 – Caixa para montagem do protótipo de Theremin proposto	34
Figura 24 – Interior do gabinete do protótipo de Theremin proposto	35
Figura 25 – Protótipo de Theremin desenvolvido	35
Figura 26 – Adaptador para pedestal do protótipo de Theremin proposto	36
Figura 27 – Protótipo de Theremin proposto com adaptador para pedestal	36
Figura 28 – O protótipo de Theremin proposto completo	37
Figura 29 – Função <i>void setup</i> do código implementado no Arduino Nano	37
Figura 30 – Função <i>void loop</i> do código implementado no Arduino Nano	38
Figura 31 – Mapeamento dos sensores para o desenvolvimento do Theremin	39

Figura 32 – Trecho do código implementado no módulo de síntese do protótipo de Theremin	40
Figura 33 – Diagrama de blocos do módulo de síntese do protótipo de Theremin . .	41
Figura 34 – Interface gráfica: Botões do oscilador implementado no bloco de síntese do protótipo de Theremin proposto	42
Figura 35 – Interface gráfica: Botão do gerador de ruído implementado no bloco de síntese do protótipo de Theremin proposto	42
Figura 36 – Interface gráfica: Botões do <i>mixer</i> implementado no bloco de síntese do protótipo de Theremin proposto	43
Figura 37 – Interface gráfica: Botões do LFO implementado no bloco de síntese do protótipo de Theremin proposto	43
Figura 38 – Interface gráfica: Filtro passa-baixas implementado no bloco de síntese do protótipo de Theremin proposto	44
Figura 39 – Gráfico de um filtro passa-baixas	45
Figura 40 – Gráfico de um filtro passa-baixas com ressonância	45
Figura 41 – Tela principal da interface gráfica do protótipo de Theremin proposto .	46
Figura 42 – Subtela do módulo de síntese do protótipo de Theremin proposto . . .	47
Figura 43 – Gráfico de onda quadrada em 440 Hz combinada com onda triangular em 440 Hz	49
Figura 44 – Espectro de onda quadrada em 440 Hz da Fig. 43	50
Figura 45 – Espectro de onda triangular em 440 Hz da Fig. 43	50
Figura 46 – Espectro da combinação entre uma onda quadrada e uma triangular em 440 Hz da Fig. 43	51
Figura 47 – Gráfico de onda dente de serra crescente em 440 Hz	51
Figura 48 – Espectro onda dente de serra crescente em 440 Hz resultante da Fig. 47	52
Figura 49 – Gráfico de onda dente de serra crescente em 440 Hz da Fig. 47 com adição de ruído branco	52
Figura 50 – Espectro de onda dente de serra crescente em 440 Hz com adição de ruído branco da Fig. 49	53
Figura 51 – Gráfico de onda dente de serra crescente em 440 Hz com aplicação de um LFO	53
Figura 52 – Instante inicial do espectro da onda dente de serra crescente em 440 Hz com aplicação de um LFO	54
Figura 53 – Instante final do espectro da onda dente de serra crescente em 440 Hz com aplicação de um LFO	54
Figura 54 – Gráfico de onda dente de serra crescente em 440 Hz para teste do bloco de filtro	55
Figura 55 – Espectro de onda dente de serra crescente em 440 Hz da 54 usado para o teste do bloco de filtro	55

Figura 56 – Gráfico de onda dente de serra crescente em 440 Hz com aplicação de filtro sem ressonância	56
Figura 57 – Espectro da onda dente de serra crescente em 440 Hz da 56	56
Figura 58 – Representação gráfica do timbre “Theremin básico” (a) sinal no tempo e (b) espectro	59
Figura 59 – Representação gráfica do timbre “Fantasma” (a) sinal no tempo e (b) espectro	59
Figura 60 – Representação gráfica do timbre “Theremin básico” (a) sinal no tempo e (b) espectro	60
Figura 61 – Componentes numerados do instrumento	69
Figura 62 – Conexões elétricas do sistema numeradas	70
Figura 63 – Tessitura do Theremin desenvolvido	72
Figura 64 – Tela principal da interface gráfica	73
Figura 65 – Tela secundária da interface gráfica	74

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADC	<i>Analog-to-Digital Converter</i> (Conversor Analógico para Digital)
BFO	<i>Beat-Frequency Oscillator</i> (Oscilador de Frequência de Batimento)
CORDIC	<i>Coordinate Rotation Digital Computer</i> (Computador Digital para Rotação de Coordenadas)
DAC	<i>Digital-to-Analog Converter</i> (Conversor Digital para Analógico)
DC	<i>Direct Current</i> (Corrente Contínua)
DSP	<i>Digital Signal Processor</i> (Processador de Sinal Digital)
FM	<i>Frequency Modulation</i> (Modulação de Frequência)
FPGA	<i>Field Programmable Gate Array</i> (Arranjo de Portas Programáveis em Campo)
IDE	<i>Integrated Development Environment</i> (Ambiente de desenvolvimento integrado)
I ² C	<i>Inter-Integrated Circuit</i> (Circuito Inter-Integrado)
LED	<i>Light Emitting Diode</i> (Diodo Emissor de Luz)
LFO	<i>Low Frequency Oscillator</i> (Oscilador de Baixa Frequência)
MIDI	<i>Musical Instrument Digital Interface</i> (Interface Digital de Instrumento Musical)
PC	<i>Personal Computer</i> (Computador Pessoal)
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> (Modulação por Largura de Pulso)
RGB	<i>Red-Green-Blue</i> (Vermelho-Verde-Azul)
RMS	<i>Root Mean Square</i> (Raiz Quadrática Média)

LISTA DE SÍMBOLOS

b	Bemol
\sharp	Sustenido
A	Amplitude
C	Capacitância
f	Frequência
Hz	Hertz
L	Indutância
pF	Picofarad
t	Tempo
V	Volt
V_{out}	Tensão de saída
x_0	Distância inicial
ω	Frequência angular
mm	milímetros
nm	Nanômetro

SUMÁRIO

1	Introdução	12
2	Objetivos	14
2.1	Objetivo geral	14
2.2	Objetivos específicos	14
3	Justificativa	15
4	Referencial teórico	16
4.1	Conceitos musicais	16
4.1.1	Características acústicas do som	16
4.1.2	Notação musical	17
4.1.3	Teoria das dinâmicas	19
4.2	Instrumentos musicais eletrônicos	19
4.3	O Theremin	20
4.3.1	História de Leon Theremin	20
4.3.2	A eletrônica por trás do instrumento	21
4.4	Estado da arte sobre protótipos de Theremin	25
4.5	Síntese de áudio	27
4.6	Sensores de proximidade	28
4.7	Microcontroladores	28
5	Materiais e métodos	30
5.1	Descrição física e estrutural do sistema	30
5.2	Implementação do protótipo	33
5.3	Implementação do algoritmo para aquisição e tratamento de dados dos sensores no Arduino Nano	35
5.4	Implementação do módulo de síntese sonora	39
5.5	Interface de usuário	46
6	Resultados	48
6.1	Resultados técnicos	48
6.1.1	Relação distância-frequência do protótipo	48
6.1.2	Síntese de áudio	49
6.2	Resultados funcionais	57
7	Conclusões	62
	Referências	63
	APÊNDICE A Manual de instruções do instrumento e da interface	66

APÊNDICE B	Carta de submissão e artigo submetido à revista <i>International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing</i>	76
APÊNDICE C	Partitura de uma obra composta para o instrumento e da música <i>Over the rainbow</i>	77
APÊNDICE D	Códigos completos	78

1 INTRODUÇÃO

A música está presente no cotidiano das pessoas de diversas maneiras, seja de forma direta ou indireta, por esse motivo surgem sempre novas abordagens e interpretações, promovendo um movimento de transformação constante. Com isso, surgem novas formas de criá-la, tornando necessário o desenvolvimento de novas ferramentas para tal (CUNHA; MARTINS, 1998). A eletrônica tem papel fundamental nessa evolução por meio do desenvolvimento de novos instrumentos, capazes de romper as limitações físicas dos instrumentos mecânicos (IAZZETTA, 1996). Dentre os mais significativos está o Theremin, o qual, diferentemente dos instrumentos convencionais, é tocado sem qualquer contato físico, apenas pelo movimento das mãos próximas as suas antenas. O instrumento foi criado por Leon Theremin na década de 20 enquanto trabalhava em métodos para a medição de altas frequências. Leon observou que a aproximação das mãos às antenas interferia na capacitância dos circuitos e utilizou isso para controlar a frequência em osciladores, criando assim o Theremin. No entanto, a utilização desse princípio também gera alguns problemas. Alguns músicos relatam que o instrumento sofre interferências devido a objetos próximos em um raio de até 3 metros de distância, modificando sua afinação e prejudicando a execução, problema esse que é comumente observado em situações em que em um local pequeno, além do thereminista, outros músicos também compartilhem o mesmo cenário e movimentem-se durante a performance (MARTÍN et al., 2012).

Ao longo dos anos, muitos estudos foram realizados para solucionar os problemas anteriores, como por exemplo, o trabalho proposto por (GOMES et al., 2009), cuja detecção dos movimentos é realizada por sensores ultrassônicos. Os dados recebidos são mapeados em um processador digital de sinais (DSP), o qual também aplica uma síntese de áudio e controla um Diodo Emissor de Luz (LED) Vermelho-Verde-Azul (RGB), dispositivo cujo encapsulamento possui três diodos emissores de luz, os quais são capazes de emitir as cores vermelha, verde e azul e mudam de cor de acordo com a nota musical executada.

Com base nas necessidades encontradas e como alternativa às soluções já elaboradas, foi desenvolvido um Theremin óptico com síntese de áudio e interface gráfica. No protótipo desenvolvido, a detecção de movimentos é feita através de sensores ópticos, cujo mapeamento é realizado por um microcontrolador conectado à um computador responsável pelo processo de síntese de áudio e pela interface gráfica, a qual permite a visualização e alteração de parâmetros do instrumento. Para a validação das funcionalidades do instrumento, foram realizados testes para a o mapeamento dos sensores, testes de validação do método de síntese aplicado, bem como a validação da interface gráfica.

Com o intuito de situar o leitor no que se refere ao trabalho desenvolvido, faz-se necessário apresentar brevemente cada capítulo do documento. O Capítulo 2 é composto pelos objetivos almejados. O Capítulo 3 aborda a justificativa, evidenciando as razões

para a realização desse projeto. O Capítulo 4 apresenta o referencial teórico, expondo os conceitos necessários para o entendimento com relação ao funcionamento eletrônico do instrumento, bem como conceitos musicais e trabalhos já realizados sobre o assunto. O Capítulo 5 refere-se aos materiais e métodos, no qual são descritos os materiais e apresentada a metodologia, bem como a implementação do instrumento. O Capítulo 6 apresenta os resultados experimentais e os testes realizados. Por fim, o Capítulo 7 apresenta a conclusão.

2 OBJETIVOS

Neste capítulo são apresentados os objetivos do presente projeto.

2.1 OBJETIVO GERAL

Projetar e implementar um Theremin mediante sensores ópticos, síntese de áudio e interface gráfica.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos são apresentados a seguir:

- Implementar um Theremin cuja relação custo-benefício seja alta;
- Incorporar ao Theremin uma boa diversidade de timbres;
- Proporcionar uma grande facilidade de interpretação ao instrumento;
- Desenvolver uma interface gráfica intuitiva e de fácil utilização para a configuração de parâmetros do instrumento musical proposto.

3 JUSTIFICATIVA

O exercício da criação musical está diretamente associado à busca por novos timbres e a construção de arranjos únicos. Na música contemporânea por exemplo, músicos e produtores musicais amadores ou profissionais tem incluído cada vez mais melodias criadas e executadas em instrumentos musicais eletrônicos em suas composições, com o intuito de conferir uma identidade única ao seu trabalho. O instrumento mais utilizado para tal é o teclado, em que, pode se utilizar tanto seus timbres internos, como pode ser utilizado como ferramenta de controle para algum *software*. No entanto, esse instrumento, como qualquer outro, requer o domínio de técnicas para sua execução, exigindo ainda mais habilidade para a execução de melodias complexas, sendo que, não são todos os músicos que possuem afinidade com o instrumento. Também na iniciação musical, o estudo das técnicas necessárias para execução de um instrumento musical podem desmotivar o aprendizado por parte do aluno, devido à exigência de um alto nível de coordenação motora. Portanto, a construção de um instrumento musical que não exija grandes habilidades motoras e que possibilite a introdução à musicalização infantil ou adulta, auxiliando professores no ensino de música, e ainda possa ser utilizado em performances ao vivo ou em estúdio por músicos amadores ou profissionais, seria de grande relevância para música.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesse capítulo são abordados alguns conceitos musicais importantes para a compreensão do trabalho, bem como os conceitos necessários para o desenvolvimento do instrumento.

4.1 CONCEITOS MUSICAIS

Durante o estudo da teoria musical, o conhecimento de alguns conceitos torna-se estritamente necessário para a compreensão de uma obra, bem como para a comunicação de uma forma geral. A seguir são apresentados os principais conceitos para a compreensão do trabalho proposto.

4.1.1 CARACTERÍSTICAS ACÚSTICAS DO SOM

A presente seção apresenta os parâmetros que nos permitem distinguir um som musical de outro quanto às sensações provocadas durante uma apreciação musical.

- **Altura:** No âmbito musical, a altura não possui qualquer associação ao volume do som emitido, mas sim à quantidade de oscilações em uma onda sonora, ou seja, quanto menor a frequência, mais grave o som será, assim como, quanto maior sua frequência, mais agudo ele se torna (BRITO, 2003).
- **Intensidade:** A intensidade está associada à amplitude da onda sonora, ou seja, ela representa o volume do som, logo, quanto maior a intensidade, maior o seu volume (ULLOA, 2008). Na música o conceito de intensidade pode ser compreendido como uma unidade de medida do som, através da qual pode se classificar como forte ou fraco. De forma geral, a maioria dos sons podem variar de intensidade em função do ataque empregado, como, por exemplo, em um instrumento de percussão como um tambor, a variação na força de ataque irá variar a intensidade do som emitido (BRITO, 2003).
- **Duração:** A duração representa outra característica do som, capaz de classificá-lo em longo ou curto de acordo com o tempo de ressonância (BRITO, 2003). De acordo com a dinâmica na execução, a duração de uma nota pode causar diferentes sensações, como tensão ou repouso, por exemplo (ULLOA, 2008).
- **Timbre:** O timbre, diferentemente de outros atributos musicais, como altura, intensidade e duração, não pode ser descrito por meio de escalonamentos entre fraco e forte ou em gamas de altura (LOUREIRO; PAULA, 2006). Muitas vezes referido

como a cor do som, ele é a característica que torna um instrumento ou uma voz única, diferenciando-o dos demais (BRITO, 2003).

O timbre é o fator que distingue um som de outro, além da altura tonal e a intensidade, ou seja, é a partir desse parâmetro que pode-se identificar o instrumento responsável pela emissão do som ouvido. Por meio de um osciloscópio pode-se verificar que timbres diferentes possuem formatos de onda diferentes entre si, em que, de maneira geral, formatos de onda mais arredondados produzem sons mais suaves, enquanto formatos mais ponte-agudos produzem um timbre mais estridente (FRITSCH, 2002).

Na Figura 1 são mostrados alguns formatos básicos de ondas, o seu timbre característico e os instrumentos correspondentes.

Figura 1 – Diagrama comparativo entre o formato de onda, a característica subjetiva do timbre e o instrumento musical

Formato de onda	Onda retangular	Onda dente-de-serra	Onda senoidal
Timbre	Oco	Brilhante	Suave
Instrumento	Clarinete, oboé	Violino, trompete	Flauta

Fonte – Autoria própria

- **Afinação:** Define-se a ação de afinar um instrumento musical, o ato de ajustar o som em um determinado número de oscilações, o que pode ser feito em relação à uma referência, como, por exemplo, um diapasão, instrumento metálico, em forma de U montado sobre um cabo, que quando posto em vibração produz um som em uma determinada altura. Em sua grande maioria, os instrumentos devem ser afinados constantemente, devido à susceptibilidade a mudanças de temperatura (ULLOA, 2008).

4.1.2 NOTAÇÃO MUSICAL

Assim como a fala, a música também é uma linguagem sonora, sendo que, da mesma maneira que a fala pode ser representada por meio do alfabeto, a música também precisa de uma representação gráfica que padronize a comunicação, a qual é denominada notação musical (SOUZA, 2017).

A notação utilizada atualmente resulta de um longo desenvolvimento, o qual tem seu início no século XI, período em que houveram as primeiras tentativas para a anotação de

obras musicais. Os elementos básicos que constituem esse sistema são as notas musicais, as quais podem sofrer variações em sua intensidade, altura e duração de acordo com a simbologia utilizada. Numericamente, são sete as notas musicais em uma escala natural nomeadas como C, D, E, F, G, A e B. Contudo, considera-se a repetição da tônica (primeira nota da escala) para representação do fechamento de uma oitava, dessa forma, chama-se essa sequência de notas de escala diatônica por não haver nenhuma nota alterada, também sendo chamada de escala de Dó maior, Figura 2(a). A definição de notas alteradas se dá da seguinte forma: acrescenta-se o termo sustenido à nota cuja altura é elevada em um semitom (menor distância entre duas notas musicais), o qual é representado pelo símbolo \sharp . Em contrapartida, é acrescido o termo bemol à nota, cuja altura é diminuída em um semitom, sendo representado pelo símbolo \flat . A partir da adição dessas notas, também chamadas de acidentes, à escala de notas naturais, dá-se origem à escala cromática, Figura 2(b), que compreende todas as doze notas musicais, utilizando-se a nomenclatura sustenido para os acidentes no modo ascendente da escala e bemóis quando descendente.

A pauta ou pentagrama, mostrado na Figura 2, é o sistema utilizado para a escrita e leitura musical. O sistema é composto por cinco linhas e quatro espaços intermediários, em que, a posição da nota na pauta indica sua altura, sendo que, a nota correspondente a cada linha ou espaço é determinada por um elemento chamado de clave, que na referida figura corresponde a clave de sol, sendo indicado sempre no início da pauta, onde também é indicado a divisão rítmica. Além da altura, os símbolos também determinam a duração das notas ou das pausas (momentos de silêncio). Outros símbolos também podem ser utilizados para determinar a intensidade na interpretação, bem como, o andamento (ALVARENGA, 2017).

Figura 2 – Representação em pauta de (a) escala diatônica de Dó e (b) escala cromática ascendente

The figure displays two musical staves. Staff (a) is titled 'Escala diatônica de Dó' and shows the C major scale: C (Dó), D (Ré), E (Mi), F (Fá), G (Sol), A (Lá), B (Si), and C (Dó). Staff (b) is titled 'Escala cromática' and shows the ascending chromatic scale: C (Dó), C# (Dó sustenido), D (Ré), D# (Ré sustenido), E (Mi), F (Fá), F# (Fá sustenido), G (Sol), G# (Sol sustenido), A (Lá), A# (Lá sustenido), B (Si), and C (Dó).

Fonte – Autoria própria

4.1.3 TEORIA DAS DINÂMICAS

A dinâmica é a graduação da intensidade do som, a qual determina o grau de intensidade em que o som é emitido ou articulado. Por sua vez, a intensidade depende da força do impulso que provoca a vibração, da amplitude da vibração e do ambiente onde o som é produzido (MED, 1996).

Com isso, cria-se o conceito de dinâmica artificial, formas de expressão do compositor, indicadas na partitura. Essas indicações são geralmente abreviaturas em italiano colocadas sob a pauta, que perduram até que uma nova indicação de dinâmica apareça (MED, 1996).

A Figura 3 mostra a grafia utilizada para determinar a dinâmica na pauta.

Figura 3 – Figuras utilizadas para representação de dinâmica na pauta



Fonte – Autoria própria

4.2 INSTRUMENTOS MÚSICAIS ELETRÔNICOS

Durante o século XX, com o desenvolvimento das tecnologias de gravação, surgiram novas estéticas sonoras, da mesma forma, com a popularização de eletricidade surgiram também novos instrumentos musicais baseados em seu uso (ZUBEN, 2004).

Segundo JENKINS (2009), os instrumentos considerados elétricos ou eletrônicos são dependentes do princípio de transdução, ou seja, a mudança de uma forma de energia para outra. Por convenção, são chamados de instrumentos elétricos aqueles cujo som é gerado de forma mecânica e amplificado ou modificado por meio de um sistema elétrico, como por exemplo, uma guitarra. Por outro lado, define-se como instrumentos eletrônicos aqueles em que, o som é gerado internamente de maneira eletrônica, como, por exemplo, um sintetizador.

Basicamente, um instrumento eletrônico pode ser definido como um conjunto de componentes com certo nível de independência, conectados entre si com intuito de produzir som (IAZZETTA, 1997). Nesses instrumentos, há uma explícita separação entre o sistema de controle ou interface e o sistema de geração sonora. A interface de controle refere-se aos mecanismos responsáveis pelos sinais de entrada do instrumento, podendo ser por exem-

plo, modelada a partir de um instrumento mecânico ou ainda um novo tipo de interface. O sistema de geração sonora refere-se ao modo como as ondas sonoras são produzidas no instrumento, podendo ser, por transformação, por síntese ou ainda por amostragem (IAZZETTA, 1997).

4.3 O THEREMIN

O Theremin é um dos primeiros instrumentos musicais eletrônicos criados, pertencendo a um pequeno grupo de instrumentos tocados sem contato físico. Para sua interpretação é necessário apenas movimentar as mãos em direção de suas antenas, determinando a frequência com a mão direita e a intensidade com a mão esquerda. O Theremin é um instrumento monofônico, ou seja, capaz de emitir apenas uma nota por vez, tendo como uma de suas características sonoras mais marcantes o livre glissando entre as notas musicais, bem como a facilidade para a execução de vibratos, o que pode remeter à sonoridade de um violino (QUIMELLI, 2019). A Figura 4 apresenta um modelo de Theremin comercializado atualmente.

Figura 4 – Foto do Theremin original



Fonte – Adaptado de Moog

4.3.1 HISTÓRIA DE LEON THEREMIN

Nascido São Petersburgo na Rússia em 1896, Lev Sergeevich Termen mais tarde conhecido como Leon Theremin, começou estudar música ainda criança, estudando mais tarde física e astronomia na Universidade de São Petersburgo, além de violoncelo pelo conservatório da cidade. Após a revolução russa, trabalhou no desenvolvimento de equipamentos para as primeiras estações de rádio soviéticas. Em 1920, como chefe do laboratório experimental no *Ioffe Physical Technical Institute*, Theremin trabalhou em métodos para

a medição de altas frequências. Observando que o movimento das mãos afetava a capacitância dos circuitos eletrônicos, ele constatou que tal efeito poderia ser usado para controlar osciladores e, a partir disso, construiu o primeiro instrumento musical sem contato físico, chamado inicialmente de Aetherphone, e posteriormente de Thereminvox ou simplesmente Theremin (NIKITIN, 2012). A Figura 5 demonstra a forma de interpretação do instrumento.

Figura 5 – Forma de interpretação do Theremin demonstrada pelo seu criador



Fonte – Adaptado de Gomes et al. (2009)

4.3.2 A ELETRÔNICA POR TRÁS DO INSTRUMENTO

Segundo Skeldon et al. (1998), comumente o Theremin possui um ou mais módulos osciladores de frequência de batimento (BFO), utilizados direta ou indiretamente para controlar a frequência e a amplitude do sinal. Conforme mostra a Figura 6, um módulo BFO composto por dois osciladores gera sinais independentes com frequências angulares ω_1 e ω_2 , cujas saídas podem ser expressas matematicamente como $A_1 \sin \omega_1 t$ e $A_2 \sin \omega_2 t$. O módulo atua como um misturador heteródino, multiplicando os dois sinais, fornecendo uma saída igual a

$$V_{out} = A_1 A_2 \cdot \sin(\omega_1 t) \cdot \sin(\omega_2 t), \quad (4.1)$$

que a partir de uma identidade trigonométrica pode ser expandida como:

$$V_{out} = \frac{A}{2} [\cos(\omega_1 - \omega_2)t - \cos(\omega_1 + \omega_2)t], \quad (4.2)$$

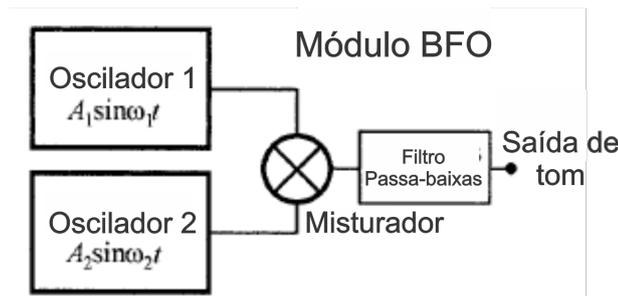
sendo que $A = A_1 A_2$. Logo, o BFO produz dois sinais em que, um deles corresponde à soma das frequências dos sinais originais e o outro à diferença, assim, utilizando um filtro

passa-baixas, é possível eliminar praticamente todo o sinal correspondente a soma das frequências, restando apenas a componente do sinal proveniente da diferença, isto é

$$V_{out} = \frac{A}{2} \cos(\omega_1 - \omega_2)t. \quad (4.3)$$

Basicamente, para o funcionamento do Theremin é necessário que a frequência de um dos dois osciladores seja alterada para que a frequência de batimento apresentada na Equação (4.3) também mude. Para tal, o instrumento é projetado de maneira que um de seus osciladores seja ajustado através do efeito capacitivo ao movimentar-se as mãos próximo à antena. Em um primeiro momento, a mudança da capacitância na ordem de pF não seria capaz de produzir grandes variações na frequência do sinal, no entanto, quando o oscilador trabalha em altas frequências, como na ordem de MHz , um pequeno deslocamento é capaz de fornecer uma variação de $1 kHz$, o que representa uma fração significativa de escala musical (SKELDON et al., 1998).

Figura 6 – Diagrama de blocos de um módulo BFO gerador de frequências



Fonte – Adaptado de Skeldon et al. (1998)

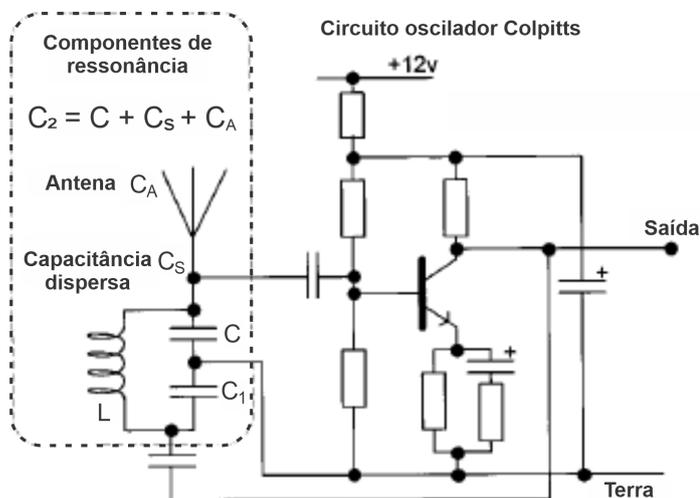
O efeito da capacitância pode ser compreendido por meio de um oscilador Colpitts, conforme a Figura 7, cuja frequência de operação é dada por:

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{L}} \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (4.4)$$

em que, L representa a indutância do circuito, C_2 a associação paralela das capacitâncias C do circuito, da capacitância C_A da antena e de todas as capacitâncias parasitas entre o circuito e a antena C_S , conforme destacado na Figura 7. O valor da capacitância C_A varia conforme movimento das mãos do instrumentista, modificando assim o tom do instrumento. Inicialmente o valor de C_2 é projetado de forma que, o oscilador conectado a antena tenha frequência igual a do segundo oscilador, que possui uma frequência fixa, para uma determinada distância inicial x_0 , fazendo com que a frequência obtida inicialmente seja igual a zero (SKELDON et al., 1998). Ainda na Figura 7, o restante do circuito apresenta um amplificador com topologia Emissor-Comum utilizando transistor PNP. Para o funcionamento do oscilador, o circuito ressonador apresentado anteriormente, provoca

uma realimentação no transistor, fazendo com que o circuito oscile, fornecendo uma saída senoidal.

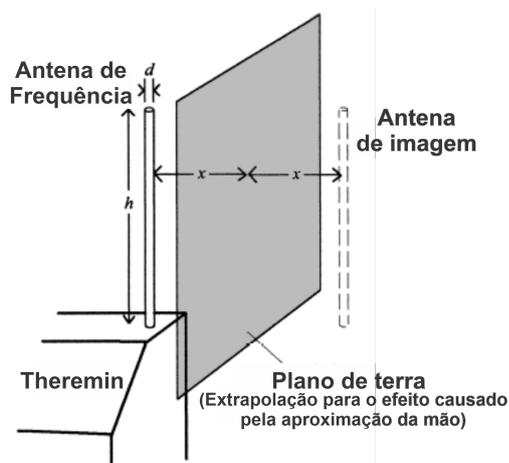
Figura 7 – Circuito esquemático de um oscilador Colpitts com destaque para os componentes responsáveis pelo ajuste de frequência



Fonte – Adaptado de Skeldon et al. (1998)

Conforme descrito por Skeldon et al. (1998), o próximo passo é verificar quantitativamente a influência da aproximação da mão do instrumentista em relação à antena de altura do instrumento. Para tal, utiliza-se a abordagem de que a mão do instrumentista é considerada como um plano de terra infinito aproximando-se da antena, em que a presença desse plano pode ser modelada como a presença de uma antena de imagem, conforme a Figura 8.

Figura 8 – Efeito causado pela aproximação da mão do músico à antena de frequência

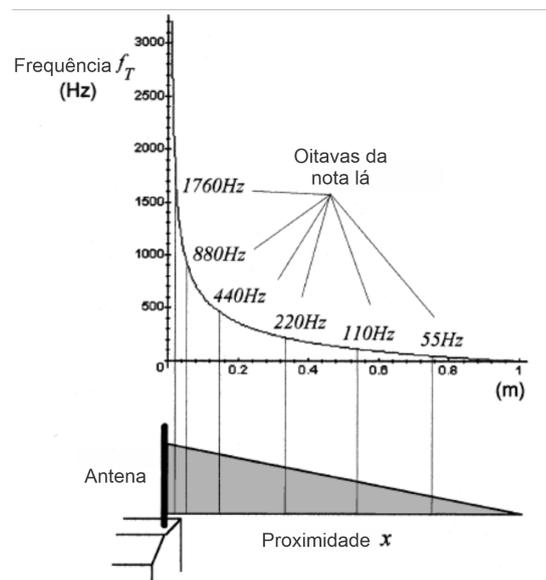


Fonte – Adaptado de Skeldon et al. (1998)

Seguidamente, a Figura 9 mostra a relação entre o alcance tonal do instrumento e a distância da mão do instrumentista em relação à antena. A partir dessa relação, observa-

se que a faixa central de operação do Theremin possui um comportamento linear, o que possibilita uma fácil transposição entre as notas musicais nessa região. Porém, esse comportamento deixa de existir em distâncias muito pequenas ou muito grandes em relação à antena. Nessas regiões esse comportamento possibilita uma ampla excursão entre as notas musicais facilitando a execução de vibratos com apenas pequenos tremores com mãos, técnica que se tornou uma marca registrada na sonoridade do instrumento.

Figura 9 – Frequência da nota Lá em diferentes oitavas vs. a distância entre a mão e a antena de frequência



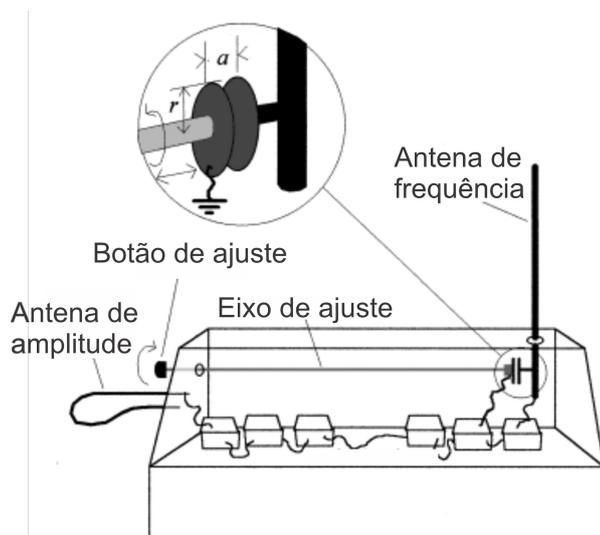
Fonte – Adaptado de Skeldon et al. (1998)

Segundo Skeldon et al. (1998), geralmente, quando o instrumento é ligado faz-se necessário um ajuste de afinação, o qual é realizado de forma eletromecânica por meio de um eixo rotativo que aproxima ou afasta discos paralelos com raio r de um capacitor, variando a distância a entre eles, o qual está conectado em paralelo com a antena de frequência. Esse controle é posicionado o mais longe possível da antena de tom, de modo que as mãos do músico não causem interferência e atrapalhem o ajuste correto do instrumento, conforme a Figura 10.

O controle de amplitude do instrumento utiliza dois osciladores BFO, assim como o controle de tom, em que um dos osciladores possui uma frequência fixa, enquanto o outro possui uma frequência variável em função da capacitância da antena. Neste caso, ambas as saídas dos osciladores estão conectadas a um circuito misturador, que por sua vez tem a saída conectada a um filtro passa baixas, o que resulta em um sinal cuja amplitude varia de acordo com as perturbações na capacitância da antena. O sinal obtido é amplificado e retificado por meio de um filtro de integração, fornecendo um sinal de controle DC que varia diretamente em função da amplitude, que por sua vez, varia de acordo com a distância da mão em relação à antena. A tensão do sinal de controle aumenta conforme

a mão se afasta da antena, tipicamente o sinal possui tensão igual a 0 V quando a mão está próxima da antena e 24 V para a maior distância projetada. Dessa forma, o volume é atenuado com a aproximação da antena (SKELDON et al., 1998).

Figura 10 – Mecanismo para a afinação do Theremin

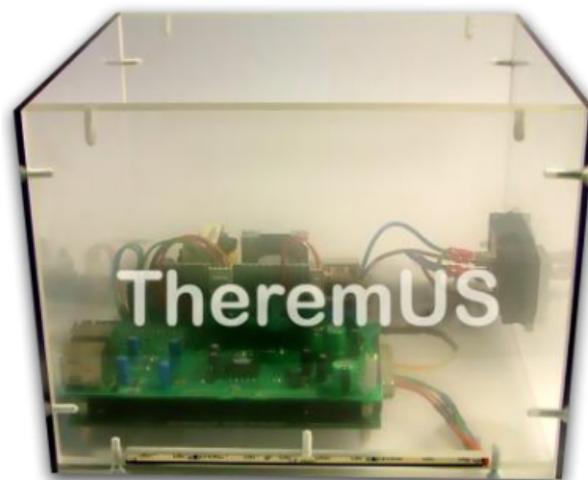


Fonte – Adaptado de Skeldon et al. (1998)

4.4 ESTADO DA ARTE SOBRE PROTÓTIPOS DE THEREMIN

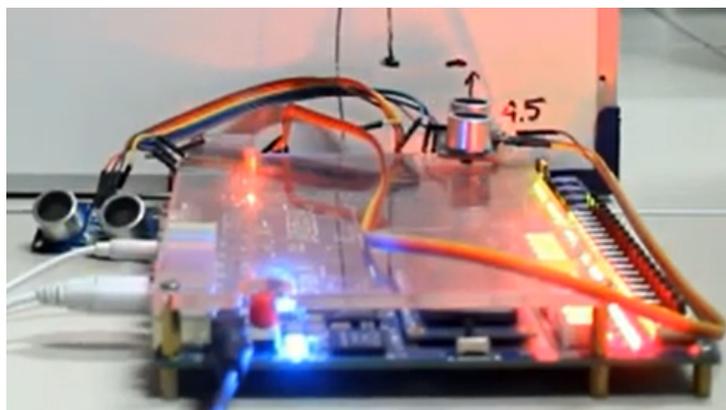
O Theremin foi um dos marcos para a evolução do cenário musical, sendo considerado por muitos o pai dos sintetizadores analógicos, que por sua vez, moldaram a construção da música eletrônica. Por esse motivo, é possível encontrar diversas pesquisas a cerca do assunto, tal como, algumas releituras do instrumento.

O trabalho realizado por Gomes et al. (2009) propõe uma releitura do Theremin, porém adicionando o conceito do *Ocular Harpsichord* criado por Louis Bertrand Castel, em que é realizada uma relação entre cores e notas musicais em uma escala de arco-íris. Basicamente, o instrumento proposto detecta os movimentos das mãos por meio de sensores ultrassônicos, empregados em substituição às antenas do original, que por sua vez, são processados em um DSP. Um algoritmo realiza o mapeamento da distância das mãos e relaciona à frequência de cada nota musical, posteriormente é aplicada uma síntese FM para a geração sonora. O conceito do *Ocular Harpsichord* é aplicado na fase de mapeamento, em que o algoritmo relaciona a faixa de frequência das notas emitidas pelo instrumento à faixa de luz visível, aplicando um sinal de modulação por largura de pulso (PWM) para controlar a intensidade da luz de uma matriz de LEDs RGB, sendo que as cores podem ser visualizadas através da caixa translúcida que encerra o instrumento. Por fim, o protótipo apresentado na Figura 11 também possui uma saída MIDI permitindo o controle de dispositivos externos.

Figura 11 – Protótipo desenvolvido por Gomes et al. (2009)

Fonte – Adaptado de Gomes et al. (2009)

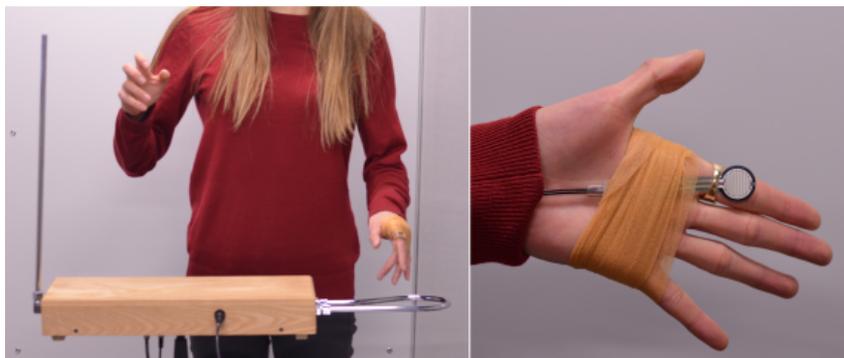
Encontra-se também outros trabalhos relevantes como o desenvolvido por Hanindhito et al. (2015), o qual utiliza sensores ultrassônicos para a detecção do movimento das mãos. Posteriormente, por meio de um FPGA é realizado o mapeamento da distância das mãos em relação aos sensores e a seguir é empregado um circuito digital CORDIC para a geração do som. A Figura 12 apresenta o protótipo citado.

Figura 12 – Protótipo desenvolvido por Hanindhito et al. (2015)

Fonte – Adaptado de Hanindhito et al. (2015)

Por fim, encontra-se o T-Voks, o qual foi desenvolvido por Xiao et al. (2019), em que um Theremin é utilizado como ferramenta de controle para um sintetizador de voz chamado Voks, inicialmente desenvolvido para a utilização em *tablets*. No T-Voks, a antena de frequência controla o tom da expressão enquanto a outra antena controla além do volume, a qualidade da voz e o esforço vocal. No instrumento apresentado na Figura 13 os enunciados de voz são pré-gravados e o sequenciamento silábico é feito por meio de um sensor de pressão adicional conectado à mão e responsável por controlar o volume.

Figura 13 – Protótipo desenvolvido por Xiao et al. (2019)



Fonte – Adaptado de Xiao et al. (2019)

4.5 SÍNTESE DE ÁUDIO

A síntese de áudio ou síntese sonora é o processo que consiste em combinar diversos blocos básicos dando origem a um novo sinal acústico. Através desse processo, é possível criar timbres únicos ou sintetizar sons de outros instrumentos, obtendo resultados irrealizáveis por outros métodos (FRITSCH, 2002). Nesse processo é possível reutilizar sons existentes ou criar novos de forma mecânica ou eletrônica (RUSS, 2008).

Em geral, as técnicas mais comuns utilizam o modelo de fonte e modificadores sonoros, no qual a fonte sonora pode ser uma entrada externa ou um gerador de ondas (*wave generator*), para a qual são aplicados modificadores de som, que em geral são filtros que atuam para modular o sinal amostrado e dar origem a novas texturas (FRITSCH, 2002).

Existem diferentes técnicas empregadas para a síntese sonora, dentre os métodos de síntese mais conhecidos estão a síntese aditiva (FRITSCH, 2002), subtrativa (FRITSCH, 2002), síntese por modulação em frequência (FM) (HUBER; RUNSTEIN, 2011), e por tabela de ondas (FRITSCH, 2002), conhecida como *wavetable*. As quais serão descritas a seguir:

- **Síntese aditiva:** O método utiliza a combinação de várias ondas senoidais com frequências diferentes para gerar o timbre final, contudo, essa técnica torna-se complexa devido a dificuldade em lidar com uma grande quantidade de ondas ao mesmo tempo (FRITSCH, 2002).
- **Síntese subtrativa:** A síntese subtrativa pode ser compreendida como uma forma de esculpir o som, ou seja, inicialmente, tem-se um sinal rico em harmônicos, que, por meio de filtros, retira-se conteúdo harmônico para modificar o timbre (FRITSCH, 2002).
- **Síntese FM:** O procedimento em questão utiliza no mínimo dois geradores de sinal para criar e modificar o som, sendo que em aplicações mais sofisticadas podem utilizar quatro ou seis geradores por sinal. Tal técnica consiste em gerar um sinal

que modula ou altera características tonais e de amplitude de uma onda portadora de base (HUBER; RUNSTEIN, 2011).

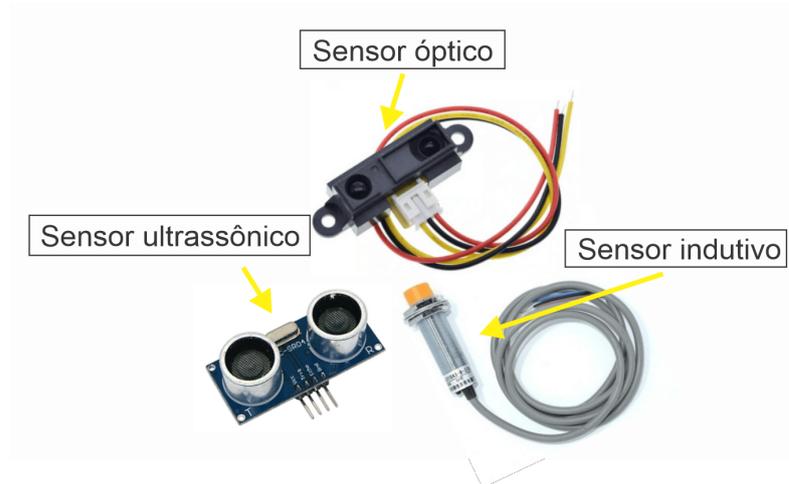
- **Síntese por tabela de ondas:** A síntese por tabela de ondas, também conhecida como *wavetable*, é realizada por meio do armazenamento de um ciclo de formas de onda digitalmente amostradas em uma memória. Essas amostras são carregadas na memória e enviadas para um DAC, onde é produzida uma saída da forma de onda (FRITSCH, 2002).

4.6 SENSORES DE PROXIMIDADE

Sensores de proximidade são dispositivos que modificam seu estado ou o sinal emitido em função de sua proximidade em relação a algum objeto, sem o contato com o mesmo. Os métodos mais adequados para o projeto desse dispositivo são: capacitivo, magnético, óptico, indutivo e por correntes de Foucault (ALCIATORE; HISTAND, 2014).

Esses dispositivos são comumente aplicados na detecção de obstáculos em sistemas inteligentes, como por exemplo, para que robôs possam desviar de objetos em seu trajeto (RAMÍREZ; JIMÉNEZ; CARREÑO, 2014). Para a utilização, leva-se em consideração pontos como, o material do objeto a ser detectado, a necessidade de respostas rápidas, necessidade de durabilidade e de repetibilidade (PETRUZELLA, 2014). A Figura 14 apresenta alguns exemplos de sensores utilizados no desenvolvimento de projetos.

Figura 14 – Sensores de proximidade comerciais



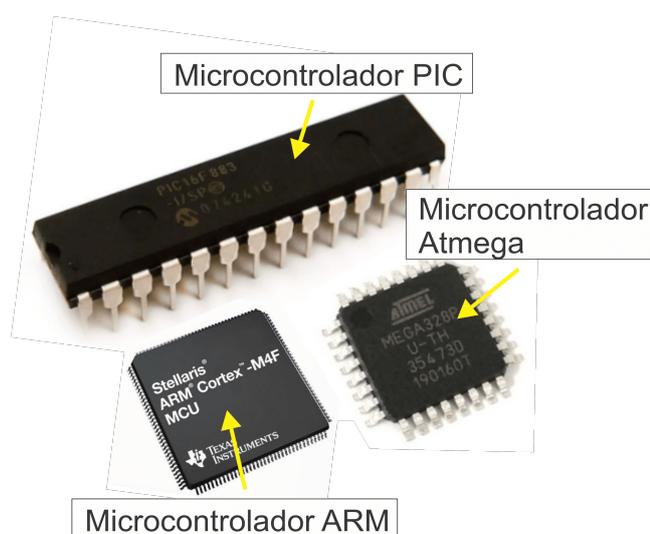
Fonte – Autoria própria

4.7 MICROCONTROLADORES

Microcontrolador é um pequeno computador composto por uma unidade central de processamento (CPU), memória e periféricos com entradas e saídas, o que permite que o

dispositivo se comunique com outros dispositivos. Com esse dispositivo é possível realizar instruções, operações lógicas e aritméticas. Cada dispositivo pode possuir periféricos diferentes entre si de acordo com sua fabricação, no entanto, os periféricos comumente encontrados são o conversores ADC e DAC, portas seriais, temporizadores e geradores de sinal PWM. Sua aplicação é feita no desenvolvimento de sistemas embarcados e no controle e automação de máquina e processos (DESHMUKH, 2005). A Figura 15 apresenta alguns microcontroladores comumente utilizados em plataformas de prototipagem.

Figura 15 – Exemplos de microcontroladores comerciais



Fonte – Autoria própria

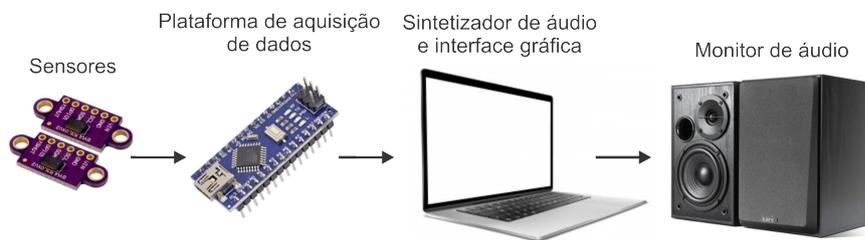
5 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os métodos necessários para o desenvolvimento do projeto, bem como os materiais aplicados.

5.1 DESCRIÇÃO FÍSICA E ESTRUTURAL DO SISTEMA

A Figura 16 apresenta os elementos físicos que compõem o projeto desenvolvido, cujas funcionalidades são descritas a seguir.

Figura 16 – Estrutura proposta para o Theremin óptico

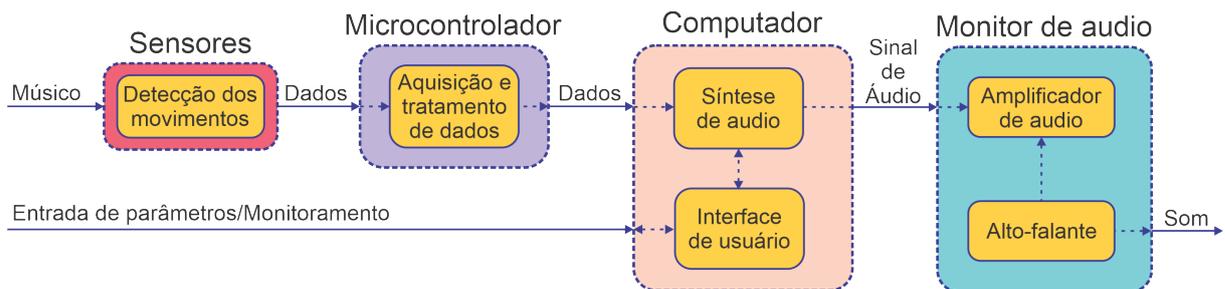


Fonte – Autoria própria

A estrutura do protótipo possui um par de sensores de distância responsáveis por mensurar a distância entre as mãos do usuário e os respectivos sensores. As medidas coletadas são enviadas à plataforma Arduino Nano que por sua vez envia esses dados ao PC, o qual é o responsável por aplicar os dados recebidos ao módulo de síntese e ainda permitir a visualização e alteração de parâmetros por meio de uma interface de usuário. Finalmente, o sinal gerado é enviado ao monitor de áudio.

Para uma melhor compreensão do protótipo desenvolvido, a Figura 17 apresenta um diagrama de blocos do projeto, evidenciando as etapas realizadas para o correto funcionamento do sistema.

Figura 17 – Diagrama de blocos do Theremin desenvolvido

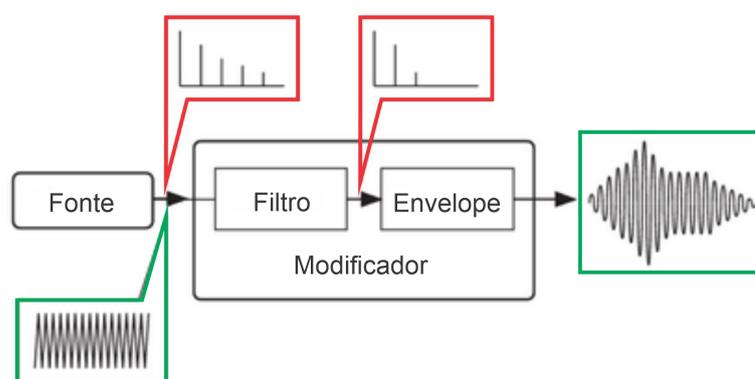


Fonte – Autoria própria

3 - **Síntese de áudio:** A etapa de síntese é a responsável pela criação da textura sonora, ou seja, ela é a responsável por moldar o som gerado imprimindo ao timbre as características desejadas conforme preferência do músico.

A Figura 20 apresenta um diagrama de blocos que exemplifica o processo de síntese subtrativa, em que as representações destacadas em vermelho correspondem ao domínio da frequência e em verde ao domínio do tempo.

Figura 20 – Diagrama de blocos do processo de síntese subtrativa



Fonte – Autoria própria

Esse método é constituído por um bloco fonte, o qual pode ser composto por osciladores e geradores de ruído, cuja combinação produz um som complexo, o qual é enviado ao bloco modificador. Por sua vez, o bloco modificador é responsável por “esculpir” o sinal gerado pelo bloco fonte, retirando componentes de frequência do sinal por meio de filtros e controlando a maneira como alguns parâmetros se comportam no tempo através de envelopes e Osciladores de baixa frequência (LFO's), como por exemplo o tempo em que um som chega ao ponto mais alto de volume, se sustenta, decai e se extingue. Nessa etapa, os dados recebidos via porta serial do Arduino Nano são utilizados para determinar a frequência do sinal gerado pelos osciladores e a amplitude do módulo amplificador do módulo de síntese.

4 - **Interface de usuário:** Para o monitoramento do instrumento foi desenvolvida uma interface gráfica com o intuito de permitir a interação com o usuário por meio de um computador (PC). A interface desenvolvida é responsável por mostrar dados do instrumento em tempo real referentes a amplitude e frequência em termos de volume e nota musical, bem como permitir ao usuário a modificação dos parâmetros do módulo de síntese sonora, permitindo que o mesmo crie timbres de acordo com suas preferências.

5 - **Monitor de áudio:** O sinal gerado após a aplicação da síntese pode ser ouvido através dos alto-falantes do PC, porém devido à necessidade de se obter um sinal de me-

lhor qualidade sonora, foi conectado ao PC um circuito amplificador de áudio externo. O equipamento utilizado foi o monitor de áudio Edifier R1100, o qual é constituído por um par de caixas, sendo uma delas passiva e a outra ativa, a qual possui um circuito amplificador embarcado. O par de monitores possui uma potência de 42 W RMS , sensibilidade de entrada de 700 ± 50 mV, relação sinal/ruído ≥ 25 dBA, resposta em frequência de 55 Hz - 20 kHz.

Figura 21 – Monitor de áudio Edifier R1100



Fonte – (EDIFIER, 2016)

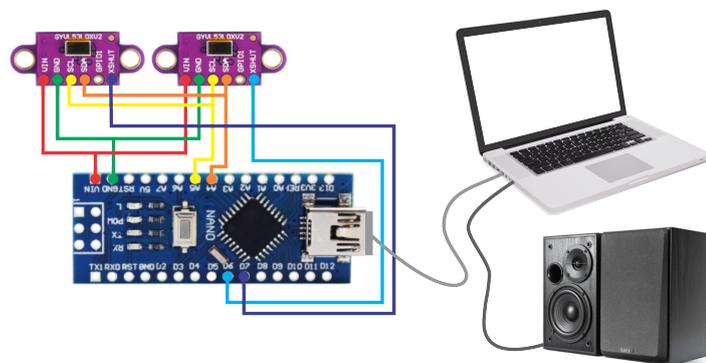
Na seguinte seção serão explicadas com maior detalhe cada uma das partes.

5.2 IMPLEMENTAÇÃO DO PROTÓTIPO

Nesta seção são apresentadas as conexões elétricas, bem como os aspectos físicos e estruturais do protótipo desenvolvido.

1 - **Conexões elétricas do sistema:** A Figura 22 apresenta todas as conexões elétricas do sistema.

Figura 22 – Conexões elétricas do protótipo de Theremin proposto



Fonte – Autoria própria

Os sensores são conectados ao Arduino por meio de *jumpers* macho-fêmea e a comunicação entre eles é feita por meio do protocolo de comunicação I²C. Com o intuito de permitir a comunicação serial, o Arduino por sua vez é conectado ao computador via cabo USB. Por fim, o sinal de áudio gerado no módulo de síntese implementado no PC é enviado até os monitores de áudio por meio de uma conexão P2-RCA.

1 - **Caixa para acomodação do circuito:** Com o intuito de proteger o circuito foi necessário empregar uma caixa de plástico para acomodar os componentes e suas respectivas conexões. Para tal, utilizou-se uma caixa para projetos eletrônicos modelo PB-900/2, conforme a Figura 23, fabricada pela empresa Patola.

Figura 23 – Caixa para montagem do protótipo de Theremin proposto



Fonte – [Usina Info \(2021\)](#)

A Figura 24 apresenta o interior da caixa onde são mostradas as conexões do instrumento.

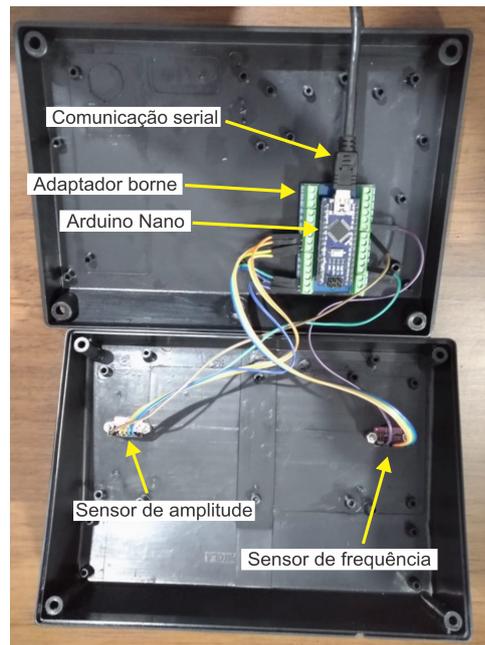
Ainda na etapa de montagem da estrutura física do protótipo, a Figura 25 apresenta a vista externa do protótipo desenvolvido.

Para facilitar a utilização do instrumento, foi instalada na base do gabinete um adaptador para pedestal de microfone, permitindo assim ajustes no seu posicionamento. A peça em questão foi desenvolvida partir de um adaptador de microfone conhecido popularmente como “cachimbo”, o qual é apresentado na Figura 26.

A Figura 27 apresenta o protótipo com o adaptador para pedestal instalado em sua base.

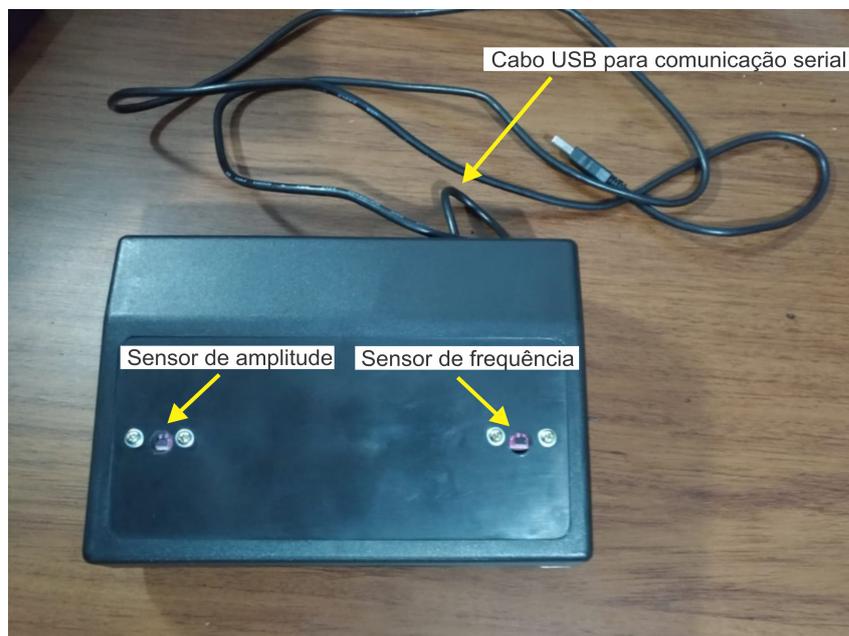
Por fim, a Figura 28 apresenta o Theremin desenvolvido conectado à um pedestal de microfone.

Figura 24 – Interior do gabinete do protótipo de Theremin proposto



Fonte – Autoria própria

Figura 25 – Protótipo de Theremin desenvolvido



Fonte – Autoria própria

5.3 IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORITMO PARA AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DE DADOS DOS SENSORES NO ARDUINO NANO

O código implementado no Arduino Nano é responsável por efetuar as operações necessárias para a obtenção e tratamento dos dados lidos pelos sensores de proximidade. O algoritmo foi desenvolvido através da IDE fornecida pelo fabricante do dispositivo.

Figura 26 – Adaptador para pedestal do protótipo de Theremin proposto

Fonte – A autoria própria

Figura 27 – Protótipo de Theremin proposto com adaptador para pedestal

Fonte – A autoria própria

A IDE do Arduino é estruturada por meio de duas funções principais, sendo elas a função “*void setup()*”, responsável pelas configurações iniciais do programa e a função “*void loop()*” responsável por executar um laço infinito com as instruções implementadas pelo programador.

A Figura 29 apresenta a função “*void setup()*” implementada.

As linhas 15 e 16 da função “*void setup()*” são responsáveis por iniciar as comunicações serial e I²C, respectivamente. Em seguida, o trecho de código entre as linhas 18 e 30 é responsável por realizar a configuração dos sensores de modo que cada um opere em um endereço de memória diferente, uma vez que por padrão esses sensores utilizam o

Figura 28 – O protótipo de Theremin proposto completo



Fonte – Autoria própria

Figura 29 – Função *void setup* do código implementado no Arduino Nano

```
13 void setup()
14 {
15   Serial.begin(9600);
16   Wire.begin();
17
18   // Define o sensor 2 como entrada para fazer o pino SHUT_2 ficar em nível alto
19   pinMode(SHUT_1, OUTPUT);
20   pinMode(SHUT_2, INPUT);
21
22   // "Desliga" o sensor 1
23   digitalWrite(SHUT_1, LOW);
24   delay(2);
25
26   // Altera o endereço do sensor 2
27   sensor2.setAddress(0x32);
28
29   // Religa o sensor 1 definindo ele como entrada
30   pinMode(SHUT_1, INPUT);
31
32   // Inicializa sensores
33   sensor.init();
34   sensor2.init();
35   sensor.setTimeout(500);
36   sensor2.setTimeout(500);
37   sensor.setMeasurementTimingBudget(40000);
38 }
```

Fonte – Autoria própria

endereço de memória 0x31, esse procedimento é necessário para que ambos operem de maneira independente. Por fim, o trecho de código entre as linhas 32 e 37 realiza a inicialização dos sensores.

A Figura 30 apresenta a função *loop* implementada no Arduino.

Figura 30 – Função *void loop* do código implementado no Arduino Nano

```

40 void loop()
41 {
42   //Realiza a medição das distâncias e retornam o valor em milímetros
43   float dist1 = sensor.readRangeSingleMillimeters();
44   float dist2 = sensor2.readRangeSingleMillimeters();
45
46   //-----Bloco responsável por tratar os dados do sensor 1-----
47   if(57<=dist1 && dist2<=777)//Verifica se os valores lidos estão no intervalo desejado
48   {
49     med1 = 36 - (((dist1 - 57)/20));
50   }else
51     med1 = -1;//Atribui -1 à variável
52   if(med1<0)//Garante que valores menores que zero não sejam enviados
53   {
54     med1 = -1;
55   }
56   //-----Bloco responsável por tratar os dados do sensor 2-----
57   if(75<=dist2 && dist2<=275)//Verifica se os valores lidos estão no intervalo desejado
58   {
59     med2 = map(dist2, 75, 275, 0, 100);//Converte o intervalo medido a um novo intervalo de 0 à 100
60   }else
61     med2=0;//Atribui 0 à variável
62   if (med2<0)//Garante que valores menores que zero não sejam enviados
63   {
64     med2 = 0;
65   }
66   //-----Envia o valor dos sensores à porta serial-----
67   Serial.print(med1);
68   Serial.print("/");
69   Serial.println(med2);
70 }

```

Fonte – Autoria própria

No código implementado, as linhas 43 e 44 são responsáveis por realizar as medições e atribuir às variáveis os valores lidos através da função *readRangeSingleMillimeters()* da biblioteca fornecida pelo fabricante dos sensores. O bloco de código entre as linhas 46 e 55 é responsável por definir o intervalo de medições que será utilizado e remapear o intervalo de valores medidos pelo sensor 1, responsável pela frequência, em um novo intervalo por:

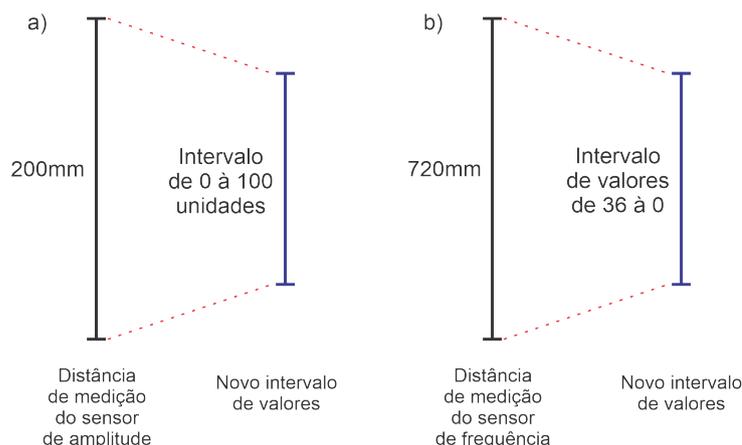
$$med_1 = 36 - ((dist_1 - 57)/20), \quad (5.1)$$

onde med_1 é o valor obtido pelo remapeamento, o valor constante 36 é utilizado no cálculo para realizar a inversão de valores em relação ao intervalo inicial, $dist_1$ é o valor de distância medido pelo sensor, o valor constante 57 é um valor levantado experimentalmente que corresponde a um *offset*, e, por fim utiliza-se o valor constante 10 para realizar uma divisão. Dessa forma a expressão recebe um valor de distância entre 57 e 777 mm e retorna um valor em unidades entre 36 e 0 com uma resolução igual a 0,05.

O trecho de código entre as linhas 56 e 65 é responsável por definir o intervalo de medições que será utilizado e remapear o intervalo de valores medidos pelo sensor 2, responsável pela amplitude, em um novo intervalo por meio da função *map()* do próprio Arduino. Essa função permite remapear um intervalo para outro, seja um intervalo maior para um menor ou vice-versa, truncando valores fracionários.

A Figura 31 representa graficamente o remapeamento dos intervalos dos sensores.

Figura 31 – Mapeamento dos sensores para o desenvolvimento do Theremin



Fonte – Autoria própria

O intervalo de valores para o sensor de amplitude foi definido de maneira que a amplitude máxima do sinal seja atingida com a mão esquerda à uma distância de 200 mm do sensor de amplitude e a amplitude mínima seja atingida à uma distância de 0 mm do sensor. O intervalo de medição do sensor foi definido entre 0 e 200 mm para possibilitar transições rápidas de amplitude em um curto intervalo de distância, sendo que o intervalo remapeado entre 0 e 100 unidades foi definido para facilitar os cálculos.

Para o sensor de frequência foi definida como faixa de trabalho o intervalo de 0 a 720 mm, esse intervalo foi definido de modo que o usuário possa realizar as transições entre uma nota e outra com uma pequena mudança de posição da mão, dessa forma toda a extensão do instrumento pode ser executada em 72 cm de deslocamento. O valor de remapeamento foi definido para um intervalo de 36 a 0 unidades de maneira que a frequência seja inversamente proporcional à distância. Dessa maneira, a maior frequência é obtida à 0 mm de distância do sensor de frequência, para qual o valor de remapeamento é igual a 36, enquanto que para uma distância igual a 720 mm, o valor remapeado é igual a 0, fornecendo a menor frequência.

5.4 IMPLEMENTAÇÃO DO MÓDULO DE SÍNTESE SONORA

Para o protótipo desenvolvido, o processo de síntese subtrativa é executado pelo PC a partir dos dados recebidos via porta serial do Arduino. O módulo em questão foi

desenvolvido em linguagem Python, juntamente com o auxílio do módulo dedicado para processamento digital de sinais chamado PYO (AJAX SOUND STUDIO, 2021), o qual permite a inclusão de cadeias de processamento de sinais com ajustes dos parâmetros em tempo real.

A Figura 32 apresenta um trecho do código desenvolvido para o módulo de síntese.

Figura 32 – Trecho do código implementado no módulo de síntese do protótipo de Theremin

```

1  from pyo import * # Importa o módulo PYO
2
3  s = Server().boot() # Cria e inicia o servidor
4
5  freq = 440 # Frequência utilizada para teste
6
7  #-----LFO-----
8  lfo = LFO(freq=10, sharp=1, mul=1) # Criação de um LFO para modular a nitidez dos osciladores
9
10 lfo.ctrl(title="Controle do LFO") # Inicialização de controles deslizantes para o LFO criado
11
12 #-----Osciladores-----
13 osc1 = LFO(freq=freq, sharp=lfo, mul=1) # Criação do oscilador 1 para geração de formas de onda
14
15 osc2 = LFO(freq=freq, sharp=lfo, mul=1) # Criação do oscilador 2 para geração de formas de onda
16
17 osc1.ctrl(title="Oscilador 1") # Inicialização de controles deslizantes do oscilador 1 criado
18
19 osc2.ctrl(title="Oscilador 2") # Inicialização de controles deslizantes do oscilador 2 criado
20
21 #-----Gerador de ruído-----
22 n1 = Noise(0.3) # Criação do gerador de ruído branco
23
24 n2 = PinkNoise(0.3) # Criação do gerador de ruído rosa
25
26 n3 = BrownNoise(0.3) # Criação do gerador de ruído marrom
27
28 sel = Selector([n1, n2]) # Criação de um seletor de ruídos
29
30 sel.ctrl(title="Ruídos") # Inicialização de controles deslizantes do oscilador 2 criado

```

Fonte – Autoria própria

No código apresentado, a linha 1 é responsável por importar o módulo PYO, a linha 3 inicia o servidor de áudio e a linha 5 inicializa uma variável responsável por gerar uma frequência de valor fixo para realização de testes. O trecho de código entre as linhas 7 e 30 é responsável por criar o bloco fonte correspondente ao método de síntese subtrativa, onde é criado um LFO, dois osciladores e três tipos diferentes de ruídos, além de controles deslizantes para teste dos parâmetros de cada elemento.

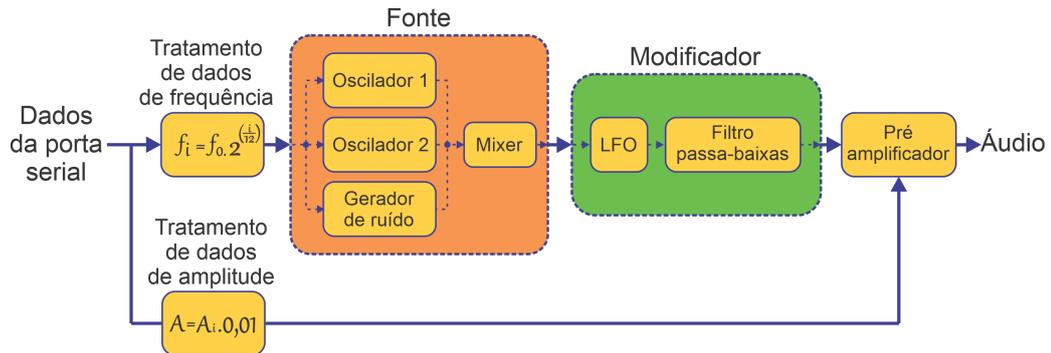
A Figura 33 apresenta um diagrama de blocos para a compreensão do processo de síntese desenvolvido, cujos principais métodos serão descritos a seguir.

1 - **Dados da porta serial:** Os dados obtidos pelos sensores são pré-tratados por meio do Arduino Nano e enviados via porta serial ao módulo de síntese sonora para a criação do sinal de áudio.

Para a determinação da frequência do sinal de áudio gerado, implementou-se no algoritmo de síntese uma rotina para o cálculo de valores, a qual determina a frequência das notas musicais da seguinte forma:

$$f_i = 2^{\left(\frac{i}{12}\right)} \times f_0, \quad (5.2)$$

Figura 33 – Diagrama de blocos do módulo de síntese do protótipo de Theremin



Fonte – Autoria própria

sendo que f_i é a frequência a ser determinada, f_0 é a frequência de referência e i o número de semitons entre a nota de referência e a nota desejada. Dessa forma, atribui-se a f_0 a frequência de 110 Hz correspondente à nota lá 2, duas oitavas abaixo do lá 4 em 440 Hz e os dados do sensor de frequência à variável i . Os valores recebidos a partir do sensor de frequência determinam qual é a nota musical que deve ser gerada pelos osciladores, logo, como o intervalo de valores varia entre 0 e 36, o instrumento possui um alcance de 3 oitavas.

Para a determinação da amplitude do sinal, implementou-se no algoritmo uma equação que determina o valor da amplitude da seguinte forma:

$$A = A_i \times 0,01, \quad (5.3)$$

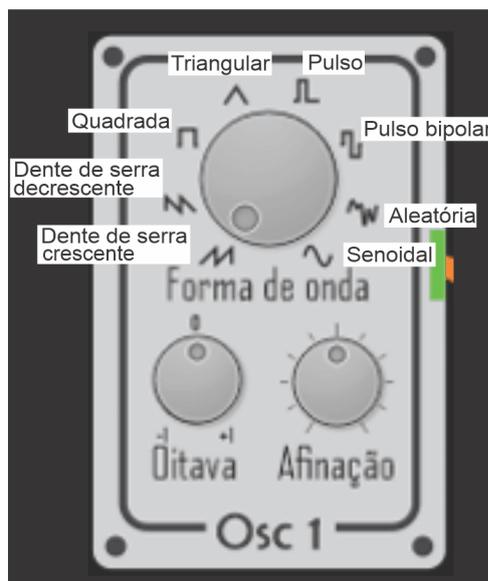
em que A é a amplitude a ser determinada, A_i é a variável que recebe o valor referente ao sensor de amplitude enviado pela porta serial, o qual varia entre 0 e 100 e, por fim, o valor 0,01 multiplica os valores recebidos fazendo com que os valores de A variem no intervalo de 0 à 1 correspondente com a faixa de valores utilizadas pelo bloco pré-amplificador, o qual é responsável por receber dados tratados do sensor de amplitude e aplicá-los sobre o sinal recebido após a passagem pelo bloco modificador, e ajustar a amplitude final do sinal.

2 - Bloco fonte: O módulo implementado é constituído por um bloco fonte, o qual contém dois osciladores e um gerador de ruídos, ambos conectados a um *mixer*.

Os dois osciladores implementados, conforme mostrado na Figura 34, são idênticos e capazes de gerar oito tipos de onda diferentes sendo elas: dente de serra crescente, dente de serra decrescente, quadrada, triangular, pulso, pulso bipolar, aleatória e senoidal.

Com o intuito de proporcionar maior flexibilidade sonora foram adicionados um controle de oitava, capaz de modificar a região das notas produzidas podendo diminuir ou aumentar em uma oitava, além de um controle de afinação que produz uma pequena desafinação no timbre gerado pelo oscilador.

Figura 34 – Interface gráfica: Botões do oscilador implementado no bloco de síntese do protótipo de Theremin proposto



Fonte – Autoria própria

O bloco fonte também possui um gerador de ruído, conforme mostrado na Figura 35, que dá ao usuário a possibilidade de adicionar um ruído ao timbre, podendo alternar entre o ruído rosa, ruído branco e ruído marrom.

Figura 35 – Interface gráfica: Botão do gerador de ruído implementado no bloco de síntese do protótipo de Theremin proposto



Fonte – Autoria própria

Na síntese sonora, os ruídos são comumente utilizados para simular sons de vento, chuva, mar ou explosões, porém também é possível adicioná-los aos sons puros dos osciladores simulando por exemplo o sopro de um flautista ao tocar o instrumento.

As diferentes colorações utilizadas na nomenclatura dos ruídos referem-se ao conteúdo de frequências de cada um. O ruído branco apresenta todas as frequências audíveis na mesma amplitude, já o ruído rosa é uma variação do ruído branco porém com a atenuação das frequências mais altas, o que o torna mais grave em relação ao anterior, e por fim o ruído marrom possui uma atenuação ainda maior nas altas frequências tornando-se o

mais grave entre os três.

Por fim, o bloco fonte conta com uma etapa de mixagem dos geradores sonoros, conforme mostrado na Figura 36. Esse processo é responsável por misturar os sinais provenientes dos osciladores e do gerador de ruído, e ajustar seus volumes. Assim o usuário pode definir a proporção de cada um dos geradores no timbre gerado.

Figura 36 – Interface gráfica: Botões do *mixer* implementado no bloco de síntese do protótipo de Theremin proposto



Fonte – Autoria própria

3 - **Bloco modificador:** O bloco modificador implementado é constituído por um LFO e um filtro passa-baixas.

O LFO, cujos botões são mostrados na Figura 37, é aplicado sobre o parâmetro de nitidez do sinal emitido pelo bloco fonte.

Figura 37 – Interface gráfica: Botões do LFO implementado no bloco de síntese do protótipo de Theremin proposto



Fonte – Autoria própria

O elemento em questão é responsável por fazer com que o sinal aumente ou diminua a quantidade de harmônicos no espectro, para um sinal triangular, por exemplo, um valor baixo de nitidez faz com que os picos tornem-se mais “arredondados”, o contrário torna esses picos mais “pontiagudos”, o que sonoramente implica em se ter um som mais “opaco” ou mais “brilhante”. A aplicação do LFO faz com que o sinal sofra oscilações periódicas, entre as características citadas anteriormente, semelhante ao efeito de mudança da frequência de corte de um filtro, dessa forma o som gerado ganha dinâmica e movimento.

Esse componente apresenta quatro controles, sendo eles: Forma de onda, amplitude, frequência e nitidez, os quais são descritos a seguir:

- **Controle de forma de onda:** Determina qual será o formato da onda aplicada ao timbre produzido no bloco fonte, permitindo ao usuário alternar dentre os oito tipos de onda mencionados anteriormente;
- **Controle de amplitude:** É responsável por determinar qual é a intensidade do LFO sobre o timbre, deixando-o mais ou menos aparente;
- **Controle de frequência:** Determina a frequência do sinal gerado, aumentando ou diminuindo o número de oscilações, o que provoca um efeito de aumento/diminuição de velocidade;
- **Controle de nitidez:** Controla o “brilho” do LFO sobre o timbre, permitindo ao usuário deixar o LFO aplicado sobre o timbre mais “brilhante” ou mais “opaco”;

Por fim, a Figura 39 apresenta o filtro passa-baixas implementado no bloco modificador.

Figura 38 – Interface gráfica: Filtro passa-baixas implementado no bloco de síntese do protótipo de Theremin proposto

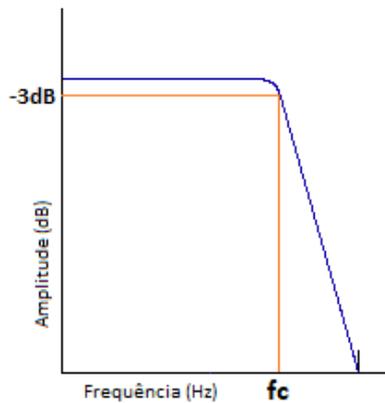


Fonte – Autoria própria

Os filtros são elementos responsáveis por permitir a passagem de determinadas frequências e atenuar as demais.

O filtro implementado no módulo de síntese é do tipo passa-baixas, cujo comportamento é demonstrado a partir de um gráfico na Figura 39.

Figura 39 – Gráfico de um filtro passa-baixas

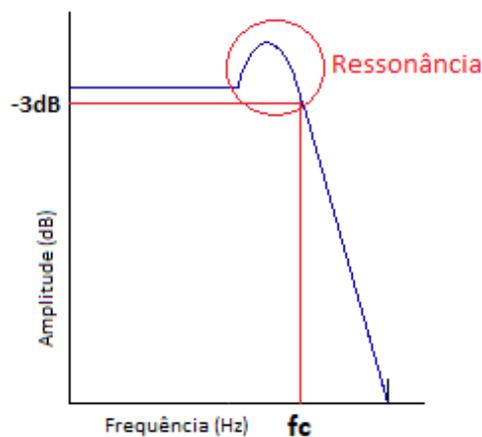


Fonte – Autoria própria

em que f_c é a frequência de corte do filtro situada no ponto em que ocorre a atenuação de $3dB$ em relação ao sinal inicial. Esse tipo de filtro permite a passagem das frequências abaixo da frequência de corte, e em contrapartida atenua as frequências acima da frequência de corte. O filtro implementado no módulo permite ao usuário ajustar a frequência de corte o que muda a característica do timbre gerado, deixando o mais “abafado” ou mais “aberto”.

O filtro implementado apresenta ainda um controle de ressonância conforme o gráfico mostrado Figura 40.

Figura 40 – Gráfico de um filtro passa-baixas com ressonância



Fonte – Autoria própria

A ressonância do filtro, também chamada de fator Q , ocorre quando o som na banda de passagem é enviado novamente ao filtro, provocando uma realimentação, cuja quantidade afeta a intensidade do som das frequências nessa região e modifica o timbre.

5.5 INTERFACE DE USUÁRIO

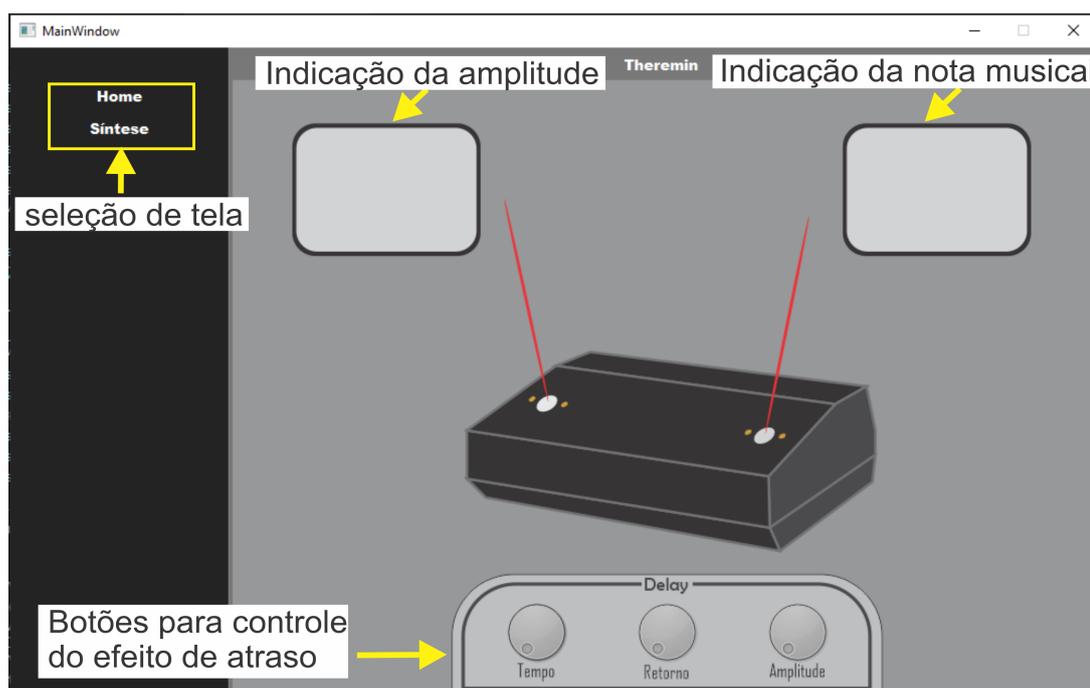
Para a interação do usuário com o sistema foi desenvolvida uma interface gráfica utilizando a linguagem Python 3.6 por meio do *software* Visual Studio Code (MICROSOFT CORPORATION, 2021) em conjunto com a biblioteca PyQt 5 (RIVERBANK COMPUTING LIMITED, 2020), o *software* QT Designer (THE QT COMPANY, 2018) e o *software* Corel Draw 2020 (BOUILLON; BEIRNE, 2020).

Inicialmente, para o desenvolvimento dos desenhos e imagens apresentadas na interface gráfica utilizou-se o *software* Corel Draw. O desenvolvimento das janelas da interface foram implementados por meio do QT Designer, *software* que utilizada como base a biblioteca PyQt 5. Por fim, para atribuir as funcionalidades aos botões utilizou-se o Visual Studio Code.

A interface foi implementada de modo a permitir uma conexão com o sistema de controle do instrumento para o envio e recebimento de dados, possibilitando a interação do usuário com o protótipo através do ajuste de parâmetros de acordo com suas preferências.

A Figura 41 apresenta a tela principal da interface, na qual o usuário pode verificar em tempo real a nota musical que está sendo executada, bem como a sua amplitude em uma escala de 0 à 100.

Figura 41 – Tela principal da interface gráfica do protótipo de Theremin proposto

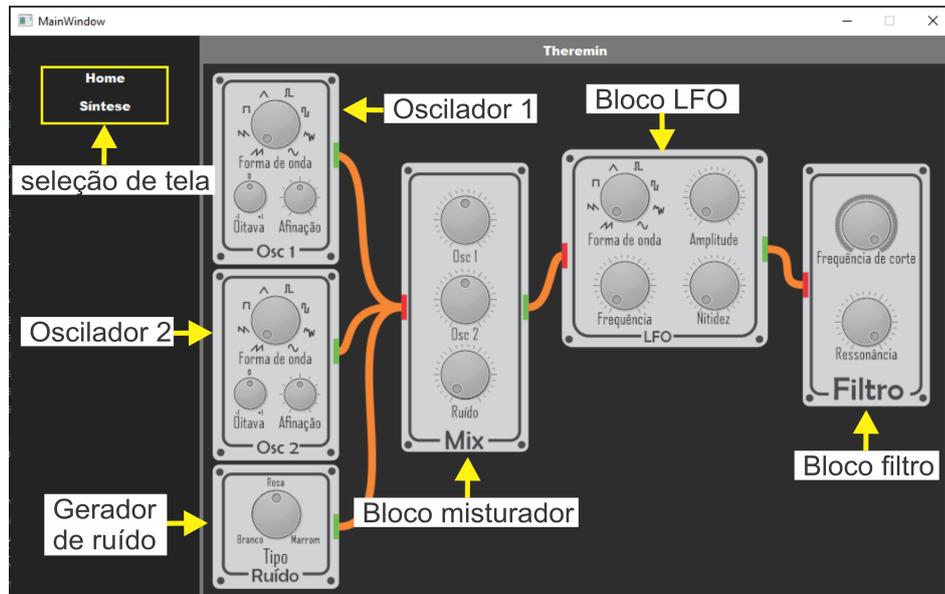


Fonte – Autoria própria

Esta tela também apresenta os controles de um efeito de atraso, o quais provocam um “eco” no timbre do instrumento que cria uma ambiência no som gerado.

Além da tela principal, a interface desenvolvida possui ainda uma subtela, a qual é apresentada na Figura 42, responsável por modificar os parâmetros do módulo de síntese.

Figura 42 – Subtela do módulo de síntese do protótipo de Theremin proposto



Fonte – Autoria própria

Esta tela foi desenvolvida de modo que o usuário pudesse perceber visualmente como é organizada a cadeia de processos da síntese do instrumento. Nela, o usuário pode alterar diretamente as formas de ondas geradas pelos osciladores, a oitava de cada oscilador, a afinação, o tipo de ruído, o volume de cada oscilador ou gerador de ruído, a forma de onda do LFO, sua amplitude, sua frequência e sua nitidez, e por fim a frequência de corte do filtro passa-baixas e sua ressonância, alterando assim as características tímbricas do instrumento.

6 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e explicados os experimentos realizados para a validação do projeto, divididos em testes técnicos e teste funcionais.

6.1 RESULTADOS TÉCNICOS

Nesta seção são apresentados em detalhes os testes realizados para verificar o funcionamento do sistema.

6.1.1 RELAÇÃO DISTÂNCIA-FREQUÊNCIA DO PROTÓTIPO

Para verificar o comportamento do protótipo levantou-se experimentalmente sua capacidade de emitir determinadas frequências para distâncias conhecidas. Os testes realizados consistiam em verificar quais as frequências obtidas para distâncias conhecidas, em que, idealmente deveria se obter as frequências da nota A, partindo da distância correspondente a nota A1 (55 Hz) até a nota A6 (1760 Hz), nota mais aguda produzida pelo instrumento.

Após as medições, com o intuito de avaliar o quanto a frequência obtida se afasta da frequência esperada calculou-se o Erro Geométrico Médio (EGM) para dez amostras de cada nota A, a partir da seguinte equação:

$$EGM = \sqrt[n]{\prod_1^n |f_{ref} - f_i|}, \quad (6.1)$$

em que, o índice n da raiz e do produtório corresponde ao número de amostras, f_{ref} recebe a frequência de referência e f_i recebe a frequência medida.

As amostras, o EGM calculado para as amostras de cada nota A de referência, e EGM total calculado com os valores do EGM em cada oitava, são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Erro Geométrico Médio

Nota	Amostras										EGM
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
A1	55,96	55,32	57,60	55,64	56,28	56,12	55,16	57,10	55,80	56,28	0,80
A2	110,96	114,87	112,90	111,28	110,64	113,88	113,22	112,25	114,21	112,9	3,95
A3	221,27	222,56	219,37	217,47	225,14	216,22	220,64	221,91	222,56	223,85	3,27
A4	438,73	446,40	451,59	447,69	445,11	440	434,95	438,73	448,99	440	7,73
A5	874,93	877,46	867,38	872,41	864,88	869,89	862,39	880	877,46	874,63	18,88
A6	1754,92	1749,86	1760	1744,82	1749,86	1760	1754,92	1739,78	1744,82	1760	15,21

Fonte – Autoria própria

Na Tabela 1, verifica-se a partir do EGM em Hz obtido para cada nota A, que o erro não afeta significativamente o funcionamento do protótipo, pois os valores obtidos são menores que um semitom, menor intervalo entre duas notas na escala cromática temperada de 12 notas por oitava, cujo intervalo em Hz entre duas notas específicas dobra a cada aumento de oitava.

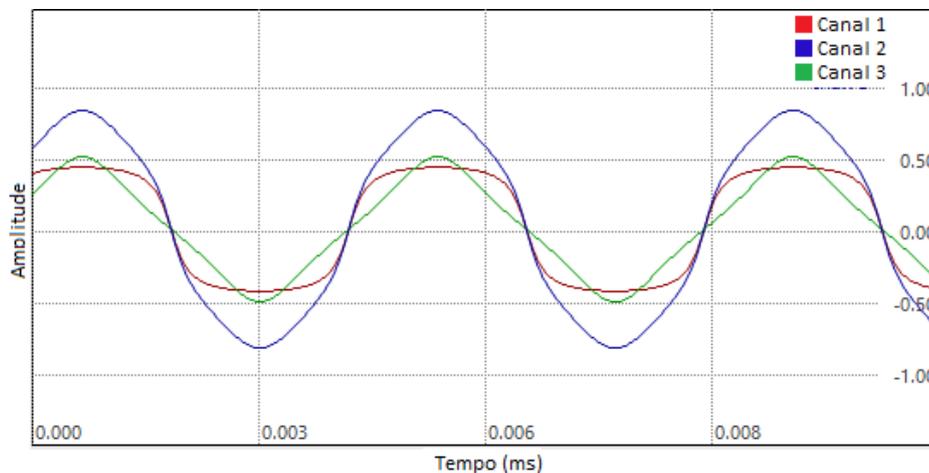
6.1.2 SÍNTESE DE ÁUDIO

Para validar o funcionamento do módulo de síntese, foram realizados testes capturando o sinal após cada elemento com intuito de verificar o comportamento do sinal.

6.1.2.1 Osciladores: Considerados os principais elementos da síntese sonora, os osciladores são os responsáveis por criar as formas de onda, que posteriormente serão modificadas para criar novas texturas sonoras.

Os osciladores do módulo de síntese permitem gerar diferentes formas de onda e combiná-las entre si, como o exemplo mostrado na Figura 43.

Figura 43 – Gráfico de onda quadrada em 440 Hz combinada com onda triangular em 440 Hz



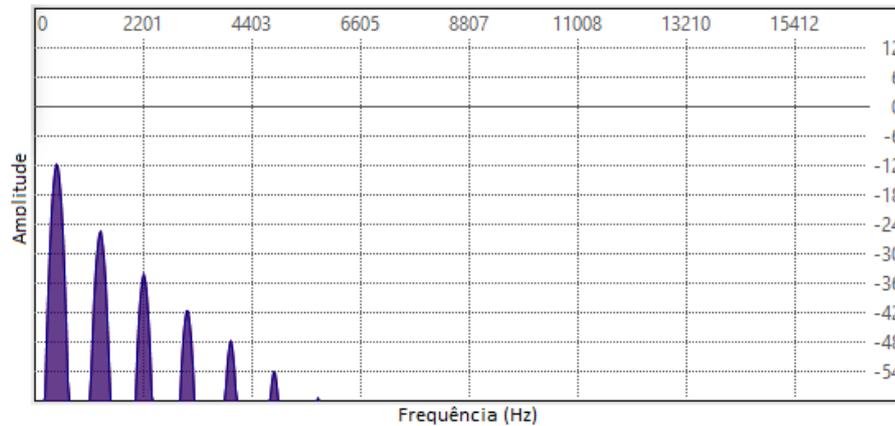
Fonte – Autoria própria

A Figura 43 mostra uma combinação entre dois sinais, sendo um sinal quadrado com frequência igual a 440 Hz em vermelho e um sinal triangular com frequência igual a 440 Hz em verde, gerados pelos osciladores 1 e 2, respectivamente. A Figura 43 apresenta também a resultante da combinação em azul. O espectro da onda quadrada é mostrado a seguir.

Conforme pode ser observado na Figura 44 a onda quadrada apresenta além da componente fundamental apenas harmônicos ímpares que decrescem linearmente em relação

à seus índices. O espectro da onda triangular é mostrado a seguir.

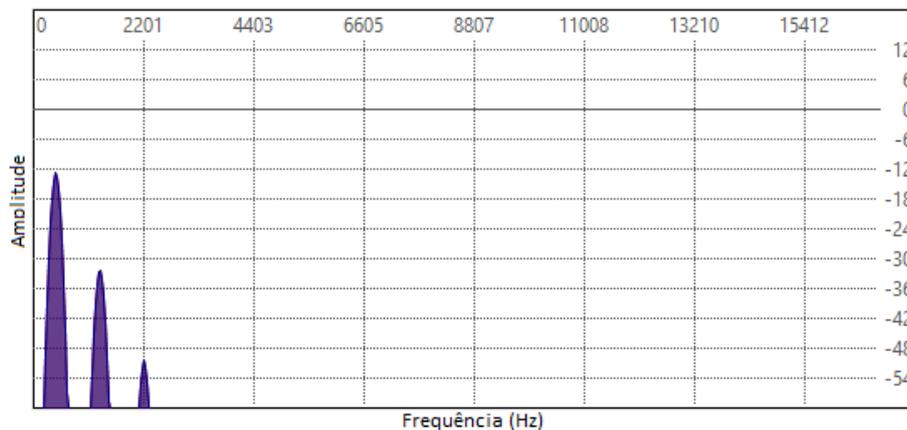
Figura 44 – Espectro de onda quadrada em 440 Hz da Fig. 43



Fonte – Autoria própria

Assim como a onda quadrada, a onda triangular cujo espectro é mostrado na Figura 45 também apresenta harmônicos ímpares, no entanto o decrescimento é exponencial.

Figura 45 – Espectro de onda triangular em 440 Hz da Fig. 43

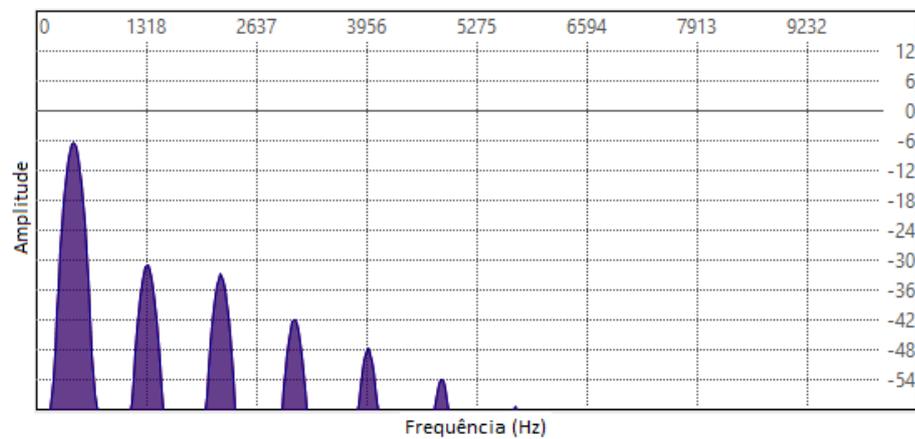


Fonte – Autoria própria

No espectro da combinação dos sinais, apresentado na Figura 46, pode se observar que a componente fundamental, o terceiro e o quinto harmônico da onda triangular somam-se à fundamental e aos harmônicos correspondentes da onda quadrada aumentando sua amplitude. O resultado sonoro obtido é um som “oco” com “suavidade”, devido as características da onda quadrada e triangular, respectivamente.

6.1.2.2 Gerador de ruído: Para verificar o comportamento do gerador de ruídos, o mesmo foi aplicado sobre um sinal gerado pelos osciladores 1 e 2, respectivamente, mos-

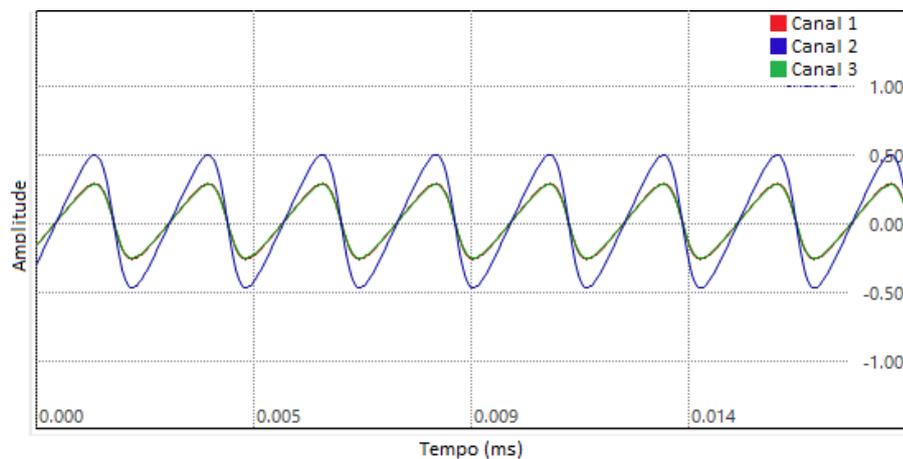
Figura 46 – Espectro da combinação entre uma onda quadrada e uma triangular em 440 Hz da Fig. 43



Fonte – Autoria própria

trado na Figura 47.

Figura 47 – Gráfico de onda dente de serra crescente em 440 Hz



Fonte – Autoria própria

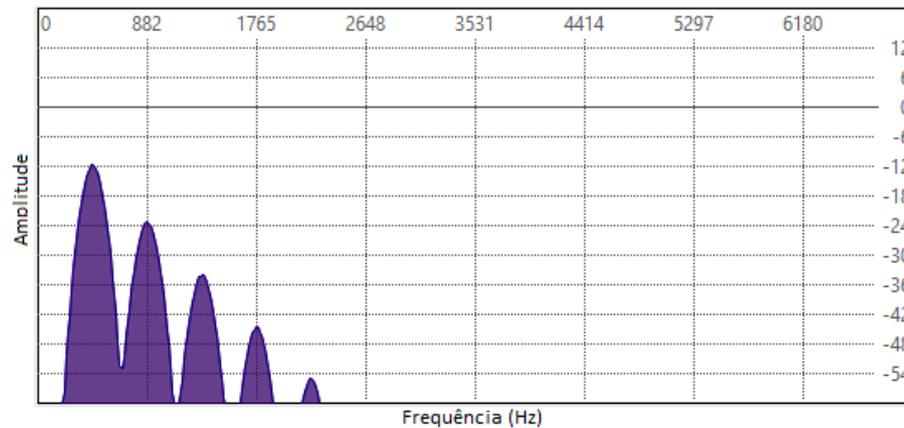
O sinal mostrado na Figura 47 é composto por um sinal em vermelho no formato dente de serra crescente em 440 Hz e um sinal em verde de mesmo formato, frequência e amplitude. A resultante desse sinal vista em azul possui o mesmo formato, porém com maior amplitude devido a soma das amplitudes iniciais.

A Figura 48 apresenta o espectro do sinal resultante, no qual pode ser observado, além da componente fundamental, harmônicos pares e ímpares que decrescem linearmente em função de seus índices.

Ao aplicar um ruído branco sobre a resultante dos sinais apresentados na Figura 47, cuja característica é apresentar componentes em todas as frequências, obtém-se um novo

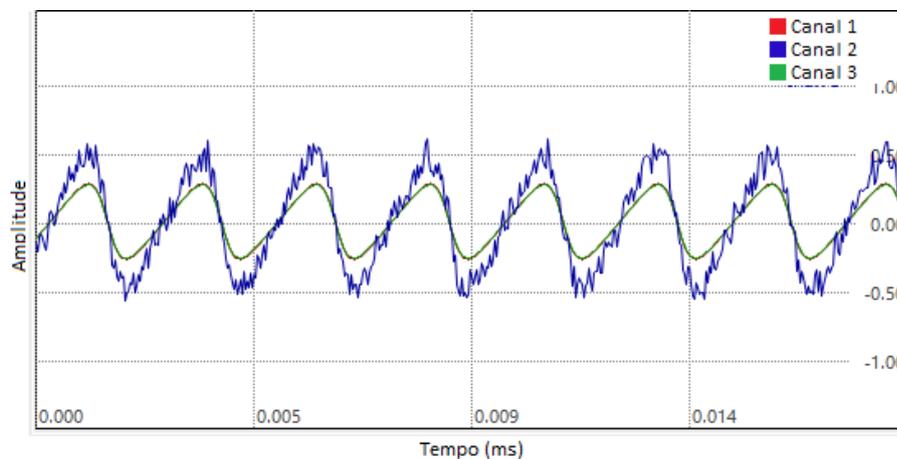
sinal, conforme mostrado na Figura 49.

Figura 48 – Espectro onda dente de serra crescente em 440 Hz resultante da Fig. 47



Fonte – Autoria própria

Figura 49 – Gráfico de onda dente de serra crescente em 440 Hz da Fig. 47 com adição de ruído branco

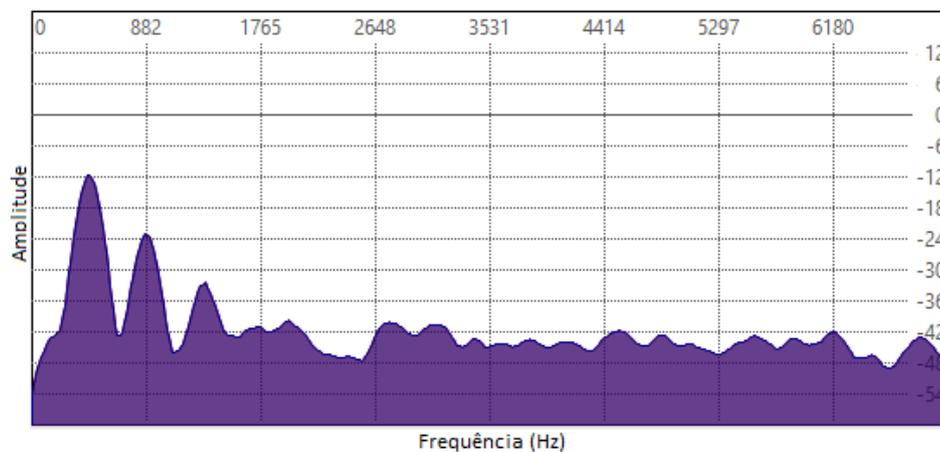


Fonte – Autoria própria

É possível verificar a partir da Figura 49 que o sinal mantém sua característica de onda dente de serra crescente, no entanto a adição do ruído branco cria distorções sobre o sinal.

Conforme esperado, na Figura 50, o espectro obtido apresenta componentes em todas as frequências devido a adição do ruído branco e picos na região da frequência fundamental e dos harmônicos da onda dente de serra. Em termos de sonoridade, o resultado obtido é um som brilhante, proveniente da quantidade de harmônicos da onda dente de serra, juntamente com um “chiado” produzido pelo ruído branco.

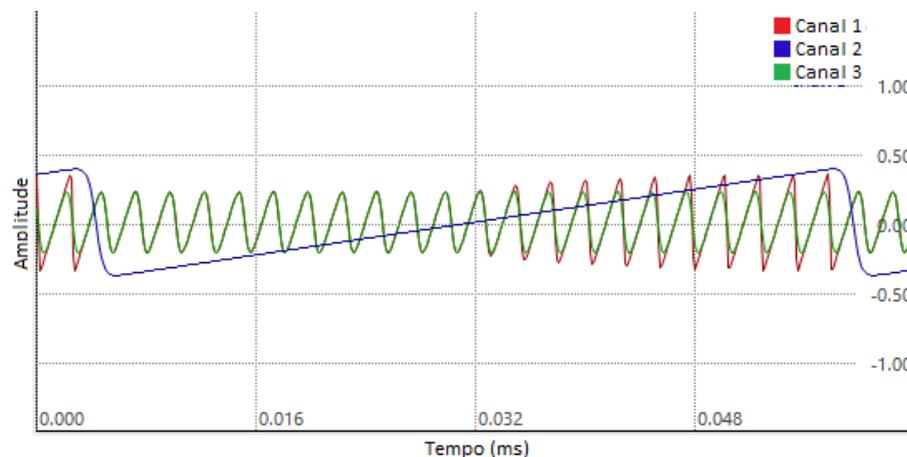
Figura 50 – Espectro de onda dente de serra crescente em 440 Hz com adição de ruído branco da Fig. 49



Fonte – Autoria própria

6.1.2.3 Bloco LFO: Responsável pela dinâmica do timbre, um LFO com sinal do tipo dente de serra crescente, de frequência igual a 20 Hz foi aplicado sobre um sinal composto por dois sinais do tipo dente de serra de 440 Hz, cujo resultado é mostrado na Figura 51.

Figura 51 – Gráfico de onda dente de serra crescente em 440 Hz com aplicação de um LFO



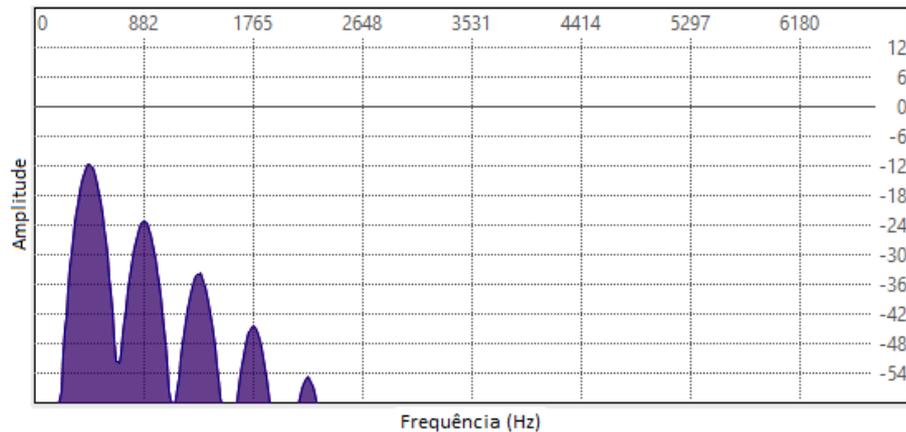
Fonte – Autoria própria

Na figura apresentada, o sinal em vermelho corresponde ao sinal resultante da aplicação do LFO, o sinal em verde corresponde a um sinal sem a modificação, para fins de comparação e, por fim, o sinal em azul corresponde ao sinal gerado pelo LFO.

Verifica-se que a aplicação do LFO faz com que os picos fiquem mais ou menos pontiagudos conforme o formato do sinal modificador. Observa-se que, para valores negativos do sinal gerado pelo LFO, o sinal dos osciladores torna-se mais arredondado em seus picos, já para a parte positiva, os picos do sinal dos osciladores crescem de acordo com o crescimento do LFO.

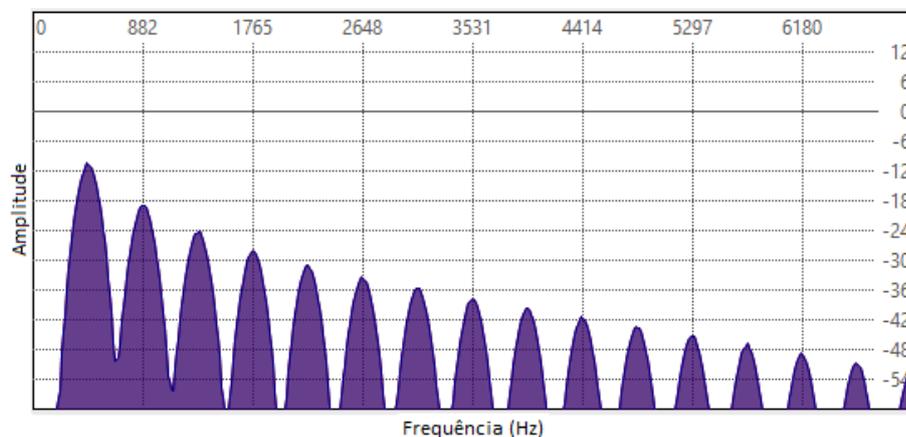
As Figura 52 e Figura 53 apresentam o espectro resultante da aplicação do sinal do LFO para os instantes em que, a amplitude do sinal modificador é mínimo e para o instante em que o valor é máximo.

Figura 52 – Instante inicial do espectro da onda dente de serra crescente em 440 Hz com aplicação de um LFO



Fonte – Autoria própria

Figura 53 – Instante final do espectro da onda dente de serra crescente em 440 Hz com aplicação de um LFO



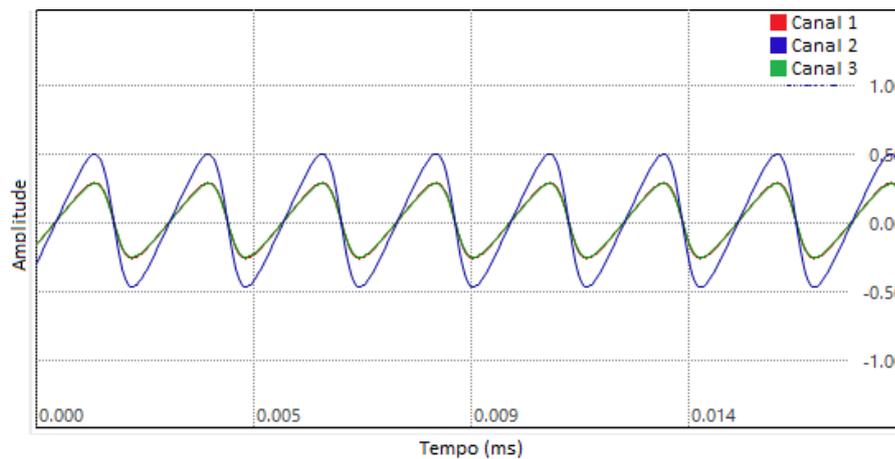
Fonte – Autoria própria

A partir disso, é possível verificar que o espectro aumenta sua quantidade de harmônicos ao mudar do instante inicial para o instante final, efeito que ocorre gradativamente de acordo com a frequência do sinal modificador. O resultado sonoro obtido corresponde ao aumento de “brilho” do timbre em função do tempo, ou seja, o timbre parte de uma sonoridade opaca para uma mais brilhante, semelhante a “abertura” de um filtro, e, como ocorre de forma cíclica imprime dinâmica e sensação de movimento ao timbre.

6.1.2.4 Filtro: Responsável pelo tratamento final do sinal gerado, o filtro é a base do conceito de síntese subtrativa pois é ele o responsável justamente por subtrair componentes de frequência do sinal.

O sinal utilizado para os testes do bloco de filtro foi o mesmo utilizado para o teste de geração de ruídos, cujo gráfico e espectro são mostrados na Figura 54 e na Figura 55, respectivamente.

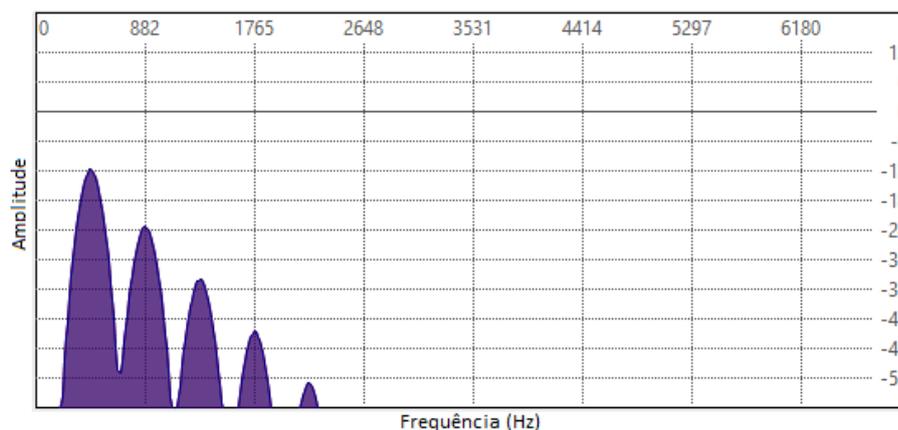
Figura 54 – Gráfico de onda dente de serra crescente em 440 Hz para teste do bloco de filtro



Fonte – Autoria própria

Os sinais em vermelho e verde correspondem aos sinais dos osciladores, enquanto o sinal em azul corresponde à resultante da combinação dos sinais.

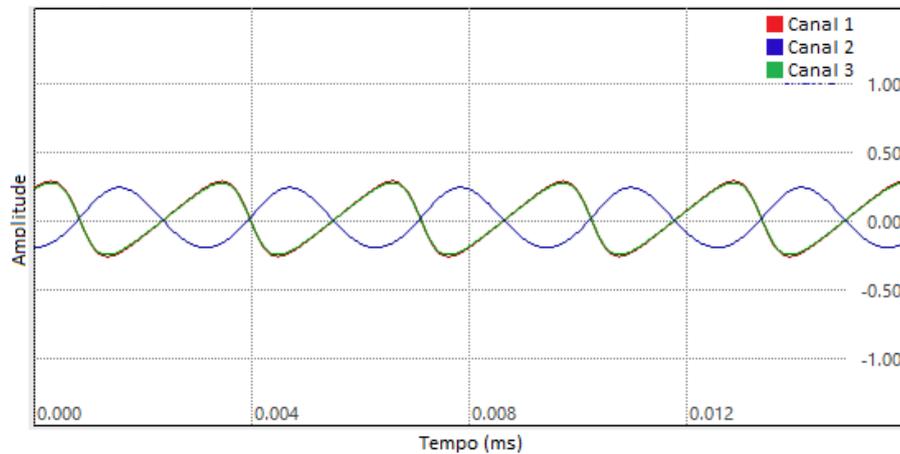
Figura 55 – Espectro de onda dente de serra crescente em 440 Hz da 54 usado para o teste do bloco de filtro



Fonte – Autoria própria

A Figura 56 apresenta o sinal obtido após a aplicação do filtro passa-baixas com frequência de corte igual a 440 Hz sem ressonância, onde os sinais em vermelho e verde correspondem aos sinais dos osciladores, enquanto o sinal em azul corresponde ao sinal resultante, ao qual o filtro foi aplicado.

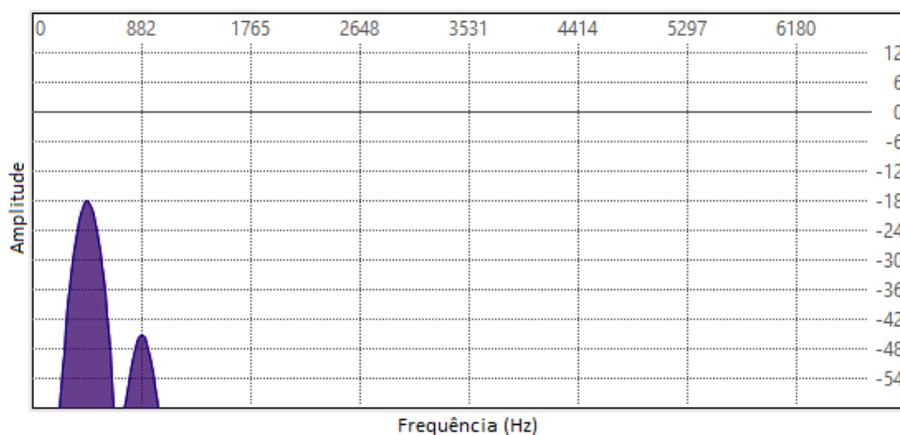
Figura 56 – Gráfico de onda dente de serra crescente em 440 Hz com aplicação de filtro sem ressonância



Fonte – Autoria própria

A partir do gráfico, verifica-se que o sinal resultante aproxima-se de uma senoide deslocada em relação ao sinal inicial. O espectro do sinal filtrado pode ser visto na Figura 57.

Figura 57 – Espectro da onda dente de serra crescente em 440 Hz da 56



Fonte – Autoria própria

Verifica-se que o terceiro, quarto e quinto harmônicos são totalmente atenuados, enquanto que o segundo harmônico sofre uma atenuação significativa. O efeito observado explica o fato do sinal resultante aproximar-se de uma senoide, uma vez que a mesma possui apenas a componente fundamental. É possível ainda observar que a retirada dessas componentes afeta também a amplitude do sinal.

Para verificar a sonoridade das formas de onda, dos ruídos, atuação do LFO e do filtro, algumas amostras de áudio foram gravadas e disponibilizadas no enlace: <https://bit.ly/3spG6RH>.

6.2 RESULTADOS FUNCIONAIS

Nesta seção, são apresentados os resultados referentes a diversidade tímbrica, análise de custo do instrumento, demonstração usabilidade do instrumento e por fim um artigo gerado a partir do trabalho.

1 - **Análise de custo:** Para validar o custo-benefício do projeto, a Tabela 2 apresenta o custo de todos os materiais utilizados para a construção do protótipo. Conforme exibido na Tabela 2, o custo total para o desenvolvimento do projeto foi de R\$ 360,21. Ressalta-se que os valores apresentados consideram também os custos de frete cobrados pelo envio dos materiais.

Tabela 2 – Custo de materiais e frete

MATERIAIS	QTD.	VALORES UNIT.
Arduino Nano	1	R\$ 68,70
Placa Borne Adaptador Arduino Nano	1	R\$ 27,84
Kit Jumpers Macho-Fêmea - 10 unidades	1	R\$ 15,33
Sensor VL53L0X	1	R\$ 45,95
Sensor VL53L0X	1	R\$ 45,95
Caixa PB-900/2	1	R\$ 73,44
Pedestal com cachimbo	1	R\$ 75,00
TOTAL		R\$ 360,21

Fonte – Autoria própria

Em buscas feitas em sites de instrumentos musicais é possível encontrar Theremins na faixa de R\$ 2900,00. A diferença de valores entre o protótipo desenvolvido e um Theremin comercial pode ser justificada por variáveis como impostos, salários, aluguéis, dentre outros custos aos quais uma grande empresa está sujeita. Com isso, verifica-se que existe viabilidade para o desenvolvimento do protótipo.

2 - **Análise da diversidade tímbrica:** O módulo de síntese subtrativa desenvolvido possibilitou a geração de som com diferentes timbres. Devido à enorme gama de combinações possíveis oferecidas pelo processo de síntese sonora, pode-se dizer que é impossível quantificar o número total de timbres de um sintetizador, uma vez que a mínima variação em um parâmetro provoca uma alteração no som, o que pode classificá-lo como um novo timbre. Contudo, com o intuito de comprovar que o protótipo oferece uma boa diversidade tímbrica, a Tabela 3 apresenta algumas configurações aplicadas ao módulo desenvolvido.

A Tabela 3 fornece configurações executadas pelo autor para verificação do módulo de síntese, cujos timbres apresentados foram criados e nomeados pelo mesmo. As configurações indicadas com sinal de % indicam ao usuário a posição do botão rotativo presente

na interface gráfica, por exemplo, a configuração igual a 50 % indica que o botão deve ser colocado na posição vertical, já para algumas configurações utiliza-se a letra “x” para indicar que o parâmetro não afetará a configuração do timbre, podendo ser configurado com qualquer tipo ou valor.

Tabela 3 – Configurações de parâmetros de síntese para obtenção de timbres

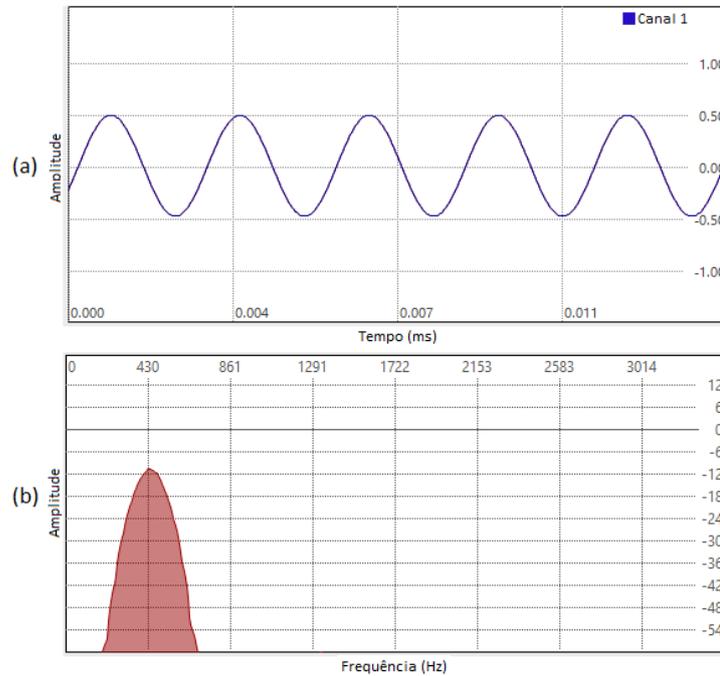
TIMBRE	CONFIGURAÇÕES						
	OSC 1	OSC 2	RUÍDO	MIX	LFO	FILTRO	ATRASO
Teremin Básico	Forma de onda: Senoidal	Forma de onda: x		Osc1: 50%	Forma de onda: x		Tempo: 0
	Oitava: 0	Oitava: x	Tipo: x	Osc2: x	Amplitude: 0%	Freq. corte: 100%	
	Afinação: 50%	Afinação: x			Frequência: x	Ressonância: 100%	Retorno: 0%
				Ruído: 0%	Nitidez: x		
Fantasma	Forma de onda: Senoidal	Forma de onda: Senoidal		Osc1: 50%	Forma de onda: x		Tempo: 25%
	Oitava: 0	Oitava: -1	Tipo: x	Osc2: 50%	Amplitude: 0%	Freq. corte: 100%	
	Afinação: 50%	Afinação: 50%			Frequência: x	Ressonância: 100%	Retorno: 25%
				Ruído: 0%	Nitidez: x		
Helicóptero	Forma de onda: Quadrada	Forma de onda: Dente de serra decrescente		Osc1: 50%	Forma de onda: Dente de serra decrescente		Tempo: 25%
	Oitava: 0	Oitava: 1	Tipo: Branco	Osc2: 50%	Amplitude: 100%	Freq. corte: 25%	
	Afinação: 50%	Afinação: 50%			Frequência: 10%	Ressonância: 100%	Retorno: 50%
				Ruído: 15%	Nitidez: 100%		

Fonte – Autoria própria

A Figura 58 apresenta os gráficos correspondentes ao primeiro timbre criado, chamado “Theremin básico”. Esse timbre consiste de uma única onda senoidal produzida pelo oscilador 1, com frequência igual a 440 Hz. Conforme esperado, na Figura 58 (a) a onda possui um formato senoidal com frequência igual a 440 Hz. O espectro na Figura 58 (b), não possui harmônicos, apresentando apenas a componente fundamental.

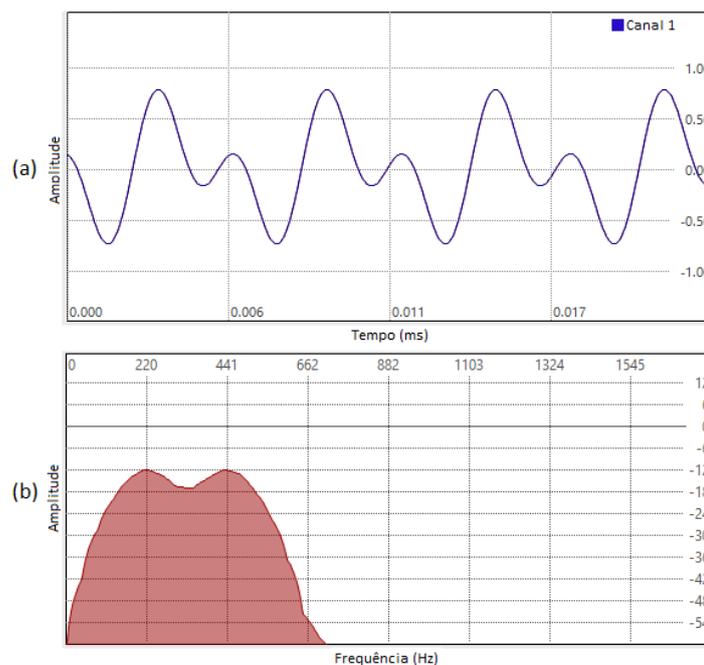
A Figura 59 apresenta os gráficos correspondentes ao segundo timbre criado, denominado “Fantasma”. Esse timbre consiste em uma superposição de duas ondas senoidais de mesma amplitude porém com frequências diferentes. Para a amostra apresentada, um dos sinais possui frequência igual a 440 Hz e o outro possui uma frequência uma oitava abaixo, sendo igual a 220 Hz. Dessa maneira o som ouvido assemelha-se a dois instrumentos sendo tocados ao mesmo tempo, um com registro mais agudo e outro com registro mais grave. A Figura 59 (a) mostra o resultado obtido pela superposição, cujo sinal possui formato senoidal com frequência igual a 440 Hz, porém com amplitude duas vezes maior que os sinais originais. Conforme mostra o espectro na Figura 58 (b) a frequência do sinal obtido concentra-se em 440 Hz.

Figura 58 – Representação gráfica do timbre “Theremin básico” (a) sinal no tempo e (b) espectro



Fonte – Autoria própria

Figura 59 – Representação gráfica do timbre “Fantasma” (a) sinal no tempo e (b) espectro



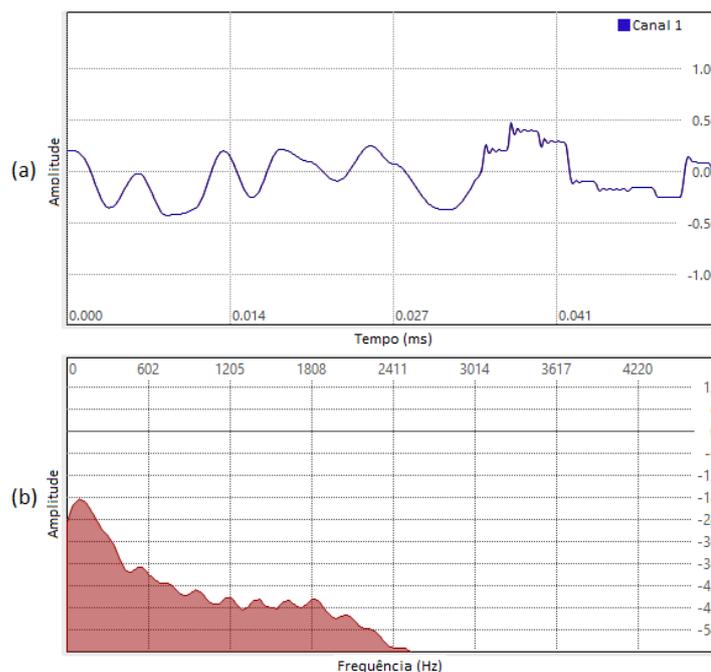
Fonte – Autoria própria

Por fim a Figura 60 apresenta os gráficos correspondentes ao terceiro timbre criado,

denominado “Helicóptero”. Esse timbre consiste em uma superposição de duas ondas aleatórias de mesma amplitude porém com frequências diferentes. Para a amostra apresentada, um dos sinais possui frequência igual a 440 Hz e o outro possui uma frequência a uma oitava abaixo, sendo igual a 220 Hz. Acrescenta-se a esse sinal um ruído e posteriormente um LFO com formato de onda dente de serra crescente e frequência igual a 10 Hz e. Por fim, o sinal é filtrado a uma frequência de corte igual a 2 kHz.

A Figura 60 (a) mostra o sinal gerado, cujo formato é indefinido. É possível observar pequenas distorções sobre o sinal, proveniente da adição do ruído branco. Conforme o espectro mostrado na Figura 60 (b) o sinal obtido possui componentes apenas abaixo de 2 kHz, frequência de corte do filtro. O som ouvido possui características percussivas, com oscilações periódicas geradas pelo LFO e, adicionalmente o ruído branco cria uma “sensação” de vento, fazendo com que o produto final se pareça com o som de um helicóptero.

Figura 60 – Representação gráfica do timbre “Theremin básico” (a) sinal no tempo e (b) espectro



Fonte – Autoria própria

Para verificar a sonoridade dos timbres citados, algumas amostras de áudio foram gravadas e disponibilizadas no enlace: <https://bit.ly/3iXOhlv>.

3 - Usabilidade do instrumento: Com o intuito de demonstrar a usabilidade do instrumento foi composta e registrada em vídeo uma peça musical para o instrumento. A partitura referente a composição encontra-se no Apêndice C.

Por fim, também foi executada a partir do instrumento a música “*Over the rainbow*” composta por Harold Arlen e Yip Harburg e amplamente executada por thereministas. A

partitura da canção encontra-se no Apêndice C.

4 - **Submissão de artigo:** O projeto desenvolvido deu origem a um artigo com o conteúdo resumido do trabalho, o qual foi submetido para publicação na revista *International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing*. A carta de confirmação de submissão e o artigo na íntegra podem ser conferidos no Apêndice C.

7 CONCLUSÕES

Ao realizar esse projeto, almejou-se desenvolver um instrumento capaz de manter suas características de afinação independente das condições do ambiente, com uma boa relação custo-benefício, com diversidade tímbrica, grande facilidade de interpretação e uma interface gráfica intuitiva.

O protótipo desenvolvido apresentou resultados positivos em relação aos testes aplicados. O módulo de síntese de áudio desenvolvido mostrou-se capaz de produzir diferentes timbres, através do ajuste de parâmetros. O desenvolvimento do *software* de interface contribui para um uso intuitivo do instrumento, além de auxiliar o usuário na compreensão dos elementos da síntese sonora. O custo total para o desenvolvimento do protótipo frente ao custo de instrumentos encontrados no mercado, permitiu concluir que existe uma boa relação custo-benefício.

Espera-se que o protótipo possa ser utilizado como ferramenta de auxílio à professores no ensino de música, tanto na introdução à musicalização, quanto no desenvolvimento da percepção musical. Além disso o protótipo poderá ser utilizado como ferramenta de introdução ao ensino de métodos de síntese de áudio.

Para trabalhos futuros, sugere-se desenvolver o método de síntese em um dispositivo embarcado, integrado ao instrumento de modo a melhorar sua portabilidade, permitindo que o instrumento possa ser utilizado sem a necessidade de um PC.

REFERÊNCIAS

- AJAX SOUND STUDIO. **Pyo 1.0.4 documentation**. Montreal, Canadá: [s.n.], 2021. Disponível em: <<http://ajaxsoundstudio.com/pyodoc/index.html>>. Acesso em: 23 de março de 2021.
- ALCIATORE, D.; HISTAND, M. **Introdução à Mecatrônica e aos Sistemas de Medições**. 4^a. ed. São Paulo, Brasil: AMGH, 2014.
- ALVARENGA, L. **Tratado geral sobre o som e a música**. 1^a. ed. [S.l.]: Clube de Autores, 2017.
- BOUILLON, M.; BEIRNE, P. **Corel Draw 2020**. Ottawa, Canadá, 2020. Disponível em: <<https://www.coreldraw.com/br/>>.
- BRITO, T. **Música na educação infantil: Propostas para a formação integral da criança**. 2^a. ed. São Paulo, Brasil: Peirópolis, 2003.
- CASA DA ROBÓTICA. **Sensor laser**. 2021. Disponível em: <<https://www.casadarobotica.com/sensores-modulos/sensores/movimento-proximidade/modulo-sensor-de-distancia-laser-vl53l0x?parceiro=3259>>. Acesso em: 23 de junho de 2021.
- CUNHA, G.; MARTINS, M. Tecnologia, produção & educação musical descompassos e desafinos. In: **IV Congresso da Rede Iberoamericana de Informática Educativa**. Brasília, Brasil: [s.n.], 1998.
- DESHMUKH, A. **Microcontrollers: Theory and Applications**. 1^a. ed. New Delhi, Índia: Tata McGraw-Hill, 2005. (Computer engineering series).
- EDIFIER. **Edifier R1580mb**. 2016. Disponível em: <<http://www.edifier.com.br/r1580mb-edifier/>>. Acesso em: 30 de setembro de 2019.
- FILIPE FLOP. **Arduino Nano**. 2021. Disponível em: <<https://www.filipeflop.com/produto/placa-nano-v3-0-cabo-usb-para-arduino/>>. Acesso em: 20 de junho de 2021.
- FRITSCH, E. **MEPSON: Métodos de ensino de programação sônica para músicos**. 437 f. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 2002.
- GOMES, A.; ALBUQUERQUE, D.; CAMPOS, G.; VIEIRA, J. Theremin: The ultrasonic theremin. **Audio Engineering Society**, New York, Estados Unidos da América, n. 127, p. 1–7, 2009.
- HANINDHITO, B.; HOGANTARA, H.; RAHMAH, A.; AHMADI, N.; ADIONO, T. Ultrasonic sensor based contactless theremin using pipeline cordic as tone generator. **International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS)**, Bandung, Indonésia, p. 268–273, 2015.
- HUBER, D.; RUNSTEIN, R. **Técnicas Modernas de Gravação de Audio**. 7^a. ed. Rio de Janeiro, Brasil: Elsevier, 2011.

- IAZZETTA, F. **Sons de Silício: Corpos e Máquinas Fazendo Música**. 228 f. Tese (Doutorado) — Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, São Paulo, Brasil, 1996.
- IAZZETTA, F. Revendo o papel do instrumento na música eletroacústica. In: **II Encontro de Música Eletroacústica**. Brasília, Brasil: II Encontro de Música Eletroacústica, 1997.
- JENKINS, L. **Manual Ilustrado Dos Instrumentos Musicais**. 1^a. ed. São Paulo, Brasil: Irmãos Vitale, 2009.
- LOUREIRO, M.; PAULA, H. Timbre de um instrumento musical: caracterização e representação. **Per Musi**, Brasília, Brasil, v. 20, n. 14, p. 57–81, 2006.
- MARTÍN, C.; MARTÍNEZ, J.; RICCHIUTI, A.; GONZÁLEZ, H.; FRANCO, C. Study of the interference affecting the performance of the theremin. **International Journal of Antennas and Propagation**, Hindawi Publishing Corporation, v. 2012, n. 9, p. 1–9, 2012.
- MED, B. **Teoria da música**. 4^a. ed. Brasília, Brasil: [s.n.], 1996.
- MICROSOFT CORPORATION. **Visual Studio Code**. Redmond, EUA, 2021. Disponível em: <<https://code.visualstudio.com/>>.
- NIKITIN, P. Leon Theremin (Lev Termen). **IEEE Antennas and Propagation Magazine**, n. 5, p. 252–257, 2012.
- PETRUZELLA, F. **Controladores Lógicos Programáveis**. 2^a. ed. Porto Alegre, Brasil: AMGH, 2014.
- QUIMELLI, C. **THEREMIN: Música e eletrônica no ensino da arte-ciência**. Dezembro 2018. 97 f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciência e Tecnologia) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Aveiro, 2019.
- RAMÍREZ, L.; JIMÉNEZ, G.; CARREÑO, J. **Sensores y Actuadores: Aplicaciones con Arduino**. 1^a. ed. Cidade do México, México: Grupo Editorial Patria, 2014.
- RIVERBANK COMPUTING LIMITED. **PyQT5**. Poundbury, UK, 2020. Disponível em: <<https://pypi.org/project/PyQt5/>>.
- RUSS, M. **Sound Synthesis and Sampling**. 3^a. ed. Burlington, Estados Unidos da América: Focal Press, 2008.
- SKELDON, K.; REID, L.; MCINALLY, V.; DOUGAN, B.; FULTON, C. Physics of the theremin. **American Association of Physics Teachers**, Glasgow, Escócia, n. 11, p. 945–955, 1998.
- SOUZA, M. **História Da Música**. 1^a. ed. [S.l.]: Clube de Autores, 2017.
- THE QT COMPANY. **QT Designer**. Espoo, Finlândia, 2018.
- ULLOA, M. O que é isto, audição musical? **Repertório: Revista acadêmica de teatro e dança**, Salvador, Brasil, n. 11, p. 53–60, 2008.

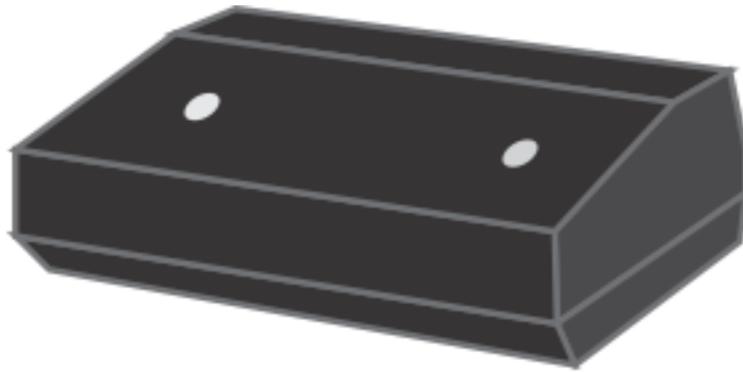
USINA INFO. **Patola**. 2021. Disponível em: <<https://www.usinainfo.com.br/caixas-patola/caixa-patola-case-para-montagem-66-x-200-x-142-mm-pb-9002-preto-4385.html>>. Acesso em: 21 de junho de 2021.

XIAO, X.; LOCQUEVILLE, G.; D’ALESSANDRO, C.; DOVAL, B. T-voks: the singing and speaking theremin. **New Interfaces for Musical Expression**, Porto Alegre, Brasil, n. 19, p. 110–115, 2019.

ZUBEN, P. **Música e tecnologia: O som e seus novos instrumentos**. 1^a. ed. São Paulo, Brasil: Irmãos Vitale, 2004.

APÊNDICE A – MANUAL DE INSTRUÇÕES DO INSTRUMENTO E
DA INTERFACE

MANUAL DE INSTRUÇÕES



ÍNDICE

1. Introdução.....	02
2. Componentes do instrumento.....	03
3. Conexões do elétricas do sistema.....	04
4. Instruções.....	05
5. Características do instrumento.....	06
6. Interface de usuário.....	07

INTRODUÇÃO

Este manual foi elaborado para auxiliar na correta utilização da ferramenta, a qual foi desenvolvida para auxiliar na educação musical. O equipamento foi desenvolvido pelo aluno Marcos Ramos dos Santos, sob orientação do Prof. Dr. Andrés Eduardo Coca Salazar, como trabalho de conclusão de curso de Engenharia Eletrônica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), campus Toledo.

O intuito dessa ferramenta é auxiliar no processo de musicalização, auxiliando o desenvolvimento da percepção musical.

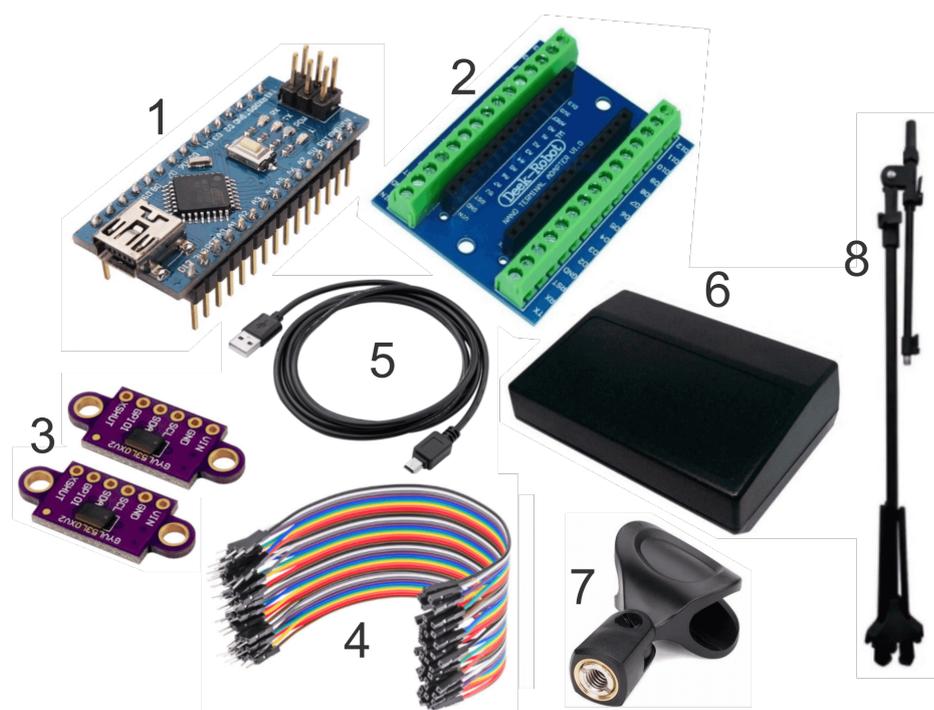
Este manual apresenta todos os componentes do sistema, suas conexões elétricas, a conexão serial e a interface de usuário.

COMPONENTES DO INSTRUMENTO

O instrumento é composto pelos componentes mostrados na Figura 61.

1. Arduino Nano V3
2. Placa borne para Arduino Nano
3. Sensores de distância laser
4. Fios de conexão
5. Cabo USB
6. Caixa para projetos
7. Adaptador para pedestal
8. Pedestal

Figura 61 – Componentes numerados do instrumento

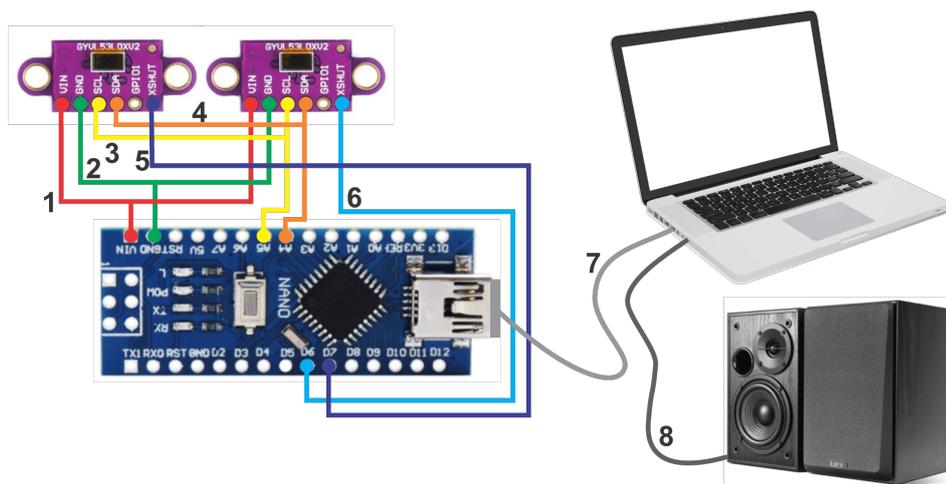


Fonte – Autoria própria

CONEXÕES DO SISTEMA

A seguir, a Figura 62 apresenta todas as conexões elétricas do sistema, as quais são descritas na Tabela 4.

Figura 62 – Conexões elétricas do sistema numeradas



Fonte – Autoria própria

Tabela 4 – Conexões elétricas do sistema

Nº da conexão	Descrição
1	+5V para alimentação dos sensores
2	GND para alimentação dos sensores
3	Sinal de Clock para comunicação I ² C
4	Transmissão de dados para comunicação I ² C
5	Conexão para habilitar/desabilitar o sensor 1
6	Conexão para habilitar/desabilitar o sensor 2
7	Conexão USB para comunicação serial
8	Conexão para monitor de áudio

Fonte – Autoria própria

INSTRUÇÕES

A seguir são apresentados os passos para a correta utilização da ferramenta.

- 1 - Acoplar o módulo físico do instrumento ao pedestal;
- 2 - Conectar o cabo USB do instrumento ao PC;
- 3 - Conectar ao PC um dispositivo para amplificação de áudio;
- 4 - Inicializar o a *software* de controle/interface;

CARACTERÍSTICAS DO INSTRUMENTO

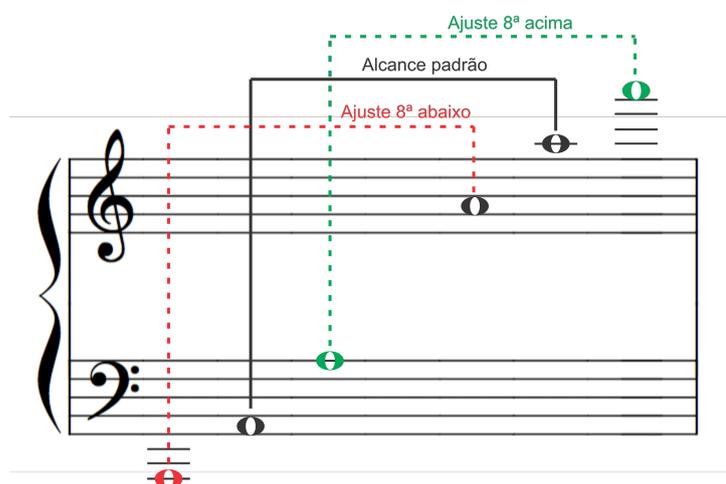
Cada instrumento musical possui características particulares, podendo ser classificado de acordo com a família a qual pertence, pela altura do som, pelo material de sua construção, entre outras características.

A seguir são apresentadas as características do Theremin desenvolvido.

- **Tessitura:** A tessitura refere-se ao conjunto de notas musicais emitidas com qualidade por um instrumento musical ou pela voz humana.

Conforme mostrada na Figura 63, o Theremin desenvolvido possui uma tessitura padrão de A2 à A5, podendo ser deslocada uma oitava acima ou abaixo de acordo com a preferência do usuário.

Figura 63 – Tessitura do Theremin desenvolvido



Fonte – Autoria própria

Adicionalmente, o módulo de síntese desenvolvido pode alterar a tessitura do instrumento para uma oitava acima indo de A3 à A6, quanto uma oitava abaixo indo de A1 à A4.

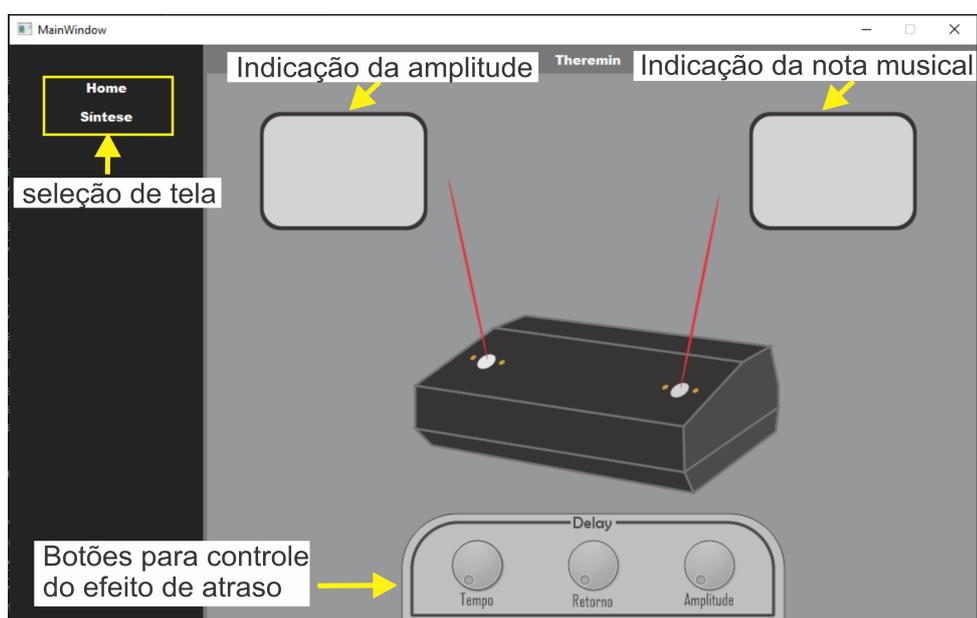
- **Registro:** O registro do instrumento é o intervalo musical completo reproduzido pelo instrumento com qualidade. No caso do Theremin desenvolvido, seu registro é amplo abrangendo o grave, médio e agudo.

INTERFACE DE USUÁRIO - PRIMEIROS PASSOS

O *software* que acompanha a ferramenta é responsável por gerar o som do instrumento através do módulo de síntese e, controlar e monitorar seus parâmetros via interface de usuário.

Após conectar o instrumento ao PC via cabo USB, o próximo passo é inicializar o *software*. Ao executar o programa, a comunicação serial é estabelecida automaticamente e a tela principal do software é mostrada, conforme a Figura 64.

Figura 64 – Tela principal da interface gráfica



Fonte – Autoria própria

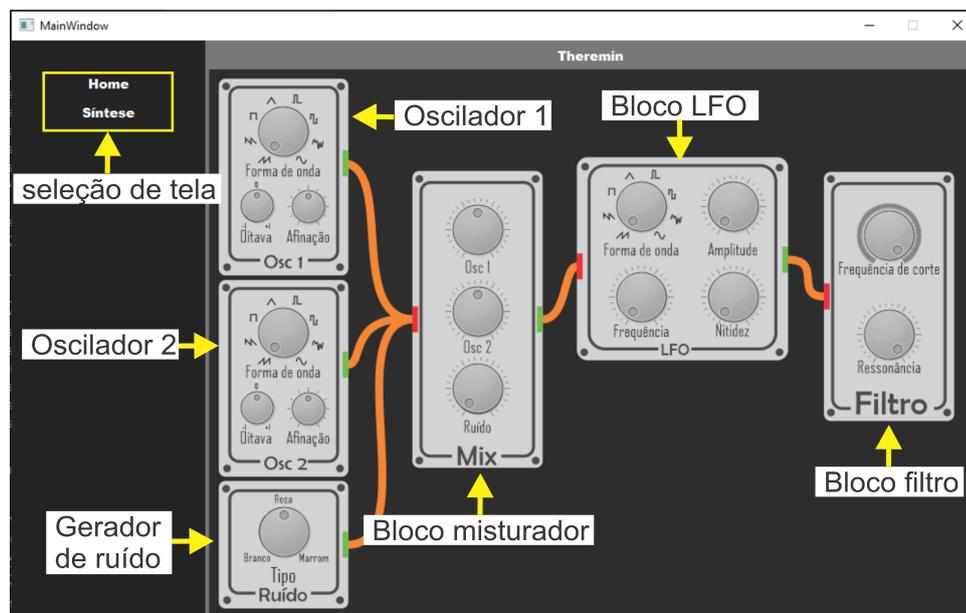
Nessa tela o usuário pode visualizar o volume e a nota musical executada. A nota musical serve como uma referência para que o usuário possa se localizar dentro da extensão do instrumento, porém, como no Theremin original a afinação da nota depende do ouvido do músico.

Nessa tela o usuário pode aplicar um efeito de "eco" ao som do instrumento para criar ambiência e dar profundidade ao timbre, cujos controles são:

- **Tempo:** Determina a velocidade das repetições, ou seja, quanto maior o valor maior o tempo entre as repetições, tornando as repetições mais lentas;
- **Retorno:** Determina o número de repetições, quanto maior o valor mais vezes as repetições acontecem;
- **Amplitude:** Determina a quantidade de efeito sobre o timbre;

Na coluna a esquerda da tela, é possível visualizar os botões para mudança de tela, o que permite ao usuário navegar entre tela principal e a tela de síntese. Essa segunda tela, mostrada na Figura 65 é a responsável por controlar os parâmetros para a criação do timbre,

Figura 65 – Tela secundária da interface gráfica



Fonte – Autoria própria

Os primeiros passos para a criação de um timbre é entender cada um dos controles e sua influência sobre o timbre. Dessa forma, serão apresentadas a seguir o funcionamento dos controles e instruções iniciais.

- **Osciladores:** O primeiro passo é conhecer a sonoridade dos elementos mais primitivos da síntese sonora, as formas de onda. Como os osciladores podem gerar oito tipos diferentes, é importante testar e verificar a sonoridade de cada uma utilizando o controle de forma de onda. Em seguida, é interessante aplicar o controle de oitava para verificar sua atuação sobre a onda. O controle de afinação pode não fazer sentido sobre um som único, mas em uma combinação pode gerar uma sonoridade interessante, portanto vale a pena testar também suas possibilidades.
- **Ruído:** Sem muitos segredos, o controle de ruído gera ruídos diferentes que podem não fazer sentido individualmente, mas em combinações com formas de onda podem enriquecer a sonoridade, portanto é importante conhecer essa ferramenta.
- **Misturador:** O bloco misturador é simples e de fácil compreensão. Esse elemento controla o volume de cada um dos blocos primários, o que pode dar flexibilidade as criações. Basicamente, por meio dos controles o usuário escolhe o que deve soar mais alto e o que deve soar mais baixo.

- **LFO:** Talvez o elemento mais complexo do módulo, o LFO acrescenta movimento ao som. Para um iniciante, o primeiro passo é aumentar sua amplitude ao máximo para que sua influência no timbre seja a maior possível e em seguida modificar sua frequência em diferentes valores. Com as diferentes frequências o usuário irá perceber as variações de velocidade sobre o timbre, assim o próximo passo é mudar as formas de onda e ouvir as mudanças de comportamento e, posteriormente testar o controle de nitidez, responsável por deixar o efeito sobre o timbre mais ou menos brilhante.
- **Filtro:** O filtro é um dos elementos mais didáticos do módulo de síntese implementado. O elemento em questão permite a passagem das frequências abaixo da frequência de corte e atenua as que estão acima. Para um iniciante, o primeiro passo é modificar a posição do controle de frequência de corte e percorrer a extensão do instrumento com o intuito de perceber qual a interferência desse elemento sobre som. O usuário irá verificar um abafamento em sons mais agudos devido ao filtro estar limitando as frequências agudas. O próximo passo é verificar a influência do controle de ressonância sobre o timbre modificando a posição do controle e percorrendo a extensão do instrumento. Durante a varredura o usuário irá perceber um leve aumento de volume e em seguida uma diminuição gradual.

**APÊNDICE B – CARTA DE SUBMISSÃO E ARTIGO
SUBMETIDO À REVISTA INTERNATIONAL JOURNAL OF
CIRCUITS, SYSTEMS AND SIGNAL PROCESSING**

O projeto desenvolvido deu origem a um artigo com o conteúdo resumido do trabalho. A seguir, são apresentadas a carta de submissão e o artigo na íntegra.

**APÊNDICE C – PARTITURA DE UMA OBRA COMPOSTA
PARA O INSTRUMENTO E DA MÚSICA OVER THE RAINBOW**

A seguir, são apresentadas as partituras das músicas *Song for theremin* composta pelo autor para o instrumento e *Somewhere Over The Rainbow* composta por Harold Arlen e Yip Harburg.

APÊNDICE D – CÓDIGOS COMPLETOS

O código implementado no microcontrolador presente no módulo físico, assim como o código implementado para geração da síntese subtrativa, estão disponíveis na plataforma online de hospedagem de códigos-fonte GitHub, nos enlaces https://github.com/ramos-marcos/Theremin_Arduino_VL53L0X e https://github.com/ramos-marcos/Modulo_de_sintese_subtrativa_PYO, respectivamente.