

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELÉTRICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

HERCULES VINICIUS TABOLKA DE MORAES

**REPRODUÇÃO DE ACORDES MUSICAIS COM MÃO
MECÂNICA EM UM TECLADO A PARTIR DE UM
ANALISADOR DE ESPECTRO SONORO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2018

HERCULES VINICIUS TABOLKA DE MORAES

**REPRODUÇÃO DE ACORDES MUSICAIS COM MÃO
MECÂNICA EM UM TECLADO A PARTIR DE UM
ANALISADOR DE ESPECTRO SONORO**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Elétrica da Coordenação de Engenharia Elétrica - DA-ELE - da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, Câmpus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. César Rafael Claire Torrico

PATO BRANCO

2018

TERMO DE APROVAÇÃO

O Trabalho de Conclusão de Curso intitulado **REPRODUÇÃO DE ACORDES MUSICAIS COM MÃO MECÂNICA EM UM TECLADO A PARTIR DE UM ANALISADOR DE ESPECTRO SONORO**, do aluno **Hercules Vinicius Tabolka de Moraes** foi considerado **APROVADO** de acordo com a ata da banca examinadora **Nº 203** de **2018**.

Fizeram parte da banca examinadora os professores:

Prof. Dr. César Rafael Claire Torrico

Prof. Me. Everton Luiz de Aguiar

Prof. Dr. Kleiton de Moraes Sousa

A Ata de Defesa assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica.

Dedico este trabalho à minha família e à Deus.

A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê.

Arthur Schopenhauer

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço os meus pais e irmão por depositarem fé e esperança em mim, trilhando meu caminho e investindo mais do que possuem para que eu possa finalizar minha formação acadêmica. Mãe, sua preocupação, cuidado e atenção foi o que me ajudaram a continuar em frente. Pai, sua presença, tanto física como espiritual, foi o que me manteve focado e que não me deixou desistir.

Agradeço a minha namorada Flaviane Grando por estar sempre comigo quando eu mais precisei, me incentivando, acalmando, me lembrando dos meus objetivos e os motivos para eu continuar no curso, fazendo com que eu nunca desistisse ou desanimasse.

Ainda, aos amigos que estiveram comigo desde os primeiros dias do curso, em especial aos meus amigos Dionatan Bernardi, Rodrigo Moschetta Santos e Valquíria Ferrari, meu muito obrigado por todo o apoio e incentivo que me deram, aos momentos que tivemos juntos, as risadas, fins de semana de estudos, conhecimentos compartilhados e trabalhos realizados, fiquem cientes que vocês contribuíram com grande parte da minha formação acadêmica.

Agradeço ao meu professor orientador César Rafael Claire Torrico pela paciência na orientação e valiosos conselhos dados, tenha certeza que contribuíram muito para o desenvolvimento do meu trabalho e escrita desta monografia. Aos demais professores que me ensinaram desde o básico até os conhecimentos específicos necessários para o desenvolvimento do meu Trabalho de Conclusão de Curso, muito obrigado.

Agradeço também ao laboratorista, Célio Degaraes, e aos auxiliares da sala de apoio, em especial ao Matheus Toccolini, por disponibilizar os equipamentos e componentes utilizados para o desenvolvimento do meu trabalho, ajudado na resolução de alguns problemas que tive e pela amizade que temos.

Por fim, agradecimentos à marcenaria ArqSoma por desenvolver o protótipo da mão mecânica com tanto capricho e atenção.

RESUMO

MORAES, Hercules Vinicius Tabolka de. Reprodução de acordes musicais com mão mecânica em um teclado a partir de um analisador de espectro sonoro. 2018. f. Trabalho de Conclusão de Curso - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2018.

Este trabalho apresenta a elaboração de dois métodos para o reconhecimento de acordes musicais (sendo os acordes: Dó, Ré, Mi, Fá, Sol, Lá e Si), em que um deles será utilizado em um sistema capaz de reproduzir o acorde analisado em um teclado musical com o auxílio de uma mão mecânica. Um dos métodos é completamente inovador e é baseado na varredura de frequências. Cada faixa de frequência, do acorde em análise, é analisado para que seja formado um vetor característico de 23 posições e comparado com 7 vetores base, em que cada vetor base, que também possui 23 posições, corresponde a um acorde de referência; o outro método é baseado no reconhecimento de padrões, em que a ideia principal é classificar o objeto analisado (acorde) em uma das classes pré-estabelecidas (acordes base) através de uma medida de distância conhecida como distância Euclidiana, e um classificador do tipo supervisionado. O sistema pode ser dividido em três partes: a primeira parte consta de um algoritmo de classificação, cujo o intuito é fazer o reconhecimento espectral do sinal musical através da Transformada Rápida de Fourier e compara-lo com acordes musicais de referência; a segunda parte do sistema é responsável por fazer a conexão entre o sistema de reconhecimento e o objeto que executará os acordes musicais no teclado musical: uma placa de aquisição de dados. A placa de aquisição de dados NI 6009 possui 12 saídas digitais e cada saída será responsável pelo acionamento de um dedo da mão mecânica (com a ajuda de um driver de acionamento). A rotina de reconhecimento dos acordes musicais comandará quais saídas deverão ser acionadas para que a mão mecânica reproduza o acorde musical reconhecido pelo sistema; a última etapa do sistema é um dispositivo eletromecânico capaz de reproduzir acordes musicais em um teclado: uma mão mecânica. Uma oitava de um teclado musical possui 12 notas, logo a mão mecânica possui 12 dedos, sendo que cada um é responsável por reproduzir uma nota musical. Embaixo de cada dedo possui um material ferromagnético fixado e uma barra de ferro circundada por um carretel de 1000 espiras. Quando a bobina é energizada, a barra de ferro torna-se um eletroímã e atrai o material ferromagnético fixado no dedo, o qual produz um movimento vertical (de cima para baixo) reproduzindo a nota no teclado musical. Ao finalizar os testes, o método baseado na varredura de frequências apontou uma eficiência de 64% no reconhecimento de acordes, enquanto que o método baseado no reconhecimento de padrões, o qual foi utilizado na implementação do sistema, reconheceu os acordes com uma eficiência de 100%. No final, a mão mecânica reproduziu todos os acordes analisado de maneira correta e rápida, atendendo os objetivos do trabalho.

Palavras-chave: varredura de frequências, reconhecimento de padrões, Transformada Rápida de Fourier, análise de espectro sonoro, classificação de acordes musicais.

ABSTRACT

MORAES, Hercules Vinicius Tabolka de. Sound reproduction with a mechanical hand on a keyboard from a sound spectrum analyzer. 2018. f. Course Completion Work - Electrical Engineering Course, Federal Technological University of Paraná. Pato Branco, 2018.

This work presents the elaboration of two methods for the recognition of musical chords (chords: Dó, Ré, Mi, Fá, Sol, Lá and Si), in which one of them will be used in a system capable of reproducing the chord analyzed in a musical keyboard with the aid of a mechanical hand. One of the methods is completely innovative and is based on frequency scanning. Each frequency range of the chord under analysis is analyzed so that a characteristic vector of 23 positions is formed and compared to 7 base vectors, where each base vector, which also has 23 positions, corresponds to a reference chord; the other method is based on pattern recognition, in which the main idea is to classify the analyzed object (chord) into one of the pre-established classes (base chords) through a distance measure known as Euclidean distance, and a classifier of the type supervised. The system can be divided into three parts: the first part consists of a classification algorithm whose purpose is to make the spectral recognition of the musical signal through the Fast Fourier Transform and compare it with reference musical chords; the second part of the system is responsible for making the connection between the recognition system and the object that will perform the musical chords on the music keyboard: a data acquisition board. The NI 6009 data acquisition board has 12 digital outputs and each output will be responsible for triggering a mechanical finger (with the help of a drive of activation). The chord recognition routine will command which outputs should be triggered so that the mechanical hand reproduces the musical chord recognized by the system; the last stage of the system is an electromechanical device capable of playing musical chords on a keyboard: a mechanical hand. An octave of a musical keyboard has 12 notes, so the mechanical hand has 12 fingers, each one of which is responsible for playing a musical note. Underneath each finger has a fixed ferromagnetic material and an iron bar surrounded by a spool of 1000 turns. When the coil is energized, the iron bar becomes an electromagnet and attracts the ferromagnetic material fixed on the finger, which produces a vertical movement (top to bottom) reproducing the note on the musical keyboard. At the end of the tests, the frequency scanning method showed a 64% efficiency in chord recognition, whereas the pattern recognition method, which was used in the system implementation, recognized the chords with an efficiency of 100%. In the end, the mechanical hand reproduced all the chords analyzed in a correct and fast way, meeting the objectives of the work.

Keywords: frequency scanning, pattern recognition, Fast Fourier Transform, sound spectrum analysis, musical chord classification.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1:	Comparação de duas cordas de um violão em função do tempo.	17
Figura 2:	Transformada Rápida de Fourier das notas mi.	17
Figura 3:	Envelope do som produzido por um tambor, trompete e flauta.	19
Figura 4:	Etapas do envelope.	19
Figura 5:	Frequências fundamental e harmônicas da corda mi de um violão.	21
Figura 6:	Notas de um teclado.	21
Figura 7:	Fluxograma da sequência de tons e semitons da escala maior.	23
Figura 8:	Fluxograma da sequência de tons e semitons da escala menor.	25
Figura 9:	Notas que formam o acorde C em um violão.	26
Figura 10:	Notas que formam o acorde C em um teclado musical.	26
Figura 11:	Acorde de G maior.	27
Figura 12:	Acorde de G maior com inversão.	27
Figura 13:	Estrutura típica de um sistema para o reconhecimento de padrões.	29
Figura 14:	Classificação supervisionada.	30
Figura 15:	Classificação não supervisionada.	30
Figura 16:	Frequências existentes até a quarta casa do violão.	32
Figura 17:	Comparação de dois acordes A para mostrar a variação de amplitude e frequência.	34
Figura 18:	Fluxograma da formação do vetor característico.	35
Figura 19:	Classificação de objetos através de medidas de distância.	36
Figura 20:	Ímãs elementares dos materiais magnéticos desorientados (antes de serem polarizados).	38
Figura 21:	Ímãs elementares de materiais magnéticos orientados (depois de polarizados).	39
Figura 22:	Limitações da construção da bobina.	40
Figura 23:	Driver utilizado para o acionamento das bobinas.	42

Figura 24: Integração do sistema de reconhecimento e reprodução de acordes musicais.	45
Figura 25: Comparação das notas y e z.	46
Figura 26: Circuito utilizado para parametrização da resistência de base. .	51
Figura 27: Configuração Darlington.	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1:	Escala de mi maior.	23
Tabela 2:	Escala maior das 12 notas de uma oitava.	24
Tabela 3:	Escala de mi menor.	24
Tabela 4:	Escala menor das 12 notas de uma oitava.	25
Tabela 5:	Notas que formam um acorde utilizando a inversão de acordes. .	28
Tabela 6:	Frequências que compõem os acordes musicais.	32
Tabela 7:	Frequências correspondentes de cada posição do vetor base. . .	32
Tabela 8:	Composição dos vetores base de cada acorde.	33
Tabela 9:	Características dos fios de cobre de diversas bitolas AWG. . . .	40
Tabela 10:	Componentes utilizados para a implementação do driver.	42
Tabela 11:	Tabela de probabilidade de sucesso na análise de um sinal acústico para o método 1.	43
Tabela 12:	Eficiência do sistema de classificação do método 1.	44

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS	13
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1	TRANSFORMADA DE FOURIER	15
2.2	TEORIA MUSICAL	18
2.2.1	CARACTERÍSTICAS MUSICAIS E SONORAS	18
2.3	FREQUÊNCIAS FUNDAMENTAIS E HARMÔNICAS DE SINAIS SONOROS	20
2.4	INTERVALOS MUSICAIS	21
2.4.1	ESCALA MAIOR	22
2.4.2	ESCALA MENOR	24
2.5	ACORDES	25
2.6	RECONHECIMENTO DE PADRÕES	28
2.6.1	TIPOS DE CLASSIFICADORES	29
3	SISTEMA PARA O RECONHECIMENTO DE ACORDES MUSICAIS	31
3.1	RECONHECIMENTO DE ACORDES COM VARREDURA DE FREQUÊNCIAS	31
3.1.1	ESTUDO DAS FREQUÊNCIAS DOS ACORDES	31
3.1.2	CONSTRUÇÃO DOS VETORES BASE	32
3.1.3	AQUISIÇÃO DOS SINAIS DE ÁUDIO	33
3.2	RECONHECIMENTO DE ACORDES COM RECONHECIMENTO DE PADRÕES	36
4	IMPLEMENTAÇÃO DA MÃO MECÂNICA	38
4.1	PROJETO DAS BOBINAS	38
4.2	DRIVER DE ACIONAMENTO	41
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	43

5.1 ANÁLISE DOS MÉTODOS DESENVOLVIDOS PARA O RECONHECIMENTO DE ACORDES MUSICAIS	43
5.2 INTEGRAÇÃO DO SISTEMA	44
5.3 DIFICULDADES ENCONTRADAS	45
6 CONCLUSÕES.....	48
APÊNDICE A - PROJETO DO DRIVER PARA ACIONAMENTO DAS BOBINAS .	51

1 INTRODUÇÃO

O estudo de técnicas de reconhecimento de padrões vem se desenvolvendo à medida que a sociedade cresce e evolui. A aplicação de metodologias deste gênero expande-se desde a área medicinal até segurança governamental (SÁ, 2000).

Vários trabalhos, utilizando o reconhecimento de padrões, foram desenvolvidos com intuito de aplicar na indústria musical, tais como classificar estilos de músicas, tipos de instrumentos, identificação de acordes, etc. Um exemplo que se encaixa nesta descrição é o trabalho de (GOMES, 2008).

Existem várias aplicações para esses estudos, tais como afinadores elétricos ou aplicativos de autoaprendizagem utilizando métodos visuais. Os métodos utilizados para desenvolver estes estudos são muito abrangentes, mas pode-se citar uma ferramenta muito utilizada: a transformada de Fourier (expressão matemática que permite analisar as frequências existentes em um sinal).

O presente trabalho aborda dois métodos para o reconhecimento de acordes musicais, onde um baseia-se na varredura de frequências e outro no reconhecimento de padrões, ambos utilizam a transformada de Fourier para análise espectral do sinal sonoro. Testes serão feitos em ambos os métodos para verificar a eficiência do reconhecimento do acorde musical, e então utiliza-lo em um sistema para reproduzir o acorde analisado em um teclado musical com o auxílio de uma mão mecânica.

A interface responsável por fazer a conexão do *software* (o qual possui o método de reconhecimento musical) com o *hardware* (mão mecânica) é a placa de aquisição de dados NI 6009, da *National Instruments*. Quando o método de reconhecimento musical reconhecer algum acorde, fará com que a placa de aquisição de dados acione as saídas correspondentes às notas musicais, as quais formam o acorde musical reconhecido.

Outros assuntos correlatos podem ser desenvolvidos para a automatização de sistemas utilizando o reconhecimento e classificação de objetos, podendo ser aplicados na indústria musical ou expandi-los para linhas de produções de empresas.

1.1 OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS

O objetivo geral do trabalho é desenvolver um sistema para reproduzir acordes musicais com uma mão mecânica em um teclado a partir de um analisador de espectro sonoro.

Para alcançar o objetivo do presente trabalho, subdividiu-o em várias etapas:

- Realizar a revisão bibliográfica sobre teoria musical, transformada de Fourier e reconhecimento de padrões;
- Gravar os acordes musicais relevantes para o trabalho utilizando um violão e um microfone;
- Analisar os acordes musicais no domínio da frequência para elaborar uma rotina de trabalho para o reconhecimento desses acordes;
- Projetar bobinas e um driver para o acionamento dos dedos da mão mecânica;
- Integração do sistema com uma placa de aquisição de dados NI 6009;
- Comparação dos resultados obtidos com os esperdos.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho está organizado da seguinte maneira:

- O Capítulo 2 aborda os conceitos fundamentais utilizados para o desenvolvimento do trabalho, tais como a transformada de Fourier, teoria musical e reconhecimento de padrões;
- No Capítulo 3 são apresentados dois métodos para o reconhecimento dos acordes musicais, onde um baseia-se na lógica de varredura de frequências existentes nos acordes musicais em estudo e o outro no reconhecimento de padrões;
- No Capítulo 4 são apresentadas as etapas que caracterizam a implementação do hardware do trabalho, tais como o projeto das bobinas e o driver de acionamento;
- No Capítulo 5 são apresentados os resultados da comparação dos dois métodos propostos no Capítulo 3, analisando a viabilidade de cada um e definindo qual melhor se adéqua à proposta inicial do trabalho;

- No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões feitas do trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão abordadas as principais teorias utilizadas para o desenvolvimento do sistema para reconhecimento de acordes musicais, tais como transformada de Fourier, timbre, frequência fundamental, intervalos musicais, acordes e reconhecimento de padrões.

2.1 TRANSFORMADA DE FOURIER

A transformada de Fourier é uma ferramenta matemática utilizada para fazer a transformação de um sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência, ou seja, com ela é possível observar as frequências existentes no sinal. Porém, na atualidade muitos dos sinais são discretizados antes de executarem alguma rotina de trabalho devido a utilização de computadores e componentes digitais que necessitam desse tipo de entrada. Uma das ferramentas utilizadas para a análise espectral deste tipo de sinal é a transformada de Fourier em tempo discreto (*discrete-time Fourier transform* - DTFT).

A DTFT é uma transformada realizada em sinais aperiódicos com características discretas no tempo. Dado um conjunto discreto de número reais ou complexos $x[n]$, a DTFT, para todos os inteiros n , é uma série de Fourier que gera uma função $X(w)$, em que as unidades de w (frequência angular, em radianos por segundo) são normalizados. A expressão matemática da DTFT é mostrada na Equação 1 (HAYKIN; VEEN, 1999).

$$X(w) = \sum_{-\infty}^{\infty} x[n]e^{-jwn} \quad (1)$$

Porém, esta equação não é utilizada em aplicações práticas pois possui um número infinito de amostras. Para contornar esse problema é utilizado a transformada discreta de Fourier (*discrete Fourier transform* - DFT). Considere um sinal possui N amostras, que n pode assumir apenas número inteiros e que uma função $x[n]$ seja representada da forma mostrada na Equação 2.

$$x[n] = \begin{cases} 0, & n < 0 \\ y[n] & 0 \leq n \leq (N - 1) \\ 0, & n \geq N \end{cases} \quad (2)$$

em que $y[n]$ é um sinal medido em N pontos. Ainda, utiliza-se apenas os valores discretos de w , dados pela Equação 3.

$$w = \frac{2\pi k}{N} \quad (3)$$

em que $k = 0, 1, \dots, N - 1$.

A partir dessas considerações, a Equação 1 torna-se a Equação 4 e seu resultado é chamado de DFT do sinal de entrada.

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j2\pi \frac{kn}{N}} \quad (4)$$

Um dos problemas da DFT é o esforço computacional que ela exige, mas para contornar esse problema é utilizado um algoritmo parecido à DTF que é a transformada rápida de Fourier. A transformada rápida de Fourier (FFT - *fast Fourier transform*) é um algoritmo eficiente que, segundo Weeks (2012), fornece os mesmos resultados que a DFT porém em um tempo muito mais curto. Um exemplo para a aplicação da FFT é mostrado a seguir.

A Figura 1 apresenta a curva de tensão elétrica correspondente ao sinal de saída de um microfone quando a nota musical mi é executada por um violão, em que 1(a) e 1(b) correspondem à 1ª e a 6ª corda de um violão, respectivamente. Ambas são notas mi, porém, estão em oitavas diferentes, ou seja, o som que cada nota emite é o mesmo, no entanto um é mais agudo e outro é mais grave. Cabe ressaltar que a amplitude dos sinais acústicos analisados estão em Volts porque, para sua aquisição, foi utilizado um microfone para a gravação do sinal e convertido em tensão.

Ao aplicar a FFT nestes sinais (com uma taxa de amostragem de 48000 amostras), pode-se analisar as frequências que os compõe. A Figura 2 mostra tais frequências, em que 2(a) e 2(b) correspondem a transformada de Fourier da 1ª e 6ª

corda de um violão, respectivamente. O primeiro pico de amplitude que aparece em cada sinal sonoro da Figura 2 corresponde à frequência fundamental e os demais são as frequências harmônicas.

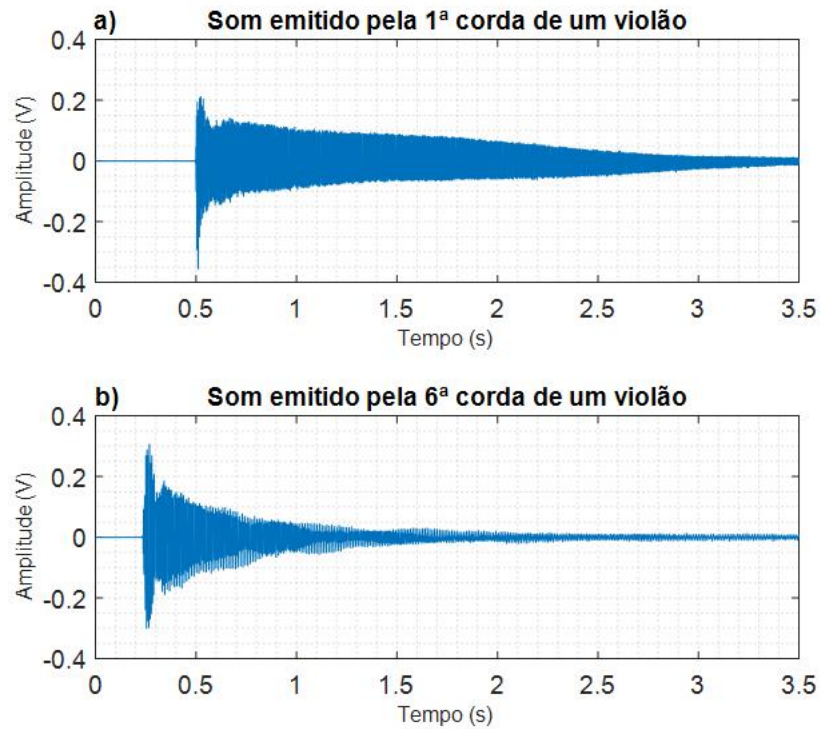


Figura 1: Comparação de duas cordas de um violão em função do tempo.
Fonte: Autoria própria.

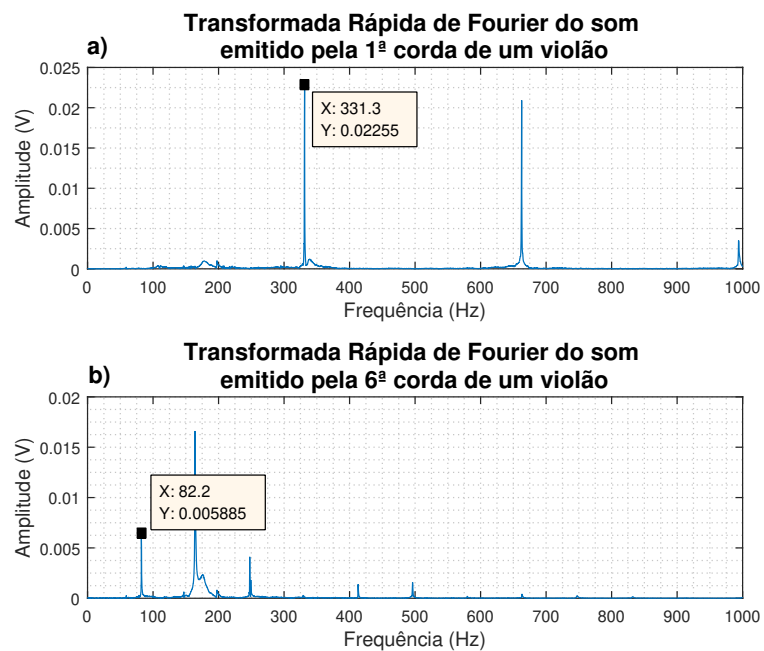


Figura 2: Transformada Rápida de Fourier das notas mi.
Fonte: Autoria própria.

Como já mencionado, ambas as notas analisadas são as mesmas, porém em oitavas diferentes. Nota-se que a frequência fundamental da 1ª e da 6ª corda do violão é de 331,3 Hz e 82,2 Hz, respectivamente, o que implica dizer que a 1ª corda está 2 oitavas acima da 6ª corda.

2.2 TEORIA MUSICAL

Embora seja muito abrangente a teoria musical, nessa seção serão definidos apenas alguns aspectos musicais importantes e relevantes para o desenvolvimento do trabalho.

2.2.1 CARACTERÍSTICAS MUSICAIS E SONORAS

A música é definida como a forma de manifestar sentimentos por meio da produção de som, porém seu conceito é mais abrangente. Música é um conjunto de sons em melodia e harmonia combinados com ordem, equilíbrio, proporção e ritmo. (MED, 1996)

Segundo Med (1996), a música pode ser separada em três partes: a harmonia e melodia, que são, respectivamente, um conjunto de sons dispostos de maneira simultânea e sucessiva e o ritmo que é a ordem e proporção em que estão dispostos os sons que constituem a melodia e a harmonia.

Cada instrumento musical produz um som próprio, o qual depende de aspectos construtivos do instrumento, tais como tração das cordas (violão, violino, piano), tração do tecido (pandeiro), diâmetro e espessura (pratos de bateria), etc. Quando uma nota é produzida por diferentes instrumentos musicais, é instantaneamente percebida uma diferença sonora. Essa diferença de som é devido ao timbre.

Segundo Bersan (2008), os aspectos que compõem o timbre de um instrumento é o tom fundamental mais os harmônicos gerados e o envelope sonoro. A Figura 3 mostra o envelope característico de três instrumentos diferentes, em que o sinal 1 é uma nota produzida por um tambor, o sinal 2 é uma nota produzida por um trompete e o terceiro sinal é produzido por uma flauta.

Segundo Bersan (2008), pode-se identificar 4 etapas que formam o envelope sonoro, em que a primeira etapa (*attack*) corresponde ao tempo em que o sinal sonoro demora para atingir amplitude máxima, a segunda (*decay*) ao tempo necessário para que o sinal sonoro decaia até a estabilidade do som, a terceira (*sustain*)

é o tempo de duração do sinal sonoro e, por fim, *release* é a etapa do envelope sonoro que o som começa a cair gradativamente até alcançar o zero. Tais etapas são representadas na Figura 4.

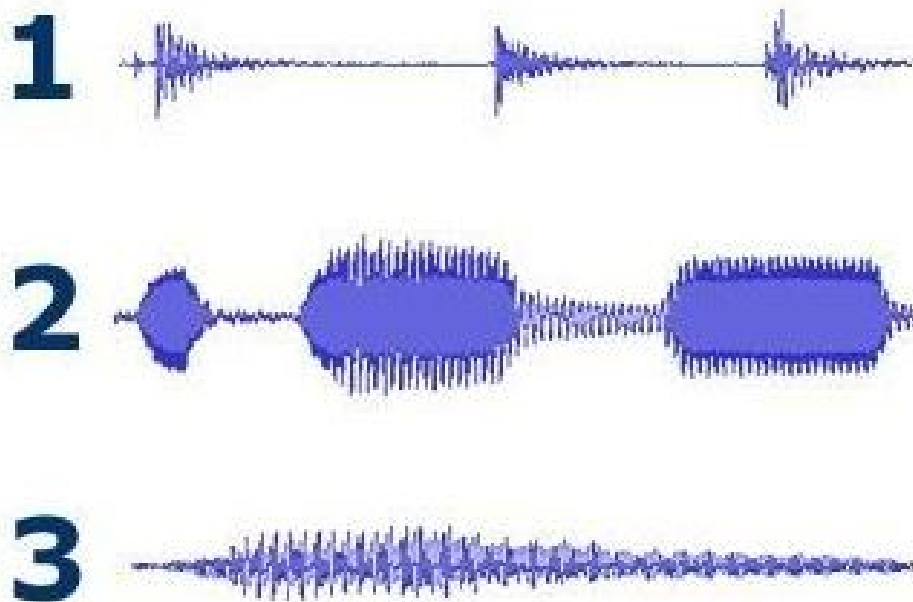


Figura 3: Envelope do som produzido por um tambor, trompete e flauta.
Fonte: (BERSAN, 2008)

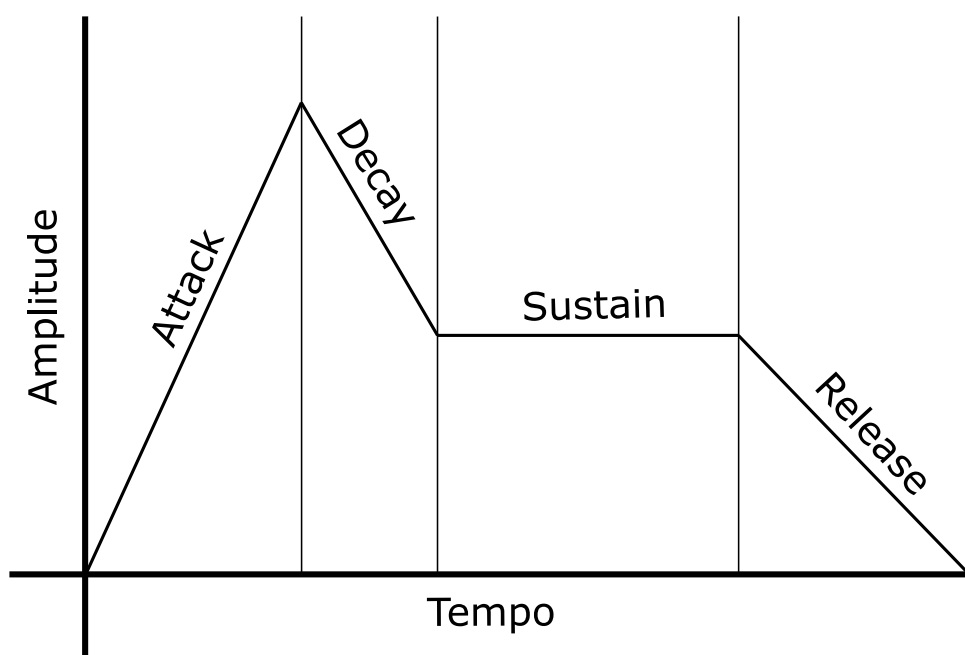


Figura 4: Etapas do envelope.
Fonte: Adaptado de Leigh (2018)

2.3 FREQUÊNCIAS FUNDAMENTAIS E HARMÔNICAS DE SINAIS SONOROS

No estudo da acústica, ondas sonoras são sons produzidos pelos instrumentos quando são submetidos a uma perturbação. Por exemplo, ao tocar um pandeiro, ele emite um som de frequência definida pela tração do tecido do instrumento. Ao tocar uma flauta, ela emite um som definido pelo assopro e pela posição dos dedos nos orifícios. Ao tocar violão, ele emite um som com frequência definida pela afinação da(s) corda(s) correspondente(s) e posição dos dedos nas cordas e casas do instrumento.

No contexto de instrumentos de cordas, pode-se definir que suas frequências sonoras dependem dos seguintes aspectos: tração do material, comprimento e densidade da corda.

No estudo das propriedades das ondas numa corda, (ALEIXO, 2003), apresenta-se uma equação da frequência fundamental f_0 em relação à tensão T , densidade linear ρ do material e comprimento da corda L , como mostra a Equação 5.

$$f_0 = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T}{\rho}} \quad (5)$$

Além da frequência fundamental, ao oscilar uma corda ou submetê-la a uma perturbação, ela apresenta outras frequências que são múltiplas à fundamental conhecidas como harmônicos. Os harmônicos são oscilações das cordas com frequências múltiplas da frequência fundamental, por exemplo, o terceiro harmônico de uma corda que oscila à 1 Hz (uma oscilação por segundo) é igual a 3 Hz (três oscilações por segundo).

Em um som emitido por um instrumento de corda (violão, por exemplo), existem múltiplos harmônicos. A Figura 5 mostra as frequências existentes numa nota mi executada em um violão. Para ver este fenômeno foi utilizada a FFT.

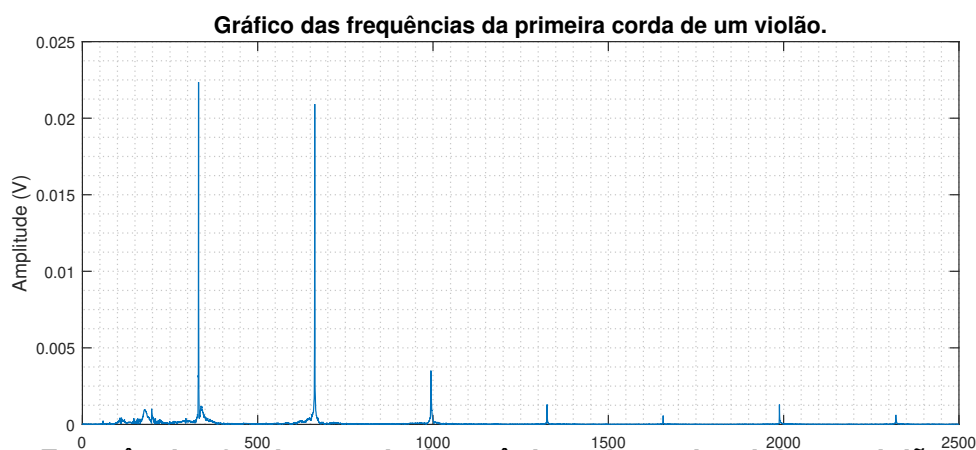


Figura 5: Frequências fundamental e harmônicas da corda mi de um violão.
Fonte: Autoria própria.

2.4 INTERVALOS MUSICAIS

Intervalo musical é a distância (em Hz) entre cada nota de uma oitava e normalmente são classificados como tons e semitons. Antes de explica-los serão definidos alguns conceitos que caracterizam a definição de intervalos musicais.

Um intervalo, dito de uma "oitava", é a multiplicação por dois na frequência. Por exemplo, se for comparar o som de duas notas dó do teclado musical, um será mais agudo que o outro, isso porque estão em oitavas diferentes, logo possuem frequências diferentes. Para visualizar e facilitar a conceituação de intervalo musical é utilizado uma imagem representativa de um teclado musical, mostrado na Figura 6.

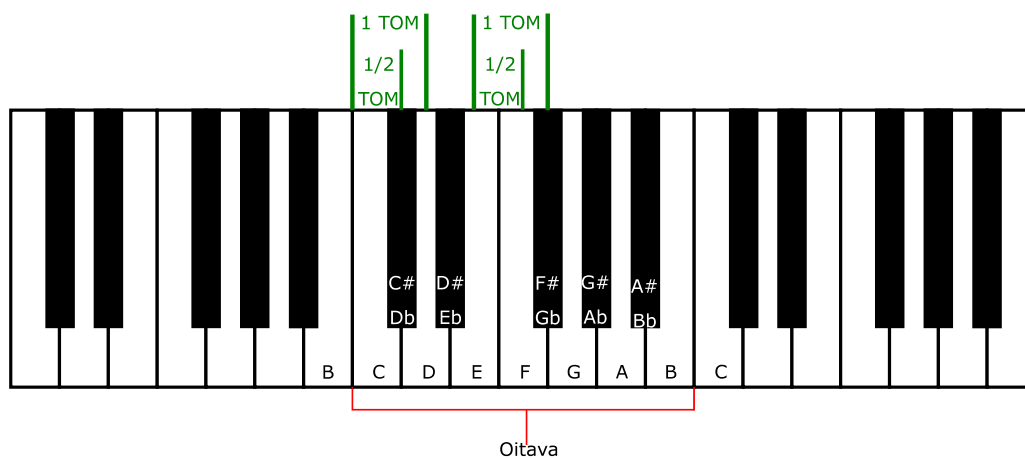


Figura 6: Notas de um teclado.
Fonte: Adaptado de Frade (2014).

Segundo Frade (2014), as notas de uma oitava de um teclado podem ser distinguidas em duas partes: notas naturais e acidentes. As notas naturais correspondem às teclas brancas: dó, ré, mi, fá, sol, lá e si. As notas acidentes correspondem às teclas pretas e são nomeadas da seguinte forma: dó sustenido, ré sustenido, fá sustenido, sol sustenido e, por fim, lá sustenido, que na notação americana são conhecidas como C \sharp , D \sharp , F \sharp , G \sharp e A \sharp . É importante salientar que a nomenclatura padrão das notas musicais são denotadas por letras minúsculas (dó, ré, mi, fá, sol, lá e si), enquanto que para os acordes são denotadas por letras iniciais maiúsculas (Dó, Ré, Mi, Fá, Sol, Lá e Si). Ainda, os nomes das notas e acordes são representadas (na notação americana) por C, D, E, F, G, A e B.

Na literatura, semitom é uma distância de um sustenido (uma nota), que matematicamente possui uma relação de $1 : \sqrt[12]{2}$ Hz, e tom é definido como sendo uma distância de dois sustenidos (duas notas) ou dois semitons, cujo a relação matemática corresponde a $1 : (\sqrt[12]{2})^2$ Hz.

Para facilitar o entendimento será atribuído a cada tecla do teclado musical uma nota, pois esse instrumento permite esta atribuição. Com isso, semitom é a distância entre duas teclas consecutivas e tom são dois semitons, ou seja, a distância entre uma tecla qualquer e duas teclas a jusante desta primeira tecla.

Por exemplo, uma oitava separada em intervalos de semitom (iniciando na nota C) será: C - C \sharp - D - D \sharp - E - F - F \sharp - G - G \sharp - A - A \sharp - B. Por outro lado, uma oitava separada em intervalos de tom (também iniciando na nota C) será: C - D - E - F \sharp - G \sharp - A \sharp .

2.4.1 ESCALA MAIOR

Escalas musicais são sequências ordenadas de intervalos musicais e são resultados de divisões precisas feitas por matemáticos antigos. Esses matemáticos observaram que alguns intervalos eram agradáveis ao ouvido humano e acabaram criando algumas escalas: a escala cromática, pentatônica, blues, diminuta, etc.

Todas essas escalas são definidas por uma sequência de tons e semitons. Os intervalos musicais para a escala maior é a seguinte: tom, tom, semitom, tom, tom, tom e semitom.

Para facilitar o entendimento de escala maior será elaborado, como exemplo, a escala maior da nota E seguindo o intervalo musical desta escala, mostrado anteriormente. A primeira nota da escala maior de E é a própria nota E. A segunda

nota é um tom acima, como mostra o intervalo musical, logo é a nota F \sharp . A terceira nota da escala também é um tom acima, nota G \sharp . A quarta nota é um semitom acima, nota A. A quinta nota é um tom acima, nota B. A sexta nota é um tom acima, nota C \sharp . A sétima nota também é um tom acima, nota D \sharp . Para finalizar a escala maior de E, a última nota é um semitom acima, nota E, finalizando uma oitava. A Tabela 1 mostra como ficou a sequência das notas para a escala de E maior e a Figura 7 mostra um fluxograma da escala maior.

Tabela 1: Escala de mi maior.

Escala maior	Notas da escala
E	E F \sharp G \sharp A B C \sharp D \sharp E

Fonte: Autoria própria

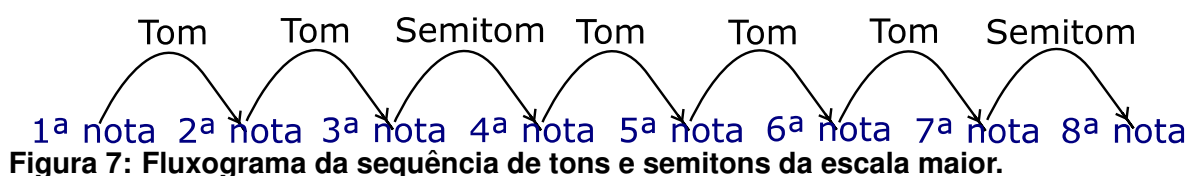


Figura 7: Fluxograma da sequência de tons e semitons da escala maior.

Fonte: Autoria própria.

Tendo isso em mente, pode-se elaborar uma tabela com a escala maior das 12 notas de uma oitava do teclado, como mostra a Tabela 2.

Tabela 2: Escala maior das 12 notas de uma oitava.

Escala maior	Notas							
C	C	D	E	F	G	A	B	C
C#	C#	D#	F	F#	G#	A#	C	C#
D	D	E	F#	G	A	B	C#	D
D#	D#	F	G	G#	A#	C	D	D#
E	E	F#	G#	A	B	C#	D#	E
F	F	G	A	A#	C	D	E	F
F#	F#	G#	A#	B	C#	D#	E#	F#
G	G	A	B	C	D	E	F#	G
G#	G#	A#	C	C#	D#	F	G	G#
A	A	B	C#	D	E	F#	G#	A
A#	A#	C	D	D#	F	G	A	A#
B	B	C#	D#	E	F#	G#	A#	B

Fonte: Autoria própria

2.4.2 ESCALA MENOR

A escala menor no teclado musical é definida pelo seguinte intervalo: tom, semitom, tom, tom, semitom, tom e tom.

Da mesma forma que na escala maior, mostra-se um exemplo de como é formado a escala menor de uma nota. Para construir tal escala é necessário acompanhar a Figura 6 para analisar a mudança de notas.

Como exemplo, monta-se a escala menor da nota E. A primeira nota da sequência é E. Seguindo a sequência definida anteriormente, a próxima nota é um tom a cima, nota F#. A terceira nota é um semitom a cima, nota G. A quarta nota é um tom a cima, nota A. A quinta nota também é um tom a cima, A e B. A sexta nota é um semitom a cima, nota C. A sétima nota é um tom a cima, nota D. A oitava e última nota é um tom a cima, nota E, finalizando uma oitava. A Tabela 3 mostra como ficou a sequência notas para a escala de E menor.

Tabela 3: Escala de mi menor.

Escala menor	Notas da escala							
E	E	F#	G	A	B	C	D	E

Fonte: Autoria própria

A Figura 8 mostra o fluxograma da sequência de notas da escala menor.

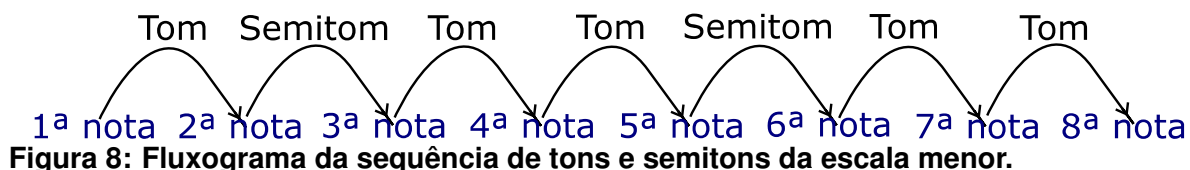


Figura 8: Fluxograma da sequência de tons e semitons da escala menor.

Fonte: Autoria própria.

Nesse contexto, é possível montar a escala menor de todas as notas de uma oitava do teclado da mesma forma feita para a escala maior. A Tabela 4 mostra as escalas das notas.

Tabela 4: Escala menor das 12 notas de uma oitava.

Escala maior	Notas							
C	C	D	D#	F	G	A	A#	C
C#	C#	D#	E	F#	G#	A	B	C#
D	D	E	F	G	A	A#	C	D
D#	D#	E#	F#	G#	A#	B	C#	D#
E	E	F#	G	A	B	C	D	E
F	F	G	G#	A#	C	C#	D#	F
F#	F#	G#	A	B	C#	D	E	F#
G	G	A	A#	C	D	D#	F	G
G#	G#	A#	B	C#	D#	E	F#	G#
A	A	B	C	D	E	F	G	A
A#	A#	C	C#	D#	F	F#	G#	A#
B	B	C#	D	E	F#	G	A	B

Fonte: Autoria própria.

2.5 ACORDES

Acorde musical é a combinação de duas ou mais notas harmônicas (que estejam em harmonia sonora) tocadas simultaneamente e esse arranjo de notas varia de instrumento para instrumento. As figuras 9 e 10 mostram o arranjo das notas para a formação de um acorde C para um violão e um teclado musical, respectivamente.

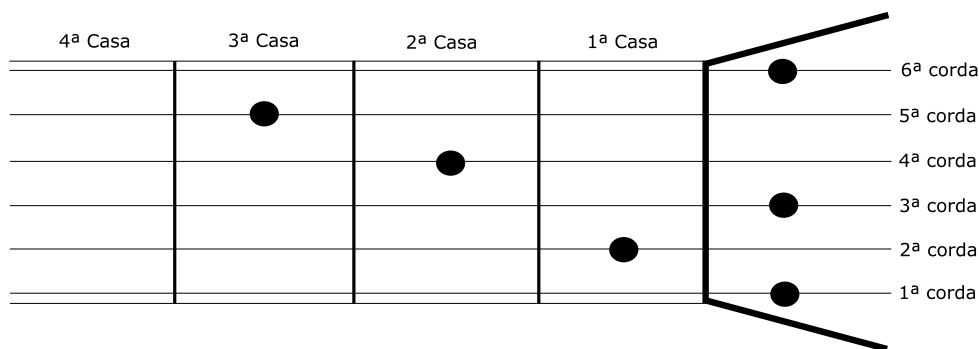


Figura 9: Notas que formam o acorde C em um violão.

Fonte: Autoria própria.

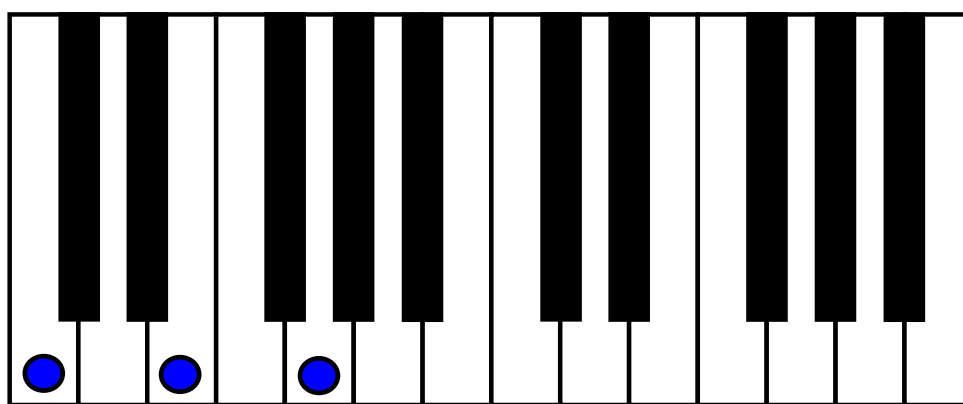


Figura 10: Notas que formam o acorde C em um teclado musical.

Fonte: Autoria própria.

Existem 4 tipos básicos de acorde, sendo eles o acorde menor, acorde diminuto, acorde aumentado e acorde maior. Em teclados musicais, os acordes são formados por tríades que é a composição de 3 notas musicais. A primeira nota define o nome do acorde e é conhecida como nota tônica; a segunda nota (terça) define se o acorde é maior ou menor; por fim, a terceira nota (quinta) é o complemento do acorde.

Para a formação dos acordes maiores (que do presente trabalho são: Dó (C), Ré (D), Mi (E), Fá (F), Sol (G), Lá (A) e Si (B)), é utilizada a escala maior do acorde em formação. Por exemplo, para formar o acorde de C maior em um teclado musical, deve-se utilizar a escala de C maior para sua formação (mostrado na Tabela 2), onde a primeira nota é a tônica (que como comentado anteriormente é aquela que dá o nome ao acorde), a segunda nota é a terça (localizada a quatro notas após a nota tônica) e a terceira nota é a quinta (localizada a sete notas após a nota tônica).

Seguindo essa regra, a partir do acorde E é necessário utilizar as teclas da próxima oitava para formar os acordes restantes, porém nesse trabalho os acordes precisam limitar-se apenas em uma oitava devido à construção da mão mecânica.

Nesse contexto, para que os acordes musicais permaneçam apenas em uma oitava, é utilizado a inversão de acordes.

Segundo (MED, 1996), a inversão de acordes é uma maneira de representar o mesmo acorde utilizando outras notas. O som muda um pouco, porém é utilizado apenas uma oitava do teclado musical, o que é desejado nesse trabalho. Sabe-se que todos os acordes de um teclado musical possuem 3 notas e que a primeira nota corresponde ao nome do acorde. Quando ocorre a inversão do acorde, a primeira nota não corresponde mais ao seu acorde, porém as notas que formam o acorde permanecem iguais.

Por exemplo, a Figura 11 mostra o acorde G sendo executado sem haver inversão de acorde pois a primeira nota é a nota do próprio acorde (nota G). Nota-se que a última nota do acorde G ocupa outra oitava. Utilizando a inversão do acorde, a terceira nota do acorde G sai da segunda oitava e vai para a primeira, onde localizam-se as outras notas, como mostra a Figura 12.

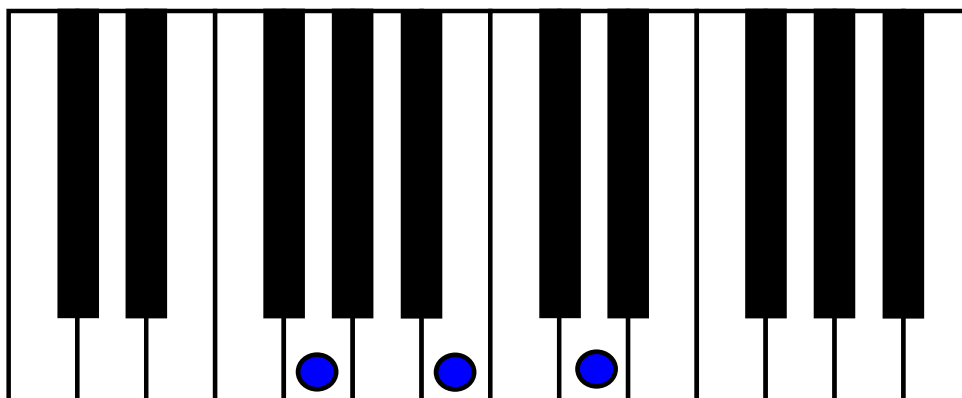


Figura 11: Acorde de G maior.

Fonte: Autoria própria.

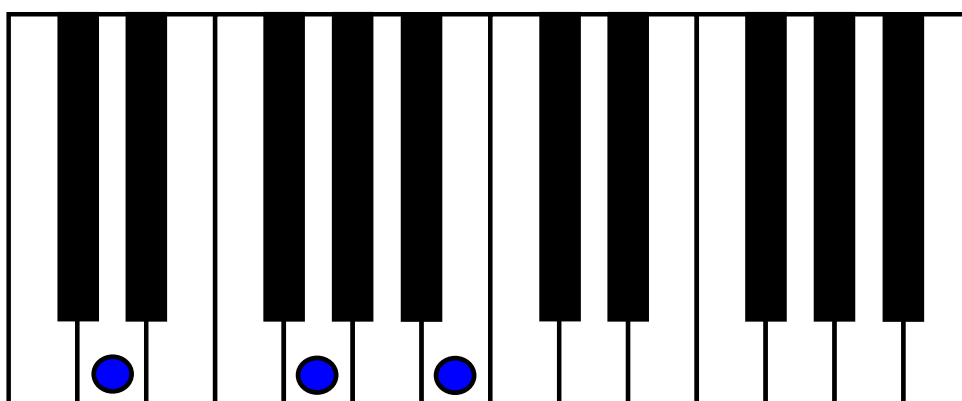


Figura 12: Acorde de G maior com inversão.

Fonte: Autoria própria.

Nota-se que as notas do acorde permaneceram as mesmas, mudando apenas a ordem de como elas normalmente são. Com isso, pode-se montar uma tabela mostrando como ficam todos os acordes com inversão. A Tabela 5 mostra a relação das notas existentes em cada acorde feito no teclado musical utilizando a inversão de acordes. Vale salientar que a inversão é feita apenas para os acordes que utilizam mais de uma oitava.

Tabela 5: Notas que formam um acorde utilizando a inversão de acordes.

Acorde	Notas		
	1ª Nota	2ª Nota	3ª Nota
C	C	E	G
D	D	F#	A
E	E	G#	B
F	C	F	A
G	D	G	B
A	C#	E	A
B	D#	F#	B

Fonte: Autoria própria.

2.6 RECONHECIMENTO DE PADRÕES

”O reconhecimento de padrões está preocupado com a descoberta automática de simetrias em dados através do uso de algoritmos computacionais e, com o uso dessas simetrias, a classificação de dados em diferentes classes”. ((BISHOP, 2006), p.1, tradução nossa).

Segundo (SÁ, 2000), o projeto de um sistema para o reconhecimento de padrões requer essencialmente três etapas. A primeira é a aquisição de dado, ou seja, requer a extração dos dados do objeto a ser classificado. Após isso é feito o pré-processamento, que é a seleção das características mais importantes do objeto e, por fim, a última etapa para o projeto de um sistema de reconhecimento é a tomada de decisão, onde é elaborado um classificador ou descritor. A Figura 13 mostra a estrutura típica de um sistema de reconhecimento de padrões.

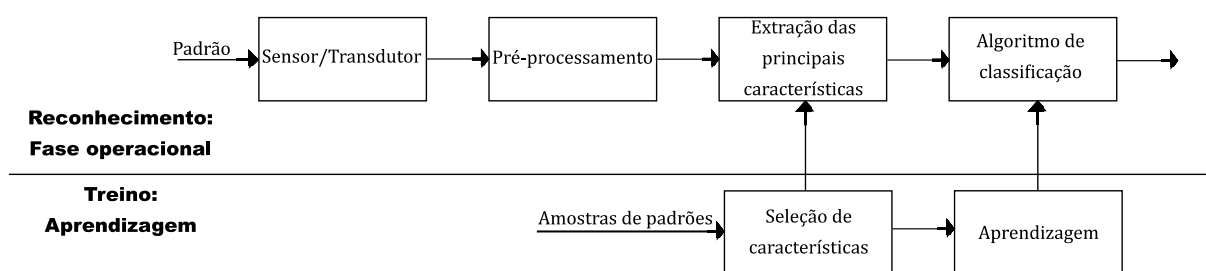


Figura 13: Estrutura típica de um sistema para o reconhecimento de padrões.
Fonte: Adaptado de (FRED, 2001).

Ao utilizar o reconhecimento de padrões em sistemas sonoros, é possível classificar o áudio em estilos musicais (através do ritmo), instrumentos musicais analisando o timbre do sinal acústico, ou acordes musicais avaliando as frequências existentes no áudio. Ao longo do tempo, vários métodos de reconhecimento de padrões e algoritmos de agrupamentos foram desenvolvidos e aperfeiçoados para diversas aplicações.

2.6.1 TIPOS DE CLASSIFICADORES

Com a evolução da sociedade e da tecnologia, fez-se necessário o desenvolvimento de métodos para avaliação de dados para melhorar a segurança, saúde e desenvolvimento social. Nesse contexto, métodos de análise e técnicas de reconhecimento de padrões foram estudados, desenvolvidos e aperfeiçoados para atender tal demanda, mas antes de conceitua-los é necessário definir alguns classificadores, como os não-supervisionado e supervisionado.

Segundo (GOMES, 2008), na classificação supervisionada o projetista define as classes e as características de cada classe para que, quanto o objeto for analisado, seja classificado na classe cuja suas características aproximem-se mais com as do objeto analisado; já a classificação não-supervisionada, o classificador agrupa os objetos em análise em função de sua disposição no espaço de características.

Observa-se que na Figura 14 há um conjunto de elementos representados num espaço bidimensional. Como conceituado anteriormente, na classificação supervisionada as classes são definidas pelo projetista e o sistema irá separar os elementos nas classes que mais se aproximam.

Nota-se também que há uma legenda ao lado indicando as classes de interesse. Com isso, pode-se classificar os objetos nas classes definidas. Já a Figura

15 não possui legenda, ou seja, os objetos são colocados para análise e o sistema, não-supervisionado, agrupa os objetos parecidos em classes distintas.

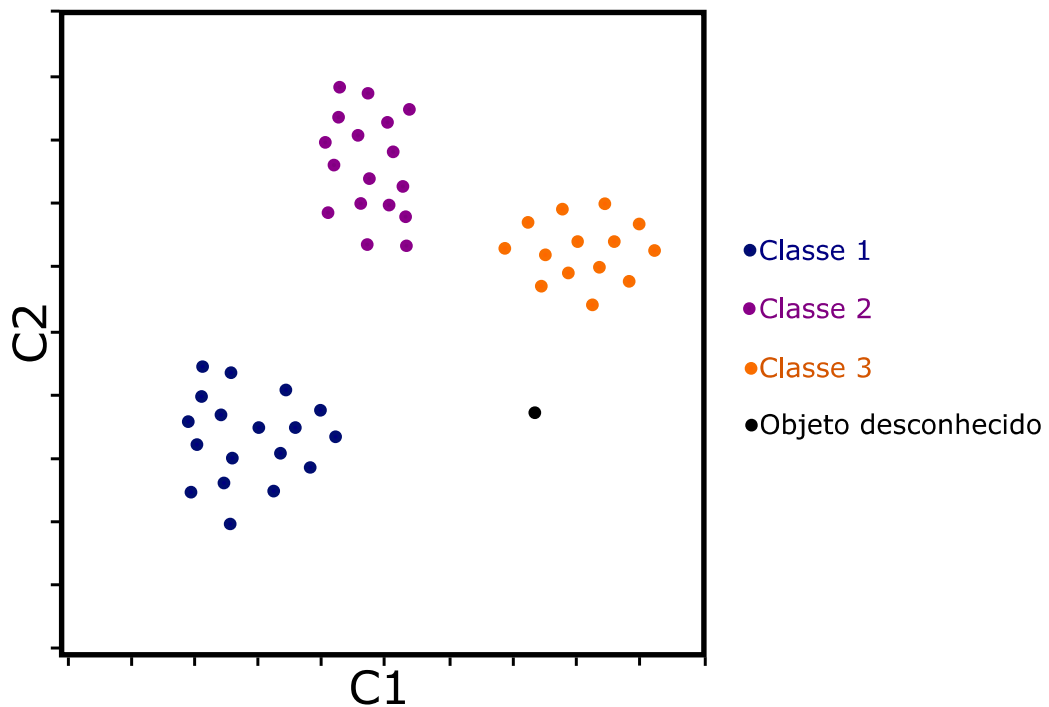


Figura 14: Classificação supervisionada.

Fonte: (GOMES, 2008).

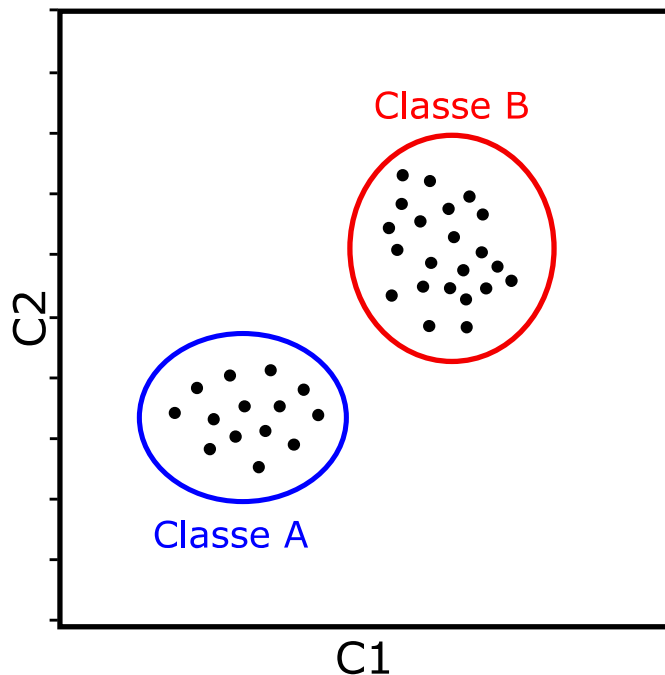


Figura 15: Classificação não supervisionada.

Fonte: (GOMES, 2008).

3 SISTEMA PARA O RECONHECIMENTO DE ACORDES MUSICAIS

Propôs-se aplicar dois métodos para o reconhecimento de acordes musicais e ambos serão abordados neste capítulo. O método 1 é elaborado a partir de uma varredura das frequências dos acordes em análise, enquanto que o método 2 se baseia no princípio do reconhecimento de padrões. No final do trabalho, os sistemas serão comparados e analisados qual é mais eficiente, apontando suas principais qualidades e defeitos.

3.1 RECONHECIMENTO DE ACORDES COM VARREDURA DE FREQUÊNCIAS

Esse foi o primeiro método proposto e tem como objetivo principal fazer a varredura das frequências existentes em um sinal acústico e comparar com uma base de dados armazenado no software utilizado nesse trabalho, o MATLAB® (versão estudante). O desenvolvimento pode ser desmembrado em várias etapas que são descritas a seguir. Vale salientar que este método não é encontrado em nenhuma bibliografia, pois é uma ideia desenvolvida neste trabalho.

3.1.1 ESTUDO DAS FREQUÊNCIAS DOS ACORDES

A primeira etapa do desenvolvimento do método é estudar as frequências existentes nos acordes maiores em estudo, sendo eles Dó (C), Ré (D), Mi(E), Fá(F), Sol(G), Lá(A) e Si(B). Tais frequências estendem-se até a quarta casa do violão, como mostra a Figura 18. Conhecendo todas as frequências, pode-se elaborar uma relação das frequências de cada acorde com base na Figura 16. Por exemplo, o acorde A é formado pelas frequências cujo o marcador "quadrado" está disposto em cima, sendo elas 82,3 Hz, 110,1 Hz, 164,5 Hz, 220,0 Hz, 278,7 Hz e 328,6 Hz. A partir disso, pode-se formar uma tabela contendo a relação das frequências de todos os acordes, como mostra a Tabela 6.

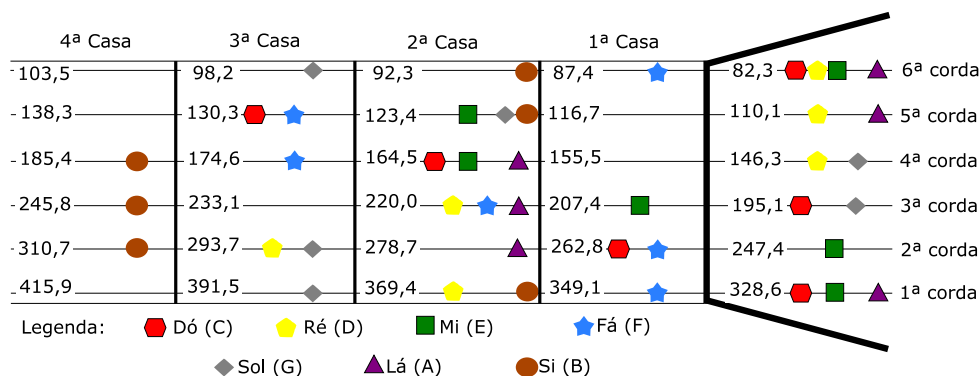


Figura 16: Frequências existentes até a quarta casa do violão.

Fonte: Autoria própria.

Tabela 6: Frequências que compõem os acordes musicais.

Acordes	Frequência (Hz)					
	1ª corda	2ª corda	3ª corda	4ª corda	5ª corda	6ª corda
Dó (C)	328,6	262,8	195,1	164,5	130,3	82,3
Ré (D)	369,4	293,7	220,0	146,3	110,1	82,3
Mi (E)	328,6	247,4	207,4	164,5	123,4	82,3
Fá (F)	349,1	262,8	220,0	174,6	130,3	87,4
Sol (G)	391,5	293,7	195,1	146,3	123,4	98,2
Lá (A)	328,6	278,7	220,0	164,5	110,1	82,3
Si (B)	369,4	310,7	245,8	185,4	123,4	92,3

Fonte: Autoria própria.

3.1.2 CONSTRUÇÃO DOS VETORES BASE

A segunda etapa do trabalho é a construção de um banco de dados para utilizar como referência na comparação dos sinais acústicos, esse banco de dados é conhecido como "vetores base". Os vetores base são formados por uma combinação binária de 23 elementos, os quais correspondem, em ordem crescente, ao número das frequências distintas envolvidas na Tabela 6, como mostra a Tabela 7.

Tabela 7: Frequências correspondentes de cada posição do vetor base.

	Frequência de cada posição do vetor base (Hz)							
Frequência	82,3	87,4	92,3	98,2	110,1	123,4	130,3	146,3
Posição	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª	7ª	8ª
Frequência	164,5	174,6	185,4	195,1	207,4	220,0	245,8	262,8
Posição	9ª	10ª	11ª	12ª	13ª	14ª	15ª	16ª
Frequência	278,7	293,7	310,7	328,6	349,1	369,4	391,5	
Posição	17ª	18ª	19ª	20ª	21ª	22ª	23ª	

Fonte: Autoria própria.

Esses vetores são utilizados como referência na comparação dos sinais acústicos e sua elaboração é simples. Por exemplo, o acorde A, como mencionado anteriormente, possui as seguintes frequências: 82,3 Hz, 110,1 Hz, 164,5 Hz, 220,0 Hz, 278,7 Hz e 328,6 Hz. Então, nas posições do vetor base que existirem essas frequências serão colocados valores 1, nas demais posições serão colocados valores 0. A Tabela 8 mostra os vetores base de todos os acordes em análise.

Tabela 8: Composição dos vetores base de cada acorde.

Acorde	Posição do vetor base																						
C	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
D	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0
E	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0
F	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0
G	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
A	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0
B	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0

Fonte: Autoria própria.

3.1.3 AQUISIÇÃO DOS SINAIS DE ÁUDIO

As aquisições dos sinais de áudio foram feitas utilizando um aplicativo gratuito da internet: 123apps LLC©. Primeiramente gravou-se uma vez os sete acordes maiores e recortou-os de maneira a deixá-los com a mesma duração, aproximadamente 2,136 s, ou seja, todos os acordes, após recortados, possuem a mesma quantidade de informação. Ainda, estes 2,136 s de informações referem-se às etapas attack, decay e sustain do envelope sonoro do sinal acústico. Após isso, aplicou-se a FFT em todos os sinais para obter os seus espectros de frequência. Desta forma, foi possível analisar as frequências de interesse e adotar limiares e faixas de frequências para a análise dos sinais futuros.

Apesar de conhecer as frequências fundamentais dos acordes em estudo, o que permite a definição das faixas de frequência (afinal é só colocar uma variação que não sobreponha outra faixa de frequência), não se pode definir as faixas pois existem muitas variações entre gravações dos acordes, como mostra a Figura 17. Por exemplo, se uma corda do violão for pressionada mais forte em uma gravação e mais fraca em outra gravação, há uma discrepância de frequências. As condições climáticas também interferem nas frequências dos acordes, caso eles forem gravados em dias

diferente. Por esse motivo adota-se um desvio de frequência aceitável. Essa desvio de frequência é um parâmetro de projeto, por exemplo se adotarmos uma variação de 1,5 Hz, então a área de análise será de $\pm 1,5$ Hz pra frente e pra trás da frequência fundamental.

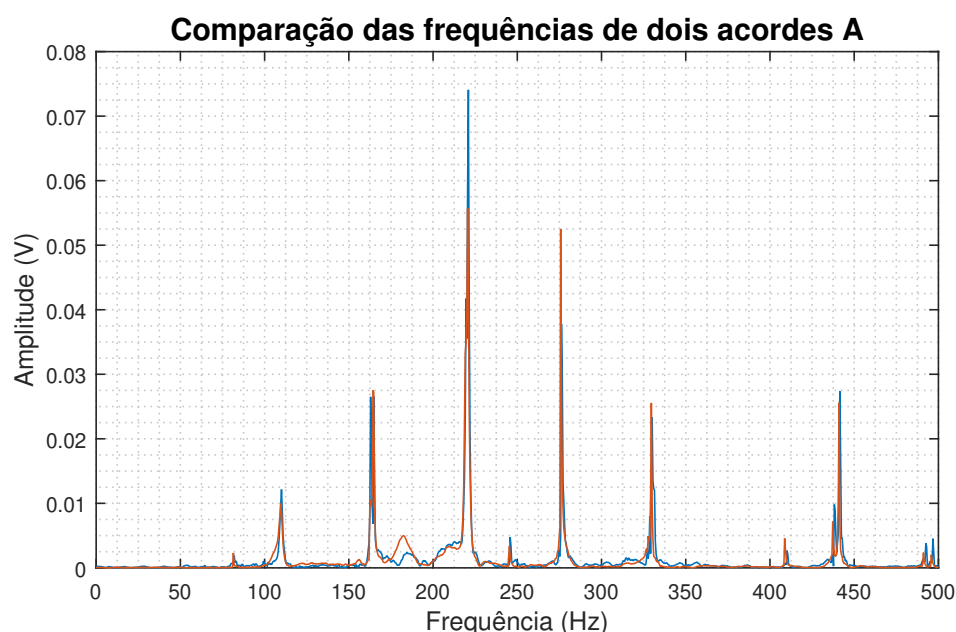


Figura 17: Comparação de dois acordes A para mostrar a variação de amplitude e frequência.

Fonte: Autoria própria.

Os limiares, comentados anteriormente, servem como referência para a verificação da amplitude do espectro sonoro do sinal e são os responsáveis por formar o vetor característico do sinal analisado, o qual será comparado com os vetores base formados na seção 3.1.2. O fluxograma da Figura 18 mostra como ocorre a formação do vetor característico ao analisar um sinal.

Definidos os limiares e as 23 faixas de frequências, a próxima etapa é fazer a comparação dos vetores característicos, formados pelos limiares nas faixas de frequência, com os vetores base definidos anteriormente. Caso a comparação dos vetores forem iguais significa que o acorde analisado é um dos acordes do banco de dados.

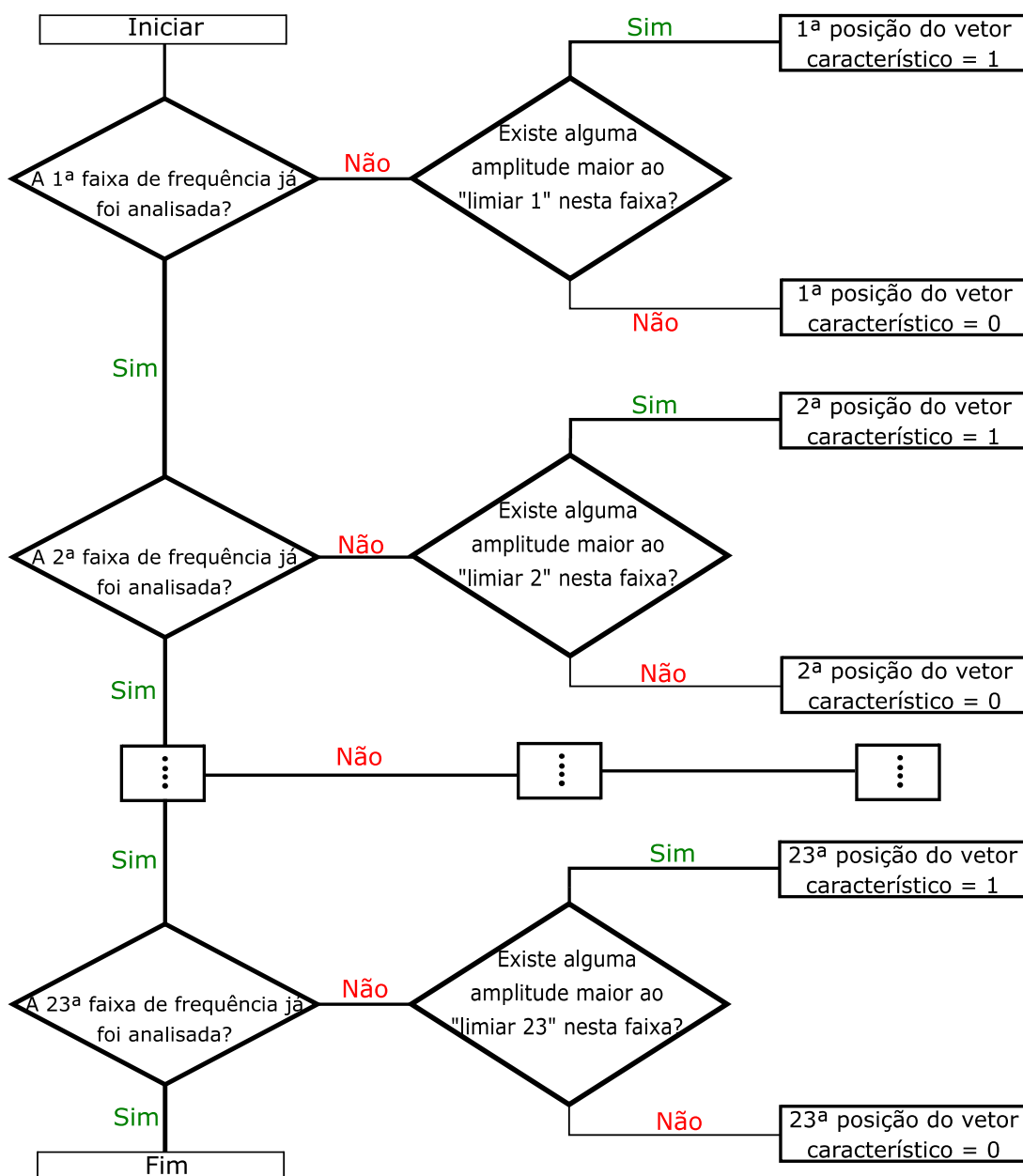


Figura 18: Fluxograma da formação do vetor característico.

Fonte: Autoria própria.

Por fim, a última etapa é gravar amostras e verificar a eficiência do sistema de classificação elaborado. Para uma boa verificação, gravou-se 70 amostras, 10 vezes cada acorde, e modificou-se o tamanho de cada sinal deixando-os com o mesmo tamanho dos 7 primeiros sinais, aproximadamente 2,136 s. Ao finalizar a análise de todas as amostras, montou-se uma tabela que informa a probabilidade de sucesso do método proposto, a qual é mostrada no capítulo 5.

3.2 RECONHECIMENTO DE ACORDES COM RECONHECIMENTO DE PADRÕES

Este método, para o reconhecimento de acordes musicais, consiste na utilização de reconhecimento de padrões com treinamento supervisionado, ou seja, um algoritmo computacional projetado para fazer o agrupamento de objetos em classes pré-definidas. Esse agrupamento é realizado através de medidas de distâncias entre as classes de referências e o objeto a ser analisado, como mostra a Figura 19.

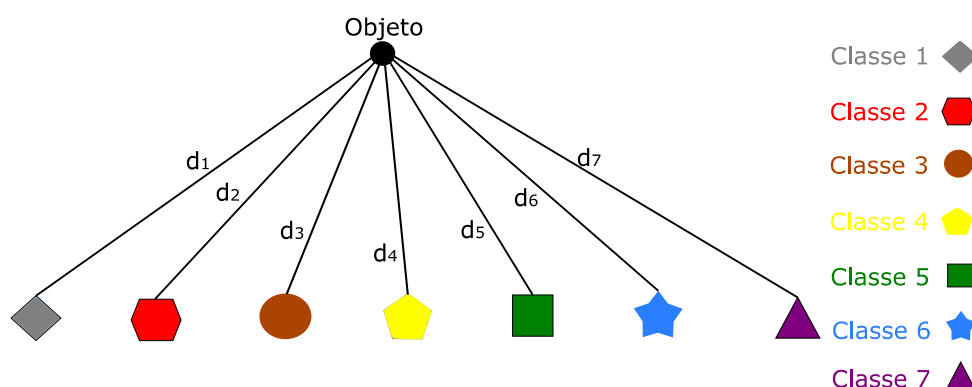


Figura 19: Classificação de objetos através de medidas de distância.

Fonte: Autoria própria.

As classes da Figura 19 representam os acordes base utilizados no código e o objeto é o acorde musical a ser reconhecido e classificado. Da mesma forma ao método anterior, utilizam-se os mesmos vetores base para comparação, e a cada leitura de um acorde novo extrai-se um vetor normalizado (objeto) contendo a amplitude do sinal nas 23 frequências de interesse. A normalização do vetor objeto é necessário para que todos os acordes a serem analisados fiquem numa mesma escala no eixo vertical e horizontal, isso é feito dividindo todos os elementos do vetor pelo maior valor do sinal em análise (em módulo).

Para conseguir fazer o agrupamento, é utilizado uma técnica de medida de distância conhecida como Distância Euclidiana. A distância euclidiana é um tipo de medida de dissimilaridade, quanto maior for a distância entre os objetos, menores são as semelhanças entre ambos. A forma de encontrar essa distância é dada pela Equação 6, onde x_i corresponde a um elemento do vetor base em análise e y_i corresponde a um elemento do vetor objeto que está sendo comparado. Neste caso o número de elementos é: $i = 1 \dots n; n = 23$. Adotou-se esta forma de medida por apresentar um elevado grau de simplicidade.

$$d(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (6)$$

A partir da Equação (6), encontra-se distâncias distintas entre cada acorde base armazenado no banco de dados do *software* e o acorde analisado, ou seja, ao comparar o vetor base do acorde C com o vetor característico formado do acorde analisado, encontra-se uma distância x e o mesmo acontece com os outros acordes, resultando em 7 distâncias. O objeto analisado (acorde musical) será classificado na classe (acorde base) cuja a distância calculada é a menor entre as 7. Por exemplo, se a distância d_5 , da Figura 21, for a menor distância das 7 distâncias, significa que o objeto é mais parecido com a classe 5 do que com as outras classes.

4 IMPLEMENTAÇÃO DA MÃO MECÂNICA

Após desenvolver o projeto da mão mecânica no *software* SketchUp®, vale salientar que esta ferramenta gráfica utilizada para o projeto é de versão estudante e que a fabricação foi feita pela empresa ArqSoma (marcenaria de Curitiba), iniciou-se o desenvolvimento das seguintes etapas: projeto das bobinas e driver de acionamento.

4.1 PROJETO DAS BOBINAS

As bobinas (projetadas de forma empírica) possuem um papel importante no funcionamento da mão mecânica. Ao energiza-las, elas precisam atrair um pequeno pedaço de ferro fixado na parte inferior dos dedos da mão mecânica para que a nota do teclado musical seja reproduzida. Tal necessidade é atendida utilizando eletroímãs.

Os eletroímãs são dispositivos que possuem capacidade de atrair materiais com propriedades magnéticas. São formados por uma barra de ferro envolta por um solenoide (bobina) que, ao aplicar uma tensão em seus terminais, uma corrente percorre as espiras da bobina orientando os ímãs elementares da barra de ferro, que inicialmente estão desorientados, como mostra a Figura 20 e Figura 21.

Ímãs elementares desorientados

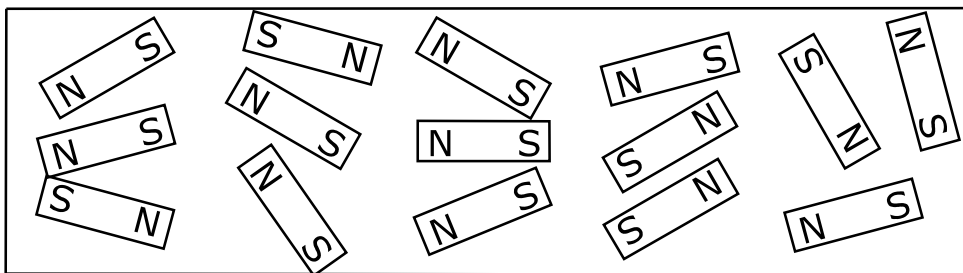


Figura 20: Ímãs elementares dos materiais magnéticos desorientados (antes de serem polarizados).

Fonte: (MARQUES, 2018).

Ímãs elementares orientados

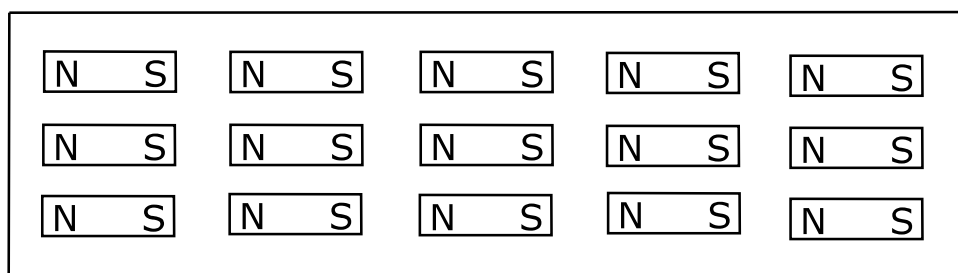


Figura 21: Ímãs elementares de materiais magnéticos orientados (depois de polarizados).

Fonte: (MARQUES, 2018).

Com isso, a barra de ferro fica polarizada e é capaz de atrair outros materiais magnéticos. A força da atração é proporcional ao quadrado da corrente que circula pela bobina, ao número de espiras e ao espaço existente entre a barra de ferro envolta pela bobina e o pedaço de ferro magnético fixado no dedo da mão mecânica "gap".

Para desenvolver a bobina para essa aplicação, algumas premissas são adotadas, tais como:

- A corrente demandada pela bobina não pode ultrapassar 2 A, pois para executar o acorde no teclado musical são necessárias três notas e a corrente máxima que a fonte externa consegue fornecer são 6 A;
- O tamanho da bobina, horizontalmente, não pode ultrapassar o diâmetro d mostrado na Figura 22 pois este diâmetro é equivalente à largura das teclas do teclado, ou seja, ultrapassá-lo interferirá no espaço ocupado pela bobina vizinha;
- O tamanho da bobina, verticalmente, não pode ultrapassar a altura h mostrada na Figura 22 pois interferirá na altura da mão mecânica.

Testes foram feitos com diferentes números de espiras e diferentes tensões aplicadas nos terminais da bobina até alcançar os valores definidos. Por tentativa e erro chegou-se à conclusão que, para atender as premissas adotadas, é necessária uma tensão de 15 V, 1000 espiras e um carretel de aproximadamente 10 cm de comprimento por 1,8 cm de diâmetro. Com esses valores, obteve-se uma corrente de aproximadamente 1,2 A.

O fio de cobre utilizado para a construção da bobina foi o 26 AWG. Ele possui algumas características construtivas e elétricas positivas que nortearam a decisão, tais como o tamanho de sua bitola e a corrente que ele suporta.

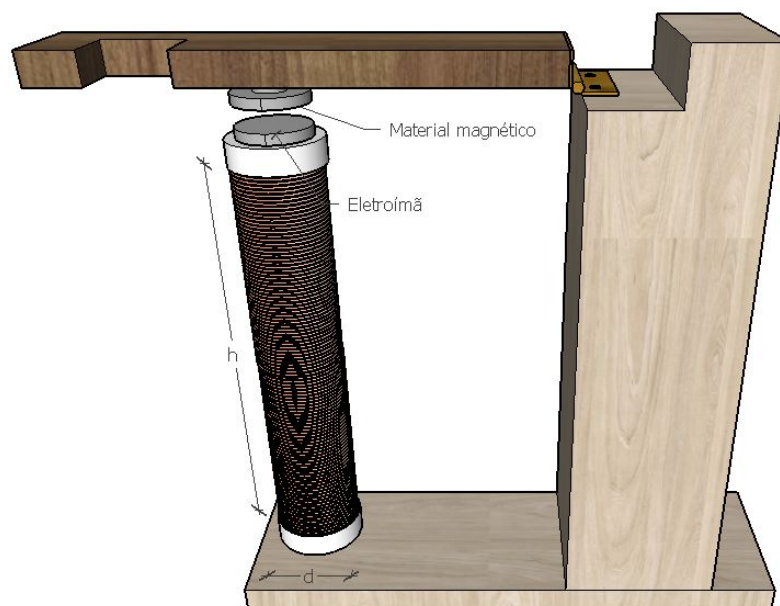


Figura 22: Limitações da construção da bobina.

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 9 informa as características construtivas dos fios de cobre de bitolas AWG. Pode-se perceber que a corrente máxima de operação do fio adotado é menor que a corrente que circula por ele durante a execução dos acordes musicais. Porém, o tempo do som que o teclado reproduz é de aproximadamente 3 s e os testes feitos nas bobinas não acusaram defeito em seus enrolamentos. Tais danos viriam a acontecer caso as bobinas fiquem acionadas por um longo período de tempo.

Tabela 9: Características dos fios de cobre de diversas bitolas AWG.

Número AWG	Diâmetro (mm)	Secção (mm ²)	Número de espiras por cm	kg/km	Resistência (Ohms/km)	Capacidade (A)
20	0,8118	0,52	11,6	4,61	32,69	1,6
21	0,7230	0,41	12,8	3,64	41,46	1,2
22	0,6438	0,33	14,4	2,89	51,5	0,92
23	0,5733	0,26	16,0	2,29	56,4	0,73
24	0,5106	0,20	18,0	1,82	85,0	0,58
25	0,4547	0,16	20,0	1,44	106,2	0,46
26	0,4049	0,13	22,8	1,14	130,7	0,37
27	0,3606	0,10	25,6	0,91	170,0	0,29
28	0,3211	0,08	28,4	0,72	212,5	0,23

Fonte: Adaptado de (NOVACON VERTEX, 2015).

Outro fato é que, para que as bobinas não sofram nenhum dano independente do tempo que ela fique acionada, precisaria escolher um fio de bitola 21 AWG ou menor, mas a seção nominal para estes tipos de fio implicaria em outras dificuldades para a construção das bobinas, pois modificaria seu tamanho para alcançar as premissas definidas e haver compensação de forças.

4.2 DRIVER DE ACIONAMENTO

A interface responsável por fazer a conexão entre o software utilizado para o trabalho, MATLAB®, e a mão mecânica implementada é a placa de aquisição de dados NI 6009, da *National Instruments*. Segundo seu *User Guide*, a corrente máxima que cada porta consegue fornecer, utilizando um resistor de pull-up para aumentar o driver de corrente, é de 8,5 mA.

Como foi visto na seção 4.1, para que os dedos tenham força suficiente para executar a nota do teclado é necessário, aproximadamente, uma corrente de 1,2 A, muito maior do que a placa consegue fornecer. Neste caso, se as bobinas forem ligadas diretamente na placa, seus terminais serão danificados.

Para evitar isso é desenvolvido um driver para o acionamento das bobinas, em que a corrente demandada pelas bobinas será fornecida por uma fonte externa e a placa de aquisição de dados servirá para comandar o acionamento e desacionamento das bobinas. Com o intuito de aumentar o ganho do transistor e garantir que o circuito não sofra nenhum dano devido as correntes, optou-se por projetar um driver conhecido como configuração Darlington, circuito localizado dentro do quadrado da Figura 23. Utilizou-se este circuito para garantir uma robustez no acionamento das bobinas.

Dimensionando corretamente o resistor de base R_B , o circuito Darlington pode operar nos estados de saturação e corte funcionando como uma chave. A tensão de comando $V_{comando}$ é o sinal fornecido pela placa de aquisição de dados (5 V), V_{cc} é a tensão de alimentação do driver, a mesma definida na seção do projeto das bobinas, e o diodo D_1 serve de proteção para o circuito quando a bobina for desenergizada.

Com o correto dimensionamento do driver, encontrou-se os resistores e transistores mostrados na Tabela 10, vale salientar que o desenvolvimento do driver encontra-se no Apêndice A.

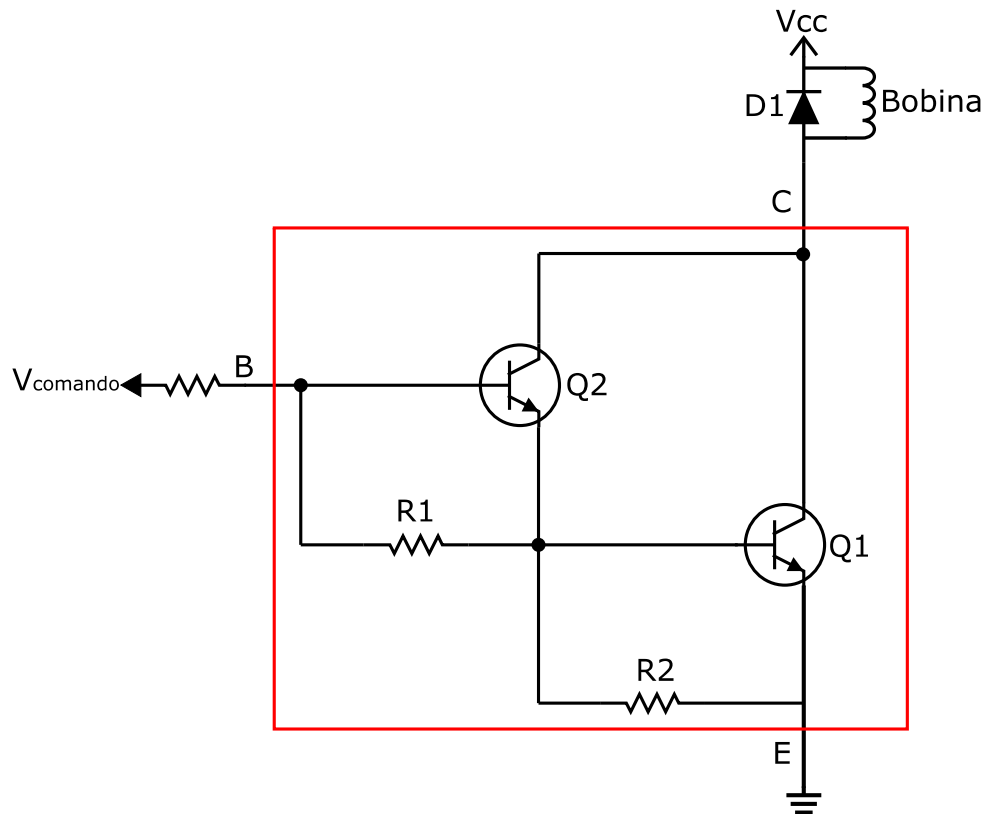


Figura 23: Driver utilizado para o acionamento das bobinas.

Fonte: Autoria própria.

Tabela 10: Componentes utilizados para a implementação do driver.

Resistores e transistores encontrados com o projeto do driver	
Resistores	$R_B = 425\Omega$ a $27k\Omega$
	$R_1 = 10k\Omega$
	$R_2 = 150\Omega$
Transistores	$Q_2 = BC548B$
	$Q_1 = TIP41C$
Diodo	1N4007

Fonte: Autoria própria.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados a análise dos métodos desenvolvidos para o reconhecimento de acordes musicais e definido qual deles apresenta ser mais eficaz ao trabalho proposto. Ainda, serão detalhados os testes feitos na mão mecânica, a integração do sistema e as dificuldades encontradas.

5.1 ANÁLISE DOS MÉTODOS DESENVOLVIDOS PARA O RECONHECIMENTO DE ACORDES MUSICAIS

Após fazer a aquisição das 70 amostras dos acordes musicais, sendo 10 de cada acorde em estudo, elaborou-se duas tabelas: uma mostra a probabilidade de sucesso do método 1 para os acordes gravados (Tabela 11) e outra mostra a eficiência do sistema de classificação por acorde do mesmo método (Tabela 12).

Tabela 11: Tabela de probabilidade de sucesso na análise de um sinal acústico para o método 1.

Tentativa	Acorde C	Acorde D	Acorde E	Acorde F	Acorde G	Acorde A	Acorde B
1	Êxito	Êxito	Êxito	Êxito	Êxito	Êxito	Êxito
2	Êxito	Êxito	Êxito	Êxito	Êxito	Êxito	Êxito
3	Êxito	Êxito	Êxito	Êxito	Falha	Êxito	Êxito
4	Êxito	Falha	Êxito	Êxito	Falha	Êxito	Êxito
5	Falha	Falha	Falha	Falha	Falha	Falha	Falha
6	Êxito	Êxito	Êxito	Falha	Falha	Êxito	Êxito
7	Êxito	Falha	Êxito	Êxito	Falha	Êxito	Êxito
8	Falha	Falha	Falha	Êxito	Falha	Êxito	Êxito
9	Falha	Falha	Êxito	Falha	Falha	Êxito	Êxito
10	Falha	Falha	Êxito	Êxito	Falha	Êxito	Êxito

Fonte: Autoria própria.

O método 1 mostrou uma eficiência de reconhecimento muito baixa, tanto em um contexto geral quanto para alguns acordes específicos pois, como mostra a Tabela 12, o acorde G foi reconhecido apenas 2 vezes das 10 tentativas realizadas, tornando-se assim inviável para a aplicação proposta. Tal probabilidade de fracasso pode ser justificado da seguinte forma:

- As gravações dos acordes podem ter sido feitas com uma qualidade baixa, ou seja, ruídos indesejáveis, instrumento desafinado, força excessiva aplicada nas cordas, etc;
- A forma de gerar o vetor característico do acorde analisado pode ter sido projetado com grandes limitações, causando, por exemplo, o aparecimento ou desaparecimento de "número(s) 1" em algumas posições do vetor característico do acorde analisado.

Tabela 12: Eficiência do sistema de classificação do método 1.

Eficiência da classificação	64%	
Eficiência por um acorde	Acorde C	60%
	Acorde D	40%
	Acorde E	80%
	Acorde F	70%
	Acorde G	20%
	Acorde A	90%
	Acorde B	90%

Fonte: Autoria própria.

O método 2, por outro lado, apresentou uma taxa elevada de sucesso por não partir do princípio da varredura das frequências e sim da menor distância existente entre o objeto em análise e as classes definidas, ou seja, por mais desafinado que esteja o instrumento ou perturbações que existam no momento da aquisição do sinal, sempre haverá uma classe em que o objeto se encaixará.

O método 2 mostrou uma eficiência de 100% para o reconhecimento dos acordes em estudo, porém ele possui um grande defeito que é a classificação de acordes que não fazem parte dos sete acordes maiores em estudo, ou seja, se analisar qualquer outro acorde além dos que estão sendo analisado (C, D, E, F, G, A e B), ele também fará o reconhecimento do acorde e convergirá para alguma classe previamente definida. Porém, como o trabalho possui a premissa de que haverá apenas acordes maiores a serem reconhecidos, então o método a ser utilizado neste trabalho é o método 2.

5.2 INTEGRAÇÃO DO SISTEMA

A implementação do sistema é mostrada na Figura 24, onde são destacados os principais objetos utilizados no presente trabalho. O objeto indicado como

sendo o número 1 é uma fonte simétrica, a qual fornecerá a corrente demandada pelas bobinas quando elas forem acionadas. O objeto número 2 é o cérebro do trabalho, um computador pessoal contendo o método utilizado para o reconhecimento de acordes musicais, o qual foi desenvolvido no software MATLAB® versão estudante. O objeto número 3 é a interface responsável por fazer a conexão do *software* do sistema com o *hardware*, a placa de aquisição de dados da *National Instruments* NI USB 6009. O número 4 é o driver para o acionamento dos dedos da mão mecânica, a qual é mostrada na marcação de número 5.

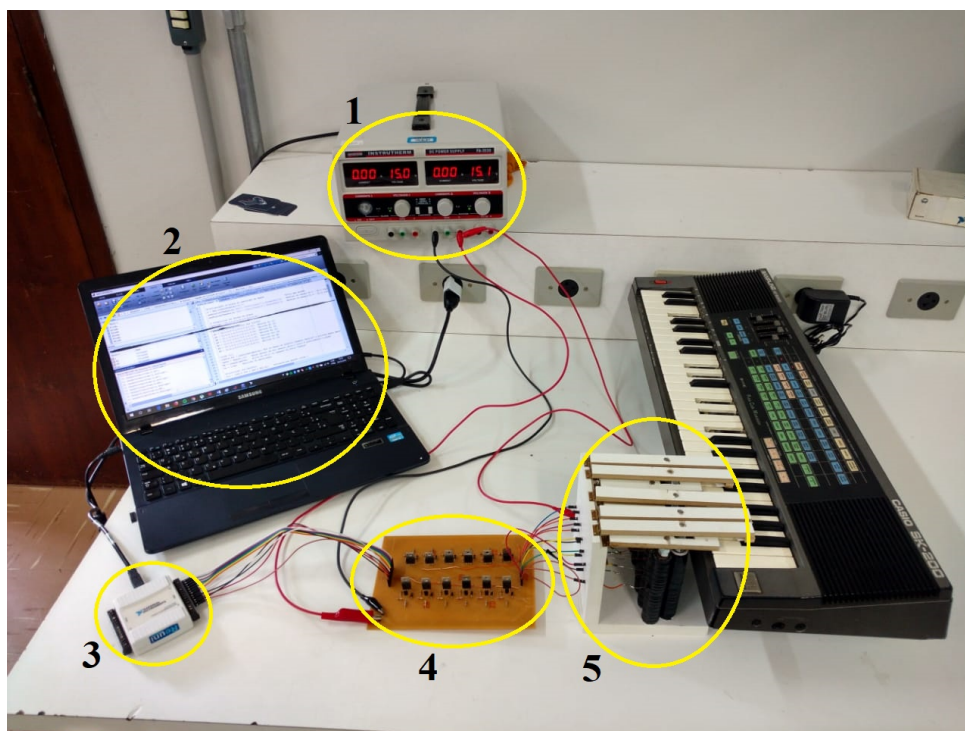


Figura 24: Integração do sistema de reconhecimento e reprodução de acordes musicais.
Fonte: Autoria própria.

5.3 DIFICULDADES ENCONTRADAS

A primeira dificuldade encontrada no decorrer do trabalho foi no desenvolvimento do método 1, pois teve-se que fazer algumas considerações para facilitar um pouco a construção da lógica de reconhecimento.

Primeiramente, as frequências definidas na Tabela 6 são ideais, ou seja, na prática é impossível obtê-las pois dependem de fatores externos, como a força dos dedos aplicada nas cordas no momento da gravação, a temperatura ambiente do dia da gravação, etc., porém as frequências encontradas nos acordes utilizando a FFT se

aproximam muito das frequências teóricas.

Ainda, para facilitar a análise e a construção do método 1, algumas frequências foram aproximadas, por exemplo as frequências de 245,8 Hz, do acorde B, e 247,4 Hz, do acorde E. Porém isso não acusa muita interferência pois os sons destas duas frequências são bem parecidos.

Outra grande dificuldade foi a definição dos limiares de amplitude e faixas de frequências para reconhecimento dos acordes. As faixas de frequências não podiam sobrepor-se entre as faixas vizinhas porque a formação dos vetores característicos seria construída de maneira errônea.

As definições dos limiares de amplitude foram definidas cuidadosamente porque em muitos casos a amplitude das frequências fundamentais de um acorde eram menores do que a amplitude das frequências harmônicas de outro acorde e isso causava erro na construção do vetor característico. Para explicar melhor este ocorrido, será feito um exemplo genérico.

Considere duas notas musicais, uma chamada de "nota y" e outra de "nota z" como mostra a Figura 25, onde a primeira frequência de ambas as notas é a frequência fundamental e a segunda é a frequência harmônica. Ainda, considere que a frequência harmônica da nota y é a frequência fundamental da nota z e que não há faixa de frequência.

A formação do vetor característico destas duas notas fica simples, é um vetor de duas posições onde a primeira posição corresponde à frequência de 100 Hz (frequência fundamental da nota y) e a segunda posição à frequência de 150,3 Hz (frequência fundamental da nota z). Ainda, seus limiares de amplitude são os seguintes: para a primeira frequência é de 0,2 V e para a segunda é de 0,08 V.

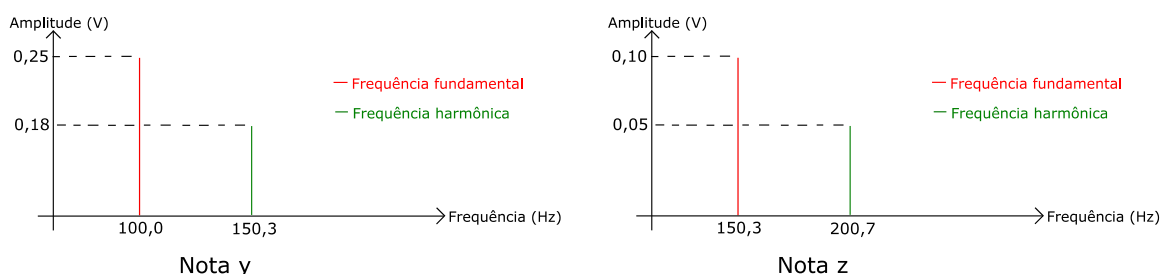


Figura 25: Comparação das notas y e z.

Fonte: Autoria própria.

Desta forma, o vetor característico da nota y é [1 1] e da nota z é [1 0]. O vetor da segunda nota foi construído de maneira correta, afinal ela possui apenas uma

frequência fundamental (a primeira), por tanto apenas a primeira posição deve ter valor 1. Já no vetor da primeira nota isso não acontece, pois, o limiar da frequência fundamental da nota z é menor do que a amplitude da frequência harmônica da nota y , fazendo com que a segunda posição do vetor característico da primeira nota também receba valor 1. Essa foi a principal dificuldade encontrada para a elaboração do método 1.

Com esse problema incontornável e a baixa eficiência de reconhecimento do método 1, fez-se necessário o estudo de outras técnicas para o reconhecimento de acordes musicais, levando ao segundo método proposto, onde sua eficiência de reconhecimento é elevada e seus "defeitos" não são relevantes para a aplicação deste trabalho.

A principal dificuldade encontrada na implementação da mão mecânica foi a construção das bobinas para que elas atendessem as especificações físicas e elétricas definidas. Além disso, a ligação entre elas precisava ser correta para que o campo magnético das duas bobinas ligadas em série se somasse obtendo uma força de atração maior, demandando desta forma menos corrente.

6 CONCLUSÕES

Os resultados do trabalho foram satisfatórios pois o sistema conseguiu reconhecer o acorde musical em análise e reproduzi-lo no teclado corretamente. Por ser um trabalho com implementação eletromecânica, várias dificuldades foram encontradas no desenvolvimento do mesmo, pois os acadêmicos de Engenharia Elétrica não estão familiarizados com atividades deste gênero, mas justamente por esse fato acaba tornando o trabalho inspirador, inusitado, criativo e interessante.

Como comentado várias vezes no desenvolvimento do presente trabalho, há diversas maneiras de construir um sistema para o reconhecimento de objetos. Desta forma não é possível comparar de igual para igual com outros trabalhos desenvolvidos. Ainda, como comentado no tópico da análise dos métodos, esse sistema é limitado aos 7 acordes maiores definidos no início do trabalho pois caso seja analisado outro acorde que não faz parte do grupo de acordes definidos, o sistema reconhece da mesma forma e faz uma aproximação para o acorde mais próximo.

Não foi possível adquirir uma informação quantitativa descrevendo a velocidade de resposta do sistema, mas na prática pode-se perceber que o acorde é reconhecido em uma velocidade considerável, havendo a possibilidade de construir algumas melodias.

Com o desenvolvimento desse trabalho, pode-se aperfeiçoar muitos conhecimentos adquiridos nas disciplinas do curso de Engenharia Elétrica envolvidas. Também foram obtidos conhecimentos externos, que não são vistos dentro da universidade, como a teoria musical e o desenvolvimento do projeto em ferramentas gráficas computacionais, como o SketchUp®.

Para as perspectivas futuras, espera-se que o trabalho tenha continuidade, seja melhorado e adaptado para diferentes aplicações, que o sistema possa reconhecer e reproduzir um acorde musical qualquer no teclado no momento que alguma pessoa execute esse acorde no violão ou algum outro instrumento, fazendo desta forma o reconhecimento de timbres.

REFERÊNCIAS

- ALEIXO, Giorgia Taiacol. **UM BANQUINHO, UM VIOLÃO ... E UMA ONDA EM PROPAGAÇÃO. (PROPRIEDADES DAS ONDAS NUMA CORDA)**. Campinas - SP, 2003. Disponível em: <https://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/F809/F809_sem1_2003/991828Giorgia-MansanaresF809_RF09_0.pdf>.
- BERSAN, Fernando. **Teoria de áudio. Timbre e envelope sonoro**. 2008. Disponível em: <<https://www.somaovivo.org/artigos/teoria-de-audio-timbre-e-envelope-sonoro/>>.
- BISHOP, Christopher M. **Pattern Recognition and Machine Learning**. [S.l.]: Springer, 2006.
- FAIRCHILD SEMICONDUCTOR CORPORATION. **NI USB-6008/6009 User Guide**. [S.l.]. Disponível em: <<http://www.ni.com/pdf/manuals/371303n.pdf>>.
- FAIRCHILD SEMICONDUCTOR CORPORATION. **BC548x Datasheet**. [S.l.], 1999. Disponível em: <<http://www.philohome.com/sensors/gp2d12/gp2d12-datasheets-/bc548.pdf>>.
- FAIRCHILD SEMICONDUCTOR CORPORATION. **TIP41x Datasheet**. [S.l.], 1999. Disponível em: <<https://www.mouser.com/ds/2/149/TIP41C-890135.pdf>>.
- FRADE, Ricardo. **Notas no teclado do piano**. 2014. Disponível em: <<https://www-academiamusical.com.pt/tutoriais/notas-no-teclado-do-piano/>>.
- FRED, Ana. **Reconhecimento de padrões**. 2001. Disponível em: <http://www.dsc.ufcg.edu.br/~joseana/RP_1_Introducao.pdf>.
- GOMES, Otavio da Fonseca Martins. Reconhecimento de padrões. In: _____. Rio de Janeiro: PUC-Rio, 2008. cap. 4.
- HAYKIN, S.S.; VEEN, B. Van. **Signals and systems**. Wiley, 1999. ISBN 9780471138204. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=QA9LAQAAIAAJ>>.
- LEIGH. **Sound Envelopes**. 2018. Disponível em: <<https://www.teachmeaudio.com/recording/sound-reproduction/sound-envelopes/>>.
- MARQUES, Domiciano. **Eletroímã**. 2018. Disponível em: <<https://brasilecola.uol.com.br/fisica/eletroima.htm>>.
- MED, Bohumil. **Teoria da música**. [S.l.]: MusiMED, 1996.
- NOVACON VERTEX. **Tabela de fios AWG**. 2015. Disponível em: <<http://www.novacon.com.br/audiotabawg.htm>>.

SÁ, Joaquim P. Marques de. **Reconhecimento de padrões**. 2000. Disponível em: <<https://web.fe.up.pt/~jmsa/recpad/index.htm>>.

STMICROELECTRONICS. **BDX3xx Datasheet**. [S.l.], 1999. Disponível em: <<https://www.st.com/resource/en/datasheet/bdx33c.pdf>>.

WEEKS, M. **Processamento Digital De Sinais Utilizando Matlab**. LTC, 2012. ISBN 9788521621416. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=yme_NAEACAAJ>.

APÊNDICE A - PROJETO DO DRIVER PARA ACIONAMENTO DAS BOBINAS

Para projetar um circuito para o acionamento das bobinas, faz-se necessário partir de algumas premissas, tais como a corrente de coletor que, como mencionado na seção do driver de acionamento, é de 1,2 A (fornecida por uma fonte externa) e a tensão que o driver deverá ser acionado é de 5 V (provida da placa de aquisição de dados). Se seguirmos o circuito da Figura 26, o transistor que melhor se encaixa nessas características é o BDX34B (Darlington), como mostra seu datasheet, pois depende de uma pequena tensão para o acionamento e permite uma elevada corrente de coletor. Porém, por questões financeiras é utilizado seu circuito interno.

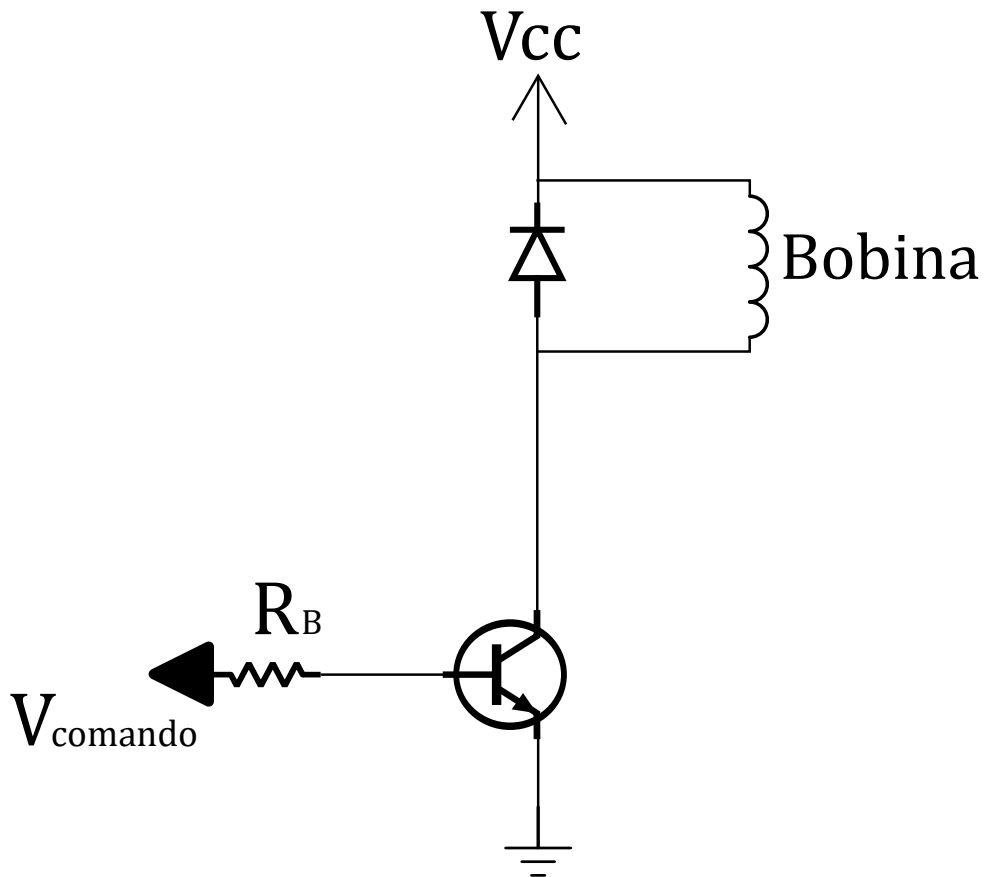


Figura 26: Circuito utilizado para parametrização da resistência de base.
Fonte: Autoria própria.

A configuração Darlington é mostrado na Figura 27, onde Q_2 geralmente é um transistor de uso geral e Q_1 normalmente é um transistor de potência. Neste trabalho, os transistores Q_1 e Q_2 utilizados são, respectivamente, o TIP41 e o BC548.

Os valores dos resistores R_1 e R_2 existentes na Figura 27 são de 10 k ω e 150 Ω respectivamente, valores propostos pelo datasheet do transistor BDX34B. Vale salientar que os transistores da configuração Darlington do transistor BDX34B não

são os mesmos utilizados neste trabalho, o que implica na alteração dos valores dos resistores R_1 e R_2 , porém se usar os mesmos resistores, ou se não usá-los, o circuito funciona da mesma forma.

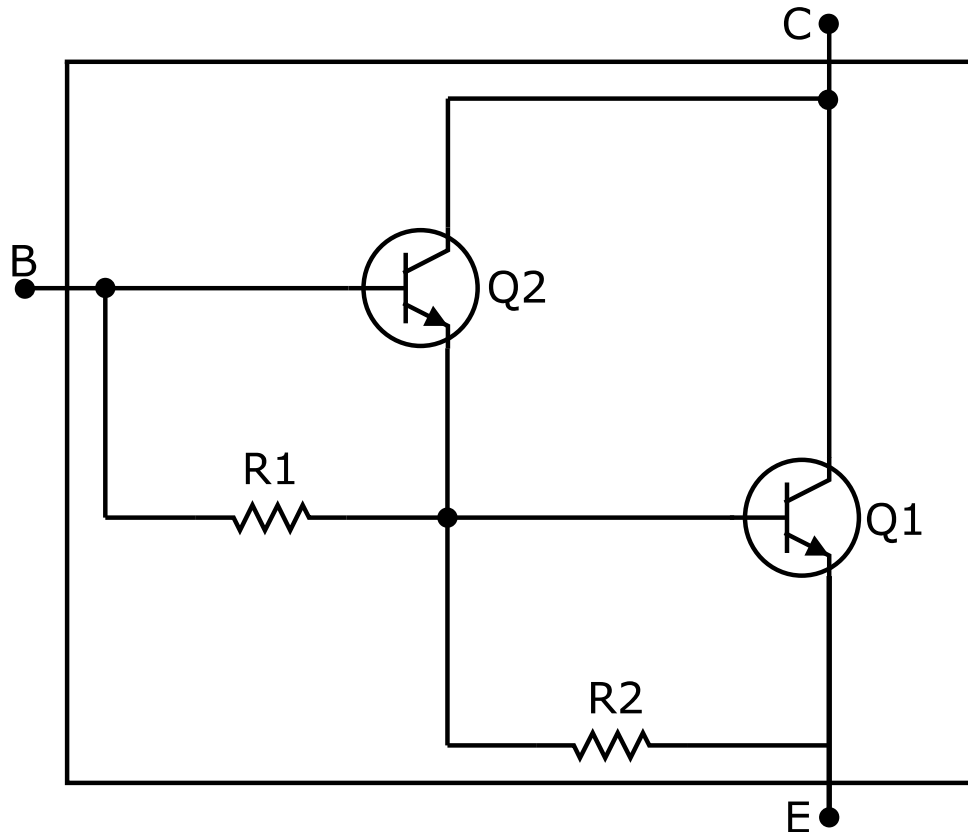


Figura 27: Configuração Darlington.
Fonte: Autoria própria.

Para a parametrização do resistor R_B , mostrado na Figura 26, não será levado em consideração o circuito Darlington, mas sim um transistor que possui um ganho elevado (devido à configuração Darlington) e uma tensão de saturação de 1 V (do transistor TIP41). Como o diodo D_1 serve apenas para garantir que o circuito não danifique com a desenergização da bobina, pode-se desprezá-lo das contas, porém será utilizado um diodo 1N4007. Além disso, com o intuito de deixar mais flexível a escolha do resistor de base, será definido uma faixa de valores onde a resistência máxima é encontrada pela corrente de coletor e a resistência mínima pela corrente máxima que a placa de aquisição de dados consegue fornecer.

Para a configuração Darlington, como há dois transistores, é necessário encontrar um valor de beta geral. Para este tipo de configuração, o beta geral é o produto dos betas dos transistores envolvidos. O TIP41 possui um beta relativamente baixo, variando entre 15 e 75 (como mostra seu datasheet), já o BC548 tem um ganho

de corrente elevado, variando entre 125 e 900.

O beta médio dos transistores utilizados nos drives é de 30 e 300, logo o beta geral será de $\beta = 9000$. A relação da corrente de coletor com a corrente de base é mostrada na Equação 7. Ainda, a corrente mínima que a placa de aquisição de dados consegue fornecer é de 8,5 mA.

$$I_c = I_b * \beta \quad (7)$$

Percorrendo a malha da esquerda da Figura 26, encontra-se uma expressão matemática da tensão de comando do circuito em função da queda de tensão no resistor de base R_B e a tensão de polarização do transistor V_{BE} , como mostra a Equação 8. A tensão de polarização do transistor deve ser a soma da tensão de polarização dos dois transistores da configuração Darlington, neste caso $V_{BE} = 1,4$ V.

$$V_{comando} = (I_B * R_B) + V_{BE} \quad (8)$$

Para encontrar o valor mínimo da resistência para o funcionamento do driver, isola-se R_B da Equação 8 e substitui-se I_B pela corrente máxima fornecida pela placa de aquisição de dados, V_{BE} pela queda de tensão da polarização dos dois transistores e $V_{comando}$ pela tensão de saída da placa NI USB 6009. Com isso, encontra-se uma resistência mínima de 425Ω .

Para encontrar o valor máximo da resistência para o funcionamento do driver, isola-se R_B da Equação 8 e substitui-se I_B pela Equação 7, resultando uma expressão dependente da corrente de coletor e do beta geral do circuito, como mostra a Equação 9.

$$R_B = \frac{(V_{comando} - V_{BE}) * \beta}{I_C} \quad (9)$$

Substituindo todos os valores calculados e definidos na Equação 9, pode-

se encontrar para a resistência de base do driver um valor de $R_B = 27000\Omega$. Com isso, a faixa de resistências para o funcionamento do circuito é $425\Omega \leq R_B \leq 27k\Omega$.