



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO – UFERSA
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS – DCEN
BACHARELADO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

DANIEL DE MENEZES SILVA

**SISTEMA DE APRENDIZAGEM PARA AFINAÇÃO, FORMAÇÃO DE ACORDES E
PERCEPÇÃO SONORA DO VIOLÃO NA PLATAFORMA ANDROID**

MOSSORÓ-RN

2015

DANIEL DE MENEZES SILVA

**SISTEMA DE APRENDIZAGEM PARA AFINAÇÃO, FORMAÇÃO DE ACORDES E
PERCEPÇÃO SONORA DO VIOLÃO NA PLATAFORMA ANDROID**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Universidade Federal Rural do Semi-Árido –
UFERSA, Departamento de Ciências Exatas e
Naturais, para a obtenção do título de Bacharel
em Ciência da Computação.

Orientador: Leandro Carlos de Souza

Coorientador: Marcelo Roberto B. G. Vale

MOSSORÓ-RN

2015

O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade de seus autores

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Biblioteca Central Orlando Teixeira (BCOT)

Setor de Informação e Referência

S586s Silva, Daniel de Menezes

Sistema de aprendizagem para afinação, formação de acordes e percepção sonora do violão na plataforma Android / Daniel de Menezes Silva -- Mossoró, 2015.

50f.: il.

Orientador: Prof. Leandro Carlos de Souza

Coorientador: Marcelo Roberto B. G. Vale

Monografia (Graduação em Ciência da Computação) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido. Pró-Reitoria de Graduação.

1. Programação. 2. Android – sistema operacional.
3. Dispositivos móveis. 4. Violão - Sistema de ensino. I.

Título.

RN/UFERSA/BCOT /071-15

CDD: 005.25

Bibliotecária: Vanessa Christiane Alves de Souza Borba

CRB-15/452

DANIEL DE MENEZES SILVA

SISTEMA DE APRENDIZAGEM PARA AFINAÇÃO, FORMAÇÃO DE ACORDES E
PERCEPÇÃO SONORA DO VIOLÃO NA PLATAFORMA ANDROID

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Universidade Federal Rural do Semi-Árido –
UFERSA, Departamento de Ciências Exatas e
Naturais, para a obtenção do título de Bacharel
em Ciência da Computação.

Data da Defesa: 30/01/2015

BANCA EXAMINADORA

Prof. M.Sc. Leandro Carlos de Souza – UFERSA
Orientador e Presidente

Prof. Dr. Marcelo Roberto Bastos Guerra Vale – UFERSA
Coorientador

Prof^a. Dra. Angélica Félix de Castro – UFERSA
Primeiro Membro

Prof. Dr. Leonardo Augusto Casillo – UFERSA
Segundo Membro

DEDICATÓRIA

A Deus por estar sempre comigo; aos meus pais, Damião Silva e Ilaneide Menezes pelo incentivo e amor; à minha esposa Maiane Cordeiro pelo amor e paciência.

AGRADECIMENTOS

A Deus por tudo quanto tem me ajudado. Por sua infinita bondade, que certamente me acompanhará em todos os dias da minha vida.

Aos meus pais, Damião Silva e Ilaneide Menezes e minha irmã Ticiane Menezes que sempre me apoiaram e me ajudaram nessa caminhada, se não fosse por vocês esse momento não seria possível.

À minha esposa Maiane Cordeiro pelo apoio, incentivo e compreensão por todo o tempo dedicado ao curso.

Aos professores Leandro Souza e Marcelo Guerra pela paciência na qual dedicaram parte do seu tempo na orientação deste trabalho.

A todos os professores do curso de Ciência da Computação pelo conhecimento passado e conselhos que serão de grande importância nas várias etapas da vida.

A minha família, amigos e a todos os que me ajudaram e me apoiaram em todo o decorrer do curso.

A todos vocês o meu imenso OBRIGADO!

RESUMO

Este trabalho descreve o desenvolvimento de um sistema de apoio ao ensino do violão para iniciantes utilizando dispositivos móveis controlados pela plataforma *Android*. O sistema proposto detecta e interpreta as notas musicais geradas pelas cordas do violão e auxilia na afinação do mesmo. Além disso, incorpora um dicionário de imagens informando quais cordas devem ser tocadas para que seja gerado um acorde. O sistema pode gerar o som correspondente a uma configuração de posicionamento dos dedos e o usuário pode compará-lo com o som emitido pelo instrumento. Este requisito propicia que o próprio usuário possa realizar uma avaliação crítica do seu progresso na aprendizagem. As notas musicais são identificadas e os acordes são gerados fazendo-se uso de técnicas de processamento de sinais. Todas as etapas envolvidas no desenvolvimento desta ferramenta são descritas por: contextualização dos assuntos necessários para o desenvolvimento; captura e codificação das notas emitidas pelo violão; processamento do sinal sonoro, feito pela utilização da transformada de Fourier; aplicação de filtros nas transformações; e interpretação dos resultados, que é uma análise do comportamento das notas do violão em termos de frequência.

Palavras-chave: Sistema de ensino. Violão. Dispositivos móveis. Android.

ABSTRACT

This work describes the development of a guitar teaching system for support beginners using mobile devices which use Android platform. This system detects and interprets musical notes generated by the guitar's strings and assists its tuning. It also incorporates a dictionary of images indicating strings which can be played to generate a chord. The system can generate the corresponding sound to a finger placement setting and the user can compare it with the instrument's sound. So, user can do, by himself, a critical assessment of his learning progress. Signal processing techniques are used to identify notes and to generate chords. All steps involved for developing this tool are described by: contextualization of the issues required for development; capture and coding of notes issued by the guitar; Sound signal processing, done using the Fourier transform; applying filters to the transformations; and interpretation of results, which is an analysis of the behavior of guitar notes in frequency.

Keywords: Education system. Guitar. Mobile devices. Android.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Amplitude de uma onda	19
Figura 2 – Frequência de uma onda	20
Figura 3 – Amplitude em função da fase	21
Figura 4 – Amostragem de um sinal.....	22
Figura 5 – Trem de impulsos unitários	23
Figura 6 – Ambiente de desenvolvimento.....	31
Figura 7 – Arquitetura Android.....	32
Figura 8 – Espectro de frequências da corda Lá capturada a 8000 a/s.....	35
Figura 9 – Diagrama de blocos do afinador	36
Figura 10 – Espectro de frequências da corda Mi capturada a 1000 a/s.....	37
Figura 11 – Interpretação do resultado da FFT.....	38
Figura 12 - Escala de cores do afinador	40
Figura 13 – Diagrama de blocos do gerador de acordes	41
Figura 14 – Corda Ré pouco desafinada abaixo da frequência fundamental.....	43
Figura 15 – Corda Ré pouco desafinada acima da frequência fundamental.....	44
Figura 16 – Corda Mi afinada.....	44
Figura 17 – Corda Si desafinada 3 tons abaixo.....	45
Figura 18 – Gráficos das notas que formam o acorde de Mi maior no braço do violão.....	46
Figura 19 – Gráfico do acorde de Mi maior a partir da combinação das notas.....	46
Figura 20 – Dicionário de acordes.....	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Notas musicais e seus acidentes.....	18
Tabela 2 – Frequências das notas do violão.....	28
Tabela 3 – Escala maior.....	29
Tabela 4 – Escala menor.....	29
Tabela 5 – Frequências usadas no reconhecimento das notas.....	40

LISTA DE SIGLAS

DFT	<i>Discrete Fourier Transform</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
API	<i>Application Programming Interface</i>
OHA	<i>Open Handset Alliance</i>
JVM	<i>Java virtual Machine</i>
SDK	<i>Software Development Kit</i>
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>
DCT	<i>Discrete Cosine Transform</i>
DST	<i>Discrete Sine Transform</i>
DHT	<i>Discrete Hartley Transform</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Problema.....	15
1.2 Objetivos.....	15
1.2.1 Objetivo geral	16
1.2.2 Objetivos específicos	16
1.3 Justificativa	16
2 REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1 Trabalhos correlatos.....	17
2.2 Conceitos básicos de teoria musical	18
2.3 Representação e características do som	19
2.3.1 Grandezas associadas a uma onda sonora	19
2.3.1.1 Amplitude (A)	19
2.3.1.2 Frequência (f).....	20
2.3.1.3 Fase	20
2.4 Teorema de Nyquist	21
2.5 Transformada de Fourier	23
2.5.1 Propriedade de Linearidade da Transformada de Fourier	24
2.5.2 Transformada Discreta de Fourier	25
2.5.3 Transformada Rápida de Fourier	25
2.6 Frequências das notas musicais.....	27
2.7 Violão	27
2.7.1 Formação de acordes no violão	28
2.8 Tecnologias usadas para o desenvolvimento	29
2.8.1 Android	30
2.8.1.1 Máquina Virtual Dalvik.....	30
2.8.1.2 Ambiente de desenvolvimento	31
2.8.1.3 Arquitetura Android.....	32
2.8.2 Java Sound API.....	32

2.8.3	Biblioteca JTransforms	32
2.8.4	Matlab	33
3	METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO.....	34
3.1	Desenvolvimento do afinador	35
3.1.1	Captura do sinal de áudio das cordas do violão.....	36
3.1.2	Processamento do sinal.....	37
3.1.3	Reconhecimento das notas.....	39
3.2	Dicionário e player dos acordes.....	41
3.3	Gerador de acordes	41
3.3.1	Gravação das notas do violão	42
3.3.2	Construção dos acordes	42
4	RESULTADOS	43
4.1	Testes de afinação	43
4.2	Dicionário e gerador de acordes.....	45
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	48
	REFERÊNCIAS.....	49

1. INTRODUÇÃO

A música é uma forma de expressão que remota o tempo dos homens primitivos. Nos dias atuais, a música encontra-se cada vez mais presente na vida das pessoas. Pode ser dividida em diversos gêneros que variam de acordo com características sociais, como a cultura e a classe social, por exemplo. O aprendizado da música é visto por muitos como uma forma de desenvolver a mente humana. Pode ser utilizada no desenvolvimento do raciocínio, no aumento de concentração, ou, simplesmente, proporcionar um bem estar para quem a escuta.

Segundo Melo (2009) o ensino da música para iniciantes, sempre oferece um grau de dificuldade. Um iniciante na música tem pouco ou nenhum conhecimento sobre teoria musical. O aluno é exposto a uma grande quantidade de informações novas, tanto para o aprendizado do instrumento, quanto para o aprendizado de teoria musical. O aprendizado trata-se de conhecer uma linguagem totalmente nova, percepção de ritmos, reconhecimentos de sons e percepção harmônica desses sons.

Associados a execução e interpretação de músicas estão os instrumentos musicais. Estes são construídos de várias formas com os mais diversos timbres. Podem ser instrumentos de cordas, sopro, teclas ou percussão, por exemplo. O aprendizado de um instrumento musical, de certo, é uma tarefa complicada. O aluno deve aprender a manejá-lo para que os sons produzidos correspondam aos esperados. Além disso, o músico deve estar atento a alguns problemas que o instrumento pode apresentar durante a sua execução.

Um dos problemas enfrentados por quem manipula instrumentos musicais é a desafinação do instrumento. Segundo Barbalho, Pina e Azevedo (2008) a afinação corresponde ao processo de ajustar o instrumento de maneira que ele possa soar com um som equivalente a outro som padrão. De acordo com Loschi e Fontes (2014) é de extrema importância que um instrumento esteja bem ajustado e com a afinação precisa. Desta forma, ele é capaz de produzir um som agradável aos ouvidos.

Os instrumentos de cordas são os mais propensos a sofrerem alterações na sua afinação, em virtude do afrouxamento de suas cordas. O processo de afinação, no entanto, é complicado e torna-se um desafio para iniciantes, que podem não perceber a condição desafinada do instrumento. Para auxiliar nesse processo de afinação, existem alguns equipamentos como o diapasão e alguns afinadores eletrônicos. Entretanto, a aquisição de um destes pode ser um mau investimento, tendo em vista que não é possível saber se o aluno terá êxito com o instrumento.

Instrumentos podem ser classificados de acordo com a sua forma de execução. Estes quando podem ser tocados apenas de forma a reproduzir um conjunto de notas sucessivas, são chamados de instrumentos melódicos. Outra forma de execução é quando estes são tocados normalmente com um conjunto de notas simultâneas, e são designados como instrumentos harmônicos. Esse conjunto de notas simultâneas são chamados de acordes. As notas podem ser combinadas de várias maneiras e formar um número muito grande de acordes.

A ferramenta desenvolvida nesse projeto deve auxiliar na educação musical e no aprendizado do violão. Esta aplicação foi implementada para a plataforma Android de forma que aproveite os dispositivos de propósito geral como os telefones móveis, para que possa aumentar o acesso a esta ferramenta. A aplicação ajuda o aluno na afinação do instrumento, na formação de acordes e na percepção sonora do violão.

1.1. Problema

O violão é um instrumento construído de madeira e possui cordas que podem ser de nylon ou aço presas a duas extremidades. É um instrumento harmônico em que, normalmente, a execução é feita através de acordes. Segundo Couto (2006) o violão pode desafinar de acordo com a mudança de temperatura que resulta da deformação do instrumento. Até mesmo após a execução de uma música ele tende a desafinar devido ao repuxe nas cordas, que são presas por tarraxas em umas das extremidades. As tarraxas também podem afrouxar e consequentemente diminuir a tensão nas cordas, o que ocasiona a desafinação. Quando um aluno está iniciando o aprendizado do violão, verifica-se o surgimento de certa dificuldade na elaboração dos acordes. Isto decorre da grande possibilidade de combinação dos sons e da memorização de sua reprodução.

1.2. Objetivos

Esse trabalho descreve a solução encontrada para detecção da afinação do violão. Também proporciona a exibição gráfica da distribuição dos dedos nas cordas para a formação de acordes, que podem ser: maiores, menores e maiores com sétima. Oferece ainda a reprodução sonora de cada um dos acordes a partir das notas que compõem esse acorde.

1.2.1 Objetivo geral

Desenvolver uma aplicação como um sistema que auxilie na aprendizagem do violão. A aplicação deve estar disponível para dispositivos móveis com a plataforma Android. O projeto é destinado a pessoas que estejam estudando a música com o intuito de tocar um violão e também para os que já possuem uma certa experiência com o instrumento.

1.2.2. Objetivos específicos

- Especificar contexto e tecnologias necessárias para o desenvolvimento da aplicação.
- Analisar gráfico do espectro de frequência do som de cada corda e entender seu comportamento usando o MATLAB;
- Desenvolver aplicação para Android;
 - Afinador para violão;
 - Dicionário de acordes;
 - Player de acordes;
- Capturar e combinar as notas do violão para gerar os acordes;
- Análise dos resultados.

1.3. Justificativa

A ferramenta desenvolvida neste trabalho tem como propósito, ajudar os usuários a identificar quando o violão está desafinado, dando-lhe instruções de como alcançar a afinação padrão. Isto possibilita ao aluno acostumar-se com o som com o qual cada corda deve soar. O software também dispõe de mecanismos para que o usuário aumente sua habilidade na utilização do instrumento através de um dicionário de imagens informando a posição dos dedos para a formação de alguns acordes; proporciona também a geração dos sons que devem ser produzidos por cada uma das imagens. Além do violão ser um dos instrumentos mais propensos a desafinação e segundo Alves (2009), é um instrumento muito utilizado na música popular. Assim, é justificável o desenvolvimento da ferramenta focada nesse instrumento. Como a ferramenta é executada por dispositivos móveis, o usuário poderá carregá-lo para qualquer lugar sem a necessidade de um equipamento extra.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Trabalhos correlatos

Nesta sessão serão apresentados alguns trabalhos que fazem uso de processamento de sinais no desenvolvimento de ferramentas relacionadas à música. Foram pesquisadas ferramentas que possuem algumas funcionalidades parecidas com a ferramenta desenvolvida neste trabalho, como por exemplo, na detecção das notas do violão. Isto foi feito no objetivo de justificar a viabilidade de proposição e implementação desta nova ferramenta.

Das ferramentas encontradas, são elas:

Acurate afinador cromático. É um afinador de instrumentos musicais que permite ajustar com precisão um determinado instrumento utilizando o microfone embutido de um dispositivo Android, com possibilidade de afinação em ambientes ruidosos. Possui interface agradável e de simples entendimento. O aplicativo foi testado com vários instrumentos como violões, cavaquinhos, ukuleles e guitarras elétricas, (GOOGLE PLAY, 2014).

Afinador de violão e guitarra elétrica implementados em FPGA. O projeto consiste no desenvolvimento de um dispositivo que tem como função a afinação de instrumentos de cordas, mais especificamente violões e guitarras elétricas, onde toda a lógica de controle, como identificação das notas e processamento do sinal é feito em um FPGA (*Field-programmable Gate Array*), (MANCERA, 2013).

As ferramentas encontradas mostram-se eficientes quanto a detecção das notas musicais e viabilidade de afinação de um instrumento de cordas. Entretanto, elas não possuem nenhum tipo de legenda das cifras do violão para facilitar o entendimento de pessoas que estão iniciando no aprendizado. Nem dispõem de um dicionário de acordes que permita ao usuário visualizar graficamente a formação de acordes que podem ser formados no instrumento, nem tão pouco a reprodução dos seus sons, na qual o usuário pode verificar como o violão deve soar estando afinado e com a formação correta dos acordes.

2.2. Conceitos básicos de teoria musical

Segundo Mascarenhas e Cardoso (1974), a música é considerada a arte de combinar os sons. Os três elementos fundamentais que compõem a música são, melodia, harmonia e ritmo. Uma melodia é formada quando um conjunto de sons são tocados sequencialmente. Harmonia é a combinação de vários sons tocados simultaneamente de acordo com as regras que regem os agrupamentos de sons simultâneos. Ritmo é descrito como uma sequência de sons coordenados e que possui uma determinada duração.

Na música os sons são representados por elementos básicos chamados notas musicais. Apesar de existirem inúmeros sons, são necessárias apenas sete notas para representá-los, estas são: dó, ré, mi, fá, sol, lá, si. Essas notas são separadas por intervalos, onde um intervalo é a distância entre uma nota e outra sendo que na música ocidental um semitom é a menor distância entre duas notas e um tom é a soma de dois semitons. O intervalo musical entre cada uma dessas notas é de um tom exceto o intervalo entre as notas mi, fá e entre as notas si, dó, que é um semitom ou meio tom.

Quando as notas musicais são tocadas sucessivamente formam uma série de sons na qual se dá o nome de escala. Quando essa serie é tocada em sua ordem natural, dó, ré, mi, fá, sol, lá, si, chama-se de escala ascendente e em ordem inversa de escala descendente. Entre as sete notas musicais ainda existem seus acidentes, sustenidos e bemóis representados respectivamente pelos símbolos # e *b* onde os sustenidos representam meio tom acima de uma nota e os bemóis meio tom abaixo. A Tabela 1 representa a sequência de notas e seus acidentes.

Tabela 1 – Notas musicais e seus acidentes

	Do#		Ré#			Fá#		Sol#		Lá#		
Dó		Ré		Mi	Fá		Sol		Lá		Si	Dó
	Réb		Mib			Solb		Láb		Sib		

Fonte: Autoria própria

Como se pode perceber a diferença entre as notas naturais mi, fá e si, dó é apenas de meio tom por isso não possuem bemóis nem sustenidos enquanto as demais possuem diferença de um tom. Esse intervalo de notas de um dó para o outro é chamado de oitava que em termos de frequência, o ultimo dó equivale ao dobro da frequência do primeiro dó. Quanto maior a frequência de uma nota, está é dita mais aguda e quanto menor a frequência é dita mais grave.

2.3. Representação e características do som

De acordo com Barbosa (1999), a grande parte da percepção que temos do mundo é a interpretação de fenômenos ondulatórios pelo nosso corpo. É caracterizado como uma onda um fluxo de energia que aumenta e diminui sua intensidade ao longo do tempo e espaço. A sensação de ouvirmos um som se deve a uma onda que se propaga causando uma variação de pressão atmosférica. Quando chegam aos nossos ouvidos são interpretadas através da membrana articular para o cérebro como um conjunto de sinais elétricos.

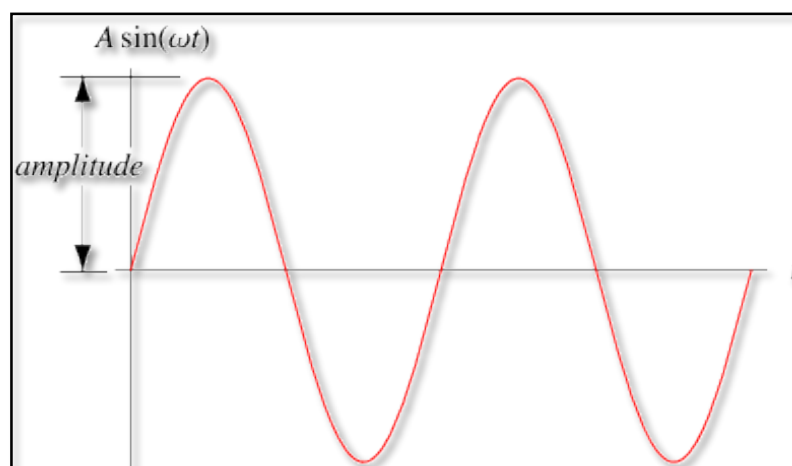
2.3.1. Grandezas associadas a uma onda sonora.

Ondas que se repetem ao longo do tempo em intervalos regulares, como os sinais sonoros, possuem algumas grandezas básicas associadas que são indispensáveis em sua análise. Entre as grandezas citadas são: amplitude, frequência, período e fase.

2.3.1.1. Amplitude (A)

A grandeza quantifica a intensidade do som que ouvimos, onde a variação da amplitude é proporcional a perturbação de pressão atmosférica. A unidade de medida da amplitude é dada em Decibéis (dB) na qual 1 decibel representa a menor variação de amplitude perceptível ao ouvido humano. A Figura 1 mostra como exemplo a amplitude de uma onda.

Figura 1 - Amplitude de uma onda

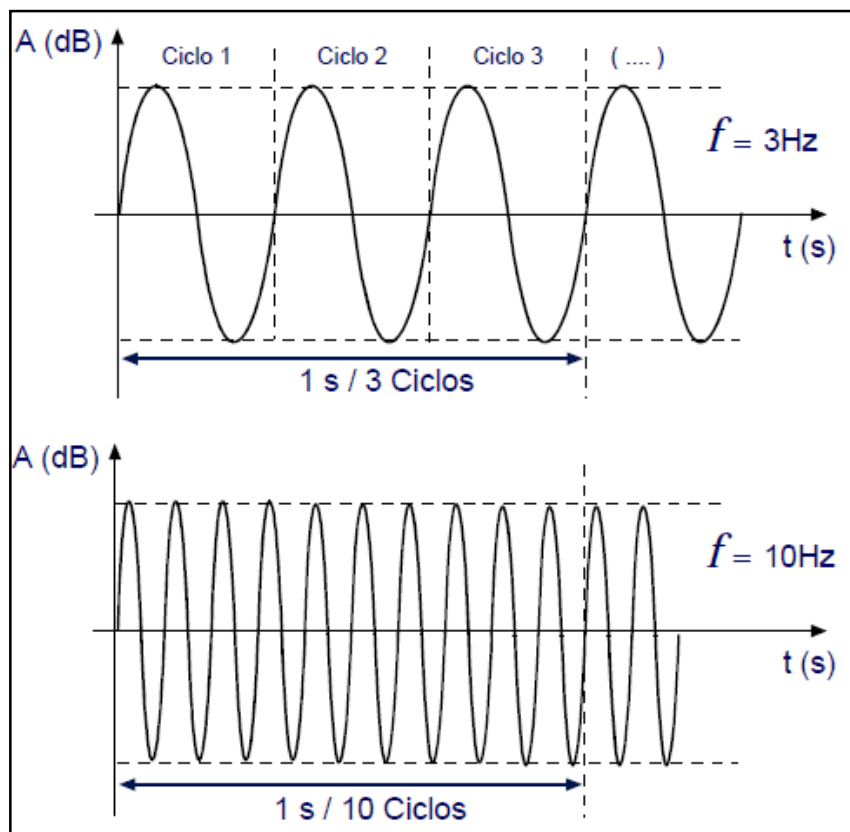


Fonte: (MATHWORLD, 2015)

2.3.1.2. Frequência (f)

A frequência diz respeito ao número de ciclos por segundo que uma forma de onda periódica oscila, onde a duração de cada ciclo é chamada de período (T). A frequência caracteriza-se como a grandeza mais relevante em relação ao som. Sua representação é dada em Hertz (Hz) onde uma onda pode variar desde 0 Hz até o infinito, entretanto o ouvido humano só consegue perceber variações de frequência na faixa de 20 Hz à 20 KHz. Na Figura 2 são apresentados dois exemplos de ondas uma com 3 ciclos por segundo e outra com 10 ciclos por segundo. Portanto cada onda possui respectivamente de 3 Hz e 10 Hz.

Figura 2 – Frequência de uma onda



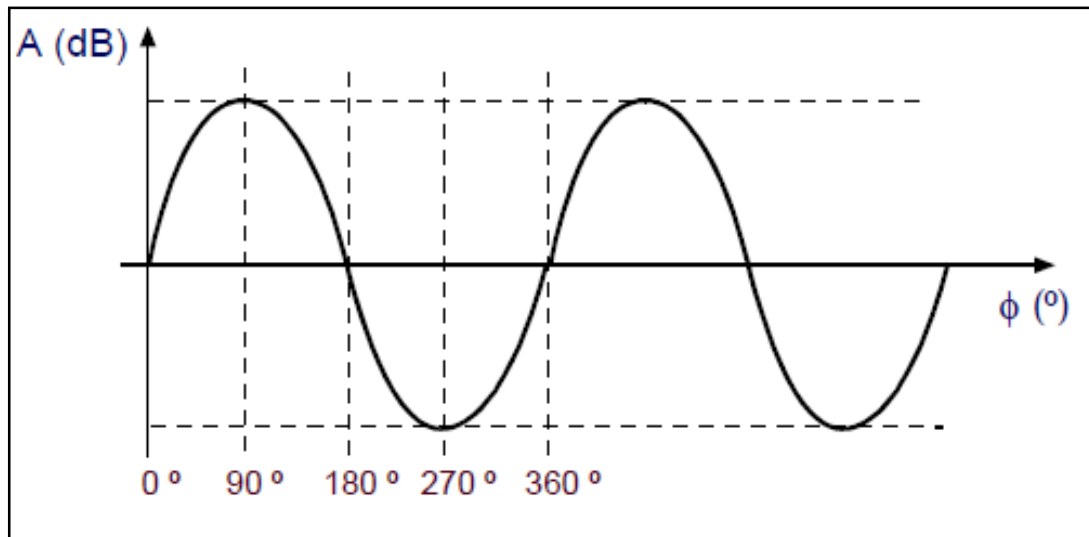
Fonte: (BARBOSA, 1999)

2.3.1.3. Fase

A representação gráfica de ondas periódicas baseia-se na relação que é possível estabelecer entre um movimento oscilatório senoidal e a definição matemática de uma

circunferência. Se percorremos uma trajetória no sentido anti-horário da circunferência, teremos valores de 0 a 360 graus. O valor em grau de cada momento percorrido é chamado de fase. A Figura 3 mostra a amplitude em função da fase percorrendo a variação de 0 a 360 graus.

Figura 3 – Amplitude em função da fase



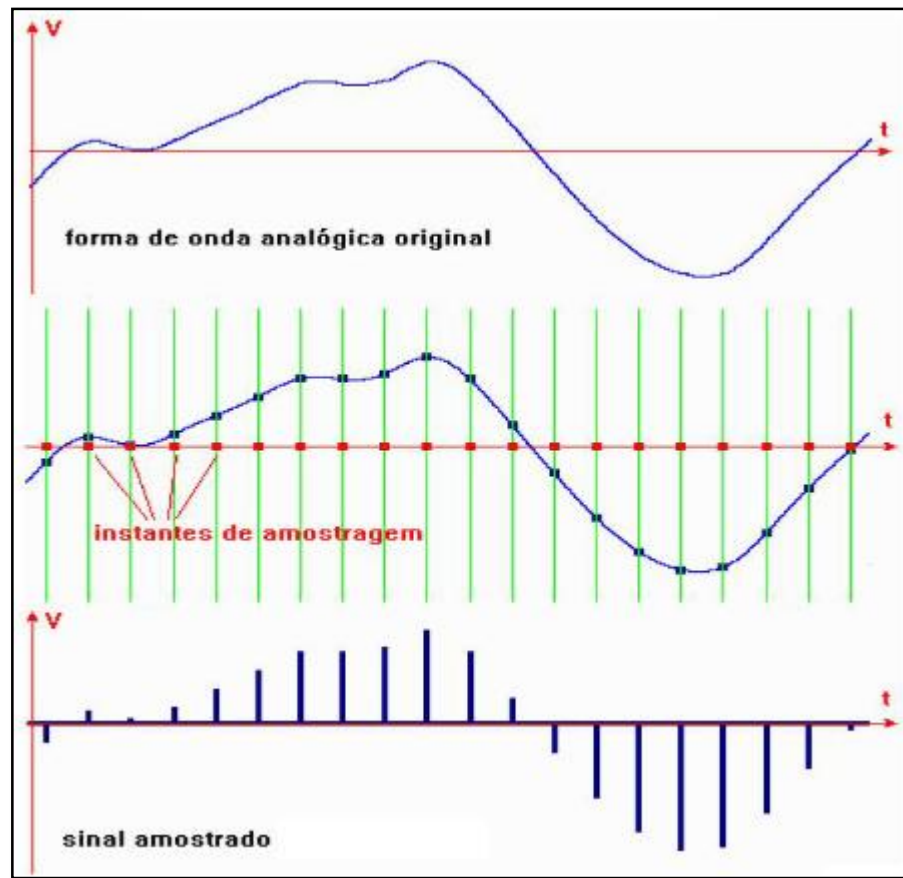
Fonte: (BARBOSA, 1999)

Duas ondas são ditas defasadas quando, no mesmo instante de tempo, possuem fases distintas. A diferença de fase de um sinal de áudio para outro é praticamente imperceptível ao ouvido humano. Contudo, a audição de dois sinais idênticos em amplitude e frequência diferenciando apenas pela fase pode causar alteração destrutiva no som. Se o ângulo de diferença desses dois sinais for de 180°, o resultado dessa soma é o silêncio pois estarão totalmente opostos e se anularão.

2.4. Teorema de Nyquist

Em sua forma física, o som possui natureza contínua. Um sinal é dito contínuo quando não existe um espaçamento entre suas amostras. Para uso em computadores é necessário que esse sinal seja amostrado, com o objetivo de se utilizar uma representação digital. Amostrar significa transformar um sinal contínuo no domínio tempo em um sinal discreto (discreto no domínio do tempo), onde são capturadas amostras do sinal original em intervalos fixos de tempo T_s , que é chamado de período de amostragem. O resultado é uma sequência finita de amostras que representa o sinal original como mostrado na Figura 4.

Figura 4 - Amostragem de um sinal



Fonte: (MANGUEIRA, 2013)

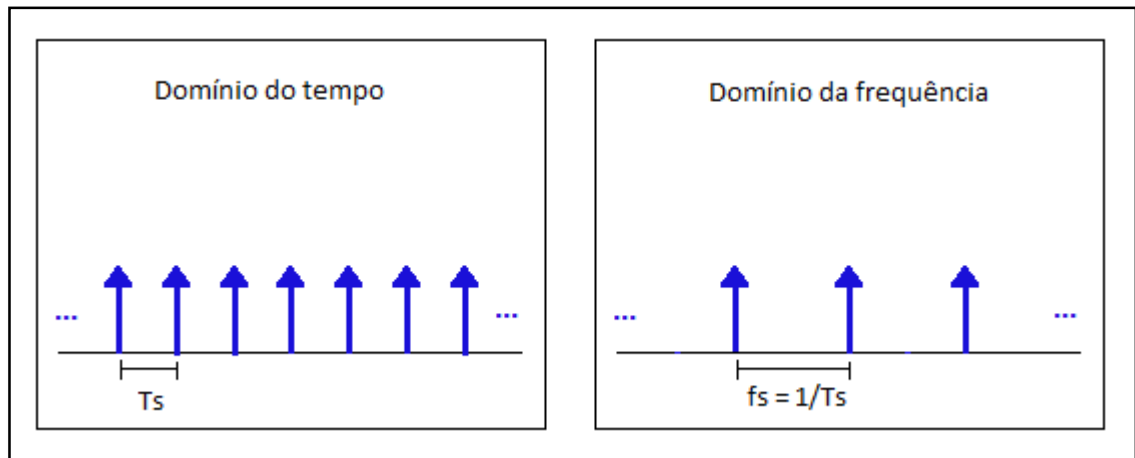
De acordo com Manguiera (2013), o Teorema de Nyquist é considerado de grande importância em aplicações que trabalham com processamento digital de sinais. Tal importância se dá por ser um teorema que estabelece uma condição adequada para a amostragem de sinais. O Teorema de Nyquist diz que um sinal deve ser amostrado a uma taxa maior ou igual a duas vezes a frequência da componente de mais alta frequência do sinal, para que possa ser reproduzido fielmente.

Com o processo de amostragem tornamos o sinal discreto, onde cada amostra é igual ao valor instantâneo do sinal original, chamados pulsos PAM (Pulsos Modulados em Amplitude). Após o processo de amostragem o sinal é quantizado, ou seja, cada amostra é representada com um número fixo de bits, tornando assim o valor de cada amostra discreto.

Um sinal possui duas representações, no domínio do tempo e no domínio da frequência. Se faz necessário a aplicação de uma transformada para projetar um sinal, que está no domínio do tempo, para o domínio da frequência. Uma transformada clássica utilizada em processamento de sinais é a Transformada de Fourier e foi a escolhida para uso neste trabalho.

Segundo Mello (2014), o período de amostragem T_s no domínio do tempo, corresponde ao seu inverso no domínio da frequência, que é a frequência de amostragem ou taxa de amostragem. A Figura 5 mostra como exemplo um trem de impulsos unitários no domínio do tempo e no domínio da frequência.

Figura 5 – Trem de impulsos unitários



Fonte: (Oppenheim, 1999)

2.5. Transformada de Fourier

Jean Baptiste Joseph Fourier foi um importante matemático e físico francês que viveu entre os séculos XVIII e XIX. Fourier fez grandes contribuições matemáticas sendo que as principais foram as séries trigonométricas batizadas em sua homenagem como séries de Fourier e suas transformadas que também levam o seu nome, (LOSCHI e FONTES, 2014).

Segundo Oppenheim (1999), para o caso de sinais periódicos e contínuos, a Transformada de Fourier aparece como ferramenta fundamental para análise do espectro de frequência. Fourier mostra que é possível decompor um sinal, por mais complexo que seja, em componentes seno e cosseno. Em alguns casos é mais simples se analisar esse sinal no domínio da frequência, o que corresponde a decompor o sinal em uma base com senos e cossenos. A transformada é invertível. Assim, filtros podem ser aplicados na frequência e a inversa tirada, com o objetivo de obter o sinal filtrado.

A Transformada de Fourier é definida por

$$F(k) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-2\pi i k t} dt \quad (1)$$

Já a inversa de Fourier é dada por

$$f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} F(k) e^{2\pi i k t} dk \quad (2)$$

A função de entrada da transformada de Fourier é representada por $f(t)$ quando aplicada a um sinal no domínio do tempo. O cálculo da transformada se dá pela integral do produto da função de entrada por uma exponencial complexa, onde o intervalo de integração pode variar de $-\infty$ à $+\infty$. A exponencial complexa pode ser calculada usando a fórmula de Euler, na qual mostra uma relação entre funções trigonométricas e funções exponenciais. A fórmula de Euler é dada por: $e^{it} = \cos(t) + i \sin(t)$. Como resultado, a função $F(k)$ é utilizada para calcular os valores das contribuições de cada componente de frequência k . O cálculo da inversa tem forma semelhante sendo que a entrada é o sinal no domínio da frequência tendo como resultado o sinal no domínio do tempo.

2.5.1. Propriedade de Linearidade da Transformada de Fourier

Para esse projeto, se mostrou válida a propriedade de linearidade da transformada de Fourier. Se adotarmos $F(w) = \mathcal{F}\{f(t)\}$, ou seja, o sinal no domínio da frequência é igual a transformada aplicada a esse sinal no domínio do tempo. Segue a propriedade de linearidade de acordo com a Equação 3 (MELLO, 2014).

$$\text{Linearidade: } \mathcal{F}\{a \cdot f(t) + b \cdot g(t)\} = a \cdot \mathcal{F}\{f(t)\} + b \cdot \mathcal{F}\{g(t)\} \quad a, b \in \mathbb{C}. \quad (3)$$

Esta propriedade de linearidade diz que a transformada da soma de duas funções $f(t)$ e $g(t)$ multiplicadas por escalares equivale a soma das transformadas de cada função separada multiplicadas por seus respectivos escalares.

2.5.2. Transformada Discreta de Fourier

De acordo com Mello (2014), para uso em computadores, como no processamento digital de sinais, é necessário ter valores discretos. Para isso existe a versão da Transformada Discreta de Fourier (DFT). Esta consiste em um algoritmo para realizar a transformada de Fourier em computadores digitais. Ela utiliza um número finito de amostras $x[n]$ no domínio do tempo e define uma representação discreta do sinal $y[k]$ no domínio da frequência onde também é possível calcular sua inversa.

A definição matemática da DFT para um sinal unidimensional é representada pela Equação 4:

$$y[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{\frac{-2\pi i k n}{N}} \quad (4)$$

Chamando $W_N = e^{-2\pi i / N}$ temos a Equação 5:

$$y[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] W_N^{kn}, \text{ para } k = 0, 1, \dots, N-1. \quad (5)$$

DFT inversa é representada pela Equação 6:

$$x[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} y[k] W_N^{-kn}, \text{ para } n = 0, 1, \dots, N-1. \quad (6)$$

O resultado da transformada é um conjunto de valores complexos na qual podem ser calculados os módulos de cada par complexo (real e imaginário) que tem como resultado as amplitudes de cada frequência que compõe o sinal. O índice representa a própria frequência, isto para uma taxa de amostragem igual ao número de amostras do conjunto a ser calculado a transformada. O cálculo do módulo de um número complexo é dado pela seguinte expressão: $modulo = \sqrt{real^2 + imaginario^2}$, (OPPENHEIM, 1999).

2.5.3. Transformada Rápida de Fourier

De acordo com Mello (2014), J.W. Cooley (IBM) em colaboração com J.W. Tukey (Bell Labs) conseguiram um grande avanço no tratamento digital de sinais em 1965, com a publicação da transformada rápida de Fourier (FFT). Esta consiste numa versão melhorada da

transformada discreta de Fourier em termo de desempenho, na qual tira proveito da estrutura repetitiva do cálculo.

A ideia da FFT é dividir uma sequência $x[n]$ em duas sequências, uma com os coeficientes de índice par e outra com os coeficientes de índice ímpar, considerando N potência de 2. Para o caso geral, mas ainda considerando N como potência de 2, podemos continuar com a decomposição da DFT de $N/2$ amostras em duas de $N/4$ amostras e continuarmos até que só restem DFTs de 2 amostras. A partir da Equação 5, dividindo a entrada $x[n]$ em duas partes, substituindo n por $2r$ para os valores pares e n por $2r+1$ para os valores ímpares temos:

$$y[k] = \sum_{r=0}^{N/2-1} x[2r] W_N^{2rk} + \sum_{r=0}^{N/2-1} x[2r+1] W_N^{(2r+1)k} \quad (7)$$

$$y[k] = \sum_{r=0}^{N/2-1} x[2r] (W_N^2)^{rk} + (W_N^k) \sum_{r=0}^{N/2-1} x[2r+1] (W_N^2)^{rk} \quad (8)$$

Mas $W_N^2 = W_{N/2}$ já que: $W_N^2 = e^{2(-\frac{2i\pi}{N})} = e^{-2i(\pi/(\frac{N}{2}))} = W_{N/2}$. Logo a equação pode ser reescrita como:

$$y[k] = \sum_{r=0}^{N/2-1} x[2r] W_{N/2}^{rk} + W_N^k \sum_{r=0}^{N/2-1} x[2r+1] W_{N/2}^{rk} \quad (9)$$

$$y[k] = G[k] + W_N^k H[k] \quad (10)$$

A FFT pode ser implementada naturalmente de forma recursiva, dado que cada uma das parcelas da soma da Equação 10 é um subcaso dessa soma, e portanto pode ser dividida recursivamente em outras duas parcelas.

Em aplicações que realizam a detecção das frequências das notas musicais para afinação de um violão por exemplo, utiliza-se normalmente a FFT ao invés da DFT, pois é necessário que uma aplicação desse tipo informe quase que instantaneamente a afinação da

corda quando tocada. O algoritmo da DFT possui uma complexidade computacional $O(n^2)$, enquanto o algoritmo da FFT possui uma complexidade $O(n \log n)$.

2.6. Frequências das notas musicais

Uma nota musical pode ser vista como uma onda que se forma enquanto a nota está soando. Uma nota musical possui alguns componentes de frequência, dentre estes o que mais se destaca é chamada de componente fundamental (componente de menor frequência). Junto com a frequência fundamental pode estar soando várias componentes harmônicas, que são múltiplos inteiros da fundamental, mas a nota é identificada pela frequência fundamental. Essa nota pode ser identificada com o uso da FFT.

De acordo com Mancera 2013, como a diferença de uma oitava de uma mesma nota representa o dobro da sua frequência e como uma escala é formada por um total de 12 notas (Dó, Dó#, Ré, Ré#, Mi, Fá, Fá#, Sol, Sol#, Lá, Lá#, Si). Então temos a razão $q^{12} = 2$ ficando $q = 2^{1/12}$. Com base nisso é possível calcular a frequência de qualquer nota musical a partir da Equação 11.

$$f_x = 2^{n/12} \cdot 440 \text{ [Hz]} \quad (11)$$

Onde n representa o número de meio tons abaixo ou acima da nota Lá₃ que possui frequência de 440 Hz, neste caso. Para valores positivos de n temos frequências mais agudas que Lá₄ e para valores negativos temos frequências de notas mais graves que Lá₃. Como exemplo de utilização da Formula 8 para calcular a frequência da nota Lá# que está meio tom acima do Lá temos: $2^{1/12} \cdot 440 = 466.16 \text{ Hz}$.

2.7. Violão

O violão é um instrumento musical harmônico onde a maioria das suas partes são construídas de madeira na qual possui seis cordas que podem ser de aço ou nylon, presas a duas extremidades. Cada corda do violão é fabricada com uma densidade específica para que cada uma possa soar em uma frequência específica de acordo com uma determinada tensão aplicada sobre elas, onde cada frequência representa uma nota musical. As cordas do violão das mais agudas para as mais graves são: mi, si, sol, ré, lá, mi. (Francisco Catelli, 2013).

Para a afinação do violão, de acordo com que o músico vai aumentando a tensão sobre a corda, ou seja, apertando a tarraxa de uma determinada corda, esta vai aumentando a frequência com a qual ela vibra e caso contrário diminuirá a frequência, até que se chegue a frequência da nota musical desejada. A relação das frequências de cada corda do violão para uma afinação padrão, sendo tocadas soltas, estão listadas na Tabela 2 junto com os nomes das notas com os índices do harmônicos e suas respectivas cifras que são letras usadas normalmente para representar as notas do violão (Mancera, 2013).

Tabela 2 – Frequências das notas do violão

Corda	Cifra	Nota	Frequência
6ª Corda (Mais grossa)	E	Mi ₂	82,41 Hz
5ª	A	Lá ₂	110 Hz
4ª	D	Ré ₃	146,85 Hz
3ª	G	Sol ₃	195,99 Hz
2ª	B	Si ₃	246,94 Hz
1ª (mais fina)	E	Mi ₄	329,63 Hz

Fonte: (MANCERA, 2013)

Como o violão é um instrumento harmônico, normalmente a sua execução se dá por meio de acordes. Acordes são formados pela combinação de duas ou mais notas tocadas simultaneamente onde uma delas é a sua tônica. Leva o nome de tônica a nota na qual dá o nome ao acorde. Nesse projeto será mostrada a formação de acordes maiores, menores e maiores com sétima que serão explicados na seção seguinte.

2.7.1. Formação de acordes no violão

Segundo Bucher (2001), para a formação de acordes, partindo da tônica, é usada como base a escala maior: tom, tom, semitom, tom, tom, tom, semitom para acordes maiores. Para acordes menores é usado a escala menor: tom, semitom, tom, tom, semitom, tom, tom. Onde é usado o primeiro, terceiro e quinto grau da escala de acordo com o tipo de acorde. Para acordes maiores com sétima segue a mesma forma dos acordes maiores apenas adicionando o sétimo grau. Grau é a distância entre uma nota de sua tônica dentro da escala.

Para a formação do acorde de dó maior segue o exemplo da escala de dó maior partindo da tônica, dessa forma temos: dó, ré, mi, fá, sol, lá, si e dó, como é mostrado na Tabela 3.

Tabela 3 – Escala maior

	Tom		Tom		Semitom		Tom		Tom		Tom		Semitom	
Dó		Ré		Mi		Fá		Sol		Lá		Si		Dó

Fonte: Autoria própria

Com base nessa escala, o acorde de dó maior é formado pelas notas dó, mi e sol. Para a formação do acorde de dó menor temos a escala de dó menor: dó, ré, ré#, fá, sol, sol#, lá# e dó, como é mostrado na Tabela 4.

Tabela 4 – Escala menor

	Tom		Semitom		Tom		Tom		Semitom		Tom		Tom	
Dó		Ré		Ré#		Fá		Sol		Sol#		Lá#		Dó

Fonte: Autoria própria

Com base nessa escala, o acorde de dó menor é formado pelas notas dó, ré# e sol. Como vimos na formação do acorde maior com sétima, basta adicionar o sétimo gral ao acorde maior, portanto o acorde de dó maior com sétima fica sendo: dó, mi, sol e si.

No braço do violão é possível perceber que normalmente na formação dos acordes são usadas mais de 3 notas, pois algumas delas são repetições das notas que formam o acorde. Essas notas tocadas repetidas servem apenas para preencher o som do acorde.

2.8. Tecnologias usadas para o desenvolvimento

A proposta apresentada neste trabalho é o desenvolvimento de uma ferramenta para dispositivos móveis que deve auxiliar no aprendizado do violão. Foi escolhida a plataforma Android para o desenvolvimento da aplicação que funcionará em dispositivos móveis com o auxílio da API *Java Sound* e a biblioteca *JTransforms*. Também foi utilizado o software MATLAB para ajudar na análise do espectro de frequência das notas e construir o gerador de acordes. O texto que segue faz uma breve descrição e justificativa de cada tecnologia utilizada para desenvolvimento deste projeto.

2.8.1. Android

Segundo Demarco (2012), nos últimos anos no Brasil, tem crescido a procura por dispositivos móveis. A cada ano o acesso a estes dispositivos tem aumentado sendo que uma grande parcela da população já dispõe de smartphones. Devido a esse grande crescimento, o Android foi desenvolvido pela Google para acompanhar esse mercado. Como uma plataforma open-source, o Android é o sistema operacional para smartphones mais usado no mundo. Além da Google existem outras diversas empresas que trabalham com telefonia móvel e que também apoiam essa tecnologia, esse grupo foi chamado de OHA (*Open Handset Alliance*) (GRANDI, 2012).

Com a popularização dos smartphones, cada vez mais os computadores de mesa ou notebooks vem sendo substituídos por essa nova tecnologia. Isso se dá pelo fato dos smartphones terem alcançado um poder de processamento cada vez maior, assim permitindo realizar várias tarefas que antes só seriam possíveis com um computador e também por serem mais portáteis, não necessitando de acessórios como bolsas e mochilas para serem carregados.

De acordo com Ricardo Lecheta (2013) a plataforma Android por sua vez dispõe de um conjunto de APIs para a criação de aplicações multimídia e ambientes que ajudam no desenvolvimento. O sistema de distribuição de aplicações para Android, o Google Play, viabiliza a distribuição de aplicativos. O usuário que dispor de qualquer smartphone com essa plataforma pode baixar uma aplicação no momento que quiser e de forma gratuita. Por ser instalado em um dispositivo móvel, poderá carregá-lo para qualquer lugar.

2.8.1.1. Máquina Virtual Dalvik

No desenvolvimento de aplicações que são executadas no Android faz-se o uso da linguagem Java. Entretanto, para a execução das aplicações não é utilizada a máquina virtual JVM (*Java Virtual Machine*). O Android utiliza a marquinha virtual Dalvik otimizada para a execução de aplicações em dispositivos móveis.

No desenvolvimento de aplicações Android o desenvolvedor terá à disposição os mesmos recursos Java. Entretanto quando o *bytecode (class)* é submetido à compilação, ele é convertido para um formato (*.dex*), isto é, *DalvikExecutable*, que representa uma aplicação Android compilada.

Após a compilação os arquivos (*.dex*) assim como os demais recursos utilizados no desenvolvimento de uma aplicação, imagens, áudio e vídeos são compactados em um arquivo

chamado (.apk) - *Android Package File*, que representa aplicação final na qual poderá ser distribuída e instalada em qualquer aparelho com Android (LECHETA, 2013).

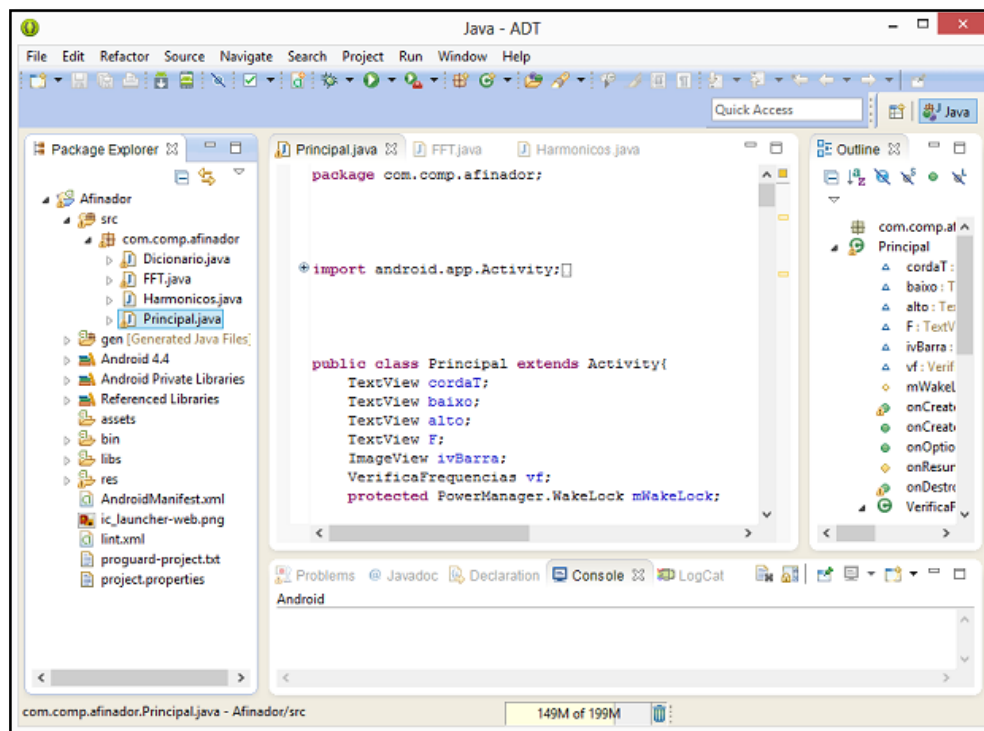
2.8.1.2. Ambiente de desenvolvimento

Com o ambiente de desenvolvimento Android SDK é possível desenvolver aplicações para a plataforma Android através do uso da linguagem Java. Esta por sua vez dispõe de ferramentas necessárias que auxiliam o desenvolvedor na criação de aplicações.

No ambiente de desenvolvimento está disponível uma ferramenta de depuração, visualizador de uso de memória e um emulador. Ainda é possível com o auxílio de plug-ins, depurar e rodar os aplicativos direto no próprio smartphone, possibilitando ao desenvolvedor maior agilidade e condições melhores de testes de aplicações, (LECHETA, 2013).

Entre as IDEs (Ambientes de Desenvolvimento de Software) para Android está o Eclipse, que possui uma versão mais estável e o Android Studio desenvolvido pela Google que ainda está em desenvolvimento dispondo apenas de versões beta. A Figura 6 mostra como exemplo a ferramenta Eclipse como ambiente de desenvolvimento.

Figura 6 – Ambiente de desenvolvimento



Fonte: Autoria própria

2.8.1.3. Arquitetura Android

A arquitetura Android é composta por cinco camadas como é mostrado na Figura 7. A base do Android é formada por uma versão modificada do kernel Linux 2.6, este provê vários serviços como de segurança, rede, gerenciamento de memória e processos além de uma camada de abstração para acesso ao hardware (LECHETA, 2013).

Figura 7 – Arquitetura Android



Fonte: (LECHETA, 2013)

2.8.2. Java Sound API

O Java disponibiliza de uma API para manipulação de áudio (*Java Sound API*). Essa API pode ser utilizada para controlar a entrada e saída de um sinal de áudio com uma taxa de amostragem de até 44.100 a/s e 16 bits por amostra. Ela fornece aos desenvolvedores uma grande quantidade de controle sobre as operações de som, fornece mecanismos de instalação, acesso e manipulação de recursos do sistema, (Oracle, 2014).

2.8.3. Biblioteca JTransforms

JTransforms é a primeira biblioteca *open source* e *multithread* que realiza o cálculo FFT, escrito todo em Java. Atualmente, quatro tipos de transformações estão disponíveis:

Discrete Fourier Transform(DFT), *Discrete Cosine Transform*(DCT), *Discrete Sine Transform* (DST) e *Discrete Hartley Transform* (DHT). O código é derivado de General Purpose FFT, pacote escrito por TakuyaOoura e do Java FFTPACK escrito por Baoshe Zhang. Segue abaixo algumas das características da biblioteca JTransforms, (GitHub, 2014).

- A implementação mais rápida da DFT, DCT, DST e DHT em Java puro;
- Transformações 1, 2 e 3 dimensões;
- Pode utilizar um tamanho arbitrário dos dados entrada;
- Utilização de *Multithreading* de forma automática;
- Suporte para grandes matrizes unidimensionais (até 2^{63} elementos);

2.8.4. Matlab

O MATLAB é uma linguagem de alto nível e um ambiente de desenvolvimento interativo para a criação de protótipos de aplicações, computação numérica, construção de gráficos, compilação de funções e programação. O MATLAB tem como elemento básico da informação um matriz que não necessita de dimensionamento. Esse sistema permite que várias aplicações complexas e vários cálculos sejam resolvidos em uma pequena fração do tempo que seria necessários com uma linguagem de alto nível como C++, Java e etc.

Para o processamento de sinais digitais o MATLAB possui uma gama de métodos que ajudam a criar aplicações nesse contexto, como por exemplo a transformada rápida de Fourier. Esta pode calcular de maneira fácil o espectro de frequência de uma sinal digital apenas passando o vetor do sinal no domínio do tempo e o seu tamanho, (MATHWORKS, 2014).

3. METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO

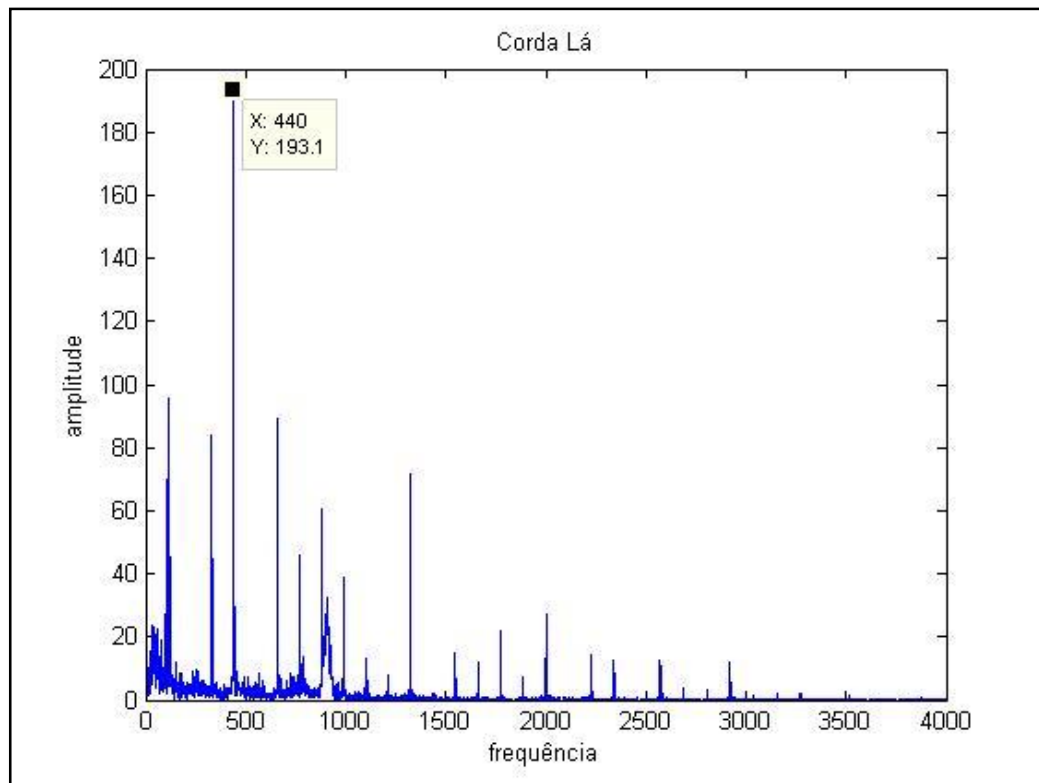
Este projeto é dividido em três partes: afinador de violão, dicionário de acordes com um *player* e um gerador de seus sons. As duas primeiras partes do projeto foram desenvolvidas para a plataforma Android utilizando como ambiente de desenvolvimento a IDE Eclipse com SDK Android. O gerador dos acordes foi desenvolvido no software MATLAB, onde os sons dos acordes gerados são exportados para reprodução no *player* presente na aplicação Android.

Para o desenvolvimento deste projeto se mostrou necessário a contextualização dos seguintes temas: conceitos sobre teoria musical utilizadas na execução do violão, forma de construção das cordas do violão e entender como funciona o processo de afinação. Entender alguns conceitos sobre conversão de um sinal contínuo em sinal discreto e processamento de sinais. Entender como é feita a aplicação da transformada de Fourier para levar um sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência e interpretação dos resultados.

Inicialmente com o auxílio do software MATLAB foram gerados vários gráficos dos sons capturados através da execução de cada corda do violão. A captura foi feita com as cordas já afinadas na sua afinação padrão e tocadas separadamente para análise do comportamento em termos de frequência. Com o auxílio da implementação da FFT disponível no MATLAB, foi constatado a presença de vários harmônicos além da frequência fundamental do som de cada corda tocada.

A partir da observação dos gráficos, foi identificado que as frequências fundamentais de cada corda do violão, na maioria das vezes, possuem amplitudes maiores que as demais componentes do sinal. Entretanto, em alguns casos, certos harmônicos chegam a soar com amplitudes maiores que a fundamental no instante do *attack* da nota (fase inicial do som). A partir de então a frequência harmônica decai rapidamente onde a fundamental passa a possuir maior amplitude neste momento. A Figura 8 mostra como exemplo o gráfico da corda Lá capturada a uma taxa de amostragem de 8000 amostras/segundo (a/s). A corda Lá possui frequência fundamental de 110 Hz, mas que no instante capturado a frequência com maior amplitude é de 440 Hz.

Figura 8 – Espectro de frequências da corda Lá capturada a 8000 a/s



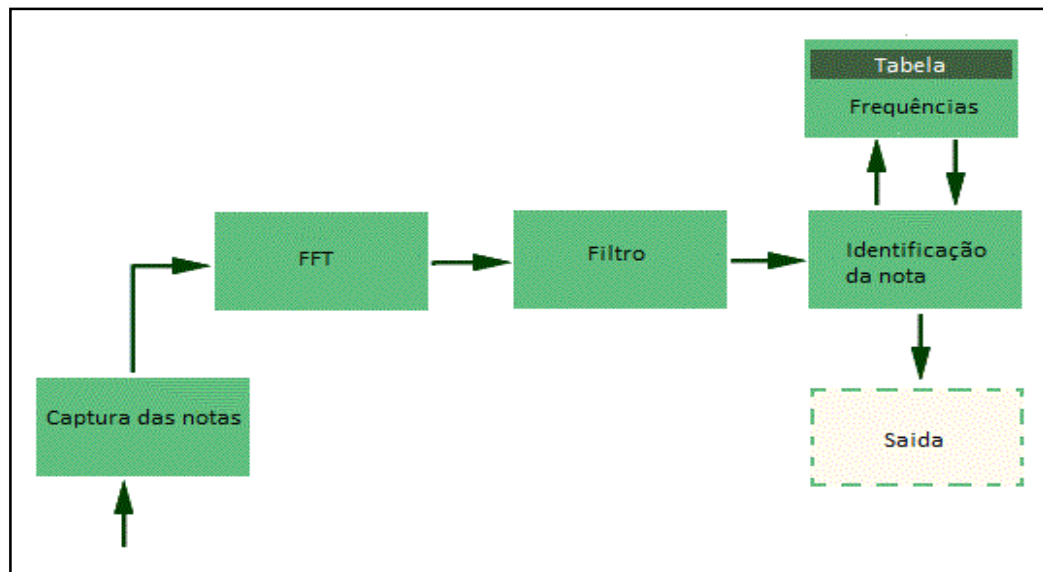
Fonte: Autoria própria

O Afinador foi desenvolvido com base na teoria já existente e a partir das análises feitas com as cordas do violão. O texto que segue é uma descrição detalhada do desenvolvimento de cada componente da aplicação.

3.1. Desenvolvimento do afinador

A implementação do módulo afinador possui duas *threads*. A *thread* principal que roda a interface para exibição dos resultados dando instruções de como chegar a frequência desejada e a *thread* que realiza o processo de captura, aplicação da FFT, filtro e interpretação dos sons das cordas do violão como indicado no diagrama de blocos da Figura 9.

Figura 9 – Diagrama de blocos do afinador



Fonte: Autoria própria

3.1.1. Captura do sinal de áudio das cordas do violão

Na captura do sinal de áudio foi utilizado a Java Sound API onde foi criado um formato de captura desse sinal com os seguinte parâmetros:

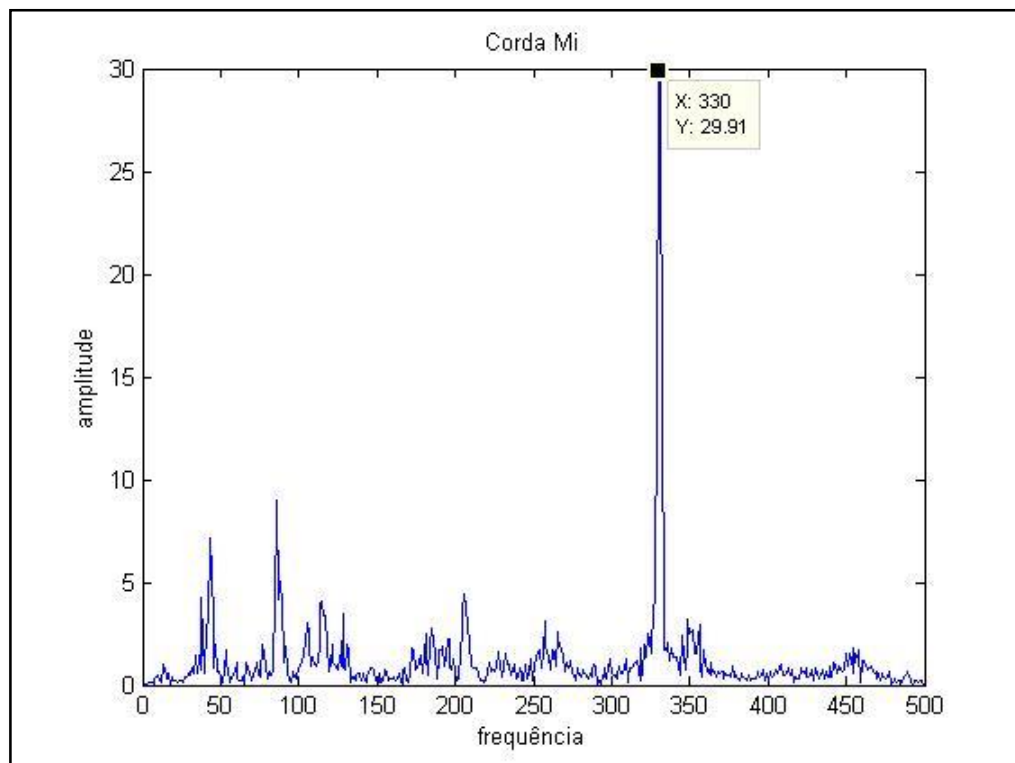
- Taxa de amostragem igual a 8000 a/s;
- 16 bits por amostra;
- Número de canais: 1 (mono);
- Vetor para guardar as amostras de 8000 posições que equivale a 1 segundo do sinal de áudio.

A taxa de amostragem de 8000 a/s foi definida por limitação da biblioteca, sendo esta taxa mínima aceita para a captura do sinal. Por questão de desempenho e para que o sinal não fosse amostrado muito além do necessário para reconhecer as componentes de frequência fundamentais referentes as cordas do violão, não foram utilizadas todas as amostras capturadas. Do vetor de 8000 amostras foi utilizado apenas 1000 amostras sendo estas extraídas num intervalo de 8 em 8 posições, o que caracteriza uma taxa de amostragem de 1000 a/s.

A alteração na captura das amostras foi possível porque como mostrado neste trabalho, a maior frequência fundamental encontrada numa corda do violão, esta tocada solta, é de 330

Hz que corresponde a frequência fundamental da corda Mi mais aguda. Uma taxa de amostragem de 1000 a/s, de acordo com Nyquist, pode ser utilizada para amostrar um sinal com a maior frequência de até 500 Hz, o que é mais que suficiente para reconhecer as cordas do violão. A Figura 10 mostra como exemplo o gráfico do espectro de frequência da corda Mi com essa taxa de amostragem.

Figura 10 – Espectro de frequências da corda Mi capturada a 1000 a/s



Fonte: Autoria própria

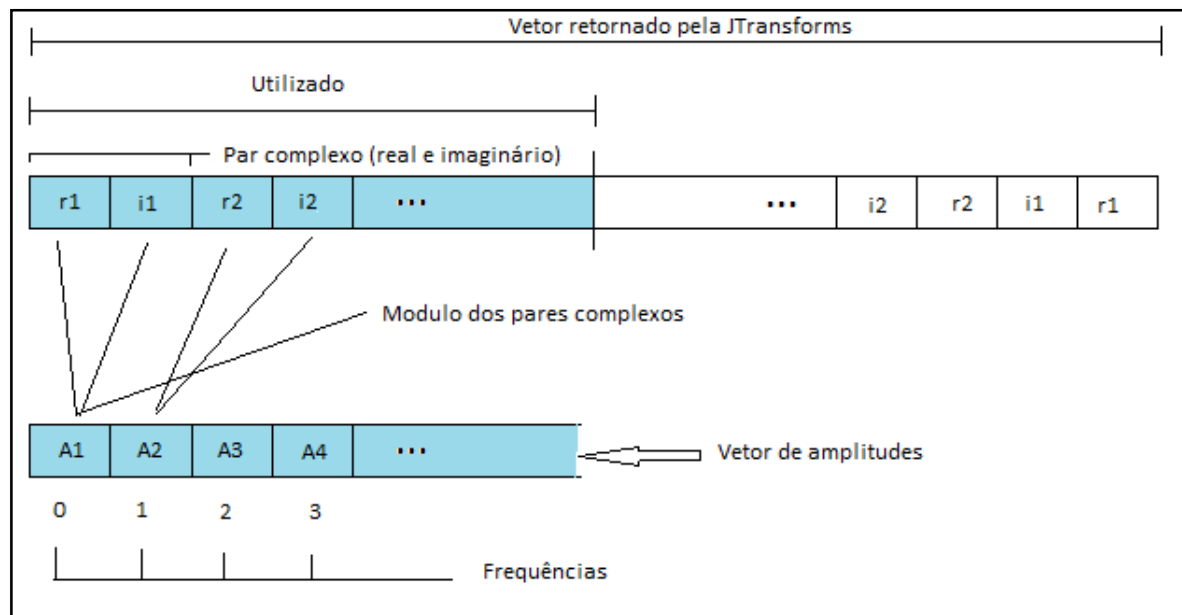
3.1.2. Processamento do sinal

Após o sinal de áudio ser armazenado é feita aplicação da FFT para obtenção do sinal no domínio da frequência onde é retornado um vetor com o dobro das posições do vetor de entrada. Os valores retornados são complexos, sendo que as posições pares e ímpares representam respectivamente as partes reais e imaginárias da contribuição de cada componente de frequência no sinal. Para encontrar a amplitude de cada componente de frequência basta, calcular o módulo de cada par complexo como mostrado nesse trabalho.

A função para o cálculo da FFT encontrada na biblioteca JTransforms retorna como resultado um vetor espelhado, sendo assim necessário apenas metade do vetor para encontrar

a frequência com maior contribuição no sinal. O compartimento N/2 do vetor de amplitudes calculado a partir do vetor retornado, representa o espectro de frequência na taxa de Nyquist. Cada índice do vetor de amplitudes representa a própria frequência sendo que o valor contido em cada célula do vetor representa a amplitude daquela componente. A Figura 11 representa um esboço do que foi explicado para uma melhor compreensão.

Figura 11 – Interpretação do resultado da FFT



Fonte: Autoria própria

Quando a FFT é aplicada em vetores com um número de amostras superiores ao capturado em um segundo de acordo com taxa de amostragem utilizada, faz-se o uso da Equação 12 para o cálculo da frequência.

$$f = i * \frac{N}{T_s} \quad (12)$$

- f : Frequência;
- i : Índice do vetor;
- N : Número de amostras do vetor;
- T_s : Taxa de amostragem.

Na saída da FFT foi adicionado um filtro para cortar frequências com amplitudes abaixo de um limiar escolhido de forma dinâmica com base na frequência identificada. Para valores de frequências mais baixas foi escolhido um limiar mais alto e para valores de frequência mais altas foi escolhido um limiar mais baixo. Os valores foram escolhidos a partir de vários testes em ambientes com baixa ou média presença de ruídos e considerando que as frequências mais baixas possuem naturalmente maiores amplitudes e frequências mais altas menores amplitudes.

Com a adição do filtro em amplitudes faz com que seja rejeitada boa parte do ruído de fundo, pois em grande parte do tempo só deve ser apresentado na tela do afinador, frequências do sons das cordas do violão que estão mais próximas do microfone, logo possuem maiores amplitudes. Os ruídos do ambiente por estarem mais distantes do microfone serão capturadas pelo microfone na maioria das vezes com amplitudes menores que os sons das cordas do violão e então serão descartadas.

3.1.3. Reconhecimento das notas

Para este trabalho os valores de frequência são reconhecidos a partir de uma tabela cadastrada com os valores das frequências fundamentais de cada corda e alguns harmônicos. Como foi visto, em alguns casos em curtos instantes de tempo algumas frequências fundamentais soam com amplitudes maiores que a fundamental causando instabilidade no reconhecimento da nota.

Quando algum harmônico de uma corda soa com maior amplitude, esta corda é considerada pelo software como afinada. Ela terá maior amplitude somente no instante do *attack* e depois irá decair rapidamente onde a frequência fundamental possuirá neste momento maior amplitude. Os harmônicos adicionados são múltiplos de 2 que representam a mesma nota que a frequência fundamental, porém, mais aguda.

Foram adicionadas frequências das notas Dó e Fá completando a escala natural das notas musicais, sendo que as cordas do violão já representam as demais notas. A adição das frequência dessas duas notas devem ajudar ao usuário na identificação do quão distante está da nota desejada baseado na escala natural. A Tabela 5 mostra a relação das frequências fundamentais e harmônicos utilizados. Para melhorar a estabilidade no reconhecimento das notas, os valores utilizados na tabela foram arredondados para o inteiro mais próximo.

Tabela 5 – Frequências usadas no reconhecimento das notas

Nota	Frequências		
Dó	132 Hz	264 Hz	-
Ré	147 Hz	294 Hz	-
Mi	82 Hz	164 Hz	330 Hz
Fá	176 Hz	352 Hz	-
Sol	196 Hz	392 Hz	-
Lá	110 Hz	220 Hz	440 Hz
Si	247 Hz	494 Hz	-

Fonte: Autoria própria

Quando uma corda é tocada, a frequência calculada nesse instante de tempo é comparada com a tabela de frequências. É então verificado qual a frequência que mais se aproxima naquele momento. Após isso a interface gráfica mostra na tela o símbolo da corda que possui a frequência (fundamental ou harmônico), mais próxima naquele instante. Então é dado instruções de forma gráfica de como chegar a ela apertando ou afrouxando a corda. A figura 12 mostra como exemplo níveis de desafinação de uma corda, sendo que quanto mais próximo do vermelho está a escala de cores (para mais ou para menos), mais desafinada a corda está.

Figura 12 – Escala de cores do afinador



Fonte: Autoria própria

3.2. Dicionário e player dos acordes

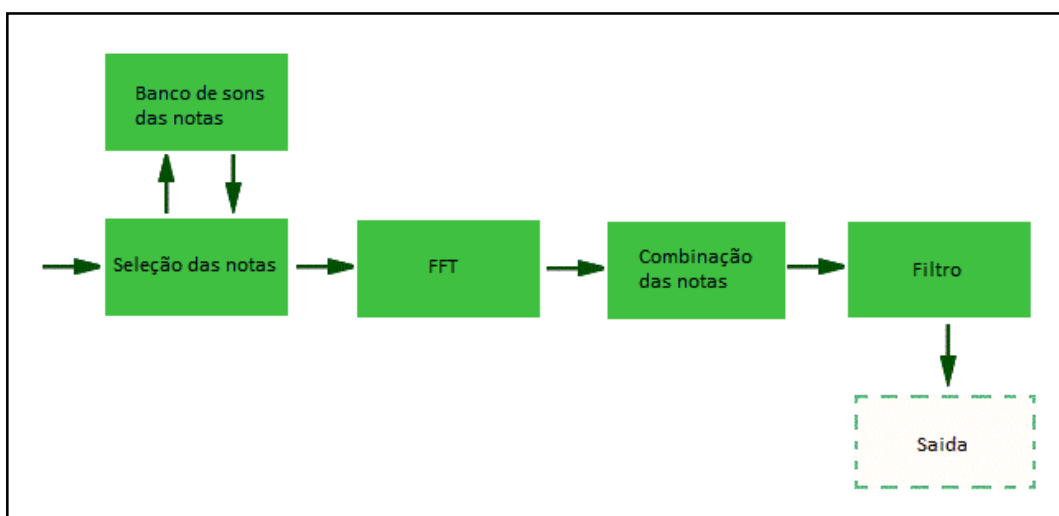
O dicionário de acordes da aplicação foi construído a partir dos desenhos de como são formados os acordes maiores, menores e maiores com sétima. Estes possuem um menor grau de dificuldade para serem montados no braço do violão e podem ser usados por um iniciante. As imagens dos acordes foram construídas com base na teoria de formação dos acordes. O acesso aos acordes é feito através de um menu lateral com a lista de todos os acordes. Quando um acorde é selecionado no menu, a imagem deste é posta na tela e então seu som é selecionado no player para que possa ser escutado através do botão ouvir.

3.3. Gerador de acordes

Os acordes foram gerados no MATLAB, pois como ainda só são gerados 21 acordes, seria feito um processamento desnecessário na aplicação. Então este processamento é feito antes no MATLAB e só depois é exportado o áudio para ser reproduzido pelo player da aplicação.

Para geração dos acordes foram gravadas notas do violão e então realizados os passos de acordo com o indicado no diagrama de blocos da Figura 13. A utilidade de gravar as notas separadas e não o acorde diretamente, é que para uma futura ampliação do dicionário podem ser gravadas todas as notas do braço do violão, que possui um conjunto muito menor que as possibilidades de acordes que podem ser formados.

Figura 13 – Diagrama de blocos do gerador de acordes



3.3.1. Gravação das notas do violão

Para o desenvolvimento do gerador de acordes foi utilizado um microfone condensador AKG C3000 na gravação das notas utilizadas na formação dos acordes. Microfones condensadores são mais sensíveis à pressão sonora e capturam o som de instrumentos com mais fidelidade. Os sons das notas foram capturadas partindo da nota da corda solta e então apertando até a quinta casa do braço do violão. Os seguintes parâmetros foram utilizados na gravação das notas do violão:

- Taxa de amostragem: 44100;
- 16 bits por amostra;
- Número de canais: 1 (mono);
- Vetor para guardas as amostras de 88200 posições que equivale a 2 segundos do sinal de áudio.

A taxa de amostragem utilizada foi escolhida baseada no ouvido humano que é capaz de escutar na faixa de 20 Hz à 20 KHz. Essa taxa é normalmente utilizada na gravação de músicas atualmente.

3.3.2. Construção dos acordes

Inicialmente é aplicada a FFT nas notas que serão utilizadas para gerar um determinado acorde. Com os sons das notas no domínio da frequência, estas são combinadas somando-as ponto a ponto. Naturalmente as baixas frequências possuem maiores amplitudes e ao somar os sinais de áudio nessa faixa de frequência, tende à distorcer devido ao volume exagerado. Esse efeito é chamado de *clip*.

Foi atribuído um limiar na qual este é aplicado ponto a ponto reduzindo os valores proporcionalmente na faixa de frequência mais baixa para reduzir a contribuição dessas frequências no áudio e então eliminar o efeito de *clip*. Após a combinação e redução da amplitude de algumas frequências graves é aplicado a transformada inversa no sinal tendo como resultado o sinal no domínio do tempo que representa o som do acorde.

4. RESULTADOS

Este capítulo descreve os resultados obtidos após a implementação de acordo com a metodologia apresentada no capítulo anterior. Foi utilizado para testes da aplicação os smartphones LG L7 II e o Samsung Galaxy Win Duos rodando o sistema Android 4.1.2. Foram utilizados dois violões para testes de afinação, um com cordas de aço e um com cordas de nylon. Para a gravação das notas utilizadas na geração dos acordes, um violão com cordas de aço.

Os resultados dos testes de afinação obtidos com o violões de aço e nylon foram os mesmos. Então só serão apresentados aqui os resultados obtidos com violão de nylon para não tornar repetitiva a apresentação e discussão dos resultados.

4.1. Testes de afinação

Os testes de afinação foram realizados em ambientes com pouco ruído e para ambientes com ruído mediano, onde os resultados se mostraram positivos para ambos os ambientes. Para afinação é necessário que o usuário tenha conhecimento apenas dos nomes das cordas do violão e da escala natural das notas musicais, dó, ré, mi, fá, sol, lá, si. As Figuras 14 e 15 mostram respectivamente exemplos do reconhecimento da proximidade de afinação da corda Ré pouco desafinada abaixo e acima da frequência fundamental.

Figura 14 – Corda Ré pouco desafinada abaixo da frequência fundamental



Fonte: Autoria própria

Figura 15 – Corda Ré pouco desafinada acima da frequência fundamental



Fonte: Autoria própria

Como mostrado nas imagens, a aplicação consegue identificar a corda tocada e reconhecer uma pequena desafinação. Mostra graficamente o quanto a corda está desafinada para mais ou para menos e qual a frequência atual em Hz. Quando a corda está afinada, o símbolo que corresponde a corda fica verde indicando ao usuário que ele chegou na afinação desejada. A Figura 16 mostra como resultado a corda Mi mais aguda afinada.

Figura 16 – Corda Mi afinada



Fonte: Autoria própria

Quando a corda tocada encontra-se muito desafinada, o software irá entender como outra corda. Cabe ao usuário saber o nome da corda tocada e tentar chegar a ela baseado na escala natural, mesmo que seja mostrado como afinado em outra nota. Para exemplificar foi capturado o som da corda Si desafinada 3 tons abaixo. O software identifica a nota Fá como mostrado na Figura 17, então o usuário deverá apertar a corda até chegar ao Si.

Figura 17 – Corda Si desafinada 3 tons abaixo



Fonte: Autoria própria

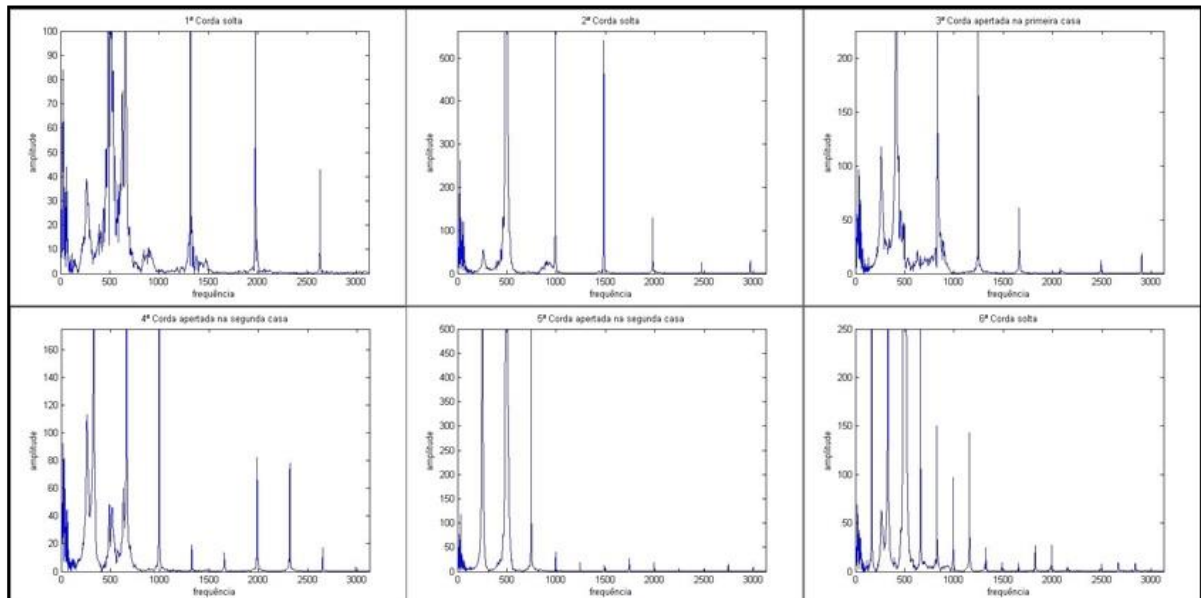
O afinador se mostrou bastante estável, apesar de utilizar o microfone do dispositivo móvel como forma de capturar a vibração das cordas, pois essa forma de captura normalmente sofre muita interferências de ruídos provenientes do ambiente. Todas as cordas são afinadas nas suas respectivas frequências fundamentais encontradas na teoria, exceto a corda Mi mais grave que é reconhecida em um harmônico acima da frequência teórica. Com a inserção de frequências harmônicas na tabela utilizada para reconhecimento das cordas, diminuiu a instabilidade no momento do *attack* da nota.

4.2. Dicionário e gerador de acordes

Os acordes gerados no MATLAB se mostraram bastante parecidos com os acordes formados no braço do violão. Como exemplo a Figura 18 mostra os gráficos do espectro de frequência das notas que formam o acorde de Mi maior no braço do violão e na Figura 19 o

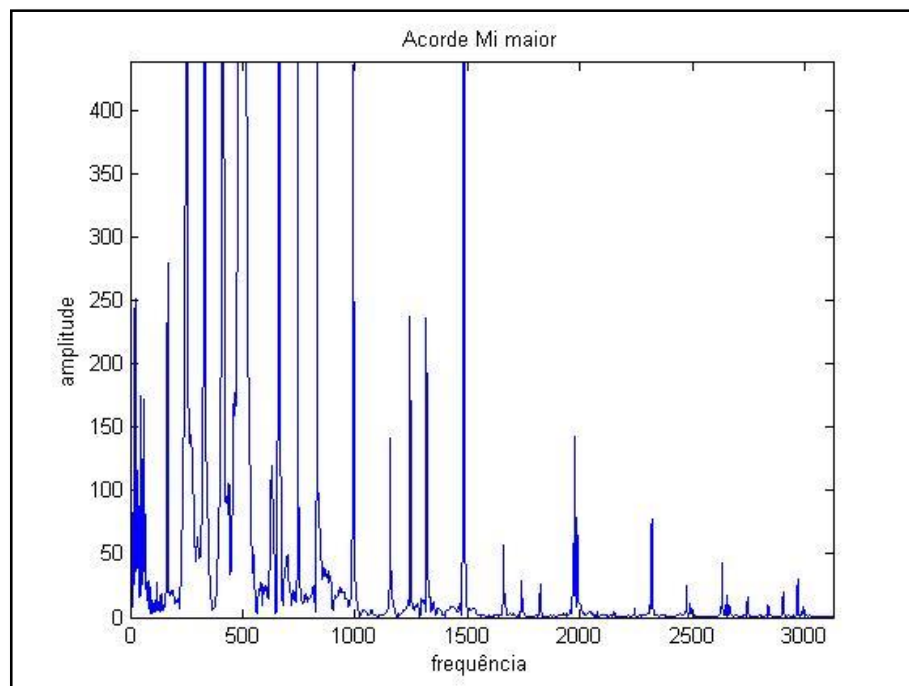
gráfico gerado a partir da combinação das notas já com a adição do limiar nas baixas frequências para reduzir o efeito de *clip*. As Figuras estão com um zoom somente na região mais importante do espectro de frequência de cada nota do acorde.

Figura 18 – Gráficos das notas que formam o acorde de Mi maior no braço do violão



Fonte: Autoria própria

Figura 19 – Gráfico do acorde de Mi maior a partir da combinação das notas



Fonte: Autoria própria

Os sons dos acordes podem ser facilmente escutados através do botão ouvir encontrado no dicionário de acordes. O dicionário possui menus de fácil acesso aos acordes na qual é mostrado sua formação graficamente. Ao selecionar um acorde no menu, o player presente na aplicação também seleciona o som referente a ele. A Figura 20 mostra como exemplo a formação do acorde de Dó maior. Os círculos azuis no braço do violão indicam quais casas devem ser apertadas para formar esse acorde e as setas verdes indicam as cordas que não são apertadas mas que também devem ser tocadas.

Figura 20 – Dicionário de acordes



Fonte: Autoria própria

Após uma quantidade considerável de testes a aplicação não mostrou nenhum erro aparente, sendo considerados seus resultados satisfatórios e de acordo com o esperado.

5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

A pesquisa na área de processamento de sinais, se torna inicialmente uma atividade complicada com uma difícil compreensão dos muitos conceitos presentes nesse contexto. Essa área encontra-se muito distante do cotidiano das pessoas como, por exemplo, a análise do espectro de um sinal. Entretanto, existe atualmente algumas ferramentas que podem abstrair parte da complexidade no desenvolvimento de aplicações relacionadas.

Através do crescente número de pesquisas em tecnologias que realizam tratamento de sinais, muitas aplicações de apoio ao ensino da música puderam ser desenvolvidas e melhoradas. As ferramentas desenvolvidas com este fim, são cada vez mais utilizadas, tanto por pessoas que estão iniciando no aprendizado da teoria musical, quanto por pessoas que estão em um nível de conhecimento mais aprofundado. Tais ferramentas são de grande importância, pois, ajudam no desenvolvimento de habilidades, como, reconhecimento de sons e execução de instrumentos musicais.

Os resultados obtidos com o desenvolvimento deste trabalho foram bastante satisfatórios no que diz respeito ao funcionamento do algoritmo de detecção das notas do violão e auxílio na afinação, onde este obteve estabilidade e fidelidade. O gerador de acordes apresentou resultados satisfatórios uma vez que os sons gerados têm muita semelhança com os tocados no próprio violão. O dicionário de acordes possui um menu de fácil acesso aos acordes com uma interface gráfica intuitiva e amigável.

Alguns dos aspectos da ferramenta podem ser expandidos em trabalhos futuros. Um deles é o aumento do número de acordes presentes no dicionário. Outro ponto se refere ao gerador de acordes, onde este pode ser implementado e integrado junto a aplicação Android. Ainda pode ser investigada uma melhor estratégia que utilize um número reduzido de notas para geração dos acordes diminuindo o espaço ocupado na memória do dispositivo.

REFERÊNCIAS

ALVES, Alexandre Orestes. **Iniciação Ao Violão Solo Por Meio Da Música Popular**. 2009. 49 p. Monografia (Licenciatura em Música) – Universidade Federal de Uberlândia, 2009.

BARBALHO, Alírio; PINA, Fernando; AZEVEDO, Rafael. **Afinador Virtual**. Disponível em: <<http://www3.iesam-pa.edu.br/ojs/index.php/computacao/article/viewFile/208/199>>. Acesso em: 22 de Jan 2015.

BARBOSA, Álvaro M. **Edição Digital de Som**: Uma abordagem aos fundamentos da escultura sonora orientada para criadores. Disponível em: <http://www.abarbosa.org/docs/edicao_digital_som.pdf>. Acesso em: 22 de Out. 2014.

BUCHER, Hannelore. **Harmonia Funcional Prática**. 2ª ed. Vitória, Espírito Santo, 2001. 212 P.

CATELLI, Francisco. **Tensão, calibre e frequência das cordas de instrumentos**. Disponível em: < <http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/361306.pdf> >. Acesso em: 13 de Nov. 2013.

COUTO, André Luiz de Macedo. **Física do violão**. 2006. 27 p. TCC (Graduação em Física) - Universidade Católica de Brasília, Brasília, 2006.

GITHUB. **JTransforms**. Disponível em: <<https://github.com/wendykierp/JTransforms>>. Acesso em: 10 de Dez. 2014.

GOOGLE PLAY. **Acurate afinador cromático**. Disponível em: < https://play.google.com/store/apps/details?id=com.studiosol.afinadorlite&hl=pt_BR >. Acesso em: 18 de Dez 2014.

GRANDI, Diego D. **Experimentos de injeção de falhas de comunicação UDP em ambientes Android**. 2012. 49 p. TCC (Graduação em Ciência da Computação) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

LECHETA, Ricardo R. Google Android: **Aprenda a criar aplicações para dispositivos móveis com Android SDK**. 3. ed. São Paulo: Novatec, 2013. 576 p.

LOSCH, Robson; FORTES, Reinaldo; **Afinador eletrônico**. Disponível em: <<http://www.unipac.br/site/bb/tcc/tcc1c2f77d281853937824f108f3b1b31fb.pdf>>. Acesso em: 01 Out. 2014.

MANCERA, Tales G. **Afinador digital para violão e guitarra elétrica implementado em FPGA**. 2013. 61 p. TCC (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

MANGUEIRA, Vitor F. **Tratamento de Múltiplos Sinais Utilizando Sistema RTOS Embarcado**. 2013. 73 p. TCC, (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

MASCARENHAS, Mario; CARDOSO, Belmira. **Curso Completo de Teoria Musical e Solfejo**. 8. Ed. Irmãos Vitale, 1974. 226 p.

MATHWORKS. **MATLAB The Language of Technical Computing**. Disponível em: <<http://www.mathworks.com/products/matlab/>>. Acesso em: 01 Dez. 2014.

MATHWORLD. **Amplitude**. Disponível em: <<http://mathworld.wolfram.com/Amplitude.html>>, Acesso em: 02 Fev. 2015.

MELLO, Carlos A. **Processamento Digital de Sinais**. Centro de Informática – UFPE, 2014. 335 p.

MELO, Fábio Delicato Feijó. **Ferramenta de Apoio ao Ensino de Instrumento Musical**. 2009. 51 p. Monografia (Graduação em Engenharia da Computação) - Universidade de Pernambuco, Pernambuco, 2009.

OPPENHEIM, Alan V.; RONALD, W. Schafer; BUCK, John R. **Discrete-Time Signal Processing**. 2. ed. New Jersey: Prentice Hall, 1999. 897 p.