

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**  
**DEPARTAMENTO DE INFORMÁTICA**  
**DEPARTAMENTO DE ELETRÔNICA**  
**CURSO DE ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO**

**RODRIGO YOSHIDA TAKEDA**

**SAAM - SISTEMA DE APOIO A APRENDIZAGEM MUSICAL**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**CURITIBA**

**2020**

**RODRIGO YOSHIDA TAKEDA**

**SAAM – SISTEMA DE APOIO A APRENDIZAGEM MUSICAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Computação do Departamento de Eletrônica e do Departamento de Informática, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Miguel Antonio Sovierzoski

**CURITIBA**

**2020**

**RODRIGO YOSHIDA TAKEDA**

**SAAM – SISTEMA DE APOIO A APRENDIZAGEM MUSICAL**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação  
apresentado como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia de Computação da  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
(UTFPR).

Data de aprovação: 19 / junho / 2020

---

Miguel Antonio Sovierzski  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Priscilla Battini Prueter  
Mestrado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Silvia Amélia Bim  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

João Alberto Fabro  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**CURITIBA**

**2022**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Miguel Antonio Sovierzoski, pela sabedoria com que me guiou desde do início dessa trajetória dando bons conselhos e sendo muito receptivo e compreensivo em relação aos problemas.

Aos meus colegas de sala. Michael Brochonski, Felipe Lambach, Nelson, Diego Lee, Bruno Oenning, Diogo Freitas, por acompanhar o curso nessa trajetória tão longa.

A minha esposa Nathalia Tainá, pelas palavras de incentivo, cooperação e compreensão em período de trabalho de conclusão de curso.

Agradeço ao meu filho Theo, que, antes de nascer, já me ajudou a escrever e terminar esse projeto.

Agradeço o meu irmão, que sempre me deixou em contato com a música e foi um dos responsáveis para criar um aplicativo com envolvimento musical.

Gostaria de deixar registrado também, o meu reconhecimento à minha família, pois acredito que sem o apoio deles seria muito difícil vencer esse desafio. Gratidão por acreditar, paciência e compreensão.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização deste trabalho.



A música exprime a mais alta filosofia  
numa linguagem que a razão não  
compreende. (Schopenhauer, Arthur)

## RESUMO

TAKEDA, RODRIGO Y., SAAM - Sistema de Apoio a Aprendizagem Musical. 2020. 68 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia de Computação - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2020.

Um dos maiores problemas no aprendizado de música é a falta de *feedback* e acompanhamento do estudante durante o estudo em casa. Outro problema é a afinação do instrumento, que deve ser realizada constantemente e o estudante de música pode ter dificuldades no processo. O sistema de apoio à aprendizagem musical (SAAM) é um projeto para mitigar os problemas de autoavaliação durante o aprendizado da música e de afinação de instrumentos. O objetivo do projeto foi desenvolver um aplicativo para *smartphone* para afinação, e apoio ao aprendizado musical da afinação e do ritmo. Ele foi desenvolvido para o sistema operacional Android utilizando as bibliotecas Superpowered e Tarsos DSP. A Superpowered é uma biblioteca de desenvolvimento gratuita para aplicativos envolvendo processamento de áudio de bom desempenho. A Tarsos DSP é uma biblioteca de processamento de digital de sinais com várias ferramentas, incluindo uma classe com o algoritmo de detecção de frequência fundamental. O SAAM consiste em três módulos principais: reconhecimento da frequência fundamental para a afinação, a alteração do ritmo da música e a extração de informações. O processo de afinação é importante para o desenvolvimento de um músico. O *feedback* de afinação é feita pelo SAAM a partir da leitura de uma entrada de áudio avaliada em tempo real sendo indicada graficamente a frequência da nota em relação à escala musical. O algoritmo de detecção Yin permite mapear as frequências do segmento de áudio e determinar a frequência da nota musical. A alteração do ritmo, diminuição ou aumento, ajuda o estudante a compreender e memorizar a música, principalmente para músicas complexas ou para estudantes iniciantes que tem dificuldades em ouvir e perceber cada detalhe da música. A simples alteração da ritmo de reprodução da música altera a frequência das notas musicais. Para manter as características do áudio, ele foi particionado em pequenos segmentos, que são repetidos ou extraídos, aumentando ou diminuindo a duração das notas musicais sem alterar a frequência destas. O aplicativo foi desenvolvido para dispositivos Android com uma entrada de áudio padrão, permitindo afinar, e auxiliar no aprendizado musical, incentivando os estudantes a continuar aprimorando seus estudos na música.

**Palavras-chave:** Alteração de Ritmo Musical, Auxílio a Aprendizagem Musical, Afinação de Instrumento Musical, Processamento Digital de Áudio.

## ABSTRACT

TAKEDA, RODRIGO Y, SAAM - Musical Learning Support System 2020. 68 f.  
Computer Engineering - Federal University of Technology - Paraná. Curitiba, 2020.

One of the biggest problems in musical learning is the lack of feedback when the student is practicing at home. Another problem is the instrument tuning. The instrument should always be tuned for a good practice. The Musical Learning Support System will try to mitigate the problem. It was developed a smartphone application for Android operating systems, which recognizes pitch, change the music rhythm and extract music information. This app uses the Superpowered and TarsosDSP. Superpowered is a free high-performance development platform for audio processing. Tarsos DSP is a digital signal processing library that includes a pitch detecting algorithm. The program is separated into three modules: pitch recognition, music rhythm changer and musical information extraction. The pitch is one of the most important skills of a musician. By listening to an audio input, it is possible to determine the fundamental frequency of the sound. The software recognizes the fundamental frequency by using the Yin algorithm which shows the audio frequency mapping. The music rhythm changer helps students to comprehend the music. It is a very important feature since there is a lot of complex and high-speed music. Normally, change the music length can result in distortions in the frequency of the signal. To change the music rhythm without changing the pitch is necessary to cut small fragments and repeat then inside the music. This procedure assures that the frequency of the music will not change. To implement these features, the app uses the Superpowered and Tarsos DSP. Both are free to use. The app is available to Android system using the default audio input and can be used to tune instruments and help in the musical education.

Keywords: Music Rhythm Changer, Musical Learning Support System, Pitch Recognition, Digital Audio Processing.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Diagrama de casos de uso para o Sistema de Apoio ao Aprendizado Musical.....	16
Figura 2 – Visão sistêmica dos recursos utilizados para o desenvolvimento do Sistema de Apoio Ao Aprendizado Musical (SAAM).....	17
Figura 3 – Cenário 1 – Usuário afinando o instrumento .....	18
Figura 4 – Cenário 2 – Diminuição de ritmo de uma música .....	19
Figura 5 – Cenário 3 – Aumento de ritmo de uma música.....	20
Figura 6 – Cenário 4 – Extração de informações da música .....	20
Figura 7 – Diferença entre ruído e som musical .....	28
Figura 8 – Escala maior ou natural.....	30
Figura 9 – Escala menor natural .....	30
Figura 10 – Onda senoidal composta de duas frequências senoidais de 4 e 7 Hz ...	34
Figura 11 – Análise FFT do sinal da figura 10 .....	34
Figura 12 – Fluxograma do algoritmo para reconhecimento de tom.....	39
Figura 13 – Representação da amplitude da nota musical em relação ao tempo.....	40
Figura 14 – Resultados obtidos utilizando o algoritmo de identificação de tom .....	40
Figura 15 – Gráfico da amplitude do Acorde de Sol Maior .....	41
Figura 16 – Gráfico do Acorde Sol Maior com as notas reconhecidas utilizando o algoritmo Yin .....	42
Figura 17 – Grau de confiança do áudio analisado .....	42
Figura 18 – Análise inicial das notas .....	43
Figura 19 – Tela inicial do SAAM com as suas funcionalidades .....	44
Figura 20 – Diagrama dos recursos compartilhados entre as atividades.....	45
Figura 21 – Tela do SAAM do módulo afinador.....	47
Figura 22 – Diagrama de conversão MIDI para nota musical .....	48
Figura 23 – Diagrama do <i>feedback</i> do módulo afinador para o usuário do SAAM....	49
Figura 24 – Fluxograma da alteração de ritmo de reprodução de música no SAAM	50
Figura 25 – Tela do SAAM com o modal contendo a mudança de ritmo em porcentagem .....	51
Figura 26 – Processo feito pela Superpowered em JNI para o novo arquivo com o ritmo alterado do SAAM .....	51
Figura 27 – Tela do SAAM gerando um arquivo de áudio com o ritmo alterado .....	52
Figura 28 – Fluxograma de acesso a informação.....	53
Figura 29 – Processo da Superpowered para extração de informações .....	54
Figura 30 – Tela do SAAM com informações da música após análise .....	54
Figura 31 – Tela do SAAM com a leitura de uma entrada de microfone com o sinal do diapasão.....	57
Figura 32 – Tela do SAAM em um exemplo de afinação de um violão.....	58
Figura 33 – Tela do SAAM com o comportamento durante o Acorde de Lá Maior ...	59

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parte das escalas musicais utilizando a Equação 1 .....	26
Tabela 2 – Exemplo de harmônicos .....	29
Tabela 3 – Frequências e notas de um violão afinado .....	38
Tabela 4 – Levantamento de dados do módulo de extração de informações .....	60
Tabela 5 – Duração dos áudios após a mudança de ritmo.....	60

## GLOSSÁRIO

- AUBIO:** Biblioteca de áudio para Python. Contém alguns dos algoritmos utilizados.
- BPM:** Batidas por minuto. É a quantidade de batidas por minutos dentro de uma música. É uma forma de medição do andamento da música.
- C++:** É uma linguagem de programação de alto desempenho utilizada por grande parte dos dispositivos.
- Escala temperada:** É um padrão que define frequências fixas para cada uma das notas. Isso significa que, para facilitar, um **Dó#** é a mesma frequência de um **Réb**.
- FFT:** *Fast Fourier Transform* é o algoritmo otimizado em número de operações aritméticas que implementa a DFT (*Discrete Fourier Transform*), também conhecida como série de Fourier de tempo discreto. Uma janela de amostras de sinal é decomposta em suas componentes senoidais.
- Gauge:** Tipo de gráfico semicircular com escala, que exibe uma informação com um indicador central.
- Harmonia:** Na música, é quando o conjunto das notas dos instrumentos possui uma percepção agradável ao ouvido humano.
- JCPlayer:** Biblioteca que inclui um reprodutor de músicas.
- JNI:** Abreviação de *Java Native Interface* que é um padrão de programação que permite utilizar linguagens como C, C++ e *assembly* em ambiente Java.
- MATLAB:** Software da empresa Mathworks Inc que tem várias ferramentas matemáticas. Muito utilizado para prototipação e ensino.
- MATPLOTLIB:** Biblioteca Python para fazer gráficos de maneira fácil e intuitiva
- Memória muscular:** É uma forma de condicionar o sistema motor para que o usuário tenha determinadas ações inconscientes para tocar o instrumento musical.

<b>Metrônomo:</b>	Instrumento que faz os batimentos sonoros para auxiliar a noção do tempo na música.
<b>NDK</b>	Abreviação de <i>Native Development Kit</i> que é a plataforma utilizada pela Android SDK para compilar códigos nativos.
<b>MIDI:</b>	Abreviação de <i>Musical Instrument Digital Interface</i> que é um padrão da indústria de som para conectar uma grande variedade de instrumentos musicais eletrônicos e formatos de músicas.
<b>OCTAVE:</b>	Software livre que possui um grande número de ferramentas matemáticas.
<b>Open Source:</b>	Licença de softwares com código aberta e gratuita.
<b>Plataforma Superpowered:</b>	Biblioteca de desenvolvimento para aplicativos de áudio. Suporta o algoritmo da FFT de alto desempenho entre outras funções como análise de áudio.
<b>Python:</b>	Linguagem de programação muito usada para análise de dados e para ensino devido a sua simplicidade.
<b>RockSmith:</b>	Jogo de videogame onde é utilizado um instrumento musical real para o aprendizado de música.
<b>Semitom:</b>	É a diferença de altura entre uma nota musical para a nota mais próxima na escala monocromática.
<b>Speedometer:</b>	Biblioteca gráfica capaz de exibir um gráfico do tipo <i>gauge</i> . Utilizado para facilitar a visualização da nota do microfone com a frequência de nota mais próxima.
<b>Tarsos DSP:</b>	Biblioteca de desenvolvimento para aplicativos de áudio em Java. Tem suporte parcial para o sistema Android.
<b>Tom:</b>	É a soma de dois semitons adjacentes na escala monocromática.
<b>Tonalidade:</b>	Refere-se à nota central a qual é construída uma escala. Quando uma música está em <b>Lá Maior</b> , significa que a música é composta por uma escala maior cuja nota tônica é o <b>Lá maior</b> .

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
1.1 OBJETIVOS	13
1.1.1 Capacidades e Habilidades da Equipe	14
1.1.2 Público-Alvo do Projeto	14
1.1.3 Visão Geral do Projeto	15
1.2 TECNOLOGIAS UTILIZADAS	16
1.3 CENÁRIOS	17
1.3.1 Cenário de Ajuste do Instrumento	17
1.3.2 Cenário de Aprendizado de Música de Ritmos Rápidos	18
1.3.3 Cenário de Aumento de Ritmo de Reprodução da Música	19
1.3.4 Cenário de Extração de Informações da Música	20
1.4 ESTRUTURA DO DOCUMENTO	21
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>22</b>
2.1 MÚSICA NA SOCIEDADE E EDUCAÇÃO	22
2.2 PROCESSOS COGNITIVOS EM MÚSICA	23
2.3 TEORIA MUSICAL	25
2.4 ANDAMENTO	25
2.5 NOTAS MUSICAIS	26
2.6 ESCALAS MUSICAIS	27
2.6.1 Escala Maior ou Escala Natural	29
2.6.2 Escala Menor Natural	30
2.7 MÉTODOS TRADICIONAIS NO APRENDIZADO DE MÚSICA	30
2.7.1 Aprendizado Formal de Música	31
2.7.2 Aprendizado Informal de Música	32
2.7.3 Educação Musical Auxiliada por Computador	32
2.8 ANÁLISE DE ÁUDIO	33
2.8.1 Reconhecimento da Frequência Fundamental Utilizando o Algoritmo Yin	34
2.9 JAVA NATIVE INTERFACE (JNI)	36
2.10 BIBLIOTECA TARSOS DSP	36
2.11 BIBLIOTECA SUPERPOWERED SDK	36
2.12 COMENTÁRIOS FINAIS	37



<b>3</b>	<b>DESENVOLVIMENTO</b>	<b>38</b>
3.1	SIMULAÇÃO E TESTE DE ALGORITMOS DO SAAM	38
3.1.1	Algoritmo de Reconhecimento da Frequência Fundamental Baseado na FFT	38
3.1.2	Afinação Utilizando o Algoritmo Yin	41
3.2	DESENVOLVIMENTO ANDROID DO SAAM	43
3.2.1	Comunicação JAVA Native Interface	46
3.2.2	Módulo Afinador do SAAM	46
3.2.3	Módulo de Alteração de Ritmo do SAAM	49
3.2.4	Módulo de Extração de Informações do SAAM	52
3.3	COMENTÁRIOS FINAIS	55
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>56</b>
4.1	PROCEDIMENTOS DE AFINAÇÃO DO INSTRUMENTO	56
4.2	COMPARATIVO DE AFINAÇÃO	56
4.3	COMPARATIVOS DA EXTRAÇÃO DE INFORMAÇÕES	59
4.4	MUDANÇA DE RITMO	60
4.5	COMENTÁRIOS FINAIS	61
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>62</b>
5.1	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	63
5.2	IMPRESSÕES PESSOAIS NA EXECUÇÃO DO TCC	64
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>66</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Existem vários benefícios no aprendizado em música. Segundo (NOGUEIRA, 2004), a música melhora as relações sociais, a disciplina individual e grupal, a sensibilização e representa à diversidade cultural dos povos. O aprendizado da música envolve muito treino e repetição até que ocorra a memorização. Um dos problemas no aprendizado da música é a qualidade da auto avaliação nos treinos porque é difícil ter alguém qualificado para julgar o seu desempenho. Em escolas de música, essa avaliação é feita semanalmente por um professor e normalmente para poucos alunos.

A tecnologia pode mitigar esse problema de ensino musical porque a música possui aspectos que podem ser avaliados por programas de computador. Como a música tem muitos aspectos matemáticos, é viável fazer uma avaliação de afinação por meios eletrônicos, ajudando músicos com um *feedback* da afinação. Além disso, a música pode ser processada para auxiliar o seu entendimento e memorização. Isso pode ser feito com a utilização de filtros ou processando a música inteira analisando os seus componentes.

Os aspectos mais subjetivos como o timbre de um instrumento e a mensagem cultural ainda não podem ser substituídos por ferramentas computacionais. Um aplicativo para *smartphone* que fornece apoio para músicos iniciantes para situações específicas pode ser relevante para a continuidade dos estudos e para relacionar a música com outras áreas científicas.

O sistema de apoio no aprendizado musical (SAAM) visa mitigar a auto avaliação usando um aplicativo portátil de fácil acesso.

### 1.1 OBJETIVOS

O objetivo do projeto é desenvolver um aplicativo Android para *smartphone* para auxiliar no aprendizado musical em situações específicas, para usuários com algum nível de conhecimento musical e com aptidão para utilizar aplicativos. A plataforma Android, nos aparelhos *smartphones*, é a mais utilizada no mundo atualmente. Além disso, as ferramentas para o desenvolvimento na plataforma são de acesso livre, sem custos, compatíveis com os sistemas operacionais mais utilizados

no mercado. O aplicativo Android desenvolvido neste projeto utiliza as bibliotecas Superpowered e TarsosDSP.

Para atingir os objetivos do projeto é necessário que o aplicativo Android contemple os seguintes objetivos específicos:

- Desenvolver um módulo de reprodução, para reproduzir o arquivo de música armazenado no *smartphone*;
- Desenvolver um módulo de afinação de instrumentos que identifique a frequência fundamental e indique às notas musicais correspondentes em um rápido tempo de resposta para o usuário afinar um instrumento;
- Desenvolver um módulo para alterar o ritmo da música, diminuindo ou aumentando o ritmo de reprodução, sendo útil na memorização e no desenvolvimento da memória muscular;
- Desenvolver um módulo de extração de informações que identifique a tonalidade da música, batidas por minutos e a intensidade da música.

#### 1.1.1 Capacidades e Habilidades da Equipe

O aplicativo foi desenvolvido por um estudante de Engenharia de Computação com conhecimentos prévios em programação, com experiência em desenvolvimento mobile nativo e noções básicas de teoria musical, sem uma formação acadêmica na área.

#### 1.1.2 Público-Alvo do Projeto

O público-alvo para este aplicativo são estudantes de música, músicos e praticantes que já tenham algum conhecimento musical e que possuam aptidão no uso de aplicativos móveis. É necessário que o usuário possua um *smartphone* Android com o SAAM instalado. O maior uso do aplicativo é para a afinação e na memorização da música e no desenvolvimento da memória muscular.

### 1.1.3 Visão Geral do Projeto

O Sistema de Apoio ao Aprendizado Musical (SAAM) pode ser dividido em módulos.

O **primeiro módulo** é o de reprodução da música armazenada no aparelho smartphone na forma de arquivo de áudio.

O **segundo módulo** é o de afinação que pode ser usado pelo usuário, estudante de música, para afinar instrumentos como um violão, guitarra, baixo dentre outros instrumentos musicais.

O **terceiro módulo** é o de alteração de ritmo de reprodução de uma música. Essa funcionalidade, quando diminuído o ritmo da música, facilita a memorização e o aprendizado da música e quando aumentado o ritmo, pode auxiliar em exercícios que ajudam na memória muscular. A razão desta funcionalidade no projeto é que músicas com muitas notas e em ritmos acelerados são de difícil aprendizado. Isso é muito bom para estudantes que não lêem partituras ou quando a partitura da música não está disponível. Quando aumentado o ritmo, o módulo pode auxiliar exercícios de progressão rítmica. Esse recurso pode ser útil para percussionistas e bateristas.

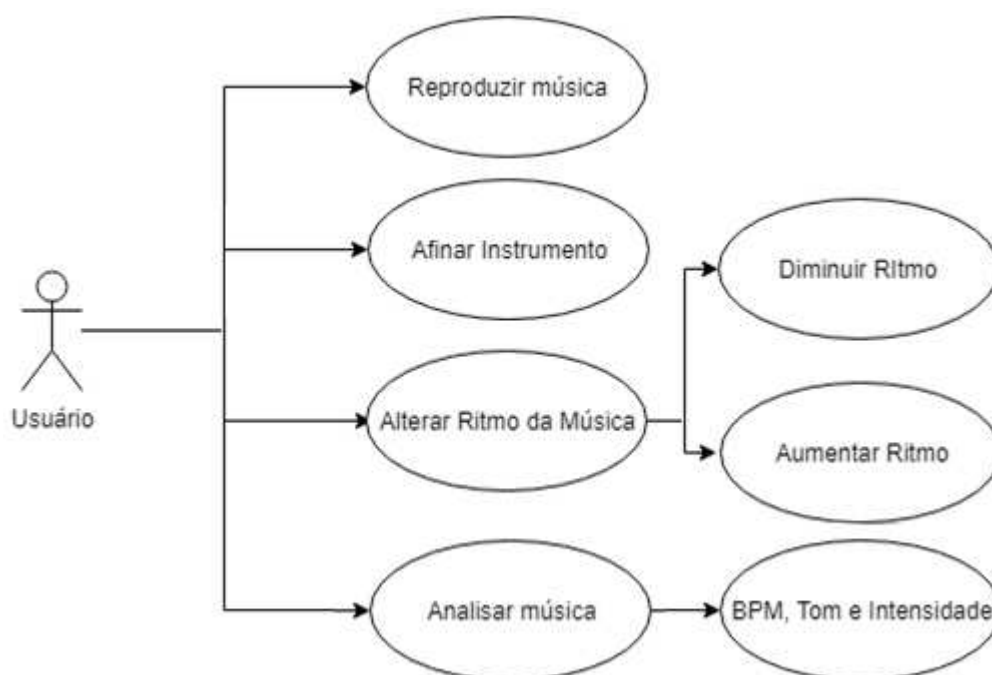
O **quarto módulo**, de extração de informações, pode extrair as seguintes informações de músicas:

- Batidas por minuto (BPM) que é uma forma de medição do ritmo da música. Normalmente o aluno de música usa uma ferramenta como um metrônomo;
- Tonalidade da música representa um conjunto de acordes que serão utilizadas na música. Neste sentido, existe uma padronização das notas que definem a tonalidade da música;
- Intensidade média da música. É definida por uma escala medida em decibéis do padrão do volume do arquivo de música analisado.

As batidas por minuto (BPM) da música é uma informação relevante para os músicos. Pode servir para ajustar o metrônomo, escrever partituras e treinamento para percussionistas. A tonalidade da música é muito importante para a composição e para a improvisação. A intensidade do som que a música tem é relevante para que numa gravação todas as músicas estejam normalizadas em intensidades semelhantes.

O diagrama de casos de uso do SAAM pode ser observado na Figura 1.

Devido à natureza multidisciplinar do trabalho, envolvendo diferentes áreas de conhecimento, foi incluído um glossário com os principais termos específicos utilizados. Fez-se necessário este glossário para auxiliar ao leitor leigo no entendimento do trabalho, e principalmente para homogeneizar o entendimento da terminologia utilizada evitando interpretações diferentes, independente da formação do leitor.



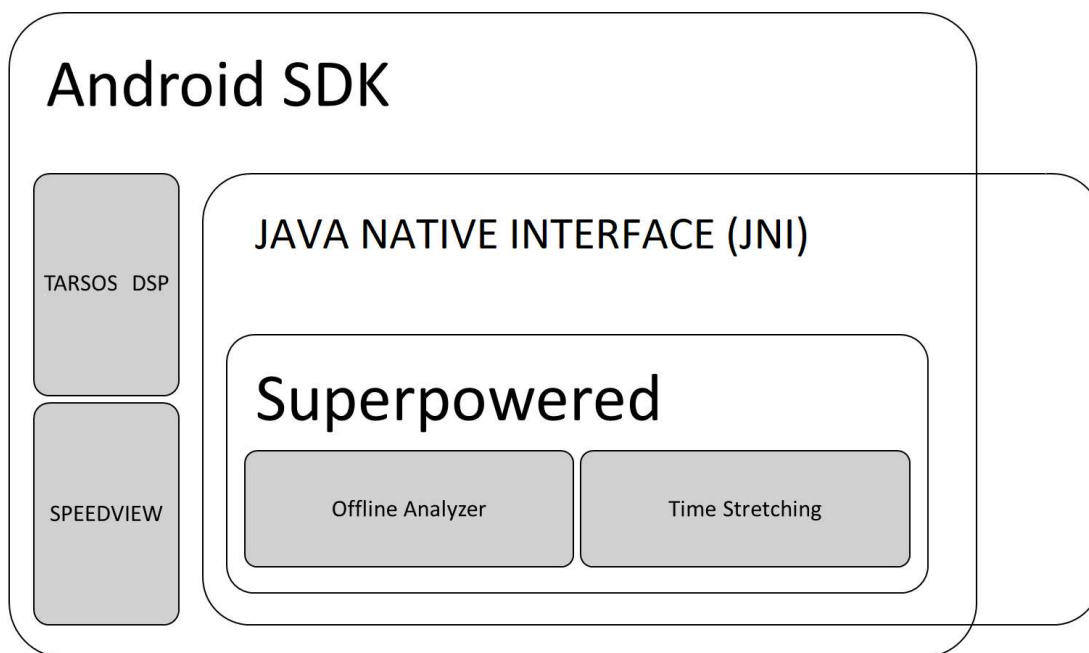
**Figura 1 – Diagrama de casos de uso para o Sistema de Apoio ao Aprendizado Musical (Autoria própria)**

## 1.2 TECNOLOGIAS UTILIZADAS

O aplicativo SAAM foi desenvolvido utilizando a IDE Android Studio, no ambiente Linux Ubuntu. A Android SDK engloba todo o desenvolvimento para aplicativos Android. Foram utilizadas as bibliotecas Tarsos DSP da *University College Ghent* e Superpowered como as principais bibliotecas de processamento de áudio. Também foram utilizados para recursos visuais os *plugins*: JCplayer e Speedometer. Para escrever o programa foram utilizadas as linguagens Java e C++. O Java é a linguagem padrão para desenvolvimento em Android. Para um alto desempenho, partes das funções foram escritas em C++ que utiliza a *Java Native interface* (JNI).

Com a JNI, é possível acessar uma camada nativa do sistema Android, permitindo acessar funcionalidades de alto desempenho.

O SAAM foi desenvolvido utilizando ferramentas para criação de aplicativos Android. A relação de dependências pode ser observada no diagrama da Figura 2.



**Figura 2 – Visão sistêmica dos recursos utilizados para o desenvolvimento do Sistema de Apoio Ao Aprendizado Musical (SAAM)  
(Autoria própria)**

A JNI é um *framework* do JAVA e nesse caso em específico está sendo utilizada para desenvolvimento em Android. Em outros casos, ela pode ser desenvolvida para utilizar o C++ em aplicações Java para *desktop*.

### 1.3 CENÁRIOS

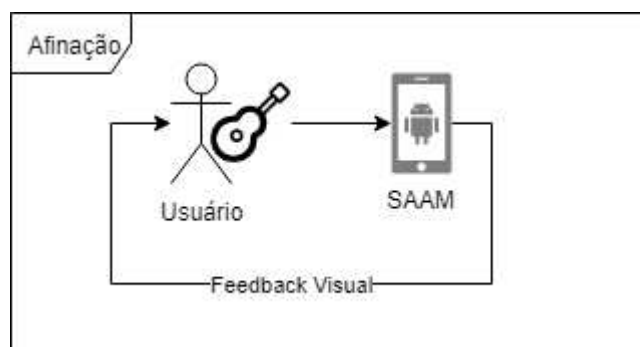
Esse tópico descreve os cenários nos quais o usuário do SAAM está envolvido com o aprendizado de música.

#### 1.3.1 Cenário de Afinação do Instrumento

Para uma afinação padrão, é feita uma comparação utilizando o ouvido. Normalmente é usado um diapasão, como referência, que vibra na frequência de 440

Hz. Utilizando essa nota (**Lá 4**) como referência, um instrumentista experiente é capaz de afinar o instrumento.

Ao utilizar o aplicativo SAAM o usuário pode acessar o módulo de afinação. A afinação utilizando o módulo é simples. Um gráfico exibe a frequência e a posição mais próxima de uma nota na afinação padrão. O processo de afinação pode ser visto no cenário da Figura 3.



**Figura 3 – Cenário 1 – Usuário afinando o instrumento (Autoria própria)**

O usuário reproduz a nota do instrumento musical e o SAAM indica em um gráfico *gauge* se o som está com frequência abaixo ou acima da nota mais próxima. O usuário altera a afinação do instrumento musical e visualmente o SAAM indica se o instrumento está afinado. Este processo interativo de afinação continua até o usuário acertar a frequência da nota na faixa indicada no gráfico *gauge*.

### 1.3.2 Cenário de Aprendizado de Música de Ritmos Rápidos

A execução de trechos de música em andamento mais lento do que o indicado ou concebido pelo intérprete permite uma melhor concentração e assimilação de trechos complexos (BARRY 1992).

Uma música de ritmo rápido pode conter muitas notas em um curto espaço de tempo, o que aumenta a complexidade da música e o entendimento das notas para um estudante de música que ainda não lê partituras ou que a partitura da música não esteja disponível. Ao tornar o ritmo de reprodução da música mais lento, facilita as diferenciações das notas e a sua memorização.

Considerando como exemplo a música Colorado Bulldog do Mr Big (<https://www.youtube.com/watch?v=vDKVhrdmYHA>). A música contém elementos de

execução complexa. São várias notas encadeadas em um curto espaço de tempo. No caso do vídeo em questão, o guitarrista da banda demonstra a música efetuando as notas em ritmo mais lento. O aplicativo SAAM faria essa demonstração similar ao instrutor, de modo a entender as notas em sequência. Após fazer o carregamento do arquivo de áudio no *smartphone*, o usuário deve carregar esse arquivo no módulo de alteração de ritmo do SAAM. O cenário para acessar a informação é descrita na Figura 4.

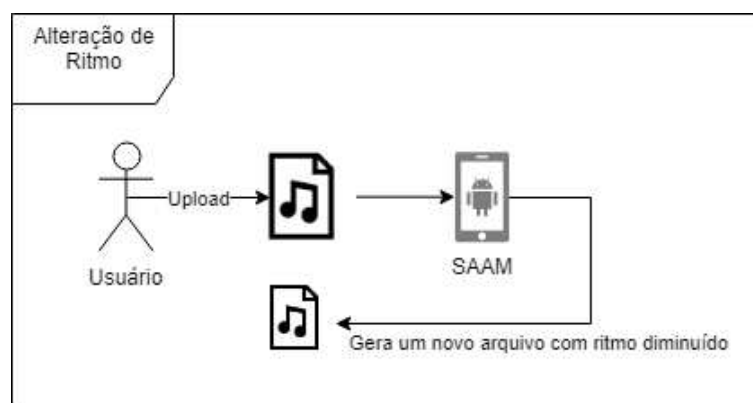


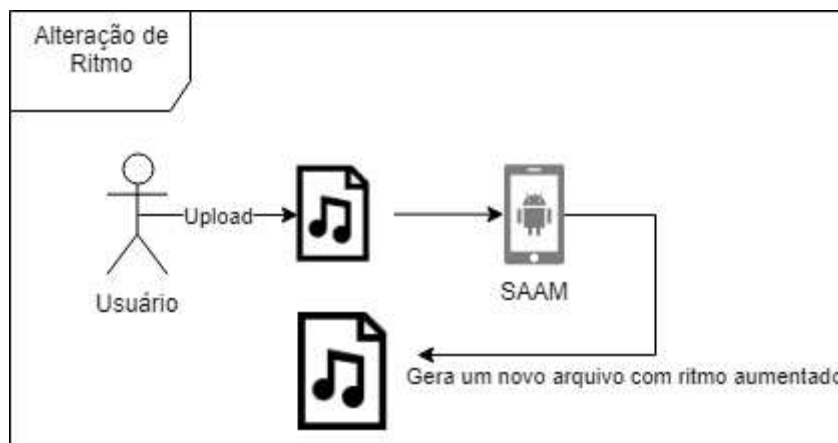
Figura 4 – Cenário 2 – Diminuição de ritmo de uma música (Autoria própria)

### 1.3.3 Cenário de Aumento de Ritmo de Reprodução da Música

A maior parte dos estudantes de música deve treinar a memória muscular do processo de aprendizagem da música. A memória muscular é um termo aceito pelos instrutores de música e consiste na capacidade de aprendizagem automática e melhora na improvisação, realizado pelo treinamento intensivo da música (instrumento ou voz) (DEAN 2014). Em geral são passados exercícios musicais que ajudam na coordenação motora e na memorização das escalas de um instrumento. Aumentar o ritmo de reprodução de um exercício e acompanhar de acordo com o que é escutado é uma maneira de treinar e melhorar a coordenação.

O usuário pode fazer o *upload* do arquivo do exercício no *smartphone* Android, acessar o módulo de alteração de ritmo de reprodução do SAAM, selecionar a velocidade desejada e criar um exercício com um ritmo mais acelerado. O processo é análogo e o resultado é o inverso à diminuição do ritmo, como mostrado na Figura 5.

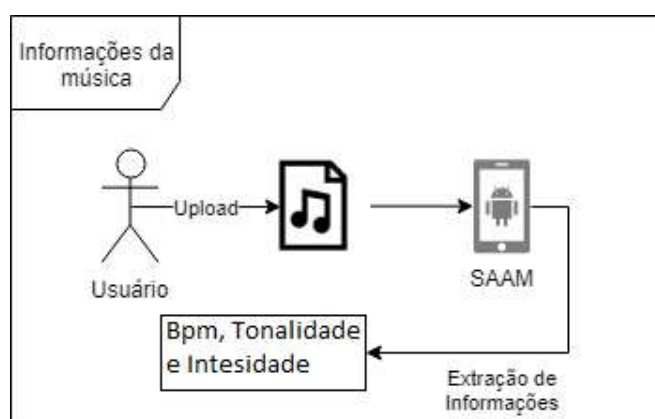




**Figura 5 – Cenário 3 – Aumento de ritmo de uma música (Autoria própria)**

#### 1.3.4 Cenário de Extração de Informações da Música

O usuário precisa extrair informações como a tonalidade da música para criar solos e harmonias. A tonalidade é uma característica da música, a qual delimita a padronização das notas musicais e relaciona-se com a harmonia. O aplicativo SAAM possibilita extrair a tonalidade da música, facilitando a improvisação e a criação de harmonias. Se a música estiver na memória do *smartphone*, o músico pode extrair a tonalidade utilizando o módulo de análise do SAAM. O diagrama que representa o cenário pode ser observado na Figura 6.



**Figura 6 – Cenário 4 – Extração de informações da música (Autoria própria)**

Outro cenário é quando um percussionista ou musicista necessita saber quantas batidas por minuto a música possui. Batidas por minuto é uma medida

utilizada no ensino musical para descrever o andamento da música. O SAAM pode extrair a informação de batidas por minuto utilizando o módulo de extração de informações da música.

#### 1.4 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

Este documento está estruturado em capítulos.

O Capítulo 1 apresentou o contexto do projeto, os objetivos e os cenários.

O Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica dos elementos envolvidos com o projeto.

O Capítulo 3 apresenta as etapas de desenvolvimento do projeto.

O Capítulo 4 apresenta alguns resultados e o Capítulo 5 finaliza o relatório apresentando as conclusões do projeto.

Devido as diferentes áreas de conhecimento envolvidas neste projeto, música, processamento de sinais de áudio, aplicativos para *smartphone*, sistema operacional Android, foi incluído um glossário com os principais termos, que podem ajudar o leitor no entendimento do trabalho.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esse capítulo apresenta as bases para o desenvolvimento do aplicativo, a motivação e a razão de algumas de suas funcionalidades.

### 2.1 MÚSICA NA SOCIEDADE E EDUCAÇÃO

A música tem participação cultural, social e de educação em diversos aspectos da sociedade. Teóricos da fundamentação musical, como WILLEMS (1970) colocam que a música é um fator importante da formação da própria personalidade humana. O autor argumenta que há uma interligação entre a música e o ser humano (aspectos fisiológico, afetivo e mental) com os elementos fundamentais da música (ritmo, melodia e harmonia). Assim, argumenta o autor, o sentido do ritmo da vida correlaciona com o próprio sentido musical. O ritmo da vida está relacionado ao ritmo da natureza, dos ruídos das máquinas, dos instrumentos de percussão. Em síntese relacionada com a fisiologia do ser humano. Pela melodia se trabalha com a sensibilidade, a afetividade, o emocional. Finalmente, a harmonia se trabalha com o aspecto cognitivo, a inteligência.

Por outro lado, pelo lado da legislação educacional, a importância da música no ensino educação foi reconhecida de forma relativa pela Lei. Segundo SILVA (2008), tendo em vista o resultado de uma discussão do PDE – Programa de Desenvolvimento Estadual no Paraná em 2008, a Lei 11.769 das diretrizes educacionais argumentou que a Lei não reconheceu a importância do professor qualificado em música, ou com a formação específica na área, segundo o termo da própria legislação proposta. Além disso, a natureza do ensino de música, segundo a lei, é de caráter não exclusivo, portanto, a atividade musical seria mais uma atividade, dentre outras na educação artística, ainda que obrigatória. A boa qualidade do ensino de música depende de ações de longo prazo do governo para terem sucesso. Além disso, há muitas restrições do ensino de música, quando se trata de materiais didáticos, ambiência, instrumentos, métodos de ensino e avaliação do conhecimento musical.

CAMPOS (2015) em sua tese de doutorado aborda a formação de docentes para o ensino da música, demonstrando que o ensino da música exige uma formação

especializada, que ora transita numa formação específica em educação e ora transita em bacharelado em formação musical. A formação musical não no sentido de *performer*, como dá a entender a legislação, mas muito mais no sentido de educador.

GROUT e PALISCA (2007) argumentam que música é uma área do conhecimento que é reconhecida como ciência clássica desde a antiga Grécia com Pitágoras e, ao mesmo tempo como arte com Aristóteles, além de ser um elemento da educação humana com Platão.

Num contexto de ensino aprendizagem a Música é derivada dos campos da matemática e acústica. ROEDERER (2002) trata a música em termos de sistemas físicos e processos psicofísicos numa abordagem interdisciplinar, porém utilizando-se de raciocínio dos físicos. SENOI ILARI (2006) afirma que em uma perspectiva mais ampla o termo Cognição Musical está sendo utilizado para designar estudos de natureza multidisciplinar abrangendo: paleontologia, biologia, história, filosofia, neurociência, etnomusicologia, sociologia, antropologia da música, psicologia do desenvolvimento, educação musical e finalmente, a tecnologia, engenharia e informática.

Como área de conhecimento, no contexto deste estudo, a abordagem levou em conta a música, com suas diversas propriedades matemáticas e que serão analisadas na teoria.

## 2.2 PROCESSOS COGNITIVOS EM MÚSICA

Os processos cognitivos em música, como tratados no item 2.1 envolvem pesquisas em diversas áreas. LEVITIN (2006) levanta a perspectiva de uma mente musical, na qual diferentes pessoas têm diferentes percepções ao ouvirem uma mesma peça musical. O autor argumenta que, em função destas diferentes percepções, há uma correlação com o sistema de memória de longo prazo e o que cada ouvinte é capaz de reter. Para o autor o que se ouve em música é uma percepção de sete atributos:

- **Altura**, como sendo um atributo psicológico, relacionado tanto à frequência física, quanto à sua posição relativa numa escala musical;
- **Ritmo** relaciona-se às durações de uma série de notas musicais;

- **Andamento** se refere à velocidade geral;
- **Contorno**, padrões de “sobe” e “desce” da melodia;
- **Timbre**, “cor” tonal produzida pelos harmônicos das vibrações dos instrumentos. É o que diferencia as mesmas notas quando tocadas em instrumentos diferentes;
- **Volume**, construto psicológico que se relaciona de forma não linear à amplitude física de uma nota;
- **Localização espacial**, indicação interpretada, com base no tempo e em diferenças espectrais naquilo que se ouve.

O interessante na afirmação de LEVITIN (2006) é de que os atributos são separáveis. Cada um dos itens relacionados pode ser estudado de forma independente. De fato, o autor considera que o reconhecimento de qualquer música é feito pela melodia, mantendo sua identidade, mesmo com mudanças de alguns atributos. Um exemplo é de que reconhecemos a música, independentemente do volume ou de seu andamento. O autor, no seu estudo, levantou um ponto importante para os processos cognitivos, levando em conta as pessoas com habilidades especiais: o denominado “ouvido absoluto”, que são capazes de produzir ou identificar notas musicais com precisão sem necessidade de referência externa. Para o autor, esta conceituação necessita de uma definição menos restrita, pois as pessoas com “ouvido absoluto” em geral são músicos que nominam a nota. O autor argumenta que na realidade existem pessoas “não músicos” que memorizam a nota, cantando uma canção em mesmo tom original, sem, no entanto, nominá-las. Isto representa um importante fator nos processos cognitivos, pois pesquisas de neuroimagem mostram que os portadores de “ouvido absoluto” na realidade são pessoas cuja atividade cerebral encontra na maior parte no dorso lateral posterior esquerdo do córtex frontal, ou seja, uma área do cérebro relacionada à aprendizagem associativa condicional, com uso de rótulos às coisas. Em outras palavras o “ouvido absoluto” não é necessariamente genético, como alguns pesquisadores argumentam, dado que é de difícil comprovação, mas um processo desenvolvido. Este desenvolvimento neuronal é estabelecido com diferentes fatores, tais como língua materna, estímulo, inclusive no período intrauterino e treinamento.

## 2.3 TEORIA MUSICAL

Este item não pretende ser exaustivo na definição de uma teoria complexa da música, mas tornar compreensível para uma leitura de quem não é profissional de música para fins de entendimento do presente trabalho. Para MED (1996, p.11) a música é a arte de combinar os sons simultânea e sucessivamente com ordem, equilíbrio e proporção do tempo. Para o autor, as principais partes de uma música são:

- **Melodia:** concepção horizontal de sons dispostos em ordem sucessiva;
- **Harmonia:** conjunto de sons em ordem simultânea (concepção vertical);
- **Contraponto:** conjunto de melodias dispostas ao mesmo tempo e concepção vertical e horizontal;
- **Ritmo:** ordem e proporção que estão dispostos os sons que constituem melodia e harmonia.

O menor intervalo adotado entre duas notas é o semitom no sistema musical ocidental. O sistema ocidental utiliza uma seleção de semitons, enquanto que a música oriental chinesa, japonesa, indiana, hebraica, entre outras usam frações menores que um semitom. Vale ressaltar que o padrão ocidental é baseado no esquema de notas de escala temperada. O sistema temperado representa o abandono da afinação absoluta no sistema natural (afinação derivada da frequência precisa) em favor de um sistema cromático, um abandono à acústica pura (MED, 1996).

## 2.4 ANDAMENTO

Segundo MED (1996) andamento é a indicação da duração absoluta do som e silêncio, ou seja, a velocidade do segmento musical. Indicado normalmente no início da música numa partitura, tem origem nos compositores italianos do século XVIII, por isso a denominação *Allegro*, *Andante*, etc.

O metrônomo é o instrumento padrão ouro presente nas aulas de música e serve para determinar o andamento, marcando a duração dos tempos.

## 2.5 NOTAS MUSICAIS

As notas musicais são representadas pela afinação e duração de um som. No padrão americano as notas são denominadas **A, B, C, D, E, F e G**. No padrão brasileiro é **Lá, Si, Dó, Ré, Mi, Fá e Sol**.

Segundo SUITS (1998), as notas musicais são dependentes das escalas e o padrão mais utilizado é a escala temperada que foi criada para atender instrumentos como o piano e o teclado. Uma das características da escala temperada é que as frequências das notas são fixas independentes das notas relativas.

A representação moderna das notas para o padrão ocidental na escala temperada é definida pela equação 1:

$$F_n = f_0 \cdot a^n \quad (1)$$

Onde:

$f_0$  : é a frequência de referência para a escala. Normalmente é escolhido o **A4 (Lá 4)** em que a frequência é 440 Hz.

$F_n$  : é a frequência encontrada utilizando uma quantidade como índice.

$a$  : é  $2^{\frac{1}{12}}$  que é aproximadamente 1,059463.

$n$  : é o índice correspondente da nota na escala musical.

Utilizando a equação 1 e a nota **Lá 3** (220 Hz) como referência é possível obter a Tabela 1 em 20° Celsius.

Cada valor da escala representa um semitom.

**Tabela 1 – Parte das escalas musicais utilizando a Equação 1 (Adaptado de Suits, 1998)**

Nota	Padrão	Frequência (Hz)	n
Lá 3	A3	220,00	0
Lá #3	A#3	233,08	1
Si 3	B3	246,94	2
Dó 4	C4	261,63	3
Dó #4	C#4	277,18	4
Ré 4	D4	293,66	5
Ré #4	D#4	311,13	6
Mi 4	E4	329,63	7

Fá 4	F4	349,23	8
Fá# 4	F#4	369,99	9
Sol 4	G4	392,00	10
Sol #4	G#4	415,30	11
Lá 4	A4	440,00	12
Lá #4	A#4	466,16	13
Si 4	B4	493,88	14
Dó 5	C5	523,25	15
Dó #5	C#5	554,37	16
Ré 5	D5	587,33	17
Ré #5	D#5	622,25	18
Mi 5	E5	659,26	19
Fá 5	F5	698,46	20
Fá #5	F#5	739,99	21
Sol 5	G5	783,99	22
Sol #5	G#5	830,61	23
Lá 5	A5	880,00	24

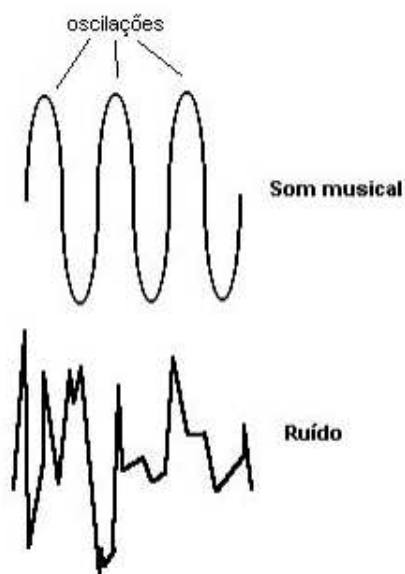
Esse padrão também é o utilizado para o sistema MIDI que divide as notas em 128 posições (de 0 a 127) e utiliza o **Lá 4** (440 Hz) como a nota de referência com índice 69.

Vale ressaltar que em algumas escalas como a escala harmônica, a frequência das notas poder variar de acordo com a referência da nota nominal.

## 2.6 ESCALAS MUSICAIS

A escala musical é um conjunto de notas que tem uma relação agradável ao ouvido humano. Segundo RATTON (2003) a maioria dos sons produzidos para a música possui determinadas características, tais como, frequência bem definida e harmônicos. O autor também entende que para a formação das escalas musicais, as características se mantêm por alguns ciclos. O autor cita que os ruídos ou outros sons não musicais, por exemplo, possuem uma frequência definida, mas não sustentam essas características. As diferenças podem ser observadas na Figura 7.





**Figura 7 – Diferença entre ruído e som musical  
(Adaptado de RATTON, 2003)**

RATTON (2003) afirma que o som sempre é uma combinação de ondas, nem sempre ocorre no modo fundamental, pois existem os modos harmônicos que são múltiplos da frequência fundamental. Eles possuem um papel importante no processo musical na harmonia, escala e percepção estética do som.

O autor considera ainda que dois sons múltiplos inteiros entre os valores de suas frequências fundamentais resultam em uma sensação auditiva agradável porque os sons estão em consonância. O autor cita ainda que existem sons complexos contendo harmônicos pares e ímpares. Um exemplo pode ser visto na Tabela 2, representando sons complexos, interpretados de maneira agradável ao ouvido humano, como o som S1 com frequência fundamental em 100 Hz e todas as harmônicas, segunda harmônica com frequência de 200 Hz, e assim sucessivamente até a nona componente.

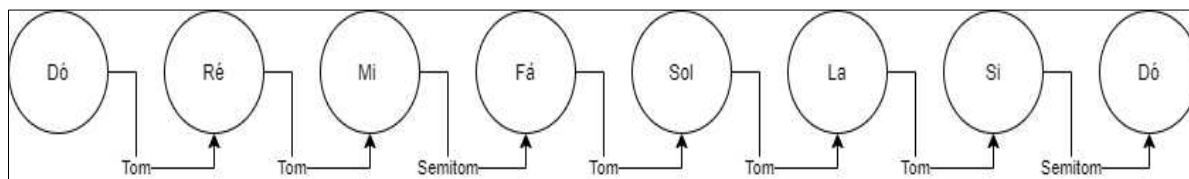
**Tabela 2 – Exemplo de harmônicos  
(Adaptado de RATTON 2003)**

Harmônico	Som S1 (Hz)	Som S2 (Hz)	Som S3 (Hz)
1	100	150	200
2	200	300	400
3	300	450	600
4	400	600	800
5	500	750	1000
6	600	900	1200
7	700	1050	1400
8	800	1200	1600
9	900	1350	1800

Entretanto, existem sons gerados em intervalos diferentes da oitava que também podem ser agradáveis para o ouvido humano. A oitava é o intervalo entre uma nota até a mesma nota na escala adjacente. Civilizações acabaram criando uma gama de frequências dentro do intervalo da oitava para que fossem construídas suas músicas.

### 2.6.1 Escala Maior ou Escala Natural

Segundo MED (1996), a escala maior ou natural se define como um conjunto de notas musicais integradas naquilo que é agradável ao ouvido humano, tradicionalmente aceito na música ocidental. O termo maior refere-se aos intervalos de tons e semitons. A escala maior é apresentada ao estudante de música como uma forma de escolhas possíveis de uma música. Para explicar os intervalos a Figura 8, utilizam-se as notas **Dó, Ré, Mi, Fá, Sol, Lá e Si** na escala maior.

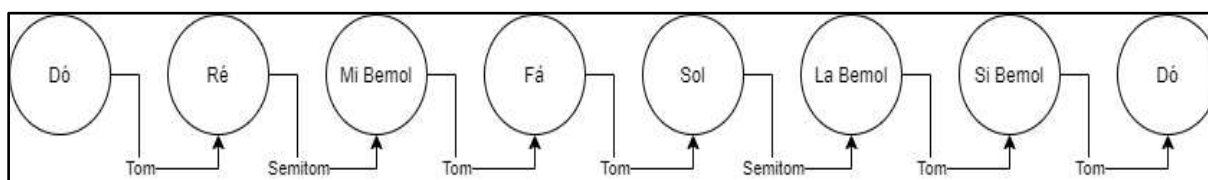


**Figura 8 – Escala maior ou natural  
(Adaptado de MED 1996)**

Segundo ADAMS (2005), a escala maior é uma das mais comuns na música, especialmente na música ocidental. É uma escala diatônica. Isso é, quando uma escala tem cinco tons completos e dois semitons. O intervalo pode ser definido como **tom, tom, semitom, tom, tom, tom, semitom**.

### 2.6.2 Escala Menor Natural

Segundo MED (1996), a escala menor natural também é uma escala diatônica que inicia no sexto grau da escala maior, por exemplo: A escala de **Lá menor** pode ser iniciada na escala de **Dó maior**. Por esse motivo a escala de **Lá menor** é chamada de relativa menor de **Dó maior**. O intervalo da escala pode ser definido como **tom, semitom, tom, tom, semitom, tom, tom** como apresenta a Figura 9.



**Figura 9 – Escala menor natural  
(Adaptado de MED 1996)**

## 2.7 MÉTODOS TRADICIONAIS NO APRENDIZADO DE MÚSICA

Segundo SANTIAGO (2006), o aprendizado de música pode ser dividido em duas categorias:

- A **prática informal**, que é tipicamente empreendido por músicos populares e profissionais mais ligados a improvisação;

- A **prática formal**, que tem como foco o desenvolvimento de habilidades técnicas. Normalmente, os músicos reconhecem que para o aprendizado completo musical, ambas devem ser estudadas com cuidado.

### 2.7.1 Aprendizado Formal de Música

O aprendizado formal sempre foi uma prática presente no estudo instrumental da música. Uma quantidade significativa de pesquisadores tem estudado a eficácia da prática deliberada (SANTIAGO, 2006). Segundo ERICSSON, KRAMPE E TESCH-ROMER (1993, p368), *“a prática deliberada é um conjunto de estratégias de estudo, com um bom planejamento, que auxilia no aprendizado com o intuito de ajudar o estudante a superar suas fraquezas e melhorar a sua performance”*.

ERICSSON, KRAMPE E TESCH-ROMER (1993) argumentam que os fatores mais importantes para um desempenho de alto nível são: precocidade na aquisição de conhecimento, o tempo investido para adquirir o conhecimento aliado a uma prática deliberada regular e extensiva, apoio de familiares, ambiente de estudo e a qualidade de instrução recebida.

LEHMANN (1997) e COSTA (1999) sugerem algumas estratégias típicas com o uso do metrônomo, o estudo rítmico, análise prévia da obra analisada, e estudo repetido de pequenas seções da peça, o estudo silencioso, entre outros. Os autores também apontam alguns fatores que influenciam no processo de aprendizado e a qualidade do desempenho musical:

- Qualidade do ensino e da supervisão;
- Precocidade do estudo instrumental;
- Aquisição gradual do conhecimento;
- Nível do conhecimento e da habilidade musical;
- Coordenação motora e habilidades técnicas;
- Nível de concentração, motivação e entusiasmo;
- Apoio familiar;
- Recursos materiais;
- Aptidão.

Outro fator decisivo para o aprendizado musical do músico é a capacidade de planejamento e sua participação ativa dentro do processo de aprendizado (NIELSEN, 2001).

### 2.7.2 Aprendizado Informal de Música

Segundo GREEN (*apud* SANTIAGO, 2006), o aprendizado musical é um conjunto de informações e interpretações que gera a aquisição do conhecimento e da habilidade técnica, tudo isso fora de uma educação musical formal. GREEN (*apud* SANTIAGO, 2006) afirma que a interação na sociedade, outros músicos e até o autodidatismo têm grande influência na formação musical. Essas atividades envolvem improvisação, criatividade para composição e tocar somente utilizando o ouvido. A prática informal também costuma ser mais prazerosa, a reprodução de uma obra musical utilizando apenas recursos auditivos costuma ser muito proveitosa para a formação de um músico instrumentista (BURNARD, YOUNKER 2002). SWANWICK e FRANÇA (1999) e BURNARD (*apud* SANTIAGO, 2006) afirmam que além desses benefícios, a prática informal é importante para processos como familiarização com outros estilos musicais, desenvolvimento de memória musical, compreensão musical e maturação. Além disso, pode ajudar nas composições e habilidades técnicas.

### 2.7.3 Educação Musical Auxiliada por Computador

Os softwares computacionais podem ser úteis para o desenvolvimento de um estudante de música. Para isso é importante estabelecer uma perspectiva multidisciplinar para que ocorra uma integração sistemática com as teorias musicais e algumas metodologias de ensino na música.

MILLETO (2004) afirma que os softwares de computadores podem ajudar de maneira significativa os estudantes. Normalmente eles são classificados nas seguintes áreas:

- **Software de música em geral.** Essa categoria inclui editores de partituras, sequenciadores;
- **Software especificamente educativo-musical.** Isso inclui softwares de treinamento auditivos, tutores, teoria musical;

- **Software de programação sônica.** Esse tipo de software permite uma estratégia de ensino particular para situações de ensino específicas. Atividades como composição e programação podem estar envolvidas.

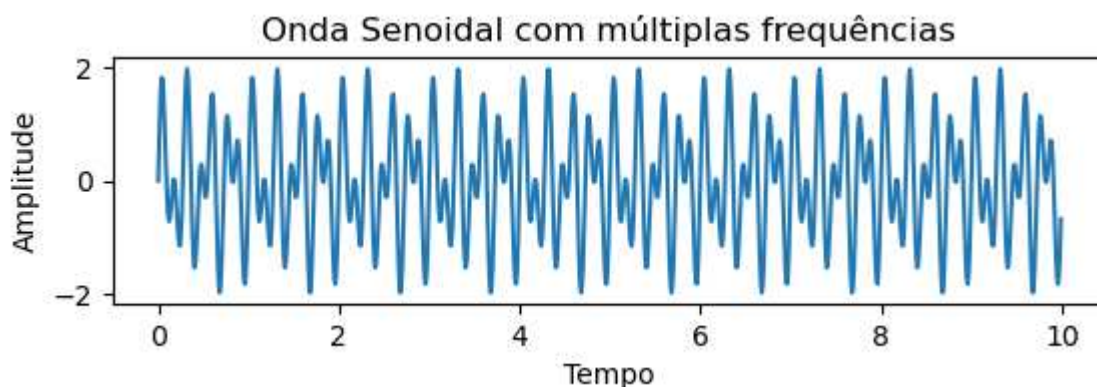
Segundo MILLETO (2004), a maior divulgação de ferramentas computacionais pode ajudar músicos e professores de música a expandir e aprimorar seus conhecimentos, vencer resistências e preconceitos, e tornar a aplicação da tecnologia em algo interessante para que os alunos tenham um acesso maior a informações.

MILLETO (2004) afirma que, apesar de estudos apontarem que exista uma necessidade real de um professor no aprendizado de música, há uma contrapartida em experiências de jovens jogando o *game* Rocksmith. Levando em consideração a Teoria do Fluxo (CSIKSZENTIMIHALYI, 1975), que investigou as circunstâncias que levam uma pessoa a entrar em um estado de imersão e satisfação (PFUTZENREUTER, 2013), foi verificado que os níveis de dificuldade do jogo são um aspecto positivo para o aprendizado. A aprendizagem musical vinculada com a diversão de jogar é algo que deve ser pensado para aulas de música.

## 2.8 ANÁLISE DE ÁUDIO

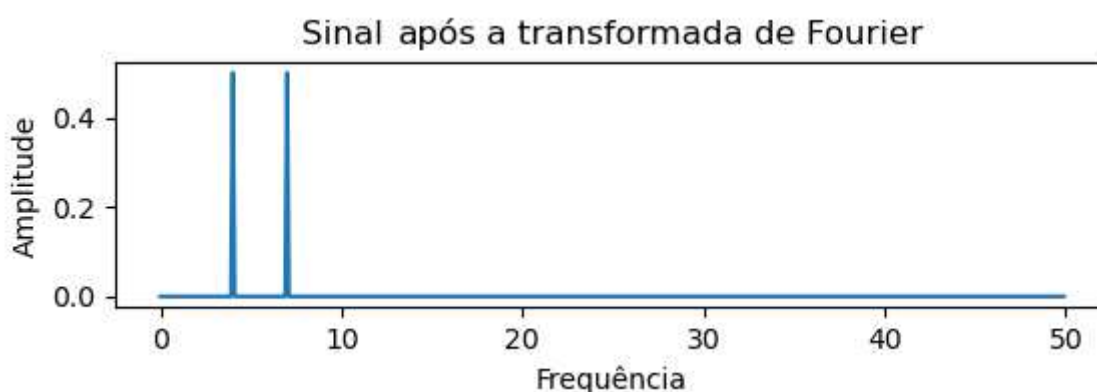
Para a análise de áudio são necessárias as ferramentas de processamento de sinais como a transformada de Fourier. A transformada de Fourier é basicamente a decomposição de uma função temporal em suas componentes senoidais. Para uma análise computacional, normalmente é utilizada o algoritmo FFT (*Fast Fourier Transform*) que é uma variante computacional com processamento matemático mais rápido do que a transformada discreta da Fourier (*Discrete Fourier Transform – DFT*) (OPPENHEIM e SCHAFER, 2010).

Levando em consideração a Figura 10, que é composta por dois sinais senoidais de mesma amplitude com de frequências de 4Hz e 7Hz.



**Figura 10 – Onda senoidal composta de duas frequências senoidais de 4 e 7 Hz (Autoria própria)**

Após aplicar a transformada de Fourier e apresentando o espectro unilateral, obtém-se a Figura 11 que indica as frequências de 4Hz e 7Hz com mesmas amplitudes (0,5).



**Figura 11 – Análise FFT do sinal da figura 10 (Autoria própria)**

A FFT é muito utilizada para análises complexas, mas pouco efetiva para o reconhecimento imediato de tons. Para isso são utilizados métodos computacionais que exigem menos poder computacional como o algoritmo Yin que será tratado no próximo tópico.

### 2.8.1 Reconhecimento da Frequência Fundamental Utilizando o Algoritmo Yin

Segundo CHEVEIGNÉ, KAWAHARA ( 2001) o algoritmo Yin é baseado em seis passos. O **primeiro passo** é a função de autocorrelação discreta, definida pela Equação 2.

$$r_1(\tau) = \sum_{j=j+1}^{t+W} x_j x_{j+\tau} \quad (2)$$

Onde:

$r_1(\tau)$ : É a função de autocorrelação;

$t$ : Índice do tempo;

$W$ : Tamanho da janela de integração;

$\tau'$ : Atraso ou defasagem do sinal.

É escolhido o ponto mais alto e o algoritmo compara o sinal com versão defasada de próprio sinal. Esse ponto não pode ser zero.

O **segundo passo** é para a diminuição de erros e consiste em uma função de diferença exemplificada pela Equação 3. Essa equação é menos sensível a maiores mudanças de amplitudes.

$$d_t(\tau) = \sum_{j=1}^{j=W} (x_j - x_{j+\tau})^2 \quad (3)$$

Onde:

$d_t(\tau)$ : É a função de diferença;

$t$ : Índice do tempo;

$W$ : Tamanho da janela de integração;

$\tau$  : Atraso ou defasagem do sinal

O **terceiro passo** é a normalização da média acumulada que substitui à função de diferença e evita a seleção de valores com fases de valor zero.

O **quarto passo** é a definição de um nível de *threshold* limiar que evita que uma nota seja identificada em uma oitava diferente. A nota candidata só pode ser aceita se estiver na faixa da lista de aceitação.

O **quinto passo** é interpolação parabólica que estima  $d_t(\tau)$  como uma curva parabólica.

O **sexto passo** é avaliar qual a melhor candidato para o índice da nota.

O algoritmo Yin completo é apresentado no trabalho de Cheveigné e Kawahara (2001).



## 2.9 JAVA NATIVE INTERFACE (JNI)

O *Java Native Interface* é um *framework* que permite que um código Java execute aplicações nativas e bibliotecas escritas em outras linguagens como C, C++ e *assembly*. Ela permite a criação de objetos do tipo Java dentro do ambiente C++ com algumas adaptações. Isso faz com que o programa seja executado fora do JVM (*Java Virtual Machine*) o que costuma melhorar a desempenho. A JNI faz uso da NDK (*Native Development Kit*) para acessar essas informações. O pacote NDK deve estar instalado no código da aplicação para esse recurso funcionar.

O JNI é indicado para operações que exigem desempenho como processamento digital de sinais e imagens, onde o desempenho é muito importante.

## 2.10 BIBLIOTECA TARSOS DSP

A Tarsos DSP é uma biblioteca JAVA para processamento de áudio. Foi desenvolvida pela University College Ghent. Possui compatibilidade parcial com Android e é de fácil utilização. Para encontrar a frequência fundamental utiliza o *Mcleod Pitch Method* baseado no artigo de CHEVEIGNÉ, KAWAHARA (2001) para identificar a frequência e possui inúmeras funções para detecção de batidas entre outras funcionalidades. Nem todas as funcionalidades são compatíveis com os dispositivos Android, mas ela é uma biblioteca de uso livre e constantemente recebe atualizações.

## 2.11 BIBLIOTECA SUPERPOWERED SDK

A Superpowered SDK é uma biblioteca de processamento de áudio desenvolvida em C++ especificamente para dispositivos móveis. Possui compatibilidade com Linux, mas o foco principal é o desenvolvimento para dispositivos móveis. A maioria das funcionalidades é gratuita e de uso livre. A biblioteca permite realizar a FFT com alto desempenho e possui latências baixas para o processamento. Para funcionar deve-se usar a JNI para que faça a camada intermediária para o Android.

## 2.12 COMENTÁRIOS FINAIS

Este capítulo apresentou resumidamente alguns aspectos de música, teoria musical, aspectos cognitivos, notas e escalas musicais. Explanou sobre aprendizagem musical, ferramentas matemáticas para análise de áudio e música e as ferramentas e bibliotecas computacionais utilizadas.

Se necessário, o leitor pode consultar as referências que apresentam estes tópicos mais detalhadamente.

O próximo capítulo apresenta o desenvolvimento do projeto SAAM.

### 3 DESENVOLVIMENTO

Este capítulo apresenta o processo de desenvolvimento do aplicativo SAAM. Isso inclui o processo de aprendizagem dos algoritmos utilizados, desenvolvimento dos recursos e das telas do aplicativo e explicação dos fluxos de informações.

#### 3.1 SIMULAÇÃO E TESTE DE ALGORITMOS DO SAAM

Para algumas funcionalidades do SAAM, foi necessário executar simulações dos algoritmos de processamento de áudio (FFT e Yin) em aplicativos MATLAB e OCTAVE, para verificar o correto processamento numérico e funcionamento do algoritmo, para depois implementá-los no aplicativo Android para execução em tempo real. Também foram feitas análises em Python utilizando algumas bibliotecas típicas para análise de ondas e áudio.

##### 3.1.1 Algoritmo de Reconhecimento da Frequência Fundamental Baseado na FFT

Para fazer algumas simulações de reconhecimento da nota, foi utilizado o MATLAB para a verificação da frequência fundamental. No exemplo, o processamento não acontece em tempo real e é usado a FFT para ajustar as definições. Nesse exemplo, são usadas as notas presentes em uma afinação padrão de guitarra ou violão. Primeiro são definidas as notas musicais representadas por: **E (Mi mais agudo)**, **B (Si)**, **G (Sol)**, **D (Ré)**, **A (Lá)** e **E (Mi mais grave)**. Essas notas, quando tocadas sem apertar os trastes do violão representam a afinação padrão de um violão. As frequências das notas são apresentadas na Tabela 3.

**Tabela 3 – Frequências e notas de um violão afinado  
(Autoria Própria)**

	<b>E6</b>	<b>B5</b>	<b>G5</b>	<b>D5</b>	<b>A4</b>	<b>E4</b>
Frequência (Hz)	1318,51	987,77	783,99	587,33	440,00	329,63

O fluxo do algoritmo de afinação pode ser visto na Figura 12 onde  $F_i$  é a frequência de entrada e  $F_e$  é a frequência da nota correspondente.

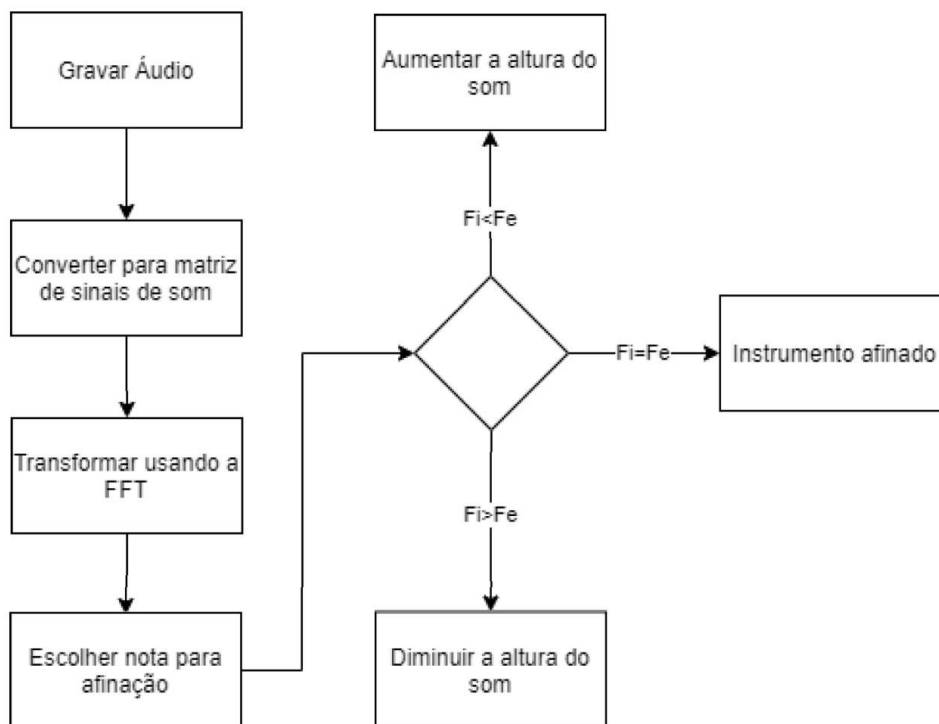
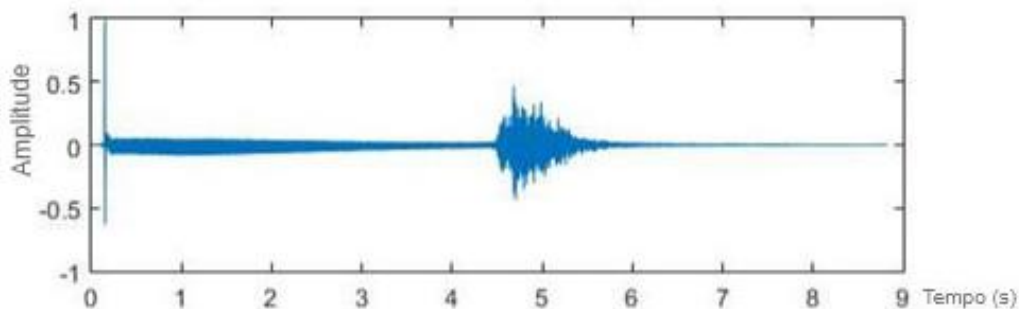


Figura 12 – Fluxograma do algoritmo para reconhecimento de tom (Autoria própria)

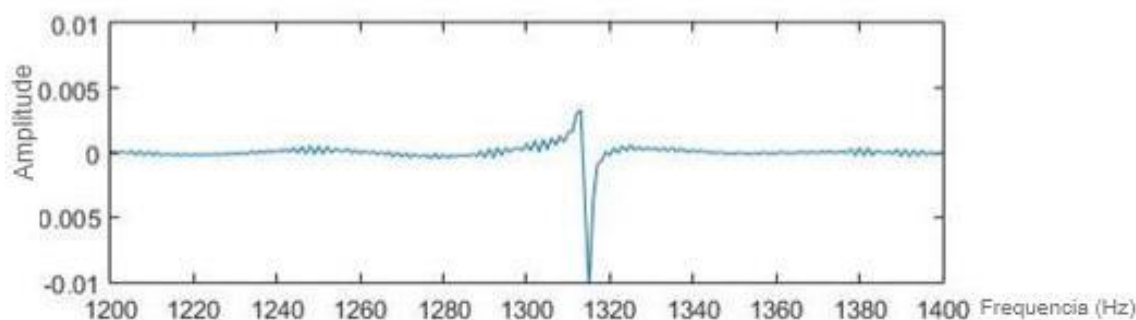
O fluxograma representa o comportamento do algoritmo desenvolvido. O *feedback* não é contínuo porque o gráfico e a extração da frequência fundamental é feita apenas uma vez.

Foi realizado o teste com a nota musical **Mi (E)** do violão previamente afinado e utilizado o MATLAB para ler o arquivo de áudio e aplicado o algoritmo baseado na FFT. O resultado gerou dois gráficos: o de tempo e o da frequência. O gráfico da amplitude em relação ao tempo da nota musical está representado na Figura 13, onde a nota ocorre entre o intervalo de 4 a 6 segundos.



**Figura 13 – Representação da amplitude da nota musical em relação ao tempo (Autoria própria)**

Após o processado o áudio utilizando a FFT, obtém-se o gráfico representado pela Figura 14.



**Figura 14 – Resultados obtidos utilizando o algoritmo de identificação de tom (Autoria própria)**

A Figura 14 indica o sinal original do som tocado pela nota **Mi** do violão. Na Figura 14 é possível observar que a nota está muito próxima da frequência de 1318 Hz (pico negativo), sendo assim, o violão está muito próximo de ser afinado. Conclui-se que a FFT é capaz de identificar a frequência fundamental.

O problema da abordagem da transformada de Fourier é o uso de janelas de áudio, o que pode gerar cortes indesejados nas extremidades de cada amostragem e por esse motivo essa abordagem exige um pós-processamento. Apesar de ser um método eficaz para encontrar a frequência, não é muito adequada para o *feedback* imediato pois necessita de maior poder computacional. Entretanto é muito eficiente para a análise completa de uma música.

### 3.1.2 Afinação Utilizando o Algoritmo Yin

O reconhecedor da frequência fundamental Yin é um dos mais utilizados para reconhecimento de notas. Ele exige menos poder computacional que a FFT e não tem grandes problemas com as extremidades da janela.

Para esse modelo, foi feito uma simulação em Python capaz de reproduzir o comportamento do algoritmo utilizado no aplicativo Android. Utilizando as bibliotecas Aubio que é uma biblioteca de processamento de áudio e Matplotlib que é uma biblioteca para a plotagem de gráficos, foi possível obter a nota utilizando padrão MIDI. Nesse padrão, cada nota é representada por um índice com valor de 0 a 127. O arquivo de som utilizado para o teste tem aproximadamente 20 segundos contendo um **Acorde de Sol Maior**. Normalmente, esse algoritmo é feito para sons monofônicos. A intenção de utilização um acorde é para verificar se ele é capaz de identificar todas as notas presentes e analisar o grau de confiança do algoritmo já que ele é baseado em correlação. O **Acorde de Sol Maior** é constituído das notas **Sol**, **Si**, **Ré**, executadas simultaneamente. O gráfico da Figura 15 representa a forma de onda no tempo do **Acorde de Sol Maior**.

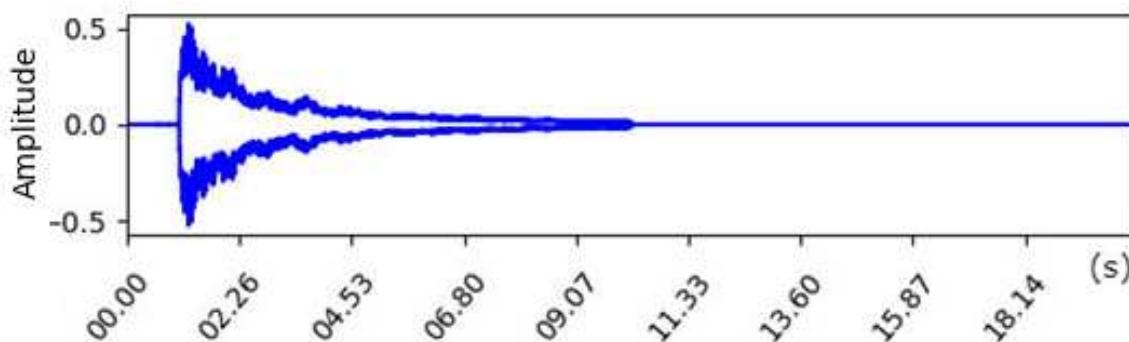


Figura 15 – Gráfico da amplitude do Acorde de Sol Maior  
(Autoria própria)

O gráfico que representa as respectivas notas em codificação MIDI encontradas no algoritmo Yin é representado pelo gráfico da Figura 16.

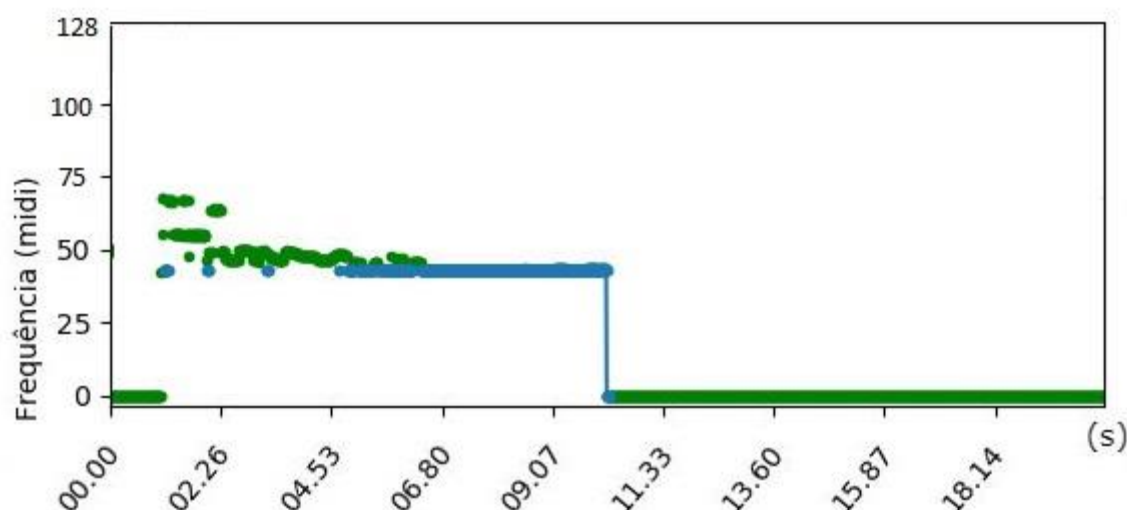


Figura 16 – Gráfico do Acorde Sol Maior com as notas reconhecidas utilizando o algoritmo Yin (Autoria própria)

Na Figura 16 é possível observar a predominância da linha azul que é representada pela nota **Sol**, apresentada pelo valor MIDI 43. Esse valor é extraído utilizando a equação 1 do capítulo 2.5 com a nota de referência **Lá** 440 Hz. Essa duração é bem predominante nos períodos de 4,53 segundos até 10 segundos. Nesta faixa, é possível observar na Figura 17 que o grau de confiança aumenta significativamente, comprovando que a nota é **Sol** em sua predominância.

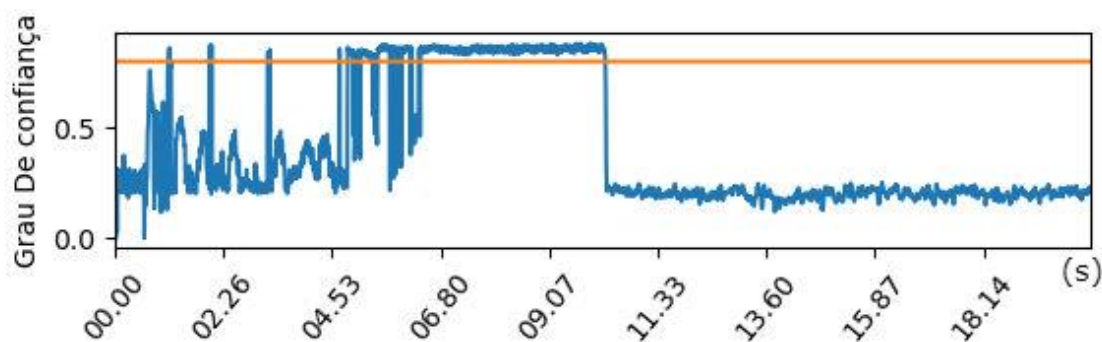


Figura 17 – Grau de confiança do áudio analisado (Autoria própria)

Analisando o intervalo entre 0 a 4 segundos, o grau de confiança é menor e possui mais notas ao mesmo tempo. Utilizando a função zoom do Matplotlib é possível obter a Figura 18 onde é possível discriminar cada nota que foi identificada.

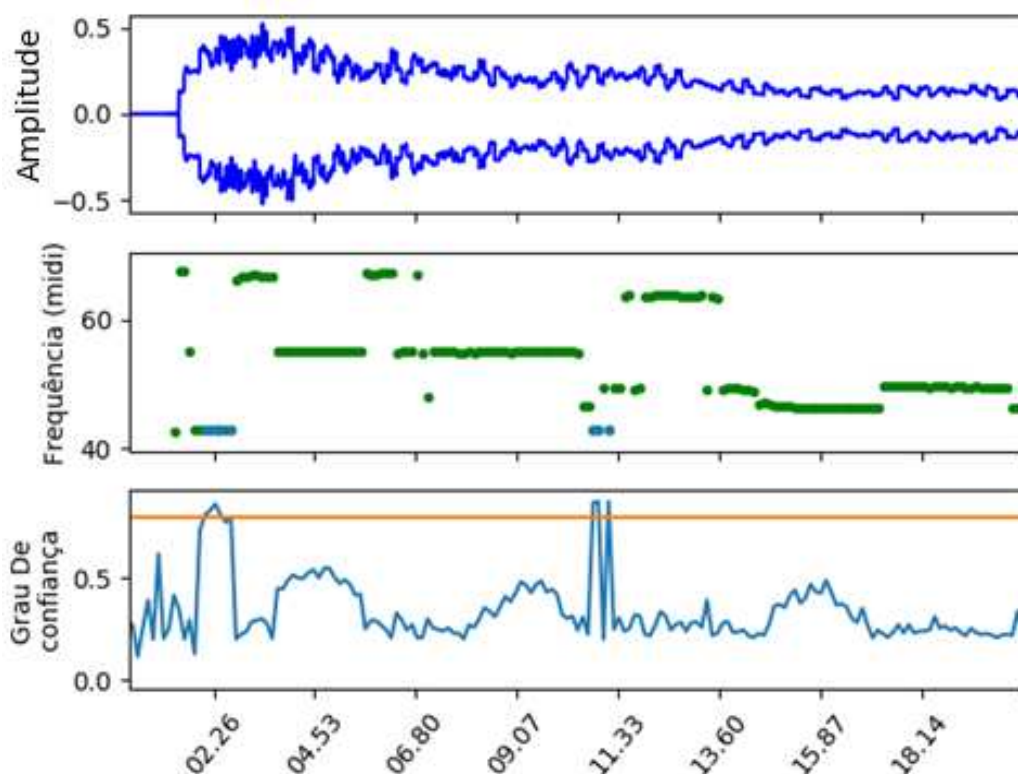


Figura 18 – Análise inicial das notas  
(Autoria própria)

É possível observar na Figura 18(b) que os valores MIDI 47 (**Si**), MIDI 50 (**Ré**), MIDI 55 (**Sol**), MIDI 67 (**Sol**), MIDI 62 (**Ré**) são predominantes nas áreas. Todas as notas identificadas fazem parte do **Acorde de Sol Maior**, concluindo-se que com algumas adaptações, é possível melhorar para conseguir extrair mais informações de tons polifônicos. Nesse sentido, ele não é tão preciso como a FFT, que detalha todo o espectro de frequências, mas ele é o algoritmo mais usado em afinadores e identificadores pela precisão e por exigir pouco processamento computacional e mais confiável quando somente uma nota é tocada.

### 3.2 DESENVOLVIMENTO ANDROID DO SAAM

O desenvolvimento do aplicativo Android foi separado nos seguintes módulos:

- **Reprodução;**
- **Afinação;**
- **Alteração de ritmo;**
- **Extração de informações.**



O módulo de reprodução é necessário para executar a reprodução da música selecionada.

O módulo de afinação é uma ferramenta indispensável para músicos de todos os níveis. Ele foi desenvolvido seguindo os padrões dos afinadores digitais mais comuns e afina os instrumentos de acordo com a escala temperada.

O módulo de alteração de ritmo pode ajudar na compreensão da música ou melhorar a ritmo de reprodução dos exercícios.

O módulo de extração de informações consegue dados importantes como BPM, tom da música e intensidade média.

A interface principal do SAAM é onde são disponibilizadas as funcionalidades do projeto utilizando uma interface como apresentado na Figura 19. Todos os ícones são propriedade da SDK (*Software Development Kit*) do próprio Android. Foi desenvolvido um *grid* para exibição dos ícones.

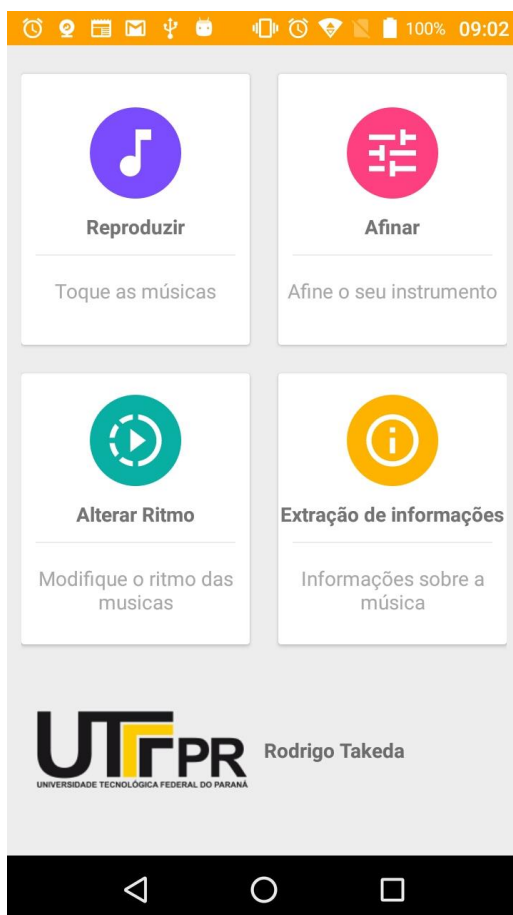


Figura 19 – Tela inicial do SAAM com as suas funcionalidades (Autoria própria)

A primeira opção é **reproduzir** música. Nessa opção é possível selecionar uma música e reproduzir a faixa carregada anteriormente. O carregamento faz uma varredura dos arquivos de áudio do *smartphone* e adiciona e uma lista onde é possível reproduzir a faixa selecionada.

A segunda opção é **afinar** que é uma tela que lê diretamente a entrada do microfone. A opção leva a uma tela com uma interface gráfica interativa de fácil interpretação para a afinação do instrumento.

A terceira opção é **alterar ritmo** que é uma tela semelhante à tela de reprodução, mas contém uma opção extra para alteração de ritmo. A alteração de ritmo tem um componente que é capaz de alterar a ritmo de reprodução da música em porcentagem.

A última opção é **extração de informações** da música como BPM, tom da música e intensidade média do som.

Para gerir todas as informações entre as telas foi desenvolvida uma classe estática que armazena o endereço dos arquivos para todas as músicas selecionadas pelo usuário.

Essas informações são compartilhadas entre as funcionalidades do aplicativo como representado na Figura 20. Após o fechamento do programa, essa lista é perdida, ou seja, a lista não é guardada em um arquivo ou banco de dados local.



Figura 20 – Diagrama dos recursos compartilhados entre as atividades (Autoria própria)

Os recursos carregados em uma atividade podem ser usados em outras para facilitar a usabilidade do aplicativo.

### 3.2.1 Comunicação JAVA Native Interface

Para conseguir criar uma camada JNI, o aplicativo Android deve ter a NDK instalada. A NDK é a abreviação de *Native Development Kit*, e ele permite acesso direto a recursos de hardware. Com esse pacote instalado, foi necessário carregar as bibliotecas com um inicializador estático. Foi utilizado a ferramenta CMake e criado um arquivo de configuração que vai adicionar a biblioteca Superpowered e o códigos fontes necessários para a compilação. Para isso foi criado uma pasta nomeada JNI. A pasta contém um arquivo de texto que define os caminhos dos arquivos que serão utilizados para o CMake compilar e os próprios códigos fontes em C++ ou C.

Para fazer uso desses objetos foi utilizada uma estrutura que acessa os códigos fontes contidos na pasta JNI. Com o JNIExport é possível chamar uma função oriunda do C++ colocando o caminho inteiro do arquivo separado por um *underline*. Com isso é possível retornar um ponteiro contendo o ambiente JNI e o objeto que será transportado entre ambientes. O aplicativo utiliza esse recurso para transportar objetos que foram processados em C++ para a exibição dentro do aplicativo Android.

### 3.2.2 Módulo Afinador do SAAM

Para o módulo afinador do aplicativo Android foi utilizada a biblioteca Tarsos DSP. A biblioteca foi escolhida por ser uma biblioteca JAVA de maior facilidade em adaptar em uma interface gráfica sem a necessidade de usar o JNI. Com ela é possível ler a frequência capturada pelo microfone e exibir de forma utilizável pelo usuário, como apresentado pela Figura 21.

O gráfico *gauge* apresenta uma escala de frequência, sendo a faixa central na cor cinza a faixa da frequência da nota. A extremidade esquerda, o início da escala *gauge*, indica meio tom abaixo da nota. A extremidade direita, o final da escala *gauge*, indica frequência de meio tom acima da nota.

Quando o indicador estiver na faixa central, o instrumento está afinado.

A entrada na atividade de afinação inicia as seguintes tarefas:

- A *thread* lê constantemente a entrada de áudio e identifica a frequência utilizando como base o algoritmo Yin;

- Utilizando a equação 1 do capítulo 2.5 com a nota Lá (440 Hz) de referência é possível extrair um valor próximo que corresponde a nota mais próxima a entrada de áudio.

O Processo pode ser observado no fluxograma da Figura 22.

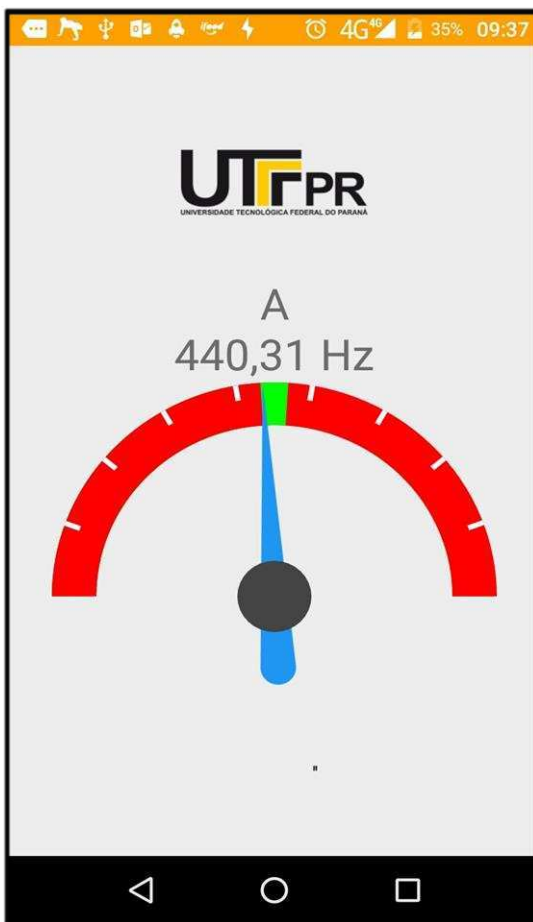
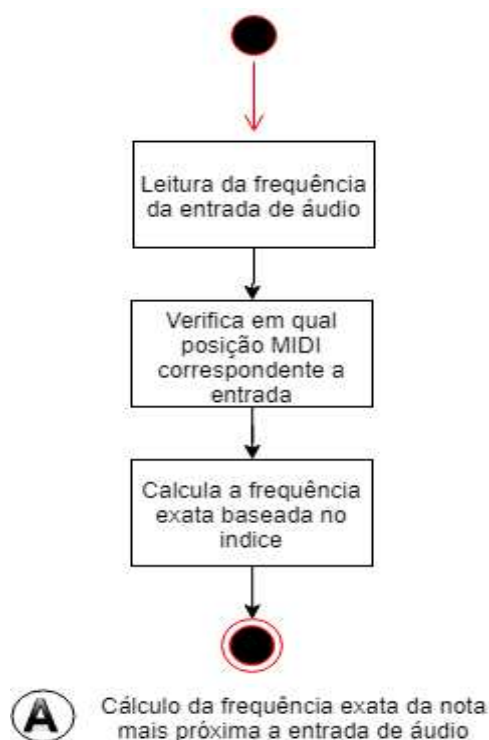


Figura 21 – Tela do SAAM do módulo afinador  
(Autoria própria)



**Figura 22 – Diagrama de conversão MIDI para nota musical (Autoria Própria)**

Com a nota mais próxima da frequência de entrada do microfone, é possível utilizar um gráfico do tipo *gauge* onde o valor central apontado na área verde é considerado afinado. Para fazer isso é feita uma comparação entre o valor lido pela entrada de áudio e o valor exato da frequência da nota extraída. O processo é parecido com a auto correlação.

Os valores de referência são a nota mais próxima do valor lido como a parte central, meio tom acima como a nota da borda superior e meio tom abaixo como a borda inferior.

O processo é exibido na Figura 21, e quanto mais próxima da área verde central, mais próximo de afinado está o instrumento. O algoritmo de afinação é representado pelo fluxograma da Figura 23.

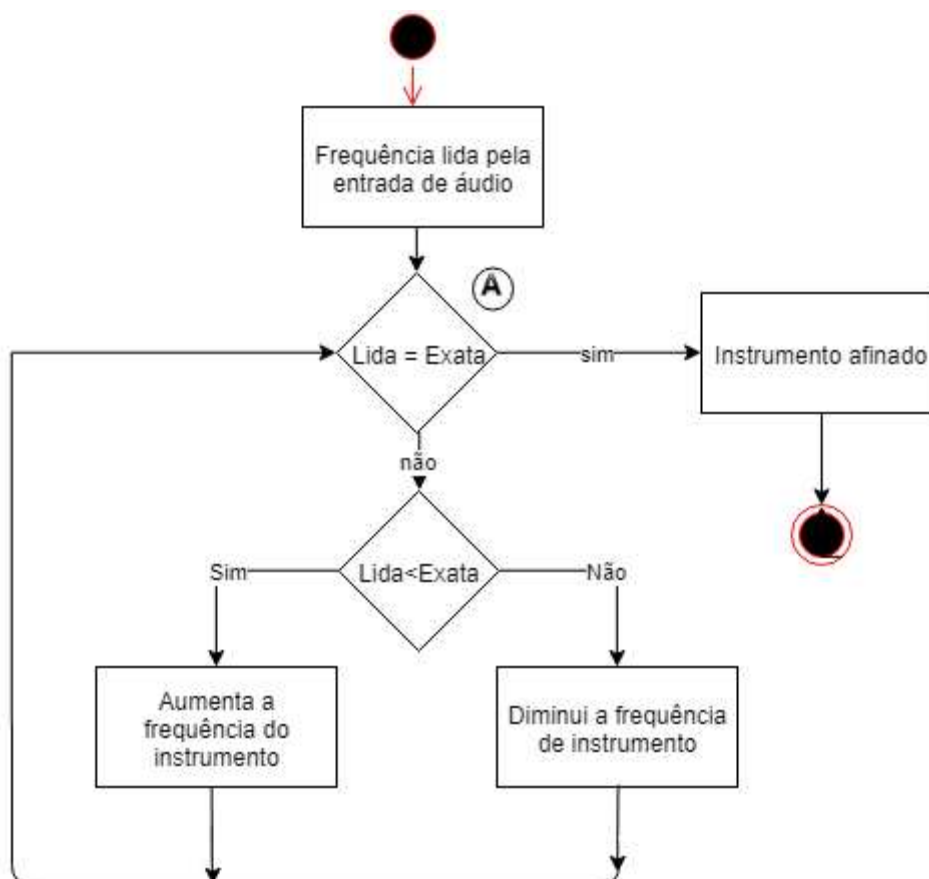


Figura 23 – Diagrama do *feedback* do módulo afinador para o usuário do SAAM (Autoria própria)

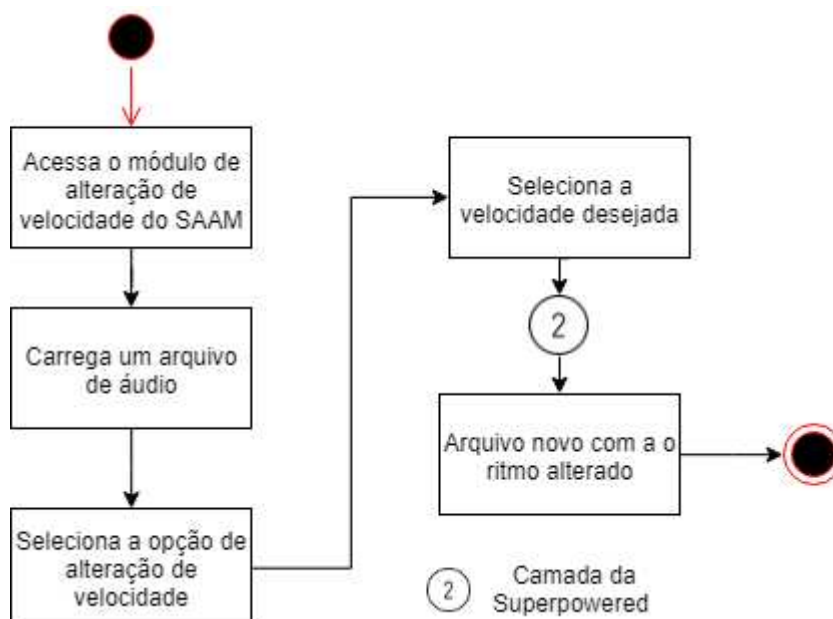
### 3.2.3 Módulo de Alteração de Ritmo do SAAM

A alteração de ritmo da música teve auxílio da biblioteca Superpowered para ser desenvolvida. Essa biblioteca foi desenvolvida para ser utilizada em JNI, ou seja, as funções que ela possui devem ser escritas em C++.

No Android, existe uma camada que conecta com a JNI, e consegue utilizar as funções que foram escritas em C++ o que acarreta em uma melhoria de desempenho.

Na parte da aplicação Android, é necessário carregar um arquivo de música para ser processado pela Superpowered.

O fluxo do processo será separado na camada Android conforme o fluxograma da Figura 24. O processo é a parte de interação do usuário.



**Figura 24 – Fluxograma da alteração de ritmo de reprodução de música no SAAM (Autoria própria)**

Primeiro o usuário deve selecionar o arquivo de áudio para ele ser carregado em uma lista e deve selecionar a porcentagem utilizando a interface como observado na Figura 25.

Uma *popup* foi criada ainda em Android nativo para o usuário selecionar a porcentagem do ritmo de reprodução da música do novo arquivo. Após selecionar a porcentagem, o programa faz uma chamada em JNI para criar um arquivo de música com a velocidade alterada. O processo da JNI é descrito na Figura 26. Caso o arquivo não exista ou o caminho do arquivo seja corrompido ou inexistente, o decodificador da Superpowered nem inicia a conversão. O aplicativo SAAM utiliza a classe *Timestretch* que processa as informações até a criação do novo arquivo. Esse processo demora de acordo com o tamanho do arquivo de áudio.

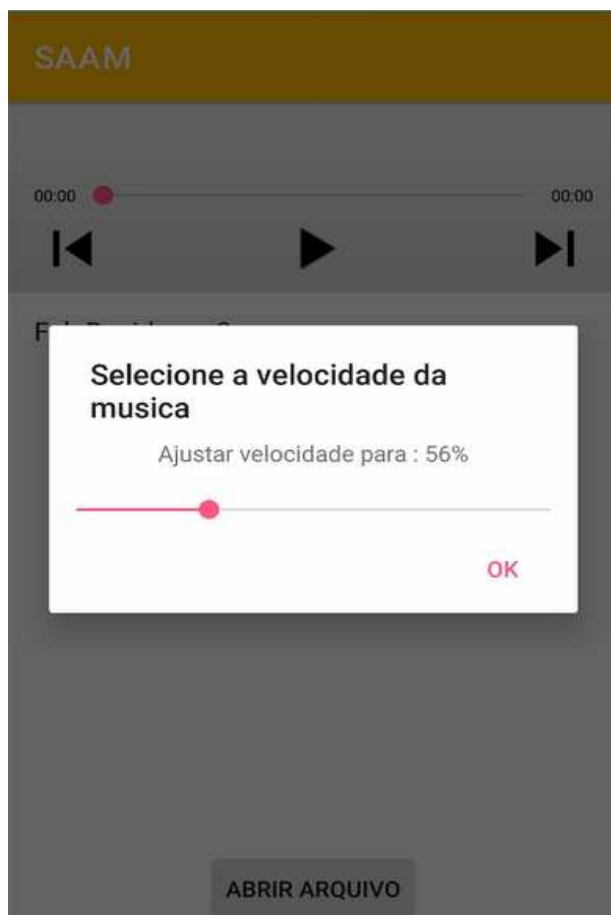


Figura 25 – Tela do SAAM com o modal contendo a mudança de ritmo em porcentagem (Autoria própria)

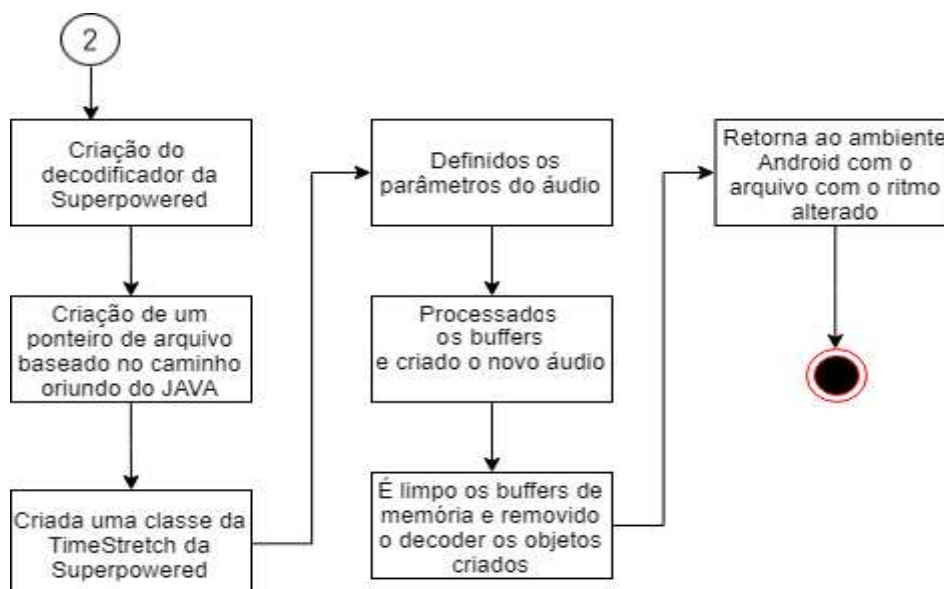
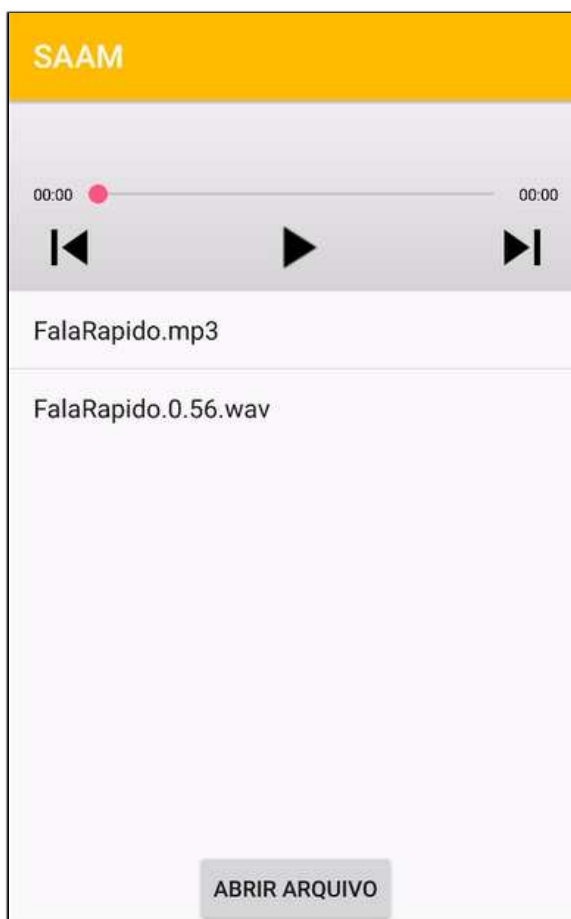


Figura 26 – Processo feito pela Superpowered em JNI para o novo arquivo com o ritmo alterado do SAAM (Autoria própria)



Após o arquivo ser processado, um novo arquivo de áudio é criado como observado na Figura 27. Sempre quando é processado um arquivo é feita uma nova varredura no sistema para que o arquivo fique selecionável para o usuário.



**Figura 27 – Tela do SAAM gerando um arquivo de áudio com o ritmo alterado (Autoria própria)**

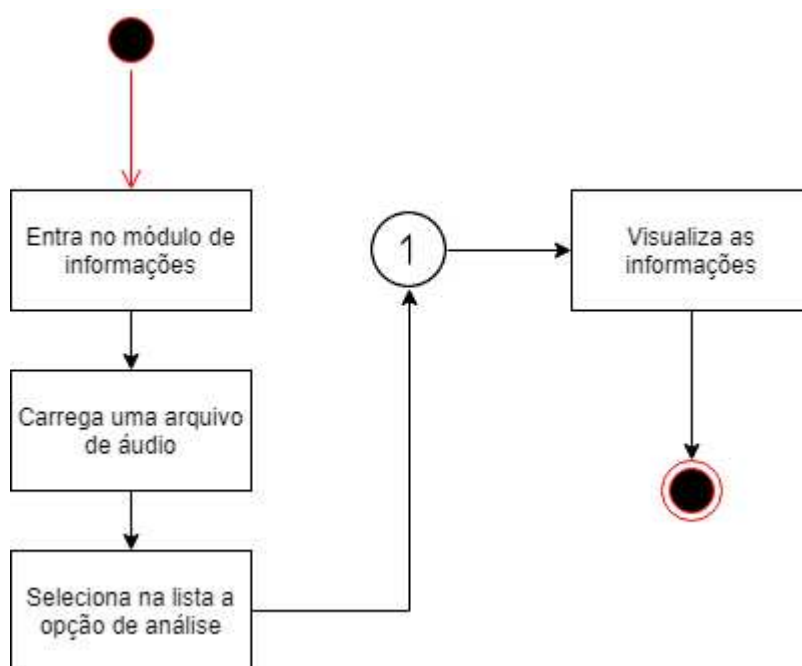
O arquivo segue um padrão de nome baseado no nome original acrescido do percentual de ritmo selecionado.

Depois de gerado o arquivo com o ritmo alterado, o usuário pode selecionar o arquivo em qualquer reproduzidor de áudio e ele permanece com o ritmo alterado.

#### 3.2.4 Módulo de Extração de Informações do SAAM

A extração de informações retorna o BPM, a tonalidade e a intensidade média do som da música. Essas funções são experimentais e possuem acuidade dependente da variação inerente ao tipo de música.

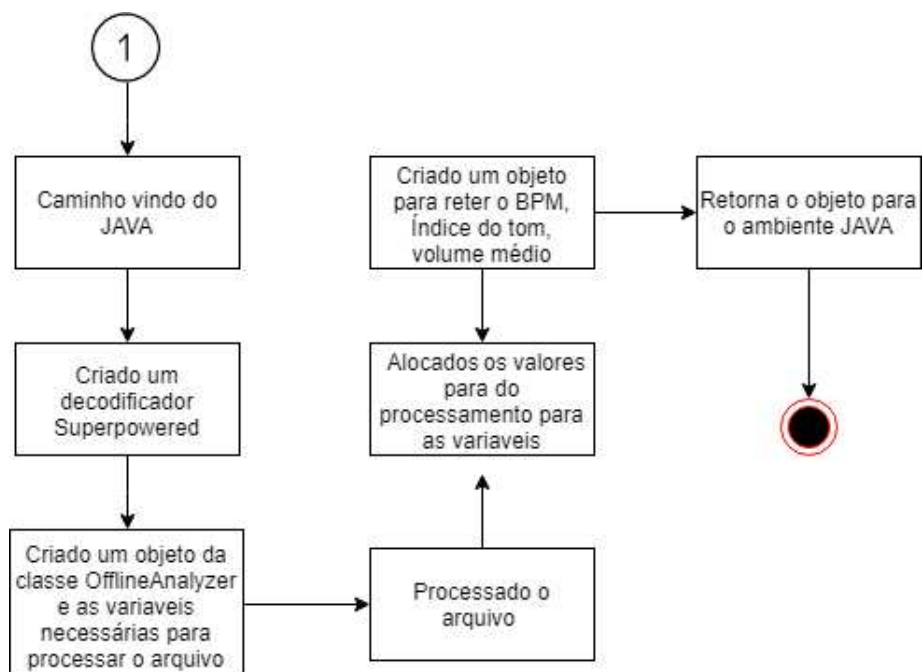
O processo funciona de maneira análoga as outras funções. O usuário seleciona a música, a camada da Superpowered processa o arquivo de áudio com o mapeamento das notas e conseguem retornar informações relevantes como tom da música, BPM e intensidade média do volume. A interação do usuário para conseguir extrair essas informações é apresentada no fluxograma da Figura 28.



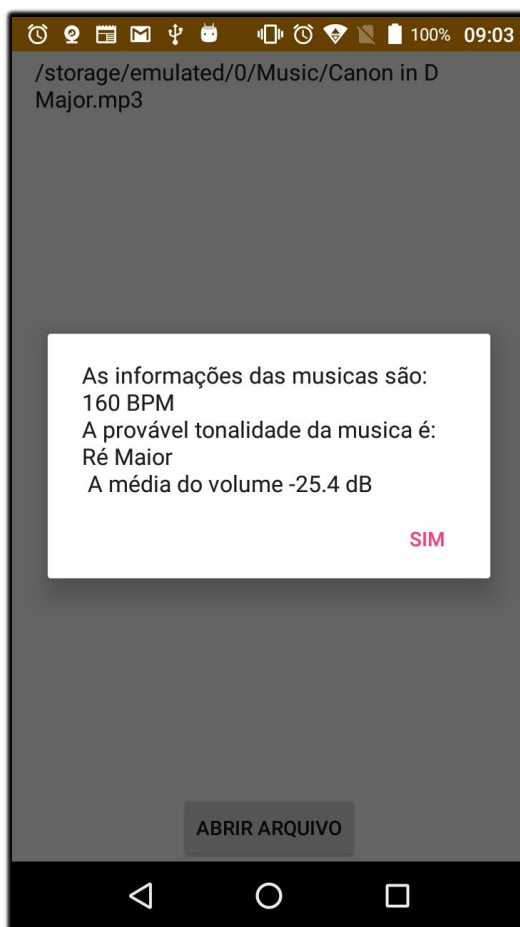
**Figura 28 – Fluxograma de acesso a informação  
(Autoria própria)**

Na camada Superpowered é feito um decodificador utilizando o caminho do arquivo e é processado até retornar as informações necessárias para o ambiente Android. Para isso é criada uma classe *OfflineAnalyzer* que cria um objeto capaz de retornar as informações para o Java. O processo é descrito no fluxograma da Figura 29.

Após o processamento são exibidas as informações da música no *smartphone*. As informações podem ser vistas conforme a Figura 30. As limitações da análise é que ela é capaz de analisar somente músicas na escala maior e menor.



**Figura 29 – Processo da Superpowered para extração de informações (Autoria própria)**



**Figura 30 – Tela do SAAM com informações da música após análise (Autoria própria)**

### 3.3 COMENTÁRIOS FINAIS

Este capítulo apresentou as etapas de desenvolvimento do SAAM.

Nem todas as etapas são de fácil entendimento para o leitor leigo, mas procurou-se apresentar as informações de forma simples e completa, para todas as etapas necessárias para o desenvolvimento do aplicativo Android.

O próximo capítulo apresenta resultados dos testes com o aplicativo.

## 4 RESULTADOS

Este capítulo apresenta resultados de experimentos e testes com as funcionalidades do aplicativo. Serão utilizados alguns sons extraídos de um violão real. Para a extração de informações serão utilizadas músicas prontas com licença de uso livre e com informações oficiais.

Foi desenvolvida uma sequência de experimentos e testes aplicados pelo autor do projeto, sendo apresentados na sequência.

### 4.1 PROCEDIMENTOS DE AFINAÇÃO DO INSTRUMENTO

Para os resultados dos comparativos de afinação, foi utilizado um diapásão e um violão de nylon de seis cordas. Para o violão ser considerado afinado, todas as seis cordas precisam estar em notas específicas indicadas pelo visor. Para afinar, é necessário saber as notas de afinação do instrumento e como aumentar ou diminuir a altura para chegar à frequência fundamental da nota.

### 4.2 COMPARATIVO DE AFINAÇÃO

Para realizar testes no afinador foi aplicada uma entrada de áudio no microfone. Foram utilizados um diapásão que emite uma nota Lá 440 Hz e notas previamente afinadas utilizando um violão de cordas de nylon. Na Figura 31 é possível observar o comportamento do afinador do SAAM ao ler um diapásão.

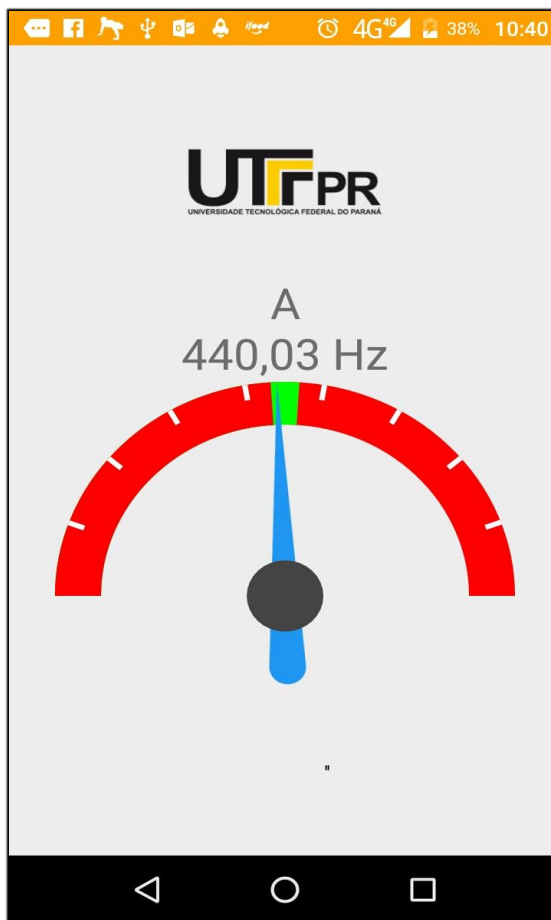


Figura 31 – Tela do SAAM com a leitura de uma entrada de microfone com o sinal do diapasão (Autoria própria)

Utilizando um violão e tocando a corda que emite a nota **Mi**, o aplicativo teve o comportamento que pode ser observado na Figura 32.

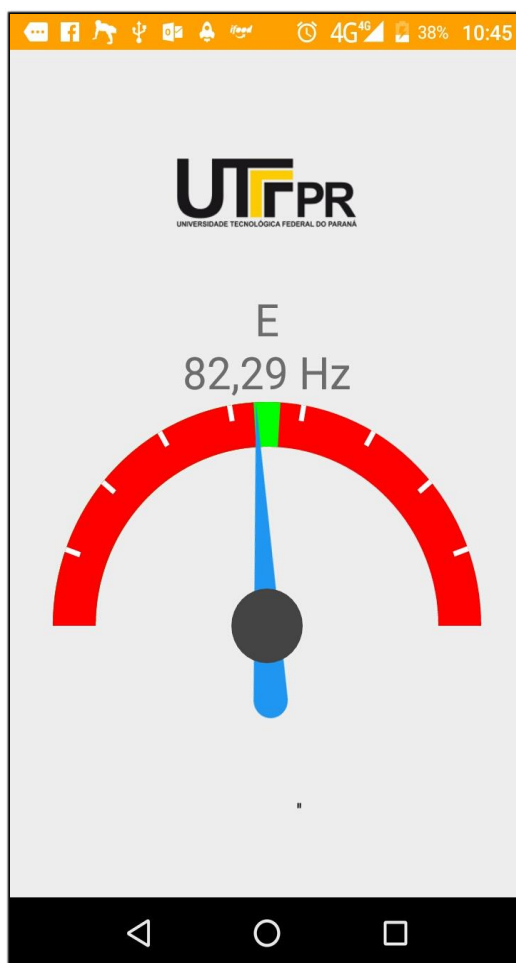
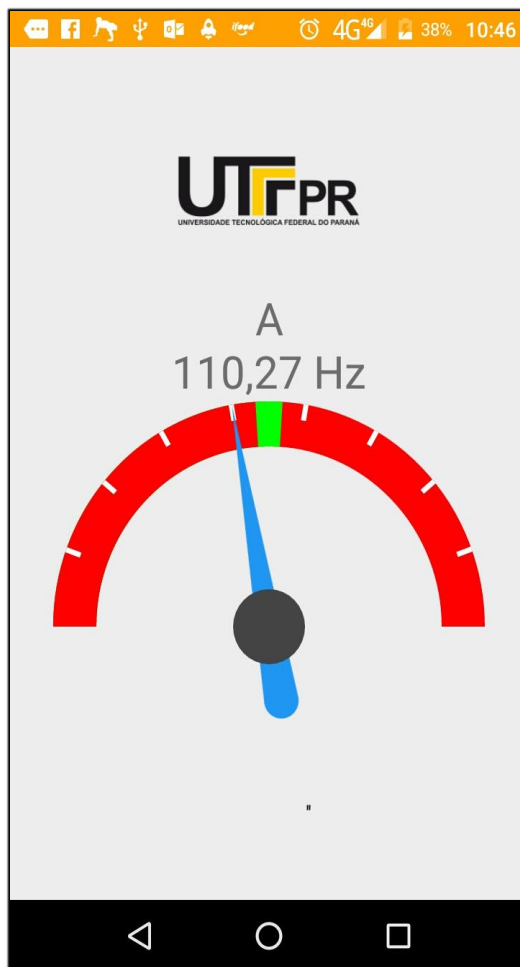


Figura 32 – Tela do SAAM em um exemplo de afinação de um violão (Autoria própria)

As notas mais graves são de reconhecimento mais difícil. Foi preciso uma distância menor entre o microfone do celular e o instrumento para uma captura precisa. Uma das possíveis causas são as especificações dos microfones embutidos nos *smartphones* e as limitações das extremidades do algoritmo Yin, além da captação do som ambiente.

Também foram testadas múltiplas notas tocadas em um violão com cordas de nylon. O **Acorde de Lá Maior** constituído pelas notas **Lá, Mi, Dó sustenido** também teve resultados satisfatórios como apresenta a Figura 33 onde a nota lá foi predominante.

O aplicativo SAAM atendeu as expectativas para afinar o violão de cordas de nylon satisfatoriamente em um ambiente com baixo nível de ruído.



**Figura 33 – Tela do SAAM com o comportamento durante o Acorde de Lá Maior (Autoria própria)**

#### 4.3 COMPARATIVOS DA EXTRAÇÃO DE INFORMAÇÕES

Para analisar alguns aspectos musicais, foram retiradas músicas do site Incompetech (Disponível em <https://incompetech.com/>) que tem músicas *royalty free* para a utilização em projetos.

Todas as músicas selecionadas apresentam tonalidade e BPM extraída do próprio site.

A Tabela 4 mostra os valores extraídos pelo aplicativo e os dados provenientes do site.



**Tabela 4 – Levantamento de dados do módulo de extração de informações (Autoria própria)**

Nome	Tonalidade (Site)	Tonalidade (App)	BPM (Site)	BPM (App)	Autor
Canon in D	<b>Ré Maior</b>	<b>Ré Maior</b>	80	160	Pachelbel
Sinfonia 3	<b>Ré Maior</b>	<b>Ré Maior</b>	98	196	J.S. Bach
Sonatina	<b>Dó Menor</b>	<b>Dó Menor</b>	75	150	Kevin MacLeod
Toccat e Fugue	<b>Ré menor</b>	<b>Ré Menor</b>	80	122	J.S. Bach

Na extração de informações, o aplicativo foi capaz de acertar todas as tonalidades das músicas clássicas, mas a informação foi imprecisa em relação ao BPM. A extração de informação do BPM é difícil até para um músico, pois há uma dificuldade de diferenciar a duração das notas dentro de um intervalo de tempo (GRAMANI, 2008). Na maioria das músicas testadas, foi identificado o dobro do BPM. Uma das possíveis causas é a identificação de subsecções e da mudança de BPM que pode ocorrer durante a música. (GRAMANI, 2008) afirma que existem aspectos subjetivos em relação ao ritmo e que a própria separação de harmonia e ritmo é inadequada para o ensino da música.

#### 4.4 MUDANÇA DE RITMO

Para a mudança de ritmo, foram utilizadas músicas de uso livre e verificado a duração após a o processamento.

A Tabela 5 indica as músicas e sons utilizados para o teste.

**Tabela 5 – Duração dos áudios após a mudança de ritmo (Autoria própria)**

Nome do áudio	Operação (%)	Duração Normal (s)	Duração Estimada (s)	Duração no aplicativo (s)
Canon in D Major	200	355	177.5	178
Canon in D Major	50	355	710	710
Jingle Jonhson	71	30	42.25	42

As durações dos áudios ficaram dentro da faixa esperada. As possíveis diferenças são devido aos arredondamentos da exibição.

#### 4.5 COMENTÁRIOS FINAIS

Este capítulo apresentou os testes realizados com o aplicativo Android SAAM.

O próximo capítulo finaliza apresentando as conclusões, sugestões de continuação do projeto e comentários finais do trabalho.

## 5 CONCLUSÕES

O Sistema de Apoio ao Aprendizado Musical (SAAM) foi iniciado com a premissa de que os processos cognitivos em música são abrangentes, não lineares e implicam em funções psicológicas distintas para a aprendizagem de música.

O contexto para o ensino da música tem profundas mudanças num mundo tecnológico, no qual as práticas de ensino tradicional da música vêm certamente se juntar aos novos modelos de aprendizagem e acompanhamento.

Segundo TIC (2019) o acesso por celulares à internet na área urbana é de mais de 90% da população entre 9 a 17 anos em 2018. É perceptível que os jovens cada vez mais se encontram nos aparelhos móveis como um refúgio para interação, relacionamentos e perspectivas de aprendizagem. Longe de analisar as consequências desta mudança de comportamento, o que está acontecendo é um fato, e como tal deve ser analisado, compartilhado e utilizado como uma oportunidade de aprendizagem.

Por outro lado, a música é uma fonte de pesquisas em diversas áreas, não eliminando sua importância, ao contrário, aumentando sua influência no comportamento e na interação social dos jovens.

O aplicativo SAAM conseguiu atingir os objetivos propostos de apoio ao aprendizado musical em condições específicas. Ele ainda depende do grau de conhecimento do usuário, da propriedade no uso de aplicativos e nas condições de aprendizagem. Em relação aos aspectos técnicos, os objetivos foram devidamente alcançados, pois é um trabalho de Engenharia de Computação que implementa algoritmos de processamento digital de sinais em tempo real aplicados em música. Neste sentido, foi possível afinar um instrumento de corda com o auxílio do aplicativo, reproduzir uma música com o ritmo alterado sem alterar as características principais e extrair informações das músicas como BPM, tonalidade e intensidade média.

Existem concorrentes nessa área de afinação como o *ATuner* que apresenta desempenho superior, mas eles normalmente possuem somente uma função. Uma das vantagens do SAAM é reunir diversas ferramentas em um único aplicativo.

Com relação à diminuição de ritmo da música, apesar de apresentar algumas distorções, o áudio continuou contendo suas características principais como altura e

timbre dos instrumentos. A extração de informações da música pode ajudar músicos iniciantes a treinar alguns conceitos musicais básicos como tonalidade e BPM.

Uma delimitação para avaliação mais ampla dependerá do acompanhamento posterior com usuários, pois o próprio ensino da música é muito amplo, mesmo considerando um processo de iniciação de aprendizagem.

Para o desenvolvimento deste projeto foram utilizados os conhecimentos das seguintes disciplinas durante o curso de graduação em Engenharia de Computação: Programação, Estrutura de Dados, Análise de Sistemas Lineares.

## 5.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Durante o desenvolvimento e testes do aplicativo SAAM foram observadas algumas melhorias que poderiam ser implementadas, mas que não estavam no escopo inicial do projeto e atrasariam a finalização e a defesa.

Seria interessante se o processo de afinação fosse otimizado em tempo de execução e no uso. Uma melhoria no tempo de resposta aliado com informações sobre a afinação de alguns instrumentos de corda mais utilizados, na forma de um *wizard* ou tutorial facilitaria o processo.

Uma melhoria para a função de alteração de ritmo seria a criação de um *buffer* de memória para que não fosse sempre gerado um arquivo novo para cada alteração de ritmo de reprodução da música.

Precisa-se aprimorar o algoritmo de detecção das batidas por minuto da música devido a uma taxa de detecções errôneas dependendo do tipo de música.

Também é necessário verificar a licença da biblioteca Superpowered que teve algumas mudanças desde o início do desenvolvimento do aplicativo. Na época de início do projeto, a versão utilizada da biblioteca Superpowered era *free access*.

Para facilitar o desenvolvimento deste tipo de trabalho, seria interessante os autores procurarem capacitação formal nas áreas de Teoria Musical e de Processamento Digital de Sinais com aplicação em áudio e música.

A banca de defesa do trabalho sugeriu diversas ideias que podem ser desenvolvidas e acrescentadas no aplicativo numa versão futura, de forma a facilitar e ajudar o usuário no aprendizado musical.

O aplicativo pode conter a funcionalidade de metrônomo como forma de melhorar a quantidade de ferramentas disponíveis. O usuário especifica o número de BPM, e o aplicativo gera a cadência dos toques.

Para facilitar o uso da mudança de ritmo, o indicador de velocidade da música, ao invés de um índice percentual, deve-se utilizar o BPM, que é a medida mais utilizada pelos músicos.

Além disso, deve ser desenvolvida para o aplicativo uma interface mais amigável e intuitiva, com apoio e estudo de um especialista em design de interface e de experiência do usuário.

Os testes do aplicativo SAAM foram realizados pelo desenvolvedor do trabalho na forma de teste de validação da ideia. A banca ainda sugeriu que na continuação do trabalho, disponibiliza-se o aplicativo para uma turma de aprendizes de música para efetuarem o uso e uma avaliação de usabilidade do aplicativo no auxílio ao aprendizado musical com sugestões de melhoria.

Deixam-se estes comentários e sugestões para o desenvolvimento de novos trabalhos a partir deste.

## 5.2 IMPRESSÕES PESSOAIS NA EXECUÇÃO DO TCC

A multidisciplinariedade do projeto e as muitas correlações foram o maior desafio no TCC. Na disciplina de Estrutura de Dados, por exemplo, é ensinado sobre as classes estáticas que foram utilizadas pelo compartilhamento de caminhos dos arquivos do aplicativo. Outro exemplo é transformada de Fourier, apresentada na disciplina de Análise de Sistemas Lineares, que foi utilizada para detectar a frequência fundamental nas simulações.

Aliar os conhecimentos adquiridos durante o curso de Engenharia de Computação a área de Teoria Musical, onde não tenho formação acadêmica se provou um grande desafio. A Teoria Musical já possui diversas áreas de conhecimento, e relacionar a área utilizando a matemática foi um dos maiores desafios.

O conhecimento acadêmico de Teoria Musical aliado a complexidade do desenvolvimento de software dificultou o entendimento e a finalização do projeto.

Existiram muitas dificuldades relacionadas à documentação das bibliotecas, algo comum nessa área de desenvolvimento com bibliotecas *open source*.

Para desenvolver o SAAM foram necessários: estudo de Teoria Musical, Programação Mobile e partes específicas da programação não lecionadas durante o curso de graduação em Engenharia de Computação. Um dos fatores que poderia auxiliar a execução do projeto seria disponibilizar disciplinas como Teoria Musical, capacitando e facilitando o desenvolvimento do trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMS, R. **A escala maior.** 2005. Disponível em: <<http://www.jazzbossa.com/teoria/aulas/21.escalamaior.html>> Acesso em 23 de junho de 2020

BARRY, Nancy H; HALLAM, Susan. Practice. In: PARNCUTT, Richard; MCPHERSON, Gary. *The Science & Psychology of Music Performance: Creative Strategies for Teaching and Learning.* Oxford University Press, Nova York, 2002. p.151-166.

BURNARD, Pamela, **Bodily intention in children's improvisation and composition.** *Psychological of Music*, 27, p. 159-17. Estados Unidos 1999.

BURNARD, Pamela, YOUNKER, Betty **A. Mapping pathways: fostering creativity in composition.** *Music Education Research*, 14, N0, 2, p. 345-261. Estados Unidos, 2002.

CAMPOS, Gilka M de Castro. **A Formação de Professores de Música para a Educação Básica na Região Centro-oeste.** Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2015.

CHEVEIGNÉ, Allain, KAWAHARA, Hideki. **YIN, a fundamental frequency estimator for speech and music,** France:, 2001.

COSTA, Doris, **an investigation into instrumental pupils' attitudes to varied, structured practice: two methods of approach,** *British Journal of Musical Education*, 16: 1, p. 66-77. Inglaterra, 1999.

CSIKSZENTIMIHALYI, Mihaly, **Beyond boredom and anxiety,** São Francisco: Jossey-Bass, 1975.

DEAN, James, **Path Metheny's Finger Routes: The Role of Muscle Memory in Guitar Improvisation,** 2014.

ERICSSON, K, Anders, KRAMPE, Ralf Th, e TESCH-ROMER, Clemens. **The role of deliberate practice in the acquisition of expert performance**. Psychological Review, 100, No 3, p 363-406, 1993.

GRAMANI, José Eduardo, **Rítmica Viva – A consciência musical do ritmo**. Editora Unicamp. Campinas. 2008.

GREEN, Lucy. **How Popular musicians Learn**, Adershot: Ashgate, 2001.

GROUT, Donald J; PALISCA, Claude V. **História da Música Ocidental**. Tradução de Ana Luísa Faria. Portugal, 2007.

LEHMANN, Andreas C, **The acquisition of expertise in music. Efficiency of deliberate practice as moderating variable in accounting of sub-expert performance**. In Irine Deliege. John Sloboda (eds.), **Perception and cognition of Music**, Ed. East Sussex: Psychology Press. 1997.

LEVITIN, D. J. **Em busca da mente musical**. In: ILARI, B. (Org.) **Em busca da mente musical: ensaios sobre os processos cognitivos em música – da percepção à produção**. Editora da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

MARTINS DE CASTRO E CAMPOS, Gilka. **A Formação de Professores de Música para a Educação Básica na Região Centro-Oeste**. Tese de doutorado em Educação. Goiás. 2015.

MED, Bohumil. **Teoria da Música**. Brasília. Musimed 4 ed. 1996.

MILLETTO, Evandro M. **Educação Musical Auxiliada por Computador: Algumas Considerações e Experiências**. CINTED-UFRGS V. 2 N 1. 2004.

NIELSEN , Siw G. **Self-regulating learning strategies in instrumental music practice**. Music Education Research, 3, No 2, p. 155-168, 2001.

NOGUEIRA, Monique A. **A música e o desenvolvimento da criança**. Revista da UFG, Goiás, 2004.



OPPENHEIM, A.V., SCHAFER, R. W., **Discrete-Time Signal Processing**. 3a Ed. Prentice Hall, 2010.

PFUTZENREUTER, A. C. **Tocar/Jogar Rocksmith: As experiências de Flow de jovens guitarristas que jogam games de música**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Música da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2013.

RATTON, M. **Quando a matemática rege a música**. 2003. Disponível em: <[http://www.dirsom.com.br/index\\_htm\\_files/Matematica%20%26%20Escalas%20Musica%20cais.pdf](http://www.dirsom.com.br/index_htm_files/Matematica%20%26%20Escalas%20Musica%20cais.pdf)>. Acesso em 23 de junho de 2020.

ROEDERER, Juan G. **Introdução à física e psicofísica da música**. Edusp. São Paulo. 2002.

SANTIAGO, Patrícia Furst, **The application of Alexander Technique principles to piano teaching for beginners**. Belo Horizonte, 2006.

SANTIAGO, Patricia. **A integração da prática deliberada e da prática informal**, Per Musica p 52-62, n 13. Belo Horizonte, 2006.

SENOI ILARI, Beatriz (org). **Em busca da mente musical**. Editora UFPR. Curitiba. 2006.

SILVA, Felix. **Musica na Escola publica: Desafios e soluções**. Escola de música e artes do Paraná, Curitiba, Paraná, 2008.

SUITS. B. H. **Physics of the music**. 1998. Disponível em:<<https://pages.mtu.edu/~suits/NoteFreqCalcs.html>>. Acesso em 23 de fevereiro de 2018.

SWANWICK, Keith e FRANÇA, Cecília Cavalieri. **Composing, performing, and audience-listening as indicators of musical understanding**. British Journal of Music Education, 16, P, 5-19, 1999.

TIC. Kids Online Brasil. **Pesquisa sobre o Uso da Internet por Crianças e adolescentes no Brasil**. 2019. Disponível em <

[https://www.cgi.br/media/docs/publicacoes/216370220191105/tic\\_kids\\_online\\_2018\\_livro\\_eletronico.pdf](https://www.cgi.br/media/docs/publicacoes/216370220191105/tic_kids_online_2018_livro_eletronico.pdf) > Acesso em 23 de junho de 2020.

WILLEMS, Edgar. **As bases psicológicas da educação musical** Edições ProMúsica. Bienne, Suíça, 1970.