

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
CENTRO DE INFORMÁTICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INFORMÁTICA

ANDERSON RUFINO DOS SANTOS SILVA

UMA ABORDAGEM BASEADA EM OTIMIZAÇÃO PARA GERAÇÃO DE *LICKS*  
DE GUITARRA

João Pessoa

2019

ANDERSON RUFINO DOS SANTOS SILVA

UMA ABORDAGEM BASEADA EM OTIMIZAÇÃO PARA GERAÇÃO DE *LICKS*  
DE GUITARRA

Defesa de projeto de dissertação apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Informática da Universidade Federal da Paraíba, como requisito para obtenção do Grau de Mestre. Área de Concentração: Computação Distribuída.

Orientador: Prof. Dr. Anand Subramanian

João Pessoa

2019

**Catálogo na publicação**  
**Seção de Catalogação e Classificação**

S586a Silva, Anderson Rufino Dos Santos.

Uma abordagem baseada em otimização para geração de licks de guitarra / Anderson Rufino Dos Santos Silva. - João Pessoa, 2019.

82 f. : il.

Orientação: Anand Subramanian.

Dissertação (Mestrado) - UFPB/Informática.

1. Composição Algorítmica. 2. Solos de Guitarra. 3. Otimização. 4. Cadeias de Markov. I. Subramanian, Anand. II. Título.

UFPB/BC

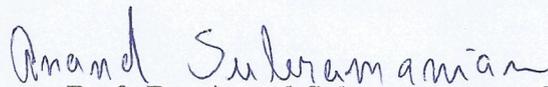
ANDERSON RUFINO DOS SANTOS SILVA

UMA ABORDAGEM BASEADA EM OTIMIZAÇÃO PARA GERAÇÃO DE *LICKS*  
DE GUITARRA

Defesa de projeto de dissertação apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Informática da Universidade Federal da Paraíba, como requisito para obtenção do Grau de Mestre. Área de Concentração: Computação Distribuída.

Aprovada em 30 de agosto de 2019.

BANCA EXAMINADORA

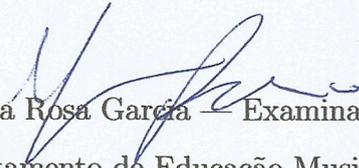


Prof. Dr. Anand Subramanian — Orientador

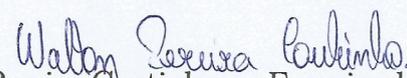
Departamento de Sistemas de Computação — UFPB

  
Prof. Dr. Lucídio dos Anjos Formiga Cabral — Examinador Interno

Departamento de Computação Científica — UFPB

  
Prof. Dr. Marcos da Rosa Garcia — Examinador Externo ao Programa

Departamento de Educação Musical — UFPB

  
Prof. PhD. Walton Pereira Coutinho — Examinador Externo à Instituição

Unidade Acadêmica de Engenharia de Produção — UFCG

João Pessoa

2019

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me dado forças para terminar este trabalho, até mesmo nas horas mais sombrias.

Aos meus pais, que nunca mediram esforços no cuidado e na proteção. Agradeço imensamente pelo apoio e o amor dado por eles, que foi imprescindível para a minha formação.

À minha namorada Julliany, que me compreendeu e me ajudou em vários momentos de necessidade.

Ao meu orientador, Anand, por não ter desistido de mim nos momentos de dúvidas e angústias.

Ao meu grande amigo, Nailson, pela sua imensurável ajuda durante o decorrer de todo o meu mestrado.

Ao meu primo, Thiago, por ter me dado dicas e conselhos valiosos no início desta etapa que agora finaliza-se.

Aos meus amigos mais próximos, Bruno, Evandro, Marconi, Matheus e Nathália, que tornavam os desafios mais fáceis de serem cumpridos.

Aos professores, Marcos Rosa, Lucídio e Walton, por terem aceitado o convite para participarem da banca de avaliação.

Aos meus colegas de laboratório, Carlos, Eduardo, Vitor e Yuri, que me ajudaram, além de terem compartilhado comigo muitas horas de jogatina.

Muito obrigado!

## RESUMO

O presente trabalho descreve o funcionamento de uma abordagem computacional que, mediante o uso de métodos exatos e heurísticos, realiza a construção de fragmentos melódicos, os quais são representados, mais especificamente, através de *licks* de guitarra. Este tipo de aplicação integra-se no campo da Composição Algorítmica, que é a criação de música com o auxílio de algoritmos. Para tal feito, um banco de fragmentos melódicos menores intitulados *sublicks* é utilizado. Estes fragmentos equivalem à porção mais elementar de um *lick* de guitarra, que são as notas musicais. Diante disso, um conjunto de regras são estabelecidas para pontuar transições entre os *sublicks*, e assim, podemos determinar uma matriz de custo para auxiliar na concatenação dos mesmos, resultando em um *lick* completo. Tal concatenação é realizada por um modelo matemático, que ainda leva em conta determinadas entradas, como por exemplo, quantidade de notas musicais e técnicas de guitarra a serem utilizadas na construção do *lick*. Adicionalmente, um modelo probabilístico baseado em Cadeias de Markov fez-se necessário na construção de um tipo diferente de *lick*, chamado de *lick turnaround*, devido às suas características peculiares. Para validar a ferramenta proposta, melodias resultantes da mesma foram submetidas à uma avaliação humana com um grupo seletivo de 60 pessoas com diferentes níveis de conhecimento musical. De forma geral, os resultados sugerem que houve uma boa aceitação por parte dos ouvintes, constatando a agradabilidade de se ouvir estas melodias.

**Palavras-chave:** Composição Algorítmica, Solos de Guitarra, Otimização, Cadeias de Markov.

## ABSTRACT

The present work describes the operation of a computational approach that, through the use of exact and heuristic methods, performs the construction of melodic fragments, which are represented, more specifically, by guitar licks. This type of application is part of the field of Algorithmic Composition, which is the creation of music with the aid of algorithms. For this purpose, a database of smaller melodic fragments entitled “sublicks” is used. These fragments are the most elemental portion of a guitar lick, which is the musical notes. Given this, a set of rules are established to score transitions between sublicks, so we can determine a cost matrix to assist in their concatenation, resulting in a complete lick. Such concatenation is performed by a mathematical model, which still takes into account certain inputs, such as the amount of musical notes and guitar techniques to be used in the construction of lick. Additionally, a probabilistic Markov Chain-based model was necessary to construct a different type of lick, called a turnaround lick, due to its peculiar characteristics. To validate a proposed tool, melodies resulting from it were subjected to human evaluation with a selected group of 60 people with different levels of musical knowledge. Overall, the results suggested that there was a good acceptance by the listeners, noting the pleasantness of listening to these melodies.

**Keywords:** Algorithm Composition, Guitar Solos, Optimization, Markov Chains.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>11</b>
1.1	DEFINIÇÃO DO TEMA DA PESQUISA . . . . .	11
1.2	JUSTIFICATIVA . . . . .	13
1.3	OBJETIVOS . . . . .	14
1.3.1	Objetivo Geral . . . . .	14
1.3.2	Objetivos Específicos . . . . .	14
1.4	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO . . . . .	15
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO DA LITERATURA</b>	<b>16</b>
2.1	PROGRAMAÇÃO LINEAR . . . . .	16
2.2	CONCEITOS BÁSICOS MUSICAIS . . . . .	17
2.2.1	Notas Musicais e Escala . . . . .	17
2.2.2	Duração e Ritmo . . . . .	18
2.2.3	Tablatura . . . . .	18
2.2.4	Compasso . . . . .	19
2.2.5	Harmonia e Melodia . . . . .	20
2.2.6	O estilo <i>Blues</i> . . . . .	20
2.2.7	<i>12-Bar Blues</i> . . . . .	21
2.2.8	A <i>Blue Note</i> . . . . .	22
2.2.9	Quiálicas . . . . .	22
2.2.10	Técnicas de Guitarra . . . . .	23
2.3	CADEIAS DE MARKOV . . . . .	23
2.4	TRABALHOS RELACIONADOS . . . . .	24
<b>3</b>	<b>ASPECTOS METODOLÓGICOS</b>	<b>29</b>
3.1	METODOLOGIA PROPOSTA . . . . .	29
3.1.1	Classificação dos <i>licks</i> . . . . .	29

3.1.1.1	<i>Licks</i> de repetição . . . . .	30
3.1.1.2	<i>Licks turnaround</i> . . . . .	31
3.1.1.3	<i>Licks</i> regulares . . . . .	32
3.1.2	Gerando <i>licks</i> regulares . . . . .	32
3.1.2.1	O banco de <i>sublicks</i> regulares . . . . .	34
3.1.2.2	O modelo matemático para <i>licks</i> regulares . . . . .	36
3.1.3	Gerando <i>licks</i> de repetição . . . . .	38
3.1.3.1	O banco de <i>sublicks</i> de repetição . . . . .	39
3.1.4	Gerando <i>licks turnaround</i> . . . . .	39
3.1.4.1	O primeiro compasso . . . . .	40
3.1.4.2	O segundo compasso . . . . .	41
3.1.5	Regras de transição e matrizes de custo . . . . .	42
3.1.6	Pós-processamento . . . . .	43
3.2	VALIDAÇÃO DA FERRAMENTA PROPOSTA . . . . .	46
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>49</b>
4.1	RESULTADOS COMPUTACIONAIS . . . . .	49
4.1.1	Resultados das avaliações . . . . .	49
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>59</b>
5.1	Considerações Finais . . . . .	59
5.2	Melhorias futuras . . . . .	60
<b>A</b>	<b>PARTITURAS E TABLATURAS DOS SOLOS “AUTOMÁTICOS”</b>	<b>67</b>

## LISTA DE FIGURAS

2.1	<i>Representação de uma tablatura . . . . .</i>	19
2.2	<i>Lick descrito através de um compasso . . . . .</i>	20
2.3	<i>Notas dispostas de forma sequencial . . . . .</i>	21
2.4	<i>Notas tocadas de forma simultânea . . . . .</i>	21
3.1	<i>Padrões de repetição . . . . .</i>	31
4.1	<i>Visão geral das avaliações dos solos semi-automáticos . . . . .</i>	50
4.2	<i>Visão geral das avaliações dos solos automáticos . . . . .</i>	51
4.3	<i>Visão geral das pontuações médias de ambos os tipos de solo . . . . .</i>	52
4.4	<i>Intervalo de confiança da diferença das médias para todos os níveis de participantes referentes aos índices de satisfação . . . . .</i>	53
4.5	<i>Avaliação dos solos semi-automáticos pelos participantes de nível iniciante</i>	53
4.6	<i>Avaliação dos solos automáticos pelos participantes de nível iniciante . . .</i>	54
4.7	<i>Avaliação dos solos semi-automáticos pelos participantes de nível intermediário . . . . .</i>	54
4.8	<i>Avaliação dos solos automáticos pelos participantes de nível intermediário .</i>	55
4.9	<i>Avaliação dos solos semi-automáticos pelos participantes de nível profissional</i>	55
4.10	<i>Avaliação dos solos automáticos pelos participantes de nível profissional . .</i>	56
4.11	<i>Uso dos solos semi-automáticos pelos avaliadores de todos os níveis . . . .</i>	57
4.12	<i>Uso dos solos automáticos pelos avaliadores de todos os níveis . . . . .</i>	58
4.13	<i>Intervalo de confiança da diferença das médias para todos os níveis de participantes referentes ao uso dos solos . . . . .</i>	58
A.1	<i>Tablatura/partitura do solo “automático” 1 . . . . .</i>	68
A.2	<i>Tablatura/partitura do solo “automático” 2 . . . . .</i>	69
A.3	<i>Tablatura/partitura do solo “automático” 3 . . . . .</i>	70
A.4	<i>Tablatura/partitura do solo “automático” 4 . . . . .</i>	71

A.5	Tablatura/partitura do solo “automático” 5 . . . . .	72
A.6	Tablatura/partitura do solo “automático” 6 . . . . .	73
A.7	Tablatura/partitura do solo “automático” 7 . . . . .	74
A.8	Tablatura/partitura do solo “automático” 8 . . . . .	75
A.9	Tablatura/partitura do solo “automático” 9 . . . . .	76
A.10	Tablatura/partitura do solo “automático” 10 . . . . .	77
A.11	Tablatura/partitura do solo “automático” 11 . . . . .	78
A.12	Tablatura/partitura do solo “automático” 12 . . . . .	79
A.13	Tablatura/partitura do solo “automático” 13 . . . . .	80
A.14	Tablatura/partitura do solo “automático” 14 . . . . .	81
A.15	Tablatura/partitura do solo “automático” 15 . . . . .	82

## LISTA DE TABELAS

2.1	As notas musicais e suas cifras correspondentes . . . . .	17
2.2	Figuras rítmicas e suas propriedades . . . . .	18
2.3	Trabalhos relacionados em CA e CAC . . . . .	28
3.1	Regras de formação dos <i>sublicks</i> regulares . . . . .	35
3.2	Regras de formação dos <i>sublicks</i> de repetição . . . . .	39
3.3	Regras de formação dos <i>sublicks turnaround</i> . . . . .	42
3.4	Visão geral de todas as regras empregadas . . . . .	44
3.5	Correspondência entre as regras descritas e os métodos de geração . . . . .	44

## LISTA DE ABREVIACOES

CA	Composição Algorítmica
CAC	<i>Computer-aided composition</i>
PCV	Problema do Caixeiro Viajante
PL	Programação Linear
PLI	Programação Linear Inteira
PLM	Programação Linear Mista
VNS	<i>Variable Neighborhood Search</i>

# Capítulo 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1 DEFINIÇÃO DO TEMA DA PESQUISA

O computador é uma ferramenta excepcional para auxiliar o compositor a ampliar sua capacidade criativa. Contudo, as limitações relacionadas à simulação do pensamento criativo humano são reconhecidas, pois devemos aceitar que nenhum método computacional existente hoje resgata de fato a criatividade de forma inerente. A criatividade observada nos resultados do processamento de um programa para composição musical deriva majoritariamente da criatividade do programador (de Souza e Faria, 2011).

A composição algorítmica (CA) é a aplicação de um algoritmo rígido e bem definido ao processo de composição da música, uma metodologia para permitir que um compositor humano trabalhe mais rapidamente (Jacob, 1996) e requer que o compositor construa um programa para compor a música (Pope, 1995). Para criar estes algoritmos, o estudo dos padrões que ocorrem em métodos tradicionais de composição se faz necessário. Este tipo de criação é curioso, pois dúvidas surgem a todo momento sobre conceitos pessoais relacionados às perspectivas sobre computadores produzirem obras de arte (Freitas, 2011a). Diante disso, questões são levantadas a respeito de quem utiliza tal abordagem, como por exemplo, se o compositor está compondo música ou apenas reconhecendo-a (Jacob, 1996).

Pope (1995) afirma que a CA pode assumir diversas formas, tais como procedural, estocástica ou sistemas baseados em conhecimento que são geradores no sentido de usarem dados de entrada para gerar dados musicais como saída. Geralmente, a literatura classifica os algoritmos de composição de acordo com a maneira que os mesmos processam os dados musicais, bem como suas estruturas. Diante disso, Papadopoulos e Wiggins (1999) classificam em seu trabalho os métodos computacionais para composição musical

como: modelos matemáticos, sistemas baseados em conhecimento, gramáticas, métodos evolucionários, sistemas de aprendizagem, sistemas distribuídos e sistemas híbridos.

Outro campo de pesquisa relativamente novo é a Composição Assistida por Computador (CAC) que, relacionando música e computadores, permite que o computador auxilie o compositor ou até mesmo gere uma partitura original (Herremans e Sörensen, 2012). Segundo Assayag (1998), ferramentas de composição auxiliadas por computador visam fornecer ao compositor meios de usar programas para criação musical através da implementação de ideias predeterminadas.

Um dos primeiros exemplos de composições geradas por computador está no trabalho de Hiller e Isaacson (1957), que utilizou o computador Illiac para gerar a peça musical Illiac Suite. A ideia principal foi usar regras de seleção para aceitar ou descartar aleatoriamente tons e ritmos gerados, através de um sistema de cadeias de Markov (Sandred et al, 2009).

Além da CA e da CAC, existem na literatura duas outras áreas que envolvem o uso de composição através de algoritmos. A primeira delas é a Composição Algorítmica Afetiva (do inglês, *Affective Algorithmic Composition*), que aborda a percepção das emoções e suas características musicais correlacionadas. Mais informações sobre essa área encontram-se em Williams et al (2013). E por último, o trabalho de Ariza (2005) relata sobre uma nomenclatura híbrida de CA e CAC chamada Composição Algorítmica Assistida por Computador (do inglês, *Computer-Aided Algorithmic Composition*). Estas duas últimas áreas citadas não são abordadas neste trabalho.

O método computacional utilizado aqui é baseado no trabalho de Cunha et al (2018), onde os autores descrevem uma abordagem para geração de solos de guitarra no estilo *Blues*, que será comentado nas seções subsequentes. Langston (1989) descreve uma técnica utilizada por programas de composição musical chamada *Riffology* na qual a unidade básica de construção é o *riff*, um pequeno fragmento melódico. No estilo musical *rock*, um *lick* caracteriza-se como uma pequena frase melódica. Isto pode soar de forma suspeita próximo à definição de *riff*, porém existe uma pequena diferença. Enquanto que “*riff*” e “*lick*” são utilizados de forma intercambiável, a maioria dos guitarristas concordam

que um *riff* é uma figura repetida que pode ser utilizada para formar a base de uma música, enquanto que um *lick* está mais para um trecho melódico e, geralmente, não é utilizado para formar a base de uma figura rítmica (Corporation et al, 2014). De acordo com Lilliestam (1996), termos como *riff* ou *lick* são bem estabelecidos e bastante difundidos entre músicos de estilos como *Jazz* e *Rock*. Sendo assim, nesta pesquisa, o termo *lick* é utilizado para representar pequenos fragmentos melódicos do instrumento guitarra e, adicionalmente, o termo *sublick* representa porções melódicas ainda menores, permitindo definir um *lick* como uma combinação de *sublicks*.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

O uso de novas tecnologias no meio educacional de forma geral e, especificamente, no setor musical, pode tornar-se um recurso no processo de aprendizagem. Utilizando softwares característicos para a educação musical, é possível fazer com que os usuários obtenham noções de teoria musical, composição, criação de arranjos e partituras, gravar faixas de áudio dentre outras atividades (Pinto, 2007).

Ainda de acordo com Pinto (2007), a criação do sistema MIDI (do inglês, *Musical Instrument Digital Interface*) trouxe novas perspectivas para o mundo da tecnologia musical. Com este sistema, os códigos sonoros dos instrumentos musicais foram padronizados, permitindo a comunicação destes instrumentos com computadores. Esta revolução digital torna-se cada vez mais popular no âmbito da educação musical. Podemos notar isso nas principais áreas de aplicação de softwares musicais, tais como em pesquisas onde o computador é utilizado como um gerador de sons ou na busca pela praticidade da composição, simplificando o processo de criação e edição de arquivos de som.

Gohn (2003) afirma que as novas tecnologias para o ensino musical oferecem um potencial tão grande quanto inexplorado e a contribuição destas tecnologias só será eficaz diante da realização de pesquisas e o desenvolvimento de novos materiais didáticos. Em Lilliestam (1996), pode-se encontrar uma pesquisa que relata o ato de tocar música de ouvido, fato que inclui as atividades de aprendizado e composição.

Diante do que foi exposto, Cunha et al (2016) acreditam que a ferramenta resultante

do seu trabalho pode vir a ser utilizada como auxiliar no processo de composição, criação e aprendizagem de música no instrumento guitarra. Caso o usuário seja um estudante, por exemplo, ele teria a oportunidade de estudar e aprender os *licks* de guitarra gerados. Além disso, a ferramenta também pode ser útil como um recurso para compositores com bloqueio criativo. Dessa forma, esse tipo de usuário poderia utilizar os *licks* gerados automaticamente como ponto de partida para uma possível composição, ou até mesmo, em suas próprias composições de fato.

Como será visto na Seção 2.4, através da revisão bibliográfica realizada, foram encontrados trabalhos na área de CA baseados em algoritmos genéticos, redes neurais, cadeias de Markov e heurísticas/metaheurísticas. Com exceção do trabalho de Cunha et al (2018), apenas um trabalho baseado em programação matemática foi encontrado, que é o de Tanaka e Fujii (2015). Sendo assim, doravante a escassez de propostas que utilizam métodos exatos de otimização, o trabalho proposto traz como principal contribuição uma maneira de utilizar algoritmos na composição de *licks* de guitarra utilizando esta abordagem.

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 Objetivo Geral

Desenvolver uma ferramenta capaz de criar automaticamente *licks* de guitarra através do uso de técnicas de otimização.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

- Criar um banco de dados de *sublicks* de guitarra do estilo *Blues*;
- Definir regras de transição, as quais atribuem um custo à transição entre dois *sublicks*, baseando-se em conceitos musicais e na tocabilidade do instrumento guitarra no estilo *Blues*;
- Descrever formulações matemáticas para a combinação dos *sublicks*, formando *licks* completos;

- Implementar um método estocástico baseado em Cadeias de Markov para lidar com a criação de *licks turnaround*;
- Testar as abordagens propostas;
- Submeter os resultados obtidos à uma avaliação humana.

#### 1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho está organizado da seguinte forma: além deste primeiro capítulo que é introdutório e contém a definição e os objetivos da pesquisa, o Capítulo 2 apresenta uma breve revisão da literatura, bem como conceitos básicos de otimização e de notação musical necessários para uma melhor compreensão deste trabalho; o Capítulo 3 explica a metodologia adotada; o Capítulo 4 apresenta os resultados computacionais obtidos com o experimento; e, por último, o Capítulo 5 conclui o trabalho.

# Capítulo 2

## FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo serão abordados alguns conceitos básicos importantes à respeito da área de Programação Matemática, do modelo probabilístico Cadeias de Markov e da nomenclatura musical para um melhor entendimento do trabalho, junstamente com uma breve revisão da literatura, listando trabalhos relacionados nas áreas de CA e CAC.

### 2.1 PROGRAMAÇÃO LINEAR

A Programação Linear (PL) é uma das disciplinas que integram-se na área da Programação Matemática e são de suma importância para o campo da Pesquisa Operacional. Suas aplicações são comuns em grande parte dos setores do nosso cotidiano como na indústria, nos transportes, na saúde e na administração (Maculan e Fampa, 2006). O uso da PL possui uma grande receptividade como abordagem graças a sua habilidade de modelar problemas importantes e complexos de tomada tomada de decisões, além da capacidade de seus métodos produzirem soluções em tempo razoável (Sousa, 2000).

O problema por programação linear foi formalizado por Dantzig (2016) que, em seguida, desenvolveu o *Método Simplex* para resolvê-lo. De acordo com (Barboza, 2005), um problema de PL é composto por uma função linear formada por variáveis de decisão chamada de *função objetivo* cujo valor deve ser otimizado; por relações de interdependência entre as variáveis de decisão que são representadas por um conjunto de equações ou inequações lineares chamadas de *restrições*; e pelas próprias *variáveis de decisão* que podem assumir valores positivos ou nulos.

Em certos problemas de PL, quando as variáveis de decisão precisarem admitir valores inteiros, estaremos diante de um problema de Programação Linear Inteira (PLI). Em outros casos, nem todas as variáveis de decisão são restritas à valores inteiros. Em tais casos, o problema pode ser também caracterizado como um problema de Programação Linear Mista (PLM) (Maculan e Fampa, 2006).

## 2.2 CONCEITOS BÁSICOS MUSICAIS

### 2.2.1 Notas Musicais e Escala

Notas musicais são frequências sonoras bem definidas. O ouvido humano capta estas frequências e o cérebro as processa, atribuindo um som distinto para cada uma delas. Existem sete notas musicais básicas, são elas: **Dó, Ré, Mi, Fá, Sol, Lá e Si**, as quais são identificadas através de letras chamadas cifras, para facilitar sua escrita. Uma escala é uma sucessão ascendente ou descendente de notas musicais diferentes e consecutivas, em um determinado sistema musical. A altura de uma nota musical é determinada pela frequência ou velocidade das vibrações e está diretamente relacionada à nota musical correspondente. Quanto maior for a velocidade da vibração, mais agudo será o som e vice-versa. Notas musicais também podem sofrer alterações denominadas acidentes em suas respectivas alturas. Os acidentes mais comuns encontrados são o bemol ( $b$ ), que diminui a nota natural em um semitom (ou meio tom) e o sustenido ( $\sharp$ ), que eleva a altura da nota natural em um semitom (Med, 1996). A tabela 2.2 apresenta cada nota musical ao lado de sua cifra correspondente. Para um trabalho completo sobre a origem das notas musicais, veja Freire (2008).

Tabela 2.1: As notas musicais e suas cifras correspondentes

Nota Musical	Cifra
Dó	C
Ré	D
Mi	E
Fá	F
Sol	G
Lá	A
Si	B

### 2.2.2 Duração e Ritmo

Na música, existem sons longos e breves, além do silêncio, que é a ausência de som. A duração é estabelecida como o tamanho da continuidade do som ou de sua ausência (silêncio). O ritmo é a maneira como se sucedem as durações de cada som em termos de ordem e de proporção. Para representar as durações, existem as figuras rítmicas e as suas pausas correspondentes (Med, 1996). A tabela 2.2 apresenta tais figuras rítmicas, bem como suas respectivas nomenclaturas e pausas, além de quantas figuras rítmicas do tipo correspondente cabem dentro de um compasso de quatro tempos (discutido a seguir, na Seção 2.2.4).

Tabela 2.2: Figuras rítmicas e suas propriedades

Figura Rítmica	Nomenclatura	Pausa	Duração
	Semibreve	—	64
	Mínima	—	32
	Semínima	⋈	16
	Colcheia	γ	8
	Semicolcheia	γ̇	4
	Fusa	γ̇̇	2
	Semifusa	γ̇̇̇	1

### 2.2.3 Tablatura

A tablatura, ou de forma resumida, *tab*, é um sistema de notação que representa graficamente as casas e as cordas da guitarra. Ela não informa diretamente qual nota

musical deve ser tocada, mas a casa e a corda que devem ser utilizadas. A figura 2.1 apresenta um modelo de tablatura com algumas notas descritas. A linha mais acima da tablatura corresponde à primeira corda da guitarra, enquanto que a linha mais abaixo corresponde à sexta corda da guitarra (para uma guitarra de seis cordas). As outras linhas correspondem às outras quatro cordas restantes. O número que aparece em qualquer uma das cordas indica em qual casa da guitarra a corda referente deve ser tocada. Por exemplo, se o número 2 aparece na segunda linha partindo de cima, significa que a segunda corda deve ser tocada, pressionando-a na segunda casa. A presença do número 0 em uma linha indica que a corda deve ser tocada abertamente, ou seja, nenhuma casa deve ser pressionada (Corporation et al, 2014).

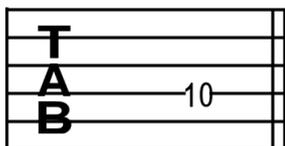


Figura 2.1: *Representação de uma tablatura*

#### 2.2.4 Compasso

Compassos são intervalos regulares de tempo que são agrupados em ciclos de mesma duração. De forma tradicional, são utilizados para mensurar a música (Gusmão, 2012). Cada compasso possui uma fração, cujo numerador representa quantas figuras rítmicas (ritmo) cabem naquele compasso e o denominador representa a espécie destas figuras. Logo, a duração de uma figura rítmica é mensurada através da porção do compasso a qual ela ocupa (Med, 1996).

Como apresentado na tabela 2.2, uma relação entre compasso e duração é estabelecida de acordo com a quantidade de figuras rítmicas de um determinado tipo que podem caber dentro de um compasso. Por exemplo, dentro de um compasso cabem 64 semifusas ou 32 fusas ou 16 semicolcheias, sendo o mesmo raciocínio aplicado à todos os outros tipos de figuras rítmicas. Analogamente, podemos afirmar que 1 semifusa, em termos de fração, representa  $1/64$  de compasso. Dessa forma, tanto a duração das notas musicais quanto o tamanho de um compasso, podem ser considerados dentro de um intervalo fechado de 1 à

64 de modo que, se um compasso qualquer possui duas semicolcheias, é sabido que estas últimas, juntas, ocupam 32 unidades do compasso, ou metade do mesmo. Essa é a maneira que a ferramenta proposta lida com as durações das notas musicais e suas relações com os compassos os quais pertencem.

A fim de padronizar o processo de manipulação dos *licks* e *sublicks*, no presente trabalho, estipulou-se que um *lick* terá o tamanho exato de um compasso, estabelecendo uma equivalência entre ambos. A figura 2.2 apresenta um exemplo de compasso.

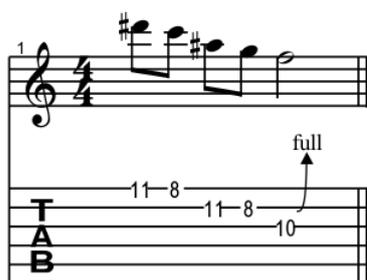


Figura 2.2: *Lick* descrito através de um compasso

### 2.2.5 Harmonia e Melodia

Melodia é um conjunto de sons dispostos em ordem sucessiva e horizontal. De forma mais branda, é uma sequência de notas musicais tocadas sequencialmente, uma após a outra. Já harmonia é um conjunto de sons dispostos em ordem simultânea e vertical, ou seja, são notas musicais tocadas ao mesmo tempo, que também podem ser denominadas de acordes. Sendo assim, pode-se afirmar que a harmonia estuda os acordes e as relações entre os mesmos (Med, 1996). A figura 2.3 apresenta um exemplo de notas tocadas sequencialmente, enquanto que a figura 2.4 apresenta um exemplo de notas tocadas de forma simultânea.

### 2.2.6 O estilo *Blues*

Os primeiros traços do estilo apareceram em meados de 1619, quando os primeiros escravos foram levados da África para os Estados Unidos. As condições nos navios que os transportaram eram desumanas. Diante disso, muitos escravos cometiam suicídio ou



Figura 2.3: *Notas dispostas de forma sequencial*

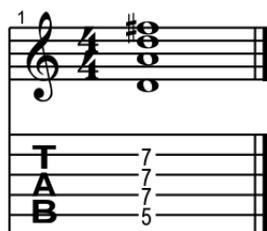


Figura 2.4: *Notas tocadas de forma simultânea*

se jogavam ao mar, outros simplesmente aceitavam suas vidas como escravos. Alguns capitães obrigavam os escravos a cantarem e dançarem nos navios, acreditando que isto os tornariam mais saudáveis durante a perigosa viagem. Algumas destas cantorias pareciam ser lamentações à respeito do exílio dos escravos. A partir deste ponto, ao longo dos anos que se passaram e após vários acontecimentos históricos relacionados à comunidade negra nos Estados Unidos, o estilo popularizou-se, propagando-se por todo o país e, com o tempo, pelo mundo (Weissman, 2004).

### 2.2.7 12-Bar Blues

*12-Bar Blues* é um modelo do estilo musical *Blues* que representa uma progressão dos acordes I, IV e V referentes à escala da tonalidade da música que está sendo tocada, ao longo de 12 compassos (Ganapes, 2015). Por exemplo, consideremos uma música qualquer, a qual segue o modelo *12-Bar Blues* clássico na tonalidade de Dó. Ao longo dos doze compassos dessa música, será tocada uma progressão dos acordes de Dó, Fá e Sol que, por sua vez, são os acordes de número I, IV e V referentes à escala de Dó<sup>1</sup>. Por motivos de redução de escopo, esta modalidade foi escolhida para a realização deste trabalho.

<sup>1</sup>A escala de Dó é descrita pela sequência das notas Dó, Ré, Mi, Fá, Sol, Lá e Si

### 2.2.8 A *Blue Note*

A chamada *blue note* é considerada como um tipo de elemento básico pertencente à estilos afro-americanos como *Jazz*, *Blues*, *Soul* e *Rock*, e possui características únicas quando executadas em harmonias nestes estilos. Em termos de altura, a *blue note* equivale à quinta bemol<sup>2</sup> da escala natural da tonalidade em que se encontra a harmonia, acrescentada à escala pentatônica menor. Por exemplo, a *blue note* referente à escala pentatônica menor de Dó é G $\flat$  (lê-se sol bemol). O trabalho de Weisethaunet (2001) aborda a *blue note* a partir de uma perspectiva histórica, bem como a sua utilização.

### 2.2.9 Quiálteras

Quiálteras são grupos de notas empregados com maior ou menor duração do que normalmente representam. Por exemplo, um conjunto de três quiálteras, também chamado de tercina, é definido como três notas musicais com durações iguais e com um tempo total equivalente à duas notas, com figuras rítmicas da mesma espécie (Med, 1996). Estas mesmas quiálteras, dispostas em um determinado compasso, representam a subdivisão de uma batida de tempo em três partes iguais (Corporation et al, 2014). Neste trabalho, foi observado que as quiálteras são alterações no tempo normal das notas musicais, de acordo com sua figura rítmica. Neste contexto, dada uma nota musical cuja figura rítmica é uma colcheia, que ocupa 8 unidades de compasso, uma versão desta nota musical com uma quiáltera aplicada à mesma passaria a ocupar 5.333 unidades de compasso. Esta transformação é definida através da equação 2.1, onde  $d$  equivale à duração inicial da nota musical e  $d'$  representa a duração resultante de tal transformação.

$$d' = 2/3d \tag{2.1}$$

---

<sup>2</sup>Movimento de recuar a nota musical em meio tom

### 2.2.10 Técnicas de Guitarra

Técnicas sugerem como a melodia é interpretada através da manipulação das cordas da guitarra (Chen et al, 2015). De fato, elas alteram o estado padrão das notas musicais com o intuito de produzir uma sensação singular ao ouvinte. No presente trabalho, cinco técnicas de guitarra são abordadas, as quais, de acordo com Chen et al (2015), são definidas a seguir.

***Bend***: refere-se a esticar a corda da guitarra com a mão esquerda para aumentar a altura da nota a qual está sendo aplicada a técnica, seja de forma gradual ou instantânea.

***Vibrato***: representa variações pequenas e rápidas em termos de altura. Em outras palavras, consiste em oscilar a corda da guitarra utilizando o dedo.

***Hammer-on***: acontece quando uma determinada nota é tocada e outro dedo da mão esquerda é utilizado para pressionar a mesma corda em outra casa adiante, enquanto a primeira nota ainda soa.

***Pull-off***: é o ato de retirar o dedo da mão esquerda, de forma arrastada, de uma nota que está sendo tocada para uma nota com altura mais baixa. O uso sucessivo e rápido de *Pull-off* e *Hammer-on* é frequentemente chamado de *trill*.

***Slide***: refere-se à ação de deslizar o dedo da mão esquerda pela corda, ao longo de uma ou mais casas, para chegar à outra nota.

## 2.3 CADEIAS DE MARKOV

As Cadeias de Markov modelam o comportamento de uma sequência de eventos. Cada evento pode levar a cadeia para um determinado estado, de um número fixo de estados. Alterações no estado entre eventos consecutivos são chamados de transições. O estado da cadeia antes de uma transição chama-se estado atual, assim como o resultado de uma transição equivale a um dos possíveis estados futuros. Em um modelo de Markov, o comportamento de uma cadeia é representado por um conjunto de números chamados de probabilidades de transição. Cada probabilidade representa a chance da cadeia mover-se de um determinado estado atual para outro estado futuro particular. Tais probabilidades

são organizadas através de uma matriz, chamada de matriz de transições (Hall e Smith, 1996).

Diante do exposto, é possível criar uma sequência de notas musicais através de um modelo de Markov. Dado um conjunto de notas, cada nota representa um estado da cadeia. Desta maneira, a seguinte pergunta deve ser feita: qual será a próxima nota da sequência, dado que a nota atual é Dó? A resposta encontra-se na matriz de transições, uma estrutura que contém as probabilidades de transições entre cada estado. A Seção 3.1.4.1 apresenta com mais detalhes como foi possível gerar fragmentos melódicos utilizando Cadeias de Markov.

## 2.4 TRABALHOS RELACIONADOS

Johanson e Poli (1998) desenvolveram o sistema *GP-Music*, que permite aos usuários evoluir pequenas sequências musicais através de programação genética interativa. O funcionamento básico do sistema utiliza um algoritmo de programação genética, um pequeno conjunto de funções para criar sequências musicais e uma interface de usuário que permite a classificação de sequências individuais. Como o usuário é o gargalo<sup>3</sup> em sistemas interativos, o sistema coleta dados de avaliação do usuário e utiliza-os para treinar um avaliador automático baseado em redes neurais. De acordo com os autores, as peças musicais geradas pelo avaliador automático eram agradáveis, mas não eram, em geral, tão boas quanto as peças musicais geradas nas execuções interativas do usuário.

Alfonseca et al (2007) propuseram o uso do algoritmo *Normalized Information Distance*, uma medida de informação algorítmica que está entre as melhores métricas para classificação de melodias, como uma função de *fitness* que pode ser utilizada por algoritmos genéticos para gerar música de forma automática em um dado estilo predefinido. A minimização desta medida entre uma música gerada e um conjunto de guias musicais torna possível a obtenção da música gerada por computador que lembra o estilo de um determinado artista. O operador de recombinação exerce um papel importante neste pro-

---

<sup>3</sup>Significa dizer que o usuário serviu como uma função de aptidão ou de *fitness* que, segundo Pacheco et al (1999), tratando-se de algoritmos genéticos, é uma função que melhor representa o problema abordado e tem por objetivo fornecer uma medida de aptidão para cada indivíduo na população.

blema, e por isso, diversas variações são testadas para ajustar o algoritmo genético para esta aplicação. A superioridade da altura tonal relativa em relação aos outros parâmetros musicais, tal como a duração das notas, levou os autores a desenvolverem um algoritmo simples, mas que obtém bons resultados.

Biles et al (1994) descreveram o algoritmo genético *GenJam*, baseado no modelo de como músicos iniciantes de *jazz* aprendem a improvisar. De acordo com o acorde que está sendo tocado, o sistema mapeia ideias melódicas para notas específicas através de escalas sugeridas. Para improvisar em uma melodia, o sistema processa dados de entrada que fornecem informações como ritmo e progressão de acordes. A avaliação de aptidão dos solos é realizada em tempo real durante o acompanhamento de uma sessão rítmica por intermédio de um humano. Durante a sessão, o usuário pode classificar a melodia reproduzida pelo sistema como boa ou ruim.

Tokui et al (2000) apresentam uma abordagem baseada em computação evolucionária interativa para a composição de melodias. O método desenvolvido combina algoritmos genéticos com programação genética. Indivíduos resultantes do algoritmo genético representam pequenas peças de padrões melódicos, enquanto que os indivíduos resultantes da programação genética expressam como estes padrões são organizados em termos de suas funções. Ambas as populações são envolvidas interativamente por meio da avaliação do usuário. Segundo os autores, com a integração destas duas metodologias, é possível buscar estruturas melódicas de forma efetiva.

Mistler (2017) propôs um sistema capaz de transcrever músicas escritas em notação de partituras para tablaturas, além de prever uma tablatura ótima para qualquer melodia dada como entrada. Duas abordagens foram apresentadas, ambas utilizando Aprendizado de Máquina. Na primeira abordagem, os acordes são previstos baseando-se em acordes tocados anteriormente. Isto foi possível através de uma *Long Short-Term Memory Recurrent Neural Network*, um tipo de rede neural recorrente que utiliza memórias de curto e longo prazo. Já na segunda abordagem, a dificuldade de um acorde é prevista em termos de uma função de custo, ao invés de prever o acorde ideal diretamente. Além disso, a função de custo é baseada em probabilidades condicionais nos dados de treinamento e estimada através de uma *Feed-Forward Neural Network*, outro tipo de rede neural a qual não possui

ciclos ou *loops* em sua arquitetura.

Hall e Smith (1996) apresentam um algoritmo baseado em cadeias de Markov que compõe melodias de *Blues* dada uma sequência de acordes. Ele é composto por duas fases: a fase de *análise* e a fase de *síntese*. A fase de *análise* produz um modelo de Markov composto por tabelas de transição de zero, primeira e segunda ordem, que cobrem tanto a parte de melodias quanto a parte de ritmos. Um conjunto de tabelas de transição é produzido para cada acorde nos sons analisados, a fim de capturar a relação entre harmonia e melodia. Já a fase de *síntese* utiliza as tabelas criadas na fase de *análise* para gerar novas melodias. A avaliação do modelo deu-se através da interação com usuários, os quais não foram capazes de distinguir composições geradas por humanos das geradas por computador.

Tanaka e Fujii (2015) propuseram um modelo baseado em programação linear inteira que pode prover especificações de características de estruturas musicais globais no contexto de composição musical, as quais foram descritas como equações e inequações lineares. Os autores endossam que a música pode ser definida como sequências de padrões musicais como acordes, ritmos e melodias. Diante disso, quando uma nova peça é composta, é necessário escolher uma sequência dentre todas as combinações de padrões, fato que justifica a proposta do trabalho. Além disso, usuários podem utilizar a ferramenta para obter ajuda na composição de estruturas musicais desejadas.

Cunha et al (2018) desenvolveram uma ferramenta capaz de gerar solos de guitarra no estilo *Blues* utilizando uma abordagem baseada em programação linear inteira. O *framework* realiza o sequenciamento de *licks* de guitarra retirados de Fritts (2012) para compor o solo completo através de uma matriz de penalidades que armazena o custo de transição de um *lick* para outro. Os autores empregaram uma estratégia de avaliação interativa para validar os solos gerados, intitulados como “otimizados”, de forma que estes, de certa forma, competiam com outros solos, denominados de “aleatórios”, os quais foram gerados de maneira aleatória, ou seja, os *licks* eram concatenados de forma randômica. Os resultados foram bem sucedidos diante do fato de que os solos otimizados tiveram uma aprovação maior relacionada aos solos aleatórios pelos avaliadores.

Herremans e Sörensen (2012) desenvolveram um algoritmo baseado na metaheurística *Variable Neighbourhood Search* (VNS) que pode gerar fragmentos musicais, consistindo de uma melodia para o *cantus firmus*<sup>4</sup> e as primeiras espécies de contraponto<sup>5</sup>. A função objetivo é baseada na quantificação de regras existentes para contraponto. Além disso, o algoritmo realiza uma busca local que começa a partir de melodias geradas aleatoriamente e as melhora alterando uma ou duas notas por vez. Uma comparação realizada pelos autores do algoritmo VNS com um algoritmo genético desenvolvido mostra que o primeiro é mais eficiente.

A tabela 2.3 apresenta um resumo dos trabalhos relacionados descritos nesta seção.

---

<sup>4</sup>Um som fixo, uma melodia utilizada como base para composições polifônicas (Scholes, 1973).

<sup>5</sup>Um ótimo estudo sobre contrapontos pode ser visto em Jeppesen (2013).

Tabela 2.3: Trabalhos relacionados em CA e CAC

<b>Referência</b>	<b>Abordagem</b>
Biles et al (1994)	Algoritmos Genéticos
Hall e Smith (1996)	Cadeias de Markov
Johanson e Poli (1998)	Algoritmos Genéticos e Programação Genética Iterativa
Tokui et al (2000)	Algoritmos Genéticos e Programação Genética
Alfonseca et al (2007)	Algoritmos Genéticos e Métricas de Similaridade
Mistler (2017)	Redes Neurais
Herremans e Sörensen (2012)	Metaheurísticas
Tanaka e Fujii (2015)	Programação Linear Inteira
Cunha et al (2018)	Programação Linear Inteira

# Capítulo 3

## ASPECTOS METODOLÓGICOS

No presente capítulo, são descritas as técnicas de otimização utilizadas para construir *licks* de guitarra no estilo *Blues*.

### 3.1 METODOLOGIA PROPOSTA

Como visto anteriormente, o objetivo deste trabalho é propor uma ferramenta capaz de criar fragmentos melódicos chamados *licks*. Contudo, a fim de testar o método desenvolvido, o objeto final é um solo de guitarra no estilo *Blues*, mais precisamente uma progressão *12-Bar Blues* (2.2.7), originada por meio do mesmo método para sequenciamento de *licks* exposto em Cunha et al (2018).

Antes de apresentar com detalhes os métodos computacionais utilizados no processo de construção dos *licks*, é importante descrever certas particularidades que são levadas em conta neste processo. Portanto, para um melhor entendimento da metodologia empregada, fez-se necessário a classificação dos *licks* decorrentes da mesma.

A parametrização requerida pela ferramenta foi estipulada de forma probabilística, definindo valores de entrada de acordo com a natureza do *lick*, que são utilizados para definir as características inerentes ao *lick* resultante. Estas características correspondem à frequência com que técnicas e outros aspectos exclusivos às notas musicais como durações apareçam.

#### 3.1.1 Classificação dos *licks*

Da mesma forma que atribuímos rótulos à músicas, sejam estes baseados na velocidade da música (lenta, rápida) ou no sentimento que é transmitido para o ouvinte

(tristeza, alegria), é fundamental que os *licks* tratados aqui sejam classificados, pois estes podem conter características especiais, inerentes aos mesmos, que determinam a que altura devem ser inseridos em uma composição musical. Consequentemente, pode-se afirmar que cada tipo de *lick* possui uma regra de formação diferente dos demais. Neste trabalho, os *licks* de guitarra são classificados em três tipos: *licks* de repetição, *licks turnaround* e *licks* regulares, os quais são definidos adiante.

### 3.1.1.1 *Licks* de repetição

Um importante aspecto do *Blues*, é a repetição. Tal ideia envolve um motivo<sup>1</sup>, que pode repetir-se uma ou várias vezes (Phillips e Chappell, 2012). É bastante útil quando há intenção de destacar ou aumentar a intensidade de um determinado momento durante a música (Fritts, 2012).

Cunha et al (2018) descrevem os *licks* de repetição baseando-se no banco de dados utilizado em sua pesquisa. Eles observaram que alguns *licks* pertencentes ao banco possuíam pequenos trechos melódicos que se repetiam ao longo do *lick* obedecendo um determinado padrão. Desta forma, quatro padrões de repetição foram definidos de forma que, dividindo o *lick* em 4 melodias menores, A, B, C e D, temos:

- Padrão 1: A, B, C e D são iguais;
- Padrão 2: A, B e C são iguais;
- Padrão 3: B, C e D são iguais;
- Padrão 4: A é igual a C e B é igual a D.

A figura 3.1 apresenta graficamente a estrutura de um *lick* de repetição em seus quatro formatos distintos. No presente trabalho, tais definições a respeito dos *licks* de repetição são utilizadas na sua construção, a qual é detalhada na Seção 3.1.3.

---

<sup>1</sup>Pequena frase musical

The figure displays four musical examples of guitar licks, each consisting of a treble clef staff and a TAB staff. The licks are divided into four measures (A, B, C, D) by vertical red lines. Each measure contains an eighth-note triplet with a 'full' accent. The TAB staves show the following fret numbers for each measure:

- Example 1: A (10-8-11), B (10-8-11), C (10-8-11), D (10-8-11)
- Example 2: A (10-8-11), B (10-8-11), C (10-8-11), D (8-11-8)
- Example 3: A (8-11-8), B (10-8-11), C (10-8-11), D (10-8-11)
- Example 4: A (10-8-11), B (8-11-8), C (10-8-11), D (8-11-8)

Figura 3.1: *Padrões de repetição*

### 3.1.1.2 *Licks turnaround*

Um *lick turnaround* é uma frase musical que ocorre nos dois últimos compassos de uma progressão em *blues*, usualmente conectando os acordes I e V (Dó e Sol). Um *lick turnaround* pode ser visto também como uma espécie de “cola”, que conecta o fim da progressão ao seu começo (Riker, 1994). Exceto quando utilizado como uma finalização, o *lick turnaround* substitui os compassos 11 e 12 e “vira você” (“*turns you around*”) de volta

para o primeiro compasso (Chipkin, 1998).

O *lick turnaround* possui uma característica intrínseca em relação aos demais, que é o fato de passar para o ouvinte a sensação de término ou conclusão da progressão. Para capturar determinada característica, uma abordagem computacional distinta das utilizadas na construção dos demais tipos de *licks* e baseada hibridamente no método de Cadeias de Markov e em técnicas exatas de otimização é empregada, a qual será descrita na Seção 3.1.4.

### 3.1.1.3 *Licks* regulares

Diferente dos *licks* de repetição e dos *licks turnaround*, os *licks* regulares são aqueles que não possuem nenhum aspecto especial semelhante à repetições ou sensações de término. Contudo, ainda sim, possuem sua importância pelo fato de representarem boa parte da composição da progressão *12-Bar Blues*. Os *licks* regulares são descritos na Seção 3.1.2.

### 3.1.2 Gerando *licks* regulares

O problema de geração de *licks* regulares pode ser visto como uma variante do Problema do Caixeiro Viajante (PCV). Dado um conjunto de cidades e o custo de deslocamento entre cada par delas, o PCV visa encontrar a maneira mais barata de visitar todas as cidades e retornar ao ponto de origem (Applegate et al, 2006). É um clássico problema de otimização combinatória caracterizado por ser fácil de se escrever, mas difícil de se resolver, além de possuir diversas aplicações práticas. O PCV pertence à classe de problemas NP-Difícil<sup>2</sup>, ou seja, o tempo gasto para resolvê-lo pode ser exponencial em relação ao tamanho da entrada (Buriol et al, 2000).

Como mencionando anteriormente, a metodologia desenvolvida para este trabalho baseia-se no trabalho de Cunha et al (2018) e consiste na utilização de um modelo matemático para gerar *licks* de guitarra no estilo *Blues*. A divergência entre as abordagens ocorre devido a Cunha et al (2018) terem utilizado um banco de *licks* retirados da literatura a fim de gerar solos completos de guitarra (uma progressão *12-Bar Blues* completa)

---

<sup>2</sup>A prova desta afirmação, além de um bom guia sobre classes de complexidade, podem ser encontrados em Garey e Johnson (2002).

de modo que, como os *licks* estavam previamente construídos, elementos musicais como duração das notas e técnicas exclusivas do instrumento guitarra já se encontravam encapsuladas nos mesmos. Já neste trabalho, como a intenção não é gerar solos de guitarra, e sim os próprios *licks*, a manipulação das características musicais será realizada a nível da porção mais elementar da geração de blocos melódicos, que é o sequenciamento das notas musicais de forma individual, considerando suas durações e o posicionamento das técnicas aplicadas às mesmas.

Por conseguinte, um banco de *sublicks* é criado para ser utilizado no processo de sequenciamento. Os *sublicks* representam notas musicais em sua forma natural, bem como sob o efeito da aplicação de diversas técnicas, ambas as formas com durações variadas. Uma matriz armazena pontuações que representam custos de transição entre os *sublicks*, que podem ser penalidades ou bonificações, e são baseados em um conjunto de regras estabelecidas que abrangem conceitos de teoria musical e métodos de execução do instrumento guitarra, ambos voltados para o estilo *Blues*. Se uma determinada transição entre um *sublick*  $i$  e um *sublick*  $j$  for compatível com alguma regra de construção definida, ela será bonificada. O conjunto de regras empregadas para determinar o custo de transição entre os *sublicks* na matriz de custo é constituído de regras retiradas do trabalho de Cunha et al (2018), além de outras regras baseadas na teoria do *Blues* e na tocabilidade do instrumento guitarra.

A fim de diminuir o determinismo no processo de geração de *licks*, um subconjunto de *sublicks* é sorteado a partir dos *sublicks* contidos no banco (Seção 3.1.2.1). Tal subconjunto é formado pela união de vários outros subconjuntos, onde cada um deles representa uma parcela de um determinado tipo de *sublick* presente no banco de dados. O modelo matemático também leva em conta uma parametrização específica, como quantidade de notas e técnicas utilizadas por *lick*, assim como a porção de *sublicks* desejada no sorteio pra ser utilizada na composição.

### 3.1.2.1 O banco de *sublicks* regulares

Para construir um *lick* de guitarra, precisamos de notas musicais, as quais podem conter técnicas aplicadas ou não. A partir deste contexto, firmamos a definição de *sublick*: um fragmento melódico muito pequeno que, em conjunto com outros *sublicks*, determinam um *lick* completo.

Sendo assim, para criar o banco de *sublicks* regulares, a ferramenta recebe como entrada um conjunto de notas musicais pertencentes à escala pentatônica menor de Dó<sup>3</sup>, as quais se encontram em uma determinada região do braço da guitarra, e que podem estar ou não sob efeito de alguma técnica, com durações distintas entre si. Desta maneira, podemos afirmar que um *sublick* é equivalente à uma nota musical munida de uma duração e, alternativamente, uma técnica de guitarra.

Diante deste contexto, cada *sublick* pertencente ao banco é criado à partir de regras de formação. Basicamente, tais regras possuem apenas a finalidade de determinar quais os elementos musicais que estarão disponíveis para a composição dos *licks* de guitarra. Para cada nota musical recebida como entrada, estas regras definem a sua duração, além de estabelecer se à mesma será atribuída alguma técnica de guitarra que, em caso negativo, o *sublick* resultante deste processo equivalerá à forma padrão da nota musical.

Existem técnicas de guitarra que requerem não uma, mas duas notas para serem executadas. Dentre as que fazem parte do escopo deste trabalho, estão o *Slide*, o *Hammer-on* e o *Pull-off*. Sendo assim, *sublicks* que contêm alguma das técnicas citadas, obrigatoriamente, são compostos por duas notas musicais. A partir deste fato, uma observação relacionada às técnicas *Hammer-on* e *Pull-off* deve ser efetuada, pois estas não fazem parte de nenhuma regra de formação. Elas são incorporadas aos *licks* resultantes posteriormente, na fase de pós-processamento. O motivo desta abordagem está relacionado à dificuldade que o problema teria caso estas técnicas possuíssem regras de formação próprias, pois, quanto maior a quantidade de *sublicks* contidos no banco, mais difícil o problema em questão se torna.

Vale salientar que, além das notas musicais apresentadas na Seção 2.2.1, pausas

---

<sup>3</sup>A escala pentatônica menor é comumente utilizada no *Blues* e é formada pelas notas: C, Eb, F, G e Bb.

também são consideradas como tal, visto que estas representam a ausência de som, ocupam espaço dentro de um compasso e, portanto, podem ser tocadas. A única restrição quanto à elas é o uso de técnicas. Como pausas não emitem nenhum som oriundo das vibrações das cordas, não é possível aplicar técnicas às mesmas. A tabela 3.1 apresenta as regras de formação utilizadas na criação do banco de *sublicks* regulares. Nesta tabela, qualquer nota musical que não seja definida como pausa será referida pelo termo “Nota Padrão”. Além disso, características adicionais às notas como o uso de técnicas ou de alguma alteração no tempo, como as quiálteras, serão representadas através do símbolo “+”.

Faz-se necessário citar uma particularidade inerente ao banco em questão, que é a presença de *sublicks* representados por pequenos acordes, os quais possuem uma regra de formação específica. Inicialmente, estes *sublicks* denotam apenas uma marcação, que é utilizada posteriormente na etapa de pós-processamento (Seção 3.1.6) com o objetivo de sinalizar a que altura do *lick* um acorde deve ser posicionado. Desta forma, é possível escolher quais notas farão parte do acorde pertinente ao *lick* baseando-se no acorde que está sendo tocado em um determinado momento durante a progressão *12-Bar Blues*, tornando a música mais agradável para o ouvinte.

Tabela 3.1: Regras de formação dos *sublicks* regulares

Regra de formação	Duração(ões) abrangida(s)
Pausa	Semínima e Colcheia
Pausa + Quiáltera	Semínima e Colcheia
Nota Padrão	Semínima, Colcheia e Semicolcheia
Nota Padrão + Bend	Semínima e Colcheia
Nota Padrão + Bend + Quiáltera	Semínima e Colcheia
Nota Padrão + Slide	Colcheia e Semicolcheia
Nota Padrão + Quiáltera	Colcheia
Acorde	Semínima

A escolha das notas musicais a serem utilizadas na criação dos *sublicks* é uma tarefa importante, dado que o problema de geração de *licks* de guitarra é classificado como um problema da classe NP-Difícil, fato mencionado na Seção 3.1.2. Isto significa que a dificuldade do problema a ser resolvido é diretamente proporcional à quantidade de notas musicais selecionadas, evento cuja natureza assemelha-se ao fato da quantidade de *sublicks* contidos no banco. Além da questão da complexidade, tal escolha também

influencia diretamente na natureza do *lick* resultante, visto que o mesmo advém destas notas.

Os *sublicks* estão no formato de arquivo MusicXML<sup>4</sup>, uma extensão baseada no formato XML<sup>5</sup>, que descreve uma peça musical em forma de notações musicais, as quais podem ser manipuladas através de alguma linguagem de programação.

### 3.1.2.2 O modelo matemático para *licks* regulares

Fazendo uma analogia entre o problema de geração de *licks* regulares e o PCV, pode-se perceber que as cidades correspondem aos *sublicks* e os deslocamentos entre elas equivalentes aos custos de transição. A seguir, o modelo matemático desenvolvido é descrito.

Dado um grafo  $G = (S, A)$ , onde  $S$  representa o conjunto de *sublicks* e  $A$  o conjunto de arcos conectando dois *sublicks* tal que  $A = \{(i, j) \mid i \neq j\}$ , seja  $p_{ij}$  a pontuação de transição entre o *sublick*  $i$  e o *sublick*  $j$ ,  $d_i$  a duração total do *sublick*  $i$ ,  $q_i$  a quantidade de notas que compõem o *sublick*  $i$ ,  $N$  uma constante que define a quantidade exata de notas que o *lick* resultante deve conter,  $B$  o conjunto de *sublicks* que possuem a técnica *bend*,  $SB$  uma constante que define a quantidade exata de *bends* que o *lick* resultante deve conter,  $S'$  o conjunto de *sublicks* que possuem a técnica *slide*,  $SS$  uma constante que define a quantidade exata de *slides* que o *lick* resultante deve conter,  $Q$  o conjunto de *sublicks* que possuem quiáltera,  $SQ$  uma constante que define a quantidade exata de quiálteras que o *lick* resultante deve conter,  $BN$  o conjunto de *sublicks* que possuem *blue note*,  $SBN$  uma constante que define a quantidade exata de *blue notes* que o *lick* resultante deve conter,  $P$  o conjunto de *sublicks* que possuem pausa e  $SP$  uma constante que define a quantidade exata de pausas que o *lick* resultante deve conter. Seja  $x_{ij}$  a variável binária que assume valor 1 se o arco  $(i, j)$  for utilizado e 0, caso contrário e  $y_i$  uma variável auxiliar que assume o valor 1 caso o *sublick*  $i$  tenha sido utilizado e 0, caso contrário.

A formulação matemática para o problema é a seguinte:

---

<sup>4</sup>[www.musicxml.com](http://www.musicxml.com)

<sup>5</sup>[wikipedia.org/wiki/XML](http://wikipedia.org/wiki/XML)

$$\min \sum_{i \in S} \sum_{j \in S} p_{ij} x_{ij} \quad (3.1)$$

$$\text{s.a.} \quad \sum_{j \in S} x_{ij} = y_i \quad \forall i \in S \quad (3.2)$$

$$\sum_{i \in S} x_{ij} = y_j \quad \forall j \in S \quad (3.3)$$

$$\sum_{i \in S} d_i y_i = 1 \quad (3.4)$$

$$\sum_{i \in S} q_i y_i = N \quad (3.5)$$

$$\sum_{i \in B} y_i = SB \quad (3.6)$$

$$\sum_{i \in S'} y_i = SS \quad (3.7)$$

$$\sum_{i \in Q} y_i = SQ \quad (3.8)$$

$$\sum_{i \in BN} y_i = SBN \quad (3.9)$$

$$\sum_{i \in P} y_i = SP \quad (3.10)$$

$$x_{ij} + x_{ji} \leq 1 \quad \forall i \in S, \forall j \in S, i \leq j \quad (3.11)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S} x_{ij} \geq 1, \quad \forall S \subseteq V', |S| > 2 \quad (3.12)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in S, \forall j \in S \quad (3.13)$$

$$y_i \in \{0, 1\} \quad \forall i \in S \quad (3.14)$$

A função objetivo (3.1) minimiza o custo de transição entre os *sublicks*. As restrições (3.2) e (3.3) estabelecem que caso o *sublick* tenha sido utilizado, nele chega apenas um arco e dele sai apenas um arco, respectivamente. As restrições (3.4) definem que o total da soma das durações dos *sublicks* utilizados deve ser igual à 1, ou seja, equivalente ao tamanho de 1 *lick* (1 compasso). As restrições (3.5) garantem que o número total de notas que compõem o *lick* resultante deve ser igual à constante  $N$ . As restrições (3.6), (3.7), (3.8), (3.9) e (3.10) garantem que, respectivamente, a quantidade de *bends*, *slides*, quiálteras,

*blue notes* e pausas que aparece no *lick* resultante seja equivalente à quantidade definida pela entrada. As restrições (3.11) e (3.12) eliminam a ocorrência de *subtours* (ciclos) e as restrições (3.13) e (3.14) são restrições de integralidade que permitem que as variáveis assumam apenas os valores 0 ou 1.

### 3.1.3 Gerando *licks* de repetição

Para gerar os *licks* de repetição, uma abordagem quase idêntica à utilizada na geração dos *licks* regulares é empregada. A única diferença existente está relacionada ao tamanho do trecho melódico resultante que, neste caso, é equivalente à 1/4 de um compasso completo. Esta restrição é consequência do modo como os *licks* de repetição foram apresentados neste trabalho. Recapitulando o que foi definido na Seção 3.1.1.1, um *lick* de repetição é caracterizado como tal se ocorrerem determinados padrões de repetição ao longo da melodia. Cada padrão citado representa, em termos de tamanho, 1/4 de um compasso (*lick*) completo.

Neste contexto, a ideia para construir *licks* de repetição foi justamente a de gerar vários fragmentos melódicos de tamanhos iguais a 1/4 de compasso, a fim de concatená-los seguindo a mesma linha dos padrões percebidos por Cunha et al (2018) em seu banco de dados. Uma vez que esta etapa é concluída, um dentre os quatro padrões de repetição apresentados é escolhido de forma aleatória, e assim, baseando-se neste último, um *lick* de repetição é construído. Desta forma, comparado ao modelo matemático utilizado para gerar os *licks* regulares, o modelo exato dos *licks* de repetição difere em apenas uma restrição, a qual se refere ao tamanho da melodia resultante, que passa a ser 1/4 de um compasso completo. A equação 3.15 descreve a restrição adaptada.

$$\sum_{i \in S} d_i y_i = 1/4 \quad (3.15)$$

### 3.1.3.1 O banco de *sublicks* de repetição

Para criar o banco de *sublicks* de repetição, os mesmos critérios utilizados na criação do banco de *sublicks* regulares são empregados. A diferença entre as abordagens está relacionada às regras de formação dos *sublicks*. Como mencionado na seção 3.1.2.1, as regras de formação dos *sublicks* regulares englobam o uso de pausas, notas musicais em sua forma padrão, técnicas como *Bend* e *Slide*, acordes, além de alterações nas durações das notas, chamadas de quiálteras.

De outro modo, para construir os *sublicks* de repetição, apenas três regras de formação são utilizadas, as quais estão descritas na tabela 3.2. Todas as considerações descritas na Seção 3.1.2 para os *sublicks* regulares também são válidas na construção dos *sublicks* de repetição.

Tabela 3.2: Regras de formação dos *sublicks* de repetição

Regra de formação	Duração(ões) abrangida(s)
Nota Padrão	Colcheia e Semicolcheia
Nota Padrão + Bend	Semínima e Colcheia
Nota Padrão + Quiáltera	Colcheia

### 3.1.4 Gerando *licks turnaround*

Definidos na Seção 3.1.1.2, os *licks turnaround*, diferentemente dos demais tipos de *licks* apresentados no corrente trabalho, são caracterizados por serem constituídos por dois compassos, os quais são utilizados ao final de uma progressão *12-Bar Blues*. Este último fato dá-se através de um aspecto intrínseco aos *licks* em evidência, que é a transmissão de uma sensação de término ao ouvinte. Diante deste contexto, uma abordagem distinta das utilizadas para construir os outros tipos de *licks* é empregada como uma tentativa de se aproximar o máximo possível da captura desta peculiaridade.

Cada compasso do *lick turnaround* é construído separadamente através de métodos computacionais diferentes. O primeiro compasso resulta de um processo estocástico chamado Cadeia de Markov, cujo objetivo é predizer notas musicais baseando-se na probabilidade de ocorrências anteriores, enquanto que o segundo compasso é oriundo do mesmo método utilizado para gerar os *licks* regulares e os *licks* de repetição, que é a utilização de

um modelo matemático, com algumas pequenas adaptações.

Ao final do processo, o *lick turnaround* é formado mediante a concatenação dos dois compassos advindos dos métodos computacionais citados, que são definidos a seguir.

#### 3.1.4.1 O primeiro compasso

Para construir o primeiro compasso de um *lick turnaround*, uma abordagem baseada no método Cadeia de Markov foi elaborada. Os atributos modelados pelo esquema definido são a altura e a duração, ambos pertencentes às notas musicais. Apesar de fazer parte do escopo deste trabalho, técnicas de guitarra não estão incluídas na geração do tipo de *lick* em evidência, especificamente. Conseqüentemente, duas matrizes que representam a contagem das transições observadas de ambos os atributos são utilizadas, ou seja, para determinar estas matrizes, são levadas em consideração as frequências das transições entre notas musicais, nas quais estão encapsuladas suas respectivas alturas e durações.

Por conseguinte, um banco de *licks turnaround* foi criado englobando *licks* retirados de McCabe (2002). A fim de obter uma maior nitidez relacionada à essência do estilo dos *licks turnaround*, o primeiro compasso de cada *lick* utilizado no método é dividido em quatro subcompassos, de forma que cada um destes contenha uma quantidade aproximada de notas musicais. Este artifício facilita o processo de predição de notas ao longo do compasso que está sendo construído, pois lidar localmente com uma porção do problema é mais trivial do que lidar com o problema como um todo. Perante esta abordagem, é sensato afirmar que quatro cadeias são definidas, de modo que cada cadeia se encarrega de produzir 1/4 do compasso resultante. Ao final do processo, a concatenação destas porções de compasso é realizada.

Para cada subcompasso, sejam  $A$  e  $B$  duas matrizes referentes aos atributos altura e duração, respectivamente, que armazenam ocorrências de transições entre notas musicais e  $i$  e  $j$  duas notas musicais pertencentes ao primeiro compasso de um *lick* qualquer contido no banco. Cada matriz é preenchida à medida que as notas dispostas ao longo do subcompasso são processadas uma a uma. Além disso, os rótulos de suas linhas e colunas provêm de um par de domínios que contêm tipos distintos encontrados de cada atributo, obtidos através

de notas empregadas nos *licks* pertencentes ao banco. Logo, adicionalmente, sejam  $i_a$  e  $i_d$  definidas como a altura e a duração de  $i$  e, igualmente,  $j_a$  e  $j_d$  definidas como a altura e a duração de  $j$ . Diante deste contexto, caso a transição  $i \rightarrow j$  aconteça, será computada por meio do incremento dos elementos  $Ai_a j_a$  e  $Bi_d j_d$  em suas matrizes correspondentes.

Com as matrizes de contagem de transições observadas preenchidas e normalizadas, a nota de partida que iniciará a cadeia deve ser definida. A primeira nota que fará parte deste *lick* é proveniente de um sorteio isolado, o qual é baseado na quantidade de ocorrências referente à primeira nota musical de cada *lick turnaround* do banco. Definida esta nota, o próximo passo é realizar sorteios sucessivos a fim de descobrir quais notas musicais farão parte do primeiro compasso do *lick turnaround* sendo construído. O processo termina quando um compasso completo for obtido através da concatenação de todas as notas musicais sorteadas. Lembrando que, quatro cadeias são determinadas, uma para cada fatia a ser gerada. Vale salientar que, durante o processo de predição das notas musicais, a transição entre a nota anterior, que já se encontra no compasso, e a recém sorteada é computada nas matrizes correspondentes, fazendo com que o seu estado seja alterado para uma ordem superior.

#### 3.1.4.2 O segundo compasso

Para construir o segundo compasso de um *lick turnaround*, a mesma abordagem matemática utilizada na construção dos *licks* regulares e dos *licks* de repetição é empregada, com ressalva para algumas diferenças. A primeira delas, é a de que as notas musicais utilizadas como entrada para gerá-lo não advêm da escala pentatônica menor de Dó, como nos *licks* regulares e nos *licks* de repetição, mas sim de notas musicais utilizadas na composição do segundo compasso dos *licks turnaround* retirados de McCabe (2002).

A segunda diferença está relacionada ao tamanho do trecho melódico resultante que, neste caso, é equivalente a  $1/2$  de um compasso completo. Foi decidido que esta restrição teria este comportamento observando a forma como os *licks turnaround* do banco são finalizados. Em grande maioria dos casos, aproximadamente a primeira metade do segundo compasso destes *licks* é composta por notas musicais com durações que vão de

semicolcheias à semínimas. Já a segunda metade é representada por notas com durações maiores, como mínimas, fazendo com que estas notas musicas soem durante todo o resto do compasso remanescente.

Desta maneira, a fim de reproduzir o mesmo comportamento encontrado nestes *licks*, após a criação de um fragmento proporcional à 1/2 de um compasso completo, a última nota musical petencente a este fragmento é estendida de forma a completar o *lick*, produzindo o efeito de soamento desta nota. A equação 3.16 descreve a restrição adaptada dos modelos descritos anteriormente para o método de que se trata.

$$\sum_{i \in S} d_i y_i = 1/2 \quad (3.16)$$

A terceira e última diferença, assim como nos *licks* de repetição, relaciona-se às regras de formação estipuladas para a formação dos *sublicks* que compõem o banco utilizado no método corrente. A tabela 3.3 apresenta uma visão geral destas regras.

Tabela 3.3: Regras de formação dos *sublicks turnaround*

Regra de formação	Duração(ões) abrangida(s)
Pausa + Quiáltera	Semínima e Colcheia
Bend + Quiáltera	Colcheia
Nota Padrão + Quiáltera	Colcheia e Semicolcheia

### 3.1.5 Regras de transição e matrizes de custo

Para gerar os *licks* regulares, os *licks* de repetição e o segundo compasso dos *licks turnaround*, fez-se necessário o uso de formulações matemáticas para o sequenciamento de *sublicks*. Este sequenciamento é guiado através de matrizes de custo, as quais são construídas com base em regras que englobam conceitos musicais e tocabilidade do instrumento guitarra. Seja  $M$  uma matriz de custo referente à um determinado conjunto de *sublicks* e sejam  $s_1$  e  $s_2$  dois *sublicks* quaisquer contidos neste conjunto. A transição do *sublick*  $s_1$  para o *sublick*  $s_2$  é representada pelo elemento  $M_{s_1 s_2}$  da matriz em questão que representa um *score*, sendo este último resultante da aplicação das regras definidas.

Estas regras foram estabelecidas com base em entrevistas realizadas com profissionais do instrumento guitarra, na análise de *licks* de *Blues* que podem ser encontrados em Fritts (2012), bem como na forma que a literatura aborda a aplicação de elementos inerentes ao instrumento, como técnicas, além das boas práticas relacionadas ao estilo (Corporation et al, 2014; Phillips e Chappell, 2012; Fritts, 2012; McCabe, 2002; Weissman, 2004; Chipkin, 1998; Riker, 1994; Ganapes, 2015; Schonbrun, 2003).

Para calcular a distância entre duas notas musicais foi utilizado um método encontrado em Mistler (2017) que consiste em projetar o braço da guitarra em um plano cartesiano de modo que uma nota, analogamente a um ponto munido de coordenadas  $x$  e  $y$ , pode ser descrita em função da casa e da corda em que a mesma se encontra. Neste caso, a distância entre duas notas musicais equivale à distância euclidiana calculada por meio de suas posições. Por exemplo, sejam  $n_1$  e  $n_2$  duas notas musicais e  $(f_1, s_1)$  e  $(f_2, s_2)$  suas respectivas posições, onde  $f_1$  e  $f_2$  correspondem às casas e  $s_1$  e  $s_2$  correspondem às cordas referentes às notas  $n_1$  e  $n_2$ , nesta ordem. A distância física entre estas duas notas dá-se através da equação 3.17.

$$dist(n_1, n_2) = \sqrt{(f_2 - f_1)^2 + (s_2 - s_1)^2} \quad (3.17)$$

A tabela 3.4 descreve todas as regras e pontuações utilizadas na construção das matrizes de custo dos *licks* regulares, dos *licks* de repetição e dos *licks turnaround*, enquanto que a tabela 3.5 identifica quais regras foram empregadas em determinado método de geração.

### 3.1.6 Pós-processamento

Em posse da progressão *12-Bar Blues* derivado do sequenciamento de *licks* efetuado pela formulação, a etapa de pós-processamento é caracterizada pelo uso de heurísticas de refinamento que adicionam e melhoram características referentes ao modo como os *licks* interagem entre si. Cada compasso desta progressão é analisado, um a um, passando por processos que removem dissonâncias e adicionam propriedades as quais não foi possível

Tabela 3.4: Visão geral de todas as regras empregadas

Regra	Descrição	Pont.
1	Se a distância entre a nota $i$ e a nota $j$ é $> 2$	+250
2	Se a distância entre a nota $i$ e a nota $j$ é $\leq 2$	-150
3	Se ambas as notas $i$ e $j$ possuem quiáltera e têm duração equivalente à Semínima	-100
4	Se ambas as notas $i$ e $j$ possuem quiáltera	+125
5	Se ambas as notas $i$ e $j$ possuem quiáltera e têm a mesma duração	+175
6	Se a nota $i$ possui quiáltera e a nota $j$ não, ou vice-versa	+100
7	Se a diferença de cordas onde estão localizadas as notas $i$ e $j$ é $> 1$	+150
8	Se a diferença de cordas onde estão localizadas as notas $i$ e $j$ é $\leq 1$	-250
9	Se a nota $i$ é igual à nota $j$	+75
10	Se a nota $i$ é igual à nota $j$ e a nota $i$ possui bend e a nota $j$ não, ou vice-versa	-225
11	Se a nota $i$ possui bend atingindo a altura da nota $j$ e $j$ encontra-se na corda abaixo	-175
12	Se a nota $j$ possui bend atingindo a altura da nota $i$ e $i$ encontra-se na corda acima	-175
13	Se a nota $j$ localizar-se uma posição anterior ou posterior à nota $i$ na escala pentatônica	-250
14	Se a soma das durações de $i$ e $j$ em caso de pausa é $> 1/2$ de um compasso completo	+75
15	Se a soma das durações de $i$ e $j$ em caso de pausa é $\leq 1/4$ de um compasso completo	-75
16	Se a nota $i$ é <i>blue note</i> (Gb) e a nota $j$ é pausa	+100
17	Se a nota $i$ é F e a nota $j$ é <i>blue note</i> (Gb)	-100
18	Se a nota $i$ é <i>blue note</i> (Gb) e a nota $j$ é G	-100
19	Se a nota $i$ é Eb, F ou C e a nota $j$ é <i>blue note</i> (Gb)	-150
20	Se a nota $i$ é <i>blue note</i> (Gb) e possui <i>bend</i> e a nota $j$ é F ou G	-150
21	Se a nota $i$ é diferente de Eb, F ou G e a nota $j$ é <i>blue note</i> (Gb) e possui <i>bend</i>	+150
22	Se a nota $i$ é <i>blue note</i> (Gb) e possui <i>bend</i> e a nota $j$ é diferente de Gb ou G	+150

Tabela 3.5: Correspondência entre as regras descritas e os métodos de geração

Regra	Tipos de <i>licks</i>
1 a 15	regulares, repetição, <i>turnaround</i>
16	regulares, <i>turnaround</i>
17 e 18	<i>turnaround</i>
19 a 22	regulares

inserir-las na etapa de sequenciamento dos *sublicks*.

Mais uma vez, a elaboração de regras com o apoio da literatura fez-se necessária com o intuito de refinar a melodia final. Estas regras alteram o estado inicial do *lick* por meio da adição de técnicas de guitarra como *Hammer-on*, *Pull-off* e vibrato, bem como a substituição de notas dissonantes com base no acorde que está sendo executado, entre outros aspectos.

Dissonâncias são, de certa forma, sons desagradáveis ao ouvido. Estas são encontradas em algumas partes do solo, quando há uma discordância entre a nota musical e o acorde que estão sendo tocados. As regras responsáveis pelas dissonâncias entre notas e acordes lidam com a situação substituindo notas que, apesar de constituírem a escala pentatônica menor de C, não estão inseridas no acorde tocado. Estas últimas dão lugar à outras notas distintas, as quais pertencem à um determinado domínio que compreende

tanto a escala pentatônica menor quanto a escala diatônica de C. Há também a particularidade da nota  $E\flat$  que, por sua vez, representa a *blue note* pertencente à escala pentatônica maior de C, a qual não faz parte do escopo deste trabalho. Este conceito faz com que esta nota também careça de um tratamento exclusivo de acordo com seu posicionamento na progressão.

A fim de minimizar o custo da solução final, as formulações matemáticas tendem a escolher o menor número de transições possíveis para compor o *lick* resultante, de forma que uma pequena quantidade de notas é utilizada. Conseqüentemente, observou-se com frequência *licks* que iniciavam a partir de notas com durações significativas. Nesta situação, com o intuito de atenuar essa propriedade determinística, regras para a decomposição destas notas de duração notável também tornaram-se necessárias.

Diante do que foi exposto, todas as regras aplicadas à melodia resultante são denotadas a seguir. De maneira a facilitar o seu entendimento, elas foram divididas em 3 grupos. O primeiro grupo destina-se às regras para resolução de dissonâncias, o segundo grupo destina-se à regras para adição de técnicas e características, enquanto que o terceiro grupo destina-se à regras para lidar com o determinismo na escolha da nota que inicia os *licks*, devido à sua duração. As regras pertencentes ao primeiro grupo são aplicadas em conformidade com o acorde que está sendo tocado num certo ponto da progressão. Além disso, as notas musicais contidas em cada *lick* analisado são processadas linearmente.

Para o primeiro grupo, a nota musical de que se trata será substituída caso:

- a primeira nota do *lick* seja F ou  $E\flat$  com duração  $>$  que uma colcheia + quiáltera e o acorde em execução seja C;
- houver um F ou  $E\flat$  ao longo do *lick* com duração  $>$  que uma colcheia e o acorde em execução seja C;
- a primeira nota do *lick* seja  $B\flat$  com duração  $>$  que uma colcheia e o acorde em execução seja F;
- a primeira nota do *lick* seja C com duração  $>$  que uma colcheia + quiáltera e o acorde em execução seja G;

- houver um  $E\flat$  ao longo do *lick* com duração  $>$  que uma colcheia e o acorde em execução seja G;
- a primeira nota do *lick* seja  $B\flat$  com duração  $>$  que uma colcheia + quiáltera e o acorde em execução seja G;
- houver um  $B\flat$  ao longo do *lick* com duração  $>$  que uma colcheia e o acorde em execução seja G.

Para o segundo grupo, caso:

- a nota corrente possua duração  $>$  que uma semínima, aplica-se vibrato à mesma;
- duas notas consecutivas encontram-se na mesma corda, probabilidade de 30% de aplicar *Hammer-on/Pull-off* às mesmas.

E para o terceiro grupo, caso:

- a primeira nota do *lick* possua duração  $>$  que uma semínima, probabilidade equi-provável de aplicar lidadura à mesma ou particioná-la em duas outras notas.

### 3.2 VALIDAÇÃO DA FERRAMENTA PROPOSTA

Como visto na Seção 2.4, Cunha et al (2018) avaliaram os resultados de seu trabalho através de um teste de audição baseado no trabalho de Hall e Smith (1996) onde os solos resultantes, definidos pelos autores como aleatórios e otimizados, foram submetidos à avaliação de pessoas com diferentes níveis de conhecimento musical que variaram entre básico, intermediário e profissional. Cada avaliador era submetido à audição de seis solos de guitarra, três da classe otimizados e três da classe aleatórios, sem que o mesmo tivesse conhecimento desta circunstância. Uma escala do tipo Likert<sup>6</sup> variando de 1 (Péssimo) a 7 (Excelente) foi utilizada para mensurar o nível de satisfação destes avaliadores para com os solos. Além desta informação, os ouvintes também deveriam informar se o solo sendo avaliado poderia ser utilizado em uma composição musical ou uma apresentação ao vivo.

---

<sup>6</sup>Um modelo de escala onde o respondente externa seu grau de concordância sobre algo (Aguilar et al, 2011).

Analogamente, neste trabalho, foi empregada uma abordagem semelhante que consiste na avaliação de solos de guitarra no estilo *Blues* com naturezas distintas; os caracterizados como otimizados, os quais serão denominados aqui de “semi-automáticos”, bem como os gerados a partir de *licks* derivados da ferramenta proposta, de agora em diante denominados de “automáticos”. Estes termos foram definidos de acordo com propriedades intrínsecas à cada tipo de solo. Por exemplo, os solos semi-automáticos, análogos aos solos otimizados no trabalho de Cunha et al (2018), são constituídos por *licks* que já contêm, inerentemente, algumas características musicais encapsuladas como técnicas e durações, enquanto que os solos automáticos, escopo deste trabalho, são constituídos por *licks* que foram construídos através da manipulação da porção mais elementar da música, que é a nota musical.

A fim de reproduzir fielmente o experimento, a utilização do mesmo modelo matemático para o sequenciamento dos *licks* fez-se necessária. Por outro lado, o banco de dados considerado é composto por *licks* resultantes do método aqui desenvolvido. É importante evidenciar também que os solos semi-automáticos foram originados através do próprio modelo matemático nativo a estes, bem como o uso do mesmo banco de *licks*, ambos provenientes de Cunha et al (2018).

Segundo Freitas (2011b), a música é um universo muito subjetivo e não existe uma definição certa do que significa a palavra “qualidade” neste âmbito. Com base neste contexto, uma consideração a respeito da estratégia de avaliação aplicada deve ser efetuada; na maioria dos casos, não é possível afirmar com clareza se uma determinada música é boa ou ruim, ou que uma música é melhor do que outra. Esta afirmação verifica-se pelo fato de tratar-se de um tópico com um grau de abstração significativo que depende da análise de várias variáveis, como por exemplo, o gosto musical inerente ao ouvinte.

Logo, no que diz respeito ao experimento empregado neste trabalho, pode-se afirmar que as melodias precisam apenas ser agradáveis de se ouvir ao sentido humano, a fim de chegar o mais próximo possível da ideia de que os solos de guitarra automáticos soam equivalentemente aos solos semi-automáticos. Diz-se “equivalentemente”, considerando o fato de que os *licks* utilizados na composição dos solos semi-automáticos foram compostos por guitarristas, o que traz à tona uma discussão relacionada à capacidade que um mé-

todo computacional possui de reproduzir o sentimento que um humano emprega em uma composição musical.

# Capítulo 4

## RESULTADOS

### 4.1 RESULTADOS COMPUTACIONAIS

Dentre as características determinantes para a construção da solução, podemos destacar a parametrização de entrada fornecida à ferramenta, que é representada pela quantidade de notas musicais e de técnicas que devem constituir o *lick* resultante; o domínio<sup>1</sup> de notas musicais que é utilizado; e as regras empregadas para determinar o custo de transição entre os *sublicks*.

Diversos testes foram realizados combinando variações de cada uma das características citadas. Diante disso, podemos observar que há uma grande quantidade de possibilidades de criação, visto que cada uma destas características influencia no resultado final. Bons exemplos desse fato, é o balanceamento das pontuações das regras de transição, as quais guiam a busca da solução no espaço, além da definição do tamanho do domínio de notas musicais, pois quanto mais notas tal domínio contiver, mais complexo ficará o problema de ser resolvido, devido à quantidade combinatorial de possibilidades.

Nas seções subsequentes são exibidos dados e gráficos provenientes da análise estatística realizada com os resultados da avaliação.

#### 4.1.1 Resultados das avaliações

Após o encerramento da fase de coleta de dados, contabilizou-se uma população total de 60 avaliações de modo que destas, 6 foram realizadas por pessoas com nível conhecimento musical básico, 33 por pessoas com nível conhecimento musical intermediário

---

<sup>1</sup>Tal domínio é estabelecido através da seleção das notas musicais que serão consideradas, ao longo do braço da guitarra.

e 21 por pessoas com nível conhecimento musical profissional. As figuras 4.1 e 4.2 reportam a visão geral das pontuações dadas para cada tipo de solo, respectivamente.

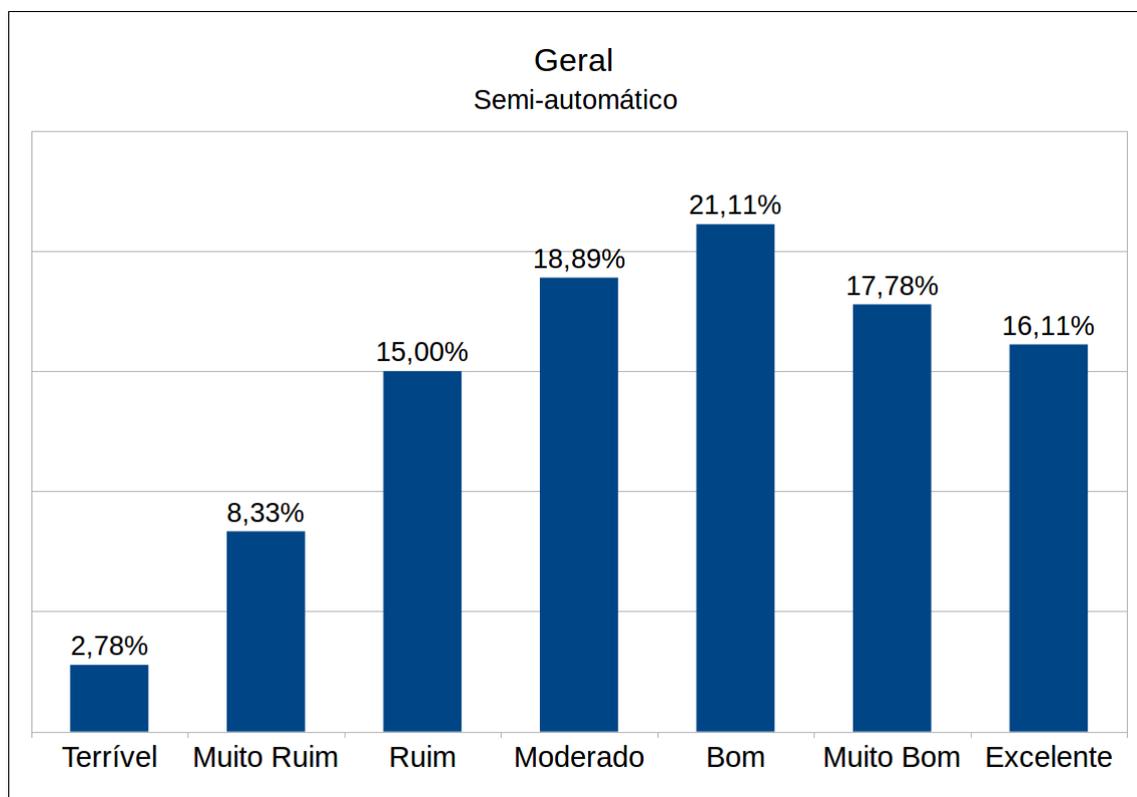


Figura 4.1: *Visão geral das avaliações dos solos semi-automáticos*

Baseado no que foi exposto até agora e contrariamente ao trabalho de Cunha et al (2018), o objetivo deste experimento é verificar inexistência de uma diferença estatística nos dados de modo que, caso a aceitação dos solos automáticos seja significativamente inferior à aceitação dos solos semi-automáticos, a hipótese de que estes não possuem características que os definem como solos interessantes ou agradáveis de se ouvir pode ser levantada, inviabilizando o papel da ferramenta proposta neste trabalho. No outro extremo, caso a aceitação dos solos automáticos seja significativamente superior à aceitação dos solos semi-automáticos, outra hipótese de que este fato seria no mínimo incoerente também pode ser levantada, baseando-se na premissa de que uma máquina ainda não possui a capacidade de reproduzir o sentimento humano depositado em composições musicais.

Sendo assim, a figura 4.3 representa um gráfico da categoria *Box plot* no qual podemos notar uma pequena diferença de aceitação de 0.322 entre os dois tipos de solo, com base nas médias das pontuações de todos os participantes. O termo “semi” descreve

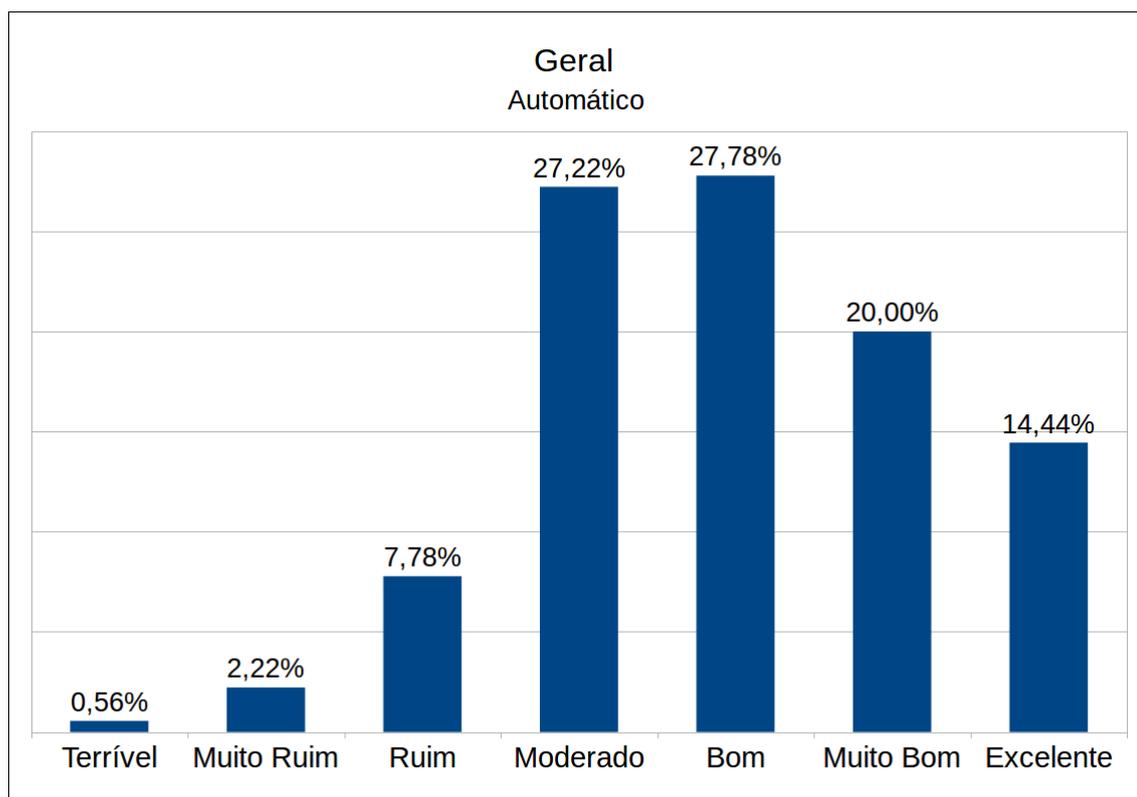


Figura 4.2: *Visão geral das avaliações dos solos automáticos*

o *box* relacionado aos solos caracterizados como semi-automáticos, enquanto que o tempo “auto” descreve o *box* relacionado aos solos caracterizados como automáticos.

É notável que dificilmente não haverá uma diferença, por mínima que seja, entre duas classes de dados distintas como no caso atual, no qual o nível de apreciação dos solos automáticos foi superior ao dos solos semi-automáticos. Contudo, deve-se verificar se a diferença é significativa o bastante para ser levada em consideração, o que decidirá se ocorreu de fato uma diferença estatística nos dados coletados. Para isso, assim como em Cunha et al (2018), neste trabalho, o *Wilcoxon signed test rank* também foi utilizado, o qual adequa-se à análise de dados pareados de forma combinada através da diferença entre médias. Em termos estatísticos, o teste é utilizado para verificar se a distribuição de probabilidade de uma amostra pertencente à uma determinada classe é igual à distribuição de probabilidade de outra amostra pertencente à uma classe distinta (Woolson, 2007).

Neste contexto, o p-valor resultante para o teste realizado com nível de significância de 5% foi de 0,0469. Este fato retrata que tende a existir uma diferença entre os dois tipos de solo em evidência. Contudo, com o intuito de aceitar a hipótese nula, a significân-

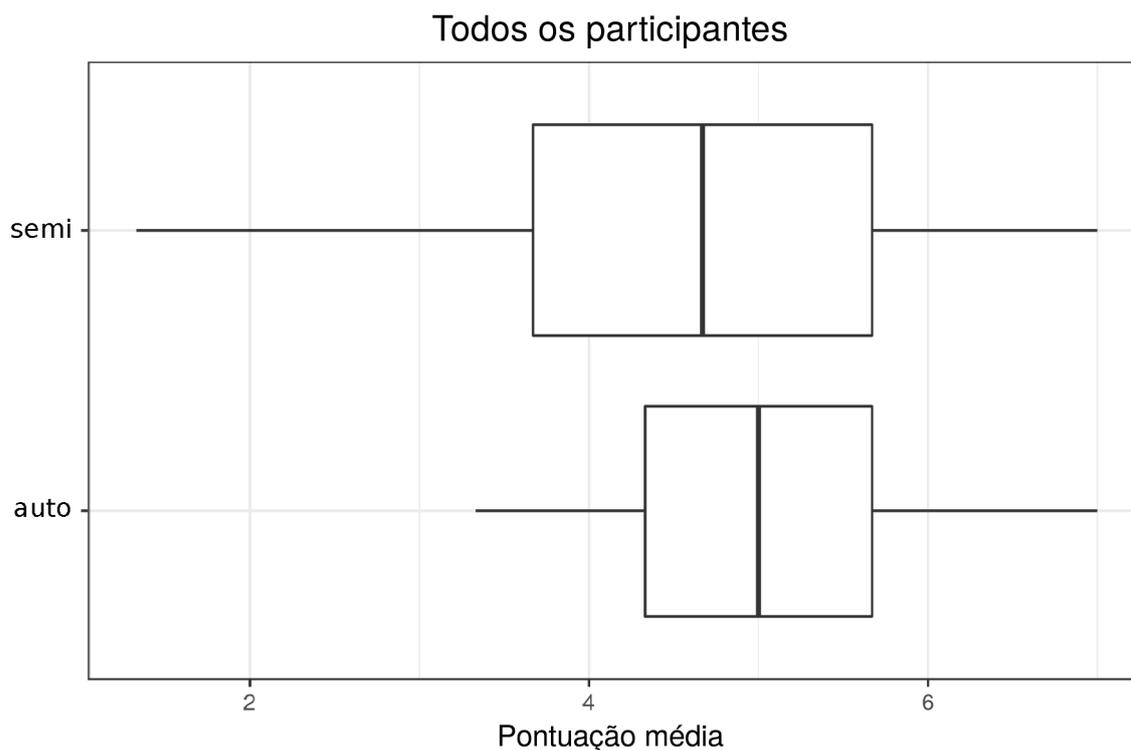


Figura 4.3: *Visão geral das pontuações médias de ambos os tipos de solo*

cia desta diferença foi verificada através da confirmação de que o conjunto de diferenças pareadas deve possuir probabilidade de distribuição centrada em zero (Woolson, 2007). Nestas circunstâncias, com um intervalo de confiança de 95%, a figura 4.4 apresenta a diferença da média pareada para cada nível de conhecimento musical, bem como todos eles de forma geral. Os termos “semi” e “auto” correspondem, respectivamente, aos solos semi-automáticos e automáticos. Pode-se observar que, como mencionado, o intervalo de confiança de cada grupo em questão passa pelo zero, de modo a corroborar a possibilidade da não existência de uma diferença entre os tipos de solos abordados.

Com o propósito de complementar os resultados, dados isolados à respeito dos índices de satisfação para cada nível de conhecimento musical, enquadrando solos de ambas as categorias, são apresentados. As figuras 4.5 e 4.6 reportam as avaliações dos participantes de nível iniciante, as figuras 4.7 e 4.8 reportam as avaliações dos participantes de nível intermediário e as figuras 4.9 e 4.10 reportam as avaliações dos participantes de nível profissional. Diante destas informações, é possível perceber que os solos automáticos tiveram um índice de satisfação mais promissor em relação aos solos semi-automáticos.

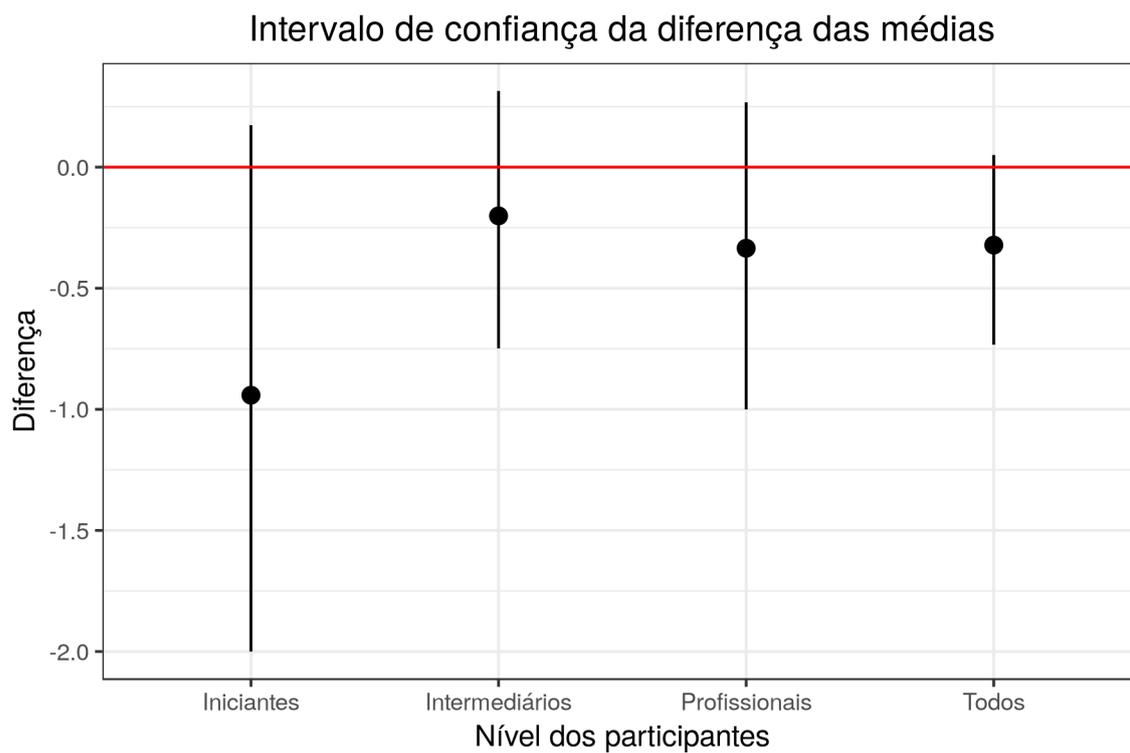


Figura 4.4: *Intervalo de confiança da diferença das médias para todos os níveis de participantes referentes aos índices de satisfação*

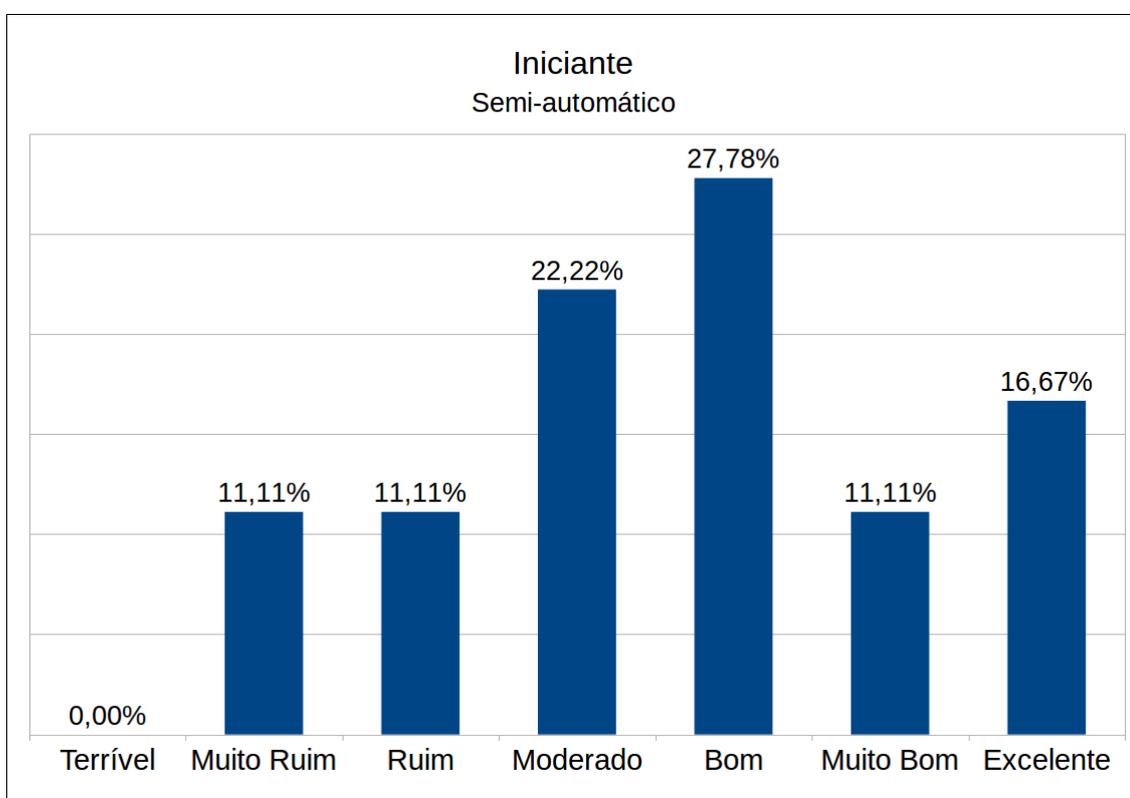


Figura 4.5: *Avaliação dos solos semi-automáticos pelos participantes de nível iniciante*

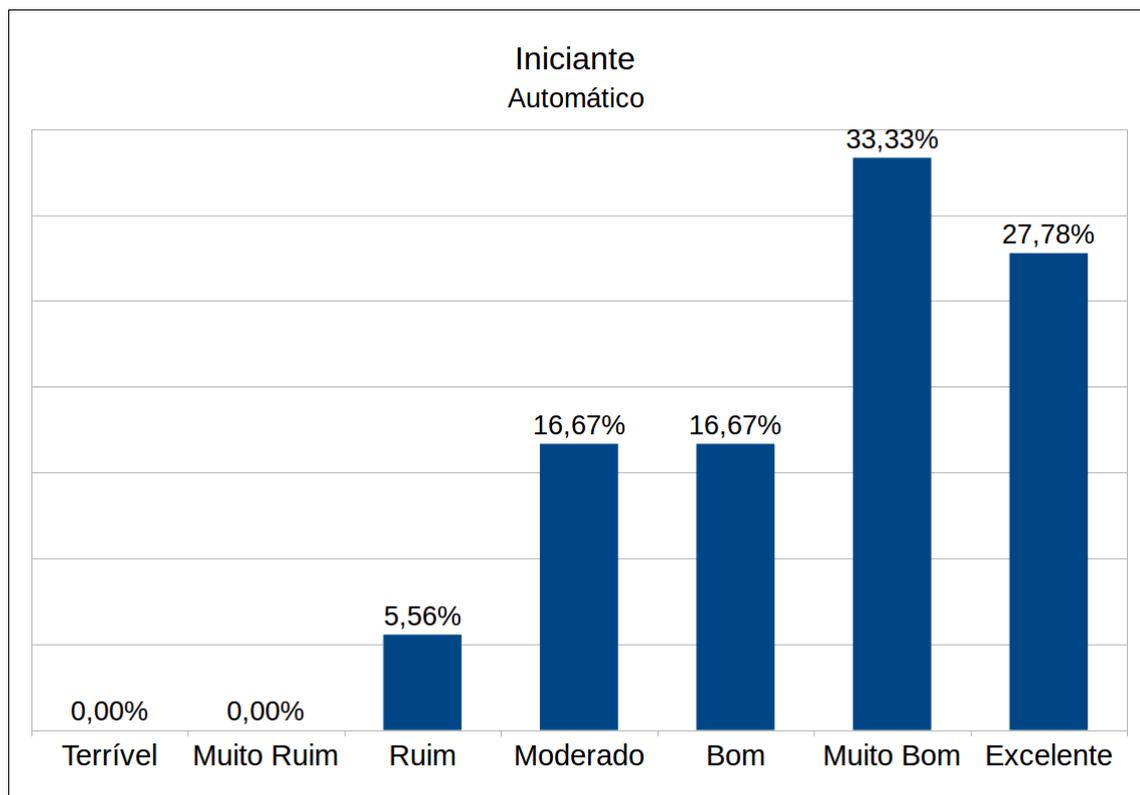


Figura 4.6: Avaliação dos solos automáticos pelos participantes de nível iniciante

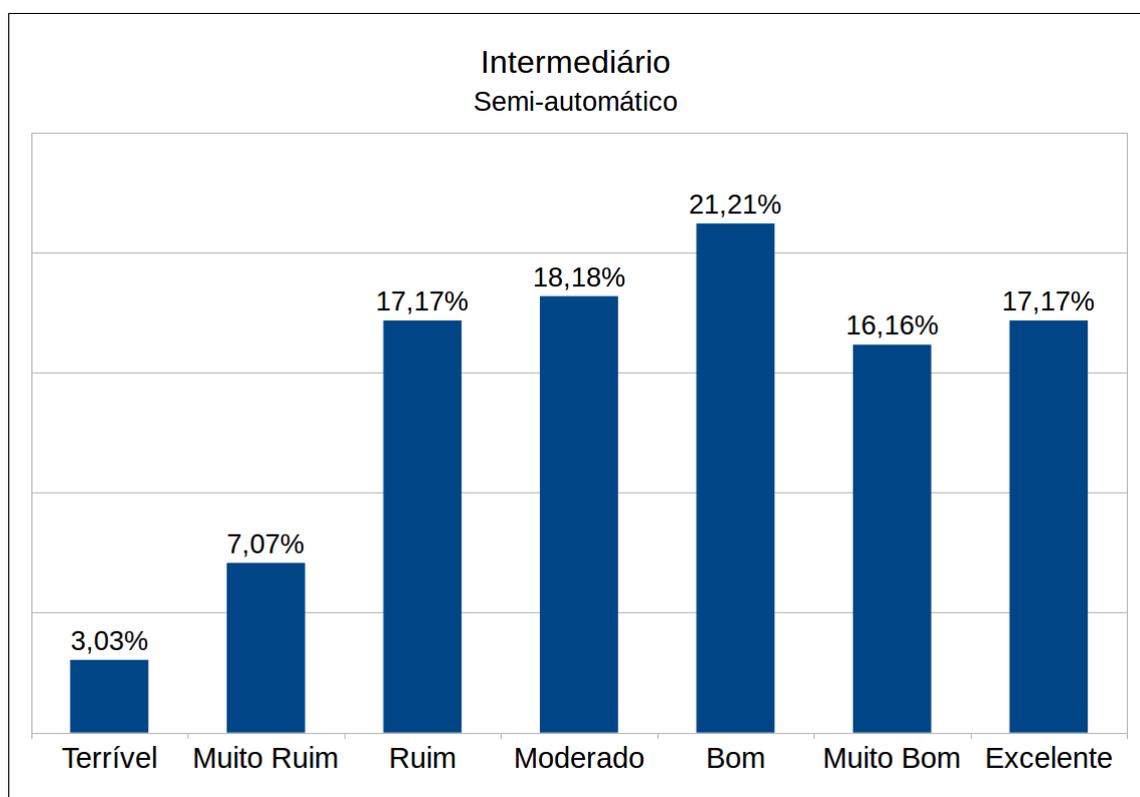


Figura 4.7: Avaliação dos solos semi-automáticos pelos participantes de nível intermediário

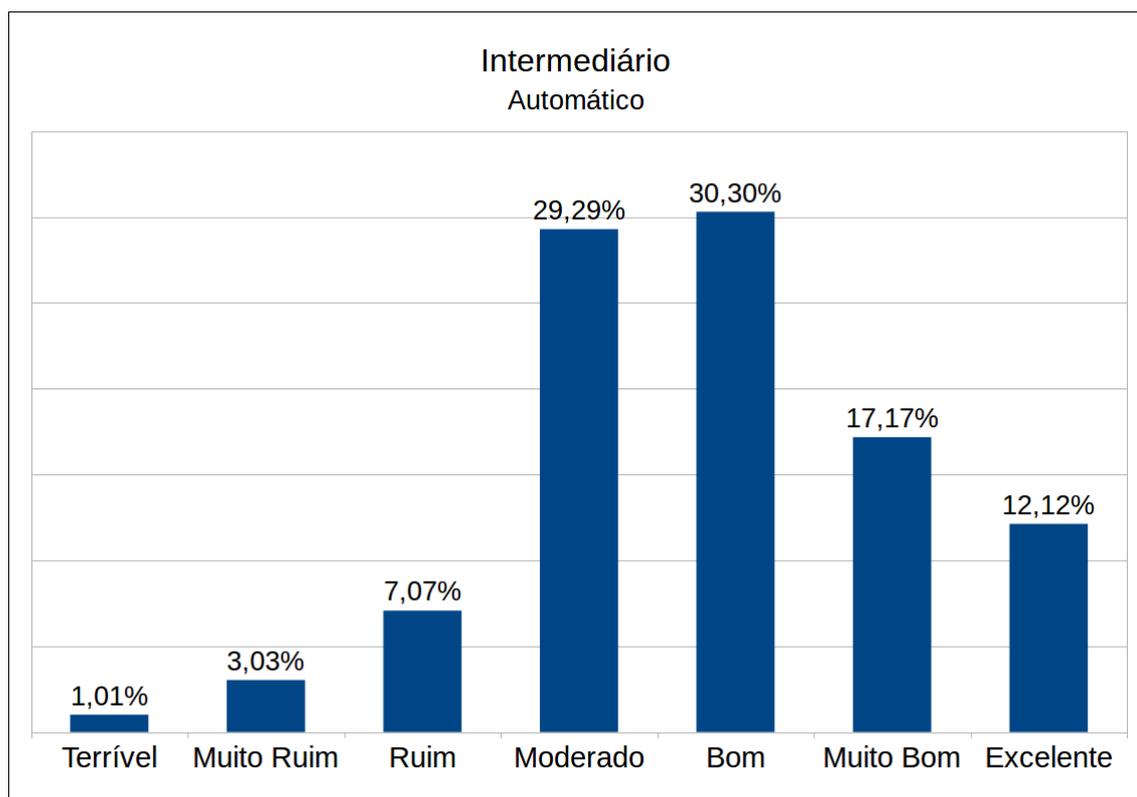


Figura 4.8: Avaliação dos solos automáticos pelos participantes de nível intermediário

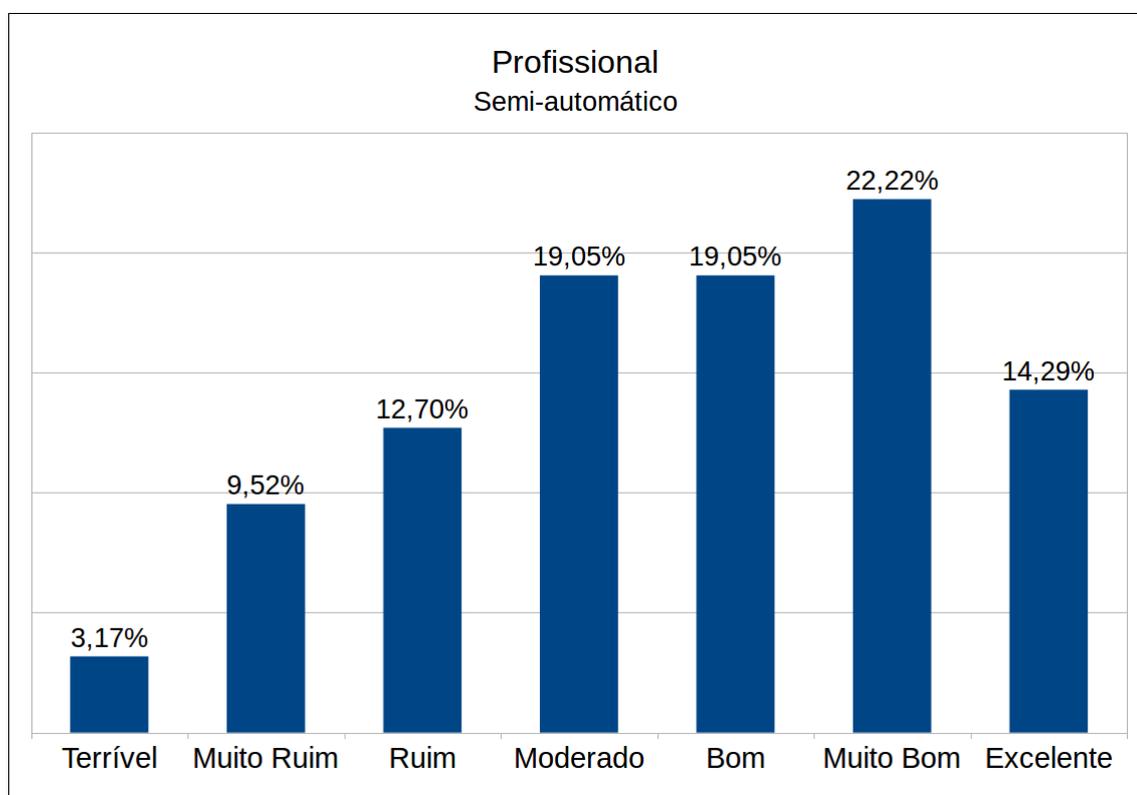


Figura 4.9: Avaliação dos solos semi-automáticos pelos participantes de nível profissional

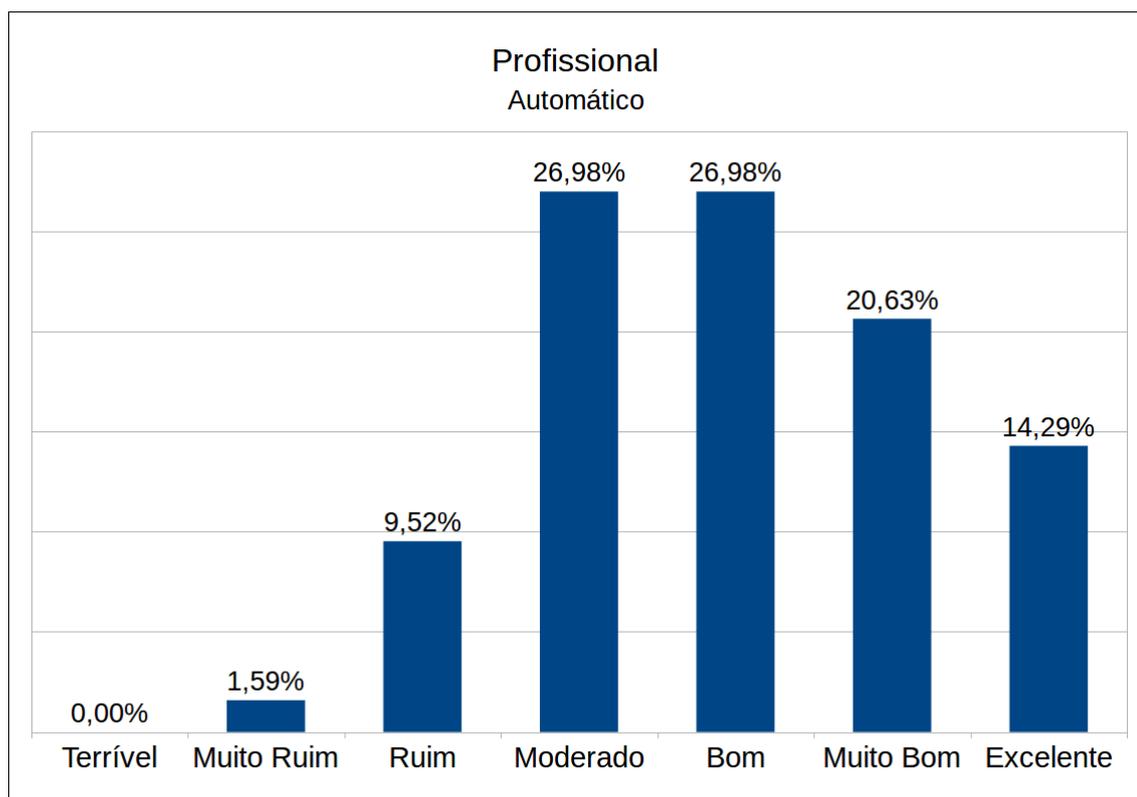


Figura 4.10: Avaliação dos solos automáticos pelos participantes de nível profissional

Analogamente aos índices de satisfação, a frequência que cada solo foi selecionado para um possível uso em uma apresentação ao vivo ou uma composição musical também foi computada. As figuras 4.11 e 4.12 refletem um uso mais frequente dos solos automáticos pelos avaliadores em relação aos solos semi-automáticos, enquanto que a figura 4.13 apresenta a diferença das médias para cada nível de conhecimento musical, bem como a média dos níveis de forma geral.

Para este teste, foi encontrado um p-valor equivalente à 0,0479 com um nível de significância de 5%, retratando a mesma condição que foi encontrada no teste anterior relacionado aos índices de satisfação dos participantes. Analisando a figura 4.13, com um intervalo de confiança de 95%, percebe-se que as médias referentes aos avaliadores de nível iniciante e profissional não possuem probabilidade de tocar o zero. Porém, contrariamente, a média referente aos avaliadores de nível intermediário, bem como a média geral relativa à todos os níveis passam pelo zero, o que reflete uma possibilidade plausível de não haver diferença estatística nos dados.

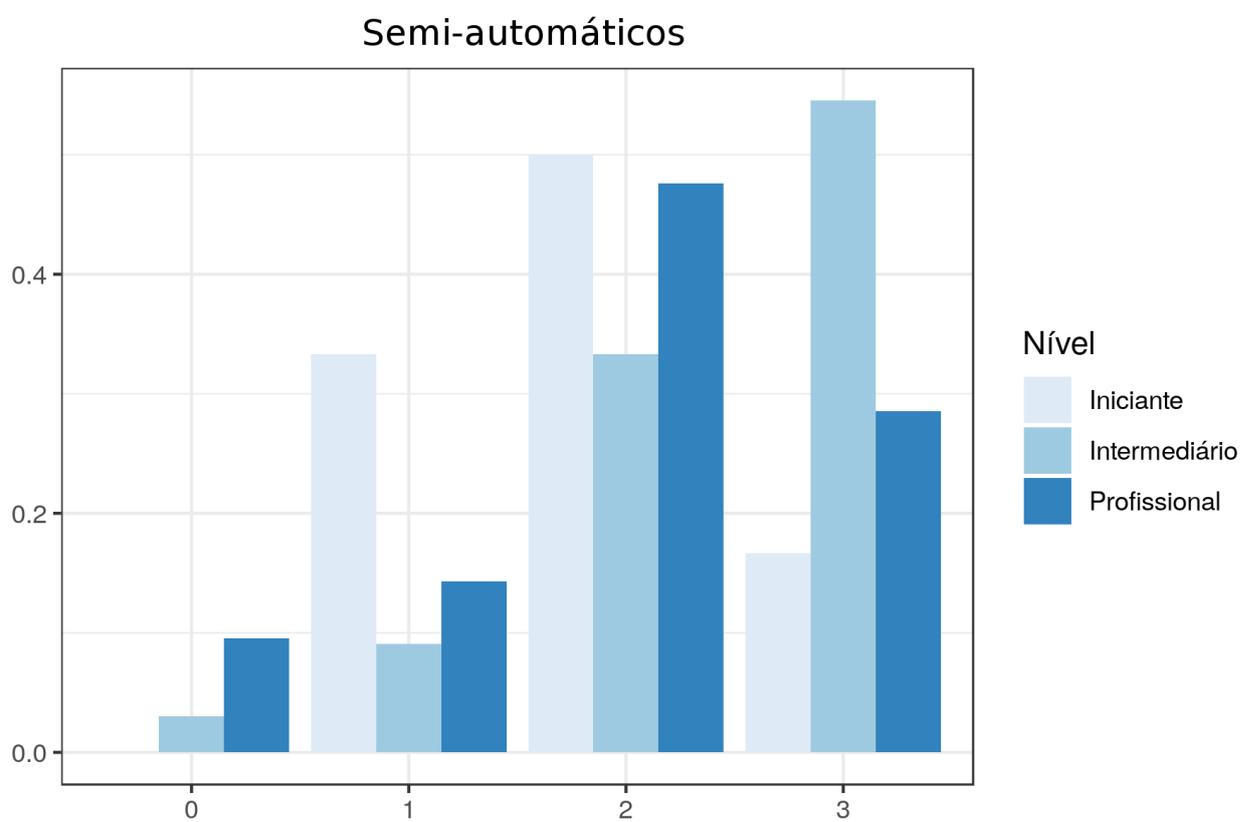


Figura 4.11: *Uso dos solos semi-automáticos pelos avaliadores de todos os níveis*

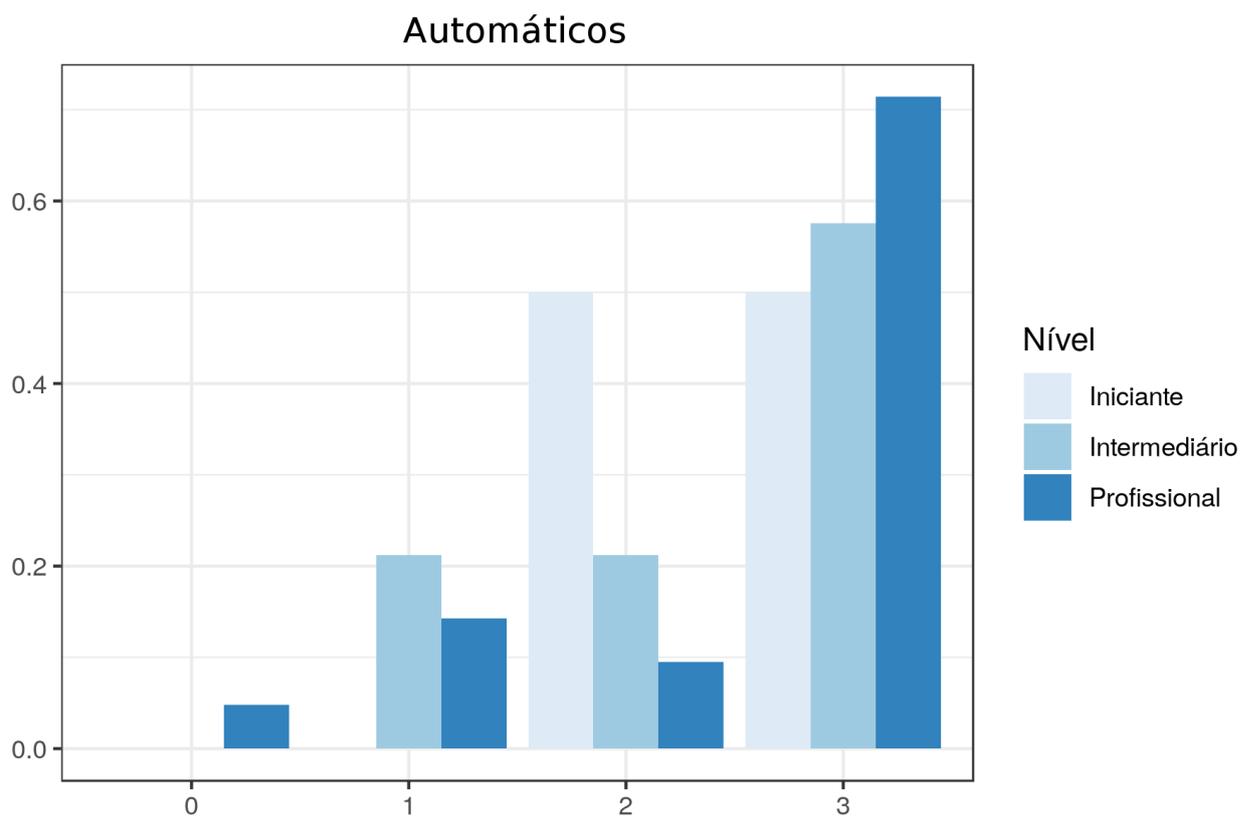


Figura 4.12: *Uso dos solos automáticos pelos avaliadores de todos os níveis*

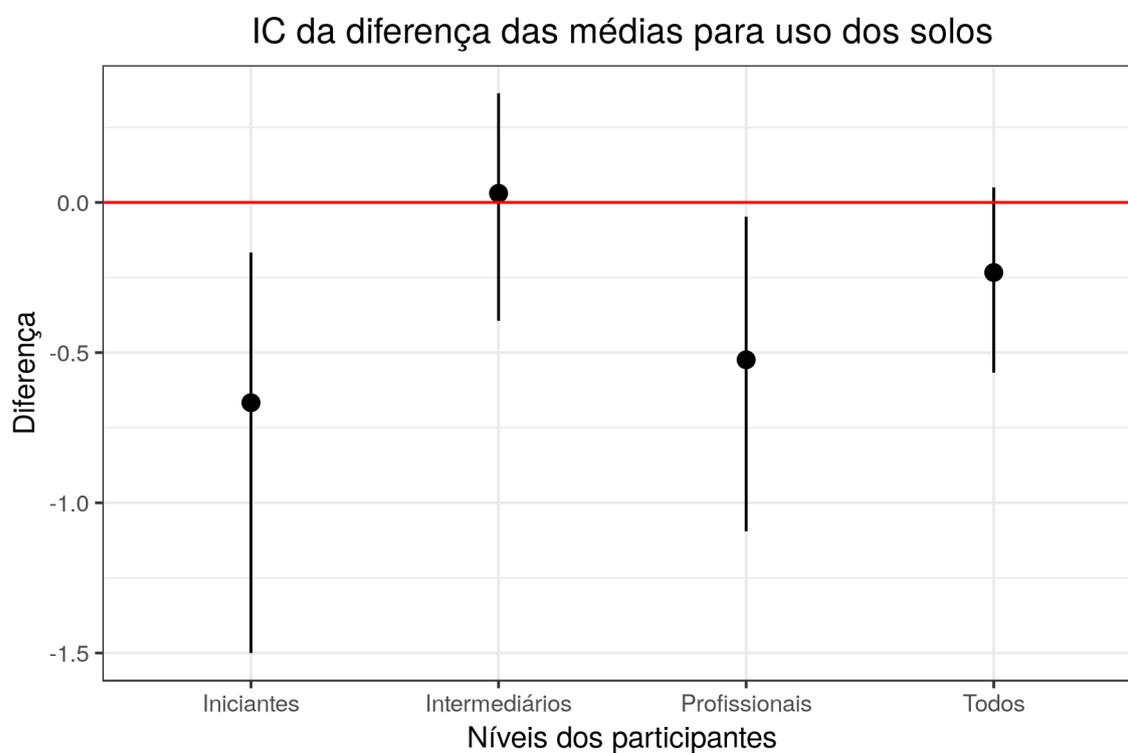


Figura 4.13: *Intervalo de confiança da diferença das médias para todos os níveis de participantes referentes ao uso dos solos*

# Capítulo 5

## CONCLUSÃO

### 5.1 Considerações Finais

Cunha et al (2018) desenvolveram um método de programação linear inteira para gerar uma progressão musical específica chamada *12-Bar Blues* através do sequenciamento de *licks* de guitarra, os quais são concatenados por meio de regras de bonificação e penalização que atuam nas transições entre os mesmos. Os *licks* utilizados neste sequenciamento foram retirados de livros como Fritts (2012), significando que todas as características musicais do instrumento guitarra como notas musicais, durações e técnicas estão nativamente encapsuladas nestes *licks*. Considerando ainda que ainda há pouquíssimas abordagens nas áreas de CA e CAC que utilizam PLI, estas características serviram de motivação na realização deste trabalho.

Apesar das propostas gerais em ambos os trabalhos possuírem certas propriedades em comum, a metodologia empregada aqui requereu uma maior heterogeneidade de detalhes a fim de conquistar resultados relevantes. Esta conjuntura baseia-se na circunstância de que, com a finalidade de gerar *licks*, propõe-se o sequenciamento de fragmentos menores que estes, chamados de *sublicks*. A partir de então, a geração de *licks* de guitarra ocorre a partir da manipulação da partícula mais elementar inerente à música, que é a nota musical. Além da grande quantidade de variáveis, este modelo sugere a elaboração de regras que lidam com a grande variação de acontecimentos dentro do processo de construção.

No âmbito da música, na maioria das vezes, o conceito de “qualidade” torna-se bastante abstrato, uma vez que gosto musical é um aspecto intrínseco à cada pessoa, ou seja, a música que agrada uma determinada pessoa pode não ter o mesmo efeito em outra. Portanto, os conceitos utilizados neste trabalho condizem com as definições encontradas

na literatura, com o intuito de se aproximar ao máximo possível de uma suposta forma correta de se tocar guitarra no estilo *Blues*.

Os resultados do experimento realizado reportam a probabilidade de não haver diferença estatística entre os dados que representam as duas classes de solos tratadas aqui, que são os automáticos e os semi-automáticos. A razão deste objetivo é interpretada partindo da existência de uma incerteza relacionada ao computador simular o sentimento humano em uma composição musical. Apesar deste fato, os solos automáticos, constituídos pelos *licks* resultantes da metodologia empregada aqui, obtiveram tanto um índice de satisfação quanto a frequência de uso superiores aos solos semi-automáticos. Logo, a análise dos resultados obtidos está sujeita à perspectiva de quem a realiza.

## 5.2 Melhorias futuras

É bastante perceptível que no estado o qual a ferramenta se encontra, há a necessidade de aprimorar funcionalidades relacionadas à diversidade dos elementos utilizados na construção dos *licks* que podem ser a escolha dos parâmetros fornecidos como entrada, os componentes musicais considerados, bem como o ajuste dos custos das matrizes de transição. O conjunto de todas estas configurações reflete uma grande variedade de características as quais o *lick* final pode conter, de acordo com as preferências do usuário.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIAR, B.; CORREIA, W.; CAMPOS, F. Uso da escala likert na análise de jogos. *Anais do X Simpósio Brasileiro de Games e Entretenimento Digital, 07-09 de novembro de 2011 Salvador*, 2011.
- ALFONSECA, M.; CEBRIÁN, M.; ORTEGA, A. A simple genetic algorithm for music generation by means of algorithmic information theory. *Evolutionary Computation, 2007. CEC 2007. IEEE Congress on*, p. 3035–3042. IEEE, 2007.
- APPLEGATE, D. L.; BIXBY, R. E.; CHVATAL, V.; COOK, W. J. *The traveling salesman problem: a computational study*. Princeton university press, 2006.
- ARIZA, C. Navigating the landscape of computer aided algorithmic composition systems: a definition, seven descriptors, and a lexicon of systems and research. *ICMC*, 2005.
- ASSAYAG, G. Computer assisted composition today. *First Symposium on Music and Computers*. Corfu Greece, 1998.
- BARBOZA, A. O. Simulação e técnicas da computação evolucionária aplicadas a problemas de programação linear inteira mista, 2005.
- BILES, J. A. ET AL. Genjam: A genetic algorithm for generating jazz solos. *ICMC*, volume 94, p. 131–137, 1994.
- BURIOL, L. S. ET AL. Algoritmo memético para o problema do caixeiro viajante assimétrico como parte de um framework para algoritmos evolutivos, 2000.
- CHEN, Y.-P.; SU, L.; YANG, Y.-H. ET AL. Electric guitar playing technique detection in real-world recording based on f0 sequence pattern recognition. *ISMIR*, p. 708–714, 2015.

- CHIPKIN, K. *Real Blues Guitar*. Contemporary Guitar. Alfred Publishing Company, Incorporated. ISBN 9780898985795. URL <https://books.google.com.br/books?id=wPmuwEWoqyMC>, 1998.
- CORPORATION, H.; CHAPPELL, J.; PHILLIPS, M.; SERNA, D. *Guitar All-In-One For Dummies, Book + Online Video & Audio Instruction*. –For dummies. Wiley. ISBN 9781118872024. URL <https://books.google.com.br/books?id=sZAYBAAAQBAJ>, 2014.
- CUNHA, N. D. S. ET AL. Um framework para a geração semiautomática de solos de guitarra, 2016.
- CUNHA, N. D. S.; SUBRAMANIAN, A.; HERREMANS, D. Generating guitar solos by integer programming. *Journal of the Operational Research Society*, v. 69, n. 6, p. 971–985, 2018.
- DANTZIG, G. *Linear programming and extensions*. Princeton university press, 2016.
- DE SOUZA, R. C.; FARIA, R. R. A. Oito reflexões sobre a criatividade na composição auxiliada por computadores, 2011.
- FREIRE, R. D. Sistema de solfejo fixo-ampliado: Uma nota para cada sílaba e uma sílaba para cada nota. *Opus*, v. 14, n. 1, p. 113–126, 2008.
- FREITAS, A. R. R. Música evolutiva: uma abordagem computacional para composição algorítmica. Master's thesis, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011a.
- FREITAS, A. R. R. D. Música evolutiva: uma abordagem computacional para composição algorítmica., 2011b.
- FRITTS, L. *2000 Blues: Licks that rock!* Centerstream Publishing, 2012.
- GANAPES, J. *Blues you can use: a complete guide to learning blues guitar*. Hal Leonard Corporation, 2015.
- GAREY, M. R.; JOHNSON, D. S. *Computers and intractability*, volume 29. wh freeman New York, 2002.

- GOHN, D. M. *Auto-aprendizagem musical: alternativas tecnológicas*. Annablume, 2003.
- GUSMÃO, P. Teoria elementar da música. *Centro de Artes e Letras. Universidade Federal de Santa Maria*, 2012.
- HALL, M. A.; SMITH, L. A computer model of blues music and its evaluation. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 100, n. 2, p. 1163–1167, 1996.
- HERREMANS, D.; SÖRENSEN, K. Composing first species counterpoint with a variable neighbourhood search algorithm. *Journal of Mathematics and the Arts*, v. 6, n. 4, p. 169–189, 2012.
- HILLER, L.; ISAACSON, L. M. *Illiad suite, for string quartet*, volume 30. New Music Edition, 1957.
- JACOB, B. L. Algorithmic composition as a model of creativity. *Organised Sound*, v. 1, n. 3, p. 157–165, 1996.
- JEPPESEN, K. *Counterpoint: the polyphonic vocal style of the sixteenth century*. Courier Corporation, 2013.
- JOHANSON, B.; POLI, R. *GP-music: An interactive genetic programming system for music generation with automated fitness raters*. University of Birmingham, Cognitive Science Research Centre, 1998.
- LANGSTON, P. Six techniques for algorithmic music composition. *Proceedings of the International Computer Music Conference*, volume 60. Citeseer, 1989.
- LILLIESTAM, L. On playing by ear. *Popular music*, v. 15, n. 2, p. 195–216, 1996.
- MACULAN, N.; FAMPA, M. H. C. Otimização linear. *Editora UNB, 1ª edição*, 2006.
- MCCABE, L. *101 Blues Guitar Turnaround Licks*. Mel Bay Publications Inc, 2002.
- MED, B. Teoria da música. 4ª edição revista e ampliada. *Musimed Edições Musicais*, 1996.

- MISTLER, E. Generating guitar tablatures with neural networks. *Master of Science Dissertation, The University of Edinburgh*, 2017.
- PACHECO, M. A. C. ET AL. Algoritmos genéticos: princípios e aplicações. *ICA: Laboratório de Inteligência Computacional Aplicada. Departamento de Engenharia Elétrica. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Fonte desconhecida*, p. 28, 1999.
- PAPADOPOULOS, G.; WIGGINS, G. AI methods for algorithmic composition: A survey, a critical view and future prospects. *In AISB Symposium on Musical Creativity*, 1999.
- PHILLIPS, M.; CHAPPELL, J. *Guitar For Dummies, with DVD*. John Wiley & Sons, 2012.
- PINTO, M. C. Tecnologia e ensino-aprendizagem musical na escola: uma abordagem construtivista interdisciplinar mediada pelo software encore versão 4.5, 2007.
- POPE, S. T. Fifteen years of computer-assisted composition. *Proceedings of the 2nd Brazilian Symposium on Computer Music*, 1995.
- RIKER, W. *Complete Blues Guitar Method: Mastering Blues Guitar*. Complete Method. ISBN 9781457439674. URL <https://books.google.com.br/books?id=jSNWkVYkt5AC>, 1994.
- SANDRED, O.; LAURSON, M.; KUUSKANKARE, M. Revisiting the illiac suite—a rule-based approach to stochastic processes. *Sonic Ideas/Ideas Sonicas*, v. 2, p. 42–46, 2009.
- SCHOLES, P. A. *The concise Oxford dictionary of music*. Oxford University Press, 1973.
- SCHONBRUN, M. *The Everything Rock & Blues Guitar Book: From Chords to Scales and Licks to Tricks, All You Need to Play Like the Greats*. Everything®. Adams Media. ISBN 9781605505312. URL <https://books.google.com.br/books?id=epntDQAAQBAJ>, 2003.
- SOUSA, R. S. *Estudos em Otimização Linear*. PhD thesis, Universidade de São Paulo, 2000.

- TANAKA, T.; FUJII, K. Describing global musical structures by integer programming on musical patterns. *Mathematics and Computation in Music*, p. 52–63. Springer, 2015.
- TOKUI, N.; IBA, H. ET AL. Music composition with interactive evolutionary computation. *Proceedings of the 3rd international conference on generative art*, volume 17, p. 215–226, 2000.
- WEISETHAUNET, H. Is there such a thing as the 'blue note'? *Popular Music*, v. 20, n. 1, p. 99–116, 2001.
- WEISSMAN, D. *Blues: the basics*. Routledge, 2004.
- WILLIAMS, D.; KIRKE, A.; MIRANDA, E. R.; ROESCH, E. B.; NASUTO, S. J. Towards affective algorithmic composition. *The 3rd International Conference on Music & Emotion, Jyväskylä, Finland, June 11-15, 2013*. University of Jyväskylä, Department of Music, 2013.
- WOOLSON, R. Wilcoxon signed-rank test. *Wiley encyclopedia of clinical trials*, p. 1–3, 2007.

# APÊNDICES

# Apêndice A

## PARTITURAS E TABLATURAS DOS SOLOS “AUTOMÁTICOS”

$\text{♩} = 90$

The image displays a guitar solo score for 'automático' 1, consisting of four systems. Each system includes a treble clef staff with musical notation and a guitar tablature staff. The tempo is marked as  $\text{♩} = 90$ . The score features several triplets (indicated by a '3' and a bracket) and slurs. Wavy lines above notes indicate vibrato. The tablature staff uses numbers 1-15 to denote fret positions. The first system starts at measure 1. The second system starts at measure 5, with a '1/2' marking above a note. The third system starts at measure 8. The fourth system starts at measure 11. The score concludes with a double bar line.

Figura A.1: Tablatura/partitura do solo “automático” 1

$\text{♩} = 90$

1

T  
A  
B

5

9

12

Figura A.2: Tablatura/partitura do solo “automático” 2



$\text{♩} = 90$

The score is divided into four systems, each with a treble clef staff and a bass staff (labeled T and B). Measure numbers 1, 5, 8, and 11 are indicated at the start of their respective systems.

- System 1 (Measures 1-4):** Treble staff features a series of eighth notes with vibrato and triplets. Bass staff shows fret numbers: 8, 8, 8-10, 11, 8-11, 11, 13, 11, 10, 10-13, 13, 13, 11, 11, 13, 11. Dynamic markings include 'full' and '1/2'.
- System 2 (Measures 5-7):** Treble staff continues with eighth notes and triplets. Bass staff shows fret numbers: 12, 12, 11, 11, 13, 12, 11, 12-12, 11, 13, 12, 11, 13, 12, 15, 12, 13, 15. Dynamic markings include 'full'.
- System 3 (Measures 8-10):** Treble staff features eighth notes with vibrato and triplets. Bass staff shows fret numbers: 13, 13, 10-10, 11, 12, 13, 13, 10-10, 11, 12, 13, 11, 13, 11, 12, 10, 10, 12, 11, 10, 13, 12, 11, 13, 13. Dynamic markings include 'full' and '1/2'.
- System 4 (Measures 11):** Treble staff features eighth notes with vibrato and triplets. Bass staff shows fret numbers: 13, 15, 15, 13, 12, 11, 12, 10, 10, 10, 8-10, 10, 8, 8, 6, 7, 10, 7, 8, 8, 7, 6, 6. Dynamic markings include '1/2'.

Figura A.4: Tablatura/partitura do solo “automático” 4

$\text{♩} = 90$

1

T  
A  
B

5#

8

11

13-15-13

13-12-15-13

11-11-13-11-12-13-10

11-13-12-11-13

11-11-13-14-15-11

12-10-12-13-10-11-13-13-11

12-11-11-12-11-13-12-11-13

12-11-13

15-16-15-13-13-15-15

13-11-13-12-13-11

11-13-15-15-12-13-13-15

13-15

15-13-15-12

10-11-10-12-11-13-10-12

10-8-9-8-11-10-7-10-10-7-10

7-6-7-8-8-9

full

1/2

full

full

1/2

1/2

full

Figura A.5: Tablatura/partitura do solo “automático” 5

$\text{♩} = 90$

1

T  
A  
B

5

8

11

Figura A.6: Tablatura/partitura do solo “automático” 6

$\text{♩} = 90$

1

5#

8

11

full

full

full

full

1/2

1/2

16 13 15 16 15 14

10 8 10 8 10 10 7 10 8

6 7 8 9 10

Figura A.7: Tablatura/partitura do solo “automático” 7

$\text{♩} = 90$

1

T  
A  
B

5

9

12

Figura A.8: Tablatura/partitura do solo “automático” 8

$\text{♩} = 90$

1

T  
A  
B

5

8

11

full

full

full

full

1/2

1/2

1/2

1/2

Figura A.9: Tablatura/partitura do solo “automático” 9

$\text{♩} = 90$

1

T  
A  
B

4

8

11

full

1/2

1/2

Figura A.10: Tablatura/partitura do solo “automático” 10

$\text{♩} = 90$

1

T  
A  
B

5#

8

12

full

full

full

1/2

1/2

Figura A.11: Tablatura/partitura do solo “automático” 11

$\text{♩} = 90$

1

T  
A  
B

5

8

11

full

1/2

full

full

1/2

Figura A.12: Tablatura/partitura do solo “automático” 12

$\text{♩} = 90$

1

T  
A  
B

5

8

12

full

Figura A.13: Tablatura/partitura do solo “automático” 13

$\text{♩} = 90$

1

T  
A  
B

5

8

12

10-10-8 10-11-10-8 10-8-10 8-9-8-7-6

Figura A.14: Tablatura/partitura do solo “automático” 14

$\text{♩} = 90$

1

T  
A  
B

5

8

11

1/2

1/2

Figura A.15: Tablatura/partitura do solo “automático” 15