

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA NATUREZA
DEPARTAMENTO DE INFORMÁTICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INFORMÁTICA

**ANÁLISE DE PADRÕES MUSICAIS RÍTMICOS E
MELÓDICOS UTILIZANDO O ALGORITMO DE
PREDIÇÃO POR CORRESPONDÊNCIA PARCIAL**

ANTONIO DEUSANY DE CARVALHO JUNIOR

JOÃO PESSOA-PB
Dezembro-2011

ANTONIO DEUSANY DE CARVALHO JUNIOR

**ANÁLISE DE PADRÕES MUSICAIS RÍTMICOS E
MELÓDICOS UTILIZANDO O ALGORITMO DE
PREDIÇÃO POR CORRESPONDÊNCIA PARCIAL**

DISSERTAÇÃO APRESENTADA AO CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E
DA NATUREZA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA, COMO
REQUISITO PARCIAL PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM
INFORMÁTICA (SISTEMAS DE COMPUTAÇÃO).

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Vidal Batista

JOÃO PESSOA-PB
Dezembro-2011

1
2

Ata da Sessão Pública de Defesa de Dissertação de Mestrado de **Antonio Deusany de Carvalho Junior**, candidato ao Título de Mestre em Informática na Área de Sistemas de Computação, realizada em 26 de dezembro de 2011.

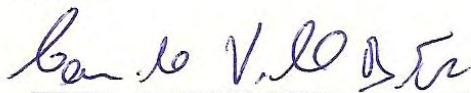
3
4

5 Aos vinte e seis dias do mês dezembro do ano dois mil e onze, às dez horas, no Auditório
6 do CCEN - da Universidade Federal da Paraíba, reuniram-se os membros da Banca
7 Examinadora constituída para examinar o candidato ao grau de Mestre em Informática, na
8 área de “*Sistemas de Computação*”, na linha de pesquisa “*Sinais, Sistemas Digitais e*
9 *Gráficos*”, o Sr. **Antonio Deusany de Carvalho Junior**. A comissão examinadora foi
10 composta pelos professores doutores: Leonardo Vidal Batista (DI-UFPB), Orientador e
11 Presidente da Banca Examinadora, José Antônio Gomes de Lima (DI-UFPB), como
12 examinador interno e Giordano Ribeiro Eulalio Cabral (DEINFO/UFRPE), como
13 examinador externo. Dando início aos trabalhos, o Prof. Leonardo Vidal Batista,
14 cumprimentou os presentes, comunicou aos mesmos a finalidade da reunião e passou a
15 palavra ao candidato para que o mesmo fizesse, oralmente, a exposição do trabalho de
16 dissertação intitulado “*Análise de Padrões Musicais Rítmicos e Melódicos Utilizando o*
17 *Algoritmo de Predição por Correspondência Parcial*”. Concluída a exposição, o candidato
18 foi argüido pela Banca Examinadora que emitiu o seguinte parecer: “*aprovado*”. Assim
19 sendo, deve a Universidade Federal da Paraíba expedir o respectivo diploma de Mestre em
20 Informática na forma da lei e, para constar, eu, professora Tatiana Aires Tavares,
21 Coordenadora deste Programa, servindo de secretária lavrei a presente ata que vai
22 assinada por mim mesmo e pelos membros da Banca Examinadora. João Pessoa, 26 de
23 dezembro de 2011.

24
25

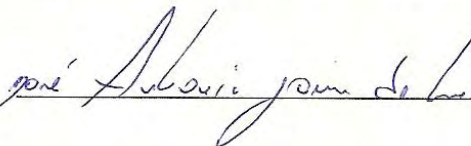

Tatiana Aires Tavares

Prof. Dr. Leonardo Vidal Batista
Orientador (DI-UFPB)



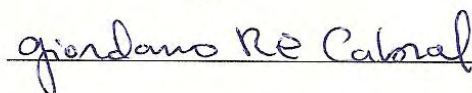
Leonardo Vidal Batista

Prof. Dr. José Antônio Gomes de Lima
Examinador Interno (DI-UFPB)



José Antônio Gomes de Lima

Prof. Dr. Giordano Ribeiro Eulalio Cabral
Examinador Externo (DEINFO/UFRPE)



Giordano Ribeiro Eulalio Cabral

26

Agradeço às energias que proporcionam a existência de tudo.

Resumo

O desenvolvimento da Teoria da Informação possibilitou formas diversas de tratamento de dados que são relevantes para qualquer área científica atualmente. Dentre elas, temos a caracterização da auto-informação, onde temos a possibilidade de determinar a informação contida em um dado em prol de futuras análises e, a partir deste ponto, a probabilidade de ocorrência de um elemento num determinado contexto tem como ser avaliada em virtude da análise da entropia. Em consequência disso, modelos de compressores foram desenvolvidos baseando-se em predição, e o algoritmo de Predição por Correspondência Parcial (Prediction by Partial Matching - PPM) foi o que mais se destacou por se aproximar ao máximo da entropia de uma entrada qualquer com dependência de contextos. O PPM realiza predição por correspondência parcial entre elementos em um determinado contexto, permitindo o reconhecimento de padrões e é utilizado em diversas áreas.

Neste trabalho, a problemática vem da avaliação da eficiência da utilização do PPM em arquivos de áudio com o intuito de utilizá-lo no reconhecimento de padrões melódicos e rítmicos em melodias. Os testes foram realizados utilizando melodias no formato MIDI, criando os modelos a partir das articulações melódicas e rítmicas separadamente, modelando os dados a partir da variação entre as alturas das notas das melodias e também considerando as proporções entre as durações das notas. A avaliação da eficiência dos modelos foi realizada através de Validação Cruzada a fim de verificar as melhores características da modelagem.

Os resultados obtidos com os primeiros testes realizados com obras para violino solo serviram para se ter um domínio das possíveis maneiras de utilização. Houve uma taxa de acerto médio de 80%, mesmo sem considerar todos os conceitos importantes da Teoria Musical. Com estes resultados, realizou-se um teste de similaridade de melodias, buscando 30 melodias num banco de 5223 arquivos obtendo ótimos resultados. A análise de melodias com o PPM utilizando os conceitos determinados confirma o PPM como um algoritmo versátil para reconhecimento de padrões em sequências melódicas, considerando válida a modelagem dos dados de entrada utilizada neste trabalho.

Palavras-chave: Análise musical, PPM, MIDI

Abstract

The development of Information Theory allowed various forms of data processing that are relevant to any area of science today. Among them, we have the characterization of the self-information, where we have the possibility to determine the information given in favor of a future analysis, and, from this point, the probability of an element in a given context is to be evaluated under the entropy analysis. By this concept, various models of compressors were developed based on prediction, and the Prediction by Partial Matching algorithm (PPM) has results closest to the maximum entropy of a given input with context dependence. The PPM performs prediction by partial correlation between the elements, allowing for pattern recognition and is used in several areas.

The aim of this work is the efficiency evaluation of the use of PPM in symbolic audio files in order to be used in pattern recognition over the melodic and rhythmic patterns of melodies. The tests were conducted using melodies on MIDI files, creating models from the melodic and rhythmic parts, evaluating the efficiency of the models through cross-validation.

The results obtained with the first tests carried out on works for solo violin have been meant as possibility ways to use. There was an average hit rate of 80%, even without considering all the important concepts of Music Theory. With these results, we carried out a test of similarity of melodies, 30 melodies were sought through a bank of 5223 files with great significant results. The analysis of melodies with certain concepts using the PPM confirms the PPM as a versatile algorithm for pattern recognition in melodic sequences, considering the modeling of valid input data used in this work.

Keywords: Music analysis, PPM, MIDI

Lista de ilustrações

Figura 1. Representação da relação entre as frequências, código MIDI e notas musicais.....	23
Figura 2. Representação da proporção temporal existente entre símbolos de notação musical	27
Figura 3. Exemplo de articulações rítmicas	27
Figura 4. Parte inicial da Melodia do Hino Nacional Brasileiro	29
Figura 5. Exemplo da representação gráfica do Hino Nacional Brasileiro	29
Figura 6. Membrana timpânica, sistema ossicular do ouvido médio e ouvido interno	31
Figura 7. Mapa tonotópico da cóclea	32
Figura 8. Diagrama do caminho do estímulo auditivo	33
Figura 9. Violino “Lady Blunt” feito por Antonius Stradivarius em 1721	42
Figura 10. Parte da partitura do primeiro movimento da obra BWV 1002 de Johann Sebastian Bach.....	45
Figura 11. Parte da partitura do segundo movimento da obra BWV 1004 de Johann Sebastian Bach.....	45
Figura 12. Representação comparativa entre os intervalos melódicos em obras de Bach.....	46
Figura 13. Representação comparativa entre os intervalos rítmicos em obras de Bach	46
Figura 14. Diagrama de Pacotes do Sistema de Análise Musical	49
Figura 15. Diagrama de Classe do Pacote “Classificador”	50
Figura 16. Interface do Sistema de Análise Musical	53
Figura 17. Interface do menu Arquivo	53
Figura 18. Interface do menu Modelo.....	54
Figura 19. Interface do menu Testes.....	54
Figura 20. Exemplo de interface dos resultados: Taxa por Contexto	55
Figura 21. Exemplo de interface dos resultados: Taxa por Contexto/Compositor.....	55
Figura 22. Exemplo de interface dos resultados: Taxa por Compositor/Contexto.....	56
Figura 23. Comparação entre este sistema e o Sistema de Percepção Auditiva.....	58
Figura 24. Interface do programa após a realização dos testes	62
Figura 25. Interface do resultado da análise no primeiro modo com melodia (1).....	63
Figura 26. Interface do resultado da análise no primeiro modo com melodia (2).....	63
Figura 27. Interface do resultado da análise no primeiro modo com melodia (3).....	63
Figura 28. Interface do resultado da análise no primeiro modo com ritmo (1).....	64
Figura 29. Interface do resultado da análise no primeiro modo com ritmo (2).....	64

Figura 30. Interface do resultado da análise no primeiro modo com ritmo (3).....	64
Figura 31. Interface do resultado na análise no segundo modo (1).....	65
Figura 32. Interface do resultado da análise no segundo modo (2).....	65
Figura 33. Interface do resultado da análise no segundo modo (3).....	65
Figura 34. Interface do resultado da análise no terceiro modo (1).....	66
Figura 35. Interface do resultado da análise no terceiro modo (2).....	66
Figura 36. Interface do resultado da análise no terceiro modo (3).....	66
Figura 37. Interface do resultado da análise no quarto modo (1).....	67
Figura 38. Interface da análise do resultado no quarto modo (2).....	67
Figura 39. Interface do resultado da análise no quarto modo (3).....	67

Lista de tabelas

Tabela 1. Exemplo de tabela de probabilidades utilizadas para para classificação com PPM 20	
Tabela 2. Porcentagem de acerto dos modos de avaliação	68
Tabela 3. Duração dos testes dos modos de avaliação utilizando 7 contextos.....	68
Tabela 4. Resultado do teste simulando o MIREX.....	69

Lista de abreviaturas e siglas

ADC	Conversor Analógico-Digital (<i>Analogic/Digital Converter</i>)
API	Interface para Programar Aplicações (<i>Application Programming Interface</i>)
bpm	Batidas por minuto (<i>beats per minute</i>)
CV	Validação Cruzada (<i>Cross Validation</i>)
DAC	Conversor Digital-Analógico (<i>Digital/Analogic Converter</i>)
DAP	Processamento digital de áudio (<i>Digital Audio Processing</i>)
IMSLP	Projeto Biblioteca Internacional de Partituras Musicais (<i>International Music Score Library Project</i>)
ISMIR	Sociedade Internacional para Recuperação de Informações em Musical (<i>International Society for Music Information Retrieval</i>)
LCS	Mais Longa Subsequência Comum (<i>Longest Common Subsequence</i>)
LOOCV	Validação Cruzada Deixando Um de Fora (<i>Leave-One-Out Cross Validation</i>)
MIDI	Interface Digital para Instrumentos Musicais (<i>Musical Instrument Digital Interface</i>)
MIR	Recuperação de Informações em Músicas (<i>Music Information Retrieval</i>)
MIREX	Permuta de Avaliações de Recuperação de Informações em Música (<i>Music Information Retrieval Evaluation eXchange</i>)
NCD	Distância de Compressão Normalizada (<i>Normalized Compression Distance</i>)
PPM	Predição por Correspondência Parcial (<i>Prediction by Partial Matching</i>)
SMS	Similaridade de Melodias Simbólicas (<i>Symbolic Melodic Similarity</i>)

Sumário

1 Introdução	11
2 Fundamentação Teórica	15
2.1 Teoria da Informação	15
2.1.1 Predição por Correspondência Parcial	16
2.1.2 Exemplo de aplicação do PPM.....	19
2.2 Sinais de Áudio.....	21
2.2.1 Processamento Digital de Áudio	22
2.2.2 Formato MIDI.....	22
2.3 Análise Musical	24
2.3.1 Ritmo	26
2.3.2 Melodia	27
2.3.3 Percepção do som	30
2.4 Validação Cruzada.....	34
2.4.1 Exemplo de validação cruzada	35
3 Aplicação do PPM para Análise Musical	37
3.1 Trabalhos Correlatos sobre Análise Musical	37
3.1.1 Trabalhos Correlatos Utilizando o Formato MIDI	39
3.2 Descrição da Análise Musical Realizada	41
3.2.1 Definição da Análise Musical com o PPM	43
3.2.2 Exemplo da aplicação do método de tratamento das melodias e ritmos.....	45
3.2.3 Descrição das avaliações realizadas.....	47
3.3 Sistema para Análise Musical.....	49
3.3.1 Detalhes de desenvolvimento	50
3.3.2 Interface para Interação com o Sistema	52
3.3.3 Comparativo deste sistema com o Sistema de Percepção Auditiva	56
3.3.4 Versão do sistema para o MIREX	59
4 Resultados da Análise	61
4.1 Interfaces dos resultados.....	62

4.2 Detalhes dos resultados.....	68
5 Considerações Finais.....	70
5.1 Discussão dos Resultados.....	70
5.2 Propostas para Trabalhos Futuros.....	71
Referências	73
APÊNDICE A – Aplicação do PPM para preparação de um modelo.....	79
APÊNDICE B – Compressão de entrada utilizando um modelo com PPM	83
APÊNDICE C – Lista de obras utilizadas.....	89

1 *Introdução*

A ligação entre as diversas áreas da ciência impõe uma visualização mais ampla diante de conceitos existentes, principalmente pelo fato de tornar-se possível levar em consideração os diversos pontos de vista e funções críticas referentes a cada área. Considerando a ligação entre todas as Ciências e a Computação é possível reconhecer o quão importante é a participação desta na evolução daquelas. A interação com a música, por sua vez predispõe análises diversificadas que vão desde a determinação automática de acordes à criação de música através de sistemas computacionais.

Um dos principais objetos de estudo da música é o som, fenômeno acústico existente através da propagação de ondas sonoras pelo espaço. O estudo do som por estar diretamente relacionado com o sistema auditivo adquire conceitos importantes também na psicologia da percepção auditiva e fisiologia do sistema neurológico e auditivo. Além disso, há de se considerar o foco no estudo artístico da música, buscando as razões para justificar as reações humanas perante as sensações passadas, por exemplo, pela atenção à execução de uma ode e na composição da mesma.

O ser humano percebe o som utilizando-se do seu sistema auditivo e às vezes do sistema tátil e visual, considerando que propagação de ondas pelo espaço é provocada por energia mecânica e elétrica na maioria das vezes. Desde a Gestalt, psicólogos passaram a analisar os sentidos de modo que se tornou possível entendê-los com experiências que descrevem o funcionamento do cérebro quanto à percepção. A percepção em si depende tanto das sensações quanto da interpretação criteriosa das relações entre tudo que é sentido. No sistema auditivo, o som é adquirido sequencialmente ordenado pelo ouvido humano e percorre um caminho através da cóclea até o córtex auditivo. Sua interpretação vai desde o ouvido interno e pode se relacionar com lembranças de outros sons encontradas na memória.

As marcas deixadas por uma simples melodia podem gerar outras melodias ou serem utilizadas para o simples reconhecimento da melodia a partir da execução de poucas notas da mesma. Desta mesma maneira, a percepção de ritmo leva ao acompanhamento do mesmo, seja através de um instrumento musical ou um simples bater do pé no chão, dando a impressão de predição. Esta predição está relacionada com diversos fatores através dos quais

o cérebro possibilita uma recuperação de uma informação antiga para reconhecer algo já existente ou predispor a criatividade.

O tratamento de informações, sejam elas de qualquer tipo, dá a possibilidade de entendimento das mesmas. Conceitos da Matemática junto à Computação permitiram que fosse então desenvolvida a Teoria da Informação, propondo uma maneira inovadora para o tratamento de dados contidos em informações através de métodos matemáticos. A partir daí, diversos trabalhos correlacionando as informações contidas em dados tornaram-se possíveis. Na área da Música não foi diferente, tendo em vista que a análise de uma grande quantidade de obras vem a ser inviável ou cansativa por um humano, enquanto que um computador habilitado para tal tarefa é capaz de realiza-la em tempo hábil e sem fatigar-se pelo esforço realizado.

Diversas pesquisas em busca das relações entre as estruturas musicais foram realizadas ao longo dos séculos através de análise de partituras e documentos históricos. Com o avanço das tecnologias, as pesquisas foram se tornando mais intensas e os objetivos mais ambiciosos. Alguns trabalhos clássicos propuseram o estudo das estruturas musicais em busca de determinação de autoria, gênero e ritmos entre outras características importantes. A partir deste ponto uma nova subárea da ciência musical surgiu com o nome de Recuperação de Informações Musicais (Music Information Retrieval – MIR). A complexidade desta busca por informações contidas em músicas com o auxílio da computação resultou em diversas metodologias que fazem parte do cotidiano auxiliando a seleção musical das pessoas através do aconselhamento musical através de preferências semelhantes (www.lastfm.com.br) e possibilitando a identificação de músicas a partir do cantarolar de parte de uma melodia relembada (www.midomi.com).

Tendo em vista a possibilidade de interação entre as ciências e com base nos diversos trabalhos da área, decidiu-se aplicar tais conhecimentos em busca de uma nova maneira de tratamento do áudio a fim de permitir um agrupamento baseado nas estruturas internas das músicas, como melodia e ritmo. Considerando o fato de a música conter informações e estas informações apresentarem relações entre si, a possibilidade de aplicação de conceitos da Teoria da Informação tornou-se foco deste trabalho. Tomando como base os principais métodos desta área, verificou-se a existência de um método considerado estado da arte em compressão baseada em contexto chamado método de Predição por Correspondência Parcial (Prediction by Partial Matching – PPM).

O PPM, método aplicado neste trabalho, detém de bons resultados em diversas áreas, como reconhecimento de texturas, análise de textos e outros tipos de informações, sendo

considerado um dos métodos com melhores resultados em compressão de dados. A ideia principal deste método de compressão vem da realização da predição de um próximo símbolo a partir dos contextos nos quais o símbolo aparece normalmente. A utilização deste método em música é proposta pelo fato de que os conceitos da Teoria Musical possibilitam a determinação de condições sequenciais existentes na Música, como a determinação de uma escala musical a ser utilizada em uma harmonia específica, sendo assim possível a suposição das notas que poderão ser executadas ou o padrão rítmico utilizado por certa cultura.

A análise musical torna-se complexa a partir do ponto em que esta se utiliza de conceitos de diversas áreas para obtenção de conclusões relevantes. A utilização de um método já aceito como ótimo em outras áreas é proposto na análise musical considerando a possibilidade de obtenção de resultados significativos. Um ponto a enfatizar é a necessidade de modelagem da informação musical a ser tratada pelo PPM por existirem diversas informações que podem ser consideradas em relação a uma simples nota musical.

Este trabalho especifica um método para o tratamento de melodias musicais com o intuito de agrupar as informações musicais de maneira mais próxima das sensações e percepções realizadas pelo ser humano. O agrupamento utilizado neste trabalho parte dos conceitos de como o sistema auditivo trata o som, baseando-se num tratamento sequencial variações entre frequências sonoras e considerando as relações de proporção de duração. Para representação destas informações são utilizados os símbolos das notas musicais referentes às frequências e à duração de cada nota.

A avaliação deste método se dá a partir de uma análise inicial de obras voltadas para violino solo em busca de caracterização de autoria das obras. Esta avaliação inicial é realizada em busca de restringir o conjunto de obras para reconhecer os melhores resultados obtidos com a aplicação do PPM nestas informações. A validação cruzada é utilizada como teste principal dos modelos criados para classificação de cada autor a fim de qualificar os modelos criados e validar a aplicação do método.

Após a validação do método e obtenção de variáveis relevantes para aplicação do PPM na análise musical, torna-se possível uma avaliação mais apurada do método utilizando-se de um banco de músicas com uma quantidade relativamente maior. A ideia do novo teste parte do conceito de que com o método proposto é possível reencontrar uma obra mesmo com alterações na mesma. Sendo assim, é realizado um teste final com tais obras com a finalidade de verificar a taxa de acerto.

Os próximos capítulos dão uma visão melhor do que se deseja apresentar com o método aqui aplicado. O Capítulo 2 trata a fundamentação teórica que serve de base para o

trabalho, sendo descritos conceitos da Teoria da Informação com foco na descrição do PPM. Uma breve introdução às noções de sinais de áudio e seu processamento é apresentada junto à definição das características do formato MIDI que será utilizado para leitura e interpretação dos arquivos de áudio do trabalho. O tópico sobre análise musical trata algumas características da música, apresentando definições sobre ritmo e melodia de modo que estes sejam compreendidos do ponto de vista em que se enquadram na metodologia aqui aplicada. Por fim, é apresentado o método estatístico aqui utilizado para avaliação dos resultados obtidos.

O Capítulo 3 apresenta diversos trabalhos correlatos com intenção de mostrar como algumas pesquisas da área são desenvolvidas e quais critérios são tomados como base para a realização deste trabalho. Os métodos de utilização dos arquivos no formato MIDI também são apresentados a fim de demonstrar maneiras diferentes para o tratamento do áudio, visto que este formato exprime apenas os eventos ocorridos e não fora desenvolvido apenas para representação de áudio, mas também para a comunicação de dispositivos.

O Capítulo 4 define o método aqui aplicado correlacionando a Análise Musical com o PPM. O sistema desenvolvido para avaliação do método é apresentado neste capítulo com a apresentação de alguns diagramas, detalhes do desenvolvimento, a interface do sistema, um comparativo com o Sistema de Percepção Musica humano, além de ser descrita uma versão específica do sistema. Os resultados dos testes realizados com o sistema são apresentados no Capítulo 5 e algumas considerações sobre todo o trabalho estão situadas no Capítulo 6.

2 Fundamentação Teórica

Por se tratar de um trabalho multidisciplinar, o qual envolve conceito de música, computação, psicologia, medicina e estatística, serão apresentadas neste capítulo diversas definições relacionadas com os temas passíveis de utilização. O enfoque principal passa a ser em relação à Teoria da Informação e sua aplicação num âmbito musical em busca do reconhecimento de padrões existentes em linhas melódicas. O conceito de melodia e ritmo será apresentado de maneira sucinta a fim de que se torne claro o foco deste trabalho.

A relação entre o processamento de sinais e o formato MIDI será descrita com enfoque na utilização deste formato para a análise musical, sendo apresentadas apenas as características relevantes. Como haverá a aplicação de uma metodologia estatística para avaliação dos resultados obtidos através da validação cruzada, esta será detalhada com exemplo para o tipo de validação efetuado nos testes a serem realizados.

2.1 Teoria da Informação

A Teoria da Informação foi desenvolvida no fim da década de 40 por Claude Shannon, e desde então todos os tipos de informações passaram a ter definições e propriedades bem específicas (SHANNON, 1948). Por ter sido o primeiro a considerar comunicação como um problema matemático rigorosamente embasado na estatística, Shannon é considerado o “pai da Teoria da Informação”. A partir de seus estudos, a nova era da informação se iniciou, levando a ciência a estudar a informação com bases filosóficas e teorias cada vez mais vigorosas.

Os conceitos criados desde então levaram ao desenvolvimento de diversas técnicas para suprirem algumas necessidades que já existiam no passado. Uma dessas necessidades que pode ser citada é a maneira de analisar muitas informações de maneira mais eficiente. Neste ponto, surgiram técnicas de codificação e compressão de informações que vieram a mudar a forma de tratamento de todo tipo de dado além de contribuir com o reconhecimento de padrões.

Todo dado de uma informação pode ser tratado como um símbolo e este símbolo deve carregar consigo uma auto-informação. Considerando que cada símbolo pertence a um alfabeto $A = \{a_0, a_1, \dots, a_{M-1}\}$, temos que cada símbolo apresentará uma probabilidade de

ocorrência a partir de uma certa fonte de informação. Sendo S uma fonte de informação - como uma imagem, um texto ou uma música, por exemplo -, temos que um elemento x gerado por S pode ser considerado uma variável aleatória que assume o valor a_i com probabilidade $P(x = a_i)$, para $i = 0, 1, \dots, M-1$. Uma variável aleatória pode ser entendida como uma variável quantitativa, cujo valor depende de fatores aleatórios. Desta maneira, a auto-informação associada a um pode ser representada a partir da Equação 1.

$$I(a_i) = -\log_2 P(x = a_i) \text{ bits} \quad (1)$$

Num determinado alfabeto, se for atribuído a cada símbolo uma quantidade de *bits* relativa a sua auto-informação, o comprimento médio do código é minimizado. Shannon (1948) provou que há a possibilidade de codificar sem perdas as informações de uma fonte qualquer chegando a uma taxa arbitrariamente próxima à entropia, mas não inferior a ela. Enquanto para a Física a entropia de um sistema é uma medida de sua ‘desordem’, a teoria da informação diz que a entropia será menor se o modelo probabilístico utilizado para codificação de um sistema for mais preciso. Logo, é possível utilizar a entropia para avaliar a eficiência da codificação utilizada para uma fonte de informação, caracterizando um código como ótimo quando seu comprimento médio é igual à entropia, pois neste caso a probabilidade de ocorrência de cada símbolo na sequência é estimada com precisão. Além disso, para atingir este comprimento médio mínimo é necessário que cada símbolo seja representado com número de *bits* igual à sua auto-informação, obtendo desta forma uma compressão de código otimizada na transmissão ou armazenamento da mensagem.

As técnicas de compressão são baseadas em métodos de codificação para modelagem de informação. Elas trabalham na relação entre o modelo e o código a fim de encontrar a compressão ótima. Dentre estas diversas maneiras de codificação, surgiu um dos mais sofisticados métodos de codificação de informações chamado método de Predição por Correspondência Parcial. Este, que se caracteriza como um método utilizado para compressão, por sua vez, codifica símbolos a partir do reconhecimento de padrões existentes em sequências e será mais bem descrito a seguir.

2.1.1 Predição por Correspondência Parcial

O método de Predição por Correspondência Parcial (Prediction by Partial Matching – PPM) é um sofisticado “estado da arte” dos métodos de compressão originalmente desenvolvido por J. Cleary e I. Witten. O método é baseado em um codificador que mantém um modelo estatístico da entrada baseando-se em contexto. Desta forma, o modelo estatístico

criado impõe que a probabilidade de um símbolo não depende apenas da frequência do símbolo, mas também do contexto que o antecede (CLEARY e WITTEN, 1984).

Cleary e Witten (1984) afirmam que um modelo que captura mais precisamente as características reais da fonte “reduz sua entropia”, aumentando as oportunidades de compressão. Logo, a definição de um modelo que leve à menor entropia para uma fonte genérica é um problema sem solução definida. Ganhos de compressão podem sempre ser obtidos com a construção de modelos mais precisos levando em consideração que os dados podem ser remodelados de diversas maneiras para serem utilizados com este método. No caso do PPM, o modelo apresenta-se bastante eficiente quando a informação a ser modelada para a codificação e compressão apresenta maior precisão quando o contexto pode ser considerado importante e tem-se a partir daí sua utilidade em casos específicos como um reconhecimento de padrões.

O algoritmo do PPM basicamente realiza a contagem das ocorrências dos símbolos. A cada símbolo lido, há uma verificação do seu contexto em diversas ordens com o intuito de incrementar o contador de ocorrência do símbolo seguido dos contextos nos quais tal símbolo foi encontrado, além do contador de ocorrência do próprio símbolo. O contexto de um símbolo é a sequência de símbolos que o antecedem, e a quantidade de contextos que serão avaliados depende da ordem do PPM. Caso esteja se considerando uma ordem dois, serão computados os contadores do símbolo, do símbolo junto ao seu antecessor e do símbolo junto aos seus dois antecessores. A probabilidade de cada símbolo em cada ordem é dada pela divisão da quantidade de vezes que o símbolo apareceu seguido do contexto da ordem em questão pela quantidade de vezes que o contexto ocorreu.

A aplicação do PPM resulta em uma tabela composta pela probabilidade dos símbolos e contextos dos dados de entrada. Um dos casos especiais a ser tratado pelo método está relacionado à situação na qual algum símbolo ou sequência não tenha ocorrido durante a criação da tabela, o que determinaria uma probabilidade igual a zero para a ocorrência do símbolo em questão. Existem diversas soluções para sanar o problema da probabilidade zero, o que garante a existência de diversas versões de implementação do algoritmo do PPM. Para gerar valores para os símbolos com probabilidade zero, algumas versões utilizam estimadores como o de Laplace, outras utilizam símbolos de escape, e em casos mais simples o valor 1 é atribuído nesta situação (SALOMON e MOTTA, 2009).

Temos que os modelos gerados pelo PPM são criados a partir dos dados de entrada e do contexto selecionado. O contexto define a ordem do PPM, todavia, um contexto muito elevado traz sérios problemas ao processo de compressão com relação ao tempo e memória

definidos para a modelagem. Por exemplo, para um alfabeto de 256 símbolos, o número de contextos de ordem dois e três são, respectivamente, 65536 e 16777216. O contexto de ordem dois é gerenciável, enquanto o outro talvez seja muito grande para manipulação em alguns casos. Na prática, contextos relativamente curtos, entre dois e dez, são utilizados. Uma boa implementação do PPM requer uma estrutura de dados cuidadosamente desenvolvida para prover rápida busca e fácil atualização diante dos milhares de símbolos. Em alguns casos guardar em memória apenas a probabilidade de elementos que apareceram na criação do modelo diminui o custo de memória para contextos altos.

Dentre as diversas características do PPM, alguns princípios podem ser levados em consideração tanto na criação da tabela de probabilidades quanto na compressão. Um deles é o princípio da exclusão, que retira da tabela os itens que não terão probabilidade de ocorrer no momento da codificação. Outro princípio que pode ser citado se refere à dinamicidade do PPM, visto que o modelo pode ser estático ou adaptativo. Um modelo estático torna a compressão mais rápida, além de facilitar a descompressão visto que o modelo não será mais alterado durante a compressão por se utilizar de um conjunto fixo de probabilidades pré-estimadas, o que pode levar a uma compressão ineficaz caso modelo seja incompatível com o que se deseja comprimir. Já o modelo adaptativo, que se atualiza durante a compressão, pode tornar mais lento o processo de compressão enquanto melhora a taxa de compressão por utilizar as taxas reais durante este processo, já que vai se adaptando à entrada.

O resultado da compressão dos símbolos de entrada baseando-se nos modelos é o armazenamento das probabilidades de ocorrência de cada símbolo. Desta forma, os símbolos e contextos com maior ocorrência serão armazenados de uma maneira melhor por apresentarem valores maiores para a probabilidade de ocorrência, o que facilita a compressão utilizando um bom codificador. Tendo em vista que as probabilidades serão resultados decimais, é possível a utilização do Codificador Aritmético durante a compressão, visto que codificadores inteiros dificultariam a aproximação do resultado à entropia da fonte (WITTEN, 1987). O Codificador Aritmético é tido como codificador ótimo por codificar cada símbolo com um número de bits igual à sua auto-informação, apresentando um código ótimo de comprimento médio igual à entropia.

Na prática, pode-se utilizar o PPM apenas para calcular o resultado da sua compressão a fim de comparar resultados de modelos utilizados. Para isto, após a criação da tabela de probabilidades de um modelo, realiza-se a compressão de uma fonte e obtêm-se o resultado final a partir da soma da quantidade de bits usada para representação de cada símbolo baseando-se na fórmula da auto-informação. O resultado da soma da quantidade de bits

utilizada para cada fonte no modelo em questão pode ser comparado a fim de verificar qual fonte obteve uma melhor compressão, determinando qual delas garante uma maior adequação da fonte ao modelo. Há também a possibilidade de cálculo da razão de compressão para verificar onde é obtido o melhor resultado em uma classificação. A razão de compressão é definida através da porcentagem entre o tamanho do arquivo comprimido e o não comprimido. Uma aplicação do PPM é apresentada a seguir a fim de facilitar seu entendimento através de um exemplo voltado à codificação de palavras.

2.1.2 Exemplo de aplicação do PPM

A aplicação do PPM parte da criação da tabela de contagem de ocorrências a partir da leitura de uma entrada que virá a criar um modelo seguindo o algoritmo do PPM com uma ordem determinada. Uma possibilidade para esta aplicação é a utilização do PPM-C (MOFFAT, 1990), algoritmo este que é uma variação do PPM, acrescentando sempre um caractere extra de escape quando uma nova ocorrência em um contexto aparece. A utilização deste caractere é feita para reservar uma probabilidade para a ocorrência de um novo símbolo no contexto em questão. Desta maneira, se um contexto foi seguido nove vezes por um símbolo “x” então este símbolo tem a probabilidade de ocorrência de nove em dez enquanto o escape tem a probabilidade de ocorrência de um em dez. Logo, se um símbolo que não houvera ocorrido antes aparece após este contexto, teremos neste momento que a probabilidade de ocorrência deste símbolo seria a do escape. Após isto, a probabilidade do “x” virá a ser nove em doze, a do novo símbolo será uma em doze e a do escape será duas em doze.

A fim de explicar a aplicação do PPM na prática, um exemplo será apresentado a seguir. Tomando como possibilidade de sinal de entrada o alfabeto representado por $A = \{A, B, C, D, R\}$, será utilizado o PPM-C para criar um modelo a partir a palavra ABRACADABRA e buscar comprimir as palavras DACAR e ABBAD neste modelo a fim de verificar as vantagens deste método de predição. Os passos para a criação da tabela com os contadores segue no APÊNDICE A.

Após a criação da tabela com os contadores, a tabela é preenchida com as probabilidades atuais dos símbolos, resultando na Tabela 1. Esta tabela de probabilidades será utilizada e adaptada ao longo da compressão de cada palavra, partindo sempre deste modelo inicial. A ordem -1 não se encontra na tabela por esta ordem ser utilizada apenas no início da criação da mesma com espaço reservado para os itens que ainda não foram utilizados e que não apresentam probabilidades de ocorrência.

Tabela 1. Exemplo de tabela de probabilidades utilizadas para para classificação com PPM

Ordem 3	Ordem 2	Ordem 1	Ordem 0
ABR → A 2/3 esc 1/3	AB → R 2/3 esc 1/3	A → B 2/7 A → C 1/7	A 5/16 B 2/16
ACA → D 1/2 esc 1/2	AC → A 1/2 esc 1/2	A → D 1/7 esc 3/7	C 1/16 D 1/16
ADA → B 1/2 esc 1/2	AD → A 1/2 esc 1/2	B → R 2/3 esc 1/3	R 2/16 esc 5/16
BRA → C 1/2 esc 1/2	BR → A 2/3 esc 1/3	C → A 1/2 esc 1/2	
CAD → A 1/2 esc 1/2	CA → D 1/2 esc 1/2	D → A 1/2 esc 1/2	
DAB → R 1/2 esc 1/2	DA → B 1/2 esc 1/2	R → A 2/3 esc 1/3	
RAC → A 1/2 esc 1/2	RA → C 1/2 esc 1/2		

Fonte: Autoria própria (2011)

No Apêndice B é apresentado todo o procedimento para compressão das entradas a partir da tabela de probabilidades criada. Realizando a soma da quantidade de bits necessária para codificar cada símbolo, temos que "DACAR" é comprimido em 10,807 bits, enquanto que "ABBAD" é comprimido em 12,911 bits, ambos utilizando o mesmo modelo. Após a codificação de ambas as entradas, percebe-se que a primeira palavra adquire uma compressão melhor do que a primeira por apresentar sequências de símbolos mais comuns no modelo utilizado, como "DA" e "ACA" e que resultaram em uma redução da entropia.

Considerando todas as características apresentadas temos que o PPM é útil para reconhecimento de padrões baseados em correspondências parciais. Diante disto, a escolha do que será utilizado como dado simbólico para o PPM deve ser bem definido. A definição dos dados deve manter o foco sobre a informação contida no dado, já que será utilizada sua auto-informação para cálculo da probabilidade. Esta etapa de definição de dados, também chamada de modelagem de dados, é importante para que seja possível encontrar semelhanças que possam gerar um bom modelo e prever bem a partir dos padrões encontrados.

Considerando estes fatores e o conhecimento dos bons resultados apresentados pelo PPM em outras áreas, surgiu a ideia de aplicar o PPM na Música, área pouco explorada pela utilização do mesmo. Como as obras musicais podem ser interpretadas a partir de diversos pontos de vista, buscou-se foco na análise a partir da representação do sinal de áudio. Sendo assim, os dados utilizados neste trabalho para a modelagem são definidos a partir da representação simbólica de sinais de áudio de forma que a tanto segmentação como a representação do sinal permita que se encontrem padrões que tornem semelhantes as obras musicais.

2.2 Sinais de Áudio

Operacionalmente, o sinal é um tipo de mensagem, cujo texto é composto de uma ou mais letras, palavras, personagens, símbolos, *displays* visuais ou sons especiais, com significado pré-arranjado e que é veiculado ou transmitido por meios visuais, acústicos ou elétricos. Os sinais de áudio, considerados mensagens ou representações sonoras, apresentam representações analógicas ou digitais e são utilizados para passar informações ou representações de algo que pode ser produzido através de ondas sonoras.

A diferença entre áudio e som precisa ser levada em consideração deste ponto em diante. O som é considerado um fenômeno acústico que existe a partir da propagação de ondas sonoras produzidas por um corpo que vibra em meio material e que pode se estender além das capacidades audíveis humanas. Já o áudio vem a ser um som reproduzido ou captado eletronicamente. Logo, a partir do momento em que um som é processado eletronicamente ele passa a ser considerado como áudio, e o áudio ao ser reproduzido através de algum meio torna-se som. A partir daí temos que ambos podem ser interpretados e tratados.

A interpretação de um sinal se dá através do seu processamento seja por meio da sensação e percepção humana ou com a utilização de equipamentos eletromecânicos. No meio eletrônico e computacional, temos que o processamento de sinal é uma área da computação, engenharia elétrica e matemática aplicada, e que lida com operações ou análise de sinais em tempo discreto ou contínuo para executar operações úteis sobre esses sinais. Outras áreas também se utilizam dos sinais para diversos fins, como a música que se utiliza dos sinais de áudio para análise de suas características acústicas.

Os sinais de áudio podem ser tratados no formato analógico ou digital. O primeiro formato baseia-se na utilização de circuitos elétricos ou mecânicos, de maneira que a forma pura do sinal seja utilizada. O formato digital normalmente resulta da conversão do formato analógico para alguma representação som através de símbolos ou com aplicação de compressão do sinal analógico para facilitar seu tratamento através de computadores. Este tratamento digital se dá pelo fato de um sinal ser algo contínuo com infinitos pontos, o que torna inviável o armazenamento de toda a representação bruta do sinal para seu tratamento posterior em virtude das limitações computacionais em relação ao processamento e principalmente à memória para armazenamento, além de ser possível considerar que em muitos casos não há tal necessidade em virtude das próprias limitações dos seres humanos em perceber todas as variações de um sinal analógico.

2.2.1 Processamento Digital de Áudio

O processamento digital de áudio (Digital Audio Processing - DAP) está preocupado com a representação de tempo discreto de sinais de áudio por uma sequência de números ou símbolos e o processamento desses sinais. O objetivo do DAP é geralmente medir, filtrar ou comprimir sinais analógicos contínuos do mundo real. O primeiro passo deste processo é converter o sinal de um formato analógico para um formato digital, por amostragem usando um conversor analógico-digital (Analogic/Digital Converter - ADC), que transforma o sinal analógico em um fluxo de números. Algumas vezes, o sinal de saída necessário pode ser requerido em formato analógico, o que requer um conversor digital-analógico (Digital/Analogic Converter - DAC). Estas conversões citadas se dão a partir da determinação de valores como quantização e amostragem do som, todavia, o áudio em formato digital pode ser adquirido através de representações criadas diretamente através de meios digitais como programas simuladores de ondas que utilizam funções específicas para gerar ondas nas frequências e amplitudes desejadas.

O sinal de áudio em formato digital adquire diversos formatos, visto que o som pode ser tratado de diversas maneiras. Os formatos digitais partem do princípio de que o áudio é resultante de uma onda sonora e esta onda foi formada a partir uma ou mais ondas em frequências diferentes. Sua representação digital pode ser a partir de senóides, valores ou símbolos com caráter representativo da onda, as frequências existentes ou até as notas musicais relativas às tais frequências. Esta última forma de representação é mais encontrada em partituras escritas utilizando programas de computador ou meramente digitalizadas, sendo ainda possível a utilização de formatos específicos como o MIDI (Musical Instrument Digital Interface), que será utilizado neste trabalho.

2.2.2 Formato MIDI

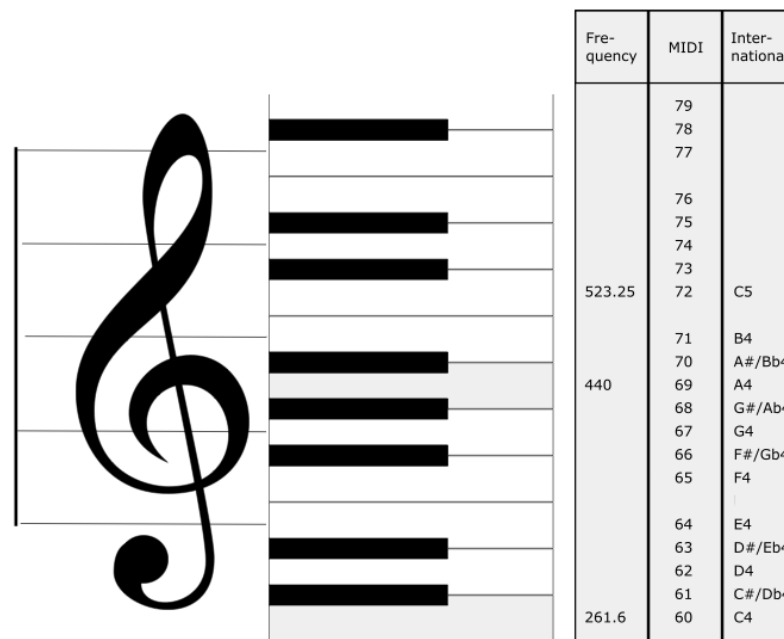
MIDI (Musical Instrument Digital Interface) é um protocolo padrão da indústria que permite que instrumentos musicais eletrônicos (sintetizadores), computadores e outros equipamentos eletrônicos (controladores MIDI, placas de som, *samplers*) se comuniquem e sincronizem-se uns com os outros. Ao contrário de dispositivos analógicos, os dispositivos que utilizam o protocolo MIDI não transmitem um sinal de áudio, ao invés disso, enviam mensagens em formato de eventos. Estes eventos podem conter informações sobre a notação musical, altura musical e intensidade de execução de uma nota, sinais de controle de parâmetros como *vibrato*, volume e *panning*, pistas e sinais de relógio para definir o tempo.

Todas as informações citadas podem ser vistas com maiores detalhes através do site oficial <http://www.midi.org>.

Por ser um protocolo eletrônico, nota-se sua ampla adoção por toda a indústria da música desde sua definição em 1982. Por ser um protocolo digital e trabalhar com mensagens, estas mensagens podem ser armazenadas em memória para um futuro uso. O formato padrão utilizado para armazenamento em arquivos é o *Standard Midi Format* (SMF) que pode gerar arquivos com as extensões "smf" e "mid". Este formato pode ser utilizado para representar uma música inteira, e como a música é armazenada como instruções ao invés de formas de onda, o tamanho dos dados dos arquivos é bastante pequeno em comparação aos formatos mais comuns como MP3 e WAVE, os quais buscam representar o sinal de áudio o mais próximo possível do sinal originalmente analógico utilizando-se ou não de compressão.

As mensagens em um arquivo "mid" representam os eventos que podem estar relacionados às frequências do áudio, mudança de configuração ou podem ser referentes a efeitos. Algumas características destes eventos foram baseadas no formato padrão da notação musical. Os eventos voltados às frequências utilizam a divisão de notas de um piano e codificam cada nota com um valor representativo entre 0 (zero) e 128. Esta codificação tem como referência a frequência 440 Hz, sendo esta frequência equivalente ao quarto Lá da notação musical ocidental temperada (explicada posteriormente) e com o código igual a 69 no formato "mid" como pode ser visto na Figura 1.

Figura 1. Representação da relação entre as frequências, código MIDI e notas musicais



O formato também se assemelha à linguagem musical no que diz respeito à duração dos eventos, pois cada evento apresenta um início e fim em uma linha do tempo guiada por uma referência às batidas por minuto (bpm) ou quantidade de quadros por segundo (*SMPTE system*). Desta maneira, tratar o conteúdo deste formato de arquivo a partir de conceitos de teoria musical é uma alternativa para análises musicais comparando-se com uma análise de partituras ou outros registros sonoros. Dependendo da análise, vários temas da teoria musical poderão ser abordados, e dentre eles tem-se a melodia e o ritmo musical, abordados neste trabalho.

A escolha desse formato de descrição simbólica do som visa facilitar o tratamento das informações. As frequências são numeradas e identificadas como notas de diferentes oitavas musicais. Considerando conceitos da Teoria Musical que serão descritos em 2.3, tem-se que o formato MIDI segue o modelo ocidental de representação musical baseando-se na escala temperada que consiste de 12 notas por oitava, a cada 12 notas teremos repetição de uma nota anterior, sendo iniciada a ordem a partir do C(-1) com o valor 0 (zero) em código MIDI e tendo o C0 com código 12. O C(-1) representa a nota mais grave a ser apresentada no formato MIDI sendo referente à frequência 8,17 Hz, sendo possível tratar até a nota G9 como a mais aguda referente à frequência 12.543,85 Hz e ao código 127 em MIDI, compreendendo assim 10 oitavas. Desta forma é possível perceber que a representação MIDI compreende uma escala de frequências útil para a análise musical.

Analisar aspectos melódicos e rítmicos a partir de ondas sonoras não deixa de ser uma opção, no entanto, utilizar-se de uma representação simbólica do som parte do julgamento de que esta é uma representação mais simples e mais próxima dos conceitos da Teoria Musical. O tratamento da onda sonora de uma melodia através de suas frequências normalmente levaria à conversão da onda em valores numéricos referentes às frequências o que pode ser facilitado através da representação simbólica em formato de notas. Já o tratamento do ritmo parte do tratamento das repetições e durações da execução das frequências, sendo assim possível sua representação numérica em escala de tempo. A partir destas observações, considera-se que seja possível tratar parte da auto-informação contida em melodias e ritmos utilizando o formato MIDI, avaliando uma modelagem específica dos dados referentes a estes temas.

2.3 Análise Musical

O termo analisar vem da ideia de examinar partes de um todo em busca do seu entendimento. O resultado de uma análise pode ser a compreensão de suas estruturas

orgânicas e suas relações a fim de especificar uma lógica científica do que está sendo analisado. A análise musical é caracterizada pelo entendimento de estruturas que fazem da música, uma arte tão admirada e ao mesmo tempo questionada pelas sensações passadas através de sua execução.

O som, matéria prima da música, sempre existiu, porém boa parte dos seres vivos sente o som da mesma maneira que os seres humanos sentem as ondas de rádio atravessando o corpo, ou seja, mal sentem ou não sentem. O sentido da audição está presente em muitos seres vivos, mas a experiência de ouvir música pelos seres humanos só é possível graças ao poder do cérebro em manipular padrões complexos de som de maneira simultânea e sucessiva, caracterizando assim a música, fato que até então não fora evidenciado em outros seres que utilizam do sentido da audição com função natural de sobrevivência (JOURDAIN, 1998).

A palavra música, que vem do grego *musiké téchne* (arte das musas), dá nome à arte de combinação de sons e silêncios. Esta arte, cuja percepção é auditiva e sequencial, existe desde as primeiras civilizações, com manifestações próprias e teorias complexas que são estudadas até os dias atuais. Sua análise teve fortes avanços no século XX a partir das contribuições das diversas áreas da ciência, como a psicologia, medicina, computação e a própria ciência musical. Isto gerou diversos conflitos entre músicos e pesquisadores, pelo fato de estes buscarem formalizar logicamente os padrões musicais, enquanto que aqueles priorizam as relações subjetivas apresentadas na música.

O estudo da música levou ao desenvolvimento da Teoria Geral Musical, muitas vezes chamada de ciência musical, estruturada através de diversas disciplinas tidas não como fim, mas como um meio de entendimento da música. As principais disciplinas que compõem esta ciência são: teoria básica da música, solfejo, ritmo, percepção melódica, rítmica e dinâmica, harmonia, contraponto, formas musicais, instrumentos musicais, instrumentação, orquestração, arranjo, fisiologia da voz e fonética, psicologia da música, pedagogia musical, história da música, acústica musical, análise musical, composição, regência e técnica de um ou mais instrumentos musicais específicos (MED, 1996).

A estrutura musical determina que qualquer que seja o método e o objetivo, o material sonoro a ser usado pela música é tradicionalmente dividido de acordo com três elementos organizacionais: melodia, harmonia e ritmo. No entanto, quando nos referimos aos aspectos do som nos deparamos com uma lista mais abrangente de componentes: altura, timbre, intensidade, duração, entre outros.

A análise realizada neste trabalho visa um estudo com base nos padrões que podem ser encontrados em articulações rítmicas e melódicas de linhas melódicas. Uma articulação pode

ser considerada uma junção entre elementos semelhantes, e, neste caso, tem-se as notas musicais como os elementos. As articulações serão consideradas em relação à diferença entre as alturas das notas e diferença entre as durações das mesmas, referentes às articulações melódicas e rítmicas, respectivamente.

2.3.1 Ritmo

Certas medidas são dispostas comumente como definidoras de ritmo. Uma frequência medida em unidade de tempo ou distância dá uma ideia de regularidade de acontecimento, no entanto, o ritmo não é algo que venha a ser regular. A razão de certa ordenação ou a noção do fluir musical traz uma ideia estrutural muito mais abrangente em relação à definição de ritmo. Esta ordenação que pode ser de caráter contínuo ou descontínuo requer maior atenção a partir do momento em que suas diversas características são levadas em consideração na determinação de um ritmo qualquer (KIEFER, 1979).

As características rítmicas voltadas à música estão relacionadas à duração e intensidade, todavia é possível caracterizar um ritmo também através de variações de timbre e altura. O ritmo na música adquire condições específicas baseando-se nas culturas e nos instrumentos através dos quais ele é expresso. O músico, ao executar uma obra, também interfere na forma como os ritmos são articulados, mesmo partindo de uma mesma representação rítmica.

A representação rítmica na música é baseada em símbolos que são utilizados para dar uma ideia de duração de movimentos. Estes símbolos seguem os conceitos de notações musicais, e partem da ideia de proporção temporal. A notação musical é o nome comum dado a qualquer sistema utilizado para representar graficamente uma obra musical, permitindo sua execução como fora composta (MED, 1996). Na Figura 2, algumas proporções são apresentadas utilizando a notação musical ocidental. Da esquerda para a direita temos símbolos que representam as durações: semibreve, mínima, semínima, colcheia, semicolcheia, fusa e semifusa. A ideia de proporção existente entre elas se dá a partir da duração em escala temporal. Uma semibreve representa uma unidade de tempo proporcional a duas mínimas, sendo assim, a semibreve apresenta-se como uma unidade e a mínima como metade desta unidade, e assim por diante. Considerando que cada representação é referente à unidade padrão que é semibreve neste caso. Logo, temos que a semifusa equivale a um sessenta e quatro avos do tempo de duração da semibreve.

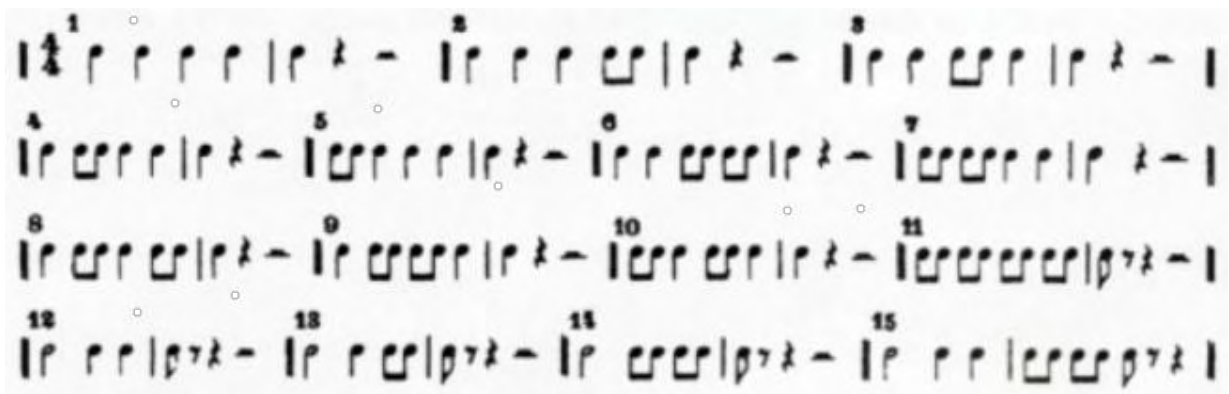
Figura 2. Representação da proporção temporal existente entre símbolos de notação musical



Fonte: POZZOLI (1983)

A partir da combinação destes símbolos é possível a criação e representação de um número imenso de ritmos (POZZOLI, 1983). A combinação deles pode ser ordenada ou não e permite que certos padrões de sequências sejam seguidos para caracterizar ritmos específicos, além de ser possível articular ritmos diferentes em paralelo utilizando-se mais de um instrumento, abrangendo assim uma gama de sensações rítmicas distintas diante de poucos símbolos. A Figura 3 apresenta alguns exemplos de articulações rítmicas a partir da variação entre símbolos da notação musical.

Figura 3. Exemplo de articulações rítmicas



Fonte: POZZOLI (1983, p.)

Esta representação musical utiliza-se de muitos outros símbolos da música, todavia, dando atenção apenas às sequências de símbolos apresentados da Figura 2, é possível verificar como tais símbolos podem ser agrupados. As sensações passadas pela execução de qualquer uma das 15 sequências apresentadas na Figura 3 são diferentes, mesmo quando as diferenças são mínimas. Isso se dá pelo fato de o sentido rítmico ser determinado por estas diferenças de organização. Porém, outras particularidades da execução podem dar aspectos diferentes até a uma mesma sequência rítmica, e uma destas particularidades, a melodia, será descrita a seguir.

2.3.2 Melodia

A sucessão de notas proporcionando uma variação de frequências sonoras caracteriza o que pode ser chamado de melodia. Na teoria musical, tem-se que a base para o estudo das

melodias são as notas musicais, os motivos melódicos e temas, os quais fazem parte da estrutura da melodia dando sentido à mesma. O sentido musical de uma melodia é sua principal característica, pois é a partir dele que se sente o que tal melodia transparece (KIEFER, 1979).

O sentido de uma melodia terá maior caráter significativo em seu sistema nativo de notação musical. Um sistema de notação musical pode ser comparado à língua de um país no que diz respeito ao modo de passar conhecimento ou descrever algo. Esta comparação se baseia no fato de sistemas musicais existirem desde a antiguidade e variarem entre diferentes culturas, sempre servindo como forma de eternizar o conhecimento musical e obras musicais. Nos dias atuais, o sistema mais tradicional é o ocidental, que emprega notas musicais representadas em um pentagrama utilizando símbolos apresentados na Figura 2 para definição de localização e duração das notas musicais, sendo possível o emprego de outros símbolos para discriminar a forma como a melodia foi pré-definida pelo compositor para ser executada posteriormente (MED, 1996).

As notas musicais utilizadas no sistema ocidental seguem um padrão que permite sua interpretação de forma mais prática, considerando que este padrão evita tanto o uso dos valores das frequências sonoras quanto a representação da duração de cada frequência em unidade de tempo padrão como o segundo ou milissegundo. A princípio são definidas sete notas musicais, sendo elas dó, ré, mi, fá, sol, lá e si, representadas também de maneira cifrada por C, D, E, F, G, A e B, respectivamente. Estas sete notas podem adquirir a condição de sustenido (#) ou bemoal (b) dependendo da escala, e, desta maneira, passam a existir 21 notas musicais. No entanto, alguns instrumentos apresentam apenas 12 notas diferentes em cada oitava, como o piano, pelo fato de igualarem algumas notas: C# e Db, D# e Eb, E e Fb, E# e F, F# e Gb, G# e Ab, A# e Bb, B e Cb, B# e C. Neste caso citado, uma representação para a sequência de notas pode ser C, C#, D, D#, E, F, F#, G, G#, A, A# e B, totalizando 12 notas que se repetem em a cada oitava. O sistema de notação musical que utiliza esta definição é tido como sistema temperado. Em algumas culturas orientais tem-se a utilização de mais notas musicais em virtude de notações antigas e divisões diferenciadas, o que promove maneiras diferentes de representação musical que não serão tratadas neste trabalho (JOURDAIN, 1998).

A apresentação de uma melodia através do sistema de notação musical ocidental resulta na visualização das relações entre notas sucessivas. Uma breve representação de melodia é apresentada na Figura 4. Nela é possível observar a melodia inicial do Hino Nacional Brasileiro com a letra acompanhando cada símbolo da notação ao qual se refere.

Tendo em vista a altura das notas em relação à pauta, verifica-se que ocorre uma sequência de ascensão e queda.

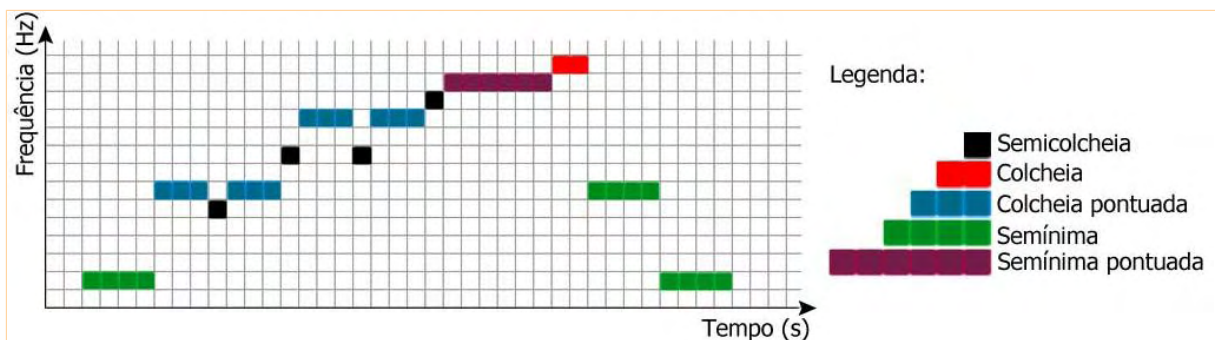
A altura de uma nota determina quão grave ou quão aguda ela é considerando a sua localização na pauta, de modo que podemos comparar a pauta com um gráfico em que o eixo das abscissas representa o tempo, enquanto que o eixo das ordenadas representa a frequência das ondas sonoras. Um exemplo gráfico comparativo para a melodia do Hino Nacional Brasileiro é apresentado na Figura 5. Outro conceito da Teoria Musical que é visto nesta partitura é o “ponto” após o símbolo, tornando a nota com uma duração 50% maior que sua duração original.

Figura 4. Parte inicial da Melodia do Hino Nacional Brasileiro



Fonte: SILVA (2011).

Figura 5. Exemplo da representação gráfica do Hino Nacional Brasileiro



Fonte: Autoria própria (2011).

A visualização da melodia em uma pauta apresenta a mesma ideia de variedade apresentada na definição de ritmo, visto que também é possível alternar a posição das notas na pauta de maneira infinita. A melodia e o ritmo proporcionam uma diversidade de linhas melódicas que são capazes de satisfazerem às diversas culturas e períodos desde a antiguidade, passando pelos dias atuais e deixando ainda milhares de possibilidades de composições para um futuro distante.

A composição de linhas melódicas se dá baseada em diversos fatores. Fatores harmônicos associados a outros conceitos da Teoria Musical predisõem as sequencias melódicas a seguirem algumas condições e regras. As escalas musicais, por exemplo,

determinam um conjunto de notas que possivelmente soarão bem ao serem utilizadas em conjunto.

A possibilidade de uma linha melódica soar bem vem da condição de admiração do som possuída pelo ser humano, o qual pode perceber o som através de seus sentidos e utilizar-se de diversos artifícios para análise musical, como seu conhecimento prévio, sua cultura ou sua conjuntura social. A partir daí temos que a percepção do som tanto influencia na audição quanto na composição de obras musicais (JOURDAIN, 1998).

2.3.3 Percepção do som

Tem-se que o ato de perceber vem da arte de adquirir conhecimentos através das sensações obtidas pelos sentidos. Alguns atos – ver, tocar, degustar, cheirar e ouvir, por exemplo – ajudam a compreender tudo o que se encontra em um ambiente através das experiências sensitivas. A percepção, por sua vez, é uma característica nativa nos seres vivos, possibilitando diversas ações que caracterizam o perfil de cada ser. A diferenciação das percepções se dá a partir de condições distintas (BOOTHROYD, 1986). Uma destas condições é o conhecimento prévio, o qual se relaciona com a interpretação dos sentidos no momento da percepção. Neste contexto, temos uma relação entre o conhecimento e a percepção segundo Morin (2000):

O conhecimento não é um espelho das coisas ou do mundo externo. Todas as percepções são, ao mesmo tempo, traduções e reconstruções cerebrais com base em estímulos ou sinais captados e codificados pelos sentidos. Daí resultam, sabemos bem, os inúmeros erros de percepção que nos vêm de nosso sentido mais confiável, o da visão. Ao erro de percepção acrescenta-se o erro intelectual. (MORIN, 2000, p. 20).

O conhecimento prévio e as características biológicas do ser humano são elementos fundamentais para caracterização do funcionamento do sistema sensorial. As deficiências e diferenças cognitivas entre seres proporcionam diferentes formas de sentir o mundo, implicando nas diferentes percepções sob mesmas condições. Logo, seres diferentes podem ter sensações e percepções diferentes em uma mesma situação, como a audição de uma onda sonora. Considerando as características neurológicas dos seres, temos que a agregação de significados às coisas do mundo é dada utilizando-se da memória como fator crucial para recuperar informações que irão possibilitar o aperfeiçoamento dos sentidos. (SILVA, 2007)

O processo de percepção auditiva se dá a partir da habilidade de interpretar sons e modelos sonoros captados pelo sistema auditivo. Segundo Boothroyd (1986), perceber um

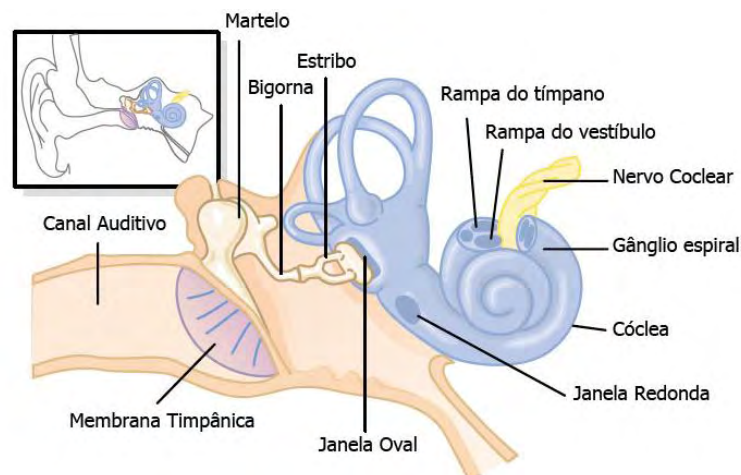
evento sonoro é um processo rápido, porém minucioso, e este processo baseia-se em etapas, como: detecção, sensação, discriminação, localização, reconhecimento, compreensão, atenção e memória. A partir disto, Boothroyd (1986) afirma que:

[...] um estímulo sonoro remoto é um evento, o estímulo próximo passa a ser o som, o órgão que sente é o ouvido, os dados sentidos consistem em padrões elétricos estimulados no nervo auditivo, o processamento se dará nas áreas reservadas aos centros auditivos no cérebro, e a percepção resultante será uma representação interna do evento original. (BOOTHROYD, 1986, p.68, tradução própria).

A onda em si é uma perturbação que se propaga num meio. As ondas sonoras utilizam dois meios para chegarem a ser perceptíveis pelo ser: o ar e o corpo humano. As ondas da própria voz são transmitidas duas vezes e de maneiras diferentes ao emissor, tanto pelo ar, quanto pelos ossos do corpo do mesmo, o que resulta no fato de os seres humanos ouvirem sua própria voz de maneira diferente da voz ouvida pelos seres ao seu redor (JOURDAIN, 1998).

Considerando o ar como meio de propagação do som, temos que as ondas sonoras seguem através deste meio até chegarem ao canal auditivo onde percorrerão um curto caminho até a membrana timpânica. A partir daí, o som percorre o ouvido médio em direção ao ouvido interno. Neste ponto o som passa pelo martelo e pela bigorna, ossos que fazem parte do sistema ossicular do ouvido médio e ajudam a amplificar a vibração causada pelo som na membrana timpânica a fim de auxiliar na transmissão do som. A bigorna por sua vez se articula com o cabo do estribo para que as ondas sonoras sejam então transmitidas para dentro da cóclea onde ocorre o tratamento do som antes de ser transmitido ao cérebro (GUYTON, 2006). Os participantes deste processo podem ser localizados na Figura 6.

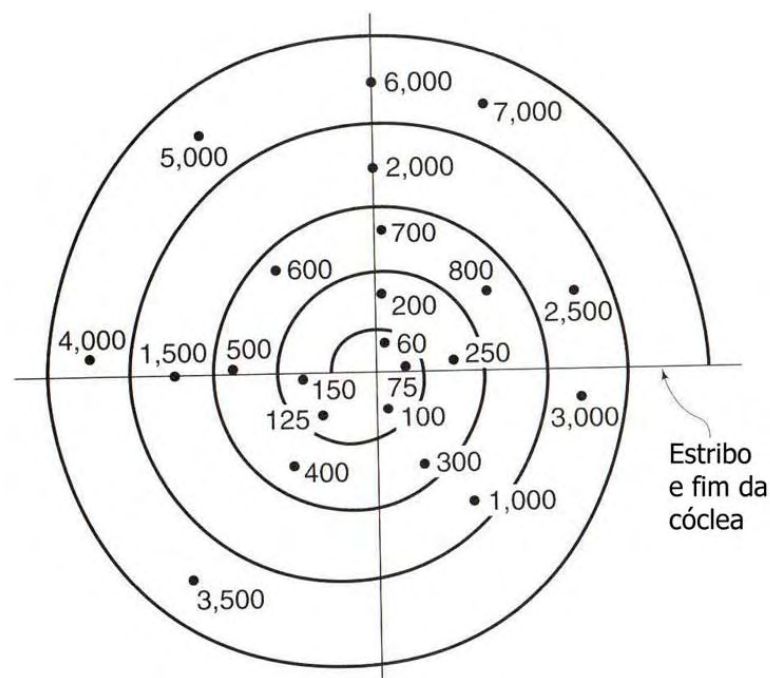
Figura 6. Membrana timpânica, sistema ossicular do ouvido médio e ouvido interno



Fonte: GUYTON (2006, p. 652, tradução própria)

Dentro da cóclea, o órgão de Corti é o receptor que gera impulsos nervosos em resposta às vibrações que atravessam o líquido coclear ao longo da membrana basilar. Os verdadeiros receptores sensoriais no órgão de Corti são as células ciliadas, as quais fazem sinapse com a rede de terminações nervosas da cóclea. Estas células estão distribuídas ao longo da cóclea de maneira que as frequências são discriminadas separadamente. Esta discriminação de frequências segue uma sequência que vai das frequências mais altas no fim da cóclea para as mais baixas no seu centro (GOLDSTEIN, 2002). A Figura 7 apresenta um mapa de localização da máxima resposta para cada frequência dentro da cóclea.

Figura 7. Mapa tonotópico da cóclea

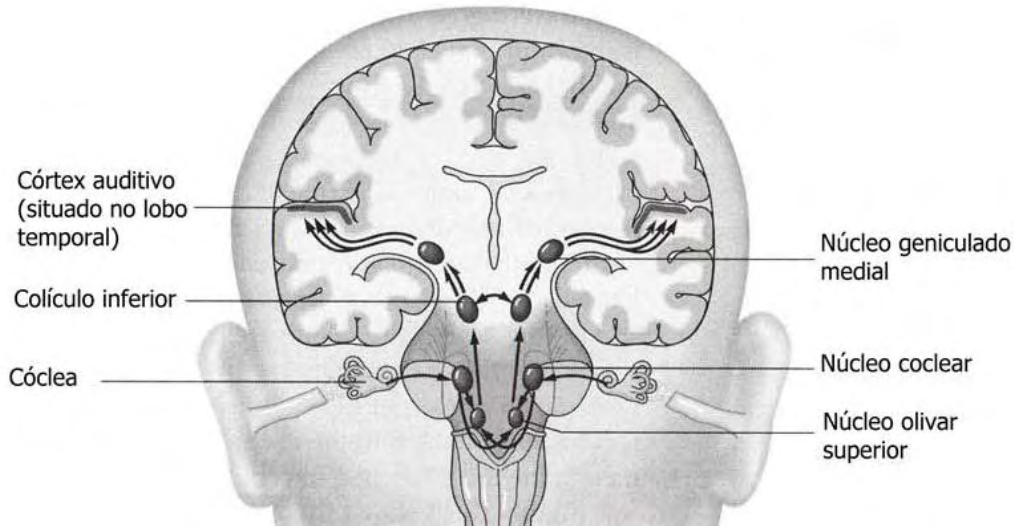


Fonte: CULLER et al. (1943 apud GOLDSTEIN, 2002, p. 354, tradução própria)

Após a passagem pela cóclea e pelo órgão de Corti, o estímulo causado pelo som segue através dos neurônios do nervo da cóclea até chegar ao córtex auditivo. Antes de chegar ao córtex, os estímulos passam por alguns diversos caminhos onde ocorrem combinações do que é percebido em cada ouvido. Neste percurso, os estímulos do ouvido direito e esquerdo se cruzam nos núcleos olivares superiores e seguem para ambos os lados do cérebro juntos, como se o estímulo fosse duplicado, combinado com o estímulo do lado contrário e assim enviado para ser interpretado. Além de se cruzarem nos núcleos olivares, há também um encontro no colículo inferior antes de chegar ao núcleo geniculado medial e ser enviado para o córtex auditivo. O caminho dos estímulos sonoros resultantes da percepção das frequências na cóclea pode ser mais bem observado na Figura 8, onde setas representam os percursos dos estímulos pelos neurônios através das fibras aferentes do nervo vestibulo-coclear. Estas fibras

aferentes são responsáveis pela aferição dos estímulos sensoriais auditivos e fazem parte do processo de percepção como intermediárias do traslado de tais estímulos (GOLDSTEIN, 2002).

Figura 8. Diagrama do caminho do estímulo auditivo



Fonte: GOLDSTEIN (2002, p. 351, tradução própria)

Ao chegar ao córtex auditivo, o estímulo é interpretado, processado e entendido. Isso se dá a partir das funções do córtex auditivo primário, secundário e terciário. Há uma diferenciação também em relação ao que é tratado em cada lado do cérebro. No lado direito, o córtex auditivo secundário mantém foco sob as relações de sons simultâneos, as quais também são chamadas de relações harmônicas. Enquanto isso, o córtex auditivo secundário do lado esquerdo dá atenção às hierarquias de sequências e à percepção do ritmo (JOURDAIN, 1998, p. 87). Considerando todo o processo do sistema auditivo, Jourdain (1998) diz:

Os neurocientistas estão longe de entender como os fenômenos temporais são representados no córtex. Mas está claro que o córtex auditivo não age como uma espécie de gravador, colocando em escaninhos, ao chegar, cada som que entra. Se fosse este o caso, inverter uma sequência de sons significaria inverter o padrão de atividade neurológica que ele produz. Mas isto não acontece: as pesquisas mostram que os sons invertidos geram uma resposta única. Isto implica que o córtex auditivo não considera isoladamente os sons individuais. Em vez disso, sempre interpreta os sons dentro do contexto precedente. (JOURDAIN, 1998, p.87).

O processamento do som em relação ao contexto se dá no córtex auditivo terciário, onde há um contato direto com o hipocampo, região considerada principal sede da memória. Quando evento sonoro chega ao córtex e é estimulado no hipocampo, este interpreta as novas informações, associa-as às memórias anteriores e determina se vai codificá-las como uma

memória de longo prazo. Para codificar algo na memória de longo prazo há a necessidade de reforçar o estímulo para que ocorra a persistência da informação. Logo, quanto maior a frequência, maior será a fixação do material "aprendido" (BARKER et al., 1999). Além disso, vale salientar que o tratamento do som é sequencial e que o cérebro trabalha normalmente com foco nas alterações do que é percebido, pois se tem que a atenção a algo que se mantém constante ou que é repetitivo torna-se baixa (GOLDSTEIN, 2002). Percebe-se então que ao aprender, a atenção é alterada e a partir da aprendizagem concluída o foco da atenção se dará para novos objetos.

Tendo em vista toda esta descrição das características musicais e da percepção auditiva, verifica-se que a repetição de um evento sonoro causa sua maior fixação e facilita sua recuperação através da memória. Estes pontos fazem uma conexão com o PPM e com a análise musical de maneira que é possível propor uma análise musical baseada na verificação de repetições, considerando estas repetições posteriormente como padrões e utilizando-as para reconhecimento de materiais semelhantes a partir da busca por estes padrões.

Os conceitos expostos também servem de base para os testes que são apresentados neste trabalho a partir do método proposto. Para validação do método, há de se utilizar de técnicas estatísticas a fim de obter informações sobre quão válidos são os métodos utilizados. Dentre as diversas técnicas existentes, a técnica trabalhada neste estudo será descrita a seguir.

2.4 Validação Cruzada

Em estatística, técnicas de reamostragem podem ser usadas para validar modelos usando subconjuntos aleatórios, e temos a validação cruzada como uma das principais técnicas utilizadas. Esta técnica é algumas vezes chamada de estimativa de rotação, e seu principal objetivo é voltado à validação de modelos preditivos. A técnica também serve para analisar como os resultados de uma análise estatística tende a generalizar um conjunto de dados independentes (MOORE e LEE, 1994).

Esta prática utiliza os itens de modelos para criar um conjunto de testes em prol da validação de modelos. Os modelos são determinados normalmente por critérios que tornam seus itens semelhantes. No final, o objetivo é avaliar a qualidade da previsão para os modelos, e quão confiável o modelo pode ser para testes futuros.

A validação cruzada pode tratar os modelos a partir de diversos tipos de treinamentos. O tipo usado neste trabalho é o Deixando-Um-De-Fora (Leave-One-Out Cross Validation -

LOOCV). A escolha deste tipo se deu pelo fato de tal validação servir para qualquer tipo de classificação, pois se torna possível testar todos os grupos de itens.

No LOOCV, apenas um item dos modelos será retirado por vez para compor o conjunto de teste, deixando os demais itens compondo os modelos a serem testados. Os resultados dos testes de cada item com todos os modelos serão comparados para estimar o erro obtido com os modelos e validar qual modelo pode ser usado para prever melhor. Este é um método caro a partir de um ponto de vista computacional, porque todos os subconjuntos de modelos serão criados durante o processo de formação para validar com o conjunto de teste.

2.4.1 Exemplo de validação cruzada

Considerando um grupo de N-modelos com C-itens e utilizando o LOOCV tem-se uma representação dos seguintes modelos “M” com itens “T” a serem avaliados:

$$M_1 = (M_{1I_1}, M_{1I_2}, \dots, M_{1I_C});$$

$$M_2 = (M_{2I_1}, M_{2I_2}, \dots, M_{2I_C});$$

...

$$M_N = (M_{NI_1}, M_{NI_2}, \dots, M_{NI_C}).$$

A criação do conjunto de teste e do conjunto de treinamento pode ser feita de diversas maneiras visto que o intuito é testar o maior número de subconjuntos dos modelos. Neste trabalho, a cada iteração o primeiro elemento de cada modelo é retirado criando o conjunto de testes e deixando os outros elementos como parte dos modelos para o conjunto de treinamento. A cada iteração todos os elementos do conjunto de testes são avaliados junto aos modelos do conjunto de treinamento e então cada elemento é devolvido a seu respectivo modelo. Desta forma, um elemento diferente de cada modelo é retirado por vez para formar o conjunto de teste, permitindo assim que todos os elementos sejam testados, além de permitir que os subconjuntos com C-1 elementos dos modelos sejam também testados.

Como a quantidade de subconjuntos será "C", tem-se "C" conjuntos de teste “T”, "N" elementos em cada conjunto de teste e "N" modelos para serem testados com os elementos dos conjuntos de teste. Isto resulta num total de CxNxN testes e CxN classificações de elementos a serem realizadas. Os resultados obtidos com as classificações são apresentados de forma que cada elemento tenha uma lista ordenada dos resultados de sua classificação a fim de determinar o modelo que melhor o classificou. Abaixo temos uma exemplificação dos conjuntos de teste e do primeiro conjunto de treinamento com os itens restantes dos modelos.

A seguir tem-se uma descrição dos conjuntos de testes “T”, com os elementos retirados dos modelos (C conjuntos com N itens):

$$T_1 = M_1I_1, M_2I_1, \dots, M_NI_1;$$

$$T_2 = M_1I_2, M_2I_2, \dots, M_NI_2;$$

...

$$T_C = M_1I_C, M_2I_C, \dots, M_NI_C.$$

Um exemplo do primeiro conjunto modelos para treinamento com os elementos restantes e sem os elementos do primeiro conjunto de teste (N modelos):

$$M_1 = (M_1I_2, M_1I_3, \dots, M_1I_C);$$

$$M_2 = (M_2I_2, M_2I_3, \dots, M_2I_C);$$

...

$$M_N = (M_NI_2, M_NI_3, \dots, M_NI_C).$$

Os próximos conjuntos de treinamento serão formados a partir da inserção dos elementos retirados, seguida da retirada dos elementos seguintes para a formação de um novo conjunto de testes. Este método utilizará todos os itens de todos os modelos concluindo sobre a qualidade de predição de cada modelo, verificando assim se é possível a utilização do modelo para classificação no domínio em questão.

Este tipo de avaliação qualifica o método calculando a taxa de acerto entre os modelos criados. Este resultado pode ser utilizado para comparações com outros métodos, porém, o principal interesse aqui é comparar o método em si com outros trabalhos da área. Sendo assim, a descrição de alguns trabalhos será realizada a seguir antes de ser exibido o método proposto.

3 Aplicação do PPM para Análise Musical

A área de Recuperação de Informações em Músicas (Music Information Retrieval – MIR) trabalha diversas maneiras tratamento de sinais de áudio e informações musicais. Muitas áreas também tratam deste tema com destreza, como a psicologia, medicina, música e computação, no entanto, o enfoque em relacionar todas as áreas ou algumas delas pode trazer vantagens para os resultados. Este trabalho trata-se de uma análise de ritmos e melodias em busca da classificação de padrões utilizando o PPM baseando-se em conhecimentos sobre o sistema auditivo humano, tema capaz abrir possibilidades diversas para sua aplicação.

A utilização do PPM na música não fora tema de muitos trabalhos. Entretanto, a utilização deste método ao longo dos anos voltado para a compressão e reconhecimento de padrões obteve bons resultados em diversos ramos, como na classificação de texturas (HONÓRIO et al, 2007), análise de imagens de mamografias (MARQUES et al, 2008) e classificação de textos (BARBOSA et al, 2009).

Antes da apresentação da proposta deste trabalho, são apresentados a seguir trabalhos correlatos ao tema em questão. Alguns trabalhos citados apresentam correspondências com este a partir da aplicação de métodos diversos na análise musical, incluindo a utilização do PPM. Outros trabalhos que são citados a seguir tratam da análise musical utilizando o formato MIDI.

3.1 Trabalhos Correlatos sobre Análise Musical

A classificação de arquivos de áudio tanto através do reconhecimento de padrões quanto com bases estatísticas são temas muito pesquisados na área de MIR. Resultados diversos mostram que há possibilidade de tratamento do áudio para segmentação de suas estruturas em busca de reconhecimento de estilos, autoria, acordes, voz, título da música, autor da música ou outras características musicais. Alguns dos principais trabalhos utilizados como base para este serão apresentados a seguir com uma breve descrição e o que seus resultados apresentam.

Em busca da modelagem de estilos musicais, comparativos entre algoritmos são apresentados em Lartillot (2001). Esta modelagem se baseia na representação computacional de características estruturais do áudio. Os algoritmos utilizados neste trabalho partem dos

princípios de compressão e também de modelagem estatística de sequências complexas de dados. Os resultados do trabalho apresentam formas de utilização de tais algoritmos e suas qualidades. Um ponto relevante é a sugestão da aplicação do PPM como trabalho posterior para análise de áudio com os mesmo princípios apresentados pelos algoritmos tratados.

O trabalho apresentado por Pearce e Wiggins (2003) apresenta comparações sobre as variadas formas de implementação do PPM na análise musical. O PPM adquiriu diversas formas variantes ao longo do tempo com o intuito de tratar melhor a probabilidade do símbolo de escape ou melhorar o tratamento para contextos longos (SALOMON e MOTTA, 2009).

As variantes do PPM apresentadas por Pearce e Wiggins (2003) utilizam três técnicas diferentes, sendo elas o método do escape, o método *interpolated smoothing* e a utilização de contextos ilimitados. Estas técnicas foram aplicadas a músicas monofônicas, que são músicas que executam apenas um som por vez. O objetivo deste trabalho foi demonstrar como algumas variações do PPM podem melhorar o desempenho dos modelos criados e consequentemente comparar tais variações no contexto em questão.

Alguns outros trabalhos são de bastante importância na área pelo fato de tratarem do reconhecimento de padrões através da análise de segmentos. O trabalho de Dnnenberg e Hu (2002) é relevante neste ponto por testar diversas técnicas de reconhecimento de padrões para áudio em formato de onda. Os resultados apresentados analisam o áudio monofônico, polifônico e utilizando o *chroma* (espectro) revelando que nem todos os segmentos semelhantes são encontrados e que o tratamento da polifonia ainda precisa ser evoluído para tratar a harmonia existente entre os segmentos.

O tratamento do áudio nos diversos trabalhos é bem diferenciado por ser possível tratar o áudio em formato de ondas, em formato espectral ou utilizando formatos descritivos de alguns bancos de dados específicos. O formato escolhido vai diferenciar os possíveis resultados a serem obtidos tendo em vista que cada formato tem sua função característica. Além dos formatos citados, o foco sobre o tratamento do áudio no formato MIDI é relevante perante as pesquisas visto que é o formato mais próximo da representação do áudio musical através de símbolos.

O formato MIDI também se apresenta com grande valor para a análise musical por apresentar características que o aproximam da representação utilizada por partituras, que é a forma mais comum de representação musical. Algumas das diversas maneiras como o áudio é tratado a partir do formato MIDI são analisadas a seguir com o intuito de expor vantagens e embasar a utilização deste formato no trabalho.

3.1.1 Trabalhos Correlatos Utilizando o Formato MIDI

O formato MIDI apresenta o áudio a partir de eventos que simbolizam a frequência e sua duração, entre outras informações como fora descrito na seção 2.2.2. A cada aparição de uma nota, é registrado um evento no arquivo “mid” indicando seu início de execução em função do tempo, e posteriormente outro evento é indicado com o intuito de especificar quando a nota musical é finalizada. Sendo assim, os trabalhos podem considerar tanto a notas quanto sua duração durante o tratamento dos arquivos neste formato.

Há uma grande dificuldade para tratamento de arquivos polifônicos pelo fato de estes apresentarem características harmônicas, rítmicas e melódicas a serem consideradas durante sua análise, no entanto, alguns trabalhos aplicam metodologias próprias neste caso. Como é o caso do trabalho de recuperação de informações através de arquivos polifônicos descrito por Suyoto et al (2007), no qual arquivos de áudio em formato de onda são convertidos para o formato MIDI e mesmo os arquivos monofônicos geram arquivos polifônicos pelo efeito dos harmônicos das notas.

O tratamento da polifonia neste caso basicamente converte sons simultâneos em sons sequenciais, como se transformasse acordes em arpejos. Se as notas “C”, “E” e “G” ocorrem simultaneamente, elas se transformam em uma sequência apresentada da mais grave para a mais aguda. Suyoto et al (2007) utiliza o algoritmo de Mais Longa Subseqüência Comum (*Longest Common Subsequence - LCS*) para buscar seqüências em comum nos arquivos.

Um ponto relevante deste trabalho é a realização da transposição das seqüências durante os testes. Desta forma, cada seqüência é testada 12 vezes, transpondo a seqüência da seguinte maneira: cada nota é adicionada de uma unidade a cada teste para gerar uma nova seqüência a ser testada e avaliada, atribuindo-se uma pontuação para a comparação desta nova seqüência. Tomando como base a seqüência “C”, “E” e “G”, teremos que a segunda seqüência a ser testada seria “C#”, “F” e “G#”, e assim sucessivamente. Este trabalho não faz diferenciação entre as oitavas das notas na representação dos símbolos.

Uma atitude diferente é tomada por Londei et al (2003), no tratamento de melodias. Neste trabalho, durante a leitura dos arquivos “mid” é realizado o armazenamento do valor resultante da subtração de uma nota pela sua antecessora somando-se a 127, a fim de evitar a dependência das notas para seu tratamento posterior. Após todo o tratamento dos arquivos, a compressão dos arquivos é feita em pares em busca da entropia relativa. Cada teste recebe uma pontuação para posteriormente ser apresentado topograficamente o resultado da comparação de todos os arquivos agrupando os semelhantes. Estes testes comprovaram que a

entropia relativa aparenta ser um bom parâmetro para identificação de música e para detecção de similaridades entre obras.

Outro tipo de tratamento é encontrado em Cilibrasi et al (2004), trabalho que tem um foco na criação de *clusters* após a comparação dos arquivos baseando-se em métricas de similaridade universais. Há a fundamentação de tentar aproximar-se da noção da complexidade de Kolmogorov, em que o tamanho do menor código comprimido a partir de um objeto original pode ser reproduzido sem perdas por um eficiente descompressor. No entanto, por motivos computacionais se utiliza de técnicas comuns de compressão e uma métrica de similaridade computável a partir da Distância de Compressão Normalizada (*Normalized Compression Distance - NCD*).

De fato, o trabalho computa a distância entre os pares de arquivos “mid” resultando numa matriz de distância. Para isto, os arquivos são pré-processados para se tornarem uniformes, sem dados particulares como informações dos artistas, *tags*, títulos, entre outros dados. Ocorre um cálculo em busca de uma nota para se tornar referência, chamada “nota modal”, a partir da qual as notas seguintes são computadas. A “nota modal” é escrita como o primeiro byte de cada arquivo e cada nota é comparada a ela antes de ser armazenada, sendo o valor 1 (um) indicando que a nota é a próxima nota após a “nota modal” na sequência de notas existentes no formato MIDI e o valor -2 representando a penúltima nota antes da “nota modal”, por exemplo. O bzip2 é utilizado como programa para compressão, sendo os resultados desta compressão utilizados para a criação dos *clusters*.

Estes métodos aqui apresentados mostram a complexidade do tratamento de arquivos de áudio perante os algoritmos e técnicas existentes. A aproximação da metodologia aplicada com a teoria musical é levada em consideração a fim de adequar cada trabalho ao tipo de dado a ser tratado, todavia, verifica-se que os trabalhos tratam normalmente a representação dos conceitos musicais como bytes armazenados em arquivos ao invés de considerar o próprio dado como objeto de estudo.

Tomando tal colocação como base teórica, este trabalho propõe um método de análise musical baseado em melodias e ritmos, considerando alguns destes conceitos utilizados nestes trabalhos correlatos e adicionando uma nova modelagem dos dados para uma classificação voltada à autoria e semelhança de linhas melódicas. Os detalhes da análise realizada são descritos a seguir junto à apresentação do sistema desenvolvido e dos bancos de dados utilizados para a análise.

3.2 Descrição da Análise Musical Realizada

A análise musical abrange muitos aspectos divididos entre as grandes áreas da ciência. A música tanto como ciência ou arte busca razões através das quais seja possível afirmar como as ondas sonoras chegam aos ouvidos humanos e passam diferentes sensações (JOURDAIN, 1998). A psicologia também é uma área da ciência que ao longo dos anos passou a realizar diversas pesquisas em busca de entender como é a relação do sistema sensorial auditivo com o cérebro (TIGHE e DOWLING, 1993). A medicina, por sua vez, sempre manteve seus estudos sobre quais partes do corpo interferem na sensação e percepção dos sons e quais partes do cérebro realizam as interpretações das estruturas sonoras (GUYTON, 2006).

A ciência da computação, mais especificamente a computação musical, passou a trabalhar em conjunto com diversas áreas na análise de som e áudio, aumentando a dimensão das pesquisas pela possibilidade de automatizar diversas análises e cálculos. A pesquisa aqui realizada apresenta uma nova maneira de tratamento do áudio em busca de reconhecimento de padrões através do processamento digital de símbolos representativos do sinal de áudio. A Teoria Musical é base para este estudo junto à Teoria da Informação, tendo em vista a aplicação dos conceitos de ambas com o intuito de abrir novos rumos para pesquisas nesta área a partir do método aqui utilizado.

Partindo dos conceitos já apresentados sobre Teoria Musical, constata-se que toda linha melódica é uma sequência de notas com ritmo e melodia definidos considerando diversas condições e probabilidades de variação. A composição de linhas melódicas por um músico com noções de Teoria Musical terá por consequência deste conhecimento prévio a possibilidade de concordância com as diversas definições e regras musicais existentes. O período e local em que uma obra é escrita também predisõem várias condições à obra, considerando aqui a grande influência da literatura da época e da cultura local no modo como tais obras podem ser contextualizadas (BROWN, 1970).

Os compositores de certa forma tem toda liberdade para criarem e expressarem ideias diferentes das comuns através de suas obras. Características pessoais dos compositores são normalmente estudadas para especificarem estilos, períodos e atribuírem definições peculiares aos mesmos. Várias similaridades entre obras musicais de um mesmo autor podem denotar algumas destas características, como pode ser visto no trabalho de Larue (1961) no qual são analisadas semelhanças coincidentes e significativas entre obras clássicas. Dentre as obras citadas no trabalho de Larue (1961) se encontram obras de Bach e Mozart com diversas

características semelhantes, principalmente nos contornos melódicos, além ser verificado que as similaridades ocorrem em trechos melódicos de um mesmo instrumento, normalmente.

Na música clássica existem compositores que desenvolveram trabalhos especiais para instrumentos específicos, sendo geralmente estes instrumentos os expositores das melodias musicais ou cantores das obras. Um instrumento muito utilizado para tal função é o violino, normalmente acompanhado por piano ou outros instrumentos de corda como viola e violoncelo com os quais a linha melódica pode ser compartilhada.

O violino é um instrumento clássico que adquiriu seu formato atual por volta do século XVI que apresenta quatro cordas e seu som é extraído principalmente através da fricção de um arco nas cordas. O arco é feito de madeira e a parte que entra em contato com as cordas do violino é feita de fios de crina de cavalo com tensão regulável (SANDYS e ANDREW, 2006). Um dos melhores fabricantes durante a “Era de Ouro” do violino foi a família Stradivarius, cujo exemplo de violino pode ser visto na Figura 9.

Figura 9. Violino “Lady Blunt”¹ feito por Antonius Stradivarius em 1721



Fonte: STRADIVARIUS VIOLIN (2011).

O violino, apesar de possibilitar a execução de mais de uma nota ao mesmo tempo, é considerado um instrumento melódico, logo ele é preferencialmente utilizado para a execução de linhas sequenciais de notas. Obras escritas para este instrumento vão do Barroco ao Jazz resultando na sua versatilidade distinta. O limite de notas que são executadas por um violino varia do G3 ao C8, sendo as últimas notas produzidas por harmônicos naturais ou artificiais, resultando num total de 51 notas. O fato de usar poucas notas e ser um instrumento melódico ajuda na análise de suas obras por um sistema computacional e é por estes motivos que obras de violino são utilizadas neste trabalho para avaliarem o método proposto.

O método aplicado neste trabalho visa correlacionar certas sequências melódicas em busca do reconhecimento de padrões existentes em obras. O método PPM é utilizado aqui

¹ O Violino Lady Blunt foi leiloado em junho de 2011 por aproximadamente 16 milhões de dólares em prol de ajudar ao Japão com relação aos terremotos e tsunamis ocorridos no mês de março de 2011. Este violino pertenceu à Lady Anne Blunt, filha de Ada de Lovelace (considerada a primeira programadora da história) e neta do Lorde Byron (um dos maiores poetas europeus).

com o intuito de encontrar obras semelhantes com base nos padrões que são tratados previamente em seus modelos criados para predição. As obras utilizadas nos testes iniciais foram compostas para violino solo por grandes compositores clássicos a fim de tentar garantir que a sequência de notas de cada obra sirva para criar um bom modelo para predição de outras obras, permita a avaliação das variações do método utilizado. A avaliação parte da análise das linhas melódicas de obras com base no ritmo e na melodia extraídos de arquivos no formato MIDI. A partir dos resultados dos testes iniciais, as melhores variáveis são utilizadas em um teste com um banco de dados maior a fim de submeter o método a uma análise mais apurada.

3.2.1 Definição da Análise Musical com o PPM

No contexto deste trabalho, a análise da melodia e do ritmo se baseia em conceitos da Teoria Musical para relacionar o PPM com a música. A análise é realizada tanto individualmente, tratando a melodia ou o ritmo, quanto em conjunto, agrupando os resultados de ambos. O fato de trabalhar a melodia juntamente com o ritmo tem uma grande importância baseada em diversos fatores, alguns técnicos e outros fisiológicos como pode ser visto em 2.33, além já ter sido enfatizado o valor representativo de ambos até na filosofia de Aristóteles em III a.C. como pode ser visto a seguir:

Os ritmos e as melodias podem representar a raiva e a doçura, como também a coragem e a temperança, e, igualmente, todas as qualidades contrárias a essas, e das demais qualidades de caráter, sem se distanciarem da realidade desses sentimentos, como sabemos por experiência própria, pois ao ouvirmos tais acordes nossas almas passam por verdadeiras transformações. O hábito de sentir o prazer ou o sofrimento a partir de meras representações é semelhante aos sentimentos experimentados diante das realidades. (ARISTÓTELES, 2010, p. 275).

O tratamento do ritmo e da melodia neste trabalho parte do conceito de a percepção sonora ser sequencial e com atenção para variações. Sendo assim, a melodia é analisada a partir das distâncias entre alturas das notas, propondo a utilização dos contornos melódicos como dados de entrada pelo fato de estes contornos representarem as variações das notas. Neste trabalho, os contornos são representados através da subtração entre a altura de uma nota pela altura de sua antecessora. Este método de tratamento dos contornos se baseia nos métodos aplicadas por Londei et al. (2003) e Cilibrasi et al. (2004..

A altura da nota aqui considerada é sua posição na sequência de notas existentes no sistema de notação musical ocidental temperado, sendo computado o valor inteiro do código MIDI equivalente. Como a sequência de notas é baseada na diferença de semitons, a diferença

entre duas notas consecutivas sempre será de uma unidade de semitom. Caso apareça um C4 seguido de um D4 em uma sequência de notas, a subtração de suas alturas resultará em 2, que seria equivalente à contagem de semitons que separam tais notas, semitons estes que podem ser representados por “C4, C4#” e “C4#, D4”, consecutivamente. Entretanto, se surgir um F5 seguido de um E5 em uma sequência o resultado será -1, pelo fato de haver uma diferença de um semitom entre tais notas e elas aparecerem em ordem descendente.

A aplicação deste método se dá pelo fato que uma mesma melodia é reconhecida pelo ser humano mesmo quando esta é executada em alturas diferentes da original, ou com centro tonal alterado. Sendo assim, a análise do contorno melódico se impõe como mais convincente do que a análise apenas das notas existentes em uma melodia (TIGHE e DOWLING, 1993). A representação do contorno com base nas diferenças entre as alturas das notas é apenas uma proposta, sendo possível tal representação ser realizada de outras maneiras.

O ritmo musical por sua vez apresenta-se como uma forma complexa a ser avaliada. Trabalhos como o de Shmulevich et al. (2001) tratam os diversos problemas encontrados no reconhecimento de padrões rítmicos argumentando que uma implementação bem sucedida de um sistema para tal função deve incorporar informações voltas à percepção, além de critérios de erro. Alguns métodos para o tratamento dos ritmos são citados no trabalho considerando os problemas encontrados. Tais métodos juntos a diversos outros citados em Shmulevich e Povel (1998) somam uma gama de fórmulas complexas que não se aplicam a este trabalho por tratarem de áudio em formato de ondas, todavia, serviram de base para a concepção do método aqui aplicado.

Por partir de uma conjectura perceptual, o ritmo de uma orquestra é baseado em uma divisão inicial do tempo dada pelo maestro. Antes de dar início à execução de uma peça musical o maestro normalmente apresenta uma unidade de tempo demarcando seu o início e fim desta unidade com sua batuta, e os instrumentos iniciam na segunda ou terceira marcação de tempo realizada pelo maestro. Assim se procede toda a execução da peça, de maneira que a duração de cada som baseia-se na unidade de tempo anteriormente apresentada. Esta determinação de unidade de tempo consiste na definição do andamento que será dado ao pulso musical. Este pulso pode ser comparado com a pulsação do coração ou um pulso elétrico.

A partir destas condições, o ritmo é tratado neste trabalho com base nas relações existentes entre as sequências de durações das notas². Os valores a serem considerados são

² Este método foi proposto e aplicado por Antonio Deusany de Carvalho Junior, Carlos Peixoto Manguiera Júnior e Tiago de França Souza em um trabalho prático da disciplina Introdução à Teoria da Informação do período 2009.2 do curso de Bacharelado em Ciência da Computação da Universidade Federal da Paraíba.

dados a partir da razão entre os tempos de duração de uma nota por sua antecessora, ou seja, o valor correspondente a quão maior ou menor é a duração da nota atual em relação à anterior. Desta maneira, se a unidade de tempo utilizada como referencia para a execução de uma obra é diferente em outra obra e em ambas são encontradas sequências de notas mantendo as mesmas proporções de duração, o padrão rítmico será encontrado e determinado como similar, o que leva ao encontro de padrões semelhantes em obras com tempos diferentes em batidas por minuto (beats per minute - bpm).

3.2.2 Exemplo da aplicação do método de tratamento das melodias e ritmos

Com o intuito de exemplificar a aplicação do método descrito, nas Figuras 6 e 7 são apresentadas partes de melodias de obras diferentes onde suas sequências de notas apresentam similaridades na melodia e no ritmo. Estas linhas melódicas fazem parte do conjunto de obras de violino utilizadas neste trabalho e foram compostas por Johann Sebastian Bach durante o período Barroco e para um conjunto de seis trabalhos divididos entre sonatas e partituras para violino solo.

Figura 10. Parte da partitura do primeiro movimento da obra BWV 1002 de Johann Sebastian Bach



Fonte: BACH (2010a).

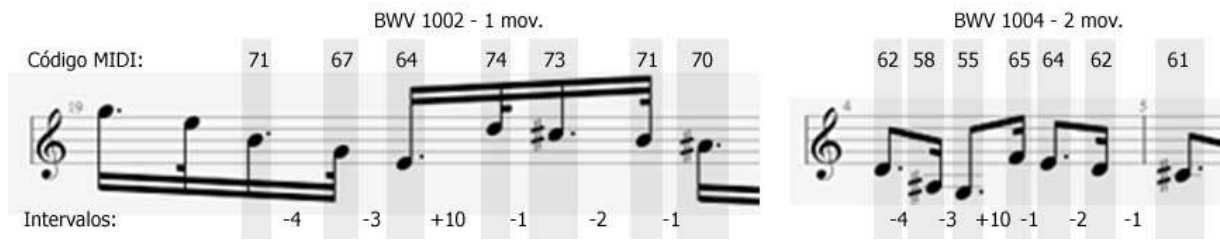
Figura 11. Parte da partitura do segundo movimento da obra BWV 1004 de Johann Sebastian Bach



Fonte: BACH (2010b).

A partir de uma análise sequencial do contorno das melodias, é perceptível reconhecer uma semelhança entre 6 intervalos consecutivos das mesmas, iniciando na terceira nota da Figura 10 e na primeira nota da Figura 11. Considerando apenas as notas, esta sequência melódica citada da Figura 10 é “B4, G4, E4, D5, C5#, B4, A4#”, enquanto que na Figura 11 há a sequência “D4, A3#, G3, F4, E4, D4, C4#”, de maneira que ambas as sequências podem ser representadas como código MIDI seguindo a notação apresentada na Figura 1 como “71, 67, 64, 74, 73, 71, 70” e “62, 58, 55, 65, 64, 62, 61”, respectivamente. As notas apresentadas não se assemelham em sua sequência, todavia os intervalos existentes entre as notas são de igual tamanho e podem ser representados pela sequência “-4, -3, +10, -1, -2, -1” a partir da metodologia adotada neste trabalho. Uma representação comparativa com mais detalhes é exibida na Figura 12.

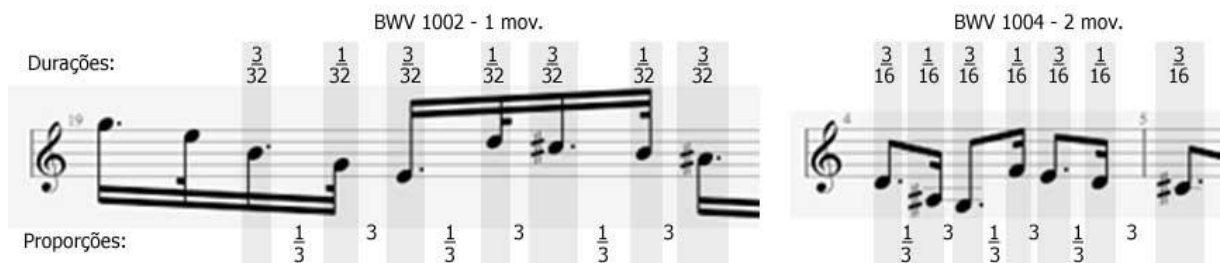
Figura 12. Representação comparativa entre os intervalos melódicos em obras de Bach



Fonte: Autoria própria (2011).

Para a comparação dos ritmos, são apresentadas a seguir as durações de todas as notas exibidas em ambas as sequências utilizando a notação descrita na Figura 2, onde a semibreve equivale a uma unidade e os outros símbolos se apresentam pelas suas proporções em relação à semibreve. Além disso, o conceito de nota pontuada também se apresenta nestas partituras, determinando que a duração da nota aumente em 50% em relação à sua duração original. Na Figura 10, a sequência de durações em relação à unidade de tempo pode ser representada por “ $3/32$, $1/32$, $3/32$, $1/32$, $3/32$, $1/32$, $3/32$, $1/32$, $3/32$, $1/32$, $3/32$, $1/32$, $3/32$, $1/32$, $1/32$, $1/16$ ”, enquanto que a sequência gerada aplicação da metodologia apresentada resulta em “ $1/3$, 3 , $1/3$, 3 , $1/3$, 3 , $1/3$, 3 , $1/3$, 3 , $1/3$, 3 , $1/3$, 1 , 1 , 2 ”. No caso da Figura 11, as durações são “ $3/16$, $1/16$, $3/16$, $1/16$, $3/16$, $1/16$, $3/16$, $1/16$, $3/16$, $1/16$, $3/16$, $1/16$, $3/16$, $1/16$, $3/32$, $3/32$, $1/16$, $3/32$, $3/32$ ” e suas proporções são “ $1/3$, 3 , $1/3$, 3 , $1/3$, 3 , $1/3$, 3 , $1/3$, 3 , $1/3$, 1 , $3/2$, 1 , $2/3$, $3/2$, 1 , $2/3$, $3/2$, 1 ”. A partir deste ponto, tem-se que apesar das durações serem diferentes, há uma constante alternância entre as proporções de $1/3$ e 3 , o que demonstra uma semelhança rítmica entre as obras considerando a metodologia aqui aplicada. Como demonstração, na Figura 13 encontra-se a representação das proporções rítmicas das partes demarcadas na Figura 12.

Figura 13. Representação comparativa entre os intervalos rítmicos em obras de Bach



Fonte: Autoria própria (2011).

Ter certeza sobre as razões pelas quais tais obras são similares requer um estudo avançado sobre a maneira como fora realizada tal composição, o contexto histórico das mesmas, além das experiências musicais tidas pelo compositor antes da concepção destas peças. Sabe-se que Bach pode ter criado estas melodias com tais semelhanças com intenção

de manter um tema melódico em comum entre elas. Este conjunto de obras foi concluído em 20 anos durante um único período literário e as obras foram compostas como movimentos musicais em formato de dança. Existem outros trabalhos de outros compositores do mesmo período semelhantes a estes, além disso, é sabido que outros trabalhos inspiraram Bach durante a composição deste conjunto de obras (LESTER, 1999).

Como a realização da análise conceitual e histórica de muitas obras levaria tempo, é proposta aqui a utilização do PPM com o propósito de tornar prática a avaliação de tais semelhanças. O PPM trabalha com a predição a partir de uma correspondência parcial dos contextos de cada elemento em uma sequência. Sendo assim, a semelhança entre partes de uma sequência implica na correspondência de contextos que podem ser utilizados para a compressão de forma que quão maior for a quantidade de semelhanças, maior será a compressão.

Esta aplicação do PPM junto aos conceitos de Teoria Musical é proposta com o intuito de mostrar o valor de sua utilização como parte de sistemas que necessitem buscar tais características aqui tratadas. Esta prática pode ser futuramente utilizada para reconhecimento de melodias semelhantes ou decorrentes de plágio, reconhecimento de autorias de obras, determinação de estilos musicais a partir do ritmo, criação de obras a partir das características mais relevantes de um compositor, dentre outras maneiras. Para a realização de alguns testes com tal metodologia, um sistema foi desenvolvido para agrupar obras compostas por um mesmo autor e verificar quão eficiente seria a predição utilizando o PPM. Estes testes foram realizados a partir de cinco tipos de avaliações que são descritas a seguir. As avaliações tem o intuito de complementar o método com outras formas de tratamento das obras.

3.2.3 Descrição das avaliações realizadas

A fim de testar mais possibilidades de utilização do PPM na Música, algumas avaliações foram propostas. As avaliações aqui realizadas foram propostas com base nos conceitos da Teoria Musical junto a conceitos da estatística que servem para avaliar a validação cruzada. Cinco modos de avaliação são propostas, no entanto, elas são agrupadas em quatro métodos, pelo fato de o algoritmo da classificação individual por ritmo ou melodia ser o mesmo.

Nestas avaliações, os modelos são criados a partir de arquivos escolhidos para participarem dos testes. Há a necessidade de todos os modelos apresentarem a mesma quantidade de arquivos para que os grupos de teste sejam não apresentem vantagens uns sobre os outros. Outra normalização necessária está relacionada à quantidade de notas de cada obra.

Como cada obra detém de uma quantidade específica de notas, que pode variar entre as obras utilizadas nos testes, também é preciso normalizar verificando qual a menor obra utilizada com o intuito de limitar todas as outras e assim evitar que grupos adquiram quantidades desproporcionais de articulações para serem utilizadas na classificação.

A avaliação dos acertos pelos modelos considera que houve sucesso na classificação de um arquivo quando uma obra retirada de um modelo durante a validação cruzada para criação do grupo de testes é posteriormente comprimida com menor razão de compressão utilizando o modelo do qual ela foi originada. A razão de compressão é calculada neste caso a partir da divisão do tamanho final da obra comprimida utilizando um modelo pela quantidade de notas selecionadas para normalização.

Uma opção a ser utilizada na avaliação é referente à consideração de harmonias e das pausas. Os modelos podem ser criados utilizando apenas as notas da linha melódica e descartar notas que ocorrem ao mesmo tempo de outras, ou converter as harmonias em arpejos quando selecionado para considerar harmonias. Ao considerar as pausas, os intervalos entre duas notas são substituídos por um símbolo referente a este silêncio. Por padrão, as harmonias são removidas e não se consideram as pausas.

Considerando os modos de avaliação, temos que o primeiro modo apresenta duas variações por utilizar a melodia ou o ritmo em cada caso, no entanto, ambos seguem o mesmo algoritmo. Os arquivos são lidos, interpretados e é decidida a criação do modelo PPM utilizando apenas um tipo de dado, sendo este dado relacionado às articulações melódicas ou às proporções rítmicas. Após a criação dos modelos, a validação cruzada é utilizada com estes. Os resultados são dados a partir quantidade de acertos realizada por cada modelo. As classificações do primeiro modo são utilizadas para os próximos modos como base para o algoritmo.

O segundo modo de avaliação realiza a média dos resultados obtidos pela classificação de uma obra utilizando a melodia e o ritmo. O terceiro modo segue o mesmo princípio de média, todavia, neste modo a média é realizada utilizando-se da posição no ranking. No terceiro modo, há a classificação normal por ritmo e melodia separadamente, e apenas os valores das posições no ranking são utilizados para o cálculo da média. Em ambos os modos, os resultados são dados a partir dos acertos após a realização da média.

O quarto modo também parte dos resultados da classificação utilizando ritmo e melodia, no entanto, verifica qual destas classificações obteve maior certeza de acerto. Esta certeza é dada a partir da diferença entre a razão de compressão dos dois primeiros colocados

de ambas as classificações. A classificação que obtiver a maior diferença será considerada como a melhor.

Alguns detalhes gerais da implementação do sistema são descritos na próxima seção. Além disso, a interface desenvolvida será exibida e em seguida será apresentado um comparativo deste sistema com o Sistema de Percepção Auditiva do ser humano.

3.3 Sistema para Análise Musical

O sistema desenvolvido neste trabalho apresenta uma estrutura dividida em pacotes, exibidos na Figura 14. Cada pacote realiza uma interação com o outro de modo que há uma dependência direta entre eles. No entanto, há a possibilidade de separação dos mesmos, permitindo a utilização do sistema em partes. A interface gráfica se encontra em um pacote específico, os elementos utilizados para a classificação estão isolados em outro pacote e o PPM utilizado se encontra também separado, sendo assim, o sistema aceita a utilização posterior de um novo PPM ou de uma nova interface gráfica.

Figura 14. Diagrama de Pacotes do Sistema de Análise Musical

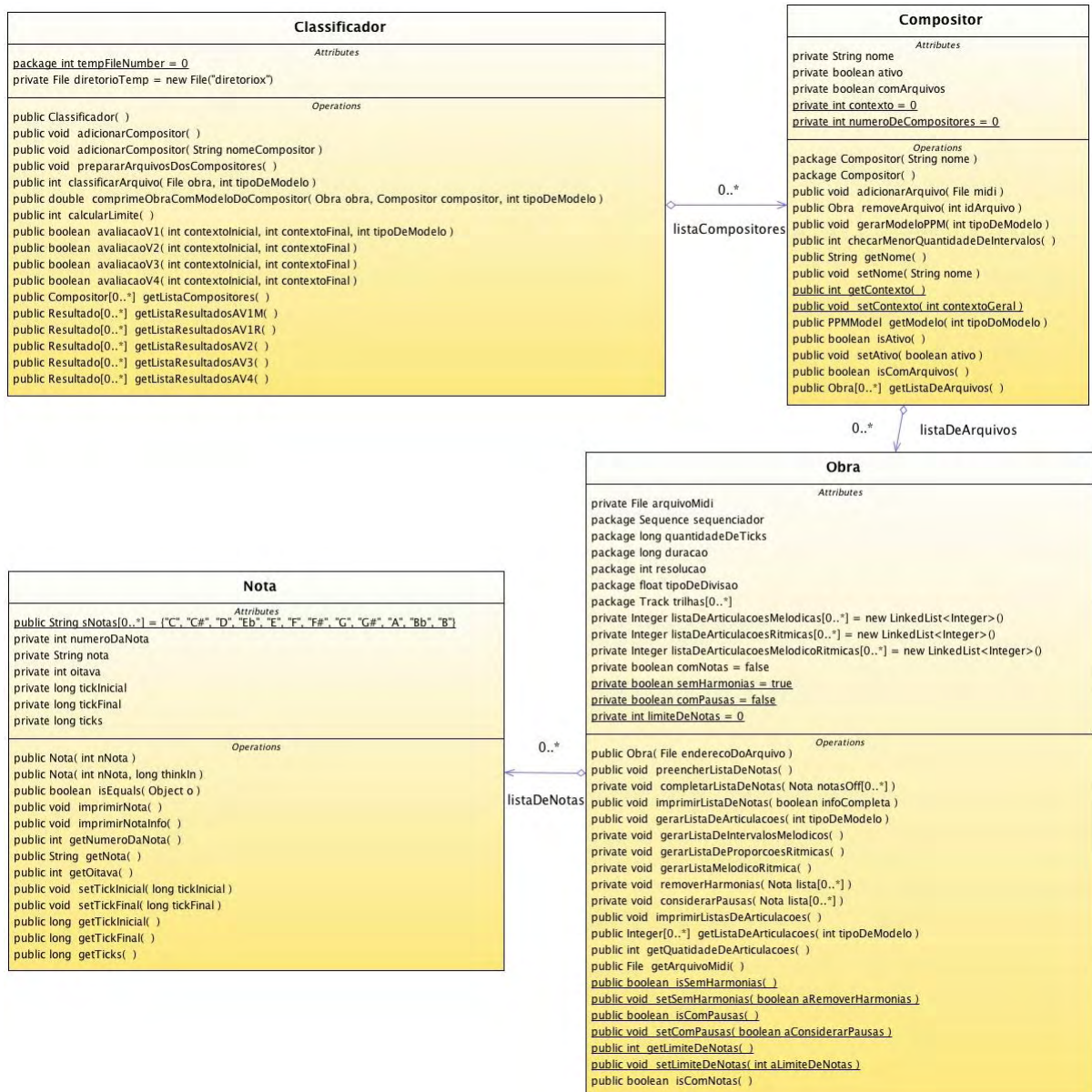


Fonte: Autoria própria (2011).

O “gui” é o pacote no qual se encontra a interface gráfica, através do qual o usuário pode interagir com o sistema. A partir da interface gráfica o usuário pode interagir com todas as funções do sistema que se encontram definidas no pacote definido a seguir. O pacote “classificador” contém as unidades necessárias para realizar: a criação dos modelos; adição, leitura e interpretação de arquivos; execução da validação cruzada; e exportação dos resultados obtidos.

As relações entre as principais classes que compõe o pacote “classificador” se encontram definidas na Figura 15 sendo também apresentadas as relações entre as classes deste pacote, os tipos de dados utilizados e os métodos existentes. Por sua vez, o “ppm” agrupa as funções para a execução do PPM e manipulação de sua estrutura de dados.

Figura 15. Diagrama de Classe do Pacote “Classificador”



Fonte: Autoria própria (2011).

Os detalhes do desenvolvimento do sistema são descritos a seguir. A preparação do sistema para aplicação no evento *Music Information Retrieval Evaluation eXchange* (MIREX) também é apresentada. Além disso, uma breve comparação do sistema de percepção auditiva humano é realizada a fim de dar um sentido mais natural ao que foi desenvolvido.

3.3.1 Detalhes de desenvolvimento

Para o desenvolvimento do sistema utilizou-se a linguagem Java (versão 1.6). Esta linguagem dá suporte ao tratamento de arquivos do tipo “mid” utilizando a Java Sound API. Através desta API é possível realizar a leitura de arquivos e obter informações sobre os eventos registrados nos arquivos e executar o que estiver descrito neles. A Java Sound API é

suportada desde a versão 1.3 do Java e apresenta um aplicativo demo como exemplo de suas funcionalidades disponibilizado junto à documentação em JAVA SOUND DEMO (2010).

O site Java Sound Resources (JSRESOURCES, 2010) serviu de base para o estudo da tecnologia aqui utilizada por se tratar de uma fonte de recursos sobre as possíveis formas de tratamento de sons utilizando a linguagem Java. O site contém diversos códigos de exemplo além de aplicações e uma lista das perguntas mais frequentes sobre o assunto.

O PPM e o Codificador Aritmético utilizados neste trabalho foram desenvolvidos por Bob Carpenter (ARITHMETIC CODING, 2011). A implementação apresenta-se adequada para o tratamento dos dados por armazenar informações utilizando um Byte por código, suficiente para o trabalho por ser possível utilização de até 256 possibilidades de valores. Este PPM apresenta-se também adaptado a um codificador aritmético que codifica a auto-informação de cada símbolo em um arquivo final para fins comparativos em relação à compressão, visto que este arquivo será utilizado na identificação dos melhores modelos a partir do menor tamanho necessário para tal armazenamento.

O sistema desenvolvido permite a adição de arquivos “mid” e criação de modelos com os arquivos. Ao adicionar um arquivo ao sistema é realizada a leitura e interpretação do arquivo. Neste ponto apenas os eventos relacionados ao início e fim de notas são verificados e a partir daí é criada uma lista sequencial com o valor das notas e uma lista com a duração das notas.

Como o PPM utilizado trabalha com o tipo de dado Byte, tem-se que os valores utilizados se encontram entre 0 e 255. Na leitura das notas é realizada a subtração entre a nota e sua antecessora, e o resultado é somado a 127 antes de ser armazenado na lista. Tomando como referência a extensão de notas de um violino, tem-se que ele permite a execução de um total de 51 notas diferentes, o que garante que os resultados podem variar entre -50 e 50, que somados a 127 levam à existência de valores entre 77 e 177 na lista de notas. Isto não impede a utilização de melodias de outros instrumentos, como, por exemplo, o piano que apresenta 88 teclas, o que levaria a uma extensão de valores entre 39 e 215.

A leitura dos tempos de duração teve um tratamento especial pelo fato de os valores serem normalmente fracionários. As razões menores que 1 (um) tem seus valores truncados na segunda casa decimal, sendo este valor multiplicado por -100 e somado a 127. Nos casos em que a razão for maior ou igual a 1 (um), o valor é truncado na primeira casa decimal, multiplicado por 10 e adicionado a 127. A amplitude da faixa de proporções possíveis vai de 0 a 0.99 e 1.0 a 9.9, o que leva a lista de durações a apresentar valores entre 28 e 226.

Há a possibilidade de considerar as pausas existentes entre as notas, atribuindo um símbolo específico quando elas aparecem na sequência de notas, no entanto, por não ser viável utilizar algum valor para sua altura, o valor 255 é armazenado no lugar do valor da articulação. Já na lista de durações das notas, o tempo das pausas é considerado como o tempo de duração de uma nota comum para o cálculo, caso seja solicitado considerar as pausas. Caso se deseje considerar as harmonias, elas serão consideradas como notas em sequência, transformando um acorde em um arpejo. Isto é necessário pelas restrições do PPM utilizado neste trabalho que considera apenas linhas sequenciais.

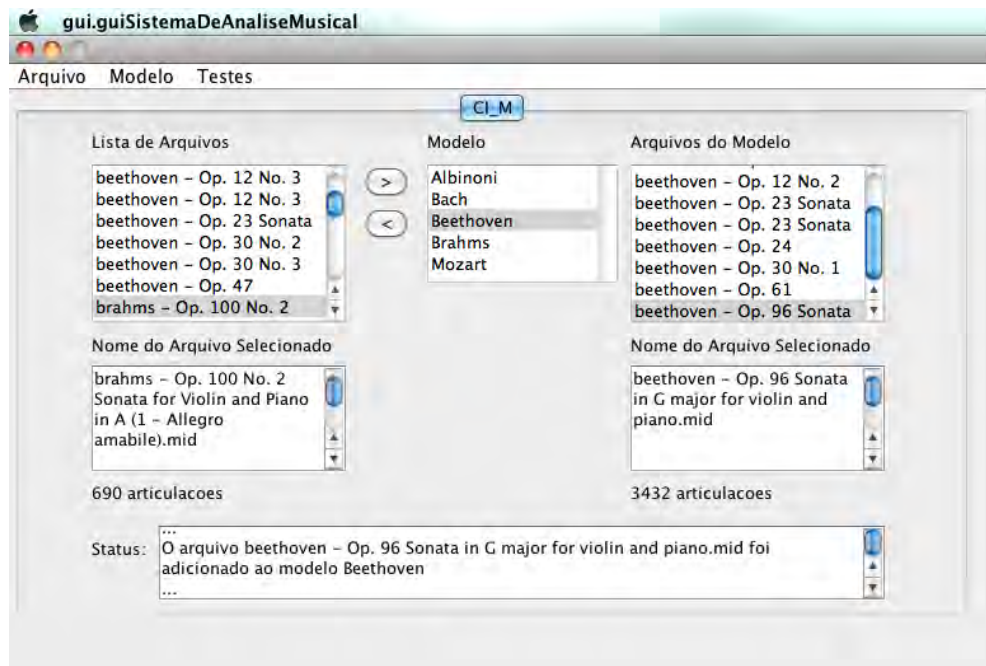
Após a adição de arquivos ao sistema, faz-se necessária a criação dos modelos para uma futura avaliação. A criação de um modelo permite a organização dos arquivos de forma que tais arquivos sejam considerados quando houver a criação da tabela de probabilidades. A tabela de probabilidades neste caso é criada a partir da aplicação do PPM às sequências de notas dos arquivos pertencentes ao modelo.

Após a organização dos modelos com a mesma quantidade de arquivos em cada, torna-se possível a realização da validação cruzada. Antes da realização dos testes ainda é possível escolher os contextos utilizados pelo PPM em cada avaliação e o tipo de avaliação a ser realizado. O resultado da validação cruzada é visualizado em um gráfico de barras com as porcentagens de acertos e pode ser exportado no formato “csv” de forma que pode ser tratado com qualquer programa voltado ao tratamento de tabelas de dados. Os resultados exibem as taxas médias de compressão obtida por cada modelo, contexto aplicado, tipo de classificação, entre outras informações.

3.3.2 Interface para Interação com o Sistema

A interface gráfica do sistema dá acesso às opções necessárias para a criação de modelos e realização de avaliações. A lista de arquivos que fazem parte de cada modelo selecionado é exibida separadamente da lista de todos os arquivos adicionados ao sistema, como pode ser visto na Figura 16. No momento da realização da validação cruzada são considerados apenas os arquivos pertencentes aos modelos criados. Antes da realização da validação cruzada é possível realizar uma checagem em relação à menor quantidade de notas existente nos arquivos selecionados para constituir os modelos.

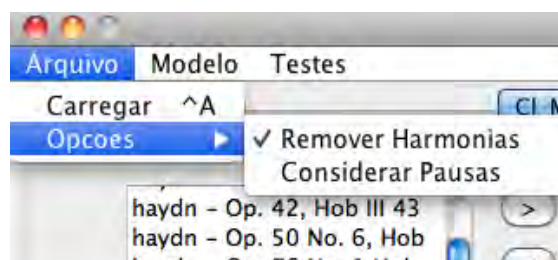
Figura 16. Interface do Sistema de Análise Musical



Fonte: Autoria própria (2011).

As opções dos menus são apresentadas a seguir. O menu “Arquivo” é a opção de entrada de áudio no sistema. Por ele são escolhidos os arquivos que possivelmente são adicionados a modelos e tratados posteriormente. Há também a opção de escolher “Remover Harmonias” e “Considerar Pausas”. Por padrão é considerado que haverá a remoção das harmonias e desconsideração das pausas a fim de analisar apenas a linha melódica contínua. Sua visualização é apresentada na Figura 17.

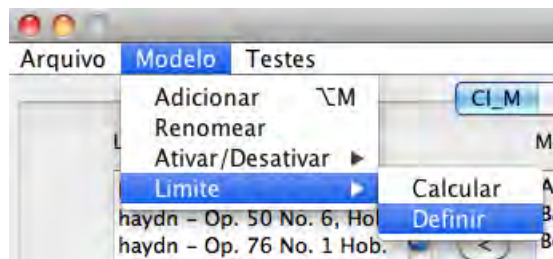
Figura 17. Interface do menu Arquivo



Fonte: Autoria própria (2011).

O menu “Modelo” apresenta opções de adição de modelos, desativação de modelos e cálculo dos limites de notas a serem consideradas pelos modelos na análise. Uma visualização das opções deste menu se encontra na Figura 18 com destaque para a opção de limite. O limite pode ser definido a partir de um valor inteiro ou ser definido após o cálculo do menor número de notas encontrado nos arquivos selecionados para fazerem parte dos modelos.

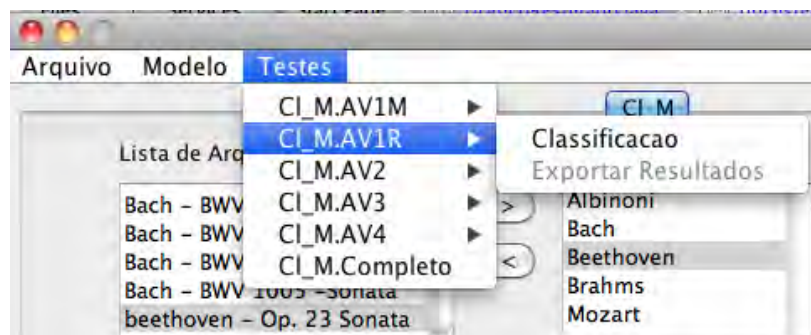
Figura 18. Interface do menu Modelo



Fonte: Autoria própria (2011).

O menu de testes apresenta as diversas opções de avaliações que podem ser realizadas. As opções de avaliação foram nomeadas de acordo com o modo de avaliação, sendo AV1 o primeiro modo e assim sucessivamente. Como o primeiro modo pode variar entre ritmo e melodia, existem as opções AV1M para análise utilizando melodia e AV1R para análise utilizando ritmo. Enquanto a classificação não é realizada, a opção de exportar resultados continuará desativada, como pode ser visto na Figura 19, onde é apresentada a interface do menu “Testes”. A última opção deste menu serve para realizar todos os testes em sequência havendo a necessidade apenas de determinar os contextos iniciais e finais de cada teste, como é necessário para a realização de um dos testes quaisquer.

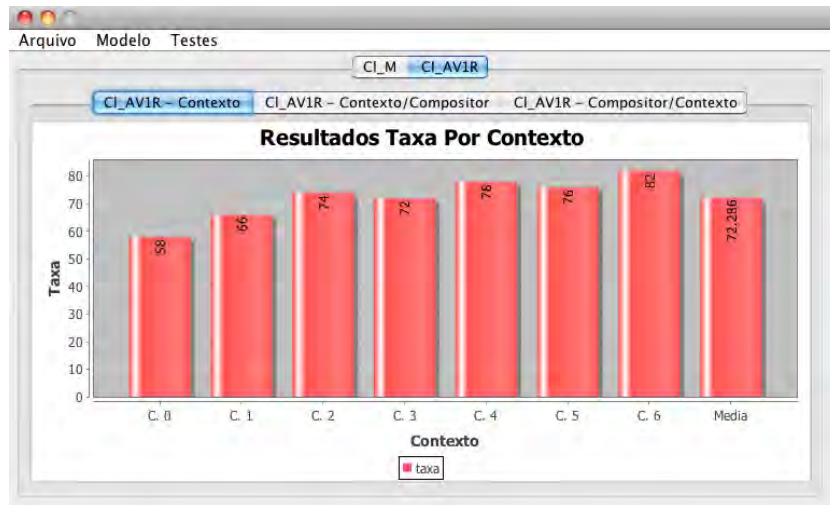
Figura 19. Interface do menu Testes



Fonte: Autoria própria (2011).

Após a realização de uma classificação qualquer, uma nova aba aparece com os gráficos dos resultados obtidos. Nesta aba podem ser vistos os resultados através de perspectivas diferentes. A primeira opção exibida na Figura 20 mostra o resultado médio de acertos em cada contexto aplicado ao PPM. A opção de contexto do PPM limita a quantidade de símbolos que serão considerados como contexto. O contexto zero, por sua vez, não considerará elementos antecessores e irá basicamente contar a quantidade de ocorrências de cada símbolo durante a criação da tabela de predição. A última barra representa a média de acerto geral utilizando os contextos de 0 a 6, no caso da Figura 20.

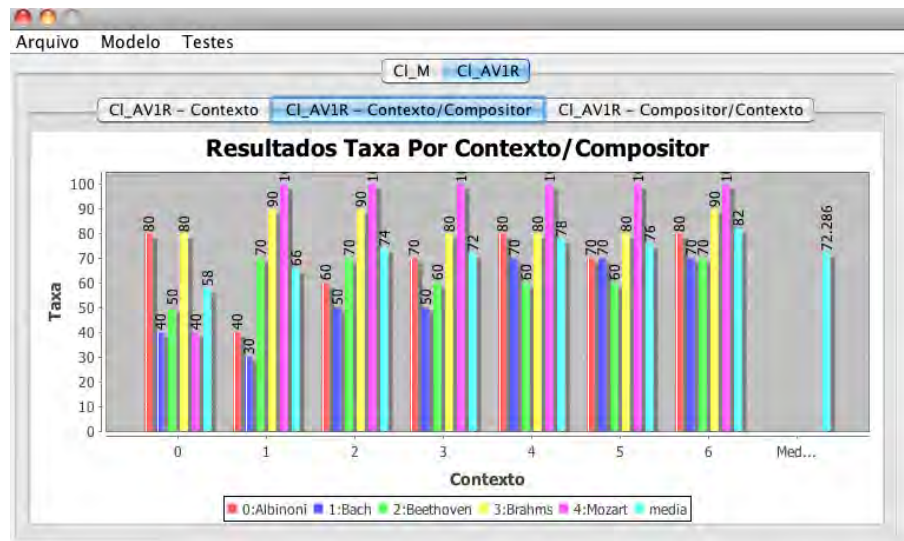
Figura 20. Exemplo de interface dos resultados: Taxa por Contexto



Fonte: Autoria própria (2011).

Outra forma de visualização é apresentada na Figura 21, onde os resultados são agrupados pelos resultados em cada contexto sendo exibida a taxa de acerto de cada compositor. A média de cada contexto é exibida no mesmo grupo do contexto e a média geral é exibida separadamente após os contextos.

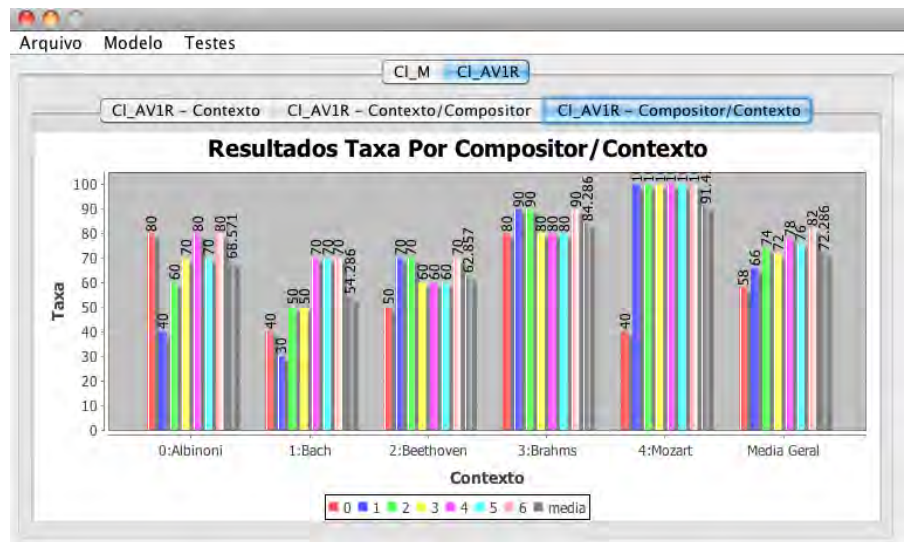
Figura 21. Exemplo de interface dos resultados: Taxa por Contexto/Compositor



Fonte: Autoria própria (2011).

O terceiro tipo de gráfico apresenta os resultados agrupados por compositor e exibindo os resultados dos compositores ordenados por contexto. A média de cada compositor é exibida junto a cada compositor, enquanto que a média de cada contexto e a média geral da classificação é exibida separadamente.

Figura 22. Exemplo de interface dos resultados: Taxa por Compositor/Contexto



Fonte: Autoria própria (2011).

Estes gráficos servem para observar a qualidade dos modelos diante dos contextos testados. As perspectivas diferentes permitem uma análise diferenciada dos resultados de acordo com o que se deseja avaliar. A realização de todos os testes de uma só vez torna-se necessária quando se deseja encontrar as melhores configurações para análise de arquivos selecionados para a criação dos modelos. Os resultados da aplicação sistema serão exibidos no próximo capítulo, no entanto, antes disso haverá um breve comparativo do sistema aqui descrito com os processos relacionados à percepção auditiva.

3.3.3 Comparativo deste sistema com o Sistema de Percepção Auditiva

A proposta do sistema a ser desenvolvido para o tratamento das melodias partiu da junção de conhecimentos de diversas áreas com os conhecimentos sobre o PPM, visualizando assim a possibilidade de seu uso na música. Pesquisas da área de psicologia indicam que músicas são reconhecidas apenas por partes da mesma, seja parte da melodia ou do ritmo, ou a combinação de ambos, sendo possível estabelecer uma relação entre a percepção auditiva e o reconhecimento de padrões (TIGHE e DOWLING, 1993). Este reconhecimento se dá a partir de uma busca no conhecimento prévio armazenado no cérebro, e para se armazenar algo em uma memória de longo prazo há a necessidade de um estímulo forte ou repetitivo (BARKER et al., 1999). Existem também fatores na área da Teoria Musical que estabelecem conceitos que permitem a predição do que pode ocorrer em seguida a certo evento musical, como o conceito de escalas musicais e as noções de harmonias envolvidas nas melodias e nos ritmos (MED, 1996).

Diante dos conceitos de psicologia, neurociência e música, os quais são melhores descritos na seção 2.3.3 referente à percepção do som, tem-se que a aplicação do PPM na análise musical torna-se viável também pelo fato de haver semelhança do método com o sistema de percepção auditiva, o qual também experimenta o reconhecimento de padrões. A percepção auditiva baseia-se em características humanas e também na memória (GOLDSTEIN, 2002). A memória, por sua vez, tem funcionamento complexo que não cabe ao escopo deste trabalho, no entanto, ela é responsável pelo banco de dados cerebral e trabalha a partir das experiências do ser (BARKER et al., 1999), o que permite a comparação com um banco de dados computacional baseado nas experiências de eventos. As experiências voltadas à audição de música podem ser representadas pela audição com atenção total ou parcial à música, sendo este último caso resultante da atenção apenas à melodia, ritmo ou outro componente da música (JOURDAIN, 1998), enquanto as experiências do sistema computacional dependem os arquivos de entrada.

Estes conceitos se assemelham com o sistema desenvolvido a partir do momento em que o sistema realiza a leitura sequencial das notas das melodias e armazena sua frequência de ocorrência com base no algoritmo do PPM que agrupa considerando os contextos. Sequências que se repetem com mais frequência caracterizam padrões que podem ser utilizados para reconhecimento futuro quando algo semelhante a tais sequências é lido. Nestas condições, a leitura de arquivos pelo sistema pode ser comparada com a audição de linhas melódicas pelo sistema auditivo humano. Já o agrupamento realizado pelo PPM se compara em parte com o tratamento dos eventos sonoros pelo cérebro na constituição da memória.

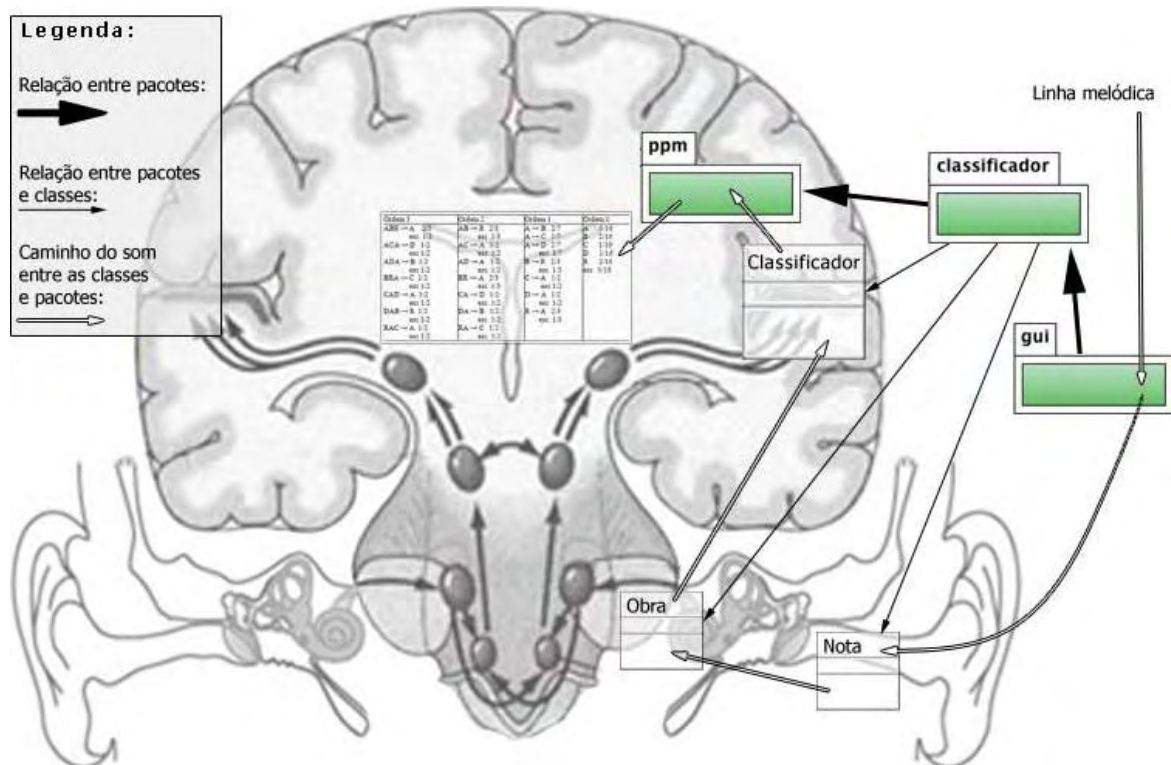
Quando algo novo é ouvido, o conhecimento prévio é utilizado para interpretação, e o que mais houvera se repetido num passado relativamente próximo passa a ser comparado inicialmente com o que inicia o processo de percepção no momento. Da mesma forma age o PPM, que inicia o processo de análise de algo novo a partir dos contextos mais comuns e já existentes na tabela de probabilidades. Os itens da tabela que apresentam probabilidades definidas representam símbolos que já ocorreram no passado e suas probabilidades podem ser comparadas à facilidade com a qual o cérebro tornou tal símbolo uma memória de longo prazo e assim consegue utilizá-lo para comparação com símbolos novos.

A interpretação das melodias para seu armazenamento no cérebro é um assunto que envolve muitas teorias, todavia, alguns experimentos da psicologia afirmam que a melodia não é armazenada diretamente através das frequências, mas sim das relações entre frequências subsequentes (TIGHE e DOWLING, 1993). Este conceito já é utilizado computação como foi visto nos trabalhos correlatos. A atenção cerebral voltada a certo estímulo se relaciona com o

tratamento do ritmo com foco a duração das notas e suas proporções relativas, sendo este o tratamento do ritmo que é analisado neste trabalho.

A Figura 23 exhibe uma comparação entre os sistemas baseando-se no que já fora descrito anteriormente. Seguindo o caminho do som, tem-se que as notas são interpretadas com relação às suas frequências pela cóclea de forma semelhante como o arquivo “mid” é processado na classe “Obra”. O lobo temporal interage com o hipocampo na memorização ou na busca pelos padrões encontrados nas obras escutadas, assim como a classe “Classificador” interage com o pacote “ppm” no intuito de realizar a classificação através da busca por o que é lido através do arquivo “mid”. O tratamento do arquivo “mid” utilizando o PPM em um modelo criado resultará em uma compressão maior deste arquivo quando houver uma maior quantidade de símbolos semelhantes, o que se assemelha com classificação cerebral que será possível quando houver conhecimento prévio armazenado na memória em relação ao que se ouve.

Figura 23. Comparação entre este sistema e o Sistema de Percepção Auditiva



Fonte: Autoria própria (2011, adaptado de GUYTON, 2006, p. 652 e GOLDSTEIN (2002, p. 351)

O fato de o sistema estar do lado esquerdo do cérebro foi intencional pelo fato de haver a análise apenas do ritmo e da melodia, considerando que o córtex secundário direito trata a harmonia musical, tema não tratado neste trabalho. Outro ponto relevante desta comparação está voltado para o fato de esta ideia de correlação com o cérebro passar a ter mais sentido na aplicação que será apresentada na próxima seção onde haverá uma busca de uma obra dentre

muitas outras, algo que normalmente ocorre ao se ouvir uma música qualquer por alguém com muita experiência musical.

3.3.4 Versão do sistema para o MIREX

O MIREX é uma campanha anual de avaliação de algoritmos voltados à recuperação de informações através de músicas que pode ser acessada em MIREX DATA (2010). A sigla MIREX vem do inglês *Music Information Retrieval Evaluation eXchange*, que significa Permuta de Avaliações de Recuperação de Informações em Música. O MIREX ocorre desde 2005 em conjunto com a conferência da Sociedade Internacional para Recuperação de Informações em Músicas - International Society (and Conference) for Music Information Retrieval (ISMIR) – de modo que várias “tarefas” são realizadas permitindo o teste de diversos algoritmos.

Dentre as avaliações do MIREX existe a tarefa voltada à Similaridade de Melodias Simbólicas (Symbolic Melodic Similarity – SMS), onde o objetivo é recuperar os itens mais semelhantes a partir de uma coleção de obras. A tarefa realizada em 2011 compreendeu do teste de seis bases de questionamento compostas por arquivos “mid” monofônicos para serem correlacionadas com um conjunto relativamente grande de arquivos “mid” também monofônicos. As seis bases são formadas por quatro classes de mutações, sendo assim cada base consiste em: o arquivo original; o original com uma nota deletada; o original com uma nota acrescentada; o original com um intervalo ampliado; e o original com um intervalo comprimido.

Nesta avaliação cada sistema deve retornar os 10 itens mais semelhantes a cada item pertencente às bases selecionadas. Isto resulta num total de 30 avaliações por serem 6 bases com 5 arquivos em cada. Para este teste é utilizado um banco de arquivos que fazem parte do banco de dados de códigos associativos e músicas folclóricas Essen (*Essen Associative Code and Folksong Database*) que pode ser encontrado em ESAC-DATA (2010) ou no próprio site do MIREX. Este *corpus* musical apresenta um total de 5223 obras das quais seis são retiradas para compor as bases. A avaliação dos resultados é realizada por pessoas que utilizarão um sistema online para ouvir os arquivos combinados: o arquivo questionado e o arquivo selecionado como semelhante.

Para adaptar o sistema desenvolvido neste trabalho para realizar testes com o banco de dados do MIREX foi necessário realizar alterações em algumas classes. A interface gráfica passou a ser desnecessária pelo fato de o MIREX trabalhar através de linha de comando. A classe “Classificador” passou a considerar apenas um arquivo como formador do modelo,

além de não ser necessário o cálculo de limites de notas nem utilização da validação cruzada. O resultado passou a ser restrito à exibição dos 10 primeiros colocados na avaliação. Alguns testes realizados com esta versão e com a versão completa do sistema são apresentados no capítulo a seguir.

4 Resultados da Análise

A fim de avaliar o método proposto neste trabalho, um teste fora realizado com obras criteriosamente selecionadas. Considerando que alguns compositores fizeram obras especialmente para violinos, buscaram-se conjuntos de obras de violino solo de um mesmo compositor, com o intuito de verificar a existência de semelhanças entre as obras desta categoria. Pelo fato de existirem obras com diferentes quantidades de notas, o procedimento de normalização é realizado utilizando o método de calcular a quantidade de notas máxima em comum entre os arquivos e definir este valor como limite de notas a ser considerado durante a análise.

Os compositores selecionados para a análise foram Albinoni, Bach, Beethoven, Brahms e Mozart. As obras fazem parte de sonatas e concertos para violino, foram obtidas através de sites da internet que disponibilizam reproduções em “mid” das partituras originais de peças clássicas. O principal site utilizado nesta pesquisa para obtenção dos arquivos foi o KUNST DER FUGE (2010), site destinado a armazenar o maior conteúdo de música clássica em formato “mid”, apresentando biografias dos compositores e outras informações importantes para pesquisas na área. A lista de obras utilizadas nestes testes se encontra no APÊNCICE C.

Os arquivos foram tratados de modo manual para que apenas a trilha musical correspondente ao violino fosse analisada pelo programa, tendo em vista que os arquivos “mid” apresentam trilhas separadas para cada instrumento além de outras informações sobre eventos. Alguns arquivos apresentavam vários movimentos juntos sendo necessária uma análise minuciosa dos arquivos utilizando as partituras dos mesmos, realizando a busca pelas partituras a partir do IMSLP (2010), projeto que provê a disponibilização de partituras e arquivos de áudio referentes a uma coleção de obras clássicas separadas por compositor, melodias, instrumentos e gêneros.

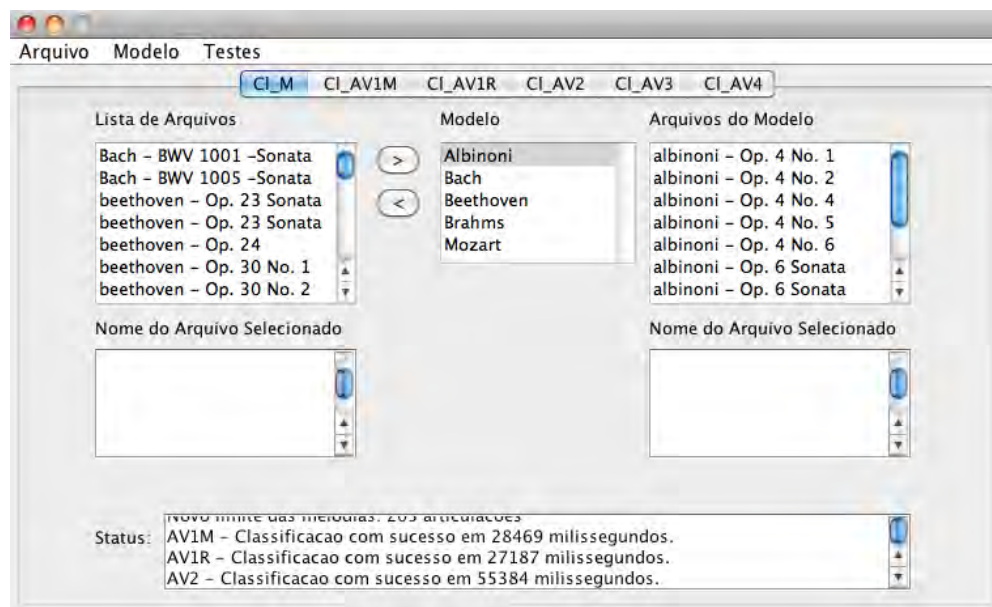
Após a preparação, os arquivos foram adicionados ao sistema para o agrupamento em modelos separando-os por compositor. 10 arquivos foram utilizados por compositor, resultando num total de 50 arquivos. O valor utilizado para a normalização foi de 205 notas, resultando num total de 204 intervalos desconsiderando pausas e harmonias.

A validação cruzada foi realizada criando modelos com contexto de 0 a 6 e realizando todos os modos de avaliações, totalizando um total de 35 testes. Os testes foram realizados utilizando um MacBook Pro com processador 2.4GHz Intel Core 2 Duo, com memória ram de 4 GB 1067MHz DDR3, no sistema operacional Mac OS X Version 10.6.8 e com o mínimo de aplicativos em execução.

4.1 Interfaces dos resultados

A interface do programa após a realização dos testes pode ser vista na Figura 24, onde é possível verificar que as classificações foram realizadas com sucesso, além de exibir a duração da classificação em milissegundos.

Figura 24. Interface do programa após a realização dos testes

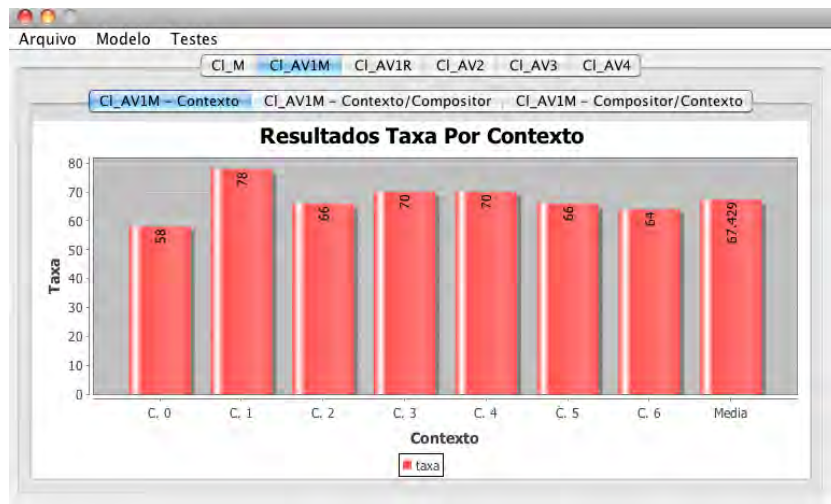


Fonte: Autoria própria (2011)

As abas de resultados seguem a ordem dos testes realizados e, como foram realizados cinco testes, cinco abas foram acrescentadas. Os resultados são apresentados das três formas possíveis dentro de cada aba e alguns detalhes são discutidos na seção a seguir a fim

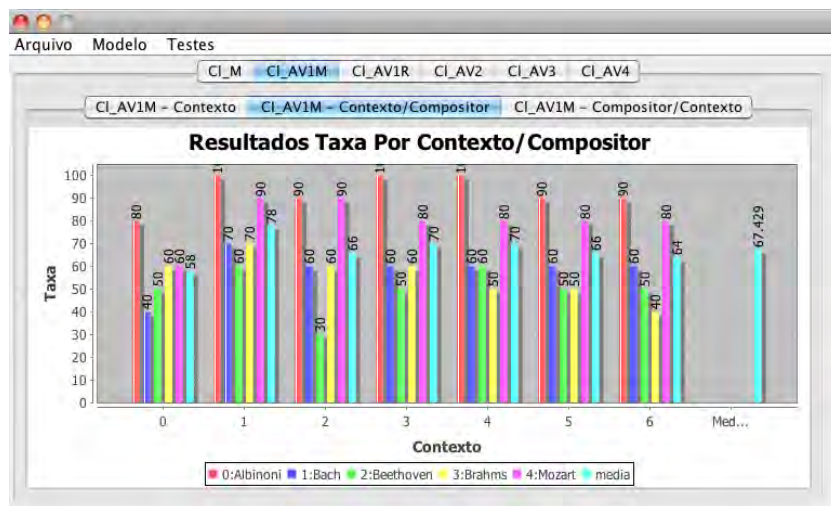
Os resultados da análise no primeiro modo com melodia utilizando contextos de 0 a 6 é exibido nas Figuras 25, 26 e 27. Os resultados da análise no primeiro modo com ritmo utilizando contextos de 0 a 6 é exibido nas Figuras 28, 29 e 30. Os resultados da análise no segundo modo utilizando contextos de 0 a 6 é exibido nas Figuras 31, 32 e 33. Os resultados da análise no terceiro modo utilizando contextos de 0 a 6 é exibido nas Figuras 34, 35 e 36. Os resultados da análise no quarto modo utilizando contextos de 0 a 6 é exibido nas Figuras 37, 38 e 39.

Figura 25. Interface do resultado da análise no primeiro modo com melodia (1)



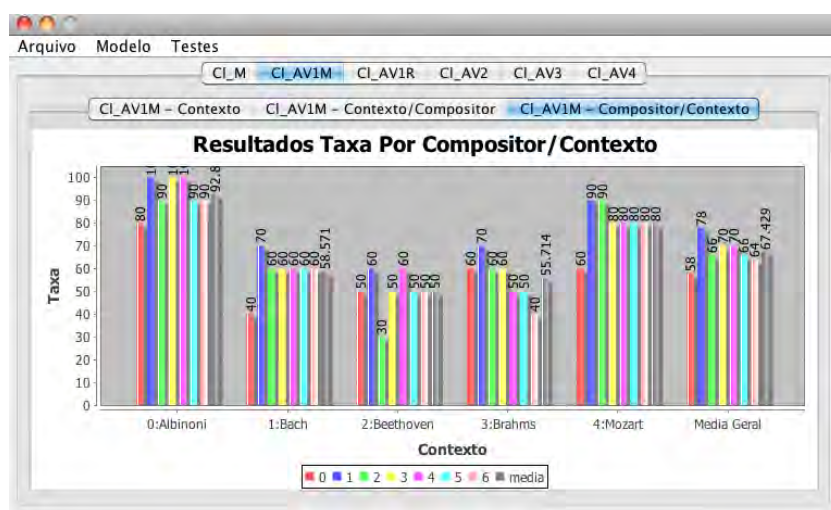
Fonte: Autoria própria (2011)

Figura 26. Interface do resultado da análise no primeiro modo com melodia (2)



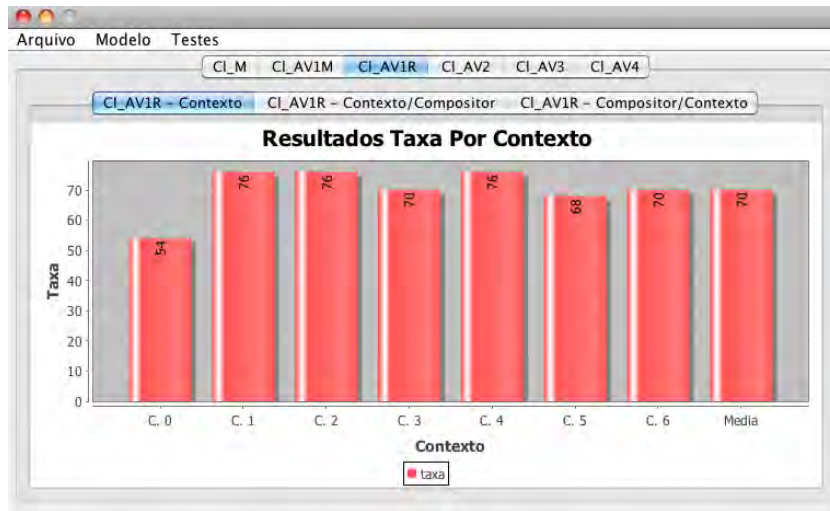
Fonte: Autoria própria (2011)

Figura 27. Interface do resultado da análise no primeiro modo com melodia (3)



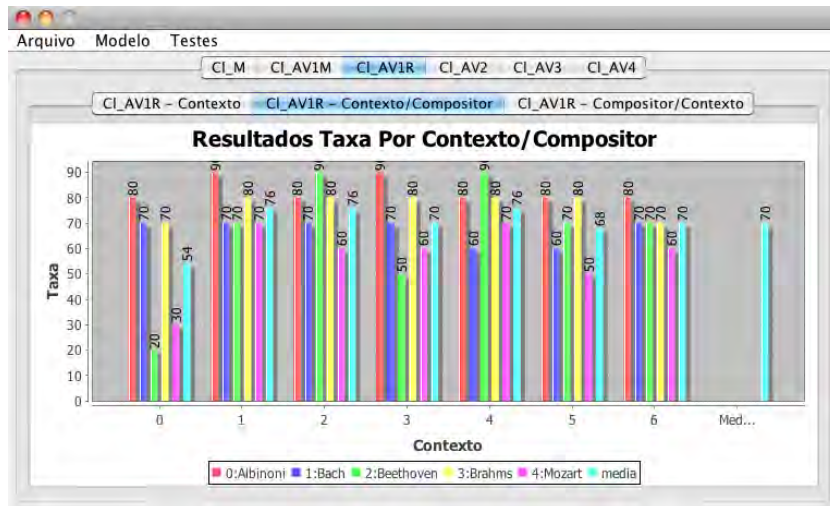
Fonte: Autoria própria (2011)

Figura 28. Interface do resultado da análise no primeiro modo com ritmo (1)



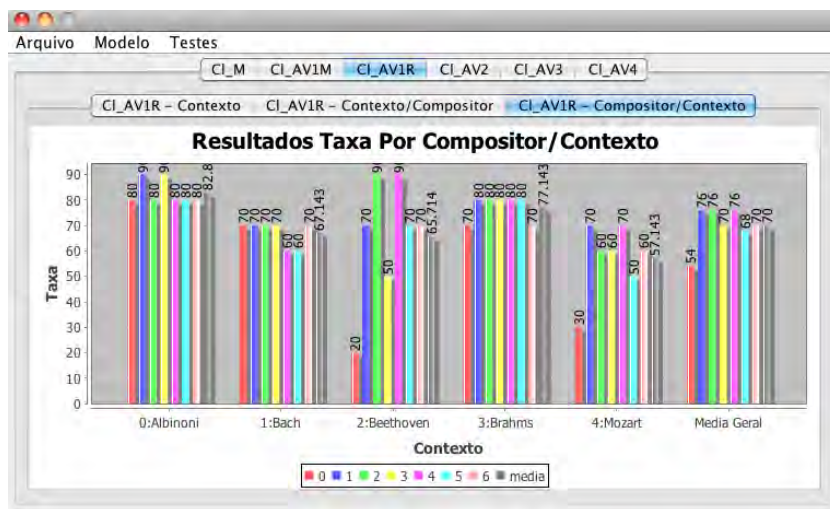
Fonte: Autoria própria (2011)

Figura 29. Interface do resultado da análise no primeiro modo com ritmo (2)



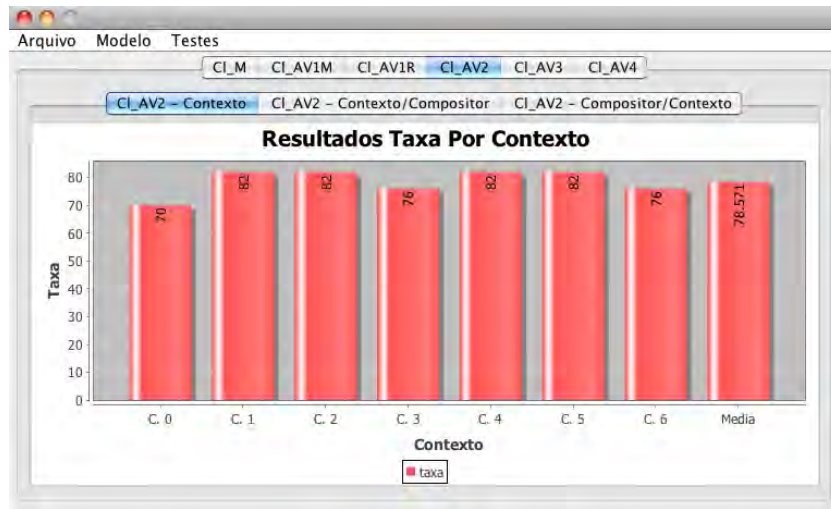
Fonte: Autoria própria (2011)

Figura 30. Interface do resultado da análise no primeiro modo com ritmo (3)



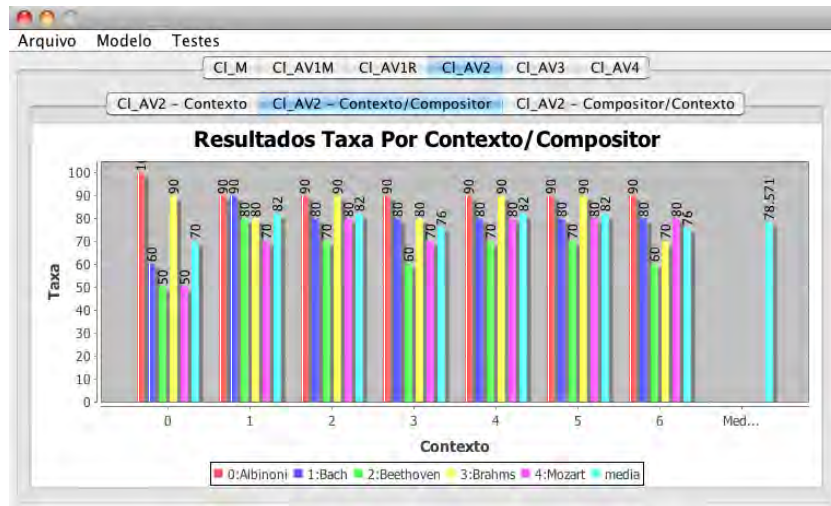
Fonte: Autoria própria (2011)

Figura 31. Interface do resultado na análise no segundo modo (1)



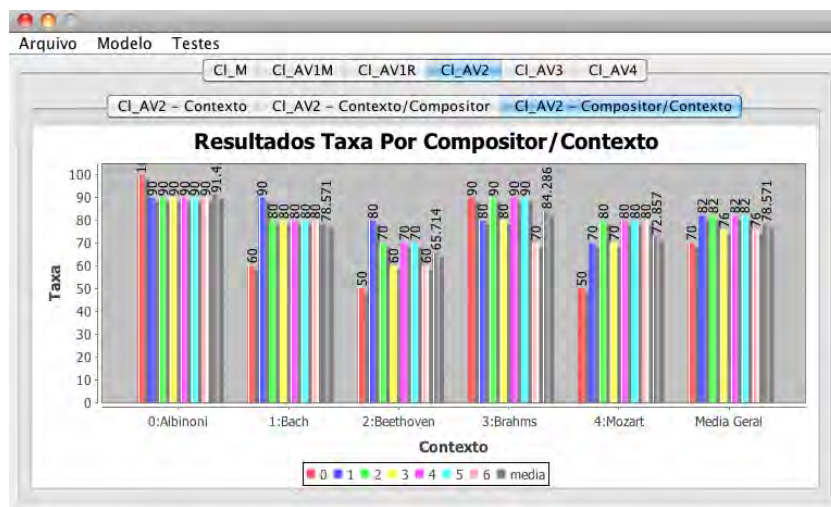
Fonte: Autoria própria (2011)

Figura 32. Interface do resultado da análise no segundo modo (2)



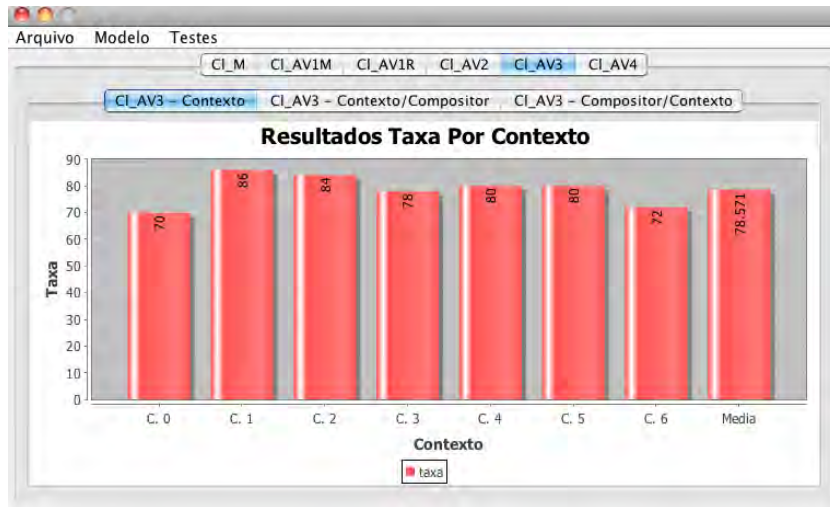
Fonte: Autoria própria (2011)

Figura 33. Interface do resultado da análise no segundo modo (3)



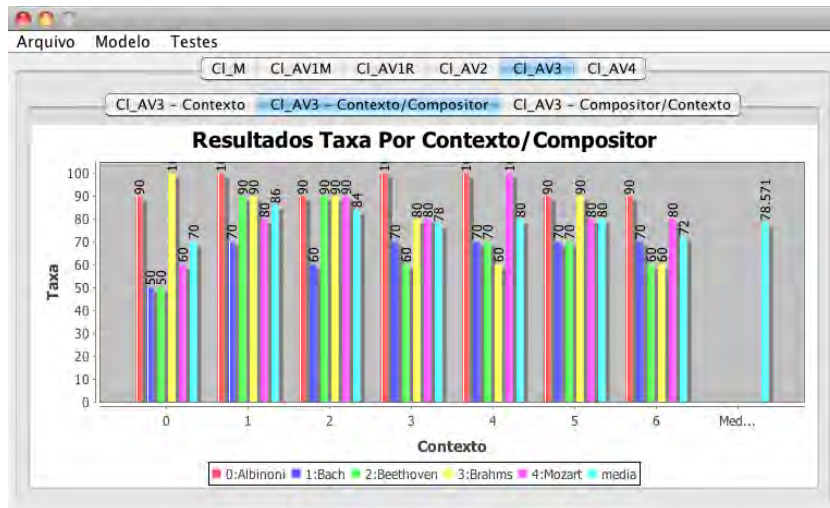
Fonte: Autoria própria (2011)

Figura 34. Interface do resultado da análise no terceiro modo (1)



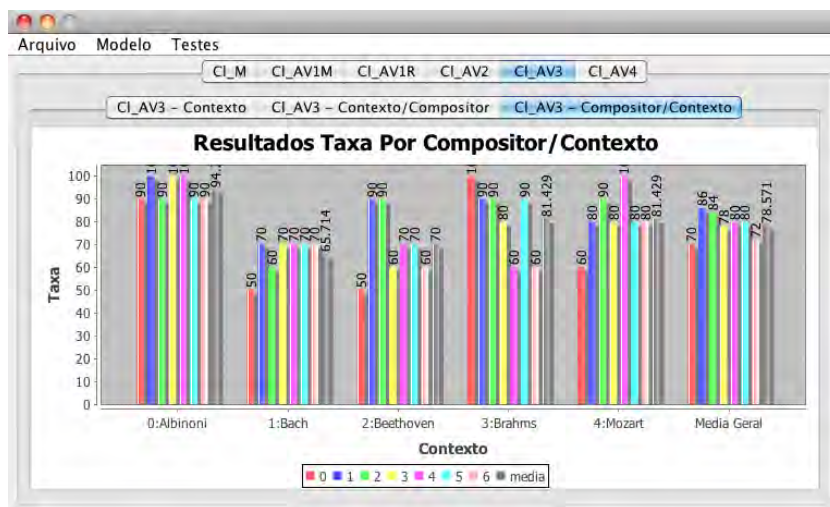
Fonte: Autoria própria (2011)

Figura 35. Interface do resultado da análise no terceiro modo (2)



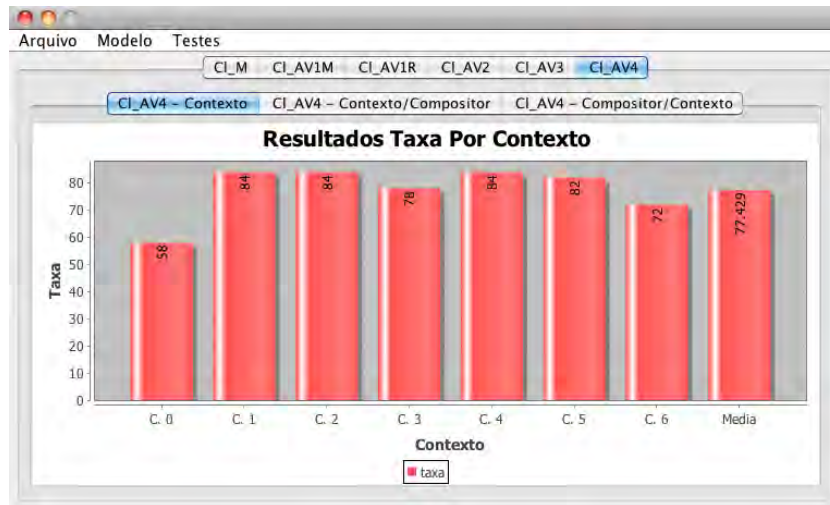
Fonte: Autoria própria (2011)

Figura 36. Interface do resultado da análise no terceiro modo (3)



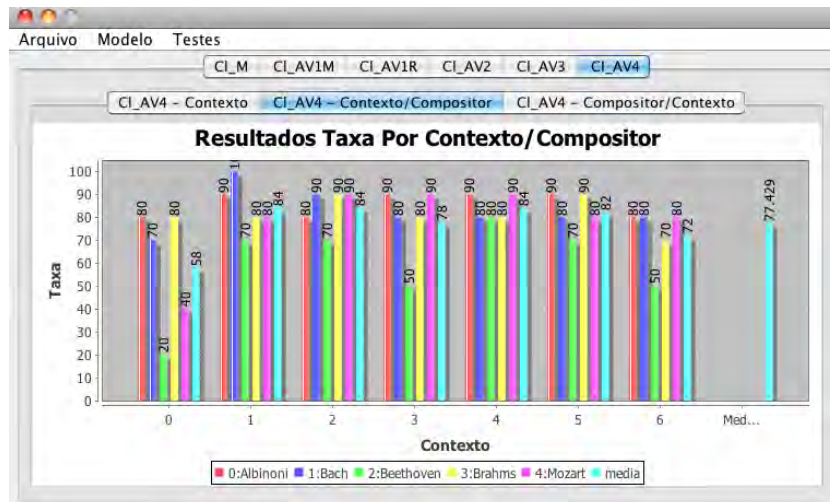
Fonte: Autoria própria (2011)

Figura 37. Interface do resultado da análise no quarto modo (1)



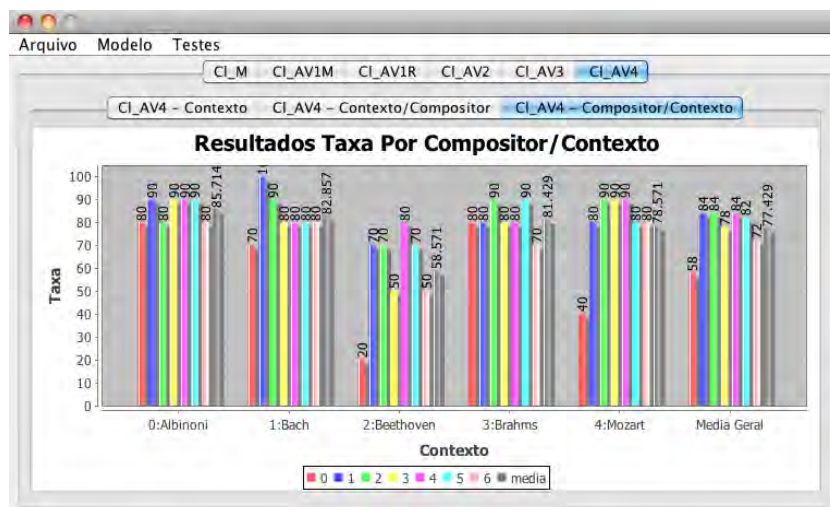
Fonte: Autoria própria (2011)

Figura 38. Interface da análise do resultado no quarto modo (2)



Fonte: Autoria própria (2011)

Figura 39. Interface do resultado da análise no quarto modo (3)



Fonte: Autoria própria (2011)

4.2 Detalhes dos resultados

A Tabela 2 apresenta os resultados dos testes exibindo a porcentagem média de acerto de cada modo de avaliação. As porcentagens são resultantes da média de porcentagem de acerto de cada compositor no contexto em questão.

Tabela 2. Porcentagem de acerto dos modos de avaliação

Modo de avaliação	Porcentagem de acerto médio em cada contexto						
	C.0	C.1	C.2	C.3	C.4	C.5	C.6
AV1M	58%	78%	66%	70%	70%	66%	64%
AV1R	54%	76%	76%	70%	76%	68%	70%
AV2	70%	82%	82%	76%	82%	82%	76%
AV3	70%	86%	84%	78%	80%	80%	72%
AV4	58%	84%	84%	78%	84%	82%	72%

Fonte: Autoria própria (2011).

A duração das classificações de cada modo em todos os contextos, sendo a classificação realizada em um contexto por vez, pode ser vista na Tabela 3. O segundo, terceiro e quarto modos de avaliação apresentam aproximadamente o dobro de duração do primeiro modo por haver necessidade de realizar a classificação completa em melodia e ritmo para finalização do algoritmo.

Tabela 3. Duração dos testes dos modos de avaliação utilizando 7 contextos

Modo de avaliação	Duração da avaliação em 7 contextos
AV1M	28469 ms
AV1R	27187 ms
AV2	55384 ms
AV3	55455 ms
AV4	55381 ms

Fonte: Autoria própria (2011)

A partir destes resultados optou-se por realizar os testes simuladores do MIREX com o modo de avaliação AV3 e com o contexto 1, por ser a maior porcentagem encontrada na Tabela 2. Os arquivos a serem avaliados foram escolhidos aleatoriamente no banco de dados ESAC-DATA (2010). Os arquivos selecionados foram: A0001.mid, A0004C.mid, B0780.mid, E0679G.mid, Q21551.mid, Z1382.mid. Para formar cada uma das seis bases de teste, as alterações foram realizadas na terceira nota de cada arquivo: deletando a terceira

nota, inserindo um dó central como colcheia após a terceira nota (com código 60 em MIDI, referente ao dó central), ampliando a terceira nota para semibreve pontuada e comprimindo para semicolcheia. Os resultados dos testes são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Resultado do teste simulando o MIREX

Obra a ser avaliada	Ranking dos arquivos avaliados									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A0001	A0001	Z0060	A0539C	A0327	A0469	E0879	D0229	B0159	B0095	A0023B
A0001-notadeletada	A0001	Z0060	A0539C	A0327	A0469	B0159	B0095	E0879	A0539B	A0023B
A0001-notainserida	A0001	Z0060	A0327	A0539C	A0469	B0159	B0062	B0095	Z0163	B0263
A0001-notaampliada	A0001	Z0060	A0327	A0469	A0539C	Z0163	B0095	B0159	Q0016A	E0879
A0001-notacomprimida	A0001	Z0060	A0539C	A0327	A0469	E0879	B0095	A0023B	Z0163	B0159
A0004C	A0004C	B0686	Z1035	A0327	Q0072C	E0043D	Z1108	B0092	A0633	F0799
A0004C-notadeletada	A0004C	B0686	Z1035	E0043D	B0092	A0327	Q0072C	F0294	F0510	A0594
A0004C-notainserida	A0004C	Z1035	F0294	E0043D	B0686	A0327	Q0072C	Z1108	B0092	A0594
A0004C-notaampliada	A0004C	B0686	Z1035	A0327	Q0072C	E0043D	Z1108	B0092	A0633	F0799
A0004C-notacomprimida	A0004C	B0686	Z1035	A0327	Q0072C	E0043D	Z1108	B0092	A0633	F0799
B0780	B0780	F0396	B0062	E0548	B0257	Z1217	A0359	Z0192	F0673	B0319
B0780-notadeletada	B0780	B0319	F0396	Z0192	E0548	B0304	B0062	B0209	F0020	F1048
B0780-notainserida	B0780	F0396	B0304	B0031	Z0192	B0319	B0062	F0690	B0582	B0526
B0780-notaampliada	B0780	F0396	B0304	B0031	B0062	B0772	B0319	Z1217	Z1063	F0490
B0780-notacomprimida	B0780	F0396	B0062	B0257	E0548	B0304	A0359	B0031	Z1217	B0319
E0679G	E0679G	Q1062C	E0739D	B0704	E0353C	B0095	F0490	B0321	A0157	Q0155c
E0679G-notadeletada	E0679G	B0704	Q1062C	E0739D	B0321	E0353C	E0334A	B0095	F0490	F0246
E0679G-notainserida	E0679G	E0353C	B0095	Q1062C	F0490	E0739D	B0704	Z1071	F0246	E0382
E0679G-notaampliada	E0679G	B0095	B0704	F0490	E0739D	E0353C	A0398B	F0246	E1353	B0321
E0679G-notacomprimida	E0679G	Q1062C	E0739D	B0704	E0353C	B0095	F0490	B0321	A0157	Q0155c
Q21551	Q21551	A0327	A0251	B0581	A0157	E0716	E0382	Z1055	F0246	E1917
Q21551-notadeletada	Q21551	E0382	A0157	Z1119	A0327	F0580	F0349	F0294	E1542	E1026
Q21551-notainserida	Q21551	B0581	E0355	A0157	E0382	Z0217	F0215	E1339	E1026	E0933
Q21551-notaampliada	Q21551	F1011	Z1022	B0729	A0518	Q1061E	Q0109A	Q0102	Q0089A	K2165
Q21551-notacomprimida	Q21551	A0327	A0251	B0581	A0157	E0716	E0382	B0197	A0519	A0342
Z1382	Z1382	A0258	B0574	B0535	Z1219	E0521	Z1085	E0782C	B0715	Z1047
Z1382-notadeletada	Z1382	A0258	Z1219	B0574	B0715	E0521	D0019	Q0112A	F0395	B0731
Z1382-notainserida	Z1382	A0258	Z1219	B0535	B0574	E0521	B0715	E0782C	B0282	B0731
Z1382-notaampliada	Z1382	Z1047	B0535	F0378	B0574	A0258	Z1219	F0395	B0731	B0094
Z1382-notacomprimida	Z1382	A0258	E0521	B0574	B0535	Z1219	B0731	Z1047	Q0112A	E0782C

Fonte: Autoria própria (2011)

O tempo necessário para a realização total dos 30 testes com as 5223 obras foi de 7,5 minutos. Após a obtenção destes resultados, pessoas são selecionadas para avaliar a semelhança das obras ranqueadas em relação à obra original de cada base, ponderando em três níveis: muito similar, pouco similar, não similar. Este tipo de avaliação não foi realizado no caso deste trabalho. Os resultados apresentados nesta seção junto aos outros conceitos dispostos neste trabalho serão correlacionados no próximo capítulo.

5 Considerações Finais

Após a revisão dos conteúdos aqui aplicados foi possível ter uma ideia de quantas variáveis devem ser consideradas para a análise de uma representação sonora qualquer. O estudo tornou-se cada vez mais complexo com o aprofundamento do conteúdo visando promover uma visão mais próxima da real ou tentando simular as atitudes cerebrais perante a percepção sonora. No entanto, o agrupamento dos conceitos de diversas ciências promoveu uma maior apreensão de características importantes induzindo a uma visão mais clara do que pode ser útil para esta e outras pesquisas.

A pesquisa aqui apresentada propôs uma análise dos padrões musicais existentes em ritmos e melodias considerando um grupo específico de obras voltadas para violino solo com intuito de realizar testes com diferentes modos de avaliação. A partir disto foi possível restringir a análise por se considerar apenas linhas melódicas, além de reduzir os conceitos utilizados durante a análise musical. A sugestão de aplicação do PPM neste âmbito fora deveras criteriosa a fim de garantir a fidelidade das comparações realizadas com os outros trabalhos na área e com os conceitos envolventes. Os resultados obtidos predispõem o uso dos métodos testados em outros trabalhos e propõem novos testes em busca de avanços a partir da utilização de outros conceitos da Teoria Musical.

5.1 Discussão dos Resultados

Os resultados obtidos com o teste partindo de obras de violino mostram taxas de acerto entre 54% e 86%. Essa variação está relacionada às diversas variáveis a serem consideradas neste tipo de avaliação, todavia, mesmo com uma análise restrita apenas às linhas melódicas considerando alguns conceitos de melodia e ritmo, foi possível obter resultados relevantes a partir dos modelos criados. Como a composição musical não se baseia na reprodução de padrões rítmicos e melódicos, a existência dos mesmo de maneira repetitiva não se dá comumente, principalmente pela música ser uma arte que se concebe primordialmente a partir da criatividade. Neste caso, os conceitos que podem ter influenciado nos principais resultados deste trabalho estão voltados para o uso de temas musicais e exercício de estilos musicais.

A análise melódica considerando os compositores resultou na verificação de que alguns apresentaram uma variação melódica vasta que fez com que suas obras não fossem

identificadas claramente através da metodologia utilizada, como foi o caso de Beethoven e Brahms. A análise dos ritmos apresentou certa melhoria em alguns casos, como pode ser visto no capítulo anterior. Alguns compositores apresentaram resultados melhores especificamente em melodia ou em ritmo, porém, os métodos de análise utilizando os resultados da melodia junto ao ritmo demonstraram que esta união teve grande valor para a avaliação, o que pode ser enaltecido a partir do fato de o cérebro tratar a melodia junto ao ritmo em um mesmo local específico.

Dentre todos os testes verificou-se que o melhor resultado foi encontrado na aplicação do terceiro modo com o contexto 1. Isto significa que a melhor predição dentre os modelos criados pelos compositores ocorreu considerando 3 notas, ou seja, um intervalo melódico e rítmico prevendo o próximo. Além disso, verifica-se que neste caso a média de ranking obteve mais sucesso na avaliação.

A aplicação do melhor resultado encontrado na realização do teste simulando o SMS do MIREX também demonstrou bons resultados, tendo em vista que as obras foram identificadas em todos os casos. No entanto, houve variação do ranking quando as obras sofreram alterações, o que só pode ser verificado como bom ou ruim caso realmente haja a validação a partir da inclusão do sistema aqui desenvolvido na avaliação anual do MIREX.

5.2 Propostas para Trabalhos Futuros

A partir dos resultados obtidos, propõe-se algumas alterações no trabalho em busca de melhoramentos. Outros conceitos da Teoria Musical não de ser utilizados nestas análises a fim garantir uma maior proximidade da computação com a música. Dentre os conceitos que podem ser utilizados, é pertinente a presença de conceitos sobre harmonia tendo em vista que ela envolve e dá sentido tanto ao ritmo quanto à melodia.

A possibilidade de tratar o ritmo também pelos pulsos e articulações das notas é algo que merece atenção por ser algo intrínseco à percepção do som tanto em um âmbito musical quanto no cerebral, já que é a partir da forma como as notas soam que elas são interpretadas e transformadas em impulsos elétricos ao serem enviadas pelos neurônios ao cérebro. Se uma nota soa baixo ou alto, com uma intensidade constante ou com uma variação de intensidade, ou de qualquer outra maneira preferível pelo seu interpretador, ela será possivelmente percebida desta maneira, dependendo da experiência musical do ouvinte (JOURDAIN, 1998).

Nem todos os eventos tratados pelo formato MIDI foram considerados neste trabalho, logo, condições de mudança de andamento, intensidade das notas e outros diversos eventos

musicais podem trazer melhores resultados. O fato de o banco de dados de obras de violino ter sido obtido através de sites da internet também oferece uma indagação sobre a validade dos testes, o que pode ser resolvido com a utilização de outros bancos específicos para teste ou da avaliação das obras por músicos certificados para tal.

Na área de Computação Musical existem trabalhos sobre identificação de obras a partir do cantar de partes da obra, trabalhos que realizam a identificação de gêneros musicais a partir de trechos musicais, entre outros tantos que poderiam partir dos métodos aqui avaliados para obtenção de resultados. A sua utilização em sistemas de Inteligência Artificial não deixa de ser viável tendo em vista a semelhança da modelagem realizada com os dados das músicas com o tratamento pelo sistema de percepção musical, além do fato de o algoritmo do PPM ter semelhanças com o tratamento das informações no cérebro humano. De um modo geral, a pesquisa abre diversas possibilidades para a utilização dos métodos aqui descritos, principalmente pelo fato de ter sido concebida com base em conceitos de ciências diferentes.

Referências

ARISTÓTELES. **Política**. Tradução de Pedro Constatins Tolens. 5. ed. São Paulo: Martin Claret, 2010.

ARITHMETIC CODING. **Compression via Arithmetic Coding**. Bob Carpenter. Disponível em: <<http://www.colloquial.com/ArithmeticCoding/>>. Acesso em: 10 jun. 2010.

BARKER, R. A., BARASI, S., NEAL, M. J. **Neuroscience at a Glance**. Blackwell Science, 1999.

BACH, Johann Sebastian. **Violin Partita No. 1 in B minor, BWV 1002**. International Music Score Library Project (IMSLP). Disponível em:
<[http://imslp.org/wiki/Violin_Partita_No.1_in_B_minor,_BWV_1002_\(Bach,_Johann_Sebastian\)](http://imslp.org/wiki/Violin_Partita_No.1_in_B_minor,_BWV_1002_(Bach,_Johann_Sebastian))>. Acesso em: 10 jun. 2010a.

_____. **Violin Partita No. 2 in D minor, BWV 1004**. International Music Score Library Project (IMSLP). Disponível em:
<[http://imslp.org/wiki/Violin_Partita_No.2_in_D_minor,_BWV_1004_\(Bach,_Johann_Sebastian\)](http://imslp.org/wiki/Violin_Partita_No.2_in_D_minor,_BWV_1004_(Bach,_Johann_Sebastian))>. Acesso em: 10 jun. 2010b.

BARBOSA FILHO, J. R. B.; BARUFALDI, B.; SANTANA, E. F.; POEL, J. V. D.;
BATISTA, L. V. **Classificação Automática de Textos por Período Literário Utilizando Compressão de Dados Através do PPM-C**. In: Brazilian Symposium in Information and Human Language Technology, 7., Anais... São Carlos, 2009.

BOOTHROYD, Arthur. **The sense of hearing**. In: Speech, Acoustic and Perception Disorders. Austin: Pro-Ed Studies in Communicative Disorders; Pro-Ed Inc, 1986.

BROWN, Calvin S. **The Relations between Music and Literature as a Field of Study**. In: *Comparative Literature*, Vol. 22, No. 2, p. 97-107, Special Number on Music and Literature. Spring, 1970.

CILIBRASI, Rudi; VITÁNYI, Paul; WOLF, Ronald de. **Algorithmic Clustering of Music Based on String Compression**. In: *Computer Music Journal*, 28:4, p. 49–67, Winter. Massachusetts Institute of Technology, 2004.

CLEARY, J. G.; WITTEN, I. H. **Data Compression Using Adaptive Coding and Partial String Matching**. In: *IEEE Transactions on Communications*, COM-32(4), p.396–402, April. 1984.

CULLE, E. A.; COAKLEY, J. D.; LOWY, K.; GROSS, N. **A revised frequency-map of the guinea-pig cochlea**. *American Journal of Psychology*, 56, p. 475-500. 1943.

DANNENBERG, Roger B; HU, Ning.; **Discovery Techniques for Music Audio**. In: ISMIR 2002. Conference Proceedings: Third International Conference on Music Information Retrieval, M. Fingerhut, ed., p. 63-70, Paris: IRCAM, 2002.

ESAC-DATA. **Essen Associative Code and Folksong Database**. Disponível em: <<http://www.esac-data.org/>>. Acesso em: 10 jun. 2010.

GOLDSTEIN, E. Bruce. **Sensation and Perception**. 6th ed. Wadsworth, 2002.

GUYTON, Arthur C. **Textbook of Medical Physiology**. 11th ed. Elsevier, 2006.

HONÓRIO, T. C. S.; DUARTE, R. C. M.; NOBRE NETO, F. D.; ALMEIDA, T. P.; BATISTA, L. V. **Classificação de Texturas Usando PPM**. In: Reunião Anual da SBPC, Belém. Anais/Resumos da 59a Reunião Anual da SBPC: publicação eletrônica. 2007.

IMSLP. **International Music Score Library Project**. Disponível em: <<http://imslp.org/>>. Acesso em: 10 jun. 2010.

JAVA SOUND DEMO. **Java Sound API: Java Sound Demo**. Oracle Technology Network - Java. Disponível em: <<http://www.oracle.com/technetwork/java/index-139508.html>>. Acesso em: 10 jun. 2010.

JOURDAIN, Robert. **Música, Cérebro e Êxtase - Como a música captura nossa imaginação**. Ojetiva, 1998.

JSRESOURCES. **Java Sound Resources**. Disponível em: <<http://www.jsresources.org/>>. Acesso em: 10 jun. 2010.

KIEFER, Bruno. **Elementos da Linguagem Musical**. Porto Alegre, RS, Brasil. Editora Movimento, 1979.

KUNST DER FUGE. **The largest classical music resource in .mid files**. Disponível em: <www.kunstderfuge.com>. Acesso em: 10 jun. 2010.

LARTILLOT, O.; DUBNOV, S.; ASSAYAG, G.; BEJERANO, G. **Automatic modelling of musical style**. In: Proceedings of the 2001 International Computer Music Conference, p. 447-454, San Francisco: ICMA, 2001.

LARUE, Jan. **Significant and Coincidental Resemblance between Classical Themes**. In: Journal of the American Musicological Society. Vol. 14, No. 2, p. 224-234, Summer. 1961.

LESTER, Joel. **Bach's works for solo violin: style, structure, performance**. Oxford University Press, 1999.

LONDEI, Alessandro; LORETO, Vittorio; BELARDINELLI, Marta Olivetti. **Musical Style and Authorship Categorization by Informative Compressors**. In: Proceedings of the 5th Triennial ESCOM Conference, p. 200-203. 2003.

MARQUES, J. R. T.; POEL, J. V. D.; BATISTA, L. V.; GUILHERME C. G.

Mammographic Image Noisy Bit Planes Identification and Removal Using a Binary PPM Algorithm and an Open Source Architecture. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica, Salvador - BA. Anais do XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica – CBEB. 2008.

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

MIREX HOME. **Music Information Retrieval Evaluation eXchange (MIREX).** Disponível em: <http://www.music-ir.org/mirex/wiki/MIREX_HOME>. Acesso em: 10 jun. 2010.

MOFFAT, A. **Implementing the PPM data compression scheme.** In: IEEE Transactions on Communications, 38(11), p. 1917–1921. 1990.

MOORE, A.W.; LEE, M.S. **Efficient algorithms for minimizing cross validation error.** In: Proceedings 11th International Conference on Machine Learning, p. 190-198, New Brunswick, New Jersey. Morgan Kaufmann. 1994.

MORIN, E. **Os sete saberes necessários à educação do futuro.** Tradução de Catarina Eleonora F. da Silva e Jeanne Sawaya. 2. ed. São Paulo: UNESCO/Cortez Editora, 2000.

PEARCE, Marcus; WIGGINS, Geraint. **An empirical comparison of the performance of PPM variants on a prediction task with with monophonic music.** In: Artificial Intelligence and Creativity in Arts and Science Symposium, AISB. 2003.

POZZOLI, Ettore. **Guia Teórico-Prático para o ensino do ditado musical – I e II Partes.** São Paulo, SP, Brasil. Ricordi Brasileira S/A, 1983.

SALOMON, David; MOTTA, Giovanni. **Handbook of Data Compression.** 5. ed. Springer, 2009.

SANDYS, William; ANDREW, Simon. **History of the Violin.** Dover Publications, 2006.

SHANNON, C.E. **A Mathematical Theory of Communication**. In: The Bell System Technical Journal, Vol. 27, p. 379–423, 623–656, Julho, Outubro. 1948.

SHMULEVICH, Ilya; POVEL, Dick-Jan. “ **Rhythm Complexity Measures for Music Pattern Recognition**. In: IEEE Second Workshop on Multimedia Signal Processing, p. 167-172. 1998.

SHMULEVICH, Ilya; YLI-HARJA, Olli; COYLE, Edward; POVEL, Dirk-Jan; LEMSTRÖM, Kjell. **Perceptual Issues in Music Pattern Recognition: Complexity of Rhythm and Key Finding**. In: Computers and the Humanities, 35, p. 23–35. Springer. 2001.

SILVA, Daniela Regina da. **Psicologia da Educação e Aprendizagem**. Indaial: Ed. ASSEVI, 2007.

SILVA, Francisco Manuel da. **Hino Nacional Brasileiro**. Acervo Digital da Fundação Biblioteca Nacional do Brasil, 1953. Disponível em:
<http://objdigital.bn.br/acervo_digital/div_musica/mas198391/mas198391.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2011.

STRADIVARIUS VIOLIN. **Stradivarius violin sold for £9.8m at charity auction**. BBC News – Entertainment & Arts, 2011. Disponível em:
<<http://www.bbc.co.uk/news/entertainment-arts-13852872>>. Acesso em: 21 jun. 2011.

SUYOTO, Iman S. H.; UITDENBOGERD, Alexandra L.; SCHOLER, Falk. **Effective Retrieval of Polyphonic Audio with Polyphonic Symbolic Queries**. In: Proceedings of Multimedia Information Retrieval, p. 105-114. MIR. 2007.

TIGHE, Thomas J.; DOWLING, W. Jay. **Psychology and music: The understanding of melody and rhythm**. Lawrence Erlbaum Associates, Publishers. New Jersey: Hillsdale, 1993.

WITTEN, I. H.; NEAL, R. M.; CLEARY, J. G. **Arithmetic Coding for Data Compression**. In: Journal of the ACM, v. 30, n. 6. 1987

APÊNDICE A – Aplicação do PPM para preparação de um modelo

Exemplo de aplicação do PPM com ordem 3 utilizando o alfabeto $A:\{A, B, C, D, R\}$ e criando o modelo a partir da entrada "ABRACADABRA"

Ordem 3	Ordem 2	Ordem 1	Ordem 0	Ordem -1
				A B C D R

Entrada: ABRACADABRA
Contexto: - - -

Ordem 3	Ordem 2	Ordem 1	Ordem 0	Ordem -1
			<u>A 1</u> esc 1	B C D R

Entrada: ABRACADABRA
Contexto: - - A

Ordem 3	Ordem 2	Ordem 1	Ordem 0	Ordem -1
		<u>A → B 1</u> esc 1	A 1 <u>B 1</u> esc 2	C D R

Entrada: ABRACADABRA
Contexto: - A B

Ordem 3	Ordem 2	Ordem 1	Ordem 0	Ordem -1
	<u>AB → R 1</u> esc 1	A → B 1 esc 1 <u>B → R 1</u> esc 1	A 1 B 1 <u>R 1</u> esc 3	C D

Entrada: ABRACADABRA
Contexto: A B R

Ordem 3	Ordem 2	Ordem 1	Ordem 0	Ordem -1
<u>ABR</u> → A 1 <u>esc 1</u>	AB → R 1 <u>esc 1</u> <u>BR</u> → A 1 <u>esc 1</u>	A → B 1 <u>esc 1</u> B → R 1 <u>esc 1</u> <u>R</u> → A 1 <u>esc 1</u>	<u>A</u> 2 B 1 R 1 <u>esc 3</u>	C D

Entrada: ABRACADABRA
Contexto: B R A

Ordem 3	Ordem 2	Ordem 1	Ordem 0	Ordem -1
ABR → A 1 <u>esc 1</u> <u>BRA</u> → C 1 <u>esc 1</u>	AB → R 1 <u>esc 1</u> BR → A 1 <u>esc 1</u> <u>RA</u> → C 1 <u>esc 1</u>	A → B 1 <u>A</u> → C 1 <u>esc 2</u> B → R 1 <u>esc 1</u> R → A 1 <u>esc 1</u>	A 2 B 1 <u>C</u> 1 R 1 <u>esc 4</u>	D

Entrada: ABRACADABRA
Contexto: R A C

Ordem 3	Ordem 2	Ordem 1	Ordem 0	Ordem -1
ABR → A 1 <u>esc 1</u> BRA → C 1 <u>esc 1</u> <u>RAC</u> → A 1 <u>esc 1</u>	AB → R 1 <u>esc 1</u> <u>AC</u> → A 1 <u>esc 1</u> BR → A 1 <u>esc 1</u> RA → C 1 <u>esc 1</u>	A → B 1 A → C 1 <u>esc 2</u> B → R 1 <u>esc 1</u> <u>C</u> → A 1 <u>esc 1</u> R → A 1 <u>esc 1</u>	<u>A</u> 3 B 1 C 1 R 1 <u>esc 4</u>	D

Entrada: ABRACADABRA
Contexto: A C A

Ordem 3	Ordem 2	Ordem 1	Ordem 0	Ordem -1
ABR → A 1 <u>esc 1</u> <u>ACA</u> → D 1 <u>esc 1</u> BRA → C 1 <u>esc 1</u> RAC → A 1 <u>esc 1</u>	AB → R 1 <u>esc 1</u> AC → A 1 <u>esc 1</u> BR → A 1 <u>esc 1</u> <u>CA</u> → D 1 <u>esc 1</u> RA → C 1 <u>esc 1</u>	A → B 1 A → C 1 <u>A</u> → D 1 <u>esc 3</u> B → R 2 <u>esc 1</u> C → A 1 <u>esc 1</u> R → A 1 <u>esc 1</u>	A 3 B 1 C 1 <u>D</u> 1 R 1 <u>esc 5</u>	

Entrada: ABRACADABRA
Contexto: C A D

Ordem 3	Ordem 2	Ordem 1	Ordem 0	Ordem -1
ABR → A 1 esc 1 ACA → D 1 esc 1 BRA → C 1 esc 1 <u>CAD → A 1</u> esc 1 RAC → A 1 esc 1	AB → R 1 esc 1 AC → A 1 esc 1 <u>AD → A 1</u> esc 1 BR → A 1 esc 1 CA → D 1 esc 1 RA → C 1 esc 1	A → B 1 A → C 1 A → D 1 esc 3 B → R 1 esc 1 C → A 1 esc 1 <u>D → A 1</u> esc 1 R → A 1 esc 1	<u>A 4</u> B 1 C 1 D 1 R 1 esc 5	

Entrada: ABRACADABRA

Contexto: A D A

Ordem 3	Ordem 2	Ordem 1	Ordem 0	Ordem -1
ABR → A 1 esc 1 ACA → D 1 esc 1 <u>ADA → B 1</u> esc 1 BRA → C 1 esc 1 CAD → A 1 esc 1 RAC → A 1 esc 1	AB → R 1 esc 1 AC → A 1 esc 1 AD → A 1 esc 1 BR → A 1 esc 1 CA → D 1 esc 1 <u>DA → B 1</u> esc 1 RA → C 1 esc 1	<u>A → B 2</u> A → C 1 A → D 1 esc 3 B → R 1 esc 1 C → A 1 esc 1 D → A 1 esc 1 R → A 1 esc 1	A 4 <u>B 2</u> C 1 D 1 R 1 esc 5	

Entrada: ABRACADABRA

Contexto: D A B

Ordem 3	Ordem 2	Ordem 1	Ordem 0	Ordem -1
ABR → A 1 esc 1 ACA → D 1 esc 1 ADA → B 1 esc 1 BRA → C 1 esc 1 CAD → A 1 esc 1 <u>DAB → R 1</u> esc 1 RAC → A 1 esc 1	<u>AB → R 2</u> esc 1 AC → A 1 esc 1 AD → A 1 esc 1 BR → A 1 esc 1 CA → D 1 esc 1 DA → B 1 esc 1 RA → C 1 esc 1	A → B 2 A → C 1 A → D 1 esc 3 <u>B → R 2</u> esc 1 C → A 1 esc 1 D → A 1 esc 1 R → A 1 esc 1	A 4 B 2 C 1 D 1 <u>R 2</u> esc 5	

Entrada: ABRACADABRA

Contexto: A B R

Ordem 3	Ordem 2	Ordem 1	Ordem 0	Ordem -1
<u>ABR</u> → A 2 esc 1	AB → R 2 esc 1	A → B 2 A → C 1 A → D 1 esc 3	<u>A</u> 5 B 2 C 1 D 1 R 2 esc 5	
ACA → D 1 esc 1	AC → A 1 esc 1	B → R 2 esc 1		
ADA → B 1 esc 1	AD → A 1 esc 1	C → A 1 esc 1		
BRA → C 1 esc 1	<u>BR</u> → A 2 esc 1	D → A 1 esc 1		
CAD → A 1 esc 1	CA → D 1 esc 1	<u>R</u> → A 2 esc 1		
DAB → R 1 esc 1	DA → B 1 esc 1			
RAC → A 1 esc 1	RA → C 1 esc 1			

Tabela resultante com as probabilidades de ocorrência de cada símbolo:

Ordem 3	Ordem 2	Ordem 1	Ordem 0
ABR → A 2/3 esc 1/3	AB → R 2/3 esc 1/3	A → B 2/7 A → C 1/7 A → D 1/7 esc 3/7	A 5/16 B 2/16 C 1/16 D 1/16 R 2/16 esc 5/16
ACA → D 1/2 esc 1/2	AC → A 1/2 esc 1/2	B → R 2/3 esc 1/3	
ADA → B 1/2 esc 1/2	AD → A 1/2 esc 1/2	C → A 1/2 esc 1/2	
BRA → C 1/2 esc 1/2	BR → A 2/3 esc 1/3	D → A 1/2 esc 1/2	
CAD → A 1/2 esc 1/2	CA → D 1/2 esc 1/2	R → A 2/3 esc 1/3	
DAB → R 1/2 esc 1/2	DA → B 1/2 esc 1/2		
RAC → A 1/2 esc 1/2	RA → C 1/2 esc 1/2		

APÊNDICE B – Compressão de entrada utilizando um modelo com PPM

Utilização da tabela de probabilidades criada a partir de "ABRACADABRA" para comprimir a entrada "DACAR"

Tabela base:

Ordem 3	Ordem 2	Ordem 1	Ordem 0
ABR → A 2/3 esc 1/3	AB → R 2/3 esc 1/3	A → B 2/7	A 5/16
ACA → D 1/2 esc 1/2	AC → A 1/2 esc 1/2	A → C 1/7	B 2/16
ADA → B 1/2 esc 1/2	AD → A 1/2 esc 1/2	A → D 1/7 esc 3/7	C 1/16
BRA → C 1/2 esc 1/2	BR → A 2/3 esc 1/3	B → R 2/3 esc 1/3	D 1/16
CAD → A 1/2 esc 1/2	CA → D 1/2 esc 1/2	C → A 1/2 esc 1/2	R 2/16
DAB → R 1/2 esc 1/2	DA → B 1/2 esc 1/2	D → A 1/2 esc 1/2	esc 5/16
RAC → A 1/2 esc 1/2	RA → C 1/2 esc 1/2	R → A 2/3 esc 1/3	

Entrada: DACAR

Contexto: - - -

Saída: $-\log_2(1/16)$

Tabela atualizada:

Ordem 3	Ordem 2	Ordem 1	Ordem 0
ABR → A 2/3 esc 1/3	AB → R 2/3 esc 1/3	A → B 2/7	A 5/17
ACA → D 1/2 esc 1/2	AC → A 1/2 esc 1/2	A → C 1/7	B 2/17
ADA → B 1/2 esc 1/2	AD → A 1/2 esc 1/2	A → D 1/7 esc 3/7	C 1/17
BRA → C 1/2 esc 1/2	BR → A 2/3 esc 1/3	B → R 2/3 esc 1/3	D 2/17
CAD → A 1/2 esc 1/2	CA → D 1/2 esc 1/2	C → A 1/2 esc 1/2	R 2/17
DAB → R 1/2 esc 1/2	DA → B 1/2 esc 1/2	D → A 1/2 esc 1/2	esc 5/17
RAC → A 1/2 esc 1/2	RA → C 1/2 esc 1/2	R → A 2/3 esc 1/3	

Entrada: DACAR

Contexto: - - D

Saída: $-\log_2(1/2)$

Tabela atualizada:

Ordem 3	Ordem 2	Ordem 1	Ordem 0
ABR → A 2/3 esc 1/3	AB → R 2/3 esc 1/3	A → B 2/7 A → C 1/7	A 5/17 B 2/17
ACA → D 1/2 esc 1/2	AC → A 1/2 esc 1/2	A → D 1/7 esc 3/7	C 1/17 D 2/17
ADA → B 1/2 esc 1/2	AD → A 1/2 esc 1/2	B → R 2/3 esc 1/3	R 2/17 esc 5/17
BRA → C 1/2 esc 1/2	BR → A 2/3 esc 1/3	C → A 1/2 esc 1/2	
CAD → A 1/2 esc 1/2	CA → D 1/2 esc 1/2	D → A 2/3 esc 1/3	
DAB → R 1/2 esc 1/2	DA → B 1/2 esc 1/2	R → A 2/3 esc 1/3	
RAC → A 1/2 esc 1/2	RA → C 1/2 esc 1/2		

Entrada: DACAR

Contexto: - D A

Saída: $-\log_2(1/2) -\log_2(1/7)$

Tabela atualizada:

Ordem 3	Ordem 2	Ordem 1	Ordem 0
ABR → A 2/3 esc 1/3	AB → R 2/3 esc 1/3	A → B $\frac{2}{8}$ A → C $\frac{2}{8}$	A 5/17 B 2/17
ACA → D 1/2 esc 1/2	AC → A 1/2 esc 1/2	A → D $\frac{1}{8}$ esc $\frac{3}{8}$	C 1/17 D 2/17
ADA → B 1/2 esc 1/2	AD → A 1/2 esc 1/2	B → R 2/3 esc 1/3	R 2/17 esc 5/17
BRA → C 1/2 esc 1/2	BR → A 2/3 esc 1/3	C → A 1/2 esc 1/2	
CAD → A 1/2 esc 1/2	CA → D 1/2 esc 1/2	D → A 2/3 esc 1/3	
DAB → R 1/2 esc 1/2	DA → B $\frac{1}{4}$ DA → C $\frac{1}{4}$	R → A 2/3 esc 1/3	
RAC → A 1/2 esc 1/2	esc $\frac{2}{4}$ RA → C 1/2 esc 1/2		

Entrada: DACAR

Contexto: D A C

Saída: $-\log_2(1/2)$

Tabela atualizada:

Ordem 3	Ordem 2	Ordem 1	Ordem 0
ABR → A 2/3 esc 1/3	AB → R 2/3 esc 1/3	A → B 2/8	A 5/17
ACA → D 1/2 esc 1/2	AC → A 2/3 esc 1/3	A → C 2/8	B 2/17
ADA → B 1/2 esc 1/2	AD → A 1/2 esc 1/2	A → D 1/8 esc 3/8	C 1/17
BRA → C 1/2 esc 1/2	BR → A 2/3 esc 1/3	B → R 2/3 esc 1/3	D 2/17
CAD → A 1/2 esc 1/2	CA → D 1/2 esc 1/2	C → A 1/2 esc 1/2	R 2/17
DAB → R 1/2 esc 1/2	DA → B 1/4 DA → C 1/4 esc 2/4	D → A 2/3 esc 1/3	esc 5/17
DAC → A 1/2 esc 1/2	RA → C 1/2 esc 1/2	R → A 2/3 esc 1/3	
RAC → A 1/2 esc 1/2			

Entrada: DACAR

Contexto: A C A

Saída: $-\log_2(1/2)$

Tabela atualizada:

Ordem 3	Ordem 2	Ordem 1	Ordem 0
ABR → A 2/3 esc 1/3	AB → R 2/3 esc 1/3	A → B 2/8	A 5/17
ACA → D 2/3 esc 1/3	AC → A 2/3 esc 1/3	A → C 2/8	B 2/17
ADA → B 1/2 esc 1/2	AD → A 1/2 esc 1/2	A → D 1/8 esc 3/8	C 1/17
BRA → C 1/2 esc 1/2	BR → A 2/3 esc 1/3	B → R 2/3 esc 1/3	D 2/17
CAD → A 1/2 esc 1/2	CA → D 1/2 esc 1/2	C → A 1/2 esc 1/2	R 2/17
DAB → R 1/2 esc 1/2	DA → B 1/4 DA → C 1/4 esc 2/4	D → A 2/3 esc 1/3	esc 5/17
DAC → A 1/2 esc 1/2	RA → C 1/2 esc 1/2	R → A 2/3 esc 1/3	
RAC → A 1/2 esc 1/2			

Saídas:

$$[-\log_2(1/16)] + [-\log_2(1/2)] + [-\log_2(1/2)] + [-\log_2(1/7)] + [-\log_2(1/2)] + [-\log_2(1/2)] =$$

$$4 + 1 + 1 + 2,807 + 1 + 1 =$$

10,807 bits

Utilização da tabela de probabilidades criada a partir de "ABRACADABRA" para comprimir a entrada "ABBAD"

Tabela base:

Ordem 3	Ordem 2	Ordem 1	Ordem 0
ABR → A 2/3 esc 1/3	AB → R 2/3 esc 1/3	A → B 2/7 A → C 1/7	A 5/16 B 2/16
ACA → D 1/2 esc 1/2	AC → A 1/2 esc 1/2	A → D 1/7 esc 3/7	C 1/16 D 1/16
ADA → B 1/2 esc 1/2	AD → A 1/2 esc 1/2	B → R 2/3 esc 1/3	R 2/16 esc 5/16
BRA → C 1/2 esc 1/2	BR → A 2/3 esc 1/3	C → A 1/2 esc 1/2	
CAD → A 1/2 esc 1/2	CA → D 1/2 esc 1/2	D → A 1/2 esc 1/2	
DAB → R 1/2 esc 1/2	DA → B 1/2 esc 1/2	R → A 2/3 esc 1/3	
RAC → A 1/2 esc 1/2	RA → C 1/2 esc 1/2		

Entrada: ABBAD

Contexto: - - -

Saída: $-\log_2(5/16)$

Tabela atualizada:

Ordem 3	Ordem 2	Ordem 1	Ordem 0
ABR → A 2/3 esc 1/3	AB → R 2/3 esc 1/3	A → B 2/7 A → C 1/7	A <u>6/17</u> B <u>2/17</u>
ACA → D 1/2 esc 1/2	AC → A 1/2 esc 1/2	A → D 1/7 esc 3/7	C <u>1/17</u> D <u>1/17</u>
ADA → B 1/2 esc 1/2	AD → A 1/2 esc 1/2	B → R 2/3 esc 1/3	R <u>2/17</u> esc <u>5/17</u>
BRA → C 1/2 esc 1/2	BR → A 2/3 esc 1/3	C → A 1/2 esc 1/2	
CAD → A 1/2 esc 1/2	CA → D 1/2 esc 1/2	D → A 1/2 esc 1/2	
DAB → R 1/2 esc 1/2	DA → B 1/2 esc 1/2	R → A 2/3 esc 1/3	
RAC → A 1/2 esc 1/2	RA → C 1/2 esc 1/2		

Entrada: ABBAD

Contexto: - - A

Saída: $-\log_2(2/7)$

Tabela atualizada:

Ordem 3	Ordem 2	Ordem 1	Ordem 0
ABR → A 2/3 esc 1/3	AB → R 2/3 esc 1/3	A → B 3/8	A 6/17
ACA → D 1/2 esc 1/2	AC → A 1/2 esc 1/2	A → C 1/8	B 2/17
ADA → B 1/2 esc 1/2	AD → A 1/2 esc 1/2	A → D 1/8 esc 3/8	C 1/17
BRA → C 1/2 esc 1/2	BR → A 2/3 esc 1/3	B → R 2/3 esc 1/3	D 1/17
CAD → A 1/2 esc 1/2	CA → D 1/2 esc 1/2	C → A 1/2 esc 1/2	R 2/17
DAB → R 1/2 esc 1/2	DA → B 1/2 esc 1/2	D → A 1/2 esc 1/2	esc 5/17
RAC → A 1/2 esc 1/2	RA → C 1/2 esc 1/2	R → A 2/3 esc 1/3	

Entrada: ABBAD

Contexto: - A B

Saída: $-\log_2(1/3) - \log_2(1/3) - \log_2(2/17)$

Tabela atualizada:

Ordem 3	Ordem 2	Ordem 1	Ordem 0
ABR → A 2/3 esc 1/3	AB → R 2/4 AB → B 1/4 esc 2/4	A → B 3/8	A 6/18
ACA → D 1/2 esc 1/2	AC → A 1/2 esc 1/2	A → C 1/8	B 3/18
ADA → B 1/2 esc 1/2	AD → A 1/2 esc 1/2	A → D 1/8 esc 3/8	C 1/18
BRA → C 1/2 esc 1/2	BR → A 2/3 esc 1/3	B → B 1/5	D 1/18
CAD → A 1/2 esc 1/2	CA → D 1/2 esc 1/2	B → R 2/5 esc 2/5	R 2/18
DAB → R 1/2 esc 1/2	DA → B 1/2 esc 1/2	C → A 1/2 esc 1/2	esc 5/18
RAC → A 1/2 esc 1/2	RA → C 1/2 esc 1/2	D → A 1/2 esc 1/2	
		R → A 2/3 esc 1/3	

Entrada: ABBAD

Contexto: A B B

Saída: $-\log_2(6/18)$

Tabela atualizada:

Ordem 3	Ordem 2	Ordem 1	Ordem 0
ABB → A 1/2 esc 1/2	AB → R 2/4	A → B 3/8	A 6/19
ABR → A 2/3 esc 1/3	AB → B 1/4 esc 2/4	A → C 1/8	B 3/19
ACA → D 1/2 esc 1/2	AC → A 1/2 esc 1/2	A → D 1/8 esc 3/8	C 1/19
ADA → B 1/2 esc 1/2	AD → A 1/2 esc 1/2	B → A 1/7	D 1/19
BRA → C 1/2 esc 1/2	BB → A 1/2 esc 1/2	B → B 1/7	R 2/19
CAD → A 1/2 esc 1/2	BR → A 2/3 esc 1/3	B → R 2/7 esc 3/7	esc 5/19
DAB → R 1/2 esc 1/2	CA → D 1/2 esc 1/2	C → A 1/2 esc 1/2	
RAC → A 1/2 esc 1/2	DA → B 1/2 esc 1/2	D → A 1/2 esc 1/2	
	RA → C 1/2 esc 1/2	R → A 2/3 esc 1/3	

Entrada: ABBAD

Contexto: B B A

Saída: -log₂(1/8)

Tabela atualizada:

Ordem 3	Ordem 2	Ordem 1	Ordem 0
ABB → A 1/2 esc 1/2	AB → R 2/4	A → B 3/9	A 6/19
ABR → A 2/3 esc 1/3	AB → B 1/4 esc 2/4	A → C 1/9	B 3/19
ACA → D 1/2 esc 1/2	AC → A 1/2 esc 1/2	A → D 2/9	C 1/19
ADA → B 1/2 esc 1/2	AD → A 1/2 esc 1/2	esc 3/9	D 1/19
BBA → D 1/2 esc 1/2	BA → D 1/2 esc 1/2	B → A 1/7	R 2/19
BRA → C 1/2 esc 1/2	BB → A 1/2 esc 1/2	B → B 1/7	esc 5/19
CAD → A 1/2 esc 1/2	BR → A 2/3 esc 1/3	B → R 2/7 esc 3/7	
DAB → R 1/2 esc 1/2	CA → D 1/2 esc 1/2	C → A 1/2 esc 1/2	
RAC → A 1/2 esc 1/2	DA → B 1/2 esc 1/2	D → A 1/2 esc 1/2	
	RA → C 1/2 esc 1/2	R → A 2/3 esc 1/3	

Saídas:

$$[-\log_2(5/6)] + [-\log_2(2/7)] + [-\log_2(1/3) - \log_2(1/3) - \log_2(2/17)] + [-\log_2(6/18)] + [-\log_2(1/8)] =$$

$$0,263 + 1,807 + 6,257 + 1,584 + 3 =$$

$$12,911 \text{ bits}$$

APÊNDICE C – Lista de obras utilizadas

Obras de Violino Solo

Obras de Albinoni:

- Op. 4 No. 1 Sonata da Chiesa
- Op. 4 No. 2 Sonata da Chiesa
- Op. 4 No. 4 Sonata da Chiesa
- Op. 4 No. 5 Sonata da Chiesa
- Op. 4 No. 6 Sonata da Chiesa
- Op. 6 Sonata I
- Op. 6 Sonata II
- Op. 6 Sonata III
- Op. 6 Sonata IV
- Op. 6 Sonata V

Obras de Bach:

- BWV 1001 -Sonata No. 1 in G minor (1 mov. - Adagio)
- BWV 1001 -Sonata No. 1 in G minor (2 mov. - Fugue)
- BWV 1001 -Sonata No. 1 in G minor (4 mov. - Presto)
- BWV 1002 -Partita No. 1 in B minor (1 mov. - Allemanda)
- BWV 1002 -Partita No. 1 in B minor (2 mov. - Double)
- BWV 1003 -Sonata No. 2 in A minor (1 mov. - Grave)
- BWV 1003 -Sonata No. 2 in A minor (2 mov. - Fugue)
- BWV 1004 -Partita No. 2 in D minor (1 mov. - Allemande)
- BWV 1004 -Partita No. 2 in D minor (2 mov. - Courante)
- BWV 1005 -Sonata No. 3 in C major (2 mov. - Fugue)

Obras de Beethoven:

- Op. 12 No. 1 Sonata in D major for violin and piano (1 mov. - Allegro con brio)
- Op. 12 No. 1 Sonata in D major for violin and piano (2 mov. - Tema con variazione - Andante con molto)
- Op. 12 No. 1 Sonata in D major for violin and piano (3 mov. - Rondo - Allegro)
- Op. 12 No. 2 Sonata in A major for violin and piano (1 mov. - Allegro vivace)
- Op. 12 No. 2 Sonata in A major for violin and piano (2 mov. - Andante, piu tosto allegretto)
- Op. 12 No. 2 Sonata in A major for violin and piano (3 mov. - Allegro piacevole)
- Op. 12 No. 3 Sonata in E flat major for violin and piano (1 mov. - Allegro con spirito)
- Op. 12 No. 3 Sonata in E flat major for violin and piano (2 mov. - Adagio con molta espressione)
- Op. 12 No. 3 Sonata in E flat major for violin and piano (3 mov. - Rondo - Allegro molto)
- Op. 23 Sonata in A minor for violin and piano (1 mov. - Presto)

Obras de Brahms:

- Op. 100 No. 2 Sonata for Violin and Piano in A (1 mov. - Allegro amabile)
- Op. 100 No. 2 Sonata for Violin and Piano in A (2 mov. - Andante tranquillo - Vivace - Andante - Vivace di piu - Andante vivace)
- Op. 100 No. 2 Sonata for Violin and Piano in A (3 mov. - Allegretto grazioso - Quasi andante)
- Op. 108 No. 3 Sonata for Violin and Piano in D minor (1 mov. - Allegro)
- Op. 108 No. 3 Sonata for Violin and Piano in D minor (2 mov. - Adagio)
- Op. 108 No. 3 Sonata for Violin and Piano in D minor (3 mov. - Un poco presto e con sentimento)
- Op. 108 No. 3 Sonata for Violin and Piano in D minor (4 mov. - presto agitato)
- Op. 78 No. 1 In G Sonata for Violin and Piano (1 mov. - Vivace ma non troppo)
- Op. 78 No. 1 In G Sonata for Violin and Piano (2 mov. - Adagio)
- Op. 78 No. 1 In G Sonata for Violin and Piano (3 mov. - Allegro molto moderato)

Obras de Mozart:

KV 211 (IV 1775) Violin Concerto No. 2 in D major (1 mov. - Moderato assai)
 KV 211 (IV 1775) Violin Concerto No. 2 in D major (2 mov. - Andante)
 KV 211 (IV 1775) Violin Concerto No. 2 in D major (3 mov. - Rondo Allegro)
 KV 216 (IX 1775) Violin Concerto No. 3 in G major (1 mov. - Allegro)
 KV 216 (IX 1775) Violin Concerto No. 3 in G major (2 mov. - Andante)
 KV 216 (IX 1775) Violin Concerto No. 3 in G major (3 mov. - Rondeau Allegro)
 KV 218 (X 1775) Violin Concerto No. 4 in D major (1 mov. - Allegro)
 KV 218 (X 1775) Violin Concerto No. 4 in D major (2 - Andante cantabile)
 KV 218 (X 1775) Violin Concerto No. 4 in D major (3 mov. - Rondeau)
 KV 219 (XII 1775) Violin Concerto No. 5 in A major (1 mov. - Allegro)

Todos os arquivos foram retirados dos sites:

- ❖ <http://www.kunsterfuge.com/> (principal site)
- ❖ http://www.jsbach.net/midi/midi_solo_violin.html (Obras de Bach)
- <http://www.classical.net/>
- <http://www.classicalarchives.com/>
- <http://www.classicalmidiconnection.com/>
- <http://www.midinet.com.br/>
- <http://www.midiworld.com/>
- <http://www.musedata.org/>

As obras do banco de dados ESAC-DATA (2010) podem ser encontradas no próprio site ou através do endereço:

<http://www.ldc.usb.ve/~cgomez/essen.tar.gz>

Os arquivos utilizados neste trabalho, o código fonte e outras informações sobre o projeto podem ser encontradas no endereço:

<http://deusanyjunior.dj/projetos/mestrado>