

# ANÁLISE DINÂMICA DE COMPOSIÇÕES MUSICAIS

António Joel Soares da Rocha



Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Área de Especialização de Telecomunicações

Departamento de Engenharia Electrotécnica

Instituto Superior de Engenharia do Porto

2011



Este relatório satisfaz, parcialmente, os requisitos que constam da Ficha de Disciplina de Tese/Dissertação, do 2º ano, do Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Candidato: António Joel Soares da Rocha, N° 1060369, 1060369@isep.ipp.pt

Orientação científica: José António Tenreiro Machado, jtm@isep.ipp.pt

Cecília Maria do Rio Fernandes Moreira Reis, cmr@isep.ipp.pt



Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Área de Especialização de Telecomunicações

Departamento de Engenharia Electrotécnica

Instituto Superior de Engenharia do Porto

25 de Julho de 2011



## *Agradecimentos*

Em primeiro lugar quero deixar o meu agradecimento aos meus orientadores científicos, Doutor José António Tenreiro Machado e Doutora Cecília Maria do Rio Fernandes Moreira Reis. O meu obrigado pelo apoio, ensinamentos, opiniões e acima de tudo a sempre e enorme disponibilidade em acompanhar o desenvolvimento do trabalho. Uma palavra de muito apreço também aos Professores Hugo Lopes e Rubén Andrade que se mostraram sempre disponíveis e activos na ajuda do desenvolvimento da parte musical do trabalho.

Para finalizar, o óbvio agradecimento aos meus pais que sempre me apoiaram e aos imensos amigos que tudo fizeram para me ajudar em tudo o precisei.



## *Resumo*

A composição musical é um tema de muito interesse para a computação evolucionária dentro da área da inteligência artificial. É uma área que tem sofrido vários desenvolvimentos ao longo dos últimos anos pois o interesse em que hajam computadores que façam obras musicais é deveras aliciante. Este trabalho tem por objectivo realizar mais um passo nesse sentido.

Assim, foi desenvolvida uma aplicação informática que realiza composições musicais de dois géneros distintos: *Músicas Infantis* e *Músicas Blues*. A aplicação foi implementada com recurso aos Algoritmos Genéticos, que são os algoritmos evolucionários mais populares da área da computação evolucionária.

O trabalho foi estruturado em duas fases de desenvolvimento.

Na primeira fase, realizou-se um levantamento estatístico sobre as características específicas de cada um dos géneros musicais. Analisaram-se quinze músicas de cada género musical, com o intuito de se chegar a uma proporção do uso que cada nota tem em cada um dos casos.

Na segunda fase, desenvolveu-se o *software* que compõe as músicas com implementação de um algoritmo genético. Além disso, foi também desenvolvida uma interface gráfica que permite ao utilizador a escolha do género musical que pretende compor. O algoritmo genético começa por gerar uma população inicial de potenciais soluções de acordo com a escolha do utilizador, realizando, de seguida, o ciclo que caracteriza o algoritmo genético. A população inicial é constituída por soluções que seguem as regras que foram implementadas de acordo com os dados recolhidos ao longo da primeira fase. Foi também implementada uma interface de avaliação, através da qual, o utilizador pode ouvir cada uma das músicas para posterior avaliação em termos de *fitness*. O estado de evolução do algoritmo é apresentado, numa segunda interface, a qual facilita a clareza e justiça na avaliação ao longo de todo o processo. Esta última apresenta informação sobre a média das *fitness* da geração anterior e actual, sendo assim possível ter uma noção da evolução do algoritmo, no sentido de se obterem resultados satisfatórios no que diz respeito às composições musicais.

### ***Palavras-Chave***

Composição Musical, Algoritmos Genéticos, Músicas para Crianças, *Blues*



## *Abstract*

The musical composition is a subject of great interest for evolutionary computation within the area of artificial intelligence. It is an area that has been undergoing several developments over the past years due to the fact that is very appealing the creation of computer applications capable of composing musical art. This work aims to contribute towards this direction.

In this line of thought, it was developed a computer application that creates musical compositions in two different styles: Children's and Blues Music. The application was implemented using Genetic Algorithms that are the evolutionary computation most popular technique.

The work was structured in two phases.

Firstly, a statistical study about specific features of each musical style was made through the analysis of fifteen music of each style in order to achieve the proportion of the use that each note has in each case.

Secondly, was developed the software that composes the songs through the implementation of a genetic algorithm. Moreover, was also developed a graphical user interface that allows the choice of the musical style that the user wishes to be composed. The genetic algorithm starts creating an initial population of potential solutions according to the user choice, followed by the cycle that characterizes the genetic algorithm. The initial population is made of solutions following the rules that were implemented according to the collected data in the first phase. An evaluation interface was also implemented and allows the user to listen each song for further assess in terms of fitness. The algorithm evolution is presented, in a second graphical user interface, that gives information about the fitness average of the previous and current generation, which makes easier the clarity and justice on evaluation along all process. This information allows having a big-picture about the algorithm evolution, in order to gain better results with respect to musical compositions.

### ***Keywords***

Music Composition, Genetic Algorithms, Children's Music, *Blues*



# Índice

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>I</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>III</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>V</b>
<b>ÍNDICE</b> .....	<b>VII</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>IX</b>
<b>ÍNDICE DE TABELAS</b> .....	<b>XIII</b>
<b>ACRÓNIMOS</b> .....	<b>XV</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1. OBJECTIVOS.....	1
1.2. CALENDARIZAÇÃO .....	2
1.3. ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO .....	2
<b>2. A MÚSICA E A COMPOSIÇÃO MUSICAL</b> .....	<b>5</b>
2.1. INÍCIOS DA MÚSICA .....	5
2.2. HISTÓRIA DA MÚSICA.....	6
2.3. MÚSICA, MATEMÁTICA E FÍSICA .....	12
2.4. RITMO.....	15
2.5. COMPOSIÇÃO MUSICAL .....	17
<b>3. COMPUTAÇÃO EVOLUCIONÁRIA</b> .....	<b>23</b>
3.1. INTRODUÇÃO .....	23
3.2. ALGORITMOS GENÉTICOS .....	24
3.3. COMPUTAÇÃO EVOLUCIONÁRIA INTERACTIVA.....	32
<b>4. COMPUTAÇÃO MUSICAL COM ALGORITMOS GENÉTICOS</b> .....	<b>37</b>
4.1. ALGORITMO GENÉTICO QUE GERA SOLOS DE JAZZ .....	37
4.2. COMPOSITOR DE MÚSICA GENÉTICO .....	40
4.3. ALGORITMO DE COMPOSIÇÃO MUSICAL INTERACTIVO .....	42
4.4. OUTROS TRABALHOS.....	45
<b>5. TRABALHO DESENVOLVIDO</b> .....	<b>47</b>
5.1. ESTRUTURA DO TRABALHO DESENVOLVIDO .....	47
5.2. PRIMEIRA FASE.....	47
5.3. SEGUNDA FASE.....	56
5.4. DEMONSTRAÇÃO .....	67
<b>6. CONCLUSÕES</b> .....	<b>73</b>
<b>REFERÊNCIAS DOCUMENTAIS</b> .....	<b>75</b>

<b>ANEXO A. MÚSICAS ANALISADAS .....</b>	<b>79</b>
<b>ANEXO B. RESULTADOS PRIMEIRA FASE.....</b>	<b>81</b>

## *Índice de Figuras*

Figura 1	Os Instrumentos de Corda, Harpa e Cítara eram Artisticamente Elaborados pelos Egípcios [9] .....	6
Figura 2	Músicos Medievais a Tocar Instrumentos de Sopros [35] .....	7
Figura 3	No Painel Superior – Músico a tocar Flauta de Tamborileiro e um Tamboril, espécie de Pandeireta com Soalhas; Painel Inferior – Cítola que deu Origem à Guitarra Portuguesa, uma Sanfona e um Harpa [9] .....	8
Figura 4	Mozart com a sua Constanze Weber e os seus dois filhos [4] .....	10
Figura 5	Hino a S. João .....	12
Figura 6	Pintura num Vaso Grego Antigo que Representa uma Lição de Música (510 a.C.) [8] . . . . .	13
Figura 7	Exemplo de Escala Diatónica Maior .....	13
Figura 8	Exemplo de Escala Diatónica Menor .....	13
Figura 9	Escala Maior com Indicação de Tons e Meios-Tons [12] .....	14
Figura 10	Intervalos Musicais .....	14
Figura 11	Exemplo de Compasso Quaternário (Unidade de Tempo e Quantidade de Unidades por Compasso) .....	15
Figura 12	Quadro com Representação das Diferentes Notas, Relação com a Semibreve e Valores Relativos [14] .....	16
Figura 13	Motivo da Quinta Sinfonia de Beethoven[39] .....	18
Figura 14	Doze Escalas Blues [41] .....	20
Figura 15	Estrutura 12 Compassos Blues [41] .....	20
Figura 16	Representação das Colcheias e Modo Como Devem ser Tocadas [40] .....	21
Figura 17	Exemplo de Processo de Selecção Natural [24] .....	25
Figura 18	Fluxograma de um Algoritmo Genético [23] .....	28
Figura 19	Exemplo de Selecção por Torneio [36] .....	30
Figura 20	Selecção por Roleta [25] .....	30

Figura 21	Seleção por Classificação (direita) [25].....	31
Figura 22	Galápagos [34] .....	34
Figura 23	Esquema CEI [42] .....	36
Figura 24	Esquema do Algoritmo <i>GenJam</i> [1].....	38
Figura 25	Populações do <i>GenJam</i> [1].....	39
Figura 26	Estrutura de um AMG [27].....	41
Figura 27	População de Vox Populi – Cromossoma <i>MIDI</i> [31].....	43
Figura 28	Interface de Controlo.....	45
Figura 29	Estrutura de Funcionamento da Aplicação na Primeira Fase .....	48
Figura 30	Exemplo de Gráfico em que se Podem Ver não só a Disposição das Notas, mas também o seu Acompanhamento Harmónico (música para crianças, Frère Jaques) ...	49
Figura 31	Representação UML das Classes da Aplicação.....	51
Figura 32	Excerto de Código – Método <i>send</i> Responsável pelo Descartar da Instância das Mensagens <i>MIDI</i> .....	52
Figura 33	Resultados Obtidos - % de Cada Nota em Músicas para Crianças.....	53
Figura 34	Resultados Obtidos - % de Graus Usados na Harmonização das Músicas para Crianças .....	54
Figura 35	Resultados Obtidos - % de Cada Nota em Músicas Blues .....	54
Figura 36	Estrutura Frásica AABB (forma) – A Caminho de Viseu .....	55
Figura 37	Estrutura Frásica ABAB (forma) – 3 Pombinhas .....	55
Figura 38	Estrutura Esquemática da Aplicação Desenvolvida .....	57
Figura 39	Pontos de Corte Possíveis - Músicas Infantis.....	61
Figura 40	Porção de Código – Cálculo do Número de Vezes que cada Nota pode ser Utilizada ( <i>total</i> é a variável que contém o número total de notas a ser usadas).....	63
Figura 41	Esquema da Estrutura Harmónica – Música para Crianças.....	64
Figura 42	Resultados Obtidos Quanto à Proporção de Notas Usadas – Música Infantil.....	65
Figura 43	Resultados Obtidos Quanto à Proporção de Notas Usadas – Músicas <i>Blues</i> .....	67
Figura 44	Interface Inicial.....	68

Figura 45	Janela de Avaliação dos Indivíduos .....	68
Figura 46	População Inicial .....	69
Figura 47	Filhos .....	69
Figura 48	Interface de Estado do AG .....	70
Figura 49	População da Geração 2 .....	71



# *Índice de Tabelas*

Tabela 1	Cronograma do Projecto.....	2
----------	-----------------------------	---



## *Acrónimos*

AG	-	Algoritmos Genéticos
HTML	-	HyperText Markup Language
<i>MIDI</i>	-	Musical Instrument Digital Interface
API	-	Application Programming Interface
CEI	-	Computação Evolucionária Interactiva
PG	-	Programação Genética
CE	-	Computação Evolucionária
ADN	-	Ácido DesoxirriboNucleico
IC	-	Inteligência Computacional
FS	-	Fuzzy Systems
RN	-	Redes Neurais
IE	-	Inteligência dos Enxames
IEEE	-	Instituto de Engenheiros Electricistas e Electrónicos
AMG	-	Artificial Musicians Group
CONGA	-	Composition in Genetic Approach



# 1. INTRODUÇÃO

A composição musical é um tema de muito interesse para a computação evolucionária dentro da área da inteligência artificial. A ambição pela existência de um compositor automatizado que realize obras musicais por si só, respeitando aquelas que são as leis da composição ou criando um novo género musical faz com que esta seja uma área de investigação relevante nos últimos anos. Um dos ramos da inteligência artificial com qual se tem trabalhado bastante, no que à composição diz respeito, é a computação evolucionária, tirando partido daqueles que são os algoritmos evolucionários mais populares da sua área: os Algoritmos Genéticos. Um dos problemas do uso destas estratégias evolutivas na realização de composições musicais assenta na avaliação em termos de *fitness* dos indivíduos (músicas). Nesta fase é necessária a interacção do ser humano, interacção esta que se torna cansativa, individual, relativa e com pouca clareza ao longo de todo o processo. Em todo o caso, os resultados obtidos em trabalhos deste género são muito aceitáveis o que serve de motivação extra para a continuação da procura de um compositor computadorizado.

## 1.1. OBJECTIVOS

Pretende-se com este trabalho desenvolver uma aplicação que implemente um Algoritmo Genético para compor músicas de dois géneros musicais: Músicas para Crianças e Músicas *Blues*. Para isso, numa primeira fase será feito um estudo estatístico sobre as características desses dois géneros musicais, pretendendo-se obter uma proporção do uso

que cada nota musical tem em cada um desses géneros de músicas. Com essa base e numa segunda fase, será implementado um algoritmo genético que após a geração da população inicial evoluirá até que o utilizador sinta que já possui uma composição do seu agrado.

## 1.2. CALENDARIZAÇÃO

Tabela 1 Cronograma do Projecto

ID	Nome das etapas	Início	Fim	Duração	Mar 2011					Abr 2011				Mai 2011				Jun 2011				Jul 2011		
					27-2	6-3	13-3	20-3	27-3	3-4	10-4	17-4	24-4	1-5	8-5	15-5	22-5	29-5	5-6	12-6	19-6	26-6	3-7	10-7
1	Seleção do projecto	07-03-2011	11-03-2011	1s																				
2	Definição de objectivos	14-03-2011	18-03-2011	1s																				
3	Pesquisa, Estudo Algoritmos Genéticos e Música	21-03-2011	01-04-2011	2s																				
4	Recolha de Dados para Primeira Fase	04-04-2011	08-04-2011	1s																				
5	Primeira Fase - Análise e Tratamento de Dados das Músicas Infantis	11-04-2011	14-04-2011	12h																				
6	Primeira Fase - Análise e Tratamento de Dados das Músicas Blues	15-04-2011	18-04-2011	6h																				
7	Segunda Fase - Desenvolvimento da População Inicial para Músicas Infantis	19-04-2011	02-05-2011	2s																				
8	Segunda Fase - Desenvolvimento do Algoritmo Genético	03-05-2011	16-05-2011	2s																				
9	Segunda Fase - Desenvolvimento da População Inicial para Músicas Blues	17-05-2011	23-05-2011	1s																				
10	Testes e Melhoramentos	23-05-2011	27-05-2011	1s																				
11	Elaboração do relatório final	30-05-2011	08-07-2011	6s																				

## 1.3. ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO

Este relatório encontra-se estruturado em 6 capítulos:

- No capítulo 1 fornece-se ao leitor o contexto desta tese, os objectivos estabelecidos para a sua prossecução e a motivação que conduziu à sua realização.
- No capítulo 2, “A Música e a Composição Musical”, será abordado um pouco daquilo que é a História da Música Ocidental, a relação que a música tem com a matemática e finalmente algumas considerações sobre o que é e em que se baseia a composição musical.

- No capítulo 3, “Computação Evolucionária”, estará presente uma pequena introdução àquilo que é a Computação Evolucionária, e uma descrição cuidada e detalhada daquilo que são os Algoritmos Genéticos e técnicas utilizadas em cada uma das suas fases.
- No capítulo 4, “Computação Musical com Algoritmos Genéticos” apresentam-se relatados alguns trabalhos realizados na área.
- No capítulo 5, “Trabalho Desenvolvido”, efectua-se uma descrição de todo o trabalho desenvolvido.
- No capítulo 6, “Conclusões”, descrevem-se as principais conclusões obtidas e perspectivam-se alguns desenvolvimentos futuros.



## 2. A MÚSICA E A COMPOSIÇÃO MUSICAL

Este capítulo contextualiza o trabalho realizado. Apresentam-se as noções básicas sobre música assim como um pouco da sua história, passando também pela matemática que se encontra na música.

### 2.1. INÍCIOS DA MÚSICA

Os começos da música desconhecem-se. Segundo os mitos dos povos, a música é de origem divina [2]. A palavra música é de origem grega e tem como significado “Força das Musas” [3].

A documentação sobre a música de épocas mais remotas é escassa. Só na Grécia Clássica surge a primeira escrita musical claramente decifrável e apenas no segundo milénio da era cristã se torna comum a escrita musical. A maior parte dos testemunhos de que se dispõe sobre a música de povos mais antigos correspondem a achados arqueológicos identificados (nem sempre com grande certeza) como instrumentos musicais e pinturas, esculturas ou relevos representando cenas musicais. Assim, o estudo dessa música é baseado em hipóteses altamente especulativas. Houve várias ideias sobre as origens da música. *Darwin* pensava que o canto surgira da imitação de gritos de animais, enquanto para *Rousseau* ela nascera do falar num tom mais elevado. Para alguns a música nasceu do ritmo ou de ritmos de trabalho, enquanto outros associam a sua origem à da fala, tendo ambas começado com a comunicação sonora. Os primeiros instrumentos parecem ter

sido frequentemente adaptações de utensílios com outras funções (arcos de caça, vasos em terracota). [4]

## 2.2. HISTÓRIA DA MÚSICA

A primeira música foi provavelmente feita por homens da pré-história a chamarem uns pelos outros ou entoando cantilenas. Encontraram-se instrumentos simples com cerca de 40,000 anos, mas há cerca de 5,000 anos começaram a ser produzidos instrumentos mais elaborados e música com ritmos e melodias bem definidos, coincidindo com o surgimento das civilizações do Egito e Ásia Menor [5]. A figura 1 ilustra exemplos de instrumentos musicais elaborados pelos Egípcios.



**Figura 1 Os Instrumentos de Corda, Harpa e Cítara eram Artisticamente Elaborados pelos Egípcios [9]**

A história da música ocidental divide-se, tipicamente em 6 períodos históricos [4,5,6,7,10]: Medieval (1000-1400), Renascença (1400-1600), Barroco (1600-1749), Clássico (1750-1824), Romântico (1825-1900), Moderno e Contemporâneo (1900-...).

### 2.2.1. MÚSICA MEDIEVAL

No período Medieval a música tornou-se bastante elaborada e os compositores exploraram formas de exprimir uma grande variedade de emoções diferentes. Inicialmente os músicos acrescentaram melodias mais complexas às cantilenas simples que existiam. Aperfeiçoou-se também um sistema próprio de escrita musical. Os gregos tinham um processo de escrever música atribuindo uma letra a cada nota (notação alfabética), mas os exemplos de música escrita por esse processo são quase inexistentes; no entanto, a

aplicação de letras viria a ser usada para dar nomes às notas musicais na Idade Média. É neste período que surge o *Canto Gregoriano*, que é a versão mais conhecida do chamado *cantochão*, sendo este o conjunto de melodias vocais não acompanhadas usadas nos rituais litúrgicos da Igreja Cristã, tendo por base tradições grega e hebraica. Outro facto assinalável é o aparecimento da *Polifonia*: a música para diversas vozes simultâneas. Este estilo viria a atingir o seu apogeu na Renascença. Na polifonia, o interesse musical é partilhado igualmente entre as várias partes melódicas que se movem independentemente produzindo uma textura entrelaçada. A subtileza da polifonia pode facilmente escapar aos ouvidos habituados à música homofónica de épocas posteriores, em que uma “melodia principal” é sustentada por partes subordinadas que se movem formando blocos de acordes. A figura 2 ilustra alguns instrumentistas medievais.



**Figura 2** Músicos Medievais a Tocar Instrumentos de Sopros [35]

A polifonia do séc. XIV é conhecida como *Ars Nova*. Esta introduzia a permissão da escrita de ritmos extremamente complexos com um grau de dependência entre ritmos de várias vozes que só se volta a encontrar no século XX. Esta complexidade vai obscurecer o texto, coisa que não agradava à igreja. Ainda assim, uma das principais obras da *Ars Nova* é a *Missa de Notre-Dame*, a 4 vozes, do poeta e compositor *Guillaume de Machaut* (c. 1300-77).

Na Europa medieval, a Igreja encarava os instrumentos como algo pagão. A única excepção era o órgão, que podia ser um pequeno instrumento portátil, usado em procissões, ou um instrumento enorme. Na música profana, porém, a variedade de instrumentos usados é enorme. Alguns, como a *gaita de foles* e a *flauta*, eram instrumentos populares europeus. Outros, como a harpa e a trombeta natural, foram herdados da antiguidade através dos romanos.

## 2.2.2. MÚSICA RENASCENTISTA

Como é de conhecimento comum, as transformações históricas não são lineares e nem se processam de forma radical. Assim, é compreensível que, inicialmente, a música renascentista se aproximasse do movimento a ela anterior, a *Ars Nova*, mas com modulações, transposições, alterações cromáticas e microtonais, sob supervisão da Igreja Católica, com o fim de orientar os padres-compositores.

A música renascentista revela um interesse muito mais vivo pelo profano (música não religiosa embora seja curioso constatar que as obras de maior destaque foram compostas para a Igreja. A linha que distingue a música profana da sacra é ténue, tanto na estrutura como na própria forma textual. O que define exactamente o cariz sacro ou profano é o conteúdo e a função do reportório. Aparecem vários géneros de música, *Policorais*, que era obras feitas para mais que um coro. *Motetos*, que designam qualquer obra polifónica sobre um único texto religioso em latim eram peças escritas para, no mínimo, quatro vozes cantados geralmente nas igrejas. Os *Madrigais* eram canções populares escritas para várias vozes e que se caracterizam por não ter refrão.

Paralelamente à afirmação da polifonia nasce a preocupação de melhorar a precisão da notação musical, porque a existência de várias vozes exigia a revisão dos princípios do passado, tanto a nível acústico como técnico, sendo feitos vários melhoramentos nesses aspectos. Na figura 3 podem ver-se alguns dos instrumentos utilizados na época.



**Figura 3** No Painel Superior – Músico a tocar Flauta de Tamborileiro e um Tamboril, espécie de Pandieira com Soalhas; Painel Inferior – Cítola que deu Origem à Guitarra Portuguesa, uma Sanfona e um Harpa [9]

A mudança mais interessante e relevante foi o estilo de polifónico coral ou policoral, sem acompanhamento de instrumentos, que revela um alto grau de complexidade e sofisticação de combinações harmónicas até 64 vozes, embora denota-se um predomínio melódico do *cantus firmus*, que é a voz superior, com uma definição harmónica do baixo. A dimensão vertical da música, ou seja, a harmonia, começa a tomar lugar, e é deste ponto que tudo tem de ser combinado entre si e bem meditado.

### 2.2.3. MÚSICA BARROCA

No período Barroco aparecem novos géneros musicais, pois com o aparecimento de Teatros de Ópera públicos, os compositores começaram a escrever óperas e cantatas. Assim, a música vocal tornou-se mais dramática, dando grande ênfase às palavras. A música instrumental desenvolveu-se imenso, tendo os compositores criado muitas formas orquestrais novas tais como a suite de danças, o concerto para instrumentos solista e orquestra e a sinfonia. Apareceu aqui também a tonalidade, sendo isto consequência do aparecimento do sistema de afinação temperado, no qual a oitava está dividida em 12 partes iguais. A tonalidade passava a ter apenas dois modos: *maior* e *menor*. Nascido na mesma época da ópera, o *Oratório* é outra importante forma de música vocal barroca. O oratório é um tipo de ópera com histórias tiradas da Bíblia. Com o passar do tempo os oratórios deixaram de ser representados e passaram a ser apenas cantados. Uma das principais características que distinguem a música barroca da renascentista é a substituição da polifonia por uma textura de *baixo contínuo* – uma forma de escrita em que o interesse musical é concentrado em dois pólos: Uma melodia aguda e uma linha grave instrumental (o baixo contínuo), que fazem sentir ao ouvinte a harmonia e as frases da música; as melodias do meio servem apenas para reforçar a harmonia, ficando em segundo plano. O baixo contínuo é normalmente escrito como uma linha melódica grave com alguns números junto às notas (*cifras*), que indicam harmonias (*acordes*) a usar pela mão direita do cravista, por exemplo. A música barroca é geralmente exuberante: ritmos enérgicos, melodias com muitos ornamentos, contrastes de timbres instrumentais e sonoridades fortes com suaves. Este é o período de grandes génios musicais, tal como *Antonio Vivaldi* (1678-1741), *Johann Sebastian Bach* (1681-1750), *Georg Friedrich Handel* (1685-1759) entre outros.

#### 2.2.4. MÚSICA CLÁSSICA

O período clássico é geralmente associado à segunda parte do século XVIII. Em termos musicais, pode ser definido como a tentativa de criar música formalmente bem definida, rigorosa nas suas proporções e moderada na expressão. Tende a evitar as emoções extremas – cuja expressão, estimulada pela inspiração individual, constitui a base do romantismo. Os clássicos buscam uma nova ordem perfeita, disciplinada, baseada na beleza pura, na razão e na estrutura. Assim, os compositores, principalmente *Haydn* e *Mozart*, estabeleceram as formas principais da música instrumental: *sonata*, *quarteto de cordas*, *concerto* e *sinfonia*. Na figura 4 visualiza-se *Mozart* com a sua família.



Figura 4 Mozart com a sua Constanze Weber e os seus dois filhos [4]

Verificou-se também uma mudança de estilo. As linhas entrelaçadas do barroco desapareceram quase totalmente, sendo substituídas por melodias marcantes, desenvolvidas em frases harmoniosas com contrastes de som mudando constantemente de uma tonalidade para outra. A música instrumental foi dominada pelo piano que se tornou altamente expressivo, inspirando compositores a produzirem grandes obras a solo. A música vocal – ópera, oratória e canção – tornou-se cada vez mais dramática e poética durante este período.

#### 2.2.5. ROMANTISMO

Após *Haydn* e *Mozart* terem estabelecido a forma clássica, inevitavelmente os compositores começaram a procurar formas de alargar os limites que qualquer forma académica impõe. Os compositores românticos procuravam exprimir emoção através da música de uma forma mais directa do que se fazia antes. Outra inovação era a popularidade da música programática, em que os instrumentos sugerem acontecimentos ou cenários. Nesta fase existem progressos que beneficiaram os instrumentos, tornando-os mais

sonoros, afinados, mais fáceis de tocar e, sobretudo mais versáteis. O piano adquiriu a sonoridade cheia e rica que se conhece hoje, os metais passam a ser equipados com pistões o que lhes permite maior versatilidade. Aparecem também alterações na formação de orquestras. Com o aumento do tamanho da orquestra, surge uma inevitável necessidade de complexidade das obras, o que leva ao aparecimento da figura do *Maestro*.

Este é um período da história da música repleto de grandes compositores dos quais se destacam *Ludwing van Beethoven* (1770-1827), *Fryderyk Chopin* (1810-1849), *Robert Schumann* (1810-1856), *Hector Berlioz* (1803-1869), *Franz Liszt* (1811-1886), *Piotr Ilitch Tchaikovsky* (1840-1893), *Gustav Mahler* (1860-1911), etc.

#### **2.2.6. SÉCULO XX E ÉPOCA CONTEMPORÂNEA**

Com o iniciar do novo século, os compositores românticos esforçavam-se por conseguir efeitos cada vez mais intensos. Acabaram por levar a música a um ponto em que a tonalidade atingiu uma rotura. Alguns começaram a escrever música revolucionária e com frequência excitante e original, em duas ou mais tonalidades simultâneas, de que resultavam harmonias estranhas. Combinavam também instrumentos e ritmos de novas maneiras. Em 1921 o compositor austríaco *Schoenberg* apresentou a música serial ou dodecafónica. Baseia-se numa série de doze notas da escala cromática, em vez das escalas de sete notas maiores e menores da tradicional música tonal.

Este é um período marcado pela procura e experiencias de novas harmonias e ritmos que eram reunidos em combinações invulgares, onde vários compositores tentavam sobrepor dois ou mais ritmos ou harmonias completamente diferentes. *Bartók*, por exemplo, escreveu peças para piano em que as duas mãos estão em duas tonalidades diferentes. Esta combinação de tonalidades é chamada de *politonalidade*.

Apareceu também a *Música Popular e Tradicional*. A definição fornecida pelo *International Folk Music Council*, com todas as suas limitações, poderá constituir um ponto de partida: a música popular é a música das pessoas comuns, passada de pessoa para pessoa mais por ser ouvida que aprendida a partir de uma transição. Hoje em dia, as canções infantis e as que se usam em actividades de convívio como excursões, por exemplo, adequam-se perfeitamente a esta definição. Três outros factores dão o carácter próprio à música popular: a continuidade (o ser executada muitas vezes ao longo de vários

anos), a variação (alterações no texto, na melodia ou no ritmo, quer para embelezar e enriquecer, quer devido às limitações da memória das pessoas) e a selecção (a aceitação de uma canção ou melodia pela comunidade onde surge).

### 2.3. MÚSICA, MATEMÁTICA E FÍSICA

*“A música é celeste, de natureza divina e de tal beleza que encanta a alma e a eleva acima da sua condição.”*

*Aristóteles*

A definição de música é muito relativa e de facto depende da interpretação e forma como cada um interage e a sente. Mas, e segundo a *ENCYCLOPÆDIA Britannica*, *música é a arte preocupada com combinação de sons vocais ou instrumentais para a beleza da forma ou expressão emocional, geralmente de acordo com padrões culturais de ritmo, melodia e, na maioria das músicas ocidentais, a harmonia* [10].

A música e a matemática sempre tiveram muitos pontos de contacto. Ambas implicam respostas da razão humana – racionalidade – ao que nos rodeia. Como as relações entre os sons são relações físicas, elas podem ser descritas matematicamente. É por isso que sempre houve uma troca de informação entre a música e a matemática. Além disso, noção rítmica, intervalos entre as diferentes notas e o timbre podem ser definidos matematicamente.

A maior parte da música é construída na manipulação de apenas *sete notas*, junto a cinco notas “extra”, mantidas à disposição para serem usadas quando necessário. As 7 notas são: *dó, ré, mi, fá, sol, lá e si* [11]. Originalmente, as sete notas eram: *A, B, C, D, E, F, G*, pois era esse o sistema de notação utilizado pelos povos de língua inglesa, proveniente da tradução greco-romana. Nesse sistema, *A* representa a nota *Lá*. Nos países latinos, os nomes das notas remontam às sílabas iniciais de cada verso de um hino a São João, composto em latim, pelo monge beneditino Guido d’Arezzo (990-1050), tal como é ilustrado na figura 5:



*UT queant laxis  
REsonare fibris  
MIRA gestorum  
FAMulti tuorum  
SOLve polluti  
LABii reatum  
Sancte Iannes*

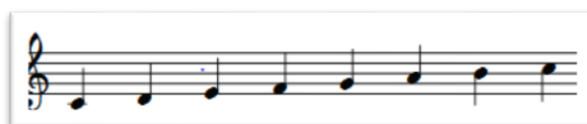
**Figura 5 Hino a S. João**

Mais tarde o *ut* foi substituído pelo *dó*, mais fácil de entoar, mas os franceses continuam a usar o *ut*. O Si foi formado da união da primeira letra de *Sancte* e da primeira de *Ionnes* (notação *Guido*). A figura 6 ilustra um vaso grego representando uma lição de música.



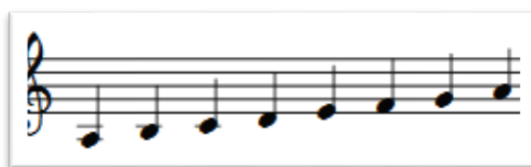
**Figura 6** Pintura num Vaso Grego Antigo que Representa uma Lição de Música (510 a.C.) [8].

A música europeia é baseada essencialmente na escala diatónica, que é constituída pelas sete notas que acima foram referidas, e que termina numa que, embora mais aguda, tem o mesmo nome que a primeira nota. A escala pode-se repetir para o lado agudo ou grave [4]. A escala diatónica Maior é apresentada na figura 7.



**Figura 7** Exemplo de Escala Diatónica Maior

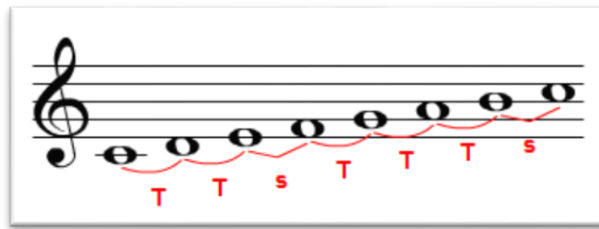
Outra escala diatónica, a *escala menor natural*, obtém-se com as mesmas notas mas começando em lá, e acabando em lá (figura 8).



**Figura 8** Exemplo de Escala Diatónica Menor

O que caracteriza uma escala é haver um intervalo fixo entre quaisquer duas das suas notas. Isto significa que se pode *transpor* uma escala para outra qualquer tonalidade

(Começá-la numa outra nota qualquer e respeitar os intervalos entre cada uma das suas notas). A cada nota da escala, é comum associar-se-lhe uma numeração romana que indica o *grau* da escala.



**Figura 9 Escala Maior com Indicação de Tons e Meios-Tons [12]**

Na escala diatónica maior, os intervalos são identificados como sendo de *tom* ou *meio-tom*. Na figura 9 podemos ver qual é o esquema e geometria de todas as escalas diatónicas maiores. “T” significa um tom, e “s” meio-tom, sendo estes a distância entre as duas notas adjacentes. Assim, pode-se observar que nestas escalas existem apenas dois intervalos de meio-tom, que se encontram do 3 para o 4 grau da escala, e do sétimo para o oitavo.

A música ocidental baseia-se num conjunto de doze notas por oitava, mas existem apenas sete nomes. Para se obter as restantes, aplica-se uma *alteração* às notas base. Essas alterações podem ser *sustenidos*, que aumentam meio-tom à nota, ou então *bemóis*, que a fazem descer o mesmo intervalo. Um e outro podem ser duplos causando então diferenças de um tom à nota a que se aplica.

Chama-se intervalo à distância que existe entre duas notas. Por exemplo, uma oitava é o intervalo entre uma qualquer nota e outra com o mesmo nome (no caso de uma escala, a primeira e a última notas fazem um intervalo de oitava). Os intervalos musicais são ilustrados na figura 10.



**Figura 10 Intervalos Musicais**

O tom de cada nota é definido pela sua frequência fundamental. Como exemplo, que é actualmente uma referência usada na afinação de orquestras e coros, ao La3 corresponde a frequência de 440Hz. O “3” indica-nos qual a oitava, sendo essa a nomenclatura usada para identificar a qual oitava corresponde uma determinada nota. No domínio das frequências,

uma oitava corresponde ao duplicar das frequências, logo  $f_{C4} = 2f_{C3}$ . Já no caso de uma quinta, a relação passa a ser  $3/2$  ( $f_{G3} = \frac{3}{2} f_{C3}$ ). Estas dependências foram descobertas e estão de acordo com a *afinação Pitagórica*, na qual um tom corresponde à razão da frequência de  $9/8$  ( $f_{D3} = \frac{9}{8} f_{C3}$ ).

Mais tarde surgire a *afinação temperada*, na qual a escala passa a ser dividida em 12 partes iguais, em que cada uma dessas partes representa meio-tom à razão de  $\sqrt[12]{2}$ . Assim, cada meio-tom da escala é definido da seguinte forma:  $f_2 = \sqrt[12]{2} f_1$  [9,13,24].

## 2.4. RITMO

Todas as melodias têm *ritmo*. Qualquer acção contínua como andar, correr, escalar, nadar ou remar, fica mais fácil quando se adquire um ritmo de tensão e relaxamento. Assim, o ritmo é o padrão que a organização temporal da música produz [4].

### 2.4.1. PULSAÇÃO

O ritmo é geralmente organizado em sequências de pulsações regulares, que se podem ouvir directamente ou apenas sentir interiormente, por exemplo quando batemos o pé ao som de uma qualquer música estamos a marcar a pulsação, a senti-la. A rapidez com que ela se exprime corresponde ao andamento da obra/música.

### 2.4.2. COMPASSO

Na música ocidental essas pulsações (tempos) costumam-se associar em grupos de 2,3 ou 4, formando assim compassos. Para se identificar qual é o compasso de determinada obra, existe a fórmula de compasso [11]. Na figura 11 pode-se visualizar um exemplo de um compasso quaternário.



**Figura 11 Exemplo de Compasso Quaternário (Unidade de Tempo e Quantidade de Unidades por Compasso)**

Esta consiste em dois números sobrepostos. O número inferior representa a unidade de tempo: é escrito tendo em relação o valor de uma semibreve. No exemplo em cima, essa unidade de tempo é a semínima, e assim o número inferior da fórmula será 4, pois 4 semínimas equivalem a uma semibreve como se pode constatar na figura 12.















Nomes da figuras das notas musicais	Figuras das notas musicais	Representação do valor das notas musicais.	Valor relativo das notas musicais
Semibreve			1
Mínima			2
Semínima			4
Colcheia			8
Semicolcheia			16
Fusa			32
Semifusa			64

Figura 12 Quadro com Representação das Diferentes Notas, Relação com a Semibreve e Valores Relativos [14] <sup>1</sup>

O número superior da fórmula de compasso indica a *quantidade de unidades em cada compasso*. Então, e mantendo como referência o exemplo anterior, o número superior será também quatro, uma vez que cada compasso tem 4 semínimas. Assim, para esse exemplo temos como fórmula de compasso  $\frac{4}{4}$ .

### 2.4.3. A DIVISÃO

Nem todos os sons têm um número certo de tempos: estes podem-se dividir em partes. Há dois tipos comuns de divisão: *binária* (cada compasso divide-se em 2 partes, compasso

---

<sup>1</sup> De notar que além dessas figuras rítmicas, ainda se podem juntar pontos de aumento a cada uma das figuras, o que aumentará à nota metade do seu valor.

diz-se *simples*) e *ternária* (cada compasso divide-se em 3 partes, compasso diz-se *composto*).

## 2.5. COMPOSIÇÃO MUSICAL

Uma composição musical é uma peça de música original composta para ser executada múltiplas vezes (em oposição à música de improvisação em que cada execução é única). A música pode ser preservada na memória ou através de um sistema de escrita e/ou notação. As composições podem ser escritas para a voz humana, geralmente contendo letras, assim como para instrumentos musicais.

Composição musical pode também significar o processo pelo qual uma peça se origina e a disciplina académica que estuda os seus métodos e técnicas. Quem executa este trabalho é chamado de compositor. O compositor deve ter conhecimento da teoria musical e das características do género musical que irá compor. Essa escolha determina, entre outras, o ritmo, a instrumentação utilizada, a forma e a duração da composição [37].

### 2.5.1. FORMA

O termo *forma* é utilizado em muitos sentidos: nas expressões *forma binária*, *forma ternária* ou *forma-rondó*, refere-se substancialmente ao número de partes (indica elementos indiferenciados, secções ou subdivisões de uma composição). Quando se refere ao *minueto*, ao *scherzo* e as outras “formas de dança”, pensa-se nas características rítmicas, métricas e de andamento. No sentido estético, *forma* significa que a peça é organizada, isto é, que se encontra constituída por elementos que funcionam tal como um organismo vivo [38].

Os requisitos essenciais para a criação de uma forma compreensível são a *lógica* e a *coerência*: a apresentação, o desenvolvimento e a interconexão das ideias devem estar baseados nas relações internas, e as ideias devem ser diferenciadas de acordo com a sua importância e função.

## 2.5.2. A SINTAXE MUSICAL

A música, sob o aspecto melódico, é um conjunto de sons que se desenvolvem por sequências de impulso-reposo. Este conjunto de sons recebe o nome de *célula* ou *inciso*. Assim, *célula* ou *inciso* é o menor conjunto que envolve a pulsação impulso-reposo. Se uma *célula* serve de base a um desenvolvimento musical, ou seja, se ela é desenvolvida como tema, é então denominada *motivo temático*, ou simplesmente, *motivo*. Um *motivo* bastante conhecido encontra-se na figura 13, que é constituído pelos dois primeiros compassos da *Quinta Sinfonia de Beethoven*:



Figura 13 Motivo da Quinta Sinfonia de Beethoven[39]

Denomina-se *conjunto* a uma quantidade qualquer de valores; duas ou três células juntas formam um conjunto denominado *semi-frase*, e duas *semi-frases* formam um conjunto chamado *frase* [39]. O termo frase significa, do ponto de vista da estrutura, uma unidade aproximada àquilo que se pode cantar num só fôlego. O seu fim sugere uma forma de pontuação, tal como uma vírgula.

Na música harmónico-homofónica, o conteúdo essencial está concentrado numa só voz, a voz principal, que possui uma harmonia inerente. A acomodação mútua entre melodia e harmonia é, num primeiro momento difícil, mas o compositor não deve criar uma melodia sem estar consciente da sua harmonia. Quando uma melodia consiste substancialmente em notas relevando um simples acorde ou uma simples sucessão de acordes, não há dificuldade em determinar e expressar as suas implicações harmónicas: com uma estrutura harmónica clara, mesmo as ideias melódicas mais elaboradas podem facilmente ser associadas às suas harmonias inerentes. O acréscimo de notas não pertencentes aos acordes contribui para a fluência e para o interesse da frase, desde que elas não obscureçam ou contrariem a harmonia.

O ritmo é um elemento particularmente importante para moldar a frase: contribui para o interesse e variedade, estabelece o carácter. O final de frase é, em geral, ritmicamente diferenciado, de modo a estabelecer uma pontuação [38].

Quando a frase tem um sentido completo, ou quando diversas frases se encadeiam e atingem um ponto final, elas formam um *período*. Este tem comprimento normal de oito compassos, sendo que os quatro primeiros formam uma *frase incompleta*, que se resolve nos quatro compassos seguintes. Se a frase ocupar um lugar importante, ela adquire a função *tema*, que é o conjunto central sobre o qual a obra musical é gerada. Todos os demais conjuntos da obra mantêm uma relação estrutural e melódica com o tema, sendo deles deduzidos.

### 2.5.3. OBRA

Uma obra pode ter várias *peças* ou *secções*. Se um período é perfeitamente delimitado, forma uma dessas secções. *Secção temática* é aquela sobre a qual as outras secções ou peças de uma obra se baseiam, ou da qual derivam. Uma obra constituída por duas secções tem a estrutura, esquema ou forma binária. Esta forma seria o equivalente, na linguagem musical, à pergunta que é seguida da correspondente resposta, sendo que a secção interrogativa começa na tônica (primeiro grau da escala) e termina na dominante (quinto grau da escala), e a segunda secção começa na dominante, e, por uma sequência de modulação, retorna à tônica (AB). Algumas formas binárias podem ter quatro compassos adicionais para um encerramento suave da obra, onde parte do tema principal é repetido. É o que se denomina *coda*. A forma ternária apresenta o esquema A-B-A, onde a terceira secção reaparece como uma repetição exacta da primeira secção A. A secção B é um episódio que contrasta com a primeira e terceira secções, pela utilização de tons e elementos diferentes. Cada secção é harmonicamente completa, mas pode-se ter uma *coda* em acréscimo à terceira secção [39].

### 2.5.4. BLUES

*Blues* é uma forma musical que os músicos de *Jazz* gostam de interpretar pois permitem-lhes exprimirem as suas emoções tal como os sentimentos do dia-a-dia e os conceitos que são apreendidos ao ver-se outro músico a tocar. Muitos professores particulares dizem que não é preciso muito para se tocarem solos *blues*, pois afirmam que basta apenas aprender as escalas *blues* do modo em que o *blues* se encontra, e simplesmente improvisar usando essas escalas. Segundo *Jamey Aebersold*, é um facto que parte do que se ouve está relacionada com as escalas, mas que quando se pesquisa a vastidão de influências do *Jazz*,

é possível ouvir muito mais do que uma escala *blues*. Na figura 14 encontram-se as doze escalas *blues*.

A estrutura básica de um *blues* assenta em 12 compassos que utiliza três acordes: primeiro, quarto e quinto graus do modo em que se encontra o *blues*, todos com sétima dominante. Como exemplo, *blues* em Fá (F) usa F7, B<sup>b</sup>7 e C7. A ordem da sua ocorrência numa estrutura de 12 compassos pode ser vista na figura 15. Além desta existem infinitas progressões de acordes que podem ser usadas nos *blues*.



Figura 14 Doze Escalas Blues [41]



Figura 15 Estrutura 12 Compassos Blues [41]

#### 2.5.4.1. SWING

O *swing* é uma característica de linguagem importante e inerente aos *blues*. De uma forma bastante simples, indica que as *colcheias* não sejam tocadas com o seu valor rítmico

real, mas sim com *swing*. Assim, duas colcheias devem ser tocadas como uma *tercínia* (3 colcheias num único tempo), mas com as duas primeiras figuras unidas por uma ligadura. Assim, embora se escrevam normalmente, devem executar-se como se fossem escritas da forma presente na figura 16 [40].



**Figura 16** Representação das Colcheias e Modo Como Devem ser Tocadas [40]



# 3. COMPUTAÇÃO EVOLUCIONÁRIA

## 3.1. INTRODUÇÃO

Nos anos 50 e 60 vários cientistas ligados à computação estudaram, de forma independente, sistemas evolucionários com a ideia de que a evolução poderia ser utilizada como uma ferramenta de optimização para resolução de problemas de engenharia. A ideia por trás destes sistemas era a de evoluir uma população de soluções candidatas para um dado problema, utilizando operadores inspirados pela variação genética e pela selecção natural. [15]

A computação evolucionária foi introduzida nos anos 60 por *Rechenber* no seu trabalho “Evolution Strategies”, que consistia num método de optimização de parâmetros de valor real para dispositivos. Seguiram-se outras técnicas tais como os algoritmos genéticos, a programação genética e a programação evolucionária.

A técnica mais popular no campo da pesquisa da computação evolucionária designa-se por algoritmos genéticos (AGs). No AG tradicional, é utilizada uma representação baseada em strings de *bits* de comprimento fixo. Cada posição na *string* representa uma característica específica de um indivíduo, e o valor guardado nessa posição representa a forma como essa característica é expressa na solução.

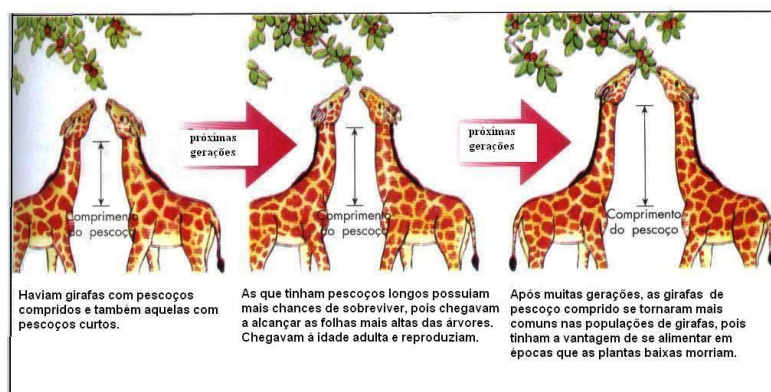
## 3.2. ALGORITMOS GENÉTICOS

Os AGs foram inventados por *John Holland* nos anos 60 e desenvolvidos pelo próprio, juntamente com os seus alunos e colegas da Universidade de Michigan nos anos 60 e 70. Quando *Holland* criou os AGs, o seu principal objectivo não era o de resolver problemas específicos, mas sim, de estudar o fenómeno de adaptação, tal como ele ocorre na natureza podendo assim, desenvolver formas para os quais esses mecanismos de adaptação natural possam ser importados para sistemas computacionais [15,23].

### 3.2.1. DARWIN E A TEORIA DA EVOLUÇÃO

Em meados do século XIX, *Charles Robert Darwin* (1809 – 1892) revolucionou todo o pensamento a respeito da evolução das espécies de seres vivos. O naturalista britânico defende que o homem, assim como os outros seres vivos eram resultado da evolução através da publicação de dois livros da sua autoria: *On the Origin of Species by Means of Natural Selection* (1859) e *The descent of man, and selection in relation to sex* (1871) [15,17]. Com esta afirmação *Darwin* concluiu, dos seus estudos, que nem todos os organismos que nascem, sobrevivem ou se reproduzem. Os indivíduos mais propensos à sobrevivência são aqueles mais aptos para enfrentar determinadas condições ambientais. Desta forma, estes indivíduos teriam maiores hipóteses de se reproduzirem e, assim, criar descendentes. Desta forma, verifica-se que com o passar do tempo, as variações favoráveis tendem a permanecer e as desfavoráveis tendem a desaparecer. Um exemplo clássico da teoria *Darwiniana* é a girafa. Inicialmente (há muito tempo atrás) existiam girafas com características bastante divergentes, algumas com o pescoço curto, pescoço médio e as que possuíam um pescoço comprido. Segundo *Darwin*, no início, todos os tipos de girafas conviviam na harmonia, mas com o passar dos anos, a vegetação mais baixa foi-se tornando escassa, dado todas as girafas poderem alimentar-se dela. Chegou então um momento em que restou apenas a vegetação mais alta, onde as girafas de pescoço mais curto não conseguiam alcançar. Como tal, devido à falta de alimentação, este tipo de girafas foram morrendo, ficando apenas as girafas mais aptas ao meio, as de pescoço mais comprido. Estas tiveram maiores oportunidades para a reprodução e, conseqüentemente, maiores hipóteses de gerar descendentes. Deste modo, a população actual das girafas é

constituída por indivíduos de pescoço longo. Na figura 17, encontra-se ilustrado o exemplo dado por *Darwin* no caso das girafas.



**Figura 17 Exemplo de Processo de Selecção Natural [24]**

De notar que a teoria de *Darwin* foi atacada por não conseguir responder a como surgem as variações nos indivíduos e a como é que os indivíduos passam as suas características à descendência. Só no século XX, com a Genética, é que estas questões seriam respondidas: os seres vivos têm, no núcleo das suas células, arranjos de ADN, chamados genes, que determinam as suas características. Um cromossoma é uma sequência de genes. Durante a reprodução sexual, os cromossomas dos progenitores cruzam-se gerando novos cromossomas. Com baixa probabilidade também podem eventualmente ocorrer mutações, que são alterações cromossómicas fortuitas que podem conferir vantagens, desvantagens ou não ter qualquer expressão [16,19,21,25].

Esses aspectos e conceitos estão então na base daquilo que são os AGs, estando por isso presentes em qualquer aplicação que faça partido deles: cromossoma, características codificadas, reprodução, cruzamento, mutação, indivíduo, função de avaliação da aptidão de um indivíduo (*fitness*), população e geração.

Resumindo, os algoritmos genéticos simulam a evolução de uma população de indivíduos, baseados na teoria da selecção natural proposta por *Charles Darwin*, com o objectivo de encontrar a solução final (óptima) de um determinado problema. A teoria da selecção natural especifica que os indivíduos mais aptos, com relação a um determinado ambiente, têm maior probabilidade de sobreviverem e aumentar a sua descendência neste ambiente.

### 3.2.2. TERMINOLOGIA BIOLÓGICA

Todos os organismos vivos consistem em células que contém o mesmo conjunto de um ou mais cromossomas – *strings* de ADN (*Ácido DesoxirriboNucleico*) – que servem como “*Blueprint*” do organismo. Um cromossoma pode, conceptualmente, ser dividido em genes – cada um codificando uma proteína em particular. Cada gene encontra-se localizado numa posição específica do cromossoma.

Muitos organismos possuem múltiplos cromossomas em cada célula. Ao conjunto de todos os cromossomas juntos dá-se o nome de *genoma* do organismo. O termo *genótipo* refere-se a um conjunto específico de genes contidos num *genoma*. O *genótipo* dá origem ao *fenótipo* do organismo – as suas características físicas e mentais.

Durante a reprodução sexual, realiza-se o cruzamento: são trocados genes entre cada par de cromossomas para formar um novo e único cromossoma. Os novos cromossomas criados estão sujeitos a possíveis mutações, nas quais alguns “*bits*” de ADN são trocados de pai para filho. A *fitness* de um organismo é tipicamente definida como a probabilidade desse organismo viver para mais tarde reproduzir ou como uma função do número de filhos que esse organismo tem.

Em AGs, o termo “cromossoma”, refere-se tipicamente a uma solução que é candidata à resolução de um problema, normalmente codificado como uma *string* de *bits*. Os “genes” tanto podem ser *bits* únicos como pequenos blocos de *bits* adjacentes que codificam um elemento específico da solução candidata. Um “alelo” numa *string* de *bits* tanto pode ter o valor 0 como o valor 1. O cruzamento consiste na troca de elementos genéticos entre dois cromossomas, enquanto a mutação consiste na troca de um *bit* de uma posição aleatória de um cromossoma. O operador de inversão, não é muito utilizado nos AGs.

O *genótipo* de um indivíduo num AG que utiliza *strings* de *bits*, consiste na configuração desses *bits* no cromossoma desse indivíduo. Normalmente, não existe noção do que é o *fenótipo* no contexto dos AGs [15,19,23].

### 3.2.3. ESPAÇO DE PESQUISA

Geralmente procura-se pela melhor solução num conjunto de soluções possíveis. Em AGs, o espaço onde se encontram todas as soluções viáveis é designado de “Espaço de Pesquisa”. Nos AGs, a melhor solução é procurada de entre um conjunto de possíveis soluções que são representadas como pontos no espaço de pesquisa.

### 3.2.4. ELEMENTOS DE UM AG

Praticamente, todos os AGs têm os seguintes elementos em comum: população de cromossomas, selecção de acordo com a *fitness* de cada indivíduo, cruzamento para produção de novos cromossomas e mutação aleatória. [15,16,17,18,19,20,23]

Os cromossomas (indivíduos) numa população de um AG tomam a forma de *string* de *bits*. Cada posição no cromossoma tem dois alelos possíveis: 0 ou 1. Cada cromossoma pode ser pensado como um ponto no espaço de pesquisa de soluções candidatas. O AG processa populações de cromossomas – substitui, de forma sucessiva, uma população por uma nova.

Uma população é uma colecção de indivíduos. Existem dois aspectos importantes sobre a população que deve ser usada num AG:

- A população inicial gerada;
- O tamanho da população.

O tamanho da população varia consoante a complexidade do problema. Quanto maior a população, mais fácil é a exploração do espaço de pesquisa, no entanto, consome mais recursos computacionais.

Geralmente, os AGs requerem uma função de *fitness* que atribui um *score* a cada cromossoma na população corrente. A *fitness* de um cromossoma depende do quão bem o cromossoma resolve o problema em questão.

A implementação mais simples de um AG envolve três tipos de operadores genéticos: selecção, cruzamento e mutação.

### 3.2.5. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DOS AGs

O princípio de funcionamento dos AGs é simples: consiste na imitação de elementos genéticos e de selecção natural que se encontram na natureza, por parte de um programa de computador – os parâmetros do problema são codificados como uma estrutura de dados linear, como um vector ou uma *string* semelhantes à estrutura do ADN.

Para começar, existe normalmente uma população aleatória que representa os valores de diferentes parâmetros criados por um gerador de números aleatórios. O tamanho típico da população varia entre umas dezenas e umas centenas. Para realizar a optimização é necessário utilizar uma função de *fitness*. Através dessa função de *fitness*, podem-se seleccionar os melhores candidatos da população e eliminar aqueles que não são tão aptos. Posteriormente, realizam-se os respectivos cruzamentos entre cromossomas, podendo existir mutação. A figura 18 apresenta um fluxograma de um AG.

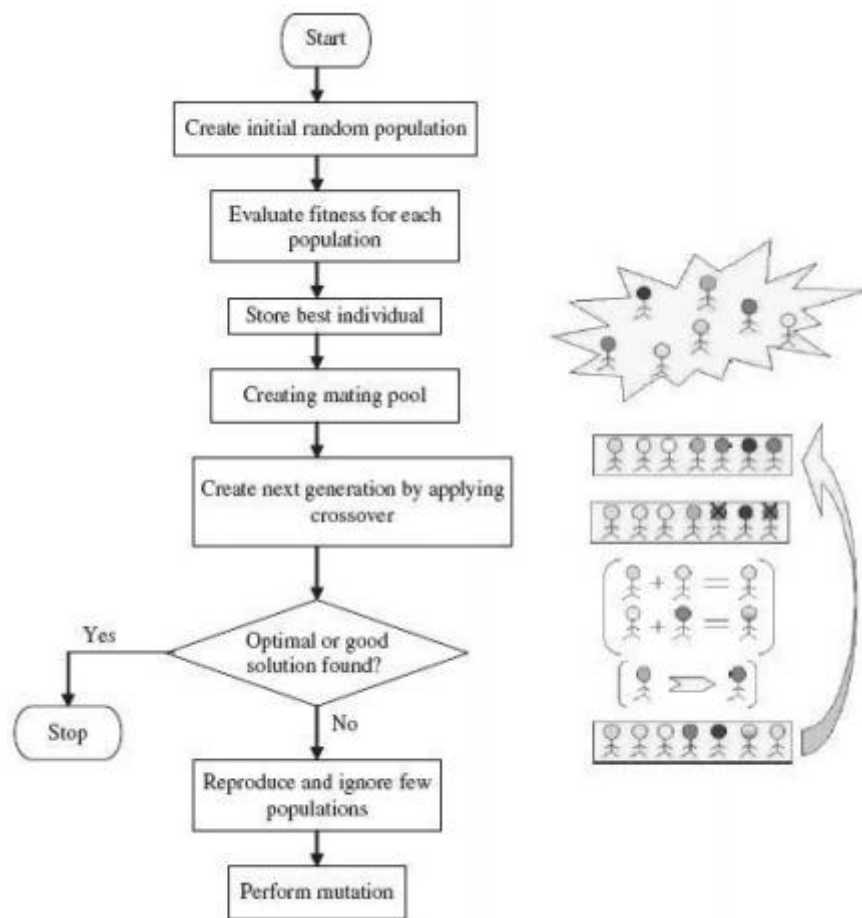


Figura 18 Fluxograma de um Algoritmo Genético [23]

### 3.2.6. OPERADORES GENÉTICOS

O objectivo dos operadores genéticos é transformar a população através de sucessivas gerações, na procura de melhorar a aptidão dos indivíduos. Os operadores genéticos são necessários para que a população se diversifique e mantenha as características de adaptação adquiridas pelas gerações anteriores. Na maior parte dos casos os AGs utilizam três operadores: selecção, cruzamento e mutação [18,23,25].

#### 3.2.6.1. SELECÇÃO

A selecção é a responsável pela perpetuação das boas características na espécie segundo a teoria de evolução de *Charles Darwin*.

É nesta etapa, selecção, que os indivíduos são escolhidos para posterior cruzamento. Neste ponto, fazendo uso do grau de adequação de cada um, é efectuado um sorteio onde os mais aptos possuem maior probabilidade de se reproduzirem. Este grau é calculado a partir da função de avaliação (*fitness*) de cada indivíduo, e determina o quão apto este se encontra para a reprodução em relação à população em que se insere.

Existem vários métodos de selecção, tais como:

Selecção por **Torneio**: Grupos de soluções são escolhidos sucessivamente e as que mais se adaptam são as que são seleccionadas. Este método assenta nas seguintes etapas [36]:

- São seleccionados uma série de indivíduos da população para torneio;
- De seguida entram em competição directa pelo direito de ser pai, usando como arma a sua *fitness*;
- Tamanho do torneio ( $k$ ): quantos competidores são seleccionados aleatoriamente dentro da população;
  - Mínimo de 2 indivíduos escolhidos. Ter em conta que usando-se para  $k$  o tamanho total da população, o vencedor será sempre o mesmo.

- Depois, dos indivíduos seleccionados para torneio, é escolhido para cruzamento aquele indivíduo que tiver melhor *fitness*. A figura 19 mostra um exemplo de selecção por este método.

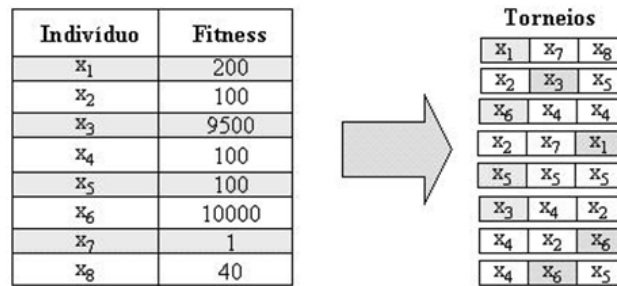


Figura 19 Exemplo de Selecção por Torneio [36]

Selecção **Uniforme**: Todos os indivíduos possuem a mesma probabilidade de serem seleccionados. Como tal, esta forma de selecção possui uma probabilidade muito remota de causar uma melhoria significativa na população sobre a qual actua;

Selecção **Elitista**: Garante a selecção dos melhores cromossomas da geração anterior;

Selecção por **Estado Estacionário**: A nova população deve ter uma grande parte de cromossomas que sobreviverão para a próxima geração. Para isso, poucos e bons cromossomas são seleccionados para a geração da descendência. A seguir alguns maus cromossomas são removidos e substituídos pelos novos descendentes.

Selecção por **Roleta**: Os pais são seleccionados de acordo com sua habilidade de adaptação. Quanto melhor forem os cromossomas, mais hipóteses de serem seleccionados terão. A probabilidade de selecção de um indivíduo é uma função do valor de *fitness*. A figura 20 apresenta um exemplo de selecção por roleta.

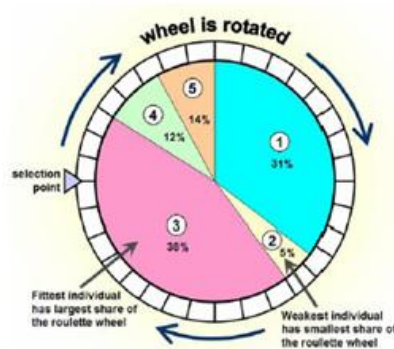


Figura 20 Selecção por Roleta [25]

Seleção por **Classificação/ Ranking**: Ordena a população e atribui a cada cromossoma um valor de adaptação determinado pela sua classificação. A probabilidade de selecção está relacionada com a sua posição. Na figura 21 pode-se observar a diferença entre as probabilidades de selecção para uma mesma amostra, utilizando o método da roleta (esquerda) e o método da classificação (direita).

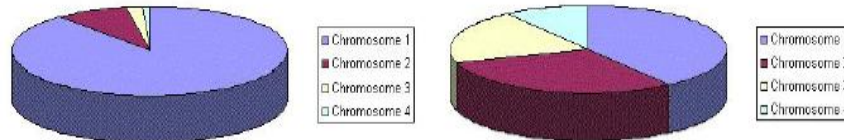


Figura 21 Seleção por Classificação (direita) [25]

### 3.2.6.2. CRUZAMENTO

O processo de cruzamento é utilizado após a realização da selecção. O cruzamento é o operador responsável pela recombinação de características dos pais durante a reprodução, permitindo que as próximas gerações herdem essas características. É considerado o operador genético predominante, por isso é aplicado com probabilidade dada pela taxa de cruzamento, que deve ser maior que a taxa de mutação.

**Um ponto de cruzamento (IPX)**: o ponto onde é realizada a quebra é escolhido aleatoriamente, ou a critério do programador, dentro da *string* que o representa. Baseado neste ponto, realiza-se a troca de informação entre os dois indivíduos.

**Cruzamento multiponto (MPX)**: semelhante ao anterior, porém a troca de segmentos é realizada com um número maior de intercalações, número este que é fixo sempre que executado.

**Cruzamento segmentado (SX)**: este tipo de cruzamento funciona de uma maneira semelhante ao multiponto, com a excepção de que sorteia o número de corte de todas as vezes que é executado.

**Cruzamento uniforme (UX)**: para cada gene a ser preenchido nos cromossomas filhos, o operador de cruzamento uniforme sorteia de qual dos pais deve ser gerado. A máscara de cruzamento é uma sequência qualquer representada por zeros e uns.

**Cruzamento por combinação parcial (PMX):** sorteia dois pontos de corte e faz com que os indivíduos filhos recebam na íntegra os genes do pai ou da mãe, ou seja, mãe para um e pai para o outro, situados entre os pontos de corte, depois disso preenche os genes restantes com valores mais adequados para cada filho.

### 3.2.6.3. MUTAÇÃO

De acordo com *John Holland*, a mutação é geralmente vista como um operador de *background*, responsável pela introdução e manutenção da diversidade genética na população [25]. Nesta etapa altera-se arbitrariamente um ou mais componentes de uma estrutura escolhida entre a descendência, logo após o cruzamento, fornecendo desta forma meios para a introdução de novos elementos na população. Assim, a mutação desempenha o papel de recuperador de materiais genéticos perdidos, funcionando como uma espécie de seguro contra a perda irreversível de material genético [23].

Exemplos de mutação são:

**Mutação por Intercâmbio:** São geradas aleatoriamente duas posições no cromossoma e os bits correspondentes às posições são intercambiados.

**Mutação por troca:** são sorteados  $n$  pares de genes e os elementos do par trocam de valor entre si;

**Mutação por Inversão:** É escolhida aleatoriamente uma posição no cromossoma e os *bits* próximos dessa posição são invertidos.

## 3.3. COMPUTAÇÃO EVOLUCIONÁRIA INTERACTIVA

De acordo com a *IEEE Computational Intelligence Society*, a Inteligência Computacional (IC) envolve quatro grandes áreas: Computação Evolucionária (CE) (Algoritmos Genéticos (AG) e Programação Genética (PG)), *Fuzzy Systems* (FS), Redes Neurais (RN) e Inteligência dos Enxames (IE). Além disso, a IC está relacionada com fractais e a teoria do caos. Sistemas baseados nestes modelos têm sido construídos e instalados em protótipos e bem-sucedidos em produtos para consumo. No entanto, a criatividade ainda é uma das principais características humanas, devido em grande parte à presença de valores subjectivos e respostas psicológicas/emocionais na avaliação de

objectos. Nesse sentido, a Computação Evolucionária Interactiva (CEI), um paradigma no qual os humanos intervêm directamente na avaliação de *fitness*, é uma nova direcção para a pesquisa na inteligência computacional. Arte, educação e engenharia são alguns exemplos para o domínio da aplicação de Computação Evolucionária Interactiva (CEI) [34].

### **3.3.1. O PROBLEMA DA AVALIAÇÃO DA *FITNESS***

Os princípios básicos que rodeiam os algoritmos evolutivos são: criação da população inicial, função de avaliação, operadores genéticos, elitismo, mutação e adaptação [32]. Como já foi referido, depois de criada a população (que poderá ser obtida a partir de um processo aleatório), esta vai ser avaliada através de uma função de avaliação (*fitness*) capaz de julgar a aptidão – atribuindo-lhe uma ‘nota’ ou ‘ranking’ – para cada indivíduo da população a cada geração produzida. Aqui se encontra um ponto nevrálgico do sistema, pois o que vem determinar esta função em questões da estética? Quais os parâmetros de avaliação de uma imagem, um ambiente, um som? Como avaliar a arte? Como definir uma função de avaliação estética? No caso de selecção estética são dadas ao utilizador escolhas que serão tomadas sob critérios altamente subjectivos, frequentemente descritos como “interessante”, “estranho”, “diferente” e assim por diante. E estes critérios fundamentarão a função de avaliação, pois através deles os indivíduos da população receberão ‘notas’ que os distinguirão entre si [32].

### **3.3.2. DIFERENTES APLICAÇÕES DESTES PRINCÍPIOS NA ARTE**

Segundo *Jon McCormack*, o *software* de *Richard Dawkins Blind Watchmaker* foi provavelmente o primeiro sistema a fazer uso de uma evolução estética via selecção. Num sistema estético evolucionário típico, um pequeno número (geralmente 16-24) de fenótipos é apresentado e o utilizador do sistema selecciona um ou mais deles de acordo com um critério subjectivo. Operações de cruzamento ou mutação são processadas nos fenótipos (aquele estado que é criado pelo artista através de uma série de instruções, regras sobre interacções, operações etc.) que produzem os fenótipos seleccionados (aquele estado experienciado pelo utilizador). Isto resulta numa nova série de descendentes, cujos fenótipos são apresentados para o utilizador seleccionar novamente. O processo é repetido até o utilizador estar satisfeito com o resultado ou não desejar continuar mais [32].

Galápagos é uma evolução *Darwiniana* interactiva de organismos virtuais. Doze computadores simulam o crescimento e o comportamento de uma população de formas animadas abstractas em doze ecrãs dispostos em arco. Os visitantes participam nesta exibição seleccionando quais os organismos que consideram esteticamente mais interessantes e ficam em degraus sensoriais que estão à frente do ecrã. Os organismos seleccionados sobrevivem, acasalam, sofrem mutações e reproduzem-se. Os que não são seleccionados são removidos e os seus computadores são habitados pela descendência dos que sobreviveram. A descendência é uma cópia e combinações dos seus pais, mas os seus genes são alterados por mutações aleatórias. Por vezes, a mutação é favorável e o novo organismo é mais interessante que os seus antecessores, e é seleccionado pelos visitantes. À medida que esta selecção e ciclo de reprodução continua, mais organismos interessantes podem aparecer. A figura 22 mostra uma imagem da aplicação Galápagos.



**Figura 22 Galápagos [34]**

Já que o código genético e a complexidade de resultados são geridos pelo computador, os resultados não são obtidos pelos limites de habilidade e compreensão humanas.

Aplicações relacionadas com a música podem ser consultadas no capítulo seguinte desta dissertação.

### **3.3.3. CEI - FUNDAMENTOS**

Entre outras características, uma avaliação interactiva é caracterizada por:

1) Avaliação do fenótipo. Avaliação humana requer que cada solução seja mostrada como ela é. Cada genótipo deve ser transformado no seu fenótipo correspondente antes que

a avaliação humana comece. Por exemplo, a melodia deve ser ouvida pelo utilizador; não faz sentido avaliar olhando para o seu genótipo, já que a sua beleza não terá o impacto emocional desejado. Nos AGs tradicionais, pelo contrário, é avaliado o genótipo.

2) Fadiga do utilizador. Na CEI, os humanos competem com incansáveis computadores. Por isso, a fadiga do utilizador é o maior problema. Algumas aproximações seguem:

a) População pequena: nos AGs clássicos, a população pode ser de centenas a milhares de indivíduos. Uma avaliação de tal número de indivíduos seria extremamente fatigante para os humanos. Como tal, na CEI as populações são pequenas ou os indivíduos que são escolhidos para avaliação interactiva são poucos. A avaliação tradicional da *fitness* em AG é feita individualmente.

b) Pequeno número de interacções: nos AGs clássicos, o número de interacções pode ser muito alto. Na CEI não é possível lidar com a fadiga do utilizador. Como tal, na CEI a convergência tem que ser rápida e efectiva.

c) Possibilidade de exclusão: a avaliação interactiva permite que o utilizador exclua imediatamente alguns indivíduos pelo seu claro distanciamento ao objectivo. Nos tradicionais AGs, algumas más soluções podem ser escolhidas para manter a diversidade (material genético).

#### **3.3.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

O paradigma CEI é baseado nos modelos computacionais que necessitam de uma intervenção humana activa e directa, tal como é ilustrado na figura 23. Nestas técnicas, os valores adequados, expressos pelos valores *fitness* dos algoritmos CE, são determinados pelo humano. O esquema geral do algoritmo CEI é muito simples: o utilizador interage com o sistema através de uma interface que avalia o *output* relacionado com a aplicação CE, responsável por aplicar mecanismos de cruzamento e mutação de modo a produzir a próxima geração baseada na selecção do utilizador. Consequentemente, a técnica CEI permite seleccionar as preferências do utilizador que incluem a sua intuição, emoções e outros aspectos psicológicos.

O maior problema é a fadiga do utilizador de CEI, que coloca o humano contra incansáveis computadores. Várias pesquisas, incluindo mecanismos automáticos e de

avaliação humana, têm sido usados para ultrapassar este problema, mas enquanto as máquinas não sentirem emoções ou sentido estético, parece que ainda há um longo caminho a percorrer.

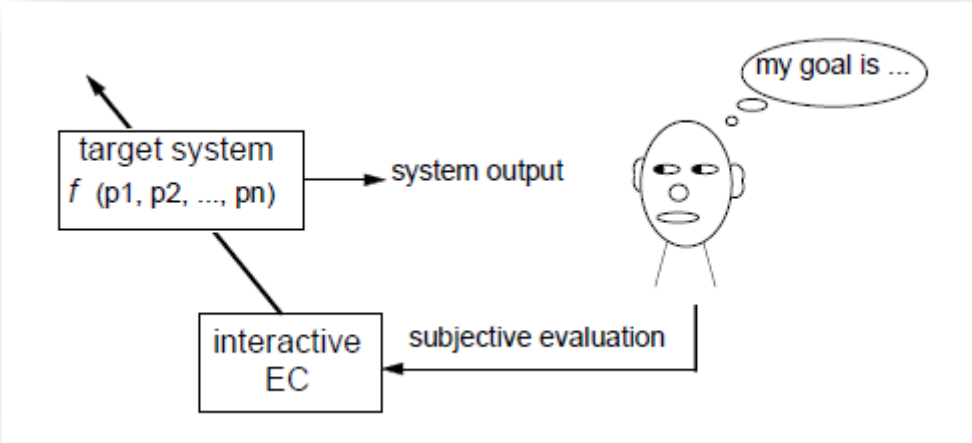


Figura 23 Esquema CEI [42]

# 4. COMPUTAÇÃO MUSICAL COM ALGORITMOS GENÉTICOS

Este capítulo descreve trabalhos já realizados no âmbito da computação musical, com especial foco para os que implementam algoritmos evolutivos, algoritmos genéticos, aplicados à composição musical.

Hoje em dia existem já muitas aplicações e desenvolvimentos na área da música, sendo a composição musical um tema bastante predilecto no que diz respeito a aplicações com algoritmos genéticos.

## 4.1. ALGORITMO GENÉTICO QUE GERA SOLOS DE JAZZ

Dos vários géneros e estilos musicais que existem, sem dúvida o *Jazz* é dos que terá mais aficionados e dos que atravessará mais barreiras culturais. Isto acontece visto que este género musical é praticado por todo o mundo, tem origem na mistura de várias tradições/géneros musicais [26]. Talvez por esse facto existam já alguns trabalhos com algoritmos evolutivos que pretendam compor músicas desse estilo musical.

Um desses exemplos está presente em [1], e é chamado de *GenJam*. Este é um modelo de algoritmo genético que funciona como um iniciante de jazz que começa por aprender e improvisar (baseado num músico de jazz novato a aprender a improvisar). Os solos são gerados através de um mapeamento que indica as escalas que devem ser

utilizadas no solo de acordo com o acorde da progressão harmónica em que se encontra. Esses solos são tocados sobre uma secção harmónica e rítmica padrão, o que permite uma avaliação em tempo real sobre o desempenho do solo gerado, sendo esta avaliação usada como valor da *fitness* de cada compasso e frase de cada solo. De seguida, os solos são submetidos a vários agentes de reprodução/operadores genéticos no sentido de obtenção de melhorias nas próximas gerações.

O *GenJam* executa em três modos: *learning*, *breeding* ou *demo*. O modo *learning* destina-se a construir valores de *fitness* e não usa operadores genéticos. No modo *breeding*, aplicam-se os operadores genéticos e metade da população é substituída por descendentes mais fortes (com melhor *fitness*), ainda antes do solo ser sujeito a nova avaliação. O modo *demo* é designado como um modo de “performance”. As frases são seleccionadas pelo método de selecção por torneio, que considera a *fitness* de cada frase e de cada compasso que as constituem, sendo a avaliação ignorada. De uma forma sucinta, o algoritmo assenta no seguinte:

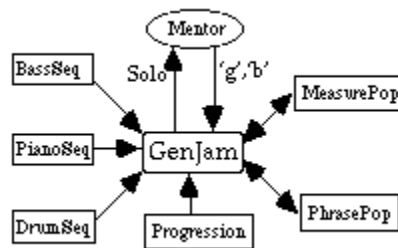


Figura 24 Esquema do Algoritmo *GenJam* [1]

Como já foi dito, os solos são tocados sobre uma secção harmónica e rítmica padrão. Para isso, o *GenJam* lê um ficheiro de progressão, ainda antes de ser gerado o solo, que define o tempo, o estilo rítmico (*swing* ou não), o número de *choruses* (número de vezes que é repetida a estrutura/progressão até ao fim durante o solo) de solo e a progressão harmónica. É através desta informação que será gerado o solo. São lidas também as sequências *MIDI* (*Musical Instrument Digital Interface*) de piano, baixo e bateria pré-geradas, que providenciam a secção harmónica e rítmica padrão. A figura 24 demonstra a arquitectura do *GenJam*. O *GenJam* improvisa uma melodia construindo eventos *MIDI* descodificados de membros das populações de frases e/compassos, sendo que cada frase é implementada como uma sequência de 4 compassos.

1. Enquanto se ouve a melodia gerada, o *mentor* (responsável pela avaliação) vai, em tempo real, fazendo a avaliação do que vai ouvindo. À medida que o solo toca, o mentor avalia o seu desempenho pressionando “g” se estiver bem (“good”), ou

“b” (“bad”) se estiver a mal. São incrementados valores unitários (+1) à *fitness* do solo em questão sempre que o mentor pressionar “g”, e feito um decremento (-1) sempre que este pressiona “b”. Desta forma é calculada a *fitness* da frase gerada.

Existe neste algoritmo um facto que o torna um pouco diferente do que o que normalmente se encontra em aplicações que recorrem a algoritmos genéticos. Neste caso não existe apenas uma população, mas sim duas (figura 25). Uma população representa compassos, e a outra frases. Tal como já foi referido anteriormente, as frases são compostas por 4 compassos. Assim, tem-se um esquema cooperativo de representação binário de dois níveis. Desta forma, a população de frases é um vector que guarda 4 valores que funcionam como apontadores para a população de compassos. Os tamanhos das populações são de 48 frases e 64 frases sendo que o valor 64 foi escolhido de forma a maximizar a eficiência na representação das frases. Tanto as frase como os compassos são representados na forma de *string*'s: 32 bits para os compassos, 24 para as frases.

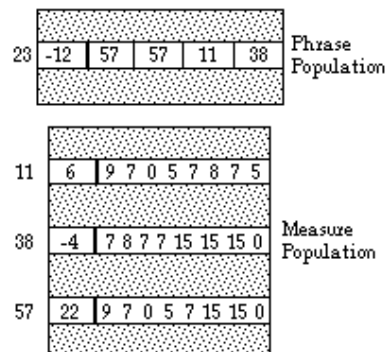


Figura 25 Populações do *GenJam*[1]

- Relativamente aos operadores genéticos, usando o *GenJam* no modo *breeding*, a selecção e a substituição são usadas em conjunto aplicando a selecção por torneio. São seleccionados 4 indivíduos aleatoriamente. Desses quatro, os dois com maiores valores de *fitness* são escolhidos como pais, e os outros dois são substituídos pela descendência dos anteriormente escolhidos como pais.
- O *GenJam* executa um cruzamento padrão de um só ponto, num local aleatório da *string* que representa a frase ou compasso. Desses dois filhos gerados, um é mantido intacto, enquanto que o outro é submetido a um dos muitos operadores de mutação.

## 4.2. COMPOSITOR DE MÚSICA GENÉTICO

Um outro trabalho que assenta na composição de música está relatado em [27]. Neste caso, existe um modelo de composição musical que gera ritmos padrões através de um sistema baseado em algoritmos genéticos com interacção de vários músicos.

Este trabalho possui dois níveis de abstracção. O primeiro considera um grupo de vários músicos artificiais (AMG – *Artificial Musicians Group*) com diferentes papéis e regras, mas cujo trabalho em comum resulta na composição final. Cada elemento tem o comportamento definido e faz assim parte do sistema global de acções de acordo com o seu papel. O segundo nível é integrado por todas as populações de sequências musicais associadas a cada elemento do nível um de abstracção. De uma forma sucinta, é o somatório de AMG diferentes.

Foi implementada uma estrutura de dados simples e prática de forma a ser possível incorporar os conceitos básicos do modelo descrito anteriormente. ( A estrutura de dados que possibilitasse o prático uso de algoritmos genéticos foi pensada para que fosse possível incorporar os conceitos básicos do modelo descrito anteriormente). A informação individual de cada elemento é registada independentemente numa matriz binária unidimensional. Nessa matriz é guardada a posição de cada ritmo padrão. Assim, uma posição activa da matriz produzirá o som associado ao músico artificial e uma não activa produzirá uma pausa (silêncio). A figura 26 demonstra a estrutura de um AMG.

Dado o carácter interactivo do modelo, restringiu-se o número da população de AMG a 10, uma vez que será necessária a avaliação humana não só dessas 10 AMG mas também das gerações seguintes.

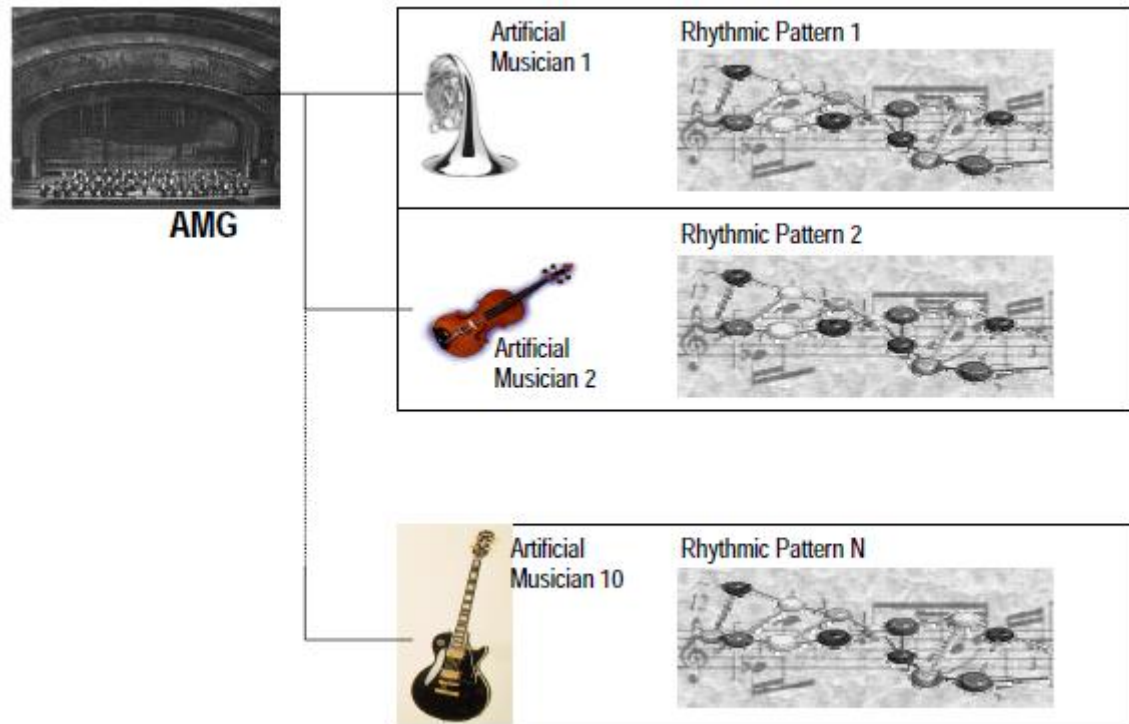


Figura 26 Estrutura de um AMG [27]

#### 4.2.1. AVALIAÇÃO

Depois de gerados os temas, é feita uma avaliação de cada um deles, dando uma cotação de 0 a 100.

#### 4.2.2. SELECCÃO

Nesta fase, os AMG cuja *fitness* se encontrar no intervalo definido pelas seguintes equações são os únicos seleccionados para evoluir (através de cruzamento e mutação, posteriormente).

$$X = \min(P_i)$$

$$Y = \Gamma(\max(P_i) - \min(P_i)) + X$$

$$\forall i / P_i \in [X, Y] \rightarrow AMG_i \text{ evoluir}$$

Onde  $P_i$  é a *fitness* de cada AMG. O cociente de aprendizagem  $\Gamma$ , foi definido 0,3 para garantir a estabilidade e adaptabilidade do modelo.

Para se escolher uma dupla de AMG para cruzamento é usado um esquema que atribui uma probabilidade a cada AMG, em proporção com a sua *fitness*. Desta forma os melhores indivíduos têm maior probabilidade de serem seleccionados, não descartando a possibilidade dos menos bons deixarem descendência.

#### **4.2.3. CRUZAMENTO E MUTAÇÃO**

Uma vez seleccionados os indivíduos, o cruzamento dá-se de forma independente para cada músico artificial. Assim, é escolhido aleatoriamente um ponto da sequência e uma ordem. O ponto define onde a segunda sequência é usada para a criação do segundo músico e dependendo da ordem, uma das duas novas sequências é escolhida.

No caso da mutação, para que houvesse um equilíbrio entre este operador genético e o grau de evolução entre as diferentes gerações, o cociente de mutação é definido como sendo o inversamente proporcional ao  $P_i$  do AMG.

Toda a informação gerada ao longo de todo este processo, incluindo todos os indivíduos que foram “eliminados” em conjunto com a avaliação/*fitness* que o utilizador atribuiu, é guardada numa base de dados para que no futuro se possa eventualmente aproveitar essas informações para posteriores desenvolvimentos.

### **4.3. ALGORITMO DE COMPOSIÇÃO MUSICAL INTERACTIVO**

Vox Populi é um ambiente que utiliza computação evolucionária aplicada à composição musical [31]. Neste trabalho, a abordagem é diferente da que normalmente se aplica com algoritmos genéticos, essencialmente no que diz respeito à função de avaliação. Ao invés de ser o utilizador a ouvir e a avaliar a *fitness* de cada indivíduo, existe uma interface gráfica que permite ao compositor interferir na música através do rato ou de outro periférico. O sistema parte do princípio de que uma peça musical consiste em vários conjuntos de material bruto manipulados e expostos ao ouvinte como harmonias, ritmos, timbres, etc. Estes conjuntos são compostos por um número finito de elementos, e o objectivo básico do compositor é organizá-los de forma estética. Modelar uma peça musical como um sistema dinâmico implica uma visão em que o compositor desenha trajetórias ou órbitas usando os elementos de cada conjunto [32].

Neste trabalho, os indivíduos da população são compostos por grupos de 4 notas, ou acordes, que se sujeitarão à selecção para cruzamento. Assim, cada indivíduo da população é definido com 4 vozes, ou notas, recorrendo ao protocolo *MIDI*. Essas notas são aleatoriamente escolhidas no intervalo de 0-127, de acordo com a codificação *MIDI* (cada número corresponde a uma nota). Em cada interacção são gerados 30 grupos.

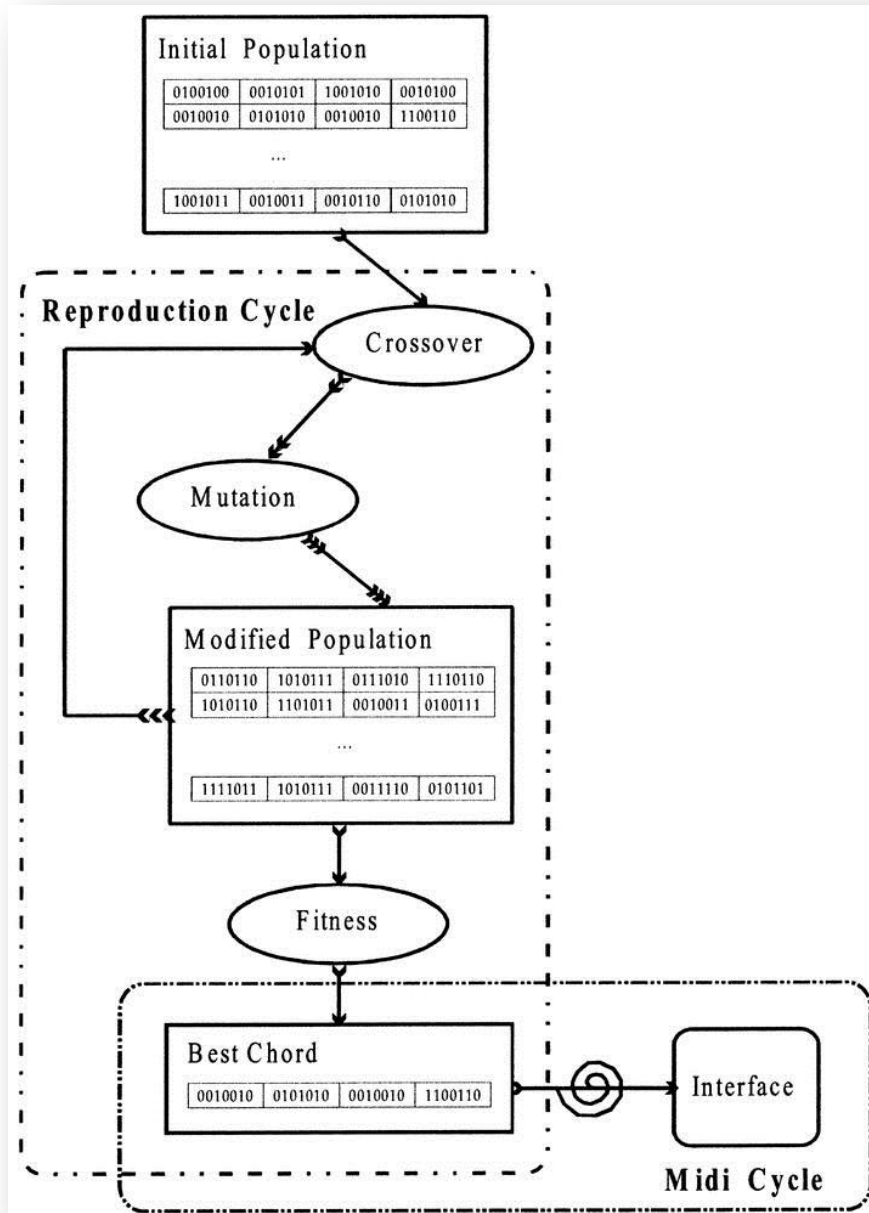


Figura 27 População de Vox Populi – Cromossoma *MIDI* [31]

A figura 27 mostra um exemplo de um grupo – genótipo – internamente representado como um cromossoma de 28 *bits*, ou 4 palavras de 7 *bits*, uma palavra por cada voz. O fenótipo corresponde ao acorde.

Existem dois tipos de processos:

Ciclo de Reprodução ( <i>Reproduction Cycle</i> )	Processo que gera acordes usando operadores genéticos e selecção de indivíduos
Ciclo <i>MIDI</i> ( <i>MIDI Cycle</i> )	Uma interface pesquisa as notas para serem tocadas pelo computador. Quando um acorde é seleccionado, fica na área de avaliação que é continuamente verificado pela interface. Essas notas são tocadas até ao próximo grupo ser seleccionado.

A função de avaliação foi dividida em três partes: *fitness* melódico (*Melodic Fitness*) + *fitness* harmónico (*Harmonic Fitness*) + *fitness* extensão vocal (*Vocal Range Fitness*).

A *melodic fitness* é avaliada através da comparação das notas que compõe o acorde para um valor *Id* (identidade), que pode ser alterado pelo utilizador em tempo real directamente na interface. Este controlo força as notas do acorde seleccionado a serem próximas do valor de identidade (*id*), e acaba por actuar como um centro tonal. A *harmonic fitness* é uma função da sintonia entre os componentes dos acordes. A *vocal range fitness* verifica se as notas do acorde estão na extensão desejada pelo utilizador, que aliás pode modificar através do controlo de oitava.

A interface desta aplicação é ilustrada na figura 28. Para controlar a composição, existem vários controlos. Entre os quais se encontram um controlo melódico (barra de *scroll mel*) que permite ajustar o centro tonal; controlo biológico (barra de *scroll bio*) que permite interferir na duração dos ciclos genéticos; controlo rítmico (barra de *scroll rhy*), que permite alterar o tempo para que se produza uma nova geração, alterando o tempo entre avaliações; existem também controlos de oitava (barra de *scroll oct*), orquestra (barra de *scroll seg*), e um *pad* interactivo que permite ao utilizador desenhar a curva que determina a evolução da música.

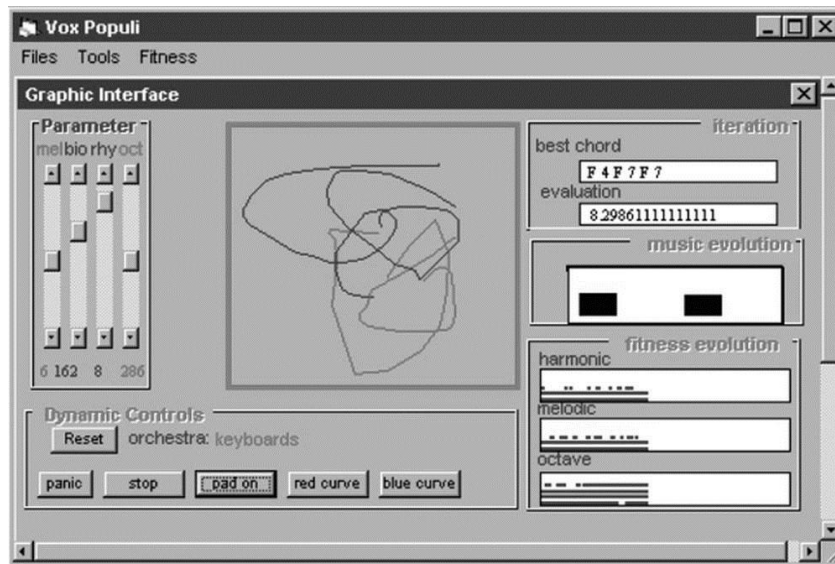


Figura 28 Interface de Controlo

#### 4.4. OUTROS TRABALHOS

Existem muitos outros trabalhos que vêm sendo desenvolvidos nesta área e recorrendo a estas técnicas. O *CONGA* (*Composition in Genetic Approach*) é um sistema baseado em computação evolucionária que gera padrões rítmicos. A grande característica deste projecto é a combinação de programação genética com algoritmos genéticos. Neste sistema, os indivíduos AG representam porções de ritmos padrões, enquanto que os PG expressam como esses padrões se organizam ritmicamente [33].

*Gibson e Byrne* desenvolveram um AG para produzir e combinar fragmentos musicais e redes neuronais para avaliar as suas *fitness*. Desde 1996 que *Rodney Waschka II* tem usado AG para composição musical, incluindo trabalhos como o *Saint Ambrose* e os seus quartetos de cordas.

*Thywissen* desenvolveu um sistema de composição chamado *GeNotator* que aplica AG a vários aspectos da composição, a diferentes níveis de abstracção [9].



# 5. TRABALHO DESENVOLVIDO

Neste capítulo apresenta-se o trabalho desenvolvido. São descritas as fases de desenvolvimento do projecto, com uma abordagem mais focada e detalhada dos aspectos mais relevantes e fulcrais.

## 5.1. ESTRUTURA DO TRABALHO DESENVOLVIDO

Este trabalho está dividido em duas grandes fases: a primeira assenta na recolha de dados estatísticos sobre os dois géneros musicais escolhidos para que na segunda fase, recorrendo a esses dados, se desenvolva a população inicial para o algoritmo genético.

Assim:

Recolha de dados estatísticos sobre os géneros musicais escolhidos;

Desenvolvimento da aplicação;

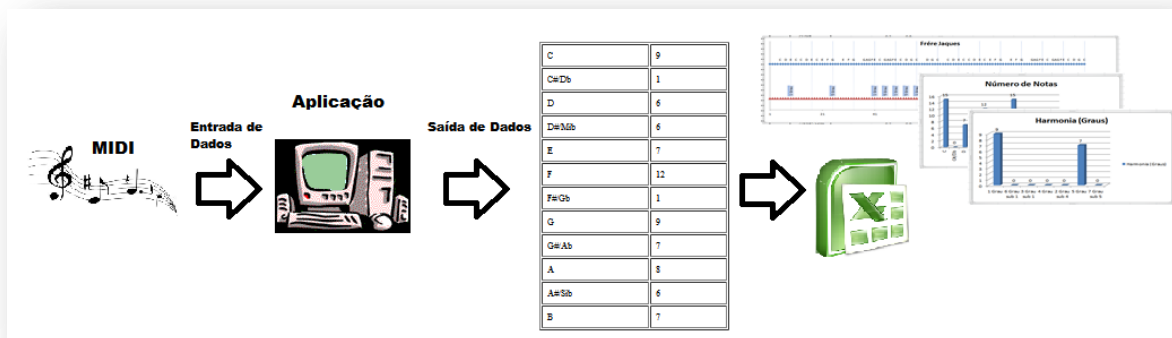
## 5.2. PRIMEIRA FASE

Na primeira fase foi necessário recolher dados estatísticos sobre músicas dos géneros musicais escolhidos, músicas para crianças e músicas do género *blues*. Pretendia-se então fazer um levantamento estatístico sobre a proporção que cada nota apresenta em cada um dos géneros musicais. Para isso, foram escolhidas quinze músicas de cada género de forma

a que se recolhessem esses dados para posteriormente serem usados na segunda fase. Assim, foi desenvolvida, em *Java*, uma aplicação que analisa cada uma das músicas e que tem como *output* os dados que se pretendem, disponibilizados em tabelas para um fácil tratamento dos mesmos. As músicas analisadas podem ser consultadas na secção de anexos deste relatório.

### 5.2.1. MODO DE FUNCIONAMENTO

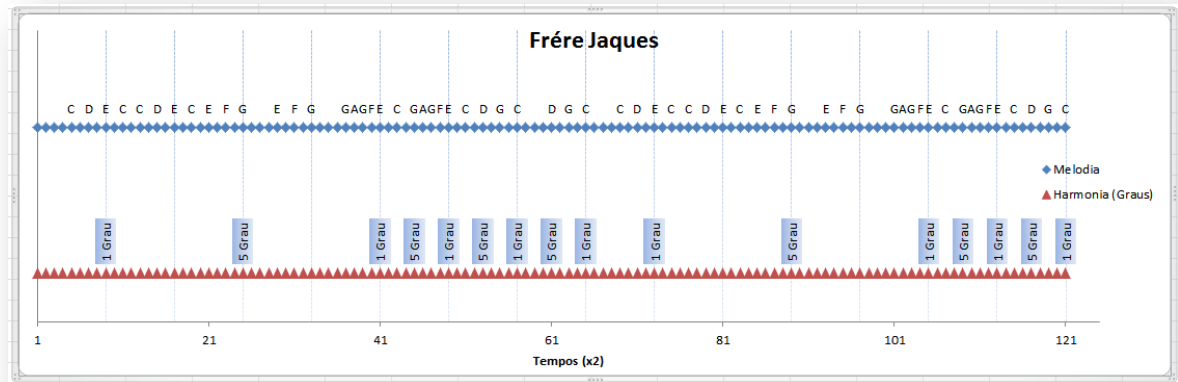
A aplicação funciona de modo bastante simples. Admite ficheiros *MIDI* como entrada e depois trata-os de forma a que no final seja criado um ficheiro contendo os dados pretendidos. O objectivo é a obtenção, numa tabela, da contagem do número de cada diferente nota presente na música analisada. Para que os dados finais fossem válidos e realmente fizessem sentido, optou-se por manter todas as músicas numa mesma tonalidade (Dó Maior para as músicas para crianças, modo de Fá para as músicas *blues*), para que o leque de notas usadas em cada uma delas fosse o mesmo. Só assim faria sentido fazer-se um estudo estatístico do género. Deste modo, os dados de cada música são armazenados e disponibilizados em tabelas num ficheiro *html* individual. De seguida, partindo desses dados recorre-se ao *Excel* para elaborar os gráficos. A figura 29 ilustra as diferentes etapas de actuação da primeira fase.



**Figura 29 Estrutura de Funcionamento da Aplicação na Primeira Fase**

É importante referir que a informação que se pretende extrair das músicas para crianças diverge da que se pretende das músicas *blues*. De acordo com a teoria musical, é importante existir e definir-se uma estrutura harmónica que servirá como base de qualquer melodia. E enquanto para o caso dos *blues* existem definidas estruturas harmónicas padrão, no caso das músicas para crianças isso não existe. Desta forma, optou-se por fazer um

levantamento de quais os graus (acordes) que são mais utilizados neste género musical para ser possível avançar para a segunda fase com uma base científica fiável.<sup>2</sup> Assim, enquanto para o caso das músicas *blues* se pretendiam apenas as proporções do uso de cada nota, no caso das músicas para crianças pretendia-se também saber quais os graus mais utilizados na sua harmonização. A figura 30 demonstra um exemplo do resultado final da análise das músicas infantis.



**Figura 30** Exemplo de Gráfico em que se Podem Ver não só a Disposição das Notas, mas também o seu Acompanhamento Harmónico (música para crianças, Frère Jaques)

### 5.2.2. DESENVOLVIMENTO DA APLICAÇÃO

Como já referido anteriormente, a aplicação foi desenvolvida em *Java*, usando especificamente a *Java Sound API*. Esta fornece interfaces e classes de dados I/O, sequenciador e síntese de *MIDI* [28].

A especificação *MIDI* define a forma como os comandos e mensagens devem ser estruturados para que seja possível a comunicação ente os diversos equipamentos. O protocolo *MIDI* possui vários tipos de mensagens que podem ser agrupadas em dois grandes grupos:

1. Mensagens de Canal;
2. Mensagens de Sistema.

---

<sup>2</sup> Este tema será explicado de forma mais explícita e aprofundada na segunda fase Capítulo 5.3.3.1

As primeiras, como o próprio nome indica, só farão efeito no canal em questão para o qual se envia a mensagem. As segundas afectam todo o sistema [29,30].

O protocolo *MIDI* tem definido vários tipos de mensagens de canal. Entre elas encontram-se:

- NoteOn/NoteOff* (Nota);
- AfterTouch* (Mono e Poly);
- ControlChange* (Controladores);
- PitchBend*;
- ProgramChange* (Programas);
- Etc...

Para este trabalho, interessa principalmente apenas uma destas mensagens de canal, a *NoteOn/NoteOff*. Isto porque, sendo necessário fazer a contagem de cada nota, e então focando-se como objectivo “filtrar” os eventos *MIDI* que correspondem a mensagens de *NoteOn/NoteOff* permitia descortinar as notas. De seguida descodifica-se qual a nota que aquele evento estaria a reproduzir e assim fazer a sua contagem.

### 5.2.3. ESQUEMA E LÓGICA FUNCIONAL DA APLICAÇÃO

A aplicação está dividida em três classes: *LerMidi*, *DumpReceiver* e *tratamgs* (ver figura 31). Cada uma delas tem, logicamente, a sua funcionalidade. A primeira é a mais simples, uma vez que apenas é responsável por carregar o ficheiro *MIDI* que contém a música a ser analisada, reconhecer todos os eventos *MIDI* que ocorrem nesse ficheiro, e, de evento em evento, chamar um método de uma das outras classes para que se recolham as informações necessárias.

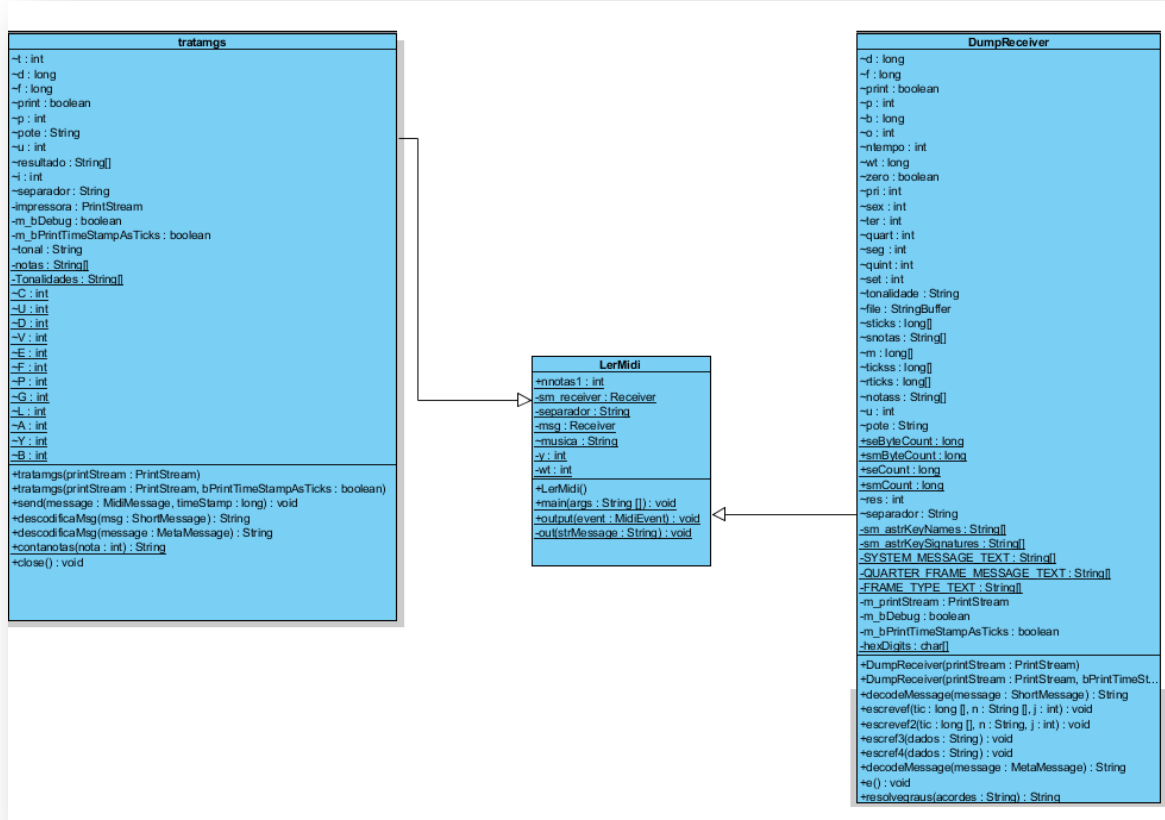


Figura 31 Representação UML das Classes da Aplicação

A classe *tratamsgs* é responsável por fazer a contagem das notas. Quando, na classe *LerMidi* se “detecta” um evento, é chamado um outro método, *output(MidiEvent event)*, que recebe como argumento o evento, e dele retira a mensagem *MIDI* que despoletou esse mesmo evento. Seguidamente, é invocado o método *send(MidiMessage message, long timeStamp)* da classe *tratamsgs*, através de um objecto do tipo *tratamsgs* declarado em *LerMidi* (*msg*), que recebe como argumentos a mensagem *MIDI* e a informação indicadora da posição onde o evento se encontra no ficheiro *MIDI*, o *tick* (cada evento que é gerado num ficheiro *MIDI* tem uma posição associada, *tick*).

O método *send* é responsável por filtrar as mensagens que chegam. De acordo com a sua *instância*, e sabendo através da API que as mensagens que geram notas são instâncias de *ShortMessage*, esse método filtra as mensagens que são dessa instância (ver figura 32). Imediatamente, é chamado o método *descodificaMsg(ShortMessage msg)* que será o responsável por descortinar quais as mensagens que são uma instância das *ShortMessage*, são responsáveis pela geração de notas (*NoteOn*).

Finalmente é invocado o método *contanotas(int nota)*, que faz a contagem do número de vezes que cada nota aparece ao longo de cada música.

```
public void send(MidiMessage message, long timeStamp) {  
  
    String MSG = new String();  
    if (message instanceof ShortMessage)  
    {  
        MSG = descodificaMsg((ShortMessage) message);  
    }  
    if (message instanceof MetaMessage)  
    {  
        MSG = descodificaMsg((MetaMessage) message);  
    }  
}
```

**Figura 32** Excerto de Código – Método *send* Responsável pelo Descortinar da Instância das Mensagens *MIDI*

A classe *DumpReceiver* tem a mesma estrutura lógica que a *tratamgs* mas apenas é usada para as músicas para crianças. Como foi referido anteriormente, a informação que interessa retirar das músicas para crianças é diferente da que é importante para as músicas *blues*. Assim, esta classe é responsável por recolher a informação sobre a estrutura harmónica das músicas para crianças. Após a realização da contagem das notas presentes na melodia das músicas para crianças, é chamado então o método *send(MidiMessage message, long timeStamp)* dessa classe que fará exactamente o mesmo que a sua homónima da classe *tratamgs*. A lógica é a mesma, são filtradas as mensagens *MIDI* responsáveis pela geração de notas. A diferença é que neste caso efectuem-se agrupamentos de três notas, porque a informação que se pretende, a estrutura harmónica, é formada através de acordes, que são feitos pela execução de três notas em simultâneo (logo mesmo *tick*).

Depois de agrupadas as três notas, existe um método, *resolvegraus(String acordes)*, que fará a conversão do acorde para o respectivo grau, obtendo-se como resultado final uma tabela de duas colunas em que na primeira se tem a melodia, e na segunda o grau harmónico associado ao acorde que é usado naquela parte da melodia.

Para finalizar é possível traçar um gráfico como o presente na figura 30, que permite uma visualização global da disposição de notas e do respectivo grau harmónico que está a ser usado ao longo da melodia. A resolução temporal é dada pela figura rítmica presente na música, que tem menor duração.

Este código está disponível na secção de anexos deste relatório.

#### 5.2.4. RESULTADOS

Pela análise de todas as músicas dos dois géneros, foi possível obter-se as estatísticas pretendidas. Assim, recolheram-se dados sobre a proporção da existência de cada diferente nota em cada estilo musical e a informação sobre os graus (acordes) mais usados na harmonização das músicas para crianças. Esta informação pode ser visualizada nos gráficos das figuras 33, 34 e 35.

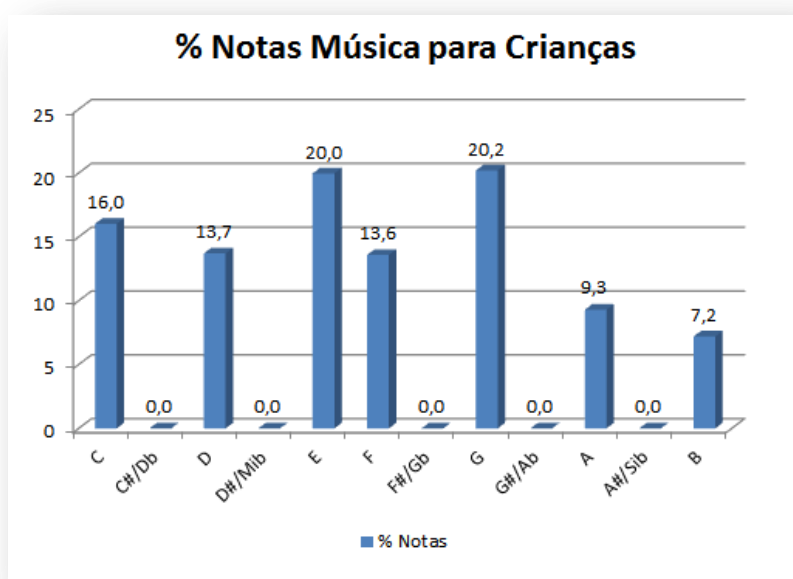
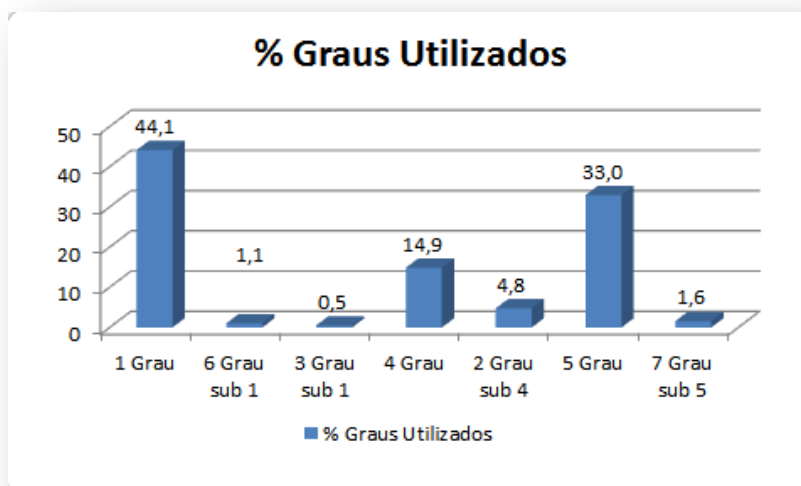
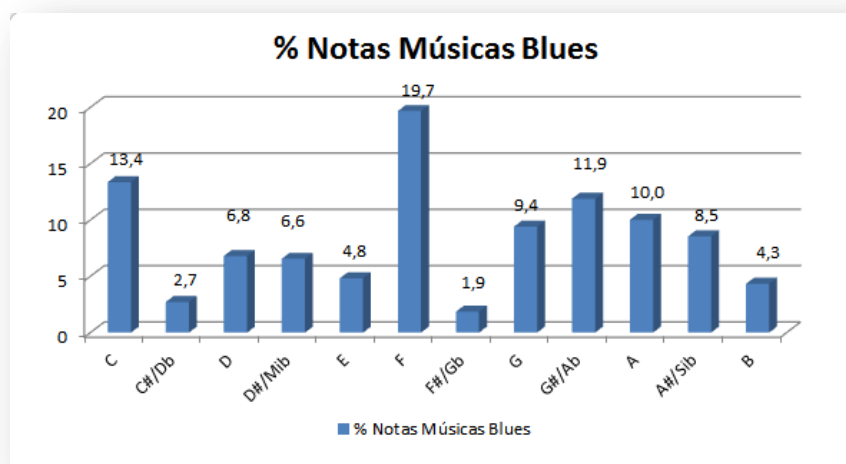


Figura 33 Resultados Obtidos - % de Cada Nota em Músicas para Crianças



**Figura 34 Resultados Obtidos - % de Graus Usados na Harmonização das Músicas para Crianças**



**Figura 35 Resultados Obtidos - % de Cada Nota em Músicas Blues**

Analisando os resultados, verifica-se que nas músicas para crianças existem imensas notas que não aparecem uma única vez em todas as músicas. Isto justifica-se pois este é um género musical perfeitamente tonal. Tendo também em consideração a tonalidade em que todas as músicas se encontravam, Dó Maior, é normal só se encontrarem notas que fazem parte dessa tonalidade (Dó, Ré, Mi, Fá, Sol, Lá e Si). De notar também, que os graus mais usados, como já esperado, foram o 1º, 4º e 5º.

Outra conclusão importante desta análise é o facto de se verificar a existência de um padrão a nível frásico que estava presente em praticamente todas as músicas. Todas elas assentavam numa estrutura de 16 compassos, regra geral binário, nos quais existiam,

maioritariamente, apenas duas frases distintas com a duração de quatro compassos. Assim, a estrutura geral das músicas infantis baseia-se num sistema de *pergunta-resposta*, que pode ter duas formas: AABB ou ABAB (figuras 36 e 37). Isto é, ou se repetem as duas frases consecutivamente, ou então elas aparecem intercaladas. Esta viria a ser uma regra usada posteriormente na criação da população inicial do algoritmo genético.

Nos *blues*, de notar que, ao contrário do que acontece nas músicas para crianças, se usam todas as notas, sendo a que mais vezes aparece o Fá, consequência de todas as músicas se encontrarem no modo de Fá. Este género musical tem uma estrutura definida de 12 compassos, quaternários.

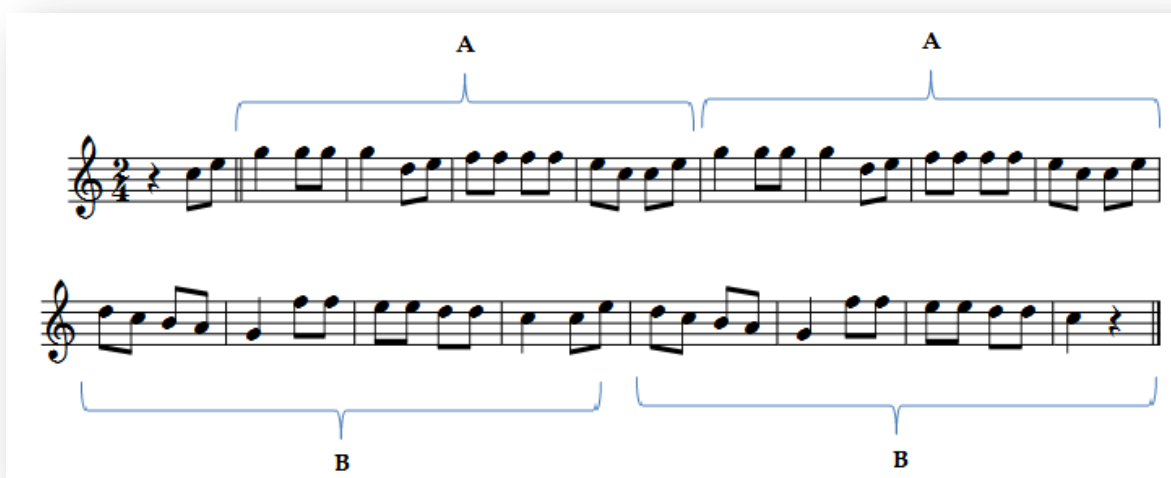


Figura 36 Estrutura Frásica AABB (forma) – A Caminho de Viseu

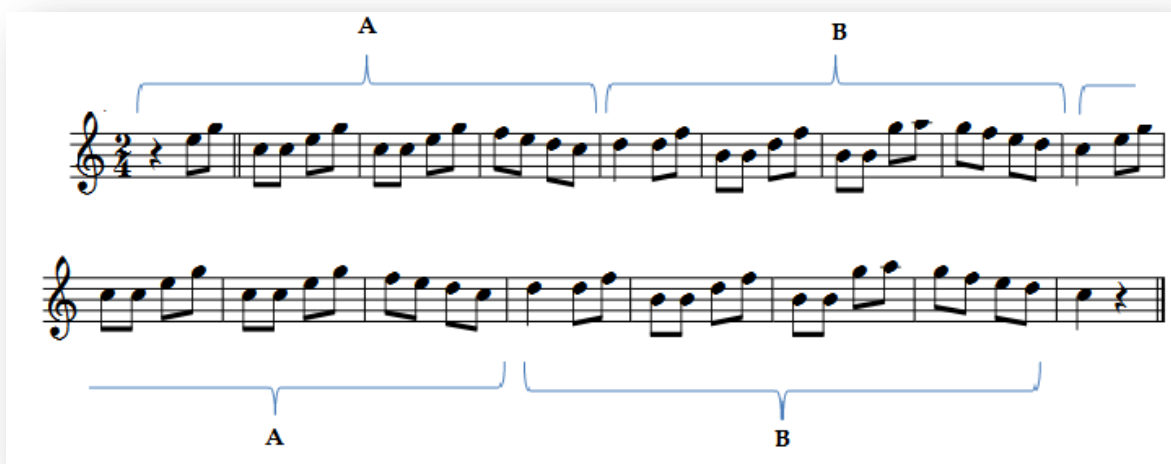


Figura 37 Estrutura Frásica ABAB (forma) – 3 Pombinhas

### 5.3. SEGUNDA FASE

Após a recolha dos dados necessários para servirem de base à geração da população inicial do algoritmo genético, partiu-se então para a segunda fase. Como se sabe e fazendo um ponto da situação, pretende-se realizar um *software* com habilidades artísticas no que diz respeito à composição musical, usando algoritmos genéticos. Pretende-se que o *software* componha músicas de dois géneros: música infantil e música do género *blues*. Para isso elaborou-se um levantamento a vários níveis sobre os dois géneros musicais de forma a serem estabelecidas regras para a criação da população inicial do algoritmo genético.

Como objectivo final pretende-se desenvolver uma aplicação que permita ao utilizador escolher um desses géneros musicais, e que o *software* componha melodias de acordo com a escolha do utilizador.

#### 5.3.1. ESTRUTURA DA APLICAÇÃO

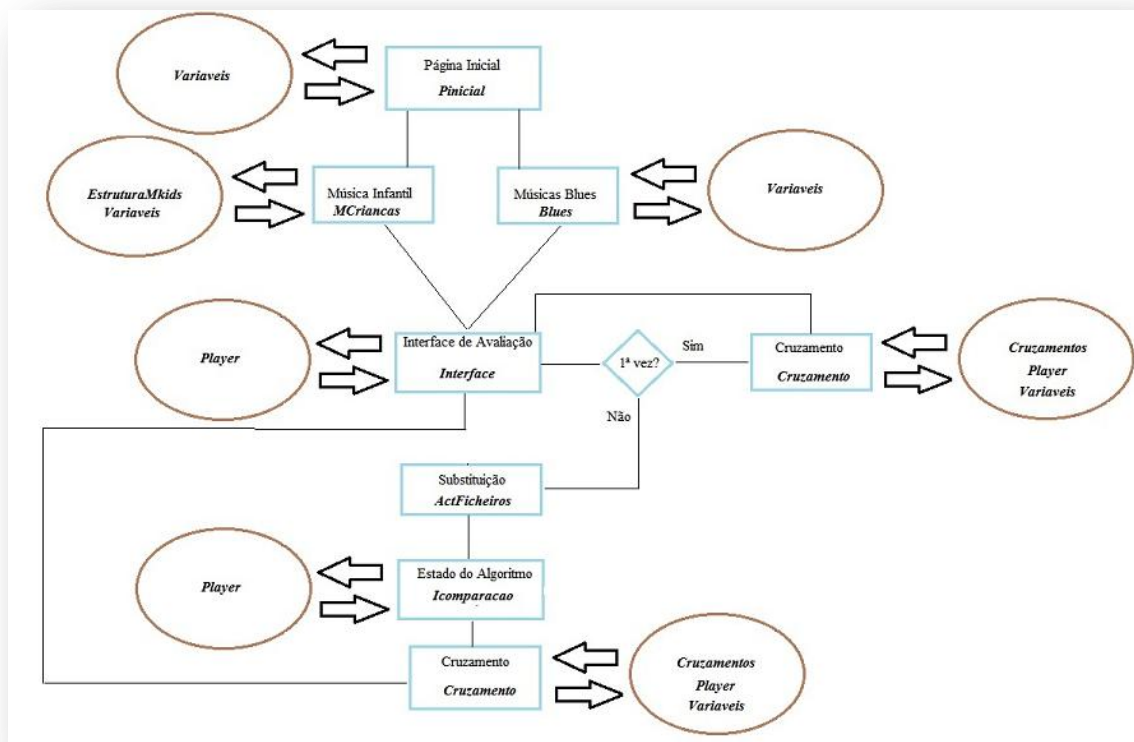
A aplicação foi desenvolvida em *Java*, mais uma vez recorrendo à *Java Sound API*. De uma forma resumida, pretende-se um *software* simples e que permita a composição de músicas ao gosto do utilizador.

Assim, na interface inicial é possível escolher-se qual o género musical que se pretende que o *software* componha. De seguida, e de forma a fazer a avaliação da *fitness* de cada indivíduo (música), aparecerá uma janela em que se poderá ouvir cada uma das músicas para futura avaliação. Entre cada geração surgirá uma janela que mostrará o estado do algoritmo genético, sendo possível ouvir todos os indivíduos da geração transacta e da actual, tal como visualizar a respectiva *fitness*.

Com o intuito de facilitar a percepção sobre a evolução do estado do algoritmo genético, a janela de estado fornece também informação relativa à média das *fitness* de cada geração. Desta forma, é possível ter indicação se o algoritmo está a evoluir, a regredir ou se já entrou em estagnação (atingiu o melhor indivíduo possível). Esta funcionalidade de estado revelou ser uma ferramenta muito útil aquando dos testes ao algoritmo,

nomeadamente na fase de escolha do número para a população inicial, assim como nos métodos de cruzamento, mais propriamente na selecção de pontos de corte e número de pontos de corte.

A aplicação está dividida em onze classes *Java*. Apenas duas geram os indivíduos para a população inicial (uma para as músicas infantis e outra para as músicas *blues*), as outras estão directamente associadas com a programação do algoritmo genético. Existiu também alguma preocupação em simplificar a lógica/mecanismo de programação para que fosse fácil e acessível efectuar futuras alterações.



**Figura 38** Estrutura Esquemática da Aplicação Desenvolvida

A figura 38 ilustra um fluxograma com a estrutura lógica da aplicação. Os rectângulos apresentam as classes “principais”, enquanto os círculos representam as classes que complementam e com as quais as classes principais interagem. As palavras a negrito indicam os nomes das classes.

### 5.3.1.1. DESCRIÇÃO DA FUNCIONALIDADE DE CADA CLASSE

<b>Pinicial</b>	Interface inicial com o utilizador. De acordo com as opções do utilizador, responsável por inicializar a classe <i>Variaveis</i>
<b>Variaveis</b>	Classe que contém variáveis importantes para toda a estrutura da aplicação, pois dimensionam toda a lógica programada tanto para o caso de o utilizador ter escolhido músicas infantis ou <i>blues</i> .
<b>MCrianças</b>	Responsável pela geração da população inicial de músicas para crianças. Interacção necessária com a classe <i>EstruturaMkids</i> .
<b>EstruturaMkids</b>	Contém os métodos que constroem todos os aspectos estruturais das músicas infantis (estrutura rítmica, harmónica e frásica). Complementa a classe <i>MCrianças</i> .
<b>Blues</b>	Responsável pela geração da população inicial de músicas <i>blues</i> .
<b>Interface</b>	Interface gráfica que permite ao utilizador ouvir e avaliar, em termos de <i>fitness</i> cada indivíduo.
<b>Player</b>	Classe que reproduz e cria ficheiros <i>MIDI</i> .
<b>Cruzamento</b>	Realiza a selecção para cruzamento, e executa o cruzamento com um só ponto de corte.
<b>Cruzamentos</b>	Realiza o cruzamento com dois pontos de corte e mutação.

**ActFicheiros**

Faz a substituição da população para a próxima geração, o que implica a mudança de ficheiros para novos directórios

**Icomparação**

Interface gráfica que permite ao utilizador visualizar o estado do algoritmo genético

**5.3.1.2. LÓGICA E MODO DE FUNCIONAMENTO**

O modo de funcionamento é bastante simples. O algoritmo começa por gerar uma população inicial de músicas. Os dados sobre cada indivíduo são guardados de duas formas: em formato *MIDI* e em *txt*. O ficheiro *MIDI* permite a audição dos indivíduos para avaliação, enquanto que o *txt* permite de forma simples fazer manipulações a cada indivíduo, especialmente na fase de cruzamento e mutação.

A informação guardada no ficheiro *txt* contém a numeração *MIDI* da nota a que corresponde. Desta forma, fazer cruzamentos será bastante simples, bastando carregar dois ficheiros *txt* para dois vectores, e num terceiro guardar uma mistura dos dois. De seguida, existe uma classe que contém um método que tendo como base os ficheiros *txt* gera um ficheiro *MIDI* para que seja possível ouvir o filho criado através de um cruzamento ou mutação.

Assim, todo o software se rege pela manipulação desses ficheiros. Para cada indivíduo existe um ficheiro *MIDI* e um *txt* que permite controlar todas as condições pretendidas (audição e manipulação genética).

**5.3.2. ESTRUTURA DO ALGORITMO GENÉTICO**

O algoritmo genético desenvolvido possui uma estrutura comum no que diz respeito ao que costuma ser a estrutura padrão de um algoritmo deste género. Assim, ele passará pelas seguintes fases:

<b>Início</b>	Geração da População Inicial
<b>Avaliação</b>	Audição das composições e avaliação em termos de <i>fitness</i>
<b>Seleção</b>	Escolha dos indivíduos para posterior cruzamento
<b>Cruzamento</b>	Recombinação de genes entre dois indivíduos
<b>Mutação</b>	Existe 10% de probabilidade de cada filho sofrer desta operação genética
<b>Substituição</b>	Seleção daquela que será a nova geração, substituindo a actual

#### 5.3.2.1. INÍCIO

Esta é a fase responsável pela geração da população inicial.

A população inicial é composta por apenas quatro indivíduos para permitir que a avaliação, em termos de *fitness function*, seja feita através da interacção do ser humano, dado que esta tarefa além de cansativa é também subjectiva. Para a sua criação são usadas as estatísticas obtidas na primeira fase. Pretende-se que todas as músicas compostas pelo algoritmo possuam as proporções do número de notas alcançadas na primeira fase. Além disso, no caso da música infantil, foram impostas algumas regras frásicas (AABB ou ABAB) características deste género musical. No caso das músicas *blues*, apenas foi implementada a regra comum aos dois géneros musicais.

#### 5.3.2.2. AVALIAÇÃO

A avaliação da *fitness* de cada indivíduo é feita, logicamente, através da audição de cada música. Sendo assim, é necessária a interacção do utilizador. Inicialmente a população era composta por 10 indivíduos, tendo sido reduzida para 4, para nesta fase se conseguir ter algum discernimento e coerência na avaliação da *fitness* de cada indivíduo.

Revelou-se ser difícil ouvir 10 músicas idênticas visto serem do mesmo género musical, e posteriormente fazer uma avaliação justa, coerente e sábia.

### 5.3.2.3. SELECÇÃO

Na selecção usou-se um método bastante adoptado neste tipo de algoritmos: *Seleccção por Torneio*. Aleatoriamente, são escolhidos 3 indivíduos que disputam dois lugares para cruzamento. Os dois indivíduos com maior *fitness* são seleccionados e passam para a fase seguinte, o cruzamento.

### 5.3.2.4. CRUZAMENTO

Nesta fase existem duas hipóteses de cruzamento: em 1 ou 2 pontos. Essa possibilidade é definida pelo utilizador no início da aplicação. De notar, que são usadas definições diferentes para cada género musical.

Para as músicas infantis os pontos de corte correspondem a um conjunto de 4 compassos (englobam os primeiros 4 compassos, ou os segundos 4 compassos ou os terceiros 4 compassos ou os quartos 4 compassos, ver figura 39).

No caso dos *blues*, os pontos de corte podem corresponder a qualquer compasso. Esta restrição, nas músicas para crianças, foi implementada, dado que se fosse possível existir pontos de corte em qualquer compasso, os indivíduos pioravam a sua *fitness*, uma vez que se perdia a forma e estrutura frásica característica destas músicas. Assim, optou-se por se limitar os pontos de corte, fazendo com que apenas fossem cruzadas frases na sua totalidade.

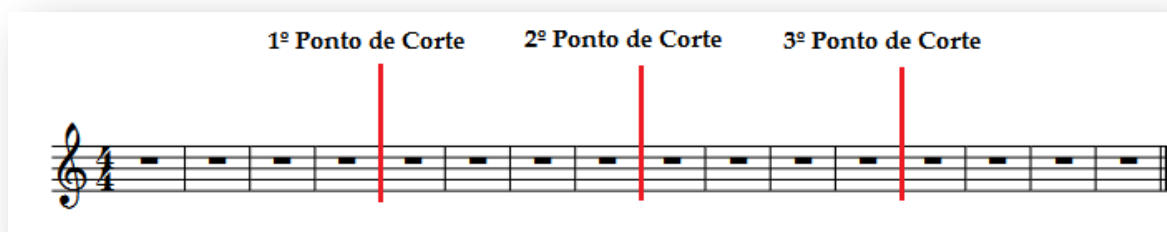


Figura 39 Pontos de Corte Possíveis - Músicas Infantis

### **5.3.2.5. MUTAÇÃO**

Esta fase ocorre apenas com 10% de probabilidade. Todos os filhos gerados são propostos à mutação. É gerado um número aleatoriamente que varia entre 0 e 99. Caso este seja menor que 10 ele é mutado. A mutação alterará as notas de um compasso escolhido também aleatoriamente.

### **5.3.2.6. SUBSTITUIÇÃO**

Nesta fase efectua-se a substituição das gerações. De entre 8 indivíduos, 4 da população inicial e 4 descendentes, é escolhido um por elitismo (aquele que tiver melhor *fitness*). Os outros 3 indivíduos são escolhidos aleatoriamente.

### **5.3.3. GERAÇÃO DA POPULAÇÃO INICIAL**

Como já foi referido anteriormente, existem duas classes responsáveis pela criação das populações iniciais. Uma é a *MCrianças*, que actua quando se pretendem músicas para crianças, e a outra é a *Blues*.

#### **5.3.3.1. MCRIANCAS**

Na geração de músicas infantis foram seguidas algumas regras. A primeira regra diz respeito à primeira fase do trabalho, o levantamento estatístico. Todas as músicas devem ter o número de notas regidos pelas proporções encontradas nessa fase. Além disso, e tendo em conta algumas regras da teoria musical, decidiu-se definir uma estrutura harmónica variável, que servirá como base para todas as melodias geradas pelo algoritmo. De acordo com a estrutura harmónica gerada para cada composição, são declaradas algumas escolhas para aquela que será a primeira nota de cada compasso. Essa nota varia de compasso para compasso, de acordo com o acorde que tem como base. São também definidas estruturas rítmicas para as frases, baseadas nas estruturas padrão que se encontram mais regularmente nas músicas infantis. É isso que define o número de notas que cada música irá conter. Cada música será tocada usando dois timbres diferentes, escolhidos aleatoriamente. Cada diferente frase será tocada por um instrumento diferente.

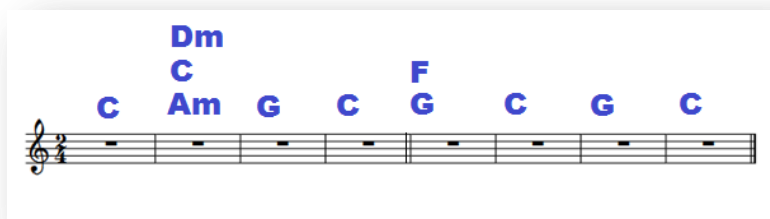
A primeira fase da criação das músicas assenta na estruturação da música em vários aspectos. Esta fase é elaborada invocando métodos que estão declarados na classe *EstruturaMkids*. Em primeiro lugar, é escolhida, aleatoriamente, uma estrutura rítmica para cada frase (métodos *EstruturaRF1()* e *EstruturaRF2()*). Existem definidas cinco estruturas para cada frase, o que dá um total de 25 combinações rítmicas diferentes. Definida a estrutura, sabe-se qual o número de notas que terá a música. Desta forma pode-se calcular quantas notas de cada serão usadas na música em questão de acordo com o levantamento estatístico feito na primeira fase (gráfico da figura 33). Tendo a proporção da distribuição de cada nota e o número total de notas a ser usadas, consegue-se facilmente saber o número total de vezes que cada nota poderá ser usada. Esses dados estão guardados em variáveis criadas para o efeito. Na figura 40 está presente a inicialização das variáveis.

```
Cc =(int) (0.16*total)+1;//número de Dós que podem ser utilizados
Dc =(int) (0.14*total)+1;//número de Rés que podem ser utilizados
Ec =(int) (0.20*total)+1;//número de Mis que podem ser utilizados
Fc =(int) (0.14*total)+1;//número de Fás que podem ser utilizados
Gc =(int) (0.20*total)+1;//número de Sol's que podem ser utilizados
Ac =(int) (0.09*total)+1;//número de Lás que podem ser utilizados
Bc =(int) (0.07*total)+1;//número de Sis que podem ser utilizados
```

**Figura 40** Porção de Código – Cálculo do Número de Vezes que cada Nota pode ser Utilizada  
(*total* é a variável que contém o número total de notas a ser usadas)

Posteriormente, define-se a estrutura frásica recorrendo ao método *EstruturaF()* também da classe *EstruturaMkids*. Este método define, aleatoriamente se a estrutura frásica será AABB ou ABAB. Finalmente, é definida a estrutura harmónica (método *SequenciaH()*).

Todas as melodias têm um “caminho” por onde seguir, e esse “caminho” é dado pela sua estrutura harmónica, o chamado “acompanhamento”. Sem essa base harmónica que deve ser característica e de acordo com aquilo que se encontra nas músicas deste género, torna-se mais complicado fazer com que uma melodia tenha nexos e significado. Assim, e com o apoio de dois professores da área, *Hugo Lopes* e *Ruben Andrade*, definiu-se a estrutura que pode ter várias formas, tal como é apresentado na figura 41.



**Figura 41** Esquema da Estrutura Harmónica – Música para Crianças

Os primeiros 4 compassos correspondem à primeira frase, e os segundos 4 compassos à segunda frase.

Depois de definida toda a estrutura, falta apenas a melodia. São gerados 8 compassos diferentes de melodia, 2 frases, que são dispostos nos 16 compassos de música de acordo com a estrutura frásica (AABB ou ABAB). Como já foi referido, a primeira nota de cada compasso é condicionada pelo acorde da sequência harmónica. Não é definida apenas uma única escolha, pelo que, para cada compasso a primeira nota pode ser uma de duas ou três possíveis. As restantes notas são escolhidas aleatoriamente. Por cada nota que é gerada, é chamado um método da classe *MCrianças*, o *validanota(int nota)*, que faz a contagem das notas que vão sendo usadas. Uma vez atingido o limite de uma determinada nota, é accionada uma *flag* (inteiro 0 ou 1), que impede que essa nota seja usada de novo. Assim, consegue-se impor o número de vezes que cada nota é usada.

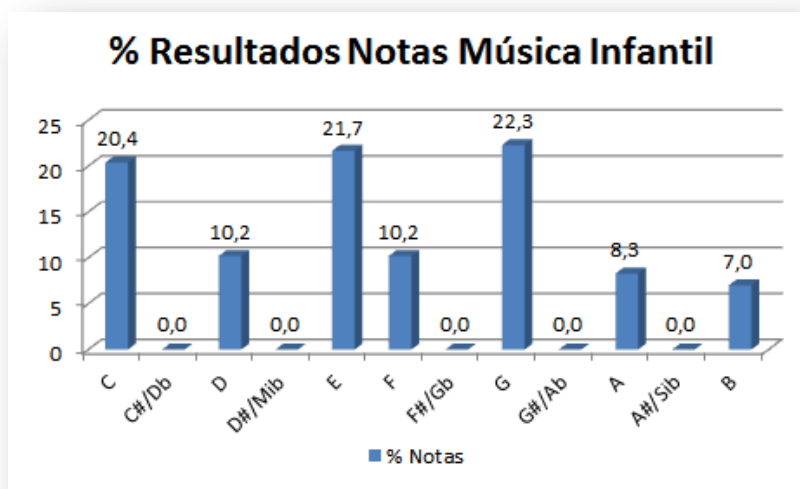
No fim, são gerados os ficheiros *MIDI* e *txt* que permitirão ao utilizador fazer a avaliação de cada indivíduo (*MIDI*) e a manipulação, por parte do *software*, de cada indivíduo nas fases seguintes.

### 5.3.3.1.1. RESULTADOS

O gráfico da figura 42 ilustra os resultados obtidos quanto à proporção das notas que foram usadas para geração de duas populações iniciais.

Como se pode observar através de uma comparação rápida dos gráficos das figuras 33 e 42, conseguiu-se manter uma boa relação na proporção de notas usadas na geração dos indivíduos tendo em conta os dados alcançados na primeira fase do trabalho. Existe alguma discrepância, é certo, mas obter resultados exactos era praticamente impossível uma vez se

torna difícil em uma só música a utilização exacta do mesmo número de notas, tendo como base um estudo a 15 músicas.



**Figura 42 Resultados Obtidos Quanto à Proporção de Notas Usadas – Música Infantil**

Como se pode consultar nas tabelas que contêm os dados obtidos na primeira fase, Anexo B, o número de vezes que cada nota era usada em cada música diferia bastante. Como tal, a criação de músicas contendo uma média de notas equivalente ao resultado obtido pela análise das quinze músicas vai condicionar os resultados finais, uma vez que nem em todas as músicas será possível respeitar por completo essas regras, dado que as músicas infantis contêm poucas notas. Em alguns casos, fazer uma repartição do uso proporcional das notas de acordo com o gráfico da figura 33 em músicas que terão aproximadamente 20 notas no total, nem sempre será possível. Além disso, todas as músicas terão à partida um número do uso de cada nota muito parecido, o que fará com que sejam relativamente semelhantes.

### 5.3.3.2. *BLUES*

A geração dos indivíduos do género *blues* é ligeiramente mais simples. Isto acontece porque, ao contrário das músicas para crianças, em que foram definidas várias regras, neste caso optou-se pela criação de indivíduos com base apenas nos dados obtidos na primeira fase. Desta forma, a única imposição aqui presente é que as notas usadas apresentem a proporção a que se chegou no levantamento estatístico. Esta abordagem permitiu, pelo

menos uma reflexão, sobre o facto de se definirem muitas ou poucas regras para a criação da população inicial. Cada música será tocada por três instrumentos, 4 compassos cada. Estes timbres são também escolhidos aleatoriamente. Além disso, as melodias geradas são tocadas sobre um acompanhamento de baixo, de forma a contextualizar-se auditivamente a melodia gerada.

A primeira fase da composição destas músicas é responsável pela definição da estrutura rítmica. Isto vai também permitir saber quantas notas terá a música, e desta forma calcular-se quantas notas de cada a mesma poderá ter. Em seguida, as notas são geradas aleatoriamente sendo utilizado o mesmo método usado nas músicas infantis para fazer a contagem das notas que vão sendo usadas, de forma a garantir a proporção a que se chegou na primeira fase (gráfico da figura 35). Posteriormente, e tal como acontece nas músicas para crianças, são gerados os ficheiros *MIDI* e *txt*.

#### **5.3.3.2.1. RESULTADOS**

O gráfico da figura 43 apresenta a proporção de notas usadas nas músicas *blues* geradas pelo *software*. Comparando com os dados obtidos na primeira fase, figura 35, conclui-se facilmente que se conseguiram atingir resultados muito próximos dos desejados. Tal como nas músicas infantis analisadas na primeira fase, o número de vezes que cada nota era usada em cada música *blues* analisada na primeira fase também variava bastante. Com isto pode concluir-se que cada música é diferente e que não se encontrou um padrão no uso de cada nota. Desta forma, forçando neste trabalho a que o uso das notas seguissem as proporções alcançadas na primeira fase, se estará a utilizar um padrão. Assim, as músicas geradas serão relativamente parecidas porque cada nota será utilizada um número parecido de vezes em cada música.

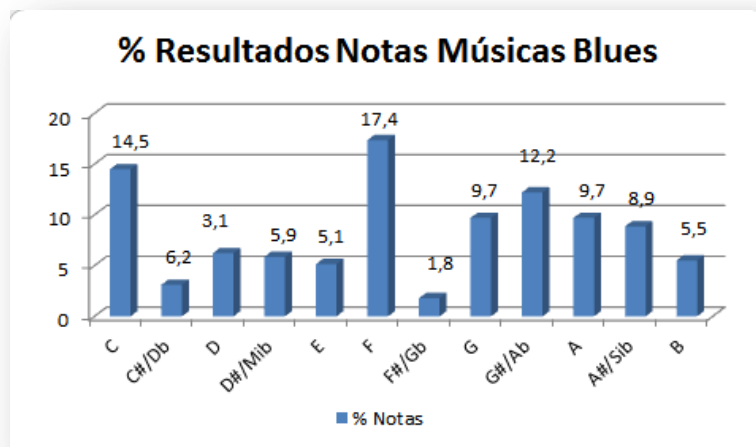


Figura 43 Resultados Obtidos Quanto à Proporção de Notas Usadas – Músicas Blues

## 5.4. DEMONSTRAÇÃO

Nesta secção será mostrado o procedimento que corresponde à utilização do *software* desenvolvido. Este *software* é bastante simples de ser utilizado. Ao longo do processo, serão apresentados os resultados na forma da partitura resultante dos indivíduos gerados, uma vez que não será, obviamente, possível proceder à sua audição.

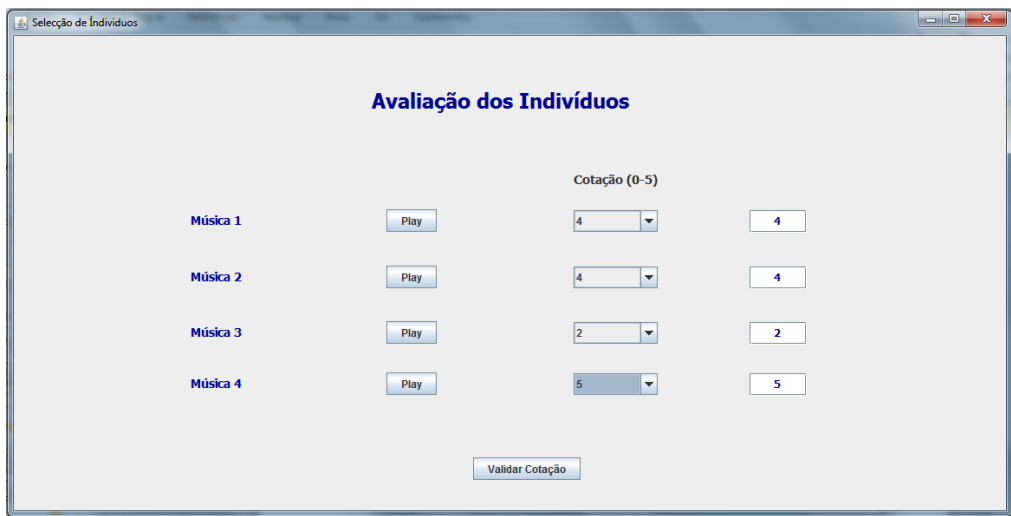
### 5.4.1. INTERFACE INICIAL

A interface inicial possibilita ao utilizador, de uma forma rápida, prática e eficaz a escolha de um dos dois géneros musicais que o *software* está preparado para compor. Além disso, permite também que o utilizador escolha o número de pontos de corte a ter em conta na fase de cruzamento no AG. A figura 44 ilustra essa interface. Nesta demonstração foi escolhida a opção *Música Infantil* como género musical e 1 ponto de corte.



**Figura 44 Interface Inicial**

Após a escolha do número de pontos de corte e do género musical que se pretende compor, o *software* avança para a criação daquela que será a população inicial do AG. Uma vez gerada a população inicial de melodias, é apresentada ao utilizador uma nova janela que permite ouvir e avaliar cada um dos indivíduos (músicas) (figura 45).



**Figura 45 Janela de Avaliação dos Indivíduos**

No seguimento da avaliação dos indivíduos, o algoritmo avança para a parte da selecção e posterior cruzamento. Como já foi referido é usado o método de selecção por *torneio*, em que são escolhidos aleatoriamente 3 indivíduos ficando seleccionado para cruzamento os 2 indivíduos que tiverem melhor *fitness*. Posteriormente, efectuam-se os cruzamentos. São realizados dois cruzamentos que darão origem a 4 novos indivíduos (filhos). Nas figuras 46 e 47 podem ver-se os indivíduos da população inicial e os filhos gerados por cruzamento.

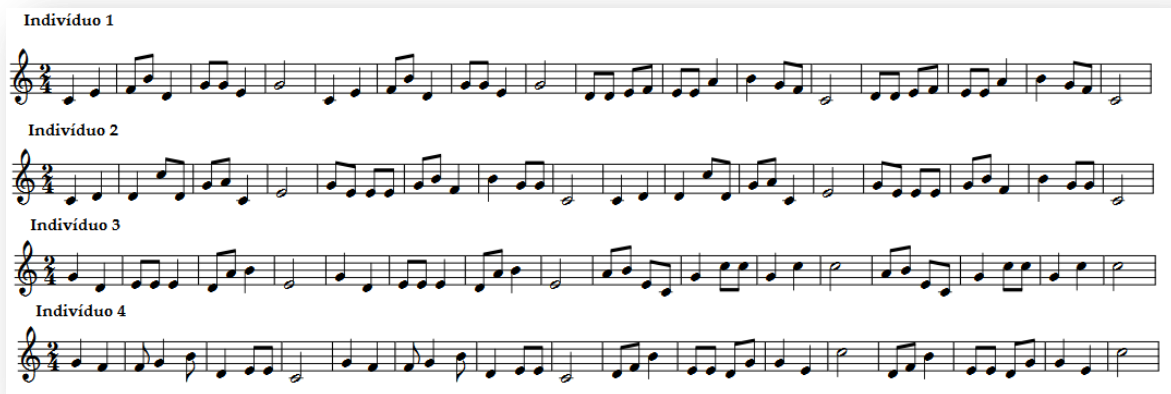


Figura 46 População Inicial



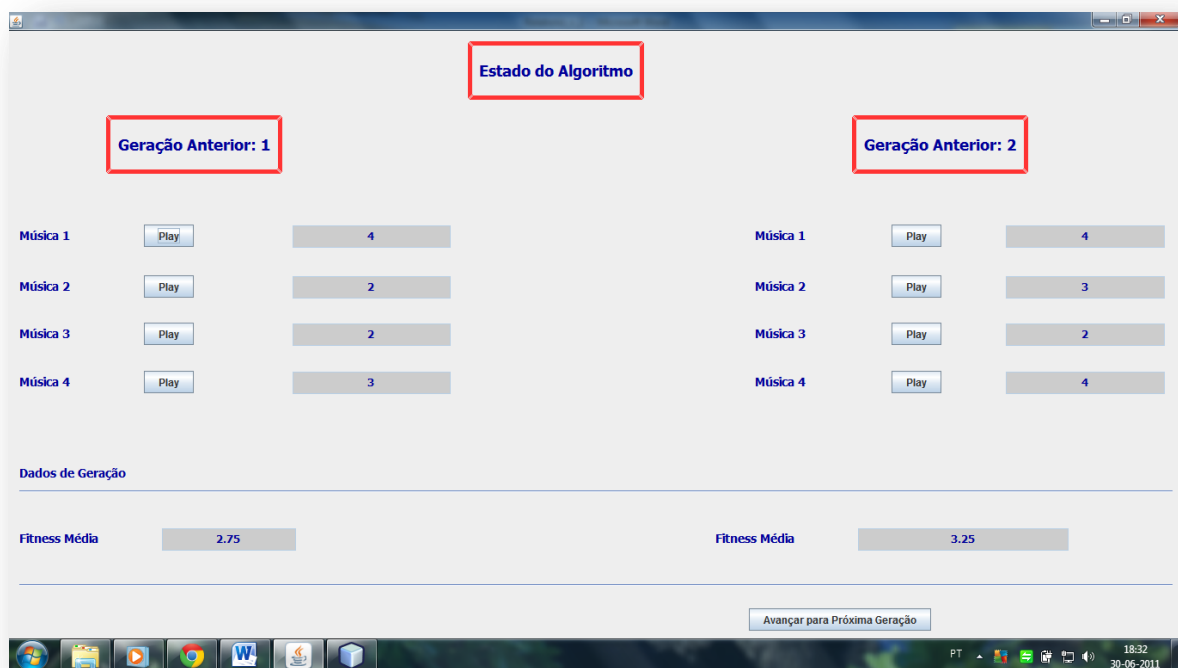
Figura 47 Filhos

Fazendo uma comparação entre as duas figuras, facilmente se consegue perceber quais foram os indivíduos seleccionados para cruzamento. Na figura 47 pode ver-se, de uma forma concreta, quais os pais que deram origem a esses filhos e os respectivos pontos de corte. De notar que o *Indivíduo 3* não deixou descendência. Como se pode observar na figura 45 este foi avaliado com a *fitness* mais baixa (2), o que o impossibilitou logo à partida de vencer qualquer torneio. Uma vez gerados os filhos é necessário avaliá-los aparecendo novamente uma janela similar à presente na figura 45.

Depois de avaliados os filhos segue-se a substituição. Como já foi referido, nesta fase o melhor indivíduo passa para a geração seguinte por *elitismo*. Os outros 3 indivíduos são escolhidos aleatoriamente. De notar que, como nesta fase existem 8 indivíduos (4 pais e 4

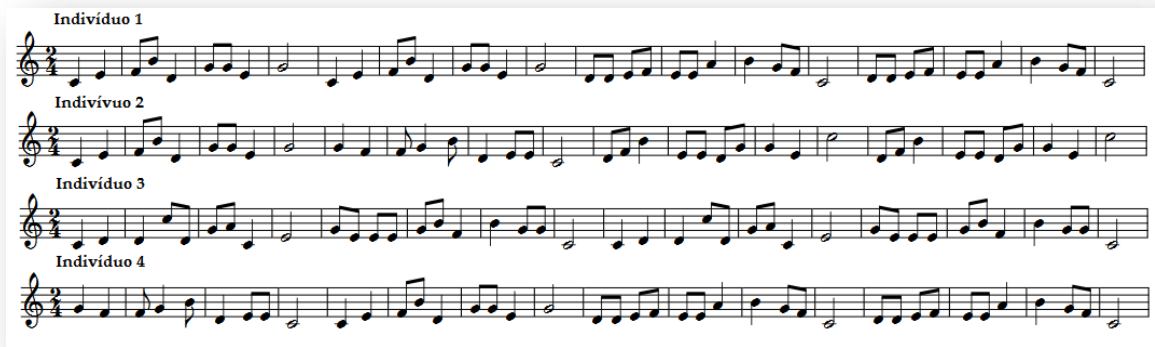
filhos), desses 8 sairão os novos 4 que formarão a próxima geração. Desta forma obtém-se e impõe-se uma probabilidade de cruzamento de 50% entre gerações.

Terminada a substituição, obtém-se uma nova geração. Nesta fase, e sendo este um AG ligado às artes, será extremamente importante ter-se uma ideia geral de evolução do AGe. Com o cansaço das sucessivas avaliações, o utilizador pode perder o discernimento e torna-se importante ter como referência as avaliações dos indivíduos das gerações anteriores. Por este motivo, foi desenvolvida uma interface que fornece essa possibilidade (figura 48).



**Figura 48 Interface de Estado do AG**

Partindo da informação que a janela da figura 48 fornece, torna-se bastante mais simples manter o discernimento e justiça na avaliação dos diversos indivíduos que se terão de avaliar ao longo do processo. Além da informação sobre a *fitness* de cada indivíduo existe a possibilidade de o voltar a ouvir. Os indivíduos que compõem a população da segunda geração podem ser visualizados na figura 49.



**Figura 49 População da Geração 2**

Através de uma observação simples das figuras 46, 47 e 49 verifica-se facilmente a passagem para a próxima geração de dois indivíduos da população inicial (1 e 2) e dois filhos (1 e 2).

Finalmente, e clicando no botão *Avançar para Próxima Geração* da interface de estado, será apresentada ao utilizador novamente a janela de avaliação dos indivíduos, descendentes dos indivíduos da segunda geração. Este processo repete-se até que o utilizador esteja satisfeito com os resultados.



## 6. CONCLUSÕES

Ao longo deste texto foram sendo apresentadas conclusões que permitiram sustentar as opções de desenvolvimento efectuadas ao longo do projecto. Assim, nesta última secção é realizada uma síntese das principais conclusões, consequências e relevância do trabalho realizado e perspectivados futuros desenvolvimentos.

A primeira fase deste projecto serviu de base para a implementação do AG interactivo. Da análise realizada às músicas infantis concluíram-se aspectos bastante importantes, nomeadamente quanto à sua estrutura, tanto frásica como harmónica. Por observação, concluiu-se que grande parte das músicas apresentavam estrutura frásica AABB ou ABAB, factor que se revelou de extrema importância na criação da população inicial do AG durante a segunda fase. Assim, foram definidas as regras para a criação das músicas seguindo uma dessas estruturas.

A segunda fase também se revelou bastante interessante, dado que foi possível implementar um AG completamente funcional capaz de gerar uma população inicial de acordo com a escolha do utilizador, evoluindo com sucesso para soluções finais satisfatórias.

Da análise de resultados há que ressaltar algumas considerações importantes. Como foi visto, na fase da geração das músicas infantis definiram-se várias regras de acordo com a teoria musical e os dados retirados e observados na primeira fase de desenvolvimento do trabalho. Isso veio a condicionar um pouco o “espírito” do AG, uma vez que a população inicial continha, desde logo, indivíduos (músicas) bastante bons. Esta condicionante traduziu-se numa evolução pouco significativa na *fitness* dos indivíduos ao longo das gerações do AG. Já no caso dos *blues* este facto não se verificou, dado que para este

gênero musical optou-se por fazer com que a população inicial fosse resultado apenas da primeira fase de estudo. Assim, além da estrutura de 12 compassos quaternários, característica do gênero musical, apenas se impôs que o número de vezes que cada nota seria usada respeitaria as proporções alcançadas na primeira fase. Neste caso, a *fitness* dos indivíduos melhora significativamente ao longo das gerações do AG.

Em termos de melhorias futuras, apresentam-se algumas ideias. Para começar, existem imensos estilos musicais que podem ser implementados numa aplicação deste gênero. Relativamente ao estudo estatístico elaborado é possível expandi-lo a vários níveis: ao nível rítmico das melodias, ao nível harmónico, ao nível da sequência das notas que fazem a melodia de acordo com a sequência harmónica e o acorde em que se encontram. Idealmente, seria fazer-se um levantamento em todos aspectos mencionados, de forma a ser possível uma integração de todas as áreas de estudo no sentido de obtenção de indivíduos que caracterizem cada vez melhor o gênero musical que representam.

## Referências Documentais

- [1] BILES, John A. – *A Genetic Algorithm for Generating Jazz Solos*, 2001
- [2] GONÇALVES, Pinto - *Recolha e Selecção de Textos*
- [3] CARDOSO, Marco – *História da Música Ocidental*
- [4] ARDLEY, Neil; ARTHUR, Dave; CHAPMAN, Hugh; CRISP, Clement; CLARK, Mary – *O livro da Música*, Dinalivro, 1997, ISBN 972-576-125-1.
- [5] ARDLEY, Neil; BESSA, Maria Alice Moura, tradução/ BENTO, Pedro, revisão - *Guia de Música para jovens ouvintes*, Porto: Civilização, 1996, ISBN 972-26-1236-0
- [6] GROUT, Donald J.; PALISCA, Claude V. – *História da Música Ocidental*, Lisboa : Gradiva, 1997, ISBN 972-662-382-0
- [7] Sítio da internet:  
<http://pt.shvoong.com/entertainment/music/744203-hist%C3%B3ria-da-m%C3%BAsica-m%C3%BAsica-renascentista/#ixzz1O33WE9aP>, último acesso em 01/06/2011
- [8] Sítio da internet:  
<http://pt.wikipedia.org/wiki/M%C3%BAsica>, último acesso em 02/06/2011
- [9] REIS, Cecília; MARQUES, Viriato M.; MACHADO, J. Tenreiro - *EVOLUTIONARY PERSPECTIVES IN COMPUTER MUSIC*
- [10] Sítio da internet:  
Britannica online, <http://www.britannica.com/ebc/article-9372879>, último acesso em 02/06/2011.
- [11] HOLST, Imogen; tradução/CZERTOK, Mariana – *ABC da Música*, São Paulo, 1998, ISBN 85-336-0914-0
- [12] Sítio da internet:  
Jazzbossa, <http://www.jazzbossa.com/teoria/aulas/21.escalamaior.html>, último acesso em 02/06/2011

- [13] PORRES, Alexandre Torres; MANZOLLI, Jônatas - *Sistemas de Afinação: Um Apanhado Histórico*, Campinas, São Paulo, Brasil
- [14] Sítio da internet:  
<http://proascg3.pbworks.com/w/page/18659126/TEMPO-DAS-NOTAS>, último acesso em 06/06/2011
- [15] MITCHELL, Melanie - *An Introduction to Genetic Algorithms*. Editado por MIT Press Ltd, 1999.
- [16] MARQUES, Artur – *Introdução aos Algoritmos Genéticos*, 2005
- [17] MEDEIROS, Felipe Leonardo Lôbo - *ALGORITMO GENÉTICO HÍBRIDO COMO UM MÉTODO DE BUSCA DE ESTADOS ESTACIONÁRIOS DE SISTEMAS DINÂMICOS*, 2002
- [18] ÁVILA, Sérgio Luciano - *ALGORITMOS GENÉTICOS APLICADOS NA OTIMIZAÇÃO DE ANTENAS REFLETORAS*, Florianópolis, 2002
- [19] BARCELLOS, João Carlos Holland – *Algoritmos Genéticos: Um estudo comparativo*, São Paulo, 2000
- [20] CARRIJO, Ivaltemir Barros - *Extracção de regras operacionais óptimas de sistemas de distribuição de água através de algoritmos genéticos multiobjectivo e aprendizado de máquina*, São Paulo, 2004
- [21] LU, David - *Automatic Music Transcription Using Genetic Algorithms and Electronic Synthesis*, 2006
- [22] Sítio da internet:  
<http://noah.hearle.com/academic/maths/temperament/>, ultimo acesso em 07/06/2011
- [23] REIS, Cecília – *Textos de apoio à disciplina de Algoritmos Genéticos*
- [24] Sítio da internet:  
<http://aprenderaaprender.webnode.com.br/album/origem%20da%20vida%20e%20evolu%C3%A7%C3%A3o/evolu%C3%A7%C3%A3o%20-%20girafa%20de%20darwin-jpg/>, último acesso em 07/06/2011

- [25] ZHU, Tânia; MAGALHÃES, Nuno - *Funções de teste [De Jong's], Rastrigin, Rosenbrock*], ISEP, 2010
- [26] DUARTE, José – *História do Jazz*, Sextante Editora, Lda, ISBN: 978-989-8093-88-2
- [27] PAZOS, Alejandro; RIEGO, A. Santos; DORADO, Julián; CARDALDA, J.J. Romero – *GENETIC MUSIC COMPOSITOR*, Universidade da Corunha
- [28] Sítio da internet:  
<http://download.oracle.com/javase/1.4.2/docs/api/javax/sound/midi/package-summary.html>, último acesso em 16/06/2011
- [29] SOUSA, Jorge; ROCHA, Joel – *Protocolo MIDI*, ISEP, 2010
- [30] Sítio da Internet:  
<http://www.midi.org/techspecs/midimessages.php>, último acesso em 16/06/2011
- [31] MORONI, Artemis; MANZOLLI, Jônatas; ZUBEN, Fernando Von; GUDWIN, Ricardo – *Vox Populi: Na Interactive Evolutionary System for Algorithmic Music Composition*, Leonardo Music Journal, Volume 10, 2000, pp. 49-54
- [32] LAURENTIZ, Silvia – *PROCESSOS COMPUTACIONAIS EVOLUTIVOS NA ARTE*, s.d.
- [33] TOKUI, Nao; IBA, Hitoshi – *Music Composition with Interactive Evolutionary Computation*, s.d.
- [34] REIS, Cecília; MARQUES, Viriato M.; MACHADO, J. Tenreiro – *A Review on Humanized Computational Intelligence*
- [35] Sítio da Internet:  
<http://www.medieval-life-and-times.info/medieval-music/medieval-musical-instruments.htm>, último acesso em 29/06/2011
- [36] LINDEN, Ricardo – *Algoritmos Genéticos Capítulo 9*
- [37] Sítio da Internet:  
[http://pt.wikipedia.org/wiki/Composi%C3%A7%C3%A3o\\_musical](http://pt.wikipedia.org/wiki/Composi%C3%A7%C3%A3o_musical), último acesso em 29/06/2011

- [38] SCHOENBERG, Arnold – *FUNDAMENTOS DA COMPOSIÇÃO MUSICAL*, Edusp - Editora da Univ. de São Paulo, ISBN : 8531400457
- [39] ALVARENGA, Luiz Gonzaga de – *Breve Tratado Sobre o Som e a Música*, Revisão 3.2 (Nov. 2009)
- [40] AEBERSOLD, Jamey – *How to Play and Improvise Jazz. Volume 1*
- [41] AEBERSOLD, Jamey – *nothin' BUT BLUES*, 1981
- [42] TAKAGI, Hideyuki – *Interactive Evolutionary Computation: Fusion of the Capabilities of EC Optimization and Human Evaluation*
- [43] MACHADO, J. A. Tenreiro; COSTA, António C.; LIMA, Miguel F. M.; -*Dynamical analysis of compositions*

## Anexo A. Músicas Analisadas

Neste anexo estão listadas as músicas que foram analisadas durante a primeira fase.

<b>Músicas Infantis</b>	<b><i>Blues</i></b>
Alecrim	All Blues
Balão do João	Ba-Lue Bolivar Ba-Lues Are
Dó Ré Mi Fá	Bessies Blues
Frére Jaques	Blue Comedy
A Caminho de Viseu	Blue in Green
Jardim da Celeste	Blue Seven
Lá Vai Uma	Blue Monk
Na Loja do Mestre André	Blues For Alice
Moças da Minha Terra	Equinox
Não Digas à Minha Mãe	Mr. PC
Oh Susana	Opus de Funk
Papagaio Loiro	Sippin At Bells
Pombinhas da Catrina	Straight no Chaser
3 Pombinhas	Can´t Stop Lovin'
Doidas Doidas Andam as Galinhas	Crossroads Blues



## Anexo B. Resultados Primeira Fase

Músicas Infantis (analisadas inicialmente)																Total	% Uso
<b>C</b>	5	18	12	6	15	6	6	2	14	6	8	6	12	14	8	138	16,02787
<b>C#/Db</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>D</b>	12	2	10	2	7	5	0	10	18	6	8	11	6	13	8	118	13,70499
<b>D#/Mib</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>E</b>	15	0	10	16	12	5	6	14	18	10	12	12	24	6	12	172	19,97677
<b>F</b>	6	0	8	26	8	4	12	10	4	8	4	9	4	2	12	117	13,58885
<b>F#/Gb</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>G</b>	11	18	10	18	15	5	12	10	16	16	14	6	6	7	10	174	20,20906
<b>G#/Ab</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>A</b>	0	22	2	12	4	1	12	6	10	2	6	1	0	0	2	80	9,291521
<b>A#/Sib</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>B</b>	0	14	8	2	0	4	12	4	0	0	8	3	0	5	2	62	7,200929

Músicas Infantis (Teste aos indivíduos Gerados pelo software)										Total	% Uso
<b>C</b>	10	10	6	6	6	10	6	10	6	64	20,38217
<b>C#/Db</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>D</b>	6	2	2	2	2	6	6	6	6	32	10,19108
<b>D#/Mib</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>E</b>	6	10	6	10	10	6	10	10	6	68	21,65605
<b>F</b>	6	2	6	2	6	4	4	2	2	32	10,19108
<b>F#/Gb</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>G</b>	6	10	10	10	10	6	8	10	6	70	22,29299
<b>G#/Ab</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>A</b>	4	4	4	4	2	4	2	2	2	26	8,280255
<b>A#/Sib</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>B</b>	2	4	4	4	2	2	4	0	0	22	7,006369

<b>Músicas Blues (analisadas inicialmente)</b>																<b>Total</b>	<b>% Uso</b>
<b>C</b>	11	20	3	4	14	9	9	3	6	9	2	9	3	0	6	108	13,36634
<b>C#/Db</b>	1	0	3	1	5	5	3	0	2	0	1	1	0	0	22	2,722772	
<b>D</b>	1	6	0	6	0	7	4	1	7	0	5	6	5	7	55	6,806931	
<b>D#/Mib</b>	1	2	7	3	3	3	3	0	4	2	2	6	5	1	11	53	6,559406
<b>E</b>	2	2	0	15	0	4	3	0	0	4	1	7	1	0	0	39	4,826733
<b>F</b>	11	5	13	4	7	14	10	19	16	19	4	12	0	17	8	159	19,67822
<b>F#/Gb</b>	1	1	0	0	5	1	3	0	0	0	2	1	1	0	0	15	1,856436
<b>G</b>	11	3	2	5	4	10	10	3	4	5	5	9	1	2	2	76	9,405941
<b>G#/Ab</b>	15	7	8	0	11	4	9	8	8	8	0	7	1	4	6	96	11,88119
<b>A</b>	15	10	0	0	0	10	15	0	3	7	3	8	2	2	6	81	10,02475
<b>A#/Sib</b>	5	5	10	0	4	7	8	2	6	11	4	6	0	0	1	69	8,539604
<b>B</b>	0	4	2	0	4	2	3	0	1	3	0	7	9	0	0	35	4,331683

<b>Músicas Blues (Teste aos indivíduos Gerados pelo software)</b>										<b>Total</b>	<b>% Uso</b>
<b>C</b>	16	16	15	15	14	15	15	15	15	121	14,49102
<b>C#/Db</b>	4	2	2	4	3	4	3	4	4	26	3,113772
<b>D</b>	5	7	7	6	6	7	7	7	7	52	6,227545
<b>D#/Mib</b>	7	6	7	7	6	5	6	5	5	49	5,868263
<b>E</b>	6	5	6	6	5	6	3	6	6	43	5,149701
<b>F</b>	15	20	19	19	18	15	19	20	20	145	17,36527
<b>F#/Gb</b>	3	2	0	0	2	3	2	3	3	15	1,796407
<b>G</b>	12	12	11	8	10	11	8	9	9	81	9,700599
<b>G#/Ab</b>	14	12	13	12	12	13	13	13	13	102	12,21557
<b>A</b>	12	12	9	10	10	8	11	9	9	81	9,700599
<b>A#/Sib</b>	6	10	10	10	8	10	10	10	10	74	8,862275
<b>B</b>	6	6	6	6	5	6	5	6	6	46	5,508982