

COMPUTAÇÃO EVOLUTIVA MULTIOBJETIVO PARA HARMONIZAÇÃO DE MELODIAS

Alan R. R. de Freitas¹, Frederico G. Guimarães¹, André S. Ruela²

¹Departamento de Engenharia Elétrica,
Universidade Federal de Minas Gerais
Belo Horizonte, MG, Brasil

alandefreitas@gmail.com, fredericoguimaraes@ufmg.br

²Departamento de Computação,
Universidade Federal de Ouro Preto
Ouro Preto, MG, Brasil

andre.siqueira.ruela@gmail.com

Resumo. *Este artigo descreve uma abordagem multiobjetivo para harmonização de melodias em música evolucionária. Existem vários métodos e resultados possíveis para um processo de harmonização de uma dada melodia de acordo com padrões musicais ocidentais. Algumas regras implícitas podem ser extraídas da teoria musical, mas alguns aspectos harmônicos só podem ser definidos por preferências do compositor. Assim, uma abordagem multiobjetivo pode ser útil para permitir que o processo evolucionário encontre um conjunto de soluções que representam o equilíbrio entre regras em diferentes funções objetivos. Neste artigo, um algoritmo evolucionário multiobjetivo define mudanças entre acordes com diferentes graus de simplicidade e dissonância. Na apresentação de tal algoritmo, discute-se como embutir conhecimento musical em Algoritmos Genéticos em um nível implícito. O algoritmo sugere que é possível desenvolver funções de avaliação que reflitam intenções humanas para as harmonias.*

PALAVRAS-CHAVE: *Música Evolutiva, Otimização Multiobjetivo, Harmonização*

Abstract. *This paper describes a multiobjective approach for melody harmonization in evolutionary music. There are numerous methods and a myriad of possible results to a process of harmonization of a given melody according to Western standards. Some implicit rules can be extracted from musical theory, but some harmonic aspects can only be defined by preferences of a composer. Thus, a multiobjective approach is useful to allow the evolutionary process to find a set of solutions that represent a trade-off between the rules in different objective functions. In this paper, a multiobjective evolutionary algorithm defines chord changes with differing degrees of simplicity and dissonance. While presenting such an algorithm, we discuss how to embed musical cognizance in Genetic Algorithms in a meta-level. The algorithm suggest that it is possible to devise fitness functions which reflect human intentions for harmonies.*

KEYWORDS: *Evolutionary Music, Multiobjective Optimization, Harmonization*

1 INTRODUÇÃO

Algoritmos Genéticos (AG) têm uma grande gama de aplicações em ciência e engenharia, em problemas complexos para os quais uma solução específica é difícil de se encontrar. A capacidade de busca de AG chamaram a atenção de várias comunidades científicas, incluindo até aplicações em arte e música (Corne and Bentley, 2001; Miranda and Biles, 2007; Romero and Machado, 2007; Todd and Latham, 1992). Houve estudos envolvendo computação evolutiva e arte tentando entender a possível influência de sistemas bioinspirados em arte, tecnologia e apreciação estética (Romero and Machado, 2007). O uso de AG para evoluir e criar arte e música é um campo conhecido como Música ou Arte Evolutiva (Miranda and Biles, 2007).

Várias aplicações de AG bem sucedidas para análise musical e síntese podem ser encontradas na literatura (Brown, 2002). Uma das principais utilidades de AG nesse contexto é a formação de melodias. Um algoritmo para a criação de solos de jazz em tempo real foi proposta (Biles, 1994, 2001), mostrando como o desenvolvimento de composição automatizada para um gênero particular de música pode ser abordada com AG que consideram várias feições das tarefas musicais, como audição e improvisação. Apesar de haver vários resultados interessantes, a Música Evolucionária ainda encara vários desafios (McCormack, 2005).

A criação de música com programas de computador tem algumas feições distintas de vários problemas regulares de otimização. É comum ver procedimentos onde um indivíduo de uma população representa um compasso que pode ser usado na composição final. Isso faz com que a busca por uma boa população seja mais importante que a busca por um indivíduo ótimo (Waschka II, 1999). Isso é uma característica particular a ser explorada em sistemas para a criação de arte.

A busca por harmonias é um outro campo de estudo que normalmente tem a vantagem de ter funções de avaliação que são mais fáceis de se especificar. Foi mostrado que algoritmos podem criar harmonias com sucesso (Papadopoulos and Wiggins, 1999). Vários destes trabalhos descrevem sistemas para a geração de harmonias de quatro partes para uma dada melodia (Harmonização SATB). Neste problema, um grupo de notas normalmente é gerado para cada nota original na melodia e o problema é mais fácil quando as mudanças de acordes também são dadas com a melodia (Horner and Ayers, 1995). Analogamente aos métodos para a geração de melodias, o desenvolvimento de métodos de harmonização focados em um estilo particular pode ser interessante (McIntyre, 1994).

Quando se define a mudança entre os acordes para uma melodia já existente, é necessário definir alguns fatores que deveriam recompensar ou penalizar um indivíduo em sua função objetivo. Contudo, estes fatores são normalmente subjetivos e se baseiam fortemente em preferências do usuário. A idéia central deste neste artigo é apresentar uma abordagem de otimização multiobjetivo para harmonização que é capaz de evoluir harmonias enquanto se trata o equilíbrio entre harmonias com ou sem tensão¹. É importante basear métodos de composição em aspectos formais desenvolvidos para música tonal. Contudo, respeitar algum conjunto de regras básicas não garante que o resultado será musicalmente interessante ou significativo. Criatividade e idéias novas podem até emergir da violação de algumas regras, mas o problema é conhecer qual conjunto de regras será violado e quando.

¹Tensão é criada em um acorde incluindo-se notas dissonantes extra que criam necessidade de relaxação ou liberação ao ouvinte

Os resultados mostram que o algoritmo multiobjetivo é capaz de encontrar um conjunto de soluções que representam o compromisso entre regras em diferentes funções objetivo, levando ao menos a um conjunto de soluções que humanos considerariam musicalmente interessantes. Apresenta-se também um novo esquema de representação de harmonias que define um acorde para cada compasso, ou fração de compasso, que pode gerar resultados que diferem daqueles da abordagem convencional para SATB, na qual um grupo de notas é definido para cada nota da melodia. Além disso cinco notas são permitidas em um acorde e algumas notas podem ser deixadas não utilizadas.

Criar um sistema de harmonização automática demanda informação sobre o domínio relativo, assim como em qualquer aplicação computacional. Este trabalho apresentará possíveis métodos para embutir este tipo de conhecimento não apenas através da definição da função de avaliação mas também implicitamente nas operações do AG. A maneira na qual estes aspectos do algoritmo são codificados faz uma distinção crucial nos resultados encontrados pela aplicação já que é um sistema para a simulação de comportamentos e criatividade humanos.

Neste artigo, apresenta-se inicialmente uma introdução a AG e alguns exemplos de como seus aspectos podem ser decididos no contexto musical. Define-se então termos musicais relativos a harmonias e como os experimentos foram delineados. Discute-se então como uma função de avaliação multiobjetivo pode ajudar usuários com preferências diferentes ou desconhecidas. Por final, analisam-se os resultados dos experimentos e apresentam-se as conclusões.

2 ALGORITMOS GENÉTICOS

AG são métodos inspirados na evolução natural (Darwin, 2003) inicialmente propostos para resolver problemas de otimização (Reeves, 2010). É uma técnica muito útil para problemas da busca difíceis onde há um modo de se avaliar soluções mas não há algoritmo conhecido que determine a solução ótima em tempo polinomial.

Estes sistemas podem alcançar bons resultados para a tarefa de geração de harmonias (Phon-Amnuaisuk et al., 1999) mas há algumas dificuldades. A primeira delas é que não há garantia de que a solução ótima será encontrada, o que é compreensível quando se espera que um programa resolva tais problemas. A segunda complicação é que AG podem ser sistemas com grande complexidade computacional quando muito conhecimento é incluído no sistema. Este tipo de conhecimento é indispensável para qualquer sistema do qual se esperam bons resultados.

Conhecimento fundamental da área deve ser dada aos AG para este possa distinguir entre soluções boas e ruins, pelo menos. Em relação à criação de harmonias, deve haver conhecimento embutido em todo o sistema para gerar soluções aceitáveis em termos de altura tonal, duração e harmonia em si. É importante considerar como embutir este tipo de informação não apenas na função de aptidão mas também em outros aspectos do algoritmo como na representação das soluções, já que os algoritmos não podem gerar nenhuma solução não prevista pelo formato de representação.

Algumas dificuldades relativas à geração de harmonias usando AG e suas subseqüentes implicações são analisadas nas seções seguintes.

Tabela 1. Notas

Nota	C	C#	D	D#	E	F	F#	G	G#	A	A#	B
Grau	1	-	2	-	3	4	-	5	-	6	-	7

3 EVOLUINDO HARMONIAS

3.1 Representando uma harmonia

Já que o sistema de afinação de temperamento igual² é a tendência usual na música ocidental, na maior parte dos casos, é conveniente usar o deslocamento relativo entre notas para a representação em vez dos valores absolutos das notas. Assim, o resultado final pode ser normalizado para representar aquela solução em um tom específico conveniente para o usuário. Também no resultado final, a oitava na qual cada nota será executada pode ser convenientemente decidida, assim como a duração de cada nota no acorde.

Os nomes das notas estão especificados na Tabela 1 com seus respectivos graus, considerando a escala de dó. Há 12 notas e 7 graus da escala natural (a escala de dó é considerada neste exemplo). Os graus das notas restantes devem ser representados em relação ao grau da nota mais próxima (por exemplo, F# pode ser 5-). O intervalo entre duas notas consecutivas é considerado de meio tom (ou semi tom), como entre C e C#, ou E e F. Um intervalo de 2 semitons é um intervalo de um tom (por exemplo, C e D, ou E e F#). Mais informações sobre intervalos podem ser encontradas em (Kennedy and Bourne, 2004).

A representação deve ser significativa ao domínio específico, que é apenas a representação de harmonias neste artigo. Assim, uma dada harmonia é definida por um grupo de vetores, cada um deles definindo um conjunto específico de notas que devem ser executadas durante aquele compasso específico. Este esquema de representação considera um grau de granularidade m dos acordes no qual o grau $m = 1$ significa que um acorde será procurado para cada compasso.

Neste artigo, propõe-se um esquema de representação da harmonia como o da Tabela 2, onde é possível perceber que as frequências absolutas das notas não estão representadas. Estas frequências não são inicialmente relevantes no contexto de harmonias pois a altura tonal de todas as notas podem ser definidas em relação à nota fundamental, enquanto a altura tonal da nota fundamental pode ser definida para uma nota conveniente. O uso de 5 notas torna possível o uso de uma tríade e duas notas extras no mesmo acorde. A quinta nota pode não ser usada, como no compasso 2 da Tabela 2, pois isso levaria a várias penalizações durante a avaliação de soluções mais simples, nas quais notas além da tríade não são desejáveis. Assim, podendo não haver uma nota na quinta posição do compasso, um acorde pode ter 4 ou 5 notas.

As notas podem ser representadas por números inteiros de 1 a 12 e a codificação não precisa definir a altura tonal absoluta de nenhuma nota como explicitado na Tabela 2, na qual o nome das notas é meramente representativo. Isso ocorre no sistema de afinação de temperamento igual onde a relação entre notas se torna mais importante que o valor absoluto de cada nota. O conjunto de notas em cada acorde é representado por:

$$h_j = \langle \eta_{1j}, \eta_{2j}, \eta_{3j}, \eta_{4j}, \eta_{5j} \rangle, \quad j = 1, \dots, n \quad (1)$$

²O sistema de afinação de temperamento igual é baseado na divisão de uma oitava (intervalo entre 2 notas, um tendo o dobro ou a metade da frequência de vibração da outra) em doze semitons iguais.

Tabela 2. Representação de uma harmonia

Compasso	1	2	...	n
Nota 5	E	–	...	D
Nota 4	C	D	...	F
Nota 3	G	A	...	D
Nota 2	E	F	...	B
Nota fundamental	C	D	...	G

onde $\eta_{ij} \in \{1, \dots, 12\}$, $\eta_{5j} \in \{0, \dots, 12\}$ e 0 significa a ausência de uma nota.

3.2 Operadores Genéticos

A criação de novos cromossomos através das gerações é feita por operadores genéticos cuidadosamente projetados, que na verdade permitem que o processo evolutivo ocorra. Os operadores mais comuns são a mutação e o cruzamento, apesar de operadores mais complexos poderem ser projetados para um campo específico de problemas. Estes operadores podem ser cegos ou guiados, o que significa que eles podem nem sempre ocorrer de maneira totalmente aleatória. Operadores guiados podem ajudar aplicações musicais já que mudanças completamente aleatórias nos cromossomos não são convenientes em algumas situações. Por exemplo, se um gene representa uma nota, a mutação pode ser guiada para respeitar algumas regras melódicas ou harmônicas.

Alguns operadores musicais comuns são usados na implementação deste trabalho para tornar o processo evolutivo mais eficiente. Além do cruzamento, todos os outros operadores ocorrem na fase de mutação. A probabilidade de se entrar na fase de mutação é de 20% e cada operador de mutação tem outra probabilidade de ser aplicado. Este valor é definido relativamente alto pois algumas das possíveis mutações que não afetam muito as soluções têm mais chance de serem escolhidas. A probabilidade de se entrar na fase de cruzamento é de 90% e apenas o cruzamento musical pode ocorrer. Todas as probabilidades de aplicação destes operadores foram arbitrariamente escolhidas pelos autores baseado na experiência adquirida após várias execuções do algoritmo. Os operadores musicais usados na evolução das harmonias são descritos abaixo.

Cruzamento Musical O cruzamento implementado não funciona a nível de bits, já que várias soluções inapropriadas seriam geradas. Similarmente ao cruzamento usual, um ponto é escolhido entre os pais e eles dividem informação considerando os genes à esquerda ou à direita deste ponto. Porém, a informação de um compasso é inseparável e o ponto de corte deve ser entre 2 compassos. A seleção de apenas 1 ponto de corte é conveniente já que ele não quebra muitas relações entre os acordes. Usar mais de um ponto de corte poderia romper muito as soluções. A relação entre compassos é importante pois várias restrições de avaliação dependem da associação entre compassos. A probabilidade de um cruzamento é de 90%.

Mutação da Altura Tonal Muda a altura tonal de uma das notas de um compasso. A maior mudança permitida em uma nota é de 1 tom para que alguns intervalos verticais muito largos sejam evitados. Um intervalo mais largo, pode ser assim alcançado através da aplicação de outros operadores ou até do operador de mutação da altura tonal mais de uma vez mas não com uma única mutação da altura tonal. Intervalos de no máximo 1 tom também forçam o algoritmo a explorar mais acordes dissonantes já que uma nota da tríade nunca será mutada para outra nota da tríade.

Note que intervalos verticais extremamente largos não são mesmo previstos pelo esquema de representação. A probabilidade de se usar este operador é de 30%. Se não há nota alguma na posição aleatoriamente selecionada (apenas possível na quinta nota do compasso), o operador não é aplicado.

Troca dentro do mesmo compasso Para trocar a posição das notas dentro do mesmo compasso. O operador cria inversões em um acorde dado. A probabilidade de se usar este operador é 50%. Se uma posição sem nota é selecionada, uma nova posição é selecionada.

Reinicializar o acorde Reinicializa todas as notas de um compasso usando a tríade com uma nota da melodia no compasso correspondente. Isso cria novos acordes com alta probabilidade de serem aceitos. Todas as tríades têm a mesma probabilidade de serem escolhidas e a probabilidade de se usar este operador é 15%.

Copiar Copia a informação de um compasso para outro compasso, criando a repetição de alguns acordes na harmonia. A probabilidade de se usar este operador é 5%.

A probabilidade de se entrar na fase de mutação é definida com 20% devido a algumas mutações que não alteram expressivamente a aptidão de uma solução, tal como a troca dentro do mesmo compasso, que pode apenas interferir na condição da posição da nota fundamental.

3.3 Harmonização Multiobjetivo

Duas funções de avaliação são definidas para trabalhar com o compromisso entre dissonância e simplicidade das harmonias. Isso é feito considerando-se que harmonias contendo acordes com apenas a tríade simples (1^a, 3^a e 5^a) ou a tríade simples mais um 7^a em alguns casos são boas harmonias de acordo com o critério de simplicidade. Nestas harmonias, a 7^a não é considerada uma nota desejável a não ser em um contexto no qual ela resulta em uma nota apropriada no acorde seguinte. A maximização de uma função de aptidão definida como função simplicidade f_1 representará a avaliação deste tipo de harmonias.

A segunda função de avaliação a ser maximizada, chamada função dissonância f_2 dá mais preferência a harmonias com dissonância em seus acordes, e compassos com mais notas que a tríade são normalmente recompensados. Apesar desta consideração, notas além da tríade que não se encaixam na melodia são penalizadas da mesma maneira que estas seriam na primeira função de avaliação.

Talvez seria possível conciliar as duas funções objetivo se já se soubesse as preferências do usuário ou se o projetista se tornasse o usuário e usasse suas próprias preferências para pesar opções contraditórias. Enquanto alguns objetivos são normalmente comuns às harmonias, tal como definir tríades específicas para guiar a progressão harmônica, alguns objetivos são muito contraditórios dependendo das preferências do usuário. Por exemplo, a inclusão de notas dissonantes dará necessariamente diferentes recompensas e penalidades em diferentes funções.

Com uma abordagem multiobjetivo, o usuário pode obter um conjunto de harmonias que se encaixa à melodia e representa o compromisso entre as regras das funções objetivo. Assim, o usuário pode escolher uma harmonia de um conjunto de resultados e definir as preferências enquanto ouve as soluções.

Para aplicar esta abordagem multiobjetivo ao problema de harmonização, emprega-se o *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm* (NSGA-II) (Deb et al., 2000). Neste método, as soluções são agrupadas em conjuntos de soluções candidatas que pertencem à mesma frente de soluções não-dominadas³ e então ordenados de acordo com seus grupos, antes de passar pelos processos reprodutivos do AG.

3.3.1 Avaliação das Soluções

Para classificar quão boa é uma solução, é necessário definir como conhecimento sobre o assunto será modelado no sistema. Como já foi mostrado, muito deste conhecimento já foi implementado nos operadores genéticos mas estes não são capazes de distinguir quais são as boas soluções. A aptidão de uma solução é dada de acordo com questões como a duração de uma nota e intervalos verticais da harmonia.

É necessário então determinar alguns fatores que podem ser desejáveis às soluções, como descrito abaixo com as penalidade usadas nestes trabalho.

- **Tríades:** A tríade é a estrutura básica de um acorde na música ocidental. A ausência de tríades tem uma penalidade de 40 neste trabalho. Se há uma 3ª e não há 5ª, a penalidade se reduz a 15 na função simplicidade f_1 e 5 na função dissonância f_2 . Com a tríade completa, há duas notas ainda que ainda podem ser usadas para criar tensão.
- **Acordes Dissonantes:** Eles podem ou não ser desejáveis. Isso é o que justifica principalmente o uso de 2 funções de avaliação. Neste trabalho, notas fora da tríade são consideradas dissonantes e elas são penalizadas na primeira função de aptidão em 10 enquanto são recompensadas em 10 na função dissonância. Uma 7ª não é penalizada na função simplicidade se ela leva a outra nota no compasso seguinte com um intervalo de meio tom. Duas notas dissonantes também levam a uma penalidade de 20 nas duas funções se eles estão a uma distância vertical de meio tom.
- **Largos intervalos:** Não é muito usual ter intervalos muito largos nos acordes, como 12 tons entre 2 notas consecutivas. Este problema é normalmente tratado penalizando largos intervalos. Neste trabalho, o problema é resolvido pela representação da solução, que já esta não considera intervalos extremamente largos já que a distância entre as notas é definida quando o genótipo é transcrito no fenótipo.
- **Notas e Acordes Inválidos:** Notas que não pertencem às escalas implicitamente definidas pela melodia são penalizadas em 30. Uma nota é considerada inválida na função simplicidade se (i) ela não pertence à escala implícita principal da música e (ii) ela não existe no compasso respectivo da melodia. Uma nota é considerada inválida na função dissonância se (i) ela não pertence à escala implícita principal da melodia, (ii) ela não existe no compasso respectivo da melodia, (iii) ela não leva cromaticamente a uma outra nota no compasso seguinte e (iv) notas com meio tom de distância estão no respectivo compasso da melodia. A penalidade para esta restrição é 30 na medida em que esta deve ser maior que a recompensa para acordes dissonantes na função dissonância.

³Uma solução Pareto domina outra se aquela é melhor que esta em relação a todas as funções objetivo.

- **Evitar uníssonos:** Não é desejável ter uníssonos gastando notas que poderiam ser usadas para formar novos acordes. Uníssonos da nota fundamental podem ser normais enquanto uníssonos da 3ª não são usualmente aceitos. A maioria dos uníssonos são penalizados em 5, uníssonos de 3ªs são penalizados em 10 e uníssonos com a nota fundamental não são penalizados.
- **Omissão de notas:** Quando a tríade não está completa. Como há 5 notas possíveis no esquema de representação deste trabalho, é possível ter notas extras sem excluir notas da tríade. A omissão da 5ª pode ser considerada normal para ter mais notas extra. A única restrição relativa à omissão de notas é a ausência de tríades já discutida.
- **Extensão das notas:** Notas devem respeitar uma extensão pré-definida de alturas tonais para evitar acordes estranhos. No esquema de representação deste trabalho, a altura tonal é definida quando o genótipo passa para o fenótipo. Assim, não há necessidade de penalização neste aspecto.
- **Sétimas:** Sétimas que levam a outra nota no acorde seguinte são recompensadas em 10 na função dissonância. Elas são recompensadas na função simplicidade apenas se levarem a uma 3ª no acorde seguinte.
- **Progressões:** Progressões específicas de acordes ou cadências na harmonia podem ter algum tipo de preferência, especialmente quando compoem em um estilo particular. Este tipo de recompensa não é considerado neste trabalho pois de fato isso dá recompensas implícitas para alguns gêneros de música que utilizam estas progressões frequentemente. Estes tipos de regras não podem ser consideradas em geral mesmo quando considerando apenas música ocidental em um sentido amplo.
- **Posição da nota fundamental:** Ter alguma recompensa a acordes com a nota fundamental na primeira nota, que é a nota mais grave do acorde, pode ser interessante. Caso contrário, não haveria diferença de aptidão entre acordes invertidos e a maior parte dos acordes tenderia a ser invertida. O valor de recompensa é 10 na função simplicidade e 10 na função dissonância.

A Tabela 3.3.1 mostra uma breve descrição das condições de avaliação com sua influência na função de aptidão.

4 EXPERIMENTOS E RESULTADOS

Experimentos com uma população de 100 indivíduos aleatoriamente inicializados ocorrem com 100 execuções do algoritmo. Valores aleatórios entre 1 e 12 foram dados para cada nota, exceto para a quinta nota de cada compasso, que recebeu valores de 0 a 12, onde 0 significa que não há nota. A representação é feita da mesma maneira que na Tabela 2.

Uma melodia conhecida foi usada com o problema para dar uma melhor ideia das capacidades do algoritmo. A melodia está representada na Figura 1. A escala implícita da melodia usada como referência foi dó maior.

Na avaliação das soluções, a presença de notas inválidas tem o maior peso na avaliação das soluções. Isso ocorre principalmente por causa da natureza do problema e as penalidades para notas inválidas nunca alcançam um nível baixo pois dois conceitos conflitantes de notas inválidas são definidos na função de aptidão.

A Figura 2 mostra uma solução da frente de pareto com um boa valor na função simplicidade (fitness (50, 61)). A harmonia gerada é muito simples e tem muita similaridade

Tabela 3. Parâmetros da avaliação da aptidão

Condição	Função Simplicidade	Função Dissonância
1: Ausência de tríade	-40	-40
1.1: Ausência de 5 ^{as}	-15	-5
2: Nota dissonante	-10	+10
2.1: Sétima	0	+10
2.2: Dissonância de meio tom	-20	-20
3: Uníssonos	-5	-5
3.1: Unísono da 3 ^a	-10	-10
3.2: Unísono da nota fundamental	0	0
4: Nota Inválida ^a	-30	-30
5: Sétima significativa ^b	+10	+10
6: Posição da nota fundamental	+10	+3

^a Note que as condições para uma nota ser considerada inválida são diferentes em cada função.

^b Note que as condições para uma sétima ser considerada significativa são diferentes em cada função.



Figura 1. Melodia de *Parabéns a Você*.

dade com a harmonia original da música, a qual o algoritmo não tem acesso explícito. As únicas diferenças seriam os acordes menores, que são inexistentes na música original (Dm é o relativo menor de F).

A possibilidade de se gerar harmonias similares à original é evidência de que o algoritmo leva a soluções musicais. Isso não significa que uma solução que não se parece com a original é uma má solução. Tais harmonias podem ser encontradas e copiar ou encontrar a harmonia original não é o objetivo deste trabalho. É por isso que testes “*ground-truth*”, baseados na harmonia original, não se aplicam a este algoritmo pois a intenção é criar harmonias factíveis tão diversas e criativas quanto possível.

A Figura 3 mostra um solução retirada da frente de Pareto com um bom valor na função dissonância (−40, 101). É possível notar que o algoritmo pode gerar harmonias mais complexas mesmo para uma melodia simples.

É também interessante notar que esta solução tem um ré maior, que não pertence à escala implícita (Dm pertenceria). Contudo, este ré maior está em um compasso no qual não há uma nota fá, que seria a terceira do acorde ré menor. Assim, a nota fá suspenso no acorde ré maior na harmonia não é penalizada na função dissonância pois leva cromaticamente a outra nota no acorde seguinte (F^Δ).

Figura 2. Solução 1.

Figura 3. Solução 2.

De acordo com as regras determinadas, o algoritmo pode ser considerado bem sucedido pois todos os indivíduos da frente de Pareto das últimas gerações romperam poucas ou nenhuma restrições.

A efetividade do algoritmo e seus operadores foi medida pelo hipervolume das frentes de Pareto (Fonseca et al., 2005) usando um ponto de referência $(-1200, -1200)$. A Figura 4 representa os hipervolumes de 200 gerações no eixo x em escala logarítmica.

5 CONCLUSÃO

Os experimentos com 2 funções para avaliar as soluções tornaram claro aspectos importantes deste tipo de problema. O conhecimento específico do sistema tem muita influência nos resultados. O modo como as soluções que são boas apenas em relação a uma função de avaliação diferem de outras soluções demonstra isso claramente. Esta abordagem possibilita que o algoritmo ignore preferências particulares do usuário e gere um conjunto de soluções factíveis.

O algoritmo convergiu para várias soluções interessantes, como a da Figura 3. Esta solução é o resultado da flexibilidade montada no sistema que leva a outro equilíbrio, entre a diversidade e a obediência de certas regras. A última opção não é normalmente útil para compositores procurando por novas idéias. Porém, estes sistemas com criatividade podem dar conjuntos de soluções factíveis em vez de retornar sempre a mesma solução excessivamente baseada em regras.

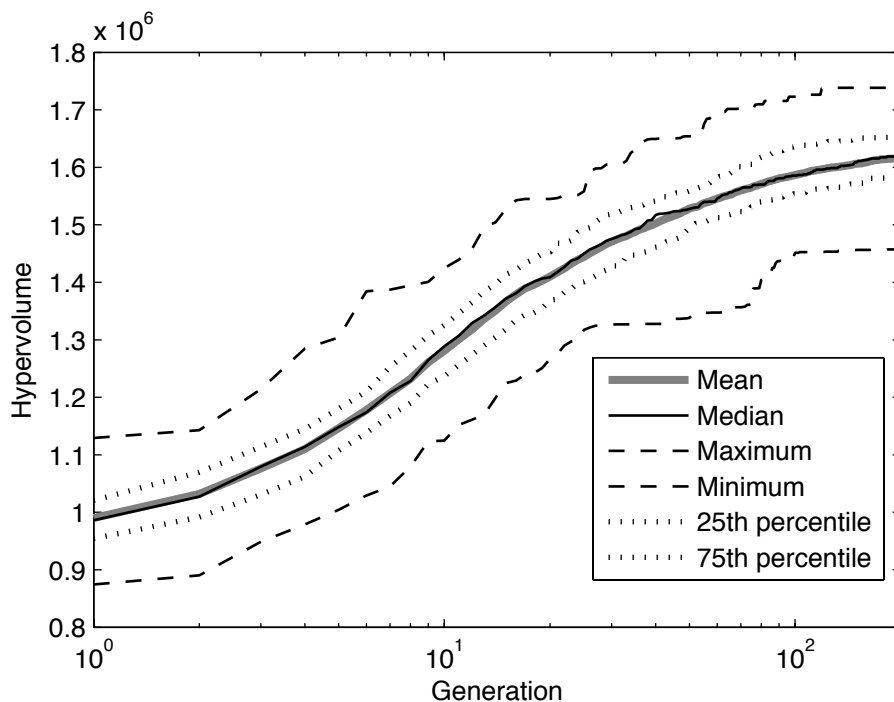


Figura 4. Evolução do hipervolume.

Métodos que permitissem que um AG tivesse uma ideia de como a música inteira deve ser e tivessem qualquer tipo de influência externa poderiam levar a melhores abordagens. Atualmente, a maior parte das condições de avaliação de uma solução consideram apenas o acorde seguinte, no máximo. Seria interessante imaginar sistemas que pudessem analisar os compassos como um todo antes de aplicar operadores genéticos.

Modelos baseados em regras podem ser eficientes em alguns casos específicos de harmonização, especialmente quando se compõe em um estilo particular de música. Contudo, sistemas evolucionários tem claras vantagens de flexibilidade e possibilidades de novas soluções criativas. A abordagem multiobjetivo demonstra claramente como estas possibilidades de novas soluções criativas podem ser utilizadas. Para trabalhos futuros, uma melhor definição de quais aspectos são preferências e quais aspectos são regras podem levar a uma abordagem evolucionária multiobjetivo que poderia também ser implicitamente considerada um sistema baseado em regras.

Agradecimentos

Este trabalho teve o apoio do Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento (CNPq) e da Coordenação para Aperfeiçoamento de Nível Pessoal Superior (CAPES).

Referências

- John Al Biles**, GenJam: Evolution of a jazz improviser, David W. Corne and Peter J. Bentley, editors, *Creative Evolutionary Systems*, pp. 165–188, Morgan Kaufmann, 2001.
- John Al Biles**, GenJam: A genetic algorithm for generating jazz solos, *Proceedings of the International Computer Music Conference*, pp. 131–131, Citeseer, 1994.
- Andrew R. Brown**, Opportunities for evolutionary music composition, *Proceedings of the Australasian Computer Music Conference*, pp. 27–34, Melbourne, 2002.

- David W. Corne and Peter J. Bentley**, editors, *Creative Evolutionary Systems*, The Morgan Kaufmann Series in Artificial Intelligence, Morgan Kaufmann, 2001.
- Charles Darwin**, *The origin of species*, Signet Classic, 2003.
- Kalyanmoy Deb, Sameer Agrawal, Amrit Pratap, and T. Meyarivan**, A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II, *Parallel Problem Solving from Nature PPSN VI*, pp. 849–858, Springer, 2000.
- Carlos M. Fonseca, Joshua D. Knowles, Lothar Thiele, and Eckart Zitzler**, A tutorial on the performance assessment of stochastic multiobjective optimizers, *Third International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization (EMO 2005)*, volume 216, 2005.
- Andrew Horner and Lydia Ayers**, Harmonisation of musical progression with genetic algorithms, *ICMC Proceedings 1995*, pp. 483–484, 1995.
- Michael Kennedy and Joyce Bourne**, *The concise Oxford dictionary of music*, Oxford University Press, USA, 2004.
- Jon McCormack**, Open problems in evolutionary music and art, *Lecture Notes in Computer Science, Applications on Evolutionary Computing, EvoWorkshops 2005: EvoBIO, EvoCOMNET, EvoHOT, EvoIASP, EvoMUSART, and EvoSTOC*, volume 3449, pp. 428–436, Springer, 2005.
- Ryan A. McIntyre**, Bach in a box: The evolution of four part baroque harmony using the genetic algorithm, *Evolutionary Computation, 1994. IEEE World Congress on Computational Intelligence., Proceedings of the First IEEE Conference on*, pp. 852–857, IEEE, 1994.
- Eduardo Reck Miranda and John Al Biles**, *Evolutionary computer music*, Springer Verlag, 2007, ISBN 1846285992.
- George Papadopoulos and Geraint Wiggins**, AI methods for algorithmic composition: A survey, a critical view and future prospects, *AISB Symposium on Musical Creativity*, pp. 110–117, Citeseer, 1999.
- Somnuk Phon-Amnuaisuk, Andrew Tuson, and Geraint Wiggins**, Evolving musical harmonisation, *Artificial neural nets and genetic algorithms: proceedings of the international conference in Portorož, Slovenia, 1999*, page 229, Springer Verlag Wien, 1999, ISBN 3211833641.
- Colin Reeves**, Genetic algorithms, *Handbook of Metaheuristics*, pp. 109–139, 2010.
- Juan J. Romero and Penousal Machado**, *The art of artificial evolution: A handbook on evolutionary art and music*, Natural Computing Series, Springer, 2007, ISBN 3540728767.
- Stephen Todd and William Latham**, *Evolutionary art and computers*, Academic Press, Orlando, FL, USA, 1992, ISBN 012437185X.
- Rodney Waschka II**, Avoiding the fitness bottleneck: Using genetic algorithms to compose orchestral music, *International Computer Music Conference ICMC99*, pp. 201–203, 1999.