

Harmonização musical automática: tendências em inteligência computacional

Nicolás Andrés Espinoza Santibáñez
Universidade Federal do Rio de Janeiro – nicolas.espinoza@smt.ufrj.br

Luiz Wagner Pereira Biscainho
Universidade Federal do Rio de Janeiro – wagner@smt.ufrj.br

Resumo: Este trabalho apresenta um breve levantamento das estratégias mais representativas da inteligência computacional aplicadas à harmonização musical automática nas últimas três décadas, procurando contextualizar o desenvolvimento atual deste campo de pesquisa, as suas preocupações e para onde ele se dirige. Um resumo com essa abrangência não está disponível na literatura, e sua elaboração foi motivada pelas necessidades da pesquisa dos autores no tema.

Palavras-chave: Harmonização automática. Inteligência computacional. Inteligência artificial simbólica. Métodos de otimização. Aprendizado de máquina.

Automatic Musical Harmonization: Trends on Computational Intelligence

Abstract: This work presents a brief survey on the most representative computational intelligence strategies applied to automatic musical harmonization of the last three decades, in order to contextualize the current development and concerns of this research field, and where it is headed. Such an encompassing overview is not available in the literature, and its elaboration was motivated by the authors' research needs.

Keywords: Automatic harmonization. Computational intelligence. Symbolic artificial intelligence. Optimization methods. Machine learning.

1. Introdução

A harmonização musical automática é um subcampo da computação musical no qual várias técnicas da inteligência computacional têm sido exploradas para a criação automática de acompanhamento polifônico para uma determinada linha melódica de entrada, incluindo representações gramaticais, sistemas baseados em regras, algoritmos evolutivos, problemas de satisfação de restrições, redes neurais e métodos probabilísticos.

Uma categorização hierárquica da literatura existente não é uma tarefa fácil ou simples, existindo sobreposições entre as definições de alguns métodos e considerável hibridização entre eles. Por exemplo, pode-se formular máquinas de Boltzmann, autômatos finitos e gramáticas estocásticas como modelos de Markov, assim como se pode categorizar sistemas de autossimilaridade como gramáticas de sistemas Lindenmayer. Exemplos de métodos híbridos são algoritmos evolutivos com sistemas baseados em regras e cadeias de Markov com satisfação de restrições.

Excelentes análises exaustivas são apresentadas por Nierhaus (2009) e Fernández e Vico (2013).

A abordagem básica tem sido a de capturar as regras necessárias para a formação adequada de estruturas musicais, e gerar notas que satisfazem estas regras. Mas essas regras não constituem um algoritmo de composição completo, sendo apenas especificações de combinações proibidas consideradas dissonantes ou desagradáveis para o ouvido, e o cumprimento destas regras não garante resultados significativos ou interessantes; analogamente à linguagem, essas regras são apenas sintaxe.

Wiggins (1999) revisa algumas estratégias de harmonização automática, levantando a questão sobre o que falta na geração automática de harmonia para fazer uma peça digna de ser ouvida, afirmando que a harmonização não é apenas colocar as notas em acordo com um conjunto de regras harmônicas, mas também a criação de uma estrutura musical que estabelece uma intenção, sugerindo a necessidade de considerar estruturas musicais em diferentes níveis. Ele introduz o conceito de estrutura musical como o que distingue a música do som, e exemplifica seus diferentes níveis através da sonata como uma forma clássica bem circunscrita, e as progressões harmônicas como um nível de estrutura local. Wiggins (1999) alega que a relação temporal entre as diferentes seções de uma peça é o aspecto mais importante da estrutura musical em todos os seus níveis na harmonização automática, estabelecendo uma relação entre estrutura e tensão musical relacionada com o nível de realização harmônica percebida em uma frase musical, o nível de dissonância local e a estrutura rítmica da passagem prévia.

A essência dessas ideias é, de alguma forma, compartilhada por Pachet e Roy (2001), e conceitos tais como estrutura musical e intenção são o fio condutor da pesquisa realizada durante a última década na busca de resultados com maior valor artístico.

Este documento faz uma breve revisão da literatura sobre aplicações da inteligência computacional na harmonização automática desenvolvida nos últimos trinta anos. Casos representativos de abordagens da inteligência artificial simbólica e métodos de otimização são apresentados a fim de contextualizar o desenvolvimento da pesquisa atual e sua direção, alguns com maior detalhe que outros. Em sua pesquisa no tema de harmonização automática de choro, os autores não encontraram disponível na literatura um trabalho com esse viés, o que motivou a preparação deste texto.

2. Inteligência artificial simbólica

2.1 Métodos baseados em gramáticas

Estratégias gramaticais são baseadas na suposição de que a estrutura musical é, em linhas gerais, análoga à estrutura da linguagem, tornando assim possíveis descrições por meios semelhantes. Apesar de essa analogia ser válida apenas dentro de certos limites, sendo enganosa se for superestimada, as gramáticas apresentam utilidade na modelagem das convenções harmônicas, e na captura de estilos específicos e variações de forma natural.

Steedman (1996) utilizou um formalismo gramatical para capturar o estilo básico do *Blues* de 12 compassos por meio de uma “semântica musical” com base na noção de expectativa harmônica no espaço de harmonia tonal de Longuet-Higgins (1962), o que pode dar uma sensação de intenção musical. Um resultado satisfatório do trabalho é a capacidade de modificar formas particulares preservando o movimento harmônico original (i.e., variações), mas faz-se necessário restringir o tamanho das estruturas produzidas.

Ponsford, Wiggins e Mellish (1999) utilizam um mecanismo estatístico de aprendizagem de gramáticas para capturar a estrutura harmônica de uma forma de dança do século XVII. Esta formulação pode ser interpretada como um modelo de Markov, e, como no trabalho de Steedman (1996), força que as sequências geradas tenham um comprimento predeterminado, tendo-se mostrado capaz de capturar o estilo musical de forma razoável.

Um objeto de estudo de interesse crescente na computação musical são os sistemas de Lindenmayer ou sistemas-L, gramáticas formais paralelas introduzidas por Lindenmayer (1968) como um marco teórico no estudo do desenvolvimento de um organismo multicelular simples. Essencialmente, são um tipo de sistema generativo baseado em regras que aplica esquemas de substituição em um subconjunto inicial de um conjunto finito de símbolos. Ao contrário das gramáticas de Chomsky (1956), as substituições são aplicadas simultaneamente para cada símbolo em cada iteração.

Dubois (2003) extrai características dos sinais de áudio através de codificação simbólica, expandindo os símbolos por meio de sistemas-L para criar acompanhamentos em tempo real.

Watson (2008) utiliza conceitos de sistemas-L e fractais para a criação de acordes básicos em um sistema de composição para flauta transversa moderna no estilo da era clássica.

Pestana (2012) tem explorado a relação entre as regras e variações definidas por Schönberg, e a autossimilaridade dos fractais e os algoritmos criados por Lindenmayer, obtendo um sistema de acompanhamento interativo que gera formas minimalistas de música.

2.2 Sistemas baseados em conhecimento

Este tipo de estratégias engloba diversos sistemas baseados em regras sob uma variedade de paradigmas, os quais representam conhecimento como símbolos com algum grau de estrutura. Na composição musical, o conhecimento é tradicionalmente estruturado como um conjunto de regras de manipulação de símbolos; conseqüentemente, os sistemas baseados em conhecimento e regras são formas orgânicas de representação musical.

As primeiras tentativas foram sistemas baseados em conhecimento estático aplicados na harmonização a quatro vozes, como o sistema de Thomas (1985) para a harmonização de melodia coral com fins educacionais.

Outro exemplo é o harmonizador a quatro vozes de Steels (1986), que deriva regras por meio de busca heurística em um conjunto de restrições que expressa conhecimento musical de harmonia tonal clássica. Alternativamente, pode-se considerar este método um problema de satisfação de restrições, embora continue sendo uma busca bruta sem procedimento de consistência.

Algumas estratégias têm representações de conhecimento que podem ser modificadas dinamicamente, permitindo ao sistema aprender novas regras, sendo interessantes para aplicações em tempo real sob avaliação do usuário.

Widmer (1992) apresenta um sistema de harmonização de melodias simples que extrai regras de harmonização da análise hierárquica das melodias de treinamento e das avaliações por usuário do corpus de treinamento.

Spangler (1999) implementa um sistema gerador de regras para a harmonização em tempo real de corais a quatro partes no estilo de J. S. Bach, que extrai regras probabilísticas de exemplos usando uma representação musical derivada do baixo cifrado.

Rybnik e Homenda (2013) incorporam lógica difusa como uma ferramenta de agregação de conhecimento personalizada para o modelo de harmonização apresentado em (RYBNIK e HOMENDA, 2012). O modelo é amplamente baseado em conhecimento de teoria musical, motivo pelo qual não precisa de uma grande quantidade de dados representativos, e os autores afirmam atingir universalidade e controle direto sobre a harmonização através de manipulação de parâmetros subjacentes.

2.3 Problemas de satisfação de restrições (CSP¹)

Este tipo de abordagem se baseia na concepção de um espaço de busca de possibilidades circunscrito por restrições, de forma a lidar com o vasto espaço de estados envolvido no processo combinatório da harmonização.

Ebcioğlu (1986) apresenta CHORAL, um conjunto de 350 regras para harmonização de melodias no estilo dos corais de J. S. Bach, considerado por Wiggins (1999) o mais reconhecido sistema de harmonização automática, e por Pachet e Roy (2001) o primeiro sistema completo com capacidade de produzir harmonizações de quatro vozes de qualidade. O sistema contém vários módulos que abordam diferentes aspectos do processo composicional executados em BSL, uma linguagem de programação de restrições lógicas especialmente concebida para a implementação de *backtracking*² inteligente, técnica que o autor considera necessária para lidar com a busca combinatorial do processo de harmonização. Mas, apesar de ser o primeiro sistema capaz de obter resultados de qualidade em problemas musicais de dificuldade considerável, e de reconhecer-se uma estrutura musical geral ou intenção no processo, o elevado número de módulos implementados na linguagem de Ebcioğlu (1986) e suas complexas interações fazem a descrição confusa e de difícil análise.

Tsang e Aitken (1991) implementam o primeiro sistema de harmonização a quatro vozes com técnicas convencionais de programação lógica de restrições por meio de vinte regras em CLP(R)³ (JAFFAR e LASSEZ, 1987). Tsang e Aitken (1991) afirmam que a harmonização tonal é inerentemente um paradigma de satisfação de restrições, usando representações de objetos musicais como *itches*⁴, intervalos e acordes em um estilo declarativo natural de regras de harmonização. No entanto, a ineficiente

¹ *Constraint satisfaction problems*

² Eliminação de candidatos a soluções não promissoras

³ *Constraint logic programming (Real)*

⁴ Alturas percebidas

utilização de espaço da implementação CLP e o custo computacional da propagação de restrições resultam em um processo lento, podendo consumir cinco minutos para harmonizar uma melodia de onze notas.

Ovans e Davison (1992) descrevem um sistema CSP interativo para contraponto de primeira espécie, destacando a profundidade combinatorial do processo de harmonização automática, o alto custo computacional da implementação de restrições passivas, e que a satisfação de restrições por si só não é suficiente para que se obtenham resultados musicais. Eles são os primeiros a propor a incorporação de técnicas de consistência de arcos para mitigar a ineficiência do processo devido ao excessivo *backtracking*, o que em geral é uma premissa aceita em programação de restrições. Ovans e Davison (1992) comparam o desempenho de técnicas de *backtracking*, verificação posterior e consistência de arcos na harmonização de duas vozes—o que, apesar de validar a eficiência superior das técnicas de consistência de arcos, foi criticado como não convincente pelo fato de harmonizar apenas duas vozes.

Pachet e Roy (1995) mostram que considerar variáveis de acorde explícitas pode reduzir a complexidade teórica do problema de harmonização, dividindo o espaço de busca por um fator equivalente à densidade de notas do acorde. Wiggins (1999) descreve esta abstração como um nível de raciocínio inicial particularmente promissor e um passo à frente em trabalhar com intenção, caracterizando acordes como *clusters* harmônicos. Esta abordagem separa o problema em dois CSPs, onde o primeiro apenas trata com notas e as suas restrições, construindo o domínio das variáveis de acorde, e o segundo usa as variáveis de acorde para produzir as soluções. Na prática, o sistema calcula soluções para harmonizar uma linha de baixo não figurada em tempo “quase” real sem fornecimento de conhecimento ao sistema.

Ramirez e Peralta (1998) apresentam um sistema CSP tradicional que gera uma sequência de nomes ou etiquetas de tríades que harmoniza adequadamente uma determinada melodia de entrada sem implementação de consistência de arco. O sistema tenta maximizar o número de progressões conhecidas, compiladas em um dicionário, em duas etapas, sendo a primeira a geração de uma ampla variedade de sequências legais de acordes, e a segunda a depuração do conjunto solução restringindo as sequências a seguir modelos padrão.

Phon-Amnuaisuk (2002) implementa um sistema de restrições com uma representação explícita do conhecimento de controle para harmonizar corais no estilo

de J. S. Bach. Esta estratégia de representação permite modificação fácil e flexível das estruturas de controle e decomposição hierárquica do processo de harmonização, dando assim mais controle sobre o processo de busca, além de gerar harmonizações naturais.

O sistema ANTON de Boenn, Brain e De Vos (2008) é um sofisticado compositor automático e harmonizador a duas vozes que utiliza uma estratégia de programação de conjunto de resposta. A estratégia, conhecida como *AnsProlog*, é baseada em uma linguagem declarativa puramente orientada a problemas complexos de busca, dando ao sistema a suficiente flexibilidade para ser uma plataforma de pesquisa de regras de composição. Esta abordagem não resolve o difícil problema de estrutura global, sendo capaz de gerar melodias curtas, mas ineficaz para construção de uma peça completa; entretanto, apresenta um ponto de partida para o desenvolvimento de um sistema hierárquico em escalas de tempo, sendo que o tempo de execução exibido sugere aptidão para aplicações em tempo real.

3. Métodos de otimização

3.1 Algoritmos evolutivos

Num contexto geral em que as abordagens por algoritmos evolutivos usualmente fazem uso de conhecimento musical para harmonizar uma peça musical a quatro vozes, Vox Populi (MORONI et al., 1994) é a única estratégia de harmonização evolutiva baseada apenas em fatores fisiológicos da audição para a criação de uma noção de aproximação ao centro tonal da sequência gerada em função da ordem de consonância acústica dos intervalos musicais.

A estratégia representa o *pitch* das notas como um conjunto de componentes espectrais por meio de formalismos de conjuntos *fuzzy*⁵, e define os indivíduos como grupos de quatro notas ou acordes. Em seguida, consonância melódica e harmônica são calculadas em função da quantidade de sobreposição entre as componentes espectrais das notas, fornecendo assim critérios de avaliação de aptidão.

Esse trabalho está mais próximo de ser um modelo cognitivo que ser um harmonizador tonal, expandindo as possibilidades de produzir modelos de harmonização além da escala temperada e do sistema tonal.

⁵ Difusos

3.2 Algoritmos evolutivos baseados em conhecimento

McIntyre (1994) apresenta um algoritmo genético para geração de harmonias barrocas que codifica um conjunto de regras como funções de pontuação, e calcula aptidões individuais por meio de uma estratégia de somas ponderadas das funções de pontuação condicionadas por níveis. O autor afirma que quase toda geração produz harmonizações críveis com alta aptidão, como também revela indivíduos de baixa aptidão no caso de melodias longas.

Phon-Amnuaisuk, Tuson e Wiggins (1999) declararam formalmente funções de aptidão baseadas em preceitos derivados da teoria musical e da literatura musicológica, concluindo a improbabilidade de se resolver o problema da harmonização através de algoritmos genéticos sem algum conhecimento da estrutura global da peça musical. Também reconhecem a viabilidade na resolução de tarefas musicais pequenas e restritas das implementações por algoritmos genéticos, e as limitações para atingir soluções ótimas causadas pela falta de estrutura de raciocínio e pela natureza heurística e estocástica do processo.

O algoritmo genético implementado por Maddox e Otten (2000) para harmonização de corais no estilo de J. S. Bach apresenta melhores resultados do que seus antecessores. Sua representação é uma versão mais flexível do trabalho de McIntyre (1994), sem funções de pontuação condicionadas por níveis, sendo um procedimento de busca menos restrito em um espaço de busca maior. Eles inferem que a aptidão dos acordes tem que ser avaliada com maior prioridade que a aptidão da condução de vozes, que múltiplas mutações de acordes provocam estancamento do algoritmo em níveis baixos de aptidão, e que o uso de seleção por roleta de indivíduos e recombinação em um ponto produzem resultados significativamente melhores que a seleção uniforme.

Lozano, Medaglia e Velasco (2009) propuseram um sistema para a geração de sequências de acordes *pop-rock* através de funções utilidade embebidas em um procedimento que combina algoritmos genéticos e busca com vizinhança variável (VNS⁶) (HANSEN; MLADENOVIĆ, 2001). Em primeiro lugar, sequências melódicas são divididas em segmentos de igual comprimento medidos em compassos, sendo cada segmento classificado com uma função harmônica. Depois, um algoritmo genético é implementado para encontrar um conjunto de boas soluções fazendo uso de duas

⁶ *Variable neighborhood search*

tabelas subjetivas para avaliar utilidades de intervalo melódico e grau harmônico dependendo das funções de segmento pré-definidas. Finalmente, é construída uma grade a partir das melhores soluções, e uma VNS encontra o caminho que contém o maior número de progressões com base em uma lista de vinte progressões do estilo *pop-rock*.

O problema específico considerado por De Prisco e Zaccagnino (2009) é a harmonização de uma linha de baixo não figurada. Uma contribuição importante deste trabalho é a introdução de operadores de recombinação e mutação especializados, assim como pontos de corte para recombinação onde o número de violações de regras musicais é maior, e aceitadores de mutação baseados em regras musicais, mas com uma limitação de tempo fundamental, uma unidade básica de duração de *beat*⁷ que ignora notas curtas. De Prisco, Zaccagnino e Zaccagnino (2011) estenderam o trabalho a composições de quatro vozes implementando um algoritmo multiobjetivo baseado em evolução diferencial de Pareto (MADAVAN; BIEGEL, 2002) que separa as avaliações das características musicais em funções de aptidão harmônicas e melódicas, obtendo melhores resultados em termos de medição da aptidão, mas com resultados musicais sem explicação clara.

Freitas e Guimarães (2011) apresentam outra abordagem multiobjetivo com operadores de recombinação e mutação especializados que é particularmente interessante porque suas funções de aptidão têm algum sentido de intenção local. Nesse caso, duas funções de aptidão são usadas para avaliar a simplicidade e a dissonância de indivíduos “acorde” dependendo dos intervalos que definem o acorde, e logo as soluções são ranqueadas por um algoritmo genético de ordenamento não dominante II (NSGA⁸-II) (DEB et al., 2000).

O algoritmo genético de Liu e Ting (2012) cria acompanhamentos melódico, de baixo, e acordes para uma linha melódica inicial. Cada tipo de acompanhamento tem sua própria tabela de pontuação, e as suas aptidões são calculadas condicionadas por níveis. Apesar de ser recente, o trabalho não apresenta contribuições ou melhoras importantes em termos de representação, operadores de recombinação ou mutação, ou definição de funções de aptidão, e a qualidade de seus resultados não é clara.

⁷ Unidade básica de tempo musical

⁸ *Nondominated sorting genetic algorithm*

Em geral, algoritmos genéticos baseados em conhecimento resultam menos interessantes por não resolverem o problema de estrutura harmônica global de uma peça musical, e por utilizarem representações que previnem acompanhamento em tempo real.

4. Redes neurais

Shibata (1991) propôs um dos primeiros exemplos de memória associativa como uma alternativa ao uso de conjuntos de regras, uma rede neural *feedforward*⁹ treinada por meio de extensa exposição a exemplos com o objetivo de harmonizar melodias simples, apresentando resultados da avaliação subjetiva para os acompanhamentos obtidos. Afirma que o módulo proposto gera progressões de acordes naturais comparáveis às de um módulo conduzido por uma tabela de transições, o que corresponde a uma definição de autômato finito.

Bellgard e Tsang (1992) utilizam máquinas de Boltzmann (BMs¹⁰) para aprender contextos locais de um corpus de corais, e uma estratégia de máquina efetiva de Boltzmann (EBM¹¹) para harmonizar corais de quatro vozes, mostrando a capacidade de aprender estilos de harmonização específicos. Em (BELLGARD; TSANG, 1994) são discutidas dificuldades de projeto que afetam a EBM e o processo de incorporação de restrições externas, as quais são consideradas críticas para o correto funcionamento do sistema harmonizador. Como resposta a isso, Bellgard e Tsang (1994) propõem um sistema híbrido baseado em redes neurais estocásticas e satisfação de restrições, abrindo a possibilidade de incluir informação do domínio na rede neural incorporando restrições absolutas no processo de indução. O sistema resolve o problema da harmonização como um processo não determinístico e não sequencial, no sentido de que para harmonizar um evento melódico utiliza informação dos eventos futuros, razão pela qual a implementação prática tem uma alta exigência computacional, mas são propostas algumas possíveis melhoras como o uso de máquinas de Boltzmann determinísticas.

HARMONET (HILD; FEULNER; MENZEL, 1991) é um sistema híbrido baseado em redes neurais *feedforward* e algoritmos de satisfação de restrições

⁹ Sem recursão

¹⁰ *Boltzmann machines*

¹¹ *Effective Boltzmann machine*

treinado para harmonizar corais a quatro vozes no estilo de J. S. Bach. Em contraste com o trabalho de Bellgard e Tsang (1994), esta é uma abordagem determinística e sequencial ao problema de harmonização. Hörnel e Ragg (1996) elaboraram sobre esse trabalho e apresentaram MELONET, um sistema de harmonização com a capacidade de gerar variações melódicas. Nesta nova proposta as melodias são aprendidas como seqüências de motivos usando o HARMONET como o primeiro estágio de processamento, além de uma rede neural adicional com neurônios do tipo *delayed-update*¹², o que reflete a natureza temporal multiescalar da música.

Gang e Lehmann (1995) abordam o problema da harmonização com uma estratégia de redes neurais recorrentes dividida em duas etapas com resultados aceitáveis em contextos locais, mas sem considerações sobre hierarquia musical tradicional. Primeiro, uma rede *feedforward* padrão de três camadas identifica as notas “chave”, no sentido da relevância para o processo de harmonização; em seguida, sob a influência da primeira sub-rede, uma rede sequencial de quatro camadas é responsável de determinar o próximo acorde. O tamanho da camada de saída da rede sequencial é quatorze, representando os sete acordes diatônicos da escala de Dó maior e sete possíveis acordes dominantes. Mais tarde, a estratégia foi implementada para harmonização em tempo real (GANG; LEHMANN; WAGNER, 1997) pela adição de uma sub-rede de noção métrica, mas sem informação da estrutura global. Finalmente, Gang, Lehmann e Wagner (1998) aplicam a rede desenvolvida em (GANG; LEHMANN; WAGNER, 1997) como uma ferramenta para modelagem de aspectos da cognição humana, e também como base na construção de um sistema de performance interativo, apresentando uma análise sobre os parâmetros de aprendizagem, o tamanho do conjunto de treinamento e a influência da informação métrica.

Melo e Wiggins (2003) tomam uma abordagem completamente diferente das dos seus predecessores, modelando a tensão musical como uma média de curvas de medição descritas por ouvintes humanos, e treinando uma rede neural para criar progressões de acordes que seguissem os níveis de tensão sugeridos pelas curvas. De certa forma, a técnica proposta estabelece um precedente de mensurabilidade da tensão musical e da capacidade de transmitir tensão da música. O sistema cria seqüências de acordes completamente diferentes das originais, preservando a intenção musical original, segundo os autores.

¹² Atualizados com retardo

De Prisco et al. (2010) apresentam o projeto, implementação e teste de uma rede neural para harmonização funcional de uma linha de baixo no estilo de J. S. Bach. Primeiro, o acorde atual é calculado usando três “modelos de base” em função da nota de baixo atual e de um, dois e três acordes prévios. Logo, as saídas dos modelos de base são fornecidas a uma rede de decisão que escolhe entre as soluções, existindo dois modelos alternativos. O primeiro, sem resultados satisfatórios, é a Rede de Controle de Baixo (BCN¹³), que decide em função de uma previsão da próxima nota do baixo e uma distância *Hamming*. O segundo modelo é uma Rede de Controle de Acorde (CCN¹⁴), que além da previsão da nota do baixo utiliza provisões dos acordes. Embora o modelo CCN tenha obtido resultados razoáveis, a rede é extremadamente complexa, com uma grande exigência de cálculo.

5. Modelos probabilísticos

Modelos probabilísticos baseados na propriedade de Markov (DURRETT, 2010) têm sido amplamente estudados na harmonização automática, particularmente os modelos ocultos de Markov (BAUM, 1966). Neste contexto, a melodia harmonizada é descrita como um processo estocástico duplamente embutido em que a melodia é modelada como uma sequência de observações que é função de uma sequência subjacente de estados não-observáveis (ocultos), os quais descrevem o acompanhamento harmônico.

Os modelos ocultos de Markov (HMMs¹⁵) aprendem regras de harmonização através de observação estatística das relações de “curto prazo” em contextos locais, i.e., relações entre estados harmônicos e observações melódicas em um mesmo instante, e relações entre estado harmônico atual e prévio, geralmente representando o conhecimento em forma matricial. Embora o processo de aprendizagem seja realizado nesse contexto local, inferências probabilísticas para identificar a melhor trajetória de estados ocultos são processadas em um contexto probabilístico global, implementado por meio de estratégias de computação paralela como o algoritmo de Viterbi (FORNEY, 1973).

¹³ *Bass control network*

¹⁴ *Chord control network*

¹⁵ *Hidden Markov models*

Allan (2002) apresenta um sistema HMM que harmoniza no estilo dos corais de J. S. Bach, mostrando a capacidade de aprendizado de regras de harmonização dos HMMs a partir de exemplos sem necessidade de conhecimento pré-programado. O modelo proposto divide o processo de harmonização em três subtarefas com base no trabalho de Hild, Feulner e Menzel (1991). Primeiro, baseado em uma sequência de observação melódica, um esqueleto harmônico etiqueta cada *beat* com um símbolo harmônico representando um conjunto de possíveis acordes, criando uma sequência desses símbolos. Em seguida, os símbolos harmônicos de saída são utilizados como observações em um segundo HMM que atribui uma nota para cada uma das três vozes, gerando uma sequência de acordes (estados) ocultos. Finalmente, um terceiro HMM realiza ornamentações separadamente para cada voz. Allan e Williams (2005) propõem uma mudança no modelo, eliminando o primeiro HMM e calculando sequências de acordes diretamente das observações da melodia.

Biyikoglu (2003) construiu um HMM harmonizador para o estudo da sintaxe harmônica e da interação entre melodia e harmonia. Treinado pela saída de um módulo de análise harmônica que opera sobre um conjunto de corais, o modelo calcula progressões de acordes adequadas para novas melodias, gerando harmonizações a quatro vozes. O sistema também incorpora características especiais para aliviar restrições de combinação e resolver o problema de esparsidade de dados, como regras de condução de vozes, mas limitações do processo de recombinação impedem a condução de vozes em muitas situações, e as progressões geradas pelo algoritmo de Viterbi tendem a ser conservadoras. Biyikoglu (2003) levanta a questão da representação temporal dos modelos de Markov na geração de música dada pelo contraste entre a operação sequencial dos modelos e a hierarquia temporal da música, afirmando que os modelos de Markov não são capazes de representar as relações hierárquicas das funções harmônicas. Porém, os modelos de Markov são capazes de gerar transições de acordes delicadas, assim como progressões de acordes aceitáveis para uma melodia dada na presença de informação local da métrica e da cadência.

Paiement, Eck e Bengio (2006) introduziram uma representação de acorde alternativa com base no sistema de cifras que pode facilitar a introdução de conhecimento de domínio de modelos de harmonização probabilísticos. No seu trabalho eles mostram empiricamente que as dependências globais das progressões de acorde são melhor capturadas por uma estrutura de árvore relacionada à métrica que

com HMMs dinâmicos simples que se concentram nas dependências locais. Não obstante, HMMs parecem ser suficientes quando é fornecida a progressão da fundamental, o que sugere que grande parte da informação de dependência temporal pode já estar contida no movimento da nota fundamental.

MySong (SIMON; MORRIS; BASU, 2008) é um sistema voltado ao usuário que escolhe acordes para acompanhar uma melodia vocal automaticamente, expondo parâmetros do HMM de forma intuitiva como *Jazz Factor* e *Happy Factor*. Um *beat* gerado por computador é usado como referência métrica pelo usuário gerando um acorde por compasso, sem tentativa de sincronismo ou de extrair intenção rítmica. MySong usa duas matrizes de transição no processo de harmonização, uma em escala maior e outra em escala menor, as quais são ponderadas pelo parâmetro *Happy Factor*. A matriz de observação (emissões) também é ponderada, mas pelo *Jazz Factor*, que desce ou aumenta pesos de emissão, dando prioridade à progressão de acordes ou à relação acorde-nota, respectivamente. Como o usuário não é restrito a uma tonalidade, o algoritmo de Viterbi calcula a sequência mais provável para cada tonalidade em 50 [ms], escolhendo o caso de maior probabilidade associada. Morris, Simon e Basu (2008) descrevem formalmente o processo de aprendizado de MySong e discutem os mecanismos pelos quais os parâmetros do sistema são expostos ao usuário, apresentando MyMusic como um caso de decodificação interativa.

Groves (2013) propôs o uso de modelos probabilísticos estendidos, especificamente modelos semiocultos de Markov (YU, 2010), para abordar o processo de harmonização automática no estilo do *rock'n'roll*. Nesta implementação se insere um parâmetro extra na informação da sequência de estados para modelar a duração de (tempo de permanência em) cada estado, permitindo que os estados ocultos tenham uma sequência de observações associada. Embora a estratégia possa ser de maior utilidade que HMMs convencionais no estabelecimento de uma intenção local através de uma relação acorde-motivo como a tentativa de Hörnel e Ragg (1996), não há evidência de que produza melhores resultados harmônicos ou rítmicos.

5.1 Redes bayesianas

As redes bayesianas são modelos gráficos de representação de independências condicionais em um conjunto de variáveis aleatórias, uma forma gráfica de representar fatorações de distribuições particulares. Modelos ocultos de

Markov são uma subclasse de redes bayesianas simples para modelagem de séries temporais.

Yi e Goldsmith (2007) introduz planejamento baseado em processos de decisão na harmonização automática, com funções de transição definidas por redes bayesianas dinâmicas (DBNs¹⁶). Dada uma melodia, um planejador MDP (*Markov Decision Process*) fatorado preenche as outras três vozes com base em harmonia clássica ocidental. As harmonias resultantes são descritas como não muito sofisticadas.

Suzuki, Kitahara e Univercity (2013) implementam um harmonizador a quatro vozes para melodias de voz soprano representando a simultaneidade e sequencialidade musical como dependências entre variáveis aleatórias em uma rede bayesiana. São apresentados dois tipos de modelos de composição, um com “nodos” de acordes e outro sem eles, a fim de investigar até que ponto o modelo sem nodos adquire conceitos fundamentais de harmonia comparado ao modelo com nodos. O harmonizador não modela as interdependências entre as três vozes geradas, considerando apenas as dependências da voz soprano. Os autores afirmam que a DBN adquire algumas regras básicas de harmonia.

Raczyński, Fukayama e Vincent (2013) propõem meios para combinar múltiplos modelos probabilísticos de varias variáveis aleatórias em um sistema de harmonização flexível através de métodos de interpolação, construindo um modelo discriminativo onde os acordes são condicionalmente dependentes de todas as variáveis definidas, e.g. tonalidade e melodia, mas os resultados não são claros.

5.2 Métodos híbridos

Algumas hibridações entre modelos de Markov e métodos baseados em conhecimento ou regras têm apresentado resultados interessantes que vale a pena destacar.

Chuan e Chew (2007) apresentam um sistema de acompanhamento de estilo específico, gerando novas harmonizações como resoluções adequadas e elegantes aprendidas de uma quantidade pequena de exemplos. Um módulo de tom de acorde usa dezessete atributos de representação melódica para aprender e determinar que notas de uma determinada melodia são prováveis tons de acorde. De acordo com esses tons de acorde, tríades são designadas aos compassos com soluções não-ambíguas, servindo de pontos de verificação. Em seguida, o sistema constrói progressões de

¹⁶ *Dynamic Bayesian networks*

acordes possíveis usando transformações neo-riemannianas (COHN, 1998) entre os pontos de verificação, apresentando trajetórias alternativas em uma estrutura de árvore. Uma cadeia de Markov treinada com essas transformações gera a progressão de acordes final.

Pachet e Roy (2014) recentemente discutiram os benefícios de abordagens verticais em matéria de harmonização, e como modelos de Markov padrão não são adequados para tal missão porque o problema é basicamente sobrerrestrito. Como uma solução alternativa, eles têm proposto usar o conceito de *fioriture*¹⁷ para melhorar a captura de sutilezas do estilo de arranjo, sob a premissa de que tais ornamentos podem expressar o estilo de arranjo com maior liberdade que notas de uma melodia; dessa forma, a *fioriture* pode ser um dispositivo de expressão criativa, apesar de ser um elemento decorativo musical não primário. Este particular ornamento pode ser definido como notas aleatórias com restrições unárias e implementado com técnicas de restrição de Markov (PACHET; ROY, 2001).

5.3 Máquinas de estados finitos probabilísticas

Máquinas de estados finitos probabilísticas (PFMSs¹⁸) são autômatos finitos que verificam algumas restrições, e são consideradas um processo gerativo. PFMSs podem representar a mesma distribuição modelada por um HMM no máximo no mesmo espaço, com um algoritmo comum pelo menos tão simples quanto no caso dos HMMs. A diferença fundamental entre as PFMSs e os HMMs é que uma PFMS incorpora probabilidades a uma estrutura, e um HMM estrutura às probabilidades. Agregar probabilidade a objetos bem conhecidos, tais como máquinas de estados finitos (FSMs¹⁹), permite construir desde a experiência e a intuição, o que pode ser de grande benefício no modelamento de problemas criativos.

Buys e Van Der Merwe (2012) apresentam um transdutor de estados finitos ponderado para harmonização de corais a quatro vozes, permitindo a colocação de restrições regulares de domínio específico na sequência gerada e a integração de modelos com diferentes níveis de complexidade. O processo de harmonização é dividido em duas etapas, cada uma realizada por inferência através de transdutores. A primeira

¹⁷ Ornamentação complexa

¹⁸ *Probabilistic finite-state machines*

¹⁹ *Finite-state machines*

etapa encontra a sequência de acordes ótima para uma melodia dada usando o algoritmo de Viterbi e um alfabeto de saída conformado por doze acordes maiores e doze acordes menores. O segundo transdutor gera três vozes adicionais, o baixo e duas vozes internas. As vozes internas modelam as restrições verticais necessárias para a representação da sequência de acordes juntamente com a melodia de entrada, e o baixo gerado em cada *beat*.

Forsyth e Bello (2013) descrevem um transdutor de estados finitos projetado para gerar acompanhamento automático de uma melodia. Para a estratégia de treinamento, cada voz individual de um corpus de composições a quatro vozes foi utilizada como melodia de entrada, enquanto as três vozes restantes foram combinadas para criar o acompanhamento, o que significa que cada peça fornece quatro pares de treinamento. O método utiliza técnicas de composição de autômatos finitos para juntar módulos de estado finitos que resolvem aspectos particulares do problema de harmonização. Forsyth et al. (2015) apresentam uma descrição mais detalhada do modelo da máquina de estados. Em primeiro lugar, sequências de melodia de entrada são codificadas como autômatos finitos (FSAs²⁰) lineares, e, em seguida, um transdutor de estados finitos (FST²¹) melodia-acorde funciona como aceitador destes FSA lineares de melodia. O FST melodia-acorde é criado como a combinação entre todas as sequências de notas possíveis contidas em compassos individuais do corpus e as probabilidades de que um acorde seja gerado juntamente com as possíveis sequências de notas. As saídas deste FST são as entradas de um FSA de ‘n-grama de acordes’ que modela as possíveis progressões de acordes no corpus. O autômato harmonizador resultante será a combinação desses três modelos. Esta abordagem tem a capacidade de tratar tanto notas individuais como motivos, mas sofre de problemas de ambiguidade, i.e., duas ou mais sequências de melodias idênticas podem ser mapeadas em dois acordes diferentes, sendo necessária alguma técnica de desambiguação. Finalmente, Forsyth et al. (2015) também descreveram um projeto de instalação interativa em tempo real e a possibilidade de usar FST para geração automática de ritmo.

²⁰ *Finite-state automata*

²¹ *Finite-state transducer*

6. Conclusões e comentários

Em quase todas as pesquisas em geração automática de acompanhamento ou harmonia são mencionadas a intenção, a tensão musical, e a estrutura global. Independentemente da forma como seja denominada, essa noção na fronteira entre o conhecimento abstrato e o conhecimento formal é a principal preocupação e o objetivo final. Esse não é um problema resolvido, mas algumas questões críticas podem ser apontadas com um maior grau de objetividade, e alguns comentários podem ser feitos sobre o estado atual da pesquisa.

A captura do contexto harmônico local é um assunto que pode ser considerado resolvido. Quase todos os procedimentos têm mostrado capacidade de produzir e, quando é parte do escopo do sistema, também aprender progressões curtas de dois acordes adequadas com base em informações locais.

Algumas das técnicas descritas têm abordado noções de estrutura global e hierarquia temporal, principalmente considerando a peça inteira para o processamento da harmonia resultante. Além disso, a implementação de representações de conhecimento de domínio específico tais como sequências de estado de movimento de fundamental, funções de condução de vozes, referências métricas e motivos melódicos têm sido úteis na geração de progressões harmonizadas mais longas. Estratégias sequenciais têm dificuldade para tratar estas dependências temporais, embora algoritmos de “trajetória mais provável” tenham mostrado algum senso de globalidade, sendo suficientes para gerar harmonias longas sob certas condições, mas com resultados conservadores e monótonos. De alguma forma, esta dicotomia global/sequencial sugere a necessidade de um compromisso na concepção de plataformas de harmonização em tempo real, onde o conhecimento musical pode se tornar um meio termo se for usado corretamente.

Simplificações das interdependências entre as vozes dos acordes ou representações simbólicas de acordes têm sido amplamente utilizadas com o fim de obter resultados adequados, essencialmente devido a problemas de intratabilidade causados por sobredimensionalidade e esparsidade de dados, mas tais simplificações carecem de formalismo estatístico, podendo levar à perda de informações importantes sobre o processo de harmonização. Existe também uma falta de produção de material sonoro e de aplicações em tempo real: comunicam-se os resultados de pesquisa em formato de partituras na maior parte dos trabalhos, provavelmente por causa da

dificuldade na representação temporal e da degradação do desempenho para implementações de maior resolução.

Referências

- ALLAN, Moray. Harmonising Chorales in the Style of Johann Sebastian Bach. Edinburgh, 2002. 73f. Master of Science Thesis. School of Informatics, University of Edinburgh, Edinburgh, 2002.
- ALLAN, Moray; WILLIAMS, Christopher. Harmonising Chorales by Probabilistic Inference. *Advances In Neural Information Processing Systems*, v.17, n.1, p.25-32, 2005.
- BAUM, Leonard E; PETRIE, Ted. Statistical Inference for Probabilistic Functions of Finite State Markov Chains. *The Annals of Mathematical Statistics*, v.37, n.6, p.1554-1563, 1966.
- BELLEGARD, Mi; TSANG, Chi Ping. Harmonizing music using a network of Boltzmann machines. In: LES RÉSEAUX NEURO-MIMÉTIQUES ET LEURS APPLICATIONS, 5., 1992, Nîmes, France. *Anais...* Nanterre, France: EC2, 1992. p.321-332.
- BELLEGARD, Mi; TSANG, Chi Ping. Harmonizing Music the Boltzmann Way. *Connection Science*, v.6, n.2-3, p.281-297, 1994.
- BIYIKOGLU, Kaan M. A Markov model for chorale harmonization. In: TRIENNIAL EUROPEAN SOCIETY FOR THE COGNITIVE SCIENCES OF MUSIC (ESCOM) CONFERENCE, 5., 2003, Hannover, Germany. *Anais...* Hannover, Germany: Proceedings of the 5th Triennial European Society for the Cognitive Sciences of Music Conference, 2003. p.81-84.
- BOENN, Georg; BRAIN, Martin; DE VOS, Marina. Automatic composition of melodic and harmonic music by answer set programming. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LOGIC PROGRAMMING, 24., 2008, Udine, Italy. *Anais... Udine, Italy: ICLP*, 2008, p.160-174.
- BUYS, Jan; VAN DER MERWE, Brink. Chorale harmonization with weighted finite-state transducers. In: SYMPOSIUM OF THE PATTERN RECOGNITION ASSOCIATION OF SOUTH AFRICA, 23., 2012, Pretoria, South Africa. *Anais...* Pretoria, South Africa: Proceedings of ICCS, 2012. p.95-101.
- CHOMSKY, Noam. Three Models for the Description of Language. *IRE Transactions on Information Theory*, v.2, n.3, p.113-124, 1956.
- CHUAN, Ching-Hua; CHEW, Elaine. A hybrid system for automatic generation of style-specific accompaniment. In: INTERNATIONAL JOINT WORKSHOP ON COMPUTATIONAL CREATIVITY, 4., 2007, London, UK. *Anais...* London, UK: Proceedings of the 4th International Joint Workshop on Computational Creativity, 2007. p.57-64.
- COHN, Richard. Introduction to Neo-Riemannian Theory: A survey and a historical perspective. *Journal of Music Theory*, v.42, n.2, p.167-180, 1998.
- DE PRISCO, Roberto; ELETTO, Antonio; TORRE, Antonio; ZACCAGNINO, Rocco. A neural network for bass functional harmonization. In: EUROPEAN CONFERENCE ON THE APPLICATIONS OF EVOLUTIONARY COMPUTATION EvoMUSART, 8., 2010, Istanbul, Turkey. *Anais...* Istanbul, Turkey: Applications of Evolutionary Computation, 2010. p.351-360.
- DE PRISCO, Roberto; ZACCAGNINO, Rocco. An evolutionary music composer algorithm for bass harmonization. In: WORKSHOPS ON APPLICATIONS OF

- EVOLUTIONARY COMPUTATION, 11., 2009, Tübingen, Germany. *Anais...* Tübingen, Germany: EvoMUSART, 2009. p.567-572.
- DE PRISCO, Roberto; ZACCAGNINO, Gianluca; ZACCAGNINO, Rocco. A multi-objective differential evolution algorithm for 4-voice compositions. In: IEEE SYMPOSIUM ON DIFFERENTIAL EVOLUTION, 2011, Paris. *Anais...* Paris: IEEE Symposium on Differential Evolution, 2011. p.1-8
- DEB, Kalyanmoy; AGRAWAL, Samir; PRATAP, Amrit; MEYARIVAN, Tanaka. A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PARALLEL PROBLEM SOLVING FROM NATURE, 6., 2000, Paris. *Anais...* Paris: Parallel Problem Solving from Nature-PPSN VI, 2000. p.849-858.
- DUBOIS, Roger Luke. *Applications of Generative String-substitution Systems in Computer Music*. Doctoral dissertation. Columbia University, 2003.
- DURRETT, Rick. *Probability: theory and examples*. 4th. ed. New York, USA: Cambridge University Press, 2010.
- EBCIOGLU, Kemal. An Expert System for Chorale Harmonization. In: THE FIFTH NATIONAL CONFERENCE ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE, 5., 1986, Philadelphia. *Anais...* Philadelphia: Association for the Advancement of Artificial Intelligence, 1986. p.784-788.
- FERNANDEZ, Jose David; VICO, Francisco. AI Methods in Algorithmic Composition: A Comprehensive Survey. *Journal of Artificial Intelligence Research*, AI Access Foundation USA, v.48, n.1, p.513-582, 2013.
- FORNEY, G David. The Viterbi Algorithm. *Proceedings of the IEEE*, v.61, n.3, p.268-278, 1973.
- FORSYTH, Jonathan; BELLO, Juan P. Generating Musical Accompaniment Using Finite State Transducers. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DIGITAL AUDIO EFFECTS, 16., 2013, Maynooth, Ireland. *Anais...* Maynooth, Ireland: Proceedings of the 16th International Conference on Digital Audio Effects, 2013. < http://dafx13.nuim.ie/papers/10.dafx2013_submission_65.pdf>. Acesso em: 06 out. 2016.
- FORSYTH, Jonathan; BITTNER, Rachel M; MUSICK, Michael; BELLO, Juan P. Improving and Adapting Finite State Transducer Methods for Musical Accompaniment. In: INTERNATIONAL COMPUTER MUSIC CONFERENCE, 41., 2015, Denton, USA. *Anais...* Denton, USA: Proceedings of the 41st International Computer Music Conference, 2015. p.290-296.
- FREITAS, Alan; GUIMARÃES, Frederico. Melody harmonization in evolutionary music using multiobjective genetic algorithms. In: SOUND AND MUSIC COMPUTING CONFERENCE, 8., 2011, Padova, Italy. *Anais...* Padova, Italy: Proceedings of the Sound and Music Computing Conference, 2011.
- GANG, Dan; LEHMANN, Daniel. An artificial neural net for harmonizing melodies. In: INTERNATIONAL COMPUTER MUSIC CONFERENCE, 20., 1995, Banff, Canada. *Anais...* Banff, Canada: Proceedings of the International Computer Music Association, 1995. p.444-447.
- GANG, Dan; LEHMANN, Daniel; WAGNER, Naftali. Harmonizing melodies in real-time: the connectionist approach. In: INTERNATIONAL COMPUTER MUSIC CONFERENCE, 22., 1997, Thessaloniki, Greece. *Anais...* Thessaloniki, Greece: Proceedings of the International Computer Music Association, 1997. p.27-30.
- GANG, Dan; LEHMANN, Daniel; WAGNER, Naftali. Tuning a neural network for harmonizing melodies in real-time. In: INTERNATIONAL COMPUTER MUSIC

CONFERENCE, 23., 1998, Ann Arbor, USA. *Anais...* Ann Arbor, USA: Proceedings of the International Computer Music Association, 1998.

< <http://quod.lib.umich.edu/i/icmc/bbp2372.1998.509/1> >. Acesso em: 06 out. 2016.

GROVES, Ryan. Automatic harmonization using a hidden semi-Markov model. In: AAAI CONFERENCE ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND INTERACTIVE DIGITAL ENTERTAINMENT, 9., 2013, Boston, USA. *Anais...* Boston, USA: Musical Metacreation: Papers from the 2013 AIIDE Workshop, 2013. p.48-791.

HANSEN, Pierre; MLADENOVIĆ, Nenad. Variable Neighborhood Search: Principles and applications. *European Journal of Operational Research*, v.130, n.3, p.449-467, 2001.

HILD, Hermann; FEULNER, Johannes; MENZEL, Wolfram. HARMONET: A neural net for harmonizing chorales in the style of JS Bach. In: NEURAL INFORMATION PROCESSING SYSTEMS, 4., 1991, Colorado. *Anais...* Advances in Neural Information Processing Systems 4, 1991. p.267-274.

HÖRNEL, Dominik; RAGG, Thomas. Learning musical structure and style by recognition, prediction and evolution. In: INTERNATIONAL COMPUTER MUSIC CONFERENCE, 5., 1996, Hong Kong, China. *Anais...* Hong Kong, China: Proceedings of the International Computer Music Association, 1996. p.59-62.

JAFFAR, Joxan; LASSEZ, Jean-Louis. Constraint logic programming. In: PROCEEDINGS OF THE 14TH ACM SIGACT-SIGPLAN SYMPOSIUM ON PRINCIPLES OF PROGRAMMING LANGUAGES, 14., 1987, Munich. *Anais...* Munich: Association for Computing Machinery, 1987. p.111-119.

LINDENMAYER, Aristid. Mathematical Models for Cellular Interactions in Development II. Simple and Branching Filaments with Two-sided Inputs. *Journal of Theoretical Biology*, v.18, n.3, p.300-315, 1968.

LIU, Chien-Hung; TING, Chuan-Kang. Polyphonic accompaniment using genetic algorithm with music theory. In: IEEE CONGRESS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION, 2012, Brisbane, Australia. *Anais...* Brisbane, Australia: IEEE Congress On Evolutionary Computation, 2012. p.1-7.

LONGUET-HIGGINS, Hugh Christopher. Letter to a Musical Friend. *Music Review*, v.23, n.1, p.244-248, 1962.

LOZANO, Leonardo; MEDAGLIA, Andrés; VELASCO, Nubia. Generation of Pop-Rock chord sequences using genetic algorithms and variable neighborhood search. In: WORKSHOPS ON APPLICATIONS OF EVOLUTIONARY COMPUTATION, 11., 2009, Tübingen, Germany. *Anais...* Tübingen, Germany: EvoMUSART, 2009. p.573-578.

MADAVAN, Nateri K; BIEGEL, Bryan A. Multiobjective optimization using a Pareto differential evolution approach. In: CONGRESS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION, 2002, Honolulu, United States. *Anais...* Honolulu, United States: Congress on Evolutionary Computation, 2002.

MADDOX, Tamara; OTTEN, John. Using an evolutionary algorithm to generate Four-Part 18th century harmony. In: PROCEEDINGS OF THE WSEAS INTERNATIONAL CONFERENCE ON ACOUSTICS AND MUSIC: THEORY AND APPLICATION, 2000, Montego Bay, Jamaica. *Anais...* Montego Bay, Jamaica: Acoustics and Music: Theory and Application, 2000. p.461-467.

MCINTYRE, Ryan A. Bach in a box: The evolution of four part baroque harmony using the genetic algorithm. In: PROCEEDINGS OF THE FIRST IEEE CONFERENCE ON EVOLUTIONARY COMPUTATION, 1., 1994, Orlando. *Anais...* Orlando: IEEE World Congress on Computational Intelligence, 1994. p.852-857.

- MELO, Andrés; WIGGINS, Geraint. A connectionist approach to driving chord progressions using tension. In: SYMPOSIUM ON AI AND CREATIVITY IN ARTS AND SCIENCE, 7., 2003, Aberystwyth, United Kingdom. *Anais...* Aberystwyth, United Kingdom: Proceedings of the AISB'03 Symposium on AI and Creativity in Arts and Science, 2003. p.60-67.
- MORONI, Artemis; MANZOLLI, Jônatas; VON ZUBEN, Fernando José; GUDWIN, Ricardo. Vox Populi: Evolutionary computation for music evolution. In: BENTLEY, Peter; CORNE, David. *Creative Evolutionary Systems*. Morgan Kaufmann, 2002. p.205-221.
- MORRIS, Dan; SIMON, Ian; BASU, Sumit. Exposing Parameters of a Trained Dynamic Model for Interactive Music Creation. In: AAAI CONFERENCE ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE, 23., 2008, Chicago, USA. *Anais...* Chicago, USA: Proceedings of the Twenty-Third AAAI Conference on Artificial Intelligence, 2008. p.784-791.
- NIERHAUS, Gerhard. *Algorithmic Composition: paradigms of automated music generation*. Vienna: Springer-Verlag, 2009.
- OVANS, Russell; DAVISON, Rod. An interactive constraint-based expert assistant for music composition. In: PROCEEDINGS OF THE NINTH BIENNIAL CANADIAN ARTIFICIAL INTELLIGENCE CONFERENCE, 9., 1992, Vancouver. *Anais...* Vancouver: *Canadian Society for Computational Studies of Intelligence*, 1992. p.76-81.
- PACHET, François; ROY, Pierre. Mixing constraints and objects: A case study in automatic harmonization. In: PROCEEDINGS OF TECHNOLOGY OF OBJECT-ORIENTED LANGUAGES AND SYSTEMS EUROPE, 16., 1995, Versailles. *Anais...* Versailles: *Technology of Object Oriented Language*, 1995. p.119-126.
- PACHET, François; ROY, Pierre. Musical Harmonization with Constraints: A Survey. *Constraints*, United States, v.6, n.1, p.7-19, 2001.
- PACHET, François; ROY, Pierre. Non-conformant harmonization: The real book in the style of take 5. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTATIONAL CREATIVITY, 5., 2014, Ljubljana, Slovenia. *Anais...* Ljubljana, Slovenia: Proceedings of ICC, 2014. p.81-84.
- PACHET, François; ROY, Pierre; BARBIERI, Gabriele. Finite-length Markov processes with constraints. In: INTERNATIONAL JOINT CONFERENCE ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE, 22., 2001, Barcelona, Spain. *Anais...* Barcelona, Spain: Proceedings of the Twenty-Second International Joint Conference on Artificial Intelligence, 2001. p.635-642.
- PAIEMENT, Jean-François; ECK, Douglas; BENGIO, Samy. Probabilistic melodic harmonization. In: CONFERENCE OF THE CANADIAN SOCIETY FOR COMPUTATIONAL STUDIES OF INTELLIGENCE, 19., 2006, Québec, Canada. *Anais...* Québec, Canada: *Advances in Artificial Intelligence*, 2006. p.218-229.
- PESTANA, Pedro. Lindenmayer Systems and the Harmony of Fractals. *Chaotic Modeling and Simulation*, v.1, n.1, p.91-99, 2012.
- PHON-AMNUAISUK, Somnuk; TUSON, Andrew; WIGGINS, Geraint. Evolving musical harmonisation. In: PROCEEDINGS OF INTERNATIONAL CONFERENCE ON ARTIFICIAL NEURAL NETS AND GENETIC ALGORITHMS, 1999, Portorož, Slovenia. *Anais...* Portorož, Slovenia: *International Conference on Artificial Neural Nets and Genetic Algorithms*, 1999. p.229-234.
- PHON-AMNUAISUK, Somnuk. Control language for harmonisation process. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MUSIC AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE, 2., 2002, Edinburgh. *Anais...* Edinburgh: *ICMAI*, 2002, p.155-167.

- PONSFORD, Dan; WIGGINS, Geraint; MELLISH, Chris. Statistical Learning of Harmonic Movement. *Journal of New Music Research*, v.28, n.2, p.150-177, 1999.
- RACZYŃSKI, Stanisław A.; FUKAYAMA, Satoru; VINCENT, Emmanuel. Melody Harmonization With Interpolated Probabilistic Models *Journal of New Music Research*, v.42, n.3, p.223-235, 2013.
- RAMIREZ, Rafael; PERALTA, Julio. A constraint-based melody harmonizer. In: PROCEEDINGS OF THE WORKSHOP ON CONSTRAINTS FOR ARTISTIC APPLICATIONS, 13., 1998, Brighton. *Anais... Brighton: European Conference on Artificial Intelligence*, 1998.
- RYBNIK, Mariusz; HOMENDA, Władysław. Extension of Knowledge-driven Harmonization Model for Tonal Music. In: THE 2012 INTERNATIONAL JOINT CONFERENCE ON NEURAL NETWORKS, 2012, IEEE. p.1-8.
- RYBNIK, Mariusz; HOMENDA, Władysław. A Harmonization Model with Partial Fuzzy Knowledge. In: IFSA WORLD CONGRESS AND NAFIPS ANNUAL MEETING (IFSA/NAFIPS), 2013, IEEE. p.1366-1371.
- SHIBATA, Nau. A Neural Network-Based Method for Chord/Note Scale Association with Melodies. NEC Research & Development, Tokyo, Japan, v.32, n.3, p.453-459, 1991.
- SIMON, Ian; MORRIS, Dan; BASU, Sumit. MySong: automatic accompaniment generation for vocal melodies. In: SIGCHI CONFERENCE ON HUMAN FACTORS IN COMPUTING
- SPANGLER, Randall Richard. *Rule-based Analysis and Generation of Music*. Doctoral research. California Institute of Technology, 1999.
- STEEDMAN, Mark. The Blues and the Abstract Truth: Music and Mental Models. In: GARNHAM, Alan; OAKHILL, Jane. *Mental Models in Cognitive Science: Essays in Honour of Phil Johnson-Laird*. Earlbaum: Psychology Press, 1996. p.305-318.
- STEELS, Luc. Learning the craft of musical composition. In: INTERNATIONAL COMPUTER MUSIC CONFERENCE, 12., 1986, Royal Conservatory of Music, Den Haag, Netherlands. Ann Arbor, MI: Michigan Publishing, University of Michigan Library. p.27-31.
- SUZUKI, Syunpei; KITAHARA, Tetsuro; UNIVERCITY, Nihon. Four-part harmonization using probabilistic models: Comparison of models with and without chord nodes. In: SOUND AND MUSIC COMPUTING CONFERENCE, 10., 2013, Stockholm, Sweden. *Anais... Stockholm, Sweden: Proceedings of the Sound and Music Computing Conference*, 2013. p.628-633.
- SYSTEMS, 26., 2008, Florence, Italy. *Anais... New York, USA: Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2008. p.725-734.
- THOMAS, Marilyn Taft. Vivace: A rule based AI system for composition. In: INTERNATIONAL COMPUTER MUSIC CONFERENCE, 11., 1985, Simon Frasier University, Canada. Ann Arbor, MI: Michigan Publishing, University of Michigan Library. p.267-274.
- TSANG, Chi Ping; AITKEN, Melanie. Harmonizing Music as a Discipline in Constraint Logic Programming. In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL COMPUTER MUSIC CONFERENCE, 17., 1991, Montreal. *Anais... Montreal: International Computer Music Association*, 1991. p.61-61.
- WATSON, Lynda Annette. *Algorithmic Composition for Flute and Accompaniment*. Master's thesis. University of Bath, 2008.
- WIDMER, Gerhard. Qualitative Perception Modeling and Intelligent Musical Learning. *Computer Music Journal*, v.16, n.2, p.51-68, 1992.

WIGGINS, Geraint A. Automated generation of musical harmony: What's missing. In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL JOINT CONFERENCE IN ARTIFICIAL INTELLIGENCE, 16, 1999, Stockholm, Sweden.

YI, Liangrong; GOLDSMITH, Judy. Automatic generation of four-part harmony. In: UAI BAYESIAN MODELING APPLICATIONS WORKSHOP, 5., 2007, Vancouver, Canada. *Anais...* Vancouver, Canada: Proceedings of the Fifth UAI Bayesian Modeling Applications Workshop, 2007. p.48-54.

YU, Shun-Zheng. Hidden Semi-Markov Models. *Artificial Intelligence*, v.174, n.2, p.215-243, 2010.