

Panorama dos modelos computacionais

aplicados à musicologia cognitiva

Marcelo Gimenes

mgimenes@gmail.com

Núcleo Interdisciplinar de Comunicação Sonora

Universidade Estadual de Campinas

Resumo

Este artigo apresenta um panorama do estado da arte dos modelos computacionais que interessam à musicologia cognitiva. Alguns destes são inspirados em fenômenos naturais, tentando imitar, por exemplo, processos executados pela mente humana, enquanto outros não têm essa preocupação. Diferentes modelos podem co-existir em modelos mais complexos. Os sistemas são organizados considerando o fluxo da informação musical, desde a percepção dos sons e a aquisição de conhecimentos musicais até a manipulação deste conhecimento em processos criativos. Entre as abordagens apresentadas encontram-se sistemas baseados em regras, em gramática e que usam aprendizagem de máquina. Além desses, também são apresentados modelos baseados na computação evolutiva (e.g., algoritmos genéticos) e na vida artificial.

Palavras-chave: musicologia cognitiva, modelos computacionais, inteligência artificial

Introdução

Entre as muitas transformações sofridas pela ciência durante o século XX, o surgimento da computação, da inteligência artificial, das técnicas para obtenção de imagens do cérebro e, ao mesmo tempo, do declínio da popularidade da psicologia comportamental, entre outros fatores, conduziram ao que chamamos de revolução cognitiva (Huron, 1999). Progressivamente, um crescente interesse pelo estudo da memória, atenção, reconhecimento de padrões, formação de conceitos, categorização, raciocínio e linguagem (Huron, 1999) ocupou o espaço que antes pertencia à psicologia comportamental.

Nesse contexto, surgem as ciências cognitivas como uma área interdisciplinar de pesquisa que reúne especialmente a filosofia, a psicologia experimental, as neurociências e a computação com o objetivo de estudar a natureza e a estrutura dos processos cognitivos. Para atingir este fim, um papel particularmente importante é exercido pela modelagem computacional, por proporcionar uma representação formal do conhecimento e a verificação experimental de diferentes teorias cognitivas.

Acompanhando essas transformações, a musicologia, especialmente nas últimas décadas, adota uma perspectiva na qual a música não é somente vista como obra de arte mas, em particular, como um processo que resulta da atuação de diversos agentes (músicos, ouvintes, etc.) (Honing, 2006). Esta visão conduziu a novas vertentes musicológicas que passaram a emprestar do rigoroso método científico (teste e falsificação), a formalização do conhecimento (modelos computacionais) e o empirismo (busca de provas).

Em vista desses fatos, a musicologia cognitiva (também conhecida como cognição musical ou musicologia computacional) conquista nas últimas décadas progressivamente cada vez mais adeptos interessados em estudar o pensamento

musical ou, em outras palavras, os hábitos musicais da mente (Huron, 1999). Sendo um ramo das ciências cognitivas, a musicologia cognitiva possui o mesmo caráter interdisciplinar daquela, reunindo teorias e métodos desenvolvidos pela filosofia (e.g., teorias do conhecimento), psicologia (e.g., experimentalismo), neurociências (e.g., imagens do cérebro) e ciência da computação (e.g., simulação).

O objeto de estudo da musicologia cognitiva é, portanto, a representação e o processamento (e.g., aquisição, armazenamento, geração) do conhecimento musical pela mente para o quê busca suporte nos modelos computacionais. Com o auxílio destes, simulações procuram demonstrar as teorias acerca dos processos cognitivos humanos. Obviamente, quanto mais próximo o modelo estiver das características destes processos, mais perto ele vai estar de atingir aquela finalidade. É sabido, contudo, que esses modelos ainda não alcançaram plenamente o objetivo de avaliar e falsificar as teorias que eles representam (Honing, 2006).

Sendo uma atividade inteligente, a música oferece material abundante para a investigação das atividades cognitivas humanas. Na ciência da computação, a área que explora o comportamento inteligente é chamada de inteligência artificial. Linhas gerais, dois paradigmas são utilizados. O primeiro, chamado de modelos simbólicos, representam explicitamente as partes do problema sob análise através de um vocabulário de símbolos que corresponde a objetos e/ou conceitos, podendo ter um modelo do mundo no qual opera (Geraint Wiggins & Smail, 2000). A compreensão do resultado das operações do sistema é facilitada pela correspondência semântica existente com esses símbolos.

O segundo paradigma, adota uma abordagem sub-simbólica, também conhecida como conexionista. Sistemas conexionistas organizam e manipulam o conhecimento através das chamadas redes neurais, um sistema de nós (processadores

simples) que são interligados (vagamente) simulando as conexões dos neurônios no cérebro. Uma vez que esses processadores não têm uma relação de significado explícito com símbolos do mundo real, sua operação é de difícil compreensão.

Feitas estas considerações preliminares, as próximas seções irão apresentar um panorama diverso dos modelos computacionais utilizados pela musicologia cognitiva. Alguns deles, como veremos, se preocupam em implementar modelos teóricos que versam sobre a cognição humana e, portanto, interessam diretamente à musicologia cognitiva. Outros, contudo, adotam uma posição "engenherística", mais voltada ao resultado (criação musical) do que propriamente à descrição desses modelos. Optamos por incluir estes últimos pelo interesse que despertam e por possuírem muitos paralelos com os primeiros.

Grosso modo, as seções estão organizadas de modo a acompanhar o fluxo da informação musical, desde a percepção dos sons, a aquisição e representação do conhecimento até processos de geração musical. Antes de iniciarmos a exposição desses modelos, a seção a seguir, "Experimentos em Inteligência Musical", irá apresentar os Experimentos em Inteligência Musical, um sistema que se tornou referência na área, a fim de termos uma visão geral de como sistemas computacionais podem exibir comportamento inteligente. Na penúltima seção, encerramos esse panorama com o sistema Ambientes Interativos Musicais (Musical Interactive Environments - iMe), que adota explicitamente modelos cognitivos para explorar a evolução musical.

Experimentos em Inteligência Musical

David Cope (1991) iniciou o projeto Experimentos em Inteligência Musical (Experiments in Musical Intelligence - EMI) há cerca de 30 anos visando a simulação computacional de estilos musicais. A idéia inicial era criar um sistema no qual

pudesse ser incorporado o modo com que ele manipulava suas idéias musicais. Se, a qualquer momento sentisse a necessidade de ajuda em função de um bloqueio mental, por exemplo, o sistema poderia ser usado para gerar automaticamente um número de novos compassos da mesma forma que ele faria pessoalmente.

As implementações iniciais deste sistema codificaram o conhecimento musical através de regras para a escrita de partes. Cope relata que os resultados não foram muito satisfatórios e que o sistema produziu apenas "depois de muito ensaio e erro ... uma música sem sabor que, basicamente, aderiu a essas regras" (Cope, 1999, p. 21). Partindo dessa experiência e vencidos os primeiros obstáculos, Cope passou a enfrentar uma série de outras questões, tais como qual seria a melhor maneira de segmentar as músicas originais ou como os segmentos deveriam ser reorganizados para que a música gerada pelo sistema tivesse sentido musical.

Cope observou que os compositores tendem a reutilizar determinadas estruturas durante toda sua obra e que estas acabam por caracterizar seus estilos musicais. Ele descobriu que estes elementos duram entre 2 e 5 tempos (7 a 10 notas melódicas), muitas vezes combinam estruturas melódicas, harmônicas e rítmicas e ocorrem normalmente de quatro a dez vezes em uma música (Cope, 1999, p. 23). A esses elementos recorrentes Cope deu o nome de "assinaturas".

Numa fase posterior, Cope passou a experimentar com corais de Bach, segmentando-os em cada tempo dos compassos. O sistema analisava um corpo de peças musicais e extraía as assinaturas que eram, em seguida, categorizadas em léxicos. O sistema também armazenava as notas para as quais as vozes se moviam de um tempo para outro do compasso. Novamente, os resultados foram insatisfatórios: novas músicas tendiam a vaguear, sem uma estrutura definida de grande escala. O problema, desta vez, era que a lógica das frases musicais não estava sendo observada.

Para resolver este problema, informações de estruturas globais tinham de ser incorporadas, juntamente com as regras de movimentação de uma nota para outra. Novos módulos de análise foram adicionados ao EMI para permitir a preservação do local que cada segmento ocupava nas seções das peças originais. O "caráter" de cada tempo, definido através de elementos como o ritmo e número de notas também tinha que ser preservado, a fim de garantir que a música produzida pelo sistema proporcionasse uma sensação de continuidade. De fato, transpostos esses obstáculos iniciais, as músicas que o sistema passou a produzir em seguida eram bastante convincentes, especialmente quando tocadas por músicos humanos.

Se, de um lado, EMI é capaz de simular determinados estilos musicais, de outro, a arquitetura do sistema como um todo é extremamente complexa. Resumidamente, o processo se inicia com a elaboração de um banco de dados musicais, uma tarefa manual, tediosa e demorada que depende inteiramente da experiência musical do usuário. Uma série de peças semelhantes têm de ser escolhidas de forma a garantir que o resultado final seja consistente. Tonalidade, tempo e métrica devem ser considerados nesta análise. Cope mencionou certa vez que esta fase inicial, da seleção à codificação das músicas, durava vários meses de trabalho (Muscutt, 2007).

Uma vez pronto o banco de dados musicais, EMI analisa as peças e deduz assinaturas musicais e regras para a composição. Um algoritmo completo de busca de padrões é aplicado sobre o material de entrada e todas as possibilidades (resultados parciais ou totais) são calculados estatisticamente. Todos os segmentos são marcados para as funções estrutural hierárquica e harmônica. A conectividade das estruturas também é checada para melodia, acompanhamento e harmonia.

Durante a recombinação (geração de novo material), as assinaturas devem sobreviver, mantendo sua forma original (relações intervalares) e o contexto local. A estrutura global de uma das composições originais é usada como referência para as novas músicas produzidas. O sistema fixa as assinaturas em seus locais de origem e depois preenche as lacunas com base nas regras encontradas durante a análise estatística. Para isso, o sistema utiliza uma Rede de Transição Aumentada (Augmented Transition Network - ATN) (Woods, 1970), uma estrutura utilizada na definição das línguas naturais e "projetada para produzir sentenças lógicas a partir de pedaços de frases e peças que tenham sido armazenados de acordo com a função de sentença" (Cope, 1991, p. 26)ⁱ.

Finalmente, Cope ouve cada uma das peças geradas pelo sistema e mantém aquelas que considera mais convincentes, em média, uma em cada quatro ou cinco peças que são descartadas (Muscutt, 2007).

Percepção musical

As pessoas são capazes de fazer generalizações e de aprender conceitos musicais elementares (e.g., alturas, escalas) a partir de exemplos musicais. Esse conhecimento, uma vez adquirido, passa a ser o ponto de partida para a apreciação de novas peças musicais (Cambouropoulos, 1998, p. 31). A modelagem da percepção humana envolve, portanto, a descoberta de estruturas de diferentes tipos e hierarquias.

Cambouropoulos (1998) propôs um modelo computacional teórico denominado Teoria Geral Computacional da Estrutura Musical (General Computational Theory of Musical Structure - GCTMS) que tem por objetivo precisamente descrever os componentes estruturais da música. O modelo propõe captar elementos que seriam reconhecidos por um ouvinte e, conseqüentemente,

inclui conceitos típicos das habilidades cognitivas humanas (e.g., abstração, reconhecimento de identidades e/ou semelhanças e categorização).

O GCTMS é constituído por uma série de componentes que abordam separadamente cada tarefa analítica. Um deles, a Representação de Intervalos de Alturas Gerais (General Pitch Interval Representation - GPIR), codifica a informação musical. O Modelo de Detecção de Limites Locais (Local Boundary Detection Model - LBDM) é responsável pela segmentação e os Modelos de Estruturas de Acentuação e Métrica (Accentuation and Metrical Structure Models - AMSM), pela definição de modelos estruturais.

Segundo o autor, esse sistema não requer que a música seja previamente marcada com elementos de nível estrutural e pode consistir em apenas uma seqüência de eventos simbólicos (notas, etc.) que o sistema traduz para a sua representação interna. Uma vez obtida a representação, o próximo passo é a segmentação do fluxo musical, para a qual o GCTMS leva em conta princípios da psicologia Gestalt (Bod, 2001).

A palavra Gestalt significa "forma" em alemão e contém a idéia de que os sentidos humanos são orientados pela percepção do todo (e.g., uma entidade física, psicológica ou simbólica) antes da percepção das partes. Grupamentos melódicos, por exemplo, podem ser definidos em razão da sua similaridade (movimento ascendente e/ou descendente), ou proximidade (ocorrência de pausas). Esses grupamentos são realizados pela memória de curto prazo ⁱⁱ (Snyder, 2000).

Os conceitos da Gestalt vêm sendo adotados por diversos pesquisadores (McAdams, 1984; Polansky, 1978; Tenney & Polansky, 1980). Deutsch (Deutsch, 1982a, 1982b), por exemplo, analisa como as regras da Gestalt podem ser aplicadas a combinações de notas. A Teoria Geradora da Música Tonal (Generative Theory of

Tonal Music - GTTM) de Lerdahl e Jackendoff (1983) também usa princípios da Gestalt para definir segmentos e agrupamentos.

A segmentação musical, uma questão básica para muitos dos sistemas que exploram a cognição e/ou a análise musical, permanece, em grande medida, apesar dos muitos progressos alcançados até hoje, um problema de difícil solução em função da infinidade de parâmetros (melodia, ritmo, etc.) e níveis de hierarquia a serem considerados. Em muitos casos, os segmentos se sobrepõem, o que indica a possibilidade de haver várias soluções aceitáveis.

Para lidar com esses problemas, diversos sistemas aplicam filtros para simplificar a entrada de dados. Ao invés de considerar a altura das notas, por exemplo, podem ser usadas as distâncias intervalares (Deutsch, 1982b). Obviamente, esta e outras estratégias têm o potencial de comprometer os resultados da segmentação, algo que deve ser levado em consideração caso a caso.

Diversos sistemas (Baker, 1989a, 1989b; Camilleri, Carreras, & Duranti, 1990; Chouvel, 1990; Hasty, 1978) adotam diferentes algoritmos para lidar com a segmentação. O LDBM, mencionado acima, constrói uma representação de intervalos a partir da seqüência de notas musicais. Em seguida, tenta detectar "descontinuidades perceptuais" ou "limites de percepção", através de parâmetros como duração (notas longas/curtas) e saltos melódicos. Para descobrir os pontos máximos de mudança local são aplicadas duas regras (mudança de identidade e regra de proximidade), inspiradas nos princípios de semelhança e proximidade da Gestalt. Com base nessa análise, para cada par de notas de uma melodia é atribuído um coeficiente de descontinuidade que determina a "força da divisão".

Thom et al (2002) apresentaram uma revisão abrangente de diversos algoritmos de segmentação melódica comparando os resultados com a segmentação

executada por músicos. Entre os algoritmos analisados encontra-se, além do já mencionado LDBM, o sistema Grouper, proposto por Temperley (2004) e que se baseia em um conjunto de regras de preferência (lacunas, extensão de frase, paralelismo métrico, etc.) adaptadas da já citada GTTM (1983).

O modelo Implicação-Realização (Narmour, 1990), também inspirado em princípios da Gestalt, envolve a análise de processos que ocorrem na percepção de estruturas melódicas. "Estruturas de implicação" são as expectativas que orientam a percepção e a criação musical e correspondem às influências estilísticas recebidas através da exposição a contextos musicais. Essas estruturas conduzem a "estruturas de realização", que são arquétipos para possíveis continuações das estruturas de implicação.

Alguns pesquisadores usam o conceito de agentes inteligentes para definir critérios e implementar algoritmos de segmentação. Gimenes (2008), por exemplo, aplica conceitos da Gestalt a uma combinação de "informações perceptivas" (e.g., direção melódica, salto melódico, o intervalo melódico entre ataques, etc.), extraídas dos "órgãos sensoriais" de agentes inteligentes. No sistema Cypher (Rowe, 2004) categorias diferentes de agentes são especializadas em parâmetros musicais diferentes (harmonia, registro, dinâmica, etc.).

Após a segmentação, uma vez definidas estruturas locais, muitas vezes, em função da tarefa analítica em questão, é necessário que estas sejam comparadas. Estabelecer que duas estruturas são iguais é algo relativamente fácil de fazer. Encontrar estruturas "semelhantes", por outro lado, é algo bem mais difícil.

Visando a contribuir para a solução desta questão, Martins et al (2005) propuseram um algoritmo para medir a similaridade entre sub-sequências em um espaço geral rítmico usando uma estrutura chamada Vetor de Coeficientes de

Similaridade. Neste modelo, capaz de comparar estruturas rítmicas de tamanhos diferentes, todas as sub-sequências de um determinado ritmo são comparadas. Uma subdivisão hierárquica das seqüências de ritmo é feita em vários níveis e uma matriz de distância para cada nível é calculada usando uma medida conhecida como "distância de bloco". A informação sobre a similaridade das sub-estruturas rítmicas é então recuperada a partir das matrizes de distâncias e codificadas para o Vetor de Coeficientes de Similaridade ⁱⁱⁱ.

Conhecimento Musical

Esta seção apresenta alguns sistemas computacionais tendo em vista a aquisição e a armazenagem do conhecimento musical.

Sistemas baseados em regras

Sistemas baseados em regras, também conhecidos como sistemas especialistas ou baseados em conhecimento, tentam encapsular explicitamente o conhecimento especialista humano em um determinado domínio. No caso da música, a quantidade de elementos que devem ser tratados de forma eficiente para descrever uma peça musical é enorme, fato que explica os muitos problemas dessa abordagem.

Um exemplo de sistema musical baseado em regras é CHORAL, proposto por Ebcioğlu (1988). Este sistema codifica cerca de 350 normas destinadas à harmonização de melodias no estilo coral de Bach e aborda aspectos como progressões de acordes e linhas melódicas das partes.

Pachet (1998) propôs um sistema para explorar variações harmônicas em seqüências de acordes de jazz. Uma dessas variações é a conhecida "regra de substituição pelo trítono" segundo a qual um acorde dominante (ch1) pode ser substituído por outro acorde dominante (ch2), em que a raiz de ch2 é a quarta aumentada (ou trítono) de ch1. Esta substituição é possível uma vez que o terceiro e o

sétimo grau de ch1 correspondem ao sétimo e terceiro graus de ch2. A Figura 1 abaixo mostra um acorde maior de dó dominante e a sua correspondente substituição pelo trítono.



Figura 1: Substituição pelo trítono.

Outra substituição de acordes muito utilizada também é aplicável aos acordes dominantes e consiste na preparação destes por acordes de sétima menor com base no segundo grau da escala local.

Também é de Pachet (1994, p. 1) o sistema MusES, que tem como objetivo experimentar "várias técnicas de representação do conhecimento orientadas a objeto no campo da harmonia tonal". Este sistema faz análises de seqüências de acordes de jazz, assim como gera automaticamente harmonizações e improvisações.

Sistemas baseados em gramática

A música, assim como a linguagem, é constituída por seqüências de estruturas ordenadas e pode, desse modo, ser descrita em termos gramaticais. Gramáticas são conjuntos finito de regras, que permitem a descrição de uma coleção potencialmente infinita de símbolos estruturados (Geraint Wiggins, 1998, p. 3). A Figura 2 mostra um exemplo simples de gramática.

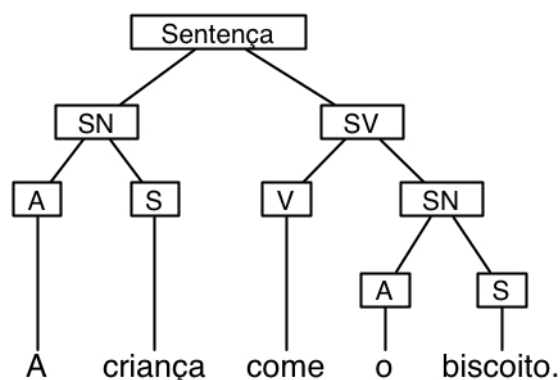


Figura 2: Exemplo de gramática.

(SN: sintagma nominal, SV: sintagma verbal, A: artigo, S: substantivo, V: verbo)

Assim, um segundo paradigma para a codificação do conhecimento musical são os sistemas baseados em gramática. Na realidade, sistemas baseados em conhecimento e sistemas gramaticais são muito semelhantes, uma vez que as duas abordagens são constituídas regras e focam na forma que está sendo produzida (Geraint Wiggins, 1999, p. 4).

O conhecido método de análise de Schenker adota princípios gramaticais (Forte, 1983; Marsden, 2007). Em termos gerais, este método consiste em submeter uma música a uma série de reduções (e.g., progressões auxiliares e notas de passagem) até que uma estrutura elementar global ("ursatz") seja revelada.

Abordagens semelhantes também são adotadas pela GTTM de Lerdahl e Jackendoff (Cambouropoulos, 1998). Neste caso, o objetivo é descrever os processos cognitivos envolvidos na música tonal, em termos de agrupamentos (com base nos princípios da Gestalt), métrica, período de tempo e estruturas redutoras. As regras de Steedman (Geraint Wiggins, 1999) são um outro sistema baseado em gramática que visa a captar estruturas musicais do jazz e de peças pop de blues de 12 compassos. Neste sistema, os processos mentais que levam à expectativa em progressões de jazz são considerados.

Aprendizagem de máquina

Ao ter contato com a música, as pessoas começam a identificar naturalmente determinadas estruturas e regularidades. Se no futuro os mesmos elementos se repetirem, conexões com o material previamente aprendido irão surgir espontaneamente. Portanto, além das abordagens anteriormente mencionadas (sistemas baseados em regras e sistemas baseados em gramática), é possível também adquirir conhecimento através de indução, ou seja, inferindo regras gerais a partir de exemplos particulares.

O objetivo de sistemas que usam essa técnica, que chamamos de aprendizagem de máquina, é fazer com que o computador "aprenda" a partir de um conjunto de dados de exemplo. O sistema extrai os padrões locais usando sistemas probabilísticos. Ao gerar novas seqüência, essas probabilidades são utilizadas (Pachet, 2002a). Um caso particular de processo estocástico comumente adotado, o modelo conhecido como cadeias de Markov permite estabelecer as probabilidades de ocorrência de um estado futuro com base no estado atual.

Uma das desvantagens dos modelos de Markov são a ausência de informações de longo prazo (Pachet, 2002a) e, assim, a dificuldade de capturar a estrutura geral de peças musicais. Além disso, o tamanho do contexto musical tem uma implicação direta na eficiência de algoritmos. Cadeias de Markov de baixa ordem não capturam eficientemente regras probabilísticas, enquanto que ordens superiores, apesar de capturar algumas estruturas de curto prazo (W. F. Walker, 1994), possuem um custo computacional importante (Assayag, Dubnov, & Delerue, 1999).

A conhecida Suíte ILLIAC, de Hiller e Isaacson (1959) foi composta com o uso de cadeias de Markov. Xenakis usou a mesma técnica para as composições *Analogique* em fins dos anos 1950. Um número de sistemas mais recentes usam

modelos probabilísticos para modelagem do estilo musical (Cope, 2004; Pachet, 2003; Thom, 2000a; W. Walker, Hebel, Martirano, & Scaletti, 1992) e improvisação de música interativa (Assayag, Bloch, Chemillier, Cont, & Dubnov, 2006; Pachet, 2003; Raphael, 1999; Thom, 2000b; Vercoe & Puckette, 1985), entre outras finalidades. Trivino-Rodriguez e Morales-Bueno (2001) usaram grafos de predição com atributos múltiplos para gerar novas músicas. O sistema iMe introduzido por Gimenes (2007) utiliza técnicas estocásticas para modelagem da memória e geração de música.

Métodos e estruturas de dados

Alguns métodos e estruturas de dados têm sido freqüentemente utilizados por sistemas baseados em aprendizagem de máquina. Pachet (2002b), por exemplo, usa árvores de prefixo para armazenar uma árvore ordenada de todas as sub-sequências (ponderada pelo seu número de ocorrências) de uma sequência musical. Neste caso, os dados de entrada são simplificados armazenando-se reduções ao invés da sequência inteira.

No contexto de compressão sem perda, Jakob Ziv e Abraham Lempel propuseram o algoritmo de análise incremental (Shlomo Dubnov, Assayag, Lartillot, & Bejerano, 2003) em que um dicionário de motivos é construído percorrendo-se uma sequência de símbolos. Novas frases são adicionadas ao dicionário quando o algoritmo encontra uma sequência que se diferencia das anteriores por um único caractere.

Outra estrutura de dados é a Árvore de Previsão de Sufixo (Ron, Singer, & Tishby, 1996), que armazena cadeias de Markov de comprimento variável. Esta estrutura foi proposta por Rissanen (1983) a fim de superar as desvantagens (e.g., o crescimento de parâmetros) do modelo original de Markov. O algoritmo constrói um

dicionário dos motivos que aparecem um número importante de vezes e que, portanto, são significativos para predizer o futuro imediato. Há, conseqüentemente, perda da informação original (Assayag & Dubnov, 2004, p. 1).

Finalmente, uma outra estrutura, o Fator Oracle (FO) é um autômato que capta todos os fatores (sub-frases) em uma seqüência musical e uma série linear de elos de transição (ponteiros) (S. Dubnov & Assayag, 2005). Ponteiros para a frente (ou fator de links) no momento da geração permitem a reconstrução das frases originais. Os ponteiros para trás (ou links de sufixo) acompanham as outras sub-frases que compartilham o mesmo sufixo e geram recombinações baseadas no contexto do material aprendido (S. Dubnov & Assayag, 2005). O sistema OMAX (Assayag et al., 2006) usa este modelo para a aprendizagem de estilo musical e improvisação em tempo real ^{iv}.

Processos generativos

A criação musical pode ser vista como o resultado da interação entre representações do conhecimento musical e processos generativos associados a ela. Um paradigma explorado nos primórdios da Inteligência Artificial (IA) foi a composição algorítmica (Hiller & Isaacson, 1959). Outros modelos incluem a computação evolutiva, os agentes inteligentes e os modelos de inspiração biológica (e.g., vida artificial, autômatos celulares e enxames). Muitas vezes sistemas musicais complexos utilizam mais de um desses modelos.

Composição Algorítmica

O uso de algoritmos na música é provavelmente tão antigo quanto a própria música. Cope afirma que seria impossível compor sem usar pelo menos alguns algoritmos: "aqueles que confiam amplamente em sua intuição para a música realmente usam algoritmos subconscientemente" (Muscutt, 2007, p. 20). Um

algoritmo é simplesmente uma "receita passo a passo para alcançar um objetivo específico"; a música algorítmica, portanto, pode ser considerada como "uma receita passo a passo para a criação de novas composições" (Muscutt, 2007, p. 10).

Um exemplo famoso de composição algorítmica são os Jogos Musicais de Dados (Würfelspiel Musikalisches) atribuídos a Mozart. O processo consiste em se criar segmentos musicais que depois são utilizados em composições onde a ordem das seqüências é determinada pelo lançamento dos dados (Cope, 1991). A Suíte ILLIAC, mencionada acima, é conhecida por ter sido a primeira peça musical gerada por computador. Mesmo que os computadores não sejam um pré-requisito para a composição algorítmica, eles facilitam muito sua execução (Muscutt, 2007).

Diversos sistemas musicais algorítmicos não necessariamente focam na música, mas simplesmente mapeiam ou fazem associações entre o resultado de algoritmos genéricos e parâmetros musicais. Esses sistemas devem ser diferenciados daqueles que incorporam conhecimento musical (Miranda, 2002b), de maior interesse para a musicologia cognitiva.

Computação Evolutiva

As principais proposições teóricas sobre as origens e a evolução das espécies foram introduzidas durante o século XIX. Lamarck (Packard, 2007) sugeriu inicialmente que os indivíduos teriam a capacidade de se adaptar ao ambiente e que os resultados dessa adaptação poderia ser transmitida de pais para filhos.

Para Darwin (1998), indivíduos com características favoráveis em relação ao seu ambiente teriam mais chances de sobreviver, se comparados a indivíduos com traços menos favoráveis. Por este motivo, após uma série de gerações, a população de indivíduos com características favoráveis cresceria e seria mais adaptada ao ambiente.

Eventualmente, após diversas gerações, as diferenças seriam tão significativas que resultariam em novas espécies.

As idéias que fundamentam os modelos evolutivos são a adaptação, a transmissão e a sobrevivência do mais apto. Sabemos que os genes (Mendel, 1865) permitem a transmissão de características particulares, mas a evolução "ocorre quando um processo de transformação cria variantes de algum tipo de informação. Normalmente, há um mecanismo que favorece a melhor transformação e descarta aquelas que são consideradas inferiores, de acordo com determinados critérios" (Miranda, 1999, p. 8).

Um número crescente de pesquisadores está desenvolvendo modelos computacionais estudar a evolução musical. Miranda (2003) estudou as origens e a evolução da música "no contexto das convenções culturais que podem emergir sob uma série de restrições (por exemplo, psicológicas, fisiológicas e ecológicas)". Em seu sistema, uma comunidade de agentes evolui um conjunto de melodias (canções) "após um período de criação espontânea, adaptação e reforço de memória" (Miranda et al., 2003, p. 94). Para atingir esta meta, os agentes possuem habilidades motoras, auditivas e cognitivas e evoluem vetores de parâmetros de controle motor imitando as canções uns dos outros. Todd e Werner (1999) modelaram a pressão de acasalamento seletivo nas origens do gosto musical, onde uma sociedade evolui canções de acasalamento através de "machos" compositores e "fêmeas" críticas.

Algoritmos genéticos

Algoritmos Genéticos (AGs), um caso particular em computação evolutiva (Holland, 1992), são uma técnica de busca inspirada por alguns dos conceitos (e.g., herança, mutação, seleção) da teoria de Darwin sobre a evolução pela seleção natural. Os AGs têm sido utilizados em muitas aplicações musicais (Brown, 1999; Horowitz,

1994; Jacob, 1995; McIntyre, 1994; Moroni, Manzolli, Zuben, & Gudwin, 2000; Tokui & Iba, 2000; Weinberg, Godfrey, Rae, & Rhoads, 2007) em diferentes contextos, em especial para gerar material de composição e improvisação.

Grosso modo, um AG envolve a geração sucessiva de populações de cromossomos que representam o domínio a ser explorado. A cada geração, a população anterior de cromossomos é transformada por um número de operadores (mutação, crossover, etc.) e uma função de aptidão avalia a adequação dos novos candidatos para uma determinada solução. De uma geração para outra, apenas os candidatos mais aptos sobrevivem (Figura 3).

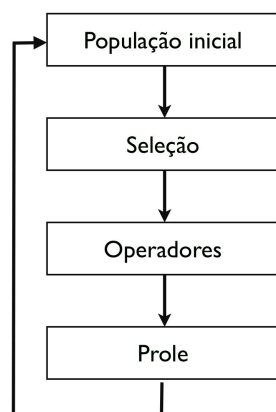


Figura 3: Algoritmo genético.

Criar uma função aptidão adequada não é uma tarefa fácil, porém. No sistema GenJam (Biles, 1999), por exemplo, a função de aptidão é executada pelo operador humano, que avalia cada candidato recém-gerado. Esta abordagem, conhecida como Algoritmo Genético Interativo (AGI), apresenta um sério problema, pois o número de candidatos gerados é normalmente grande. No sistema Vox Populi (Moroni et al., 2000) a função de aptidão (outro AGI) é controlada em tempo real pelo usuário através de uma interface gráfica. Em qualquer caso, a seleção dos candidatos mais aptos se baseia no julgamento (experiência musical prévia, etc.) do controlador humano.

Biles (1994) define GenJam (abreviação de Genetic Jammer) como um estudante aprendendo a improvisar solos de jazz. Este sistema integra um conversor de áudio para MIDI, o que permite improvisações e "trading fours"^v em tempo real com um instrumento monofônico. Neste modo, GenJam ouve os últimos quadro compassos tocados pelo ser humano, mapeando-os para sua representação cromossômica. Em seguida os cromossomos são modificados e o resultado é tocado durante os quatro compassos seguintes (Biles, 1998, p. 1).

Na realidade, a adequação dos sistemas baseados em AG para a musicologia cognitiva é muito limitada, já que de nenhuma maneira simulam o comportamento cognitivo humano. Nas palavras de Wiggins (1999, p. 12), "... eles carecem de estrutura em seu raciocínio - compositores desenvolveram métodos complexos e sutis ao longo de séculos que envolvem diferentes técnicas para resolver os problemas abordados aqui. Ninguém poderia seriamente sugerir que um autor de hinos trabalha da mesma forma que um AG, por isso, enquanto podem produzir resultados (quase) aceitáveis, não esclarecem em nada o funcionamento da mente do compositor".

Agentes Inteligentes

Agentes inteligentes (Figura 4), também conhecidos como agentes racionais, autônomos ou de software (Jones, 2008; Russell & Norvig, 2002), são sistemas adaptativos que residem em um ambiente dinâmico e complexo em que sentem e agem de forma autônoma executando uma série de tarefas, a fim de atingir os objetivos para os quais foram concebidos (Maes, 1991; Russell & Norvig, 2002).

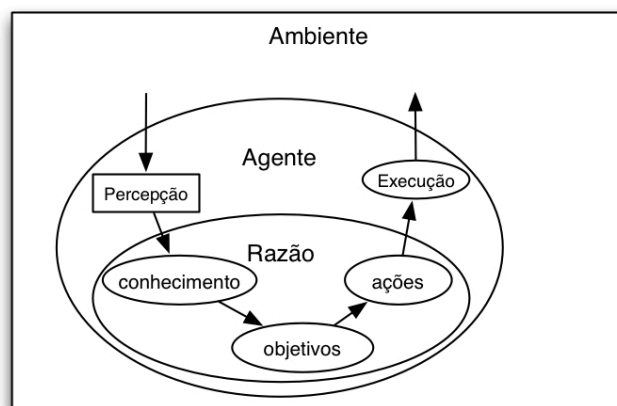


Figura 4: Arquitetura de um agente

Miranda e Todd (2003) identificaram três abordagens para a construção de sistemas baseados em agentes para a composição: (i) a conversão de comportamento extra-musical em som, (ii) algoritmo de inspiração genética e (iii) sistemas culturais. Uma perspectiva em que os agentes não necessariamente realizam tarefas musicais exemplifica o primeiro caso, em que alguns aspectos do seu comportamento (como se movimentar de um espaço definido, etc.) é mapeado para o som. A interação afeta o comportamento dos agentes e as músicas que eles produzem, mas essa música, por outro lado, não necessariamente afeta o seu comportamento.

Na segunda abordagem (algoritmo de inspiração genética), os agentes reproduzem artificialmente os mecanismos da teoria da evolução pela seleção natural de Darwin. A sobrevivência e a reprodução dos agentes dependem da música que eles produzem e o sistema como um todo tenderia a produzir mais "músicas de sucesso".

A terceira e última abordagem utiliza agentes virtuais e processos de auto-organização para modelar sistemas culturais onde mecanismos de reforço evoluem as habilidades dos agentes. Apenas esta última abordagem permitiria o "estudo das circunstâncias e dos mecanismos pelos quais a música teria surgido e evoluído em comunidades virtuais de músicos e ouvintes" (2003, p. 1).

Sistemas em que atuam mais de um agente são chamados de multi-agentes (Wulfhorst, Nakayama, & Vicari, 2003) e muitas vezes usados em simulações de interações sociais. Para Miranda (1999, p. 5), a linguagem e a música devem ser encaradas como um fenômeno cultural que emerge de interações sociais e não como um recurso completo que surge no nascimento de um bebê.

Em um mesmo sistema podem existir diversos tipos de agentes, cada um especializado em uma habilidade específica, como o que ocorre na Sociedade da Mente proposta por Minsky (1988). Outra possibilidade é que todos possuam as mesmas habilidades. No campo musical, Cypher (Rowe, 2004) adota a primeira abordagem, enquanto os músicos virtuais de Miranda (2002b) e os agentes de iMe (Gimenes & Miranda, 2008), a segunda.

Além dos sistemas acima mencionados, muitos outros sistemas são baseados em agentes. OMAX, por exemplo, modela uma topologia de agentes interativos com foco em diferentes habilidades (ouvintes, fatiadores, alunos, etc.) (Assayag et al., 2006). Frank (Casal & Morelli) usa técnicas de MPEG7 e genéticas de co-evolução, juntamente com agentes artificiais em performances ao vivo. Wulfhorst et al (2003) apresentaram uma arquitetura genérica de um sistema multi-agentes que interagem com músicos humanos. Impett (2001) utiliza um sistema para gerar composições musicais onde os agentes se adaptam às mudanças do ambiente em que residem. Pachet (2000) usa agentes em um contexto evolutivo para emergir formas de ritmo em simulações em tempo real.

O modelo mimético de Miranda (2002b) utiliza agentes inteligentes para incorporar mecanismos de evolução musical. Mimese seria a habilidade de imitar as ações de outras pessoas e animais. A hipótese é de esta característica seria uma das chaves para o surgimento da música em uma sociedade virtual (Miranda, 2002b, p.

79). Todos os agentes são capazes de ouvir e produzir sons (sintetizador vocal), além de guardar associações entre os parâmetros motores e perceptivos (memória). Como são programados para imitar uns aos outros, após algum tempo, um repertório compartilhado de melodias é criado.

Modelos biologicamente inspirados

Além dos algoritmos genéticos e dos agentes, outros modelos, tais como a vida artificial (a-life), autômatos celulares e enxames procuram inspiração em fenômenos biológicos para abordar a criatividade musical.

Os modelos da vida artificial

Os sistemas baseados na vida artificial tentam replicar fenômenos biológicos através de simulações em computador (Miranda, 2003) e lidar com conceitos (e.g., as origens dos organismos vivos, o comportamento emergente e auto-organização) que buscam esclarecer a gênese e a evolução da música.

Miranda e Todd (2003, p. 6) observam que talvez a aplicação mais interessante de técnicas de a-life "seja o estudo das circunstâncias e dos mecanismos pelos quais a música teria surgido e evoluído em mundos artificiais habitado por comunidades virtuais de músicos e ouvintes". Alguns estudiosos têm abordado esta questão ao longo da história (Thomas, 1995; Wallin, Merker, & Brown, 2000), embora modelos computacionais não tenham sido freqüentemente utilizados para a validação teórica.

Autômatos celulares

Autômatos celulares consistem em uma rede multidimensional de células, cada uma possuindo um estado em um determinado momento, de uma série de estados possíveis. Uma função determina a evolução destes estados em passos de tempo discretos.

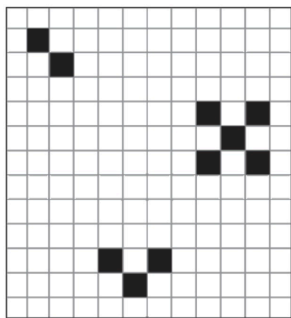


Figura 5: Autômato celular.

No conhecido Jogo da Vida de Conway, por exemplo, o estado das células (viva ou morta) é determinado pelo estado de seus vizinhos. Em cada ciclo de tempo todas as células são avaliadas e seus estados alterados de acordo com um conjunto de regras (Tabela 1). A configuração inicial das células afeta a dinâmica do sistema e pode permitir a emergência de comportamentos interessantes, especialmente no domínio visual.

Tempo t	Condição	Tempo t + 1
morta	3 vizinhos vivos	viva
viva	4 ou + vizinhos vivos	morta
viva	1 ou 0 vizinhos vivos	morta
viva	2 ou 3 vizinhos vivos	viva

Tabela 1: Regras de evolução do Jogo da Vida de Conway.

Diversos sistemas têm usado autômatos celulares. Chaosynth (Miranda, 2002a) usa essa técnica para controlar um sintetizador de áudio de síntese granular. Camus (Miranda, 2001) utiliza dois autômatos celulares simultâneos - o Jogo da Vida e o Demon Cyclic Space (Griffeath & Moore, 2003) - para gerar estruturas musicais (acordes, melodias, etc.).

Enxames

Os elementos individuais de um sistema auto-organizado podem se comunicar uns com os outros e modificar seu meio ambiente através de um método conhecido como estigmergia. O comportamento de cada elemento do sistema não é suficiente para determinar a organização do sistema como um todo. Por outro lado, esta organização resulta (emerge) daquele comportamento. Esse fenômeno ocorre, por exemplo, com enxames de abelhas e bandos de pássaros. Como

Swarm Granulador (Blackwell, 2006) é um sistemas que se baseiam no conceito de enxames. Um ser humano toca um instrumento musical, o que produz atratores em torno dos quais gravitam partículas artificiais. As regras seguidas por estas partículas são simples e envolvem os conceitos de coesão ("se separados, aproximem-se"), separação ("se muito pertos, afastem-se") e alinhamento ("tentativa de igualar as velocidades") (Blackwell, 2006, p. 4). O comportamento do sistema, que é mapeado em parâmetros de som, emerge destas interações entre as partículas.

Ambientes Interativos Musicais

O último dos sistemas abordados neste artigo, os Ambientes Interativos Musicais (Musical Interactive Environments - iMe) adota diversas das técnicas mencionadas acima. Trata-se de um sistema interativo musical que tem como objetivo principal explorar a evolução da música tendo como referência a transmissão de memes (estruturas) musicais e, conseqüentemente, as faculdades perceptivas e cognitivas dos seres humanos. Este sistema segue as condições do Modelo Ontomemético de Evolução Musical (Ontomemetical Model of Music Evolution - OMME), que se baseia nas noções de ontogênese e de memética^{vi}.

No sistema iMe, especialmente concebido para abordar a interatividade sob um ponto de vista improvisacional, agentes executam atividades inspiradas no mundo real

(ouvir, executar, praticar, improvisar-solo, improvisar-grupo, ler e compor música) e se comunicam entre si e com o mundo exterior. O resultado dessas atividades é que a memória dos agentes é constantemente alterada e, conseqüentemente, seus estilos musicais evoluem.

O sistema utiliza o protocolo de comunicação MIDI para a troca de mensagens entre os agentes e entre estes e o mundo exterior, a partir do qual os agentes extraem a representação musical simbólica necessária para as interações. Esta representação possui paralelos com os modelos perceptivos e cognitivos humanos, ou seja, com a forma como os sons são captados pelos ouvidos, processados e armazenados pela memória (Snyder, 2000). Uma série de filtros equipam os "ouvidos" dos agentes e são responsáveis pela extração de características particulares do fluxo sonoro, tais como o aumento e/ou a diminuição da freqüência sonora (direção da melodia) ou a densidade musical (número simultâneo de notas).

A segmentação implementada no iMe inspira-se em princípios da psicologia Gestalt. Em linhas gerais, o algoritmo de segmentação simula o fenômeno da habituação, ou seja, dado que um sinal (determinada característica do fluxo sonoro) permanece estável durante algum tempo, o seu interesse (atenção) decai. Enquanto os agentes percebem o fluxo sonoro, a repetição do mesmo sinal resulta em uma falta de interesse enquanto que uma mudança de comportamento desse sinal, depois de um certo número de repetições, desperta sua atenção.

Em (Gimenes, 2009) são descritas com detalhe algumas das possibilidades do OMME implementadas pelo sistema iMe, especialmente na área da musicologia cognitiva. É possível, por exemplo que, em um determinado cenário, um agente ouça uma peça e um outro agente ouça uma outra peça. Ao final da simulação, a diferença

do conhecimento musical dos agentes irá corresponder à diferença dos estilos musicais entre as peças.

Uma outra área explorada pelo sistema iMe é a criatividade musical visando, mais especificamente, contribuir para a construção da "musicalidade das máquinas" e para a interação entre máquinas e seres humanos. Uma performance pública foi realizada durante o Peninsula Arts Contemporary Music Festival em fevereiro de 2008 na Universidade de Plymouth (Reino Unido) onde essa possibilidade foi demonstrada.

Conclusão

Este artigo apresentou o estado da arte dos modelos computacionais com aplicações para a musicologia cognitiva. De várias maneiras, estes modelos procuram modelar como os seres humanos lidam com questões como percepção, representação do conhecimento, aprendizagem, criatividade e raciocínio.

Diversas abordagens foram apresentadas. Sistemas baseados em regras encapsulam o conhecimento especialista humano através de regras explícitas, enquanto que os sistemas baseados em gramática definem um conjunto finito de regras que descrevem a estrutura desse conhecimento. Sistemas que usam aprendizagem de máquina, por outro lado, tentam reproduzir os processos de aquisição do conhecimento humano.

Além desses, modelos baseados na computação evolutiva (e.g., algoritmos genéticos) e na vida artificial tentam replicar fenômenos biológicos através de simulações computacionais, e analisam temas como as origens dos organismos vivos, o comportamento emergente e a auto-organização.

Como vimos, alguns desses modelos se preocupam em implementar teorias que versam sobre a cognição humana e, portanto, interessam diretamente à

musicologia cognitiva. Outros, contudo, são mais voltados a um resultado sonoro do que propriamente à descrição desses modelos. Estes últimos foram incluídos pelo interesse que despertam e por possuírem muitos paralelos com os primeiros.

Bibliografia

- Assayag, G., Bloch, G., Chemillier, M., Cont, A., & Dubnov, S. (2006). *Omax Brothers: a Dynamic Topology of Agents for Improvisation Learning*. Workshop on Audio and Music Computing for Multimedia, Santa Barbara, EUA.
- Assayag, G., & Dubnov, S. (2004). Using Factor Oracles for machine Improvisation. *Soft Computing - A Fusion of Foundations, Methodologies and Applications*, 8(9), 604-610.
- Assayag, G., Dubnov, S., & Delerue, O. (1999). *Guessing the Composer's Mind: Applying Universal Prediction to Musical Style*. International Computer Music Conference, Beijing, China.
- Baker, M. (1989a). An Artificial Intelligence approach to musical grouping analysis. *Contemporary Music Review*, 3(1), 43-68.
- Baker, M. (1989b). A cognitive model for the perception of musical grouping structures. *Contemporary Music Review*(Music and the Cognitive Sciences).
- Biles, J. A. (1994). *GenJam: A Genetic Algorithm for Generating Jazz Solos*. International Computer Music Conference, Aarhus, Denmark.
- Biles, J. A. (1998). *Interactive GenJam: Integrating Real-Time Performance with a Genetic Algorithm*. International Computer Music Conference, Univ. of Michigan, Ann Arbor, EUA.

- Biles, J. A. (1999). *Life with GenJam: Interacting with a Musical IGA*. International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, Tokyo, Japan.
- Blackwell, T. (2006). Swarming and Music. In E. Miranda & J. A. Biles (Org.), *Evolutionary Computer Music*. London: Springer.
- Bod, R. (2001). *A Memory-Based Model For Music Analysis: Challenging The Gestalt Principles*. International Computer Music Conference, Havana, Cuba.
- Brown, C. (1999). Talking Drum: A Local Area Network Music Installation. *Leonardo Music Journal*, 9, 23-28.
- Cambouropoulos, E. (1998). *Towards a General Computational Theory of Musical Structure*. University of Edinburgh, Edinburgh.
- Camilleri, L., Carreras, F., & Duranti, C. (1990). An Expert System Prototype for the Study of Musical Segmentation. *Interface*, 19(2-3), 147-154.
- Casal, D. P., & Morelli, D. (2007). *Remembering the future: towards an application of genetic co-evolution in music improvisation*. MusicAL Workshop, European Conference on Artificial Life, Lisboa, Portugal.
- Chouvel, J. M. (1990). Musical Form: From a Model of Hearing to an Analytic Procedure. *Interface*, 22, 99-117.
- Cope, D. (1991). Recombinant Music: Using the Computer to Explore Musical Style. *Computer*, 24(7), 22-28.
- Cope, D. (1999). One approach to musical intelligence. *IEEE Intelligent Systems*, 14(3), 21-25.
- Cope, D. (2004). A Musical Learning Algorithm. *Computer Music Journal*, 28(3), 12-27.
- Darwin, C. (1998). *The Origin of Species* (new ed.): Wordsworth Editions Ltd.

- Deutsch, D. (1982a). Grouping Mechanisms in Music. In D. Deutsch (Org.), *The Psychology of Music*. Nova York: Academic Press.
- Deutsch, D. (1982b). The Processing of Pitch Combinations. In D. Deutsch (Org.), *The Psychology of Music*. Nova York: Academic Press.
- Dubnov, S., & Assayag, G. (2005). *Improvisation Planning And Jam Session Design Using Concepts Of Sequence Variation And Flow Experience*. Sound and Music Computing, Salerno, Italia.
- Dubnov, S., Assayag, G., Lartillot, O., & Bejerano, G. (2003). Using Machine-Learning Methods for Musical Style Modeling. *IEEE Computer*, 10(38), 73-80.
- Ebcioğlu, K. (1988). An expert system for harmonizing four-part chorales. *Computer Music Journal*, 12(3), 43-51.
- Forte, A. (1983). *Introduction to Schenkerian Analysis: Form and Content in Tonal Music*: W. W. Norton & Company.
- Gimenes, M. (2010). *A Ontomemética e a Evolução Musical*. VI Simpósio de Cognição e Artes Musicais, Rio de Janeiro.
- Gimenes, M., & Miranda, E. (2008). *An A-Life Approach to Machine Learning of Musical Worldviews for Improvisation Systems*. 5th Sound and Music Computing Conference, Berlin, Germany.
- Gimenes, M., Miranda, E., & Johnson, C. (2007). *The Emergent Musical Environments: An Artificial Life Approach*. Workshop on Music and Artificial Life (ECAL), Lisboa, Portugal.
- Griffeath, D., & Moore, C. (2003). *New Directions in Cellular Automata*: Oxford University Press.

- Hasty, C. F. (1978). *A theory of segmentation developed from late works of Stefan Wolpe*. Yale University.
- Hiller, L., & Isaacson, L. (1959). *Experimental Music*. Nova York: McGraw-Hill.
- Holland, J. H. (1992). *Adaptation in Natural and Artificial Systems - An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence*. The MIT Press.
- Honing, H. (2006). On the growing role of observation, formalization and experimental method in musicology. *Empirical Musicology Review*, 1(1), 2-6.
- Horowitz, D. (1994). *Generating Rhythms with Genetic Algorithms*. International Computer Music Conference, Aarhus, Denmark.
- Huron, D. (Producer). (1999, 27/03/2007) The 1999 Ernest Bloch Lectures. Lecture 1 - Music and Mind: Foundations of Cognitive Musicology. retrieved from <http://www.music-cog.ohio-state.edu/Music220/Bloch.lectures/1.Preamble.html>
- Impett, J. (2001). *Interaction, simulation and invention: a model for interactive music*. Workshop on Artificial Models for Musical Applications, Cosenza, Italia.
- Jacob, B. L. (1995). *Composing with genetic algorithms*. International Computer Music Conference, Banff Centre for the Arts, Canada.
- Jones, M. T. (2008). *Artificial Intelligence - A System Approach*. Hingham, Massachusetts: Infinity Science Press.
- Lerdahl, F., & Jackendoff, R. (1983). *A Generative Theory of Tonal Music*. Cambridge, Mass.: MIT Press.
- Maes, P. (1991). *Designing Autonomous Agents: Theory and Practice from Biology to Engineering and Back*. MIT Press.

- Marsden, A. (2007). *Automatic Derivation Of Musical Structure: A Tool For Research On Schenkerian Analysis*. International Conference on Music Information Retrieval, Viena, Austria.
- Martins, J., Gimenes, M., Manzolli, J., & Maia Jr, A. (2005). *Similarity Measures for Rhythmic Sequences*. Simpósio Brasileiro de Computação Musical, Belo Horizonte, Brasil.
- McAdams, S. (1984). The auditory Image: A metaphor for musical and psychological research on auditory organisation. In W. R. Crozier & A. J. Chapman (Org.), *Cognitive Processes in the Perception of Art*. Amsterdam: North-Holland Press.
- McIntyre, R. A. (1994). *Bach in a box: the evolution of four part Baroque harmony using the genetic algorithm*. IEEE World Congress on Computational Intelligence, Orlando, EUA.
- Mendel, G. (1865). *Experiments on Plant Hybridization*. Paper presented at the Meetings of the Natural History Society of Brünn. Retrieved from <http://www.mendelweb.org/Mendel.html>
- Minsky, M. (1988). *The Society of Mind*: Pocket Books.
- Miranda, E. (1999). The artificial life route to the origins of music. *Scientia*, 10(1), 5-33.
- Miranda, E. (2001). *Composing music with computers*. Oxford: Focal Press.
- Miranda, E. (2002a). *Computer sound design: synthesis techniques and programming* (2nd ed.). Oxford: Focal Press.
- Miranda, E. (2002b). Emergent Sound Repertoires in Virtual Societies. *Computer Music Journal*, 26(2), 77-90.

- Miranda, E. (2003). On the evolution of music in a society of self-taught digital creatures. *Digital Creativity*, 14(1), 29-42.
- Miranda, E., Kirby, S., & Todd, P. (2003). On Computational Models of the Evolution of Music: From the Origins of Musical Taste to the Emergence of Grammars. *Contemporary Music Review*, 22(2), 91-111.
- Miranda, E., & Todd, P. M. (2003). *A-Life and Musical Composition: A Brief Survey*. Simpósio Brasileiro de Computação Musical, Campinas, Brasil.
- Moroni, A., Manzolli, J., Zuben, F. V., & Gudwin, R. (2000). Vox Populi: An Interactive Evolutionary System for Algorithmic Music Composition. *Leonardo Music Journal*, 10, 49-54.
- Muscutt, K. (2007). Composing with Algorithms An Interview with David Cope. *Computer Music Journal*, 31(3), 10-22.
- Narmour, E. (1990). *The Analysis and Cognition of Basic Melodic Structures*: University Of Chicago Press.
- Pachet, F. (1994). *The MusES system: an environment for experimenting with knowledge representation techniques in tonal harmony*. Simpósio Brasileiro de Computação Musical, Baxambu, Brasil.
- Pachet, F. (1998). *Sur la structure algebrique des sequences d'accords de Jazz*. Journées d'Informatique Musicale, Agelonde, France.
- Pachet, F. (2000). *Rhythms as emerging structures*. International Computer Music Conference, Berlin, Germany.
- Pachet, F. (2002a). *The continuator: Musical interaction with style*. International Computer Music Conference, Gothenburg, Sweden.
- Pachet, F. (2002b). Interacting with a Musical Learning System: The Continuator. In C. Anagnostopoulou, M. Ferrand & A. Smaill (Org.), *Music and Artificial*

- Intelligence, Lecture Notes in Artificial Intelligence* (Vol. 2445, pp. 119-132): Springer Verlag.
- Pachet, F. (2003). The Continuator: Musical Interaction With Style. *Journal of New Music Research*, 32(3), 333-341.
- Packard, A. S. (2007). *Lamarck, the Founder of Evolution: His Life and Work*: Dodo Press.
- Polansky, L. (1978). *A hierarchical gestalt analysis of Ruggle's Portals*. International Computer Music Conference, Evanston, EUA.
- Raphael, C. (1999). A Probabilistic Expert System for Automatic Musical Accompaniment. *Journal of Computational and Graphical Statistics*, 10(3), 487-512.
- Rissanen, J. (1983). A universal data compression system. *IEEE Transactions on Information Theory*, 29(5), 656-664.
- Ron, D., Singer, Y., & Tishby, N. (1996). The Power of Amnesia: Learning Probabilistic Automata with Variable Memory Length. *Machine Learning*, 25, 117-149.
- Rowe, R. (2004). *Machine Musicianship*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Russell, S. J., & Norvig, P. (2002). *Artificial Intelligence: A Modern Approach*: Prentice Hall.
- Snyder, B. (2000). *Music and Memory: An Introduction*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Temperley, D. (2004). *Cognition of Basic Musical Structures*: The MIT Press.
- Tenney, J., & Polansky, L. (1980). Temporal Gestalt Perception in Music. *Journal of Music Theory*, 24(2), 205-241.

- Thom, B. (2000a). *BoB: an Interactive Improvisational Music Companion*.
International Conference on Autonomous Agents, Barcelona, Spain.
- Thom, B. (2000b). *Unsupervised Learning and Interactive Jazz/Blues Improvisation*.
Seventeenth National Conference on Artificial Intelligence and Twelfth
Conference on Innovative Applications of Artificial Intelligence.
- Thom, B., Spevak, C., & Hothker, K. (2002). *Melodic segmentation: evaluating the
performance of algorithms and musical experts*. International Computer Music
Conference, Gothenburg, Sweden.
- Thomas, D. A. (1995). *Music and the Origins of Language*. Cambridge: Cambridge
University Press.
- Todd, P. M., & Werner, G. M. (1999). Frankensteinian Methods for Evolutionary
Music Composition. In N. Griffith & P. M. Todd (Org.), *Musical networks:
Parallel distributed perception and performance*. Cambridge, MA: MIT
Press/Bradford Books.
- Tokui, N., & Iba, H. (2000). *Music Composition with Interactive Evolutionary
Computation*. International Generative Art, Milan, Italia.
- Trivino-Rodriguez, J. L., & Morales-Bueno, R. (2001). Using Multiattribute
Prediction Suffix Graphs to Predict and Generate Music. *Computer Music
Journal*, 25(3), 62-79.
- Vercoe, B., & Puckette, M. (1985). *The synthetic rehearsal: Training the synthetic
performer*. International Computer Music Conference, Vancouver, Canada.
- Walker, W., Hebel, K., Martirano, S., & Scaletti, C. (1992). *ImprovisationBuilder:
improvisation as conversation*. International Computer Music Conference, San
Jose State University, EUA

Walker, W. F. (1994). *A Conversation-Based Framework For Musical Improvisation*.

University of Illinois.

Wallin, N. J., Merker, B., & Brown, S. (Eds.). (2000). *The Origins of Music*.

Cambridge, MA: MIT Press.

Weinberg, G., Godfrey, M., Rae, A., & Rhoads, J. (2007). *A Real-Time Genetic*

Algorithm In Human-Robot Musical Improvisation. CMMR, Copenhagen.

Wiggins, G. (1998). *Music, syntax and the meaning of "meaning"*. First Symposium

on Music and Computers, Corfu, Greece.

Wiggins, G. (1999). *Automated generation of musical harmony: what's missing?*

International Joint Conference on Artificial Intelligence.

Wiggins, G., Papadopoulos, A., Phon-Amnuaisuk, S., & Tuson, A. (1999).

Evolutionary Methods for Musical Composition. *International Journal of Computing Anticipatory Systems*.

Wiggins, G., & Smail, A. (2000). Musical Knowledge: what can Artificial

Intelligence bring to the musician? *Readings in Music and Artificial Intelligence* (pp. 29-46).

Woods, W. (1970). Transition Network Grammars for Natural Language Analysis.

Communications of the ACM, 13(10), 591-606.

Wulfhorst, R. D., Nakayama, L., & Vicari, R. M. (2003). *A Multiagent approach for*

Musical Interactive Systems. International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems, Nova York, EUA.

ⁱ O aprofundamento desse tema fugiria ao escopo deste texto. Maiores informações podem ser obtidas em (Woods, 1970).

ⁱⁱ Em um modelo funcional simplificado, a memória pode ser descrita através de três processos (memória ecóica, memória de curto prazo e memória de longo prazo) que correspondem a diferentes níveis temporais da experiência musical. A memória de curto prazo processa eventos separados por mais de 63 milissegundos (16 eventos por segundo), o nível dos grupamentos melódicos e rítmicos (Snyder, 2000).

ⁱⁱⁱ O aprofundamento desse tema fugiria ao escopo deste texto. Maiores informações podem ser obtidas em (Martins et al., 2005).

^{iv} Uma explanação mais aprofundada sobre esses algoritmos pode ser encontrada em (Shlomo Dubnov et al., 2003) e (S. Dubnov & Assayag, 2005)

^v Modo de execução no jazz em que os músicos se revezam improvisando trechos de quatro compassos.

^{vi} Maiores detalhes sobre esse modelo podem ser encontrados em (Gimenes, 2010).