

- Datum, M. S., Palmiere, F. & Moiseff A. (1996) An Artificial Neural Network for Sound Localization Using Binaural Cues, *Journal of the Acoustic Society of America*, 100(1), 372-383.
- Iazzetta, F. (1994). Um Novo Músico Chamado Usuário. *I Simpósio Brasileiro de Computação e Música*, 231-235.
- Kuntenback, G. & Hulteen E. A. (1993) Gestures in Human-Computer Communication. *The Art of Human-Computer Interface*. Addison-Wesley
- Lima, G.H.T. & Wanderley, M. (1996) Dance-music interface based on ultrasound sensors and computers, *III Simpósio Brasileiro de Computação e Música*, 12-16.
- Manzolli, J. (1995) The development of a gesture interface laboratory. *II simpósio brasileiro de computação e música*, 81-84.
- Manzolli, J. & Ohtisuki, W. (1996). Interasom: Um Desktop Para Composição. *III Simpósio Brasileiro de Computação e Música*, 84-88.
- Mulder, A (1994). Virtual musical instruments: Accessing the sound synthesis universe as a performer. *I Simpósio Brasileiro de Computação e Música*, 243-250.
- Nonaka, H. & Da-te T. (1995) Ultrasonic Position Measurement and Its Application to Human Interface, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 44(3), 771-774.
- Parrilla, M., Anaya, J.J. & Fritsch, C. (1991) Digital signal processing techniques for high accuracy ultrasonic range measurements, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 40(4), 759-763.
- Sabatini A.M. (1995) A Digital Signal-processing Technique for Compensating Ultrasonic Sensors, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 44(4), 869-874.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos aos membros do NICS pela discussões durante nossos seminários de Música e Tecnologia. Este trabalho teve o apoio da FAPESP e do CNPq.

Análises Melódicas usando Grafos

RODRIGO PERES FRANCO FURTADO
HUMBERTO JOSÉ LONGO
Instituto de Informática - UFG
Caixa Postal 131, Goiânia - GO, Brasil
CEP: 74001-970

Abstract

This paper presents an approach to represent keys (modulations) by a graph structure and how to use it to help melodic analysis based on musical rules of harmonization and composition. The main objective is just to show that the graph theory contains important elements that would be used, with a certain facility, as support in melodic analysis.

Key words: Melodic analysis, keys (modulations), graph.

1. Introdução

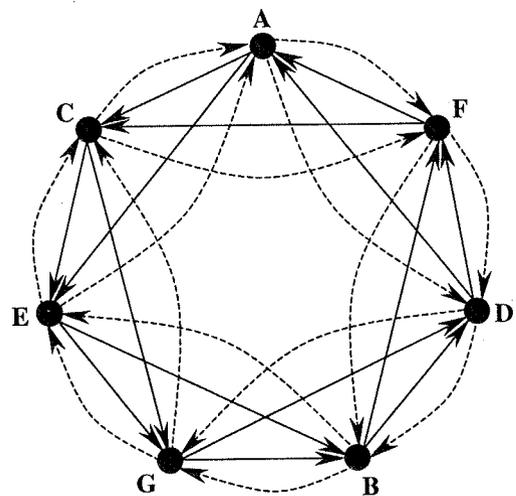
O objetivo geral deste estudo é mostrar como conceitos básicos da teoria musical e da teoria de grafos ((Jurafsky 1971), (Priolli 1987) e (Watkins & Wilson 1990)) podem se relacionar, permitindo a criação de métodos de análise melódica que visem uma correta harmonização musical. Logicamente, este artigo não dá uma cobertura total da análise melódica e harmonização, o que exigiria um estudo muito mais aprofundado. Este estudo se detém na análise teórica das partes melódicas, usando recursos da teoria de grafos e logicamente obedecendo a algumas regras musicais de harmonização baseadas em tríades e encadeamentos de acordes. Um campo harmônico pode ter notas com acidentes (sustenidos e bemóis) que em nada atrapalham a utilização da representação proposta para o campo.

A análise musical aqui realizada é bastante restrita, porém, é o ponto de partida para outras análises mais complexas. Aqui é levado em conta apenas a análise das tríades em compassos simples, com notas de mesma duração e utilizando-se somente acordes consonantes. Para facilitar considerou-se que cada compasso pode ter um e somente um acorde. A questão do encadeamento de acordes será aqui tratada de forma também simplificada, seguindo uma regra específica e bem definida.

2. Modelagem do campo harmônico de C maior

Na aplicação da teoria de grafos à música, o que foi feito a princípio foi o estudo de uma possível modelagem dos campos harmônicos com grafos e como utilizá-los para analisar as tríades dos campos harmônicos. Neste estudo é apresentado apenas a modelagem do campo harmônico de C maior, contudo os demais campos harmônicos têm modelagem similar.

Assim, seja o grafo $G = (VG, AG_{asc} \cup AG_{des})$. O conjunto de vértices VG do grafo G corresponde as notas naturais que formam o campo harmônico de C. O conjunto de arestas $AG = AG_{asc} \cup AG_{des}$ contém arestas dos tipos ascendentes e descendentes. Visto que cada acorde é formado por três notas, as arestas descendentes representam a ligação (formação do acorde) entre estas três notas. As arestas são dirigidas de cada tônica para sua 3ª e 5ª (de um vértice pai para os seus vértices filhos), para que se possa encontrar todas as tríades do campo harmônico. As arestas ascendentes ligam uma nota às suas possíveis tônicas (arestas dirigidas do vértice filho aos possíveis vértices pai). Na ilustração a seguir, tal grafo é representado com as arestas descendentes desenhadas em linha cheia e as ascendentes em linha tracejada:



Com esta modelagem do campo harmônico de C, pode-se determinar, compasso a compasso, as possíveis tríades de uma melodia com um percurso apropriado no grafo. No algoritmo descrito a seguir, parte-se da primeira nota de cada compasso e busca-se a mesma no grafo. A partir daí, faz-se uma busca em largura modificada (*breadth first search*, (McHugh 1991)) no grafo, comparando-se os vértices adjacentes ao vértice de entrada (primeira nota do compasso) com as outras notas do compasso. Consideram-se inicialmente os vértices alcançáveis a partir das arestas descendentes e depois os vértices alcançáveis a partir das arestas ascendentes. A seguir será mostrado como encontrar os elementos de uma tríade e julgá-los adequados ou não para uma possível harmonização.

O algoritmo de análise aqui proposto inicialmente encontra todas as combinações das notas de cada compasso (a ordem das mesmas não interessa). As combinações serão do tipo $C_{comp,3}$, onde *comp* é o número de notas do compasso, pois busca-se a validação de uma possível tríade. A seguir comparam-se estas combinações com o resultado de um percurso no grafo (busca em largura). Para esta análise, foi adotado fixar a primeira nota da combinação e a partir das outras notas procurar tríades completas ou possíveis fragmentos. Portanto, uma vez determinado que o campo harmônico é de C, os seguintes passos devem ser executados:

- 1 - Gerar as combinações de notas do compasso;
- 2 - Fazer a seguinte verificação nas combinações de notas:
- 3 - Iniciar o percurso no grafo começando pela 1ª nota de cada combinação;
- 4 - Se existir arestas da 1ª nota da combinação para as duas outras notas do compasso
- 5 - Achou-se uma tríade completa;
- 6 - Senão
- 7 - Se essa 1ª nota tiver um pai comum com alguma das notas do compasso
- 8 - Achou-se uma tríade válida (fragmento de tríade);
- 9 - Senão
- 10 - Não existe tríade válida para a combinação.

3. Exemplo de Análise

A seguir é mostrada a análise e harmonização das melodias abaixo, usando-se o grafo e o algoritmo descritos anteriormente. Contudo, é importante ressaltar que no algoritmo descrito anteriormente a análise é feita para todas as combinações de notas (tomadas três a três) de cada compasso. Nos três exemplos descritos a seguir não se verificou todas as combinações, pois pretende-se com os exemplos apenas se mostrar que o grafo proposto adequa-se à análise das tríades dos compassos de uma melodia.

Melodia 1:

1º compasso: Observa-se claramente a existência de uma tríade de C (dó, mi, sol), concluindo-se então que o acorde que melhor se ajusta é C maior. No

grafo, começa-se a busca pelo vértice C e verifica-se se algum dos vértices adjacentes ao vértice C corresponde a alguma das notas do compasso. Como em ambos os casos (para os dois filhos) a resposta é afirmativa, tem-se uma tríade completa de C, no estado fundamental.

2º compasso : Aqui há uma tríade completa de G (sol, si, ré), o que justifica o uso de G para harmonizar este compasso. A busca no grafo é semelhante à feita anteriormente e como as notas seguintes, após o sol, são filhos de G, então esta é a melhor tríade.

Para o terceiro e quarto compassos a análise é semelhante as duas dadas anteriormente.

Melodia 2:

1º compasso : Neste compasso, observa-se que as três notas formam uma tríade de C (1ª inversão), portanto a harmonia mais justa é o acorde de C. No grafo, a primeira nota do compasso leva ao vértice E e a segunda nota leva ao filho de E, vértice G. Neste ponto, vale observar que tem-se um fragmento de tríade (E,G). Para saber se existe uma tríade melhor (completa), observa-se o outro filho de E, como este não corresponde à terceira nota do compasso, observa-se, então, os pais das notas do fragmento de tríade (E,G). Se o pai de G for igual ao-pai de E então tem-se uma tríade completa, cuja tônica é C e a 3ª e 5ª são E e G, respectivamente. Portanto, a melhor tríade é exatamente esta última.

Neste 1º compasso percebe-se bem a utilidade dos apontadores para os pais das notas, visto que, sem estes apontadores teríamos uma harmonia correta, mas que não seria a melhor possível, pois a última nota do compasso (C) ficaria praticamente isolada. Este isolamento não acontece com o grafo proposto, pois, sempre que se quiser saber se existe uma tríade que ajusta-se melhor, basta verificar o pai das notas do compasso (que já foi analisado) e comparar o resultado com a(s) outra(s) nota(s) do compasso, para verificar se existe uma tríade completa.

2º compasso : Este compasso apresenta uma tríade que não é nem a primeira nem a segunda inversão, porém possui as três notas da tríade de F. No grafo, inicia-se a busca pelo vértice C e verifica-se logo que a tríade procurada não está ali, pois a segunda e terceira nota não são filhos diretos de C. Nota-se também, que a segunda nota do compasso não tem correspondência direta com C. A alternativa é procurar o pai de C (terceira nota do compasso, vértice F), formando uma tríade válida (fragmento de tríade). Pode-se, ainda, verificar se existe uma tríade completa. Neste caso, observa-se que outro filho de F (vértice A), é a segunda nota do compasso. Conclui-se, portanto, que se trata de uma tríade de F.

No terceiro e quarto compassos a análise é direta, visto que as tríades estão no estado fundamental e pode-se achar o acorde diretamente por uma verificação simples.

Melodia 3:

1º compasso : Trata-se claramente de uma tríade (2ª inversão) de C. No grafo, começa-se no vértice G, (1ª nota do compasso); como a segunda e a terceira nota do compasso não são filhos de G, conclui-se que G é parte de alguma tríade. Busca-se, então, um dos pais de G, por exemplo C. Imediatamente já se sabe que C é a segunda nota do compasso. Analisando-se agora o outro filho de C (vértice E) encontra-se a tríade completa, pois a terceira nota é E (que é a terça da tríade de C).

2º compasso : Nota-se uma tríade de Dm, o que justifica o uso deste acorde neste compasso. No grafo a análise é direta, chegando-se a conclusão que é uma tríade de Dm.

3º compasso : Neste compasso nota-se que as duas primeiras notas são iguais, o que não causa nenhum problema, pois pode-se insistir em qualquer nota da tríade sem mudar a harmonia. Nota-se ainda que a terceira nota faz parte da tríade de C (mi), e portanto harmoniza-se este compasso com C. No grafo, analisa-se o primeiro compasso e chega-se à conclusão que existe neste compasso um fragmento de tríade, e assim escolhe-se a tríade de C.

4º compasso : Neste compasso há uma tríade completa de G, portanto o melhor acorde é G. No percurso no grafo vai-se diretamente ao vértice D, analisam-se os seus filhos comparando-os com as notas (2ª e 3ª) do compasso. Como as notas não correspondem a nenhum dos filhos de D, busca-se o pai de D. Como o pai de D é também uma nota do compasso, já se encontrou uma tríade válida. Para verificar se há uma tríade melhor, examina-se o outro filho de D (vértice G), e verifica-se que ele também faz parte das notas do compasso, e encontra-se, portanto, uma tríade completa.

Observe-se que neste último compasso usou-se o recurso de, sempre que uma nota do compasso (principalmente a primeira) não tiver um filho correspondente às outras notas do compasso, se buscar o pai desta nota e verificar se ele ou o outro filho correspondem as outras notas do compasso.

4. Encadeamento de acordes

O encadeamento entre acordes também é uma parte importante a ser observada para uma correta análise musical. Neste estudo, juntamente com a análise de tríades, iniciou-se o estudo dos encadeamentos como forma de complementar a análise musical. É lógico que a composição musical não é algo tão inflexível e exato para que possamos simplesmente ditá-las por regras e nada mais. Porém, pode-se arriscar uma tentativa de cobrir alguns aspectos que possam ser modelados por regras e conceitos que não ceifem a criatividade artística.

Neste estudo, após a observação das tríades para cada compasso, aplicou-se uma regra básica de encadeamento de acordes, compasso a compasso, gerando todas as possíveis harmonias para uma dada melodia. Assim, usou-se o critério de só permitir encadeamentos

em que os acordes que estão se encadeando tenham pelo menos uma nota em comum; salvo o caso em que os acordes representem funções principais (IV e V graus).

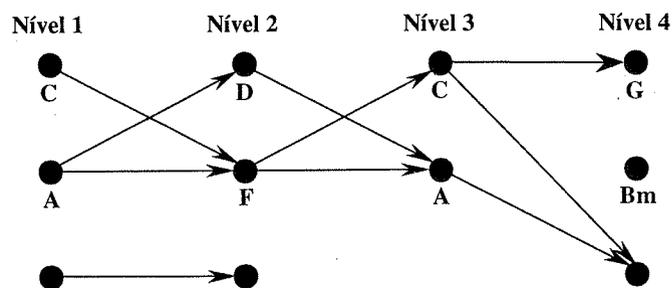
O algoritmo descrito anteriormente produz como resultado os possíveis acordes para cada compasso de uma melodia. Para se descobrir quais são os possíveis encadeamentos para a melodia, usou-se um segundo grafo ($G_I = (VG_I, AG_I)$) para modelar estes encadeamentos entre os compassos. Neste grafo, o conjunto de vértices VG_I é formado pelos acordes de cada compasso. Esses vértices podem ser representados em níveis (um nível para cada compasso), ficando os acordes do primeiro compasso no primeiro nível, os acordes do segundo compasso no segundo nível e assim sucessivamente. O conjunto de arestas é formado por possíveis encadeamentos entre dois acordes de níveis sucessivos. Assim, fazendo-se buscas em profundidade (*depth first search*, (McHugh 1991)) a partir dos vértices do primeiro nível, torna-se possível listar todos os possíveis encadeamentos de todas os acordes, ou seja, todas as possíveis harmonias para a melodia.

Um algoritmo simples para a análise harmônica pode ser descrito como a seguinte seqüência de operações:

- 1 - verificar a armadura de clave da música e identificar qual é o seu campo harmônico;
- 2 - analisar compasso a compasso, identificando-se as tríades existentes;
- 3 - usar os critérios descritos na seção 2 para gerar opções de harmonia para cada compasso;
- 4 - determinar os possíveis encadeamentos entre os compassos.

Embora seja um algoritmo genérico, o passo 3 pode corresponder aos passos 3 a 10 do algoritmo descrito na seção 2 e o passo 4 pode corresponder ao algoritmo de encadeamento descrito nesta seção.

A seguir é mostrado um exemplo de grafo de encadeamento gerado para a melodia 3 da seção anterior. Verifica-se que as arestas ligam acordes que possuem pelo menos uma nota em comum:



Aplicando-se o algoritmo de encadeamento, descrito anteriormente, a este grafo são geradas as seguintes possibilidades de harmonia:

- a) C, F, C, G;
- b) C, F, C, Em;
- c) C, F, Am, Em;
- d) Am, Dm, Am, Em;
- e) Am, F, C, G;

- f) Am, F, C, Em; e
- g) Am, F, Am, E.

O conjunto de possíveis harmonias geradas por este algoritmo pode ser muito grande. Contudo, este conjunto pode ser restringido usando-se outras regras de harmonização juntamente com a regra utilizada (por exemplo, cadência plagal e cadência perfeita).

5. Conclusão

Observou-se, claramente, neste estudo como áreas que parecem tão distantes podem ser relacionadas e contribuir mutuamente para seus desenvolvimentos. Os aspectos musicais têm fortes marcas de lógica e simetria, tornando possível gerar harmonias com o uso de estruturas de dados e algoritmos que obedeçam a determinadas regras musicais. Com os algoritmos apresentados pode-se ter uma idéia mais clara de que realmente é possível se criar métodos para o auxílio na análise de uma melodia.

O que foi feito até agora porém é uma fração muito pequena do que ainda pode ser estudado nesta área. Apesar de ser um estudo inicial, mostrou-se aqui que é viável a proposição de algoritmos mais avançados para cobrir um número maior de casos e proporcionar uma harmonização mais correta para uma melodia.

Referências

- Jurafsky, A. (1971). *Manual de Armonia*. Buenos Aires: Ricordi Americana.
- McHugh, J. A. (1991). *Algorithmic Graph Theory*. London: Wiley.
- Priolli, M. L. M. (1987). *Harmonia da concepção básica à expressão contemporânea, 1º volume*. Rio de Janeiro, RJ: Casa Oliveira de Música Ltda.
- Watkins, J. J. & Wilson, K. J. (1990). *Graphs. An Introductory Approach*. New York: Wiley.