

AHO - Analisador Harmônico Otimista

Este exemplar corresponde à redação final da Dissertação devidamente corrigida e defendida por Paulo Leitão Vilar e aprovada pela banca examinadora.

Fortaleza, 8 de Setembro de 2005.

**Marcelino Pequeno (Orientador)
Erivelton Aragão (Co-orientador)**

Dissertação apresentada ao mestrado em Ciência da Computação, UFC, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação.

Mestrado em Ciência Da Computação
Universidade Federal do Ceará

**AHO - Analisador
Harmônico Otimista**

Paulo L. Vilar¹
Fortaleza, 8 de Setembro de 2005.

Banca Examinadora
Prof. Dr. Marcelino Pequeno
Prof. Dr. Luiz Botelho
Prof. Dr. Tarcísio H. C. Pequeno

Examinador Honorário
Prof. Tarcísio J. de Lima

¹ Bolsista da FUNCAP(Fundação Cearense de Pesquisa).

Agradecimentos

Agradeço o apoio e incentivo por parte da minha família e amigos, especialmente à minha esposa Valéria e aos meus pais.

Agradeço ao professor Aragão, co-orientador e idealizador deste trabalho, que colocou a serviço deste seu tempo e atenção. Aragão, muito obrigado! Não posso deixar de agradecer também à sua esposa pela paciência e atenção nos vários e frequentes momentos em que desenvolvíamos o trabalho em sua casa.

Agradeço aos professores Marcelino e Tarcísio, que atuaram como orientadores, sempre definindo os caminhos e parâmetros de qualidade a serem observados.

Agradeço ao professor Tarcísio Lima, que atuou como consultor em assuntos musicais.

Agradeço meu filho Bruno. Sem ele, este trabalho não existiria, apesar de eu não conseguir explicar o porquê.

Agradeço à FUNCAP (Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico), pelo apoio financeiro.

Conteúdo

Capítulo 1	6
1.1 A solução proposta.....	7
1.2 Relevância da solução	8
1.3 Trabalhos relacionados.....	8
Capítulo 2	9
2.1 Música	9
2.1.1 Fundamentos de Teoria Musical	9
2.1.1.1 Escala.....	9
2.1.1.2 Acorde.....	10
2.1.1.3 Cifra	10
2.1.1.4 Harmonia	11
2.1.1.5 Cadência.....	11
2.1.1.6 Tonalidade.....	12
2.1.2 Análise Musical.....	12
2.1.3 Análise Harmônica.....	12
2.1.4 O Problema das Substituições Funcionais	14
2.1.5 O Problema do Empréstimo Modal.....	18
2.2 Computação e Música	21
2.2.1 Mark Steedman	21
2.2.2 David Temperley.....	23
Capítulo 3	27
3.1 Introdução.....	27
3.2 Cadência e Tonalidade	28
3.3 Formalização do conceito de cadência.....	32
3.3.1 Proto-gramática maior	34
3.3.2 Proto-gramática menor	39
3.4 Regras adicionais (meta gramaticais):	44
3.5 Procedimento de instanciação gramatical	44
3.6 Exemplos de Instanciação de Gramáticas	46
3.6.1 Exemplos de Instanciação para Tonalidade Dó maior	46
3.6.2 Exemplos de Instanciação para Tonalidade Lá menor	47
Formalmente, definimos a gramática de Lá maior, $Cam = \langle A, N, P, S \rangle$ onde:	47
3.7 Tipos de cadência reconhecidas pelo Aho:	48
3.8 Exemplos de derivação.....	50
3.9 Aceitação de cadências.....	60
3.10 Descrição do processo de análise.....	66
3.12 Reconhecimento de cadências compostas.....	70
3.13 Levando em conta a tonalidade global.....	72
3.14 O algoritmo de análise.....	75
3.15 Escore de adequação e a função <i>geraEscore</i>	77
Capítulo 4	78
4.1 Introdução.....	78
4.2 O Documento	79
4.2 Análise Cadencial	80
4.2.1 Música 1.....	80
4.4 Detecção de Modulações.....	84

4.4.1 Música Modulante 1	84
4.5 Resultados.....	87
4.6 Conclusão e Perspectivas	88
4.6.1 Trabalhos futuros:	88
Bibliografia.....	90

Capítulo 1

Introdução

A análise harmônica de uma peça musical consiste na determinação da tonalidade e da estrutura cadencial, isto é, da identificação das cadências musicais que ocorrem na peça e do papel que cada acorde desempenha nelas.

Este trabalho de dissertação propõe uma solução para o problema de produzir uma análise harmônica automática de uma peça a partir, apenas, da sua seqüência de acordes.

O homem desenvolveu e vem aprimorado sua prática de harmonia ao longo do tempo. A grosso modo, e apenas com propósito investigativo, dividimos este período de produção intelectual em três partes, a chamada *tonalité ancienne* (*tonalidade antiga*), usada no período medieval e na renascença, onde a associação de sonoridades (acordes) era apenas de adjacência e não gerava a sensação de subordinação. A **harmonia tonal**, onde o relacionamento entre as sonoridades simultâneas está subjugado a um centro sonoro bem definido e, com o qual todos os acordes guardam certa relação, e o terceiro período, que seria posterior a Debussy e Stavinsky. Nosso trabalho então trata do segundo tipo, ou seja, da análise de obras compostas sob a égide da harmonia tonal.

O tonalismo é uma aquisição da humanidade e está fortemente inserido na cultura ocidental. Grande parte da música popular produzida no Brasil e no mundo ocidental é eminentemente tonal. Encontramos obras tonais na produção musical atual, como na música instrumental para cinema e no jazz, e mesmo na música erudita atual, como é o caso dos compositores minimalistas como Steve Reich. Podemos verificar a presença viva do tonalismo também no gênero operístico moderno, como é o caso do compositor alemão Ernest Mahler.

A determinação da tonalidade e da estrutura cadencial não são atividades isoladas. A estrutura cadencial deve ser analisada sob a ótica de um contexto maior, a tonalidade. Da mesma forma, a tonalidade da peça é determinada pelos acordes e, em última análise, pela estrutura cadencial que a compõe.

Realizar uma análise harmônica requer tanto domínio teórico quanto prático. A teoria musical necessária para esta atividade é bastante extensa, passando por:

- Escalas musicais
- Leis de formação de acordes
- Cifras musicais
- Ritmo harmônico
- Funções harmônicas básicas
- Cadências básicas
- Equivalência entre acordes em cadências
- Estilos musicais e suas cadências particulares

A questão prática surge quando grande parte desta teoria deve ser usada simultaneamente para realizar uma análise harmônica.

Tudo isto torna a análise harmônica de uma peça musical é uma atividade difícil para músicos iniciantes, podendo, em alguns casos, se tornar complicada, mesmo para músicos experimentados.

A grande abrangência teórica necessária para realização de análises harmônicas produz uma série de efeitos indesejados como:

- Dificuldade de acesso a professores especializados
- Dificuldade de material mesmo em livros
- Escassez de material na Internet

Buscamos neste trabalho atenuar estas dificuldades desenvolvendo uma ferramenta que gera uma análise da peça musical a partir de um elemento que está quase sempre à disposição, a seqüência de acordes cifrados da peça.

Acreditamos que esta análise possa ser útil como ferramenta de apoio ao estudo da música tonal.

1.1 A solução proposta

Neste trabalho, desenvolvemos um software que realiza análise harmônica de peças musicais. Este software, que chamamos de Aho - Analisador Harmônico Otimista, produz uma análise harmônica a partir da seqüência de acordes cifrada de uma peça musical. Nesta análise, o Aho identifica a tonalidade da peça, as cadências musicais que ocorrem na seqüência de acordes e o papel de cada acorde nas cadências.

Desenvolvido com o objetivo de ser usado como ferramenta de auxílio ao ensino musical, a saída gerada pelo Aho identifica as cadências que ocorrem na seqüência de acordes da peça, informando a 'tonalidade local' de cada cadência, o tipo de cadência e a relação de encadeamento que pode haver entre as cadências da peça. Este tipo de análise é semelhante às análises harmônicas encontradas em livros texto de música.

O Aho descreve o papel que os acordes desempenham nas cadências em três níveis de abstração; o nível de grau (I, IIm, IV, V7, etc.), o nível de sub-função (T, Tr,

S, Sr, D, etc.) e o nível de sub-função. Neste ponto, o Aho vai um pouco além, pois o que vemos geralmente nos livros de música é a classificação dos acordes no nível de grau.

O trabalho do Aho se apóia na identificação das cadências que ocorrem em uma peça musical. Para fazer isto, formalizamos o conceito de cadência musical utilizando gramáticas livres de contexto. Utilizando estas gramáticas para reconhecer cadências simples e aplicando o conceito de encadeamento de cadências musicais, onde o último acorde de uma cadência pode ser o início da cadência seguinte, conseguimos reconhecer cadências musicais mais complexas. Chamamos estas de cadências compostas.

O Aho parte da identificação da tonalidade das cadências e chega à conclusão sobre a tonalidade das músicas. Para isto extrai da seqüência de acordes uma lista de tonalidades possíveis para a peça. A seqüência de acordes é, então, analisada considerando isoladamente cada uma das tonalidades possíveis. Após a análise da seqüência de acordes considerando cada tonalidade possível, produzimos como saída a melhor estrutura cadencial gerada, assim como sua tonalidade.

1.2 Relevância da solução

O nível de detalhamento de sua análise harmônica torna o Aho uma importante fonte de consulta e ferramenta para complementar as ferramentas de ensino dos estudantes de música. Para o estudante iniciante e intermediário, o Aho se torna um aliado importante no processo de aprendizado.

Para o estudante avançado, ele pode auxiliar realizando uma análise inicial ou identificando cadências e equivalências entre acordes menos usuais, ou ainda, indicando as tonalidades mais plausíveis para uma peça e apontando trechos de modulação.

1.3 Trabalhos relacionados

Alguns trabalhos foram desenvolvidos na área de análise harmônica, entre eles está o de Mark Steedman.

Steedman publicou dois artigos importantes na área de análise harmônica usando gramáticas, Steedman 1984 e Steedman 1996, ambos desenvolvidos para a análise específica do blues tradicional de doze compassos e suas variantes no jazz.

No primeiro trabalho, o autor desenvolve uma gramática sensível a contexto para reconhecer cadências em uma seqüência de acordes em de doze compassos.

No segundo trabalho, o objetivo continua o mesmo, mas o autor vai buscar suporte na teoria musical desenvolvida por Longuet-Higgins [1962a, 1962b]. Além disso, passa a usar outro tipo instrumento formal, as gramáticas categóricas [Ben91].

Capítulo 2

Música e Computação

2.1 Música

A teoria musical é uma tentativa de traduzir a prática musical do compositor e do músico através de regras e idéias. Descreve relativamente bem este fenômeno enquanto serve como uma base para seu desenvolvimento.

O estudo teórico permite, por parte dos músicos, uma maior compreensão das intenções do compositor, e, por parte do compositor, uma maior compreensão da estrutura de suas próprias obras e de outros.

2.1.1 Fundamentos de Teoria Musical

Nesta sessão, falaremos brevemente sobre os tópicos de teoria musical mais relevantes para o trabalho. É necessário ressaltar que com este material pretendemos apenas capacitar um leitor leigo em música a ter uma compreensão do restante do texto.

2.1.1.1 Escala

Escala musicais são conjuntos de notas. Existem dois grupos de escalas musicais utilizadas de forma legítima na música tonal; As escalas maiores e as escalas menores. As escalas menores são divididas em 3 categorias, as escalas menores naturais, harmônicas e melódicas.

Cada escala tem uma nota fundamental chamada de tônica. Outras notas que merecem atenção são a terça, que define o modo da escala (menor ou maior), a quinta, bastante utilizada nos acordes e a sensível, que provoca o efeito de conclusão característico da música tonal.

Todas as escalas de uma mesma categoria seguem o mesmo padrão de espaçamento entre as notas.

Vemos abaixo a escala de Dó maior, composta pelas notas Dó, Ré, Mi, Fá, Sol, Lá e Si.



Figura 2.1: Escala de Dó maior

2.1.1.2 Acorde

Quando três ou mais notas são tocadas simultaneamente ou num curto intervalo de tempo dizemos que estas notas formam um acorde.

A estrutura de um acorde contém as seguintes componentes,

- Raiz é a nota principal do acorde, também chamada “tônica do acorde”
- Modo, classificação do acorde em “maior ou menor”. É definido pela presença do intervalo de terça.
- Notas adicionais.

No contexto da harmonia tonal um acorde é definido como uma combinação simultânea de três notas, dispostas, inicialmente sob a forma duma superposição de terças. A estrutura de um acorde corresponde em termos gerais aos sons ‘harmônicos’.

O termo acorde, significando um conjunto de notas simultâneas, surgiu apenas a partir do século XVI.

2.1.1.3 Cifra

A cifra é uma notação utilizada para representar os acordes.

Nas cifras indicamos a nota fundamental ou raiz do acorde através das letras **A, B, C, D, E, F, G**, que significam respectivamente Lá, Si, Dó, Ré, Mi, Fá, Sol. A nota fundamental do acorde pode ser alterada por algum acidente (bemol ‘b’, sustenido ‘#’, dobrado bemol ‘bb’ ou dobrado sustenido ‘##’). Nestes casos indicamos o acidente após a letra que representa a nota.

O modo dos acordes é representado nas cifras da seguinte forma: se um acorde é menor, colocamos um ‘m’ após a letra que representa a raiz, caso contrário, isto é, se o acorde for maior, nenhum símbolo é adicionado na cifra.

Os acordes diminutos são reconhecidos nas cifras pela presença do símbolo ‘°’ localizado após a raiz do acorde.

As demais notas do acorde são representadas pelo número que indica o intervalo que elas mantêm com a raiz do acorde. Em todos os casos exceto no caso do intervalo de sétima, supomos que o intervalo indicado pelo número é maior, por exemplo, **C9** seria lido como Dó maior com **nona maior**. No caso da sétima, supomos que o intervalo é menor, **C7** é Dó com **sétima menor**. Para representar o acorde de Dó com sétima maior utilizamos a seguinte notação: **C7M**.

Neste trabalho, usaremos negrito para indicar as cifras.

Tabela 2.1: Cifras para os acordes mais comuns

Cifra	Descrição
C	Dó maior
D	Ré maior
Cm	Dó menor
C°	Dó diminuto
C7	Dó com sétima menor, ou apenas Dó com sétima.
C7M	Dó com sétima maior
C79	Dó com sétima e nona
Cm(5b)7	Dó semi-diminuto

2.1.1.4 Harmonia

A harmonia juntamente com o ritmo, a melodia e o timbre, são os quatro componentes da música. A harmonia está ligada à utilização intencional de notas simultâneas. É considerado como o aspecto "vertical" da música, sendo a melodia, o aspecto "horizontal".

A palavra harmonia vem do grego ἁρμονία *armonía*, que significa arranjo, ajuste e se refere mais precisamente à maneira de se afinar a lira. As acepções do termo podem variar desde o mais amplo, ‘estudo dos componentes simultâneos em música’, até o mais estrito ‘ciência dos acordes’.

A harmonia não é uma teoria estática para a classificação dos acordes (selon certaines règles), sejam naturais ou artificiais, fundadas sobre a educação do ouvido ou sobre o gosto de uma época. É também o estudo do encadeamento dos acordes.

2.1.1.5 Cadência

Este termo vem do italiano *cadenza* — **queda** —, que se deriva do verbo *cadere* que significa **cair**.

Na música ocidental, uma **cadência** é uma sucessão de acordes que dão forma a uma peça musical. Em particular, para a música clássica, pode-se usar o termo cadência para designar uma fórmula melódica e harmônica que tem a função de concluir uma peça, ou pelo menos, uma frase musical. A estrutura de uma cadência determina certos efeitos ligados às relações existentes entre os acordes — Tanto notas musicais quanto acordes tendem a ser atraídos uns pelos outros, seja por razões de consonância ou de dissonâncias. O resultado de uma cadência pode também ser determinado por causas culturais, quer dizer, pelos tipos de música aos quais os ouvintes estão habituados.

2.1.1.6 Tonalidade

Padrão de organização dos acordes, induzido pelas escalas. Ou seja, é um padrão de harmonia. Em [Che84] encontramos a seguinte definição:

“Sistema de sons, produto não da natureza mas de convenção existente em tempos e países diferentes. Padrão de notas que fornece material básico para a construção de músicas convencionais”.

O princípio básico do tonalismo pode ser expresso no exigente requerimento a seguir:

Todos os eventos que ocorrem em uma música devem ser relacionados e coordenados por um ponto central de referência, a tônica – uma nota destacada entre as demais que formam o sistema.

Outra base deste sistema é o princípio de “tensão-relaxamento” que se encontra embutido na cadência perfeita, ou seja, a sucessão de um acorde carregado de tensão seguido de um acorde estável.

2.1.2 Análise Musical

A análise musical é o melhor caminho para a elaboração e exploração das interpretações musicais. Os intérpretes que conhecem e praticam a análise se tornam aptos a encontrar e transmitir a riqueza musical embutida nas grandes obras da literatura musical.

- I. Pesquisa Pré-eliminar
- II. Audição
- III. Identificação de Motivos e Temas
- IV. Análise Harmônica
- V. Análise da Estrutura Frasal
- VI. Identificação das Divisões Formais (Modulações)
- VII. Discussão Geral sobre a Peça e seu Papel na Literatura Musical

2.1.3 Análise Harmônica

É o estudo das relações entre os acordes através das quais são definidas as cadências. É também o estudo das relações entre as cadências através das quais é definida a tonalidade de uma peça musical.

Revela-se útil tanto para o profissional de música, seja instrumentista ou compositor, como também para o ouvinte consciente, pois contribui para a compreensão profunda de uma obra musical.

The image shows a musical score for the first movement of Beethoven's First Symphony. The score is for Violino I, Violino II, Viola, and Violoncello e Bassu. Above the staves, the chord sequence C7 F G7 Am D7 G Em G C is indicated. The tempo is marked 'Adagio molto' and the dynamics range from piano (p) to fortissimo (ff).

Figura 2.2: Beethoven. Extrato da Primeira Sinfonia em Dó Maior.

Do exemplo acima extraímos a seguinte seqüência de acordes, **C7 F G7 Am D7 G Em G C**. A análise harmônica para esse trecho é a seguinte:

Em acordes:

[C7 F G7 Am]

[D7 G]

[G Em]

[Em G C]

Em graus:

[I⁷, IV, V⁷, VIIm]

[V⁷, I]

[V, IIIIm]

[IIIIm, V, I]

Em sub-funções:

[T, S, D, Tr]

[D, T]

[D, Ta]

[Ta, D, T]

Em funções:

[T, S, D, T]

[D, T]

[D, T]

[T, D, T]

A partir da estrutura das cadências identificadas, concluí-se que a tonalidade global do trecho é Dó maior.

2.1.4 O Problema das Substituições Funcionais

A substituição funcional acontece quando um acorde substitui outro e cumpre a função harmônica do substituído. Naturalmente tal função harmônica só será exercida a contento se os acordes a serem cambiados possuírem suficientes elementos constitutivos em comum.

Observe que se trata de uma substituição sintática (nome do acorde), porém mantendo-se o significado (som) intacto. Como o som é o mesmo, também o é a função harmônica.

O SubV7

O acorde maior sobre o segundo grau abaixado, quando acrescido da sétima menor, pode desempenhar a função de dominante. Neste caso chama-se substituto da dominante e é cifrado assim: SubV7.

Como a função de dominante é desempenhada originalmente pelo quinto grau com sétima menor, a substituição será então, SubV7 no lugar do V7.

O fundamento para a aceitação desta substituição é o fato de que este acorde possui em sua constituição notas musicais que correspondem, em frequência sonora, a notas musicais que compõem a dominante. Notadamente a terça, a sétima menor e a quinta diminuta.

Por exemplo, em dó maior:

The diagram illustrates the functional equivalence between the dominant chord D7 and its substitute G7(b5)/Db7 in the key of G major. The D7 chord is shown with its notes: D (tonica), F# (terça), A (quinta), and C (sétima menor). The G7(b5)/Db7 chord is shown with its notes: G (tonica), Bb (terça), D (quinta diminuta), and F (sétima). Lines connect the notes of the D7 chord to their counterparts in the G7(b5)/Db7 chord, highlighting the shared intervals of the third, diminished fifth, and minor seventh.

Figura 2.3: Substituto da dominante com quinta diminuta [SubV⁷] em dó maior.

O acorde montado sobre o segundo grau abaixado e com sétima menor é “Ré bemol com sétima”, **Dbm7**, composto pelas notas ré bemol (db), fá (f) e dó bemol (cb).

O acorde substituído corresponde ao quinto grau e seria “Sol com sétima e quinta diminuta”, $G7^5b$, composto pelas notas sol (g), si (b), ré (d**) e fá (f).**

Assim, em termos de som percebido pelo ouvido, estes dois acordes diferem apenas pela ausência de uma nota, a tônica do acorde substituído, o que não é suficiente para abalar a legitimidade da substituição. Lembrando que, do ponto de vista do acorde substituído, as notas em comum são a terça, a sétima e a quinta diminuída, ou seja, exatamente os pigmentos que lhe dão a “cor dominante”. Podemos então dizer que, apesar do quinto grau não estar nominalmente presente, a função harmônica “de dominante” está bem representada.

A Sexta Napolitana SubIVm/6

O acorde maior sobre o segundo grau abaixado, quando acrescido da sétima maior, pode desempenhar a função de sub-dominante. Neste caso chama-se substituto da subdominante e é cifrado assim: SubIVm/6.

Como a função de sub-dominante é desempenhada originalmente pelo quarto grau menor, a substituição será então, SubIVm no lugar do IVm/6.

O fundamento para a aceitação desta substituição é o fato de que este acorde possui em sua constituição notas que correspondem, em frequência sonora, a notas que compõem a sub-dominante. Notadamente a tônica, a terça, a quinta e, no baixo, a sexta menor.

Tal prática foi comum na música do compositor alemão Johan Sebastian Bach (1650-1756) e ficou conhecida como sexta napolitana.

Por exemplo, em lá menor:

B \flat 7maj⁷ Dm/B \flat

terça tônica

sétima maior quinta

quinta terça

tônica sexta

Figura 2.4: Substituto da sub-dominante com sexta [SubIVm⁶] em lá menor.

O acorde montado sobre o segundo grau abaixado e com sétima maior é “Si bemol com sétima”, $Bb7^M$, composto pelas notas si bemol (b**b**), re (d), fá (f), la (a).

O acorde que está sendo substituído corresponde ao quarto grau e seria “Ré menor com sexta no baixo”, $Dm/6$, é composto pelas notas re (d), fá (f), la (a) e si bemol (b**b**).

Assim, em termos do som percebido pelo ouvido, estes dois acordes não diferem em nenhuma nota², o que é suficiente para legitimar a substituição de um pelo outro. Lembrando que, do ponto de vista do acorde substituído, temos uma inversão, pois a sexta menor (si bemol) estaria no baixo. Podemos então dizer que, apesar do quarto grau menor não estar nominalmente presente, a função harmônica “de sub-dominante” está bem representada.

SubIVm^{9M} (em tons menores)

O acorde maior sobre o sexto grau (abaixado nas escalas menores harmônica e natural), quando acrescido da sétima maior, pode desempenhar a função de sub-dominante menor. Neste caso chama-se substituto da subdominante e é cifrado assim: SubIVm^{9M}.

Como a função de sub-dominante é desempenhada originalmente pelo quarto grau menor, a substituição será então, bVI^{7M} no lugar do IVm^{9M}.

O fundamento para a aceitação desta substituição é o fato de que este acorde possui em sua constituição notas que correspondem, em frequência sonora, a notas (sons) que compõem a sub-dominante. Notadamente a tônica, a terça, a quinta e, no baixo, a sexta menor.

Por exemplo, em lá menor:

Figura 2.5: Substituto da sub-dominante com sexta [SubIVm^{9M}] em lá menor.

O acorde montado sobre o sexto grau abaixado e com sétima maior é “Lá bemol com sétima”, Ab^{7M}, composto pelas notas lá bemol (ab), mi bemol (eb), sol (g) e dó (c).

O acorde que está sendo substituído corresponde ao quarto grau e seria “Fá menor com nona maior”, Fm^{9M}, é composto exatamente pelas mesmas notas lá bemol (ab), mi bemol (eb), sol (g) e dó (c).

Assim, em termos do som percebido pelo ouvido, estes dois acordes não diferem em nenhuma nota, o que é suficiente para legitimar a substituição de um pelo outro. Lembrando que, do ponto de vista do acorde substituído, temos uma inversão, pois a terça menor (lá bemol) estaria no baixo. Podemos então dizer que, apesar do quarto grau

² A única diferença é que o substituto está em posição invertida enquanto o substituído estaria em posição normal.

menor não estar nominalmente presente, a função harmônica “de sub-dominante menor” está bem representada.

O SubV79 / 5

O acorde sobre o segundo grau, quando acrescido da sexta maior, pode desempenhar a função de dominante. Neste caso chama-se substituto da dominante e é cifrado assim: SubV79/5.

Como a função de dominante é desempenhada originalmente pelo quinto grau com sétima menor, a substituição será então, SubV79/5 no lugar do V7.

O fundamento para a aceitação desta substituição é o fato de que este acorde possui em sua constituição notas que correspondem, em frequência sonora, a notas que compõem a dominante. Notadamente a terça, a sétima menor e a quinta diminuta.

Por exemplo, em dó maior:

The diagram shows two chords on a treble clef staff. The first chord is D7, with notes D (tônica), F (sétima menor), A (terça), and C (quinta diminuta). The second chord is G7(b5)/Db, with notes G (tônica), Bb (sétima), D (terça), and Fb (quinta diminuta). Lines connect the labels to the corresponding notes on the staff.

Figura 2.6: Substituto da dominante com quinta diminuta [SubV⁷] em dó maior.

O segundo grau abaixado e com sétima menor é “Ré bemol com sétima”, Dbm7, composto pelas notas Ré bemol (db), fá (f), Lá bemol (ab) e do bemol (cb).

O acorde substituído é o quinto grau é “Sol com sétima e nona menor”, G79b, é composto pelas notas sol (g), si (b), Ré (d) e Fá (f) e Lá bemol (ab).

Assim, em termos do som percebido pelo ouvido, estes dois acordes diferem apenas por uma nota, o que é suficiente para legitimar a substituição de um pelo outro. Lembrando que, do ponto de vista do acorde substituído, as notas em comum são a terça, a sétima e a nona menor, ou seja, exatamente os pigmentos que lhe dão a “cor dominante”. Podemos então dizer que, apesar do quinto grau não estar presente, a função harmônica “de dominante” está bem representada.

2.1.5 O Problema do Empréstimo Modal

Apesar de ter uma definição não ambígua, percebemos que o uso do empréstimo modal como elemento explanador em harmonia tem sido indiscriminado, como se na impossibilidade de determinar uma função harmônica lança-se mão do empréstimo modal como último recurso salvador. Algo como o coringa em um jogo de cartas.

A harmonia é determinada pela tonalidade, os acordes de uma peça musical são montados, escolhidos e dispostos a partir de um centro tonal. São as notas da escala associada à tonalidade que fornecem o material a ser usado na harmonização. Por exemplo, a tonalidade de dó maior está associada à escala de dó maior que fornece as notas com as quais se montam os acordes apropriados.

O empréstimo tonal é então a utilização de um acorde cujo modo do acorde não corresponde ao esperado na tonalidade em que está inserido. Porém ele será aceito sob a alegação de que se está pedindo emprestado o modo que este acorde teria em uma escala modal.

Em música o **modo** é um esquema de sucessão de intervalos empregados em uma composição. Na atual música tonal do ocidente, são usados dois modos: o **modo maior** e o **modo menor**. Porém nem sempre é assim. Basta citarmos os modos eclesiásticos usados até o começo do século XVIII, ou os modos usados no rock ou em diversos tipos de músicas populares como a do nordeste do Brasil.

Empréstimo do modo Lídio

Nas tonalidades maiores o segundo grau é menor enquanto no modo lídio o segundo grau é maior. Portanto ao encontrarmos o segundo grau 'maiorizado' em uma tonalidade maior, diremos que isto se deve a um empréstimo que a tonalidade maior faz à harmonia modal lídia.

Exemplo em Fá maior.

[Acorde sobre o 2º Grau – Gm]

Tern Fá Maior

Figura 2.7: Escala de Fá Maior e correspondente acorde sobre o II Grau, Gm.

Exemplo H. Escala de Dó Menor e correspondente acorde sobre o IV Grau, Fm.

O acorde montado sobre o Quarto Grau da escala de Dó Menor é composto pelas notas fá, lá **bemol** e dó e se chama Sol menor (**Fm**).

[Acorde sobre o 4º Grau = Fm]

Escala de Dó Menor (armônica)

Figura 2.10: Modo de Dó Dórico e correspondente acorde sobre o IV Grau, F.

[Acorde sobre o 4º Grau = F]

Modo Dó Dórico

Figura 2.11: Modo de Dó Dórico e correspondente acorde sobre o IV Grau, F.

Enquanto que no modo dórico a partir da nota dó, o acorde correspondente é Fá maior (**F**). Pois o acorde montado sobre o Quarto Grau do modo Dó Dórico é composto pelas notas fá, lá **natural** e dó e se chama Fá maior (**F**).

O “empréstimo modal” neste caso seria usar o quarto grau do modo lídio (**F**) no lugar do quarto da escala maior (**Fm**).

2.2 Computação e Música

A atividade computacional, como em quase todas as áreas, infiltrou-se também no mundo da música. Programas são atualmente utilizados para vários fins; treinamento auditivo, escrita de partituras, edição de áudio, etc. A título de exemplo podemos citar que, hoje, os dispositivos de gravação e até as mesas de controle de gravação foram substituídas por microcomputadores.

Na área específica de análise harmônica, alguns trabalhos foram desenvolvidos. Estes trabalhos se dividem em duas vertentes; os que utilizam uma abordagem lingüística, ou seja, são baseados em gramáticas, e os que adotam um caráter mais procedural. Para representar o primeiro grupo, estudaremos o trabalho de Mark Steedman. Nosso representante do segundo grupo será David Temperley.

2.2.1 Mark Steedman

Mark Steedman desenvolveu dois trabalhos na área de análise harmônica utilizando gramáticas. Ambos se restringem à análise de cadências de jazz. No primeiro, Steedman 1984, o autor utiliza uma gramática sensível a contexto para reconhecer seqüências de acordes de jazz. No segundo, Steedman 1996, há uma mudança de posicionamento teórico do autor, que passa a considerar a abordagem musical proposta por Longuet-Higgins. Além disso, deixa de lado as gramáticas livres de contexto para utilizar gramáticas categóricas (Categorical grammars).

Steedman 1984

Neste trabalho Steedman apresenta uma gramática sensível a contexto para reconhecer seqüências de acordes de 12-bar jazz.

0.		<i>12bar</i>	→	<i>I I7</i>	<i>IV I</i>	<i>V7 I</i>
1.		$X(m)(7)$	→	$X(m)$	$X(m)(7)$	
2.		$X(m)$	→	$X(m)$	IV_X	
3a.	<i>W</i>	$X7$	→	$V_X(m)7$	$X7$	
3b.	<i>W</i>	$Xm7$	→	V_X7	$xm7$	
4.		V_X7	$X(m)(7)$	→	$\flat II_X(m)(7)$	$X(m)(7)$
5.	<i>X</i>	<i>X</i>	<i>X</i>	→	<i>X</i>	$II_X m$ $III_X m$
6a.	$X(m)$	$X(m)$	V_X	→	$X(m)$	$\sharp X \circ 7$ V_X
6b.	$X(m)$	$X(m)$	$II_X m7$	→	$X(m)$	$\sharp X \circ 7$ $II_X m7$
6c.	$X(m)$	$X(m)$	$VII_X m7$	→	$X(m)$	$\sharp X \circ 7$ $VII_X m7$
7a.		<i>X</i>	→	$\{X(M7), X(7'), X9, X13\}$		
7b.		$X7$	→	$\{X\flat 9, X\flat 10, X7 + 5\}$		
7c.		Xm	→	$\{Xm(7'), Xm6\}$		
7d.		$Xm7$	→	$\{Xm9, X\phi 7\}$		

Figura 2.12: Gramática proposta em Steedman 1984, extraída de Steedman 1996

As derivações desta gramática sempre partem da regra 0, que define a estrutura harmônica trivial para os 12 compassos como tônica, tônica com sétima menor seguida de uma cadência plagal e finalizada com a cadência dominante – tônica.

Por exemplo, se utilizarmos Dó maior como referência, obtemos a seguinte seqüência utilizando a regra 0: **C C7 F C G C**

As demais seqüências são obtidas a partir desta utilizando as demais regras.

As regras 3a e 3b merecem uma atenção especial. A regra 3a permite que troquemos qualquer acorde W que precede um acorde maior com sétima menor (sétima dominante), X7, pelo acorde dominante de X com sétima menor, Vx7 ou pelo acorde dominante com sétima menorizado, Vxm7. A regra 3b faz um trabalho semelhante para acordes menores com sétima menor, Xm7. Esta regra, porém, só permite a troca pelo acorde dominante com sétima menor, Vx7. A utilização destas regras sofre a restrição de que W não pode ter sido alterado anteriormente por nenhuma outra regra.

a.	$I(M7)$	$IV(7')$	$I(M7)$	$I7$	$IV(7')$	$IV(7')$	$I(M7)$	$I(M7)$	$V7$	$V7$	$I(M7)$	$I(M7)$
a'.	$I(M7)$	$IV(7')$	$I(M7)$	$I7$	$IV(7')$	$IV(7')$	$I(M7)$	$I(M7)$	$III7$	$V7$	$I(M7)$	$I(M7)$
a''.	$I(M7)$	$IV(7')$	$I(M7)$	$I7$	$IV(7')$	$IV(7')$	$I(M7)$	$VI7$	$III7$	$V7$	$I(M7)$	$I(M7)$
a'''.	$I(M7)$	$IV(7')$	$I(M7)$	$I7$	$IV(7')$	$IV(7')$	$III7$	$VI7$	$III7$	$V7$	$I(M7)$	$I(M7)$

.....
etc.

Figura 2.13: Aplicação sucessiva das regras 3a e 3b, extraída de Steedman 1996

Steedman 1996

Em seu segundo trabalho sobre este assunto, Steedman abandona as gramáticas sensíveis a contexto e passa a utilizar gramáticas categóricas (Categorical grammars) [Ben91]. Ele pretende com isso produzir uma gramática que represente mais diretamente os conceitos musicais, principalmente aqueles extraídos de Longuet-Higgins (1962a, 1962b).

Na figura abaixo, são listadas as regras que atribuem as categorias gramaticais aos acordes.

- (1). $X(m) := \frac{X(m)(7)/X(m)(7)}{X(m)}$
- (2). $X(m) := \frac{X(m)/IV_X}{X(m)}$
- (3a.) $Xm7 := \frac{Xm7/IV_X(7)}{X(m)}$
- (3b.) $X7 := \frac{X7/IV_X(m)(7)}{X(m)}$
- (4). $X(m)7 := \frac{\sharp IV_X(m)7/VII_X(m)(7)}{X(m)}$
- (5). $X := \frac{(X/III_X m)/II_X m}{X(m)}$
- (6). $X \circ 7 := \frac{\flat V_X / \flat V_X}{\flat II_X / \flat II_X}$
 $\quad \quad \quad \flat VII_X m 7 / \flat VII_X m 7$

Figura 2.14: Gramática categórica extraída de Steedman 1996

A próxima figura traz as regras básicas utilizadas nas derivações feitas utilizando as categorias.

- a. $X/Y \quad Y \Rightarrow X$
- b. $Y \quad X \setminus Y \Rightarrow X$

Figura 2.15: Regras de derivação básicas, extraídas de Steedman 1996

A regra **a.** é utilizada para eliminações à esquerda e é representada, nas derivações, pelo símbolo ‘>’. A regra **b.** é utilizada para eliminações à direita e é representada pelo símbolo ‘<’.

Para conseguir derivações mais completas, Steedman adicionou algumas regras de derivação a seu repertório.

- $X/Y \quad Y/Z \Rightarrow_B X/Z$
- $X \Rightarrow C(X) \setminus (Y \setminus X)$
- $X \Rightarrow X/X$

Figura 2.16: Regras adicionais de derivação, extraídas de Steedman 1996

A primeira regra permite composições entre as categorias. A segunda introduz o conceito de cadência não inicial, dando explicitamente ao acorde X a categoria de cadência não inicial. A terceira regra permite que seqüências de acordes X repetidos possam ser agrupadas em um só X.

Vemos abaixo a derivação de uma seqüência de acordes apresentada em Steedman 1996.

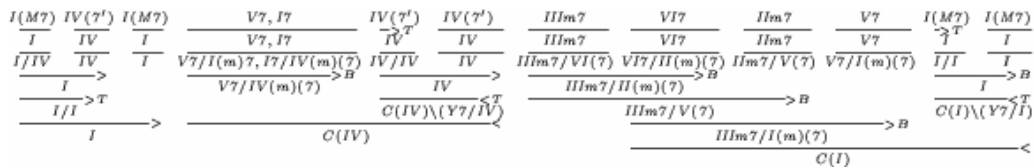


Figura 2.17: Derivação, extraídas de Steedman 1996

Vemos aqui na verdade três arvores de derivação, uma terminando em I, outra em C(IV) e a última terminando em C(I).

2.2.2 David Temperley

David Temperley, em seu livro *The Cognition of Basic Musical Structures*, desenvolve métodos computacionais para determinar as que, segundo ele, são as estruturas básicas de uma peça musical. Temperley pretende que estes métodos possam ser utilizados como sugestões para como pessoas percebem estas estruturas.

Os métodos computacionais desenvolvidos por Temperley não contemplam todos os tipos de música, eles foram desenvolvidos tendo em vista a música clássica dos séculos 18 e 19, também chamada de música tonal tradicional. Segundo Temperley, a musica tonal foi escolhida por três motivos: a familiaridade que ele tem com musica

tonal, o desenvolvimento teórico e experimental sem paralelo feito na área e o grande número de obras musicais tonais escritas em notação musical.

As estruturas musicais abordadas por Temperley são: métrica, melodia, contraponto, nomeação das notas, harmonia e tom. Dentre estas, harmonia e tom terão destaque nesta dissertação.

Em geral, a entrada de dados para seus algoritmos é um conjunto de notas representadas por números inteiros (por exemplo, C central=60), o tempo de início e de fim destas notas. Este tipo de informação pode ser extraída facilmente de arquivos MIDI.

Os métodos desenvolvidos são baseados em *preference rules*. *preference rules* são critérios de avaliação de uma determinada entrada e são utilizadas como guia para a confecção do programa. Ao serem implementadas, cada uma destas regras atribui um escore numérico para uma entrada, geralmente um segmento de uma peça.

Um segmento de uma peça pode ser analisado de várias formas. A análise de uma peça inteira consiste da combinação da análise dos segmentos desta peça. Para cada possível análise de um segmento, cada regra gera um escore. O escore para a análise de um segmento é a soma dos escores dados pelas regras. O escore para a análise da peça é a soma dos escores obtidos pelos segmentos. A análise preferida para a peça é aquela que obtém o maior escore.

O valor numérico que uma *preference rule* atribui a uma análise é estipulado empiricamente.

Classes de notas (*pitch-classes*):

Como dito acima, a entrada para os algoritmos é um conjunto de notas representadas por números inteiros (por exemplo dó central=60), o tempo de início e de fim destas.

De acordo com esta entrada, um inteiro que representa uma nota musical identifica uma nota em dois aspectos, a nota em si e a altura na qual ela é tocada. A informação sobre a altura, apesar de importante em muitos casos, não é levada em conta nas análises sobre nomeação, harmonia e tom. Assim, as notas da entrada são agrupadas em classes. Estas classes são identificadas por letras:

A = classe das notas lá
 B = classe das notas si
 C = classe das notas dó
 D = classe das notas ré
 E = classe das notas mi
 F = classe das notas fá
 G = classe das notas sol

Por exemplo, todos os C, não importando em que altura foram tocados, pertencerão à classe C.

Classe Tonal de Notas – TPC (*tonal pitch-classes*):

Na música tonal, temos 12 sons que podem ser tocados em várias alturas. Porém um som pode receber mais de um nome. Esta nomeação depende do contexto no qual a nota está inserida. Por exemplo, o som identificado pelo inteiro 61 pode ser nomeado de ré bemol ou dó sustenido dependendo do contexto. Para representar este fato, as notas serão agrupadas em classes tonais. Temos então para o inteiro 61 as possíveis classes tonais C# e Db e para o inteiro 60 teremos B##, C e Dbb. As classes tonais também são representadas por inteiros.

Linha das quintas:

Um recurso muito utilizado por Temperley é a linha das quintas. A linha das quintas é uma seqüência de classes tonais de notas:

...Fx—B#—E#—A#—D#—G#—C#—F#—B—E—A—D—G—C—F—Bb—Eb—Ab—Db—Gb—Cb—Fb—Bbb...
--

Figura 2.18: Linha das quintas.

A origem desta seqüência está na formação das escalas maiores e a numeração das classes tonais é feita tendo ela como base; C = 1, G = 2, D=3....

Nomeação de notas:

A nomeação das notas nada mais é do que encontrar sua correta classe tonal. A idéia básica utilizada por Temperley é que as notas devem preferencialmente ser nomeadas de forma que suas representações fiquem mais próximas na linha das quintas. Além desta diretriz, ele cria uma regra especial para notas adjacentes e uma outra que considera a harmonia. Para utilizar a análise harmônica, se faz necessário um pré-processamento da entrada para determinar aonde ocorrem as batidas fortes na peça. Isto é feito pelo módulo que analisa a estrutura métrica.

Preference rules para nomeação de notas:

1 – Regra da variância (*pitch variance rule*): Prefira nomear as notas de forma que suas representações fiquem mais próximas na linha das quintas.

Para implementar esta regra, é definido o conceito de “centro de gravidade de TPCs”. É dito que toda representação TCP tem um centro de gravidade (COG), uma posição média da representação das notas na linha das quintas. Deve ser preferida a nomeação que resulta num menor distanciamento do centro de gravidade. O COG é constantemente atualizado. O COG em um determinado momento é a média ponderada das representações escolhidas para as notas com o peso maior para eventos recentes.

2 – Regra (*Voice-leading rule*): Dados dois eventos adjacentes no tempo e a distância de um semi-tom, se o primeiro evento for distante do centro de gravidade, ele deve ser nomeado de forma que fique a cinco passos de distância do segundo na linha das quintas.

3 – Regra da harmonia (*Harmonic feedback rule*): Prefira nomear notas de forma que gerem uma “boa representação harmônica”.

Esta terceira regra se refere diretamente a harmonia. De fato, o algoritmo de nomeação utiliza o de harmonia para avaliar conjuntos de **representações notas**. Desta forma, a entrada para o algoritmo de harmonia não é um conjunto convencional de notas (frequências) mas sim um conjunto de **representações de notas**.

Harmonia:

Como visto acima, método de análise harmônica desenvolvido por Temperley tem como entrada um conjunto de TPCs. Além disso, é feito um pré-processamento para descobrir onde as batidas fortes ocorrem na peça.

Para decidir qual o nome do acorde formado pelas TPCs fornecidas na entrada, cada TPC na linha das quintas é tomada como raiz do acorde e as relações com as TPCs da entrada são medidas, sendo escolhida como raiz a TPC que obtém maior escore. As relações são levadas em consideração na seguinte ordem de prioridade: 1, 5, 3, 3b, 7b, 5b, 9b e ornamentais. Ornamentais são todas as relações excluindo as que foram citadas anteriormente.

Outras regras são estabelecidas levando em consideração as batidas fortes da peça, a relação entre a raiz do acorde analisado e o a raiz do acorde anterior e a escolha de penalidades para notas com relações ornamentais.

1 – Regra de compatibilidade (*Compatibility rule*): Ao escolher raízes para acordes, prefira certas relações na ordem a seguir: 1, 5, 3, 3b, 7b, 5b, 9b e ornamentais.

2 – Regra da batida forte (*Strong beat rule*): Prefira acordes que iniciam em batidas fortes.

3 – Regra da variância harmônica (*Harmonic variance rule*): Prefira raízes que estão próximas às raízes de segmentos vizinhos na linha das quintas.

4 – Regra da dissonância ornamental (*Ornamental dissonance rule*): Uma nota é uma dissonância ornamental se ela apresenta uma relação ornamental com a raiz escolhida. Prefira as dissonâncias ornamentais em que:

- a. São seguidas por uma nota a um tom ou meio tom de distância.
- b. Tem a métrica fraca.

A implementação do método de análise harmônica é feita junto com a implementação do método de nomeação de notas, resultando em um único programa. Para isto, a escolha dos escores das regras, que é feita empiricamente, deve levar em conta a interação entre as regras dos dois modelos.

Capítulo 3

Analizador Harmônico Automático

3.1 Introdução

O objetivo principal do Aho é produzir uma análise harmônica de uma peça musical. O Aho é baseado no conceito musical de cadência harmônica. Esta análise determina a tonalidade da peça e sua estrutura cadencial.

A estrutura cadencial consiste na identificação das cadências que ocorrem na peça e da classificação dos acordes que as compõem. Sendo a aplicação educativa uma das metas desta dissertação, a classificação será apresentada em três níveis de abstração; o de grau, o sub-funcional e o funcional.

O nível de grau corresponde à abstração usual na literatura musical, por exemplo, na tonalidade de Dó maior, o acorde **C** será o primeiro grau (I), o **Dm**, o segundo (II_m), etc.

O nível funcional representa as três funções harmônicas primitivas, que correspondem ao repouso e aos movimentos de aproximação e afastamento do centro da tonalidade, respectivamente tônica (T), dominante (D) e subdominante(S). O nível sub-funcional representa uma especificação mais detalhada da função desempenhada do acorde na cadência. Por exemplo, na tonalidade de Dó maior, os acordes **F** e **Dm** cumprem ambos a função de subdominante, uma vez que representam um afastamento do centro da tonalidade. Porém este afastamento tem características diferentes de um caso para o outro, justificando, portanto, a classificação sub-funcional de subdominante (S) para o **F** e subdominante relativa (Sr) para o **Dm**.

A entrada do Aho é a seqüência de acordes cifrados da peça.

Para fazer a análise harmônica, o Aho segue os seguintes passos:

1. Gera um vetor de tonalidades candidatas para a peça. Estas tonalidades são inferidas examinando os acordes da peça; colocamos no vetor de tonalidades, sem repetições, a tonalidade induzida por cada acorde da peça .
2. Submete cada uma destas tonalidades candidatas a um algoritmo que tem como entrada uma tonalidade global e uma seqüência de acordes, no caso a peça.

Este algoritmo retorna a estrutura cadencial baseada na tonalidade candidata, e um escore que representa o nível de adequação da estrutura cadencial em relação a esta tonalidade.

Para guiar a confecção do programa, formalizamos o conceito de cadência utilizando gramáticas livres de contexto.

3.2 Cadência e Tonalidade

Com fins metodológicos interpretamos uma cadência como composta de duas partes, **corpo** e **cabeça**. Cabeça é o acorde final da cadência, é seu o “destino” harmônico. O Corpo é formado pelos outros acordes que compõe a cadência e que geram a sensação harmônica de movimento na direção da cabeça.

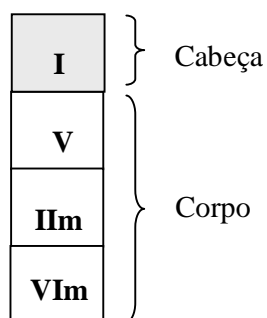


Figura 3.1: Exemplo de uma cadência.

Tal divisão é necessária, pois ao empregarmos as cadências como explicação para a aceitação de acordes não diatônicos em uma harmonia, analisaremos a cabeça e o corpo de maneiras diferentes.

Analisando a forma como uma cadência se inclui em uma harmonia, exigimos que a cabeça seja um acorde diatônico com relação à tonalidade da música estudada. Os acordes do corpo deverão respeitar propriedades da própria cadência que não necessariamente são aquelas da tonalidade da música.

Uma cadência contém sua própria harmonia que pode diferir, em maior ou menor grau, da harmonia global onde a cadência foi identificada.

Considerando como **global** o contexto harmônico de uma peça musical como um todo, chamaremos de **local** o fragmento de harmonia contido em uma cadência.

Acordes diatônicos de uma tonalidade maior.

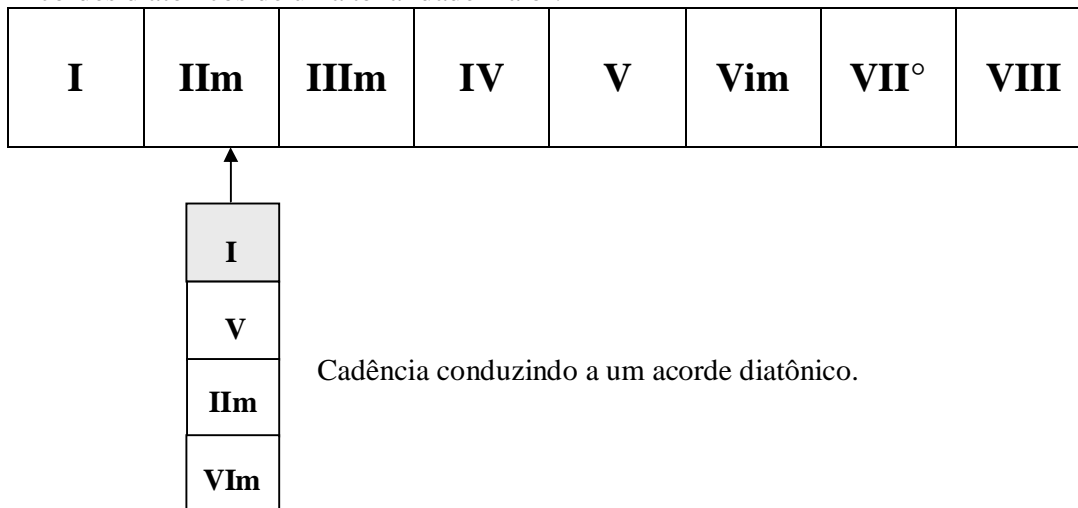


Figura 3.2: Exemplo de uma cadência conduzindo a um acorde diatônico.

É a característica “injetiva” das cadências que nos permite aceitar os acordes que compõem seu corpo como sendo integrantes da tonalidade global, apesar de serem possivelmente não diatônicos.

Imagine como no exemplo acima, que a peça musical se encontra em uma tonalidade maior, e a cadência se dirige para um grau menor da tonalidade principal, digamos o segundo grau. A tonalidade parcial definida pela cadência é menor, pois menor também é sua cabeça (o segundo grau da tonalidade principal).

O acorde cabeça da cadência tem duplo papel, do ponto de vista da tonalidade principal (da música) ele é um segundo grau e do ponto de vista da tonalidade secundária (da cadência) ele é um primeiro grau.

Acordes diatônicos de uma tonalidade maior.

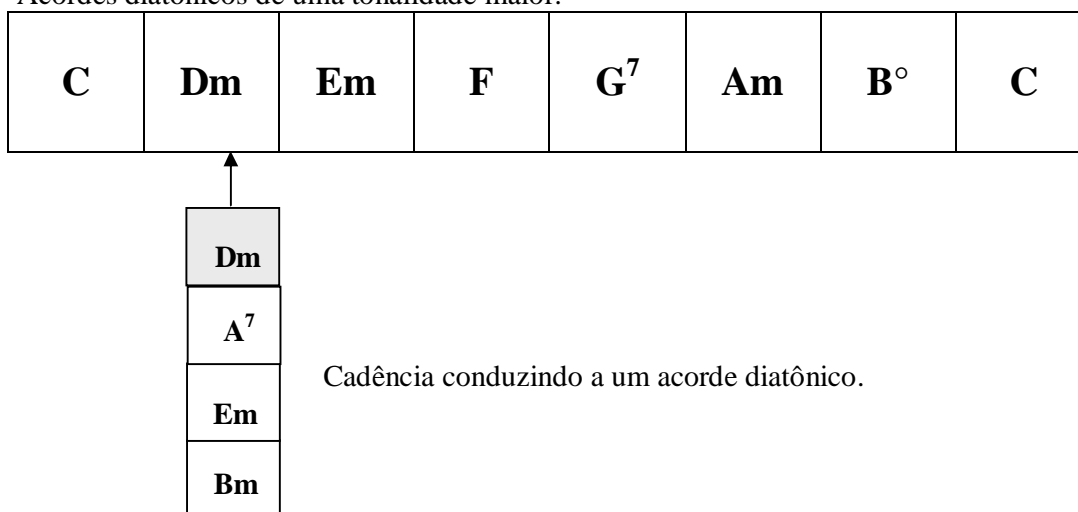
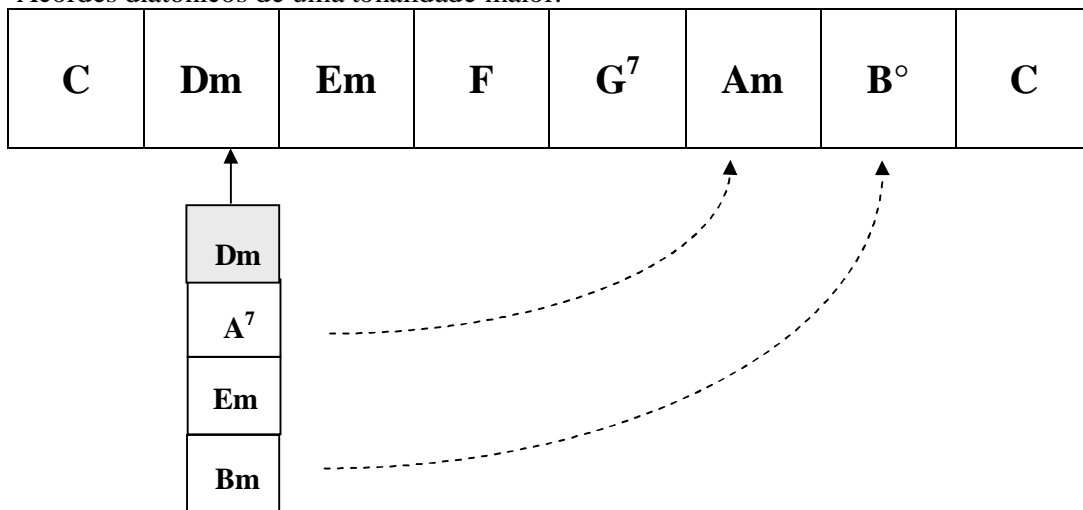


Figura 3.3: Exemplo de uma cadência conduzindo a um acorde diatônico.

Observe que o acorde alvo na tonalidade principal e o acorde cabeça da cadência são o mesmo. Esta é uma condição *sine qua non* para a aceitação da cadência no contexto harmônico.

Veja também que o corpo da cadência se compõe de acordes diatônicos (à tonalidade principal), mas também de acordes não diatônicos:

Acordes diatônicos de uma tonalidade maior.



Acorde não diatônico em uma cadência

Figura 3.4: Exemplo de uma cadência conduzindo a um acorde diatônico.

Música Andança

Autores: Tapajós, Caimi e Souto

Tom: Dó maior

C

Olha a lua mansa se derramar

D⁷

Ao luar descansa meu caminhar

G⁷

Seu olhar em festa se fez feliz

Lembrando a seresta que um dia eu fiz

C

Por onde for quero ser seu par

Analisando os acordes da cadência temos:

Diatônico: O **Em** da cadência que corresponde ao que se espera na tonalidade.

Não Diatônico: O **A⁷** da cadência que difere do esperado na tonalidade, **Am**.
E o **Bm** da cadência que difere do esperado na tonalidade, **B^o**.

Resumindo: Em uma peça musical na tonalidade de Dó maior, podemos encontrar acordes não diatônicos, porém eles podem ser prontamente aceitos no contexto de dó maior caso sejam membros de uma cadência que, por ventura, se esteja conduzindo a um dos acordes diatônicos da peça.

O fenômeno explicado acima pode se sofisticar quando, por exemplo, ele se manifesta não no contexto harmônico geral de uma peça, mas diretamente no corpo de uma cadência. O leitor versado em lógica ou matemática já deve estar se perguntando: “Espere um pouco, Isso define então uma estrutura recursiva, não?”.

Felizmente a resposta é sim. Dizemos felizmente porque, apesar das dificuldades inerentes ao tratamento computacional das estruturas recursivas, conseguimos levar a cabo esta tarefa, como veremos a seguir.

3.3 Formalização do conceito de cadência

Para formalizar o conceito de cadência musical, utilizamos gramáticas livres de contexto. Uma seqüência de acordes é considerada uma cadência quando é reconhecida por uma destas gramáticas.

Construímos uma gramática para cada tonalidade, isto é, para reconhecer as cadências na tonalidade de Dó maior utilizamos uma gramática construída especificamente para esta tonalidade. Temos, assim, uma gramática para a tonalidade de Dó maior, outra para a de Dó menor, uma para a de Ré maior, e assim por diante. Observe que estamos falando da tonalidade interna das cadências, e não da tonalidade da peça musical como um todo. Chamamos a tonalidade interna das cadências de **tonalidade local** e a tonalidade da peça musical como um todo de **tonalidade global**.

Estas gramáticas podem ser divididas em dois grupos, as gramáticas para tonalidades maiores e as gramáticas para as tonalidades menores, ou seja, um grupo para cada modo harmônico.

As gramáticas de grupos diferentes possuem regras bem específicas. Porém, Em um mesmo grupo, existe um conjunto de regras comuns para todas suas gramáticas. As regras que diferem entre as gramáticas de um mesmo grupo são específicas da tonalidade em questão, e não do modo. Assim, criamos uma **proto-gramática** para cada modo, uma proto-gramática maior e outra menor.

Chamamos de proto-gramática um conjunto de regras que não permitem derivações completas, pois não possuem terminais. Estas regras, acrescidas das regras que geram terminais, formam uma gramática.

Obtemos a gramática de uma tonalidade somando suas regras específicas com as regras da proto-gramática que corresponde ao modo. Chamamos este processo de **instanciação gramatical**.

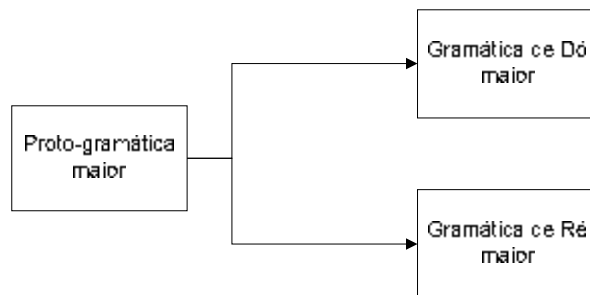


Figura 3.5: Derivações a partir do esqueleto maior.

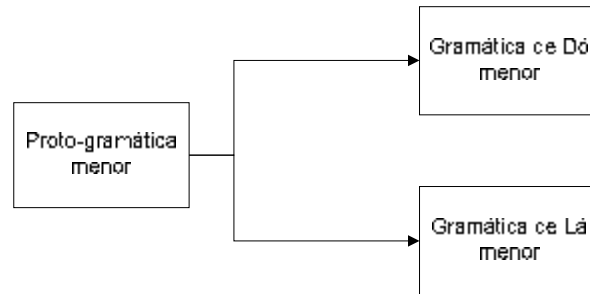


Figura 3.6: Derivações a partir do esqueleto menor.



Figura 3.7: Reconhecimento de uma cadência.

As proto-gramáticas baseiam-se nos conceitos musicais vistos acima, **função harmônica** (T, D, S), **sub-função harmônica** (T, Tr, S, Sr, ...) e **grau** (I, II, III_m, ...).

A tonalidade de uma cadência reconhecida por uma gramática será a tonalidade que deu origem a esta gramática. Chamaremos a tonalidade da cadência de **tonalidade local**, e de **tonalidade global** a tonalidade da peça.

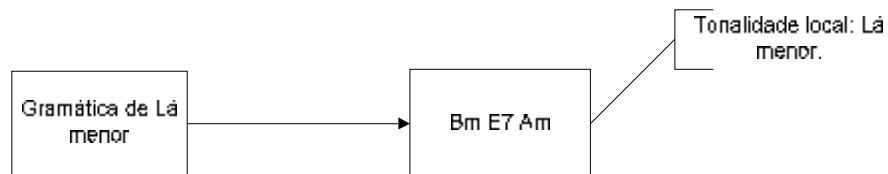


Figura 3.8: Tonalidade local de uma cadência.

Formalmente, uma gramática G é definida através de quatro conjuntos, $\langle A, N, P, S \rangle$ onde:

- A é o alfabeto da linguagem gerada pela gramática. Os símbolos deste alfabeto são chamados de terminais.
- N define o conjunto de símbolos intermediários chamados de não terminais.
- P é o conjunto de regras de re-escrita.
- S é um conjunto unitário cujo elemento é o símbolo inicial das derivações.

Como nossas proto-gramáticas não são construídas com o intuito de se comportarem como gramáticas completas, adaptaremos esta formalização para que possamos defini-las de uma forma mais natural.

Definiremos uma proto-gramática PG usando os conjuntos $\langle P_n, P_p, P_s \rangle$ onde:

- P_n define o conjunto de símbolos utilizados nas proto-gramáticas.
- P_p é o conjunto de regras de re-escrita.
- P_s é um conjunto unitário cujo elemento é o símbolo inicial.

Como foi dito acima, formamos uma gramática completa a partir de uma proto-gramática adicionando a esta regras que geram terminais. Assim, para definir uma gramática G a partir de uma proto-gramática PG precisamos especificar A , ou seja, os terminais da gramática, e um conjunto G_p com as regras específicas da gramática para gerar os terminais. Desta forma temos que $G = \langle A, N, P, S \rangle$ onde:

- A é o alfabeto da gramática
- $N = P_n$ é o conjunto de não terminais
- $P = (P_p \cup G_p)$, conjunto de regras da gramática
- $S = P_s$, conjunto contendo o símbolo inicial.

Utilizamos este mecanismo, definiremos a seguir as proto-gramáticas menor e maior e exemplificaremos a definição de uma gramática para Dó maior a partir da proto-gramática maior.

3.3.1 Proto-gramática maior

Como visto a cima, para definir uma proto-gramática, precisamos definir os conjuntos $\langle P_n, P_p, P_s \rangle$. Para a proto-gramática maior temos:

$$P_n = \{C, T, D, S, X, Maex, T, Tr, Ta, S, Sr, S-blues, Eth, D, Dsemi, SubV7, D^0, D^0-triade, D5a, D79/3, Cdpas, Cdaux, CRock, I, Vim, III_m, IV, II_m, IV7, IV_m, V, VII5d7, II_b7, VI_b6, VII^0, II^0, IV^0, VI_b^0, VII^0-tri, II^0-tri, IV^0-tri, VI_b^0-tri, V5a, V79/3, I^\#, I^0, III_b^0, III_b^0, IV^\#, VI^0, VII_b, II\}$$

$$P_s = \{C\}$$

P_p está descrito abaixo nas tabelas 3.1, 3.2, 3.3, 3.4 e 3.5.

Tabela 3.1

Regras	Descrição
C à T D S D T	Cadência perfeita simétrica
à T T S D T	Cadência perfeita estendida
à T S S D T	Cadência perfeita estendida
à S S D T	Cadência perfeita estendida
à T S D T	Cadência perfeita
à T D S T	Cadência plagal estendida
à T S S T	Cadência plagal estendida
à S D T	Cadência perfeita
à D S T	Cadência plagal estendida
à S S T	Cadência plagal estendida
à T D T	Cadência dominante
à T S T	Cadência plagal
à D T	Cadência dominante
à S T	Cadência plagal

Tabela 3.2

Regras que geram os ‘clichês’ harmônicos:	
C à X	Clichês
à Maex	Mini-anatole estendido

Tabela 3.3

Regras que geram funções harmônicas:

T à T	Tônica
à Tr	Tônica relativa
à Ta	Tônica anti-relativa
S à S	Sub-dominante
à Sr	Sub-dominante relativa
à S-blues	Sub-dominante Blues
à Eth	Sub-dominante de empréstimo modal
D à D	Dominante
à Dsemi	Acorde semi-diminuto dominante
à SubV7	Substituto da dominante (veja capítulo 2)
à D ^o	Acorde diminuto dominante
à D ^o -triade	Acorde diminuto (tríade) dominante
à D5a	Dominante com quinta aumentada
à D79/3	VII Semidiminuto no papel de Dominante com sétima, nona e terça no baixo
X à Cdpas T	Clichê dominante de passagem
à Cdaux T	Clichê dominante auxiliar
à CRock T	Clichê rock Empréstimo Mixolidio

Tabela 3.4

Regras que geram graus:

T à I

Tr à VI_mTa à III_m

S à IV

Sr à II_m

S-blues à IV7

ETh à IV_m

D à V

Dsemi à VII5d7

SubV7 à IIb7

à VI_bm6D⁰ à VII⁰à II⁰à IV⁰à VI_b⁰D⁰-triade à VII⁰-trià II⁰-trià IV⁰-trià VI_b⁰-tri

D5a à V5a

D79/3 à V79/3

Cdpas à I#º

Cdaux à Iº

à IIIbº

à IV#º

à VIº

CRock à VIIb

MAex à II Ilm D T

Tabela 3.5

Regras para cadências interrompidas:

C à TTSD

à TSSD

à SSD

à TSD

à TDS

à SD

Cadência perfeita interrompida

3.3.2 Proto-gramática menor

A definição da proto-gramática menor segue abaixo:

$P_n = \{C, T, D, S, X, Maex, T, Tr, Ta, S, Sr, SubNapT, Semp, SubIV, SubNapS, D Dsemi, SubV7, D^0, D^0\text{-triade}, D6m, Cdpas, Cdaux, CRock, Im, III, VIb, VIsemi, IVm, VIb, IIb, IV, VIb7M, IIm, V, IIb7, VIbm6, VII^0, II^0, IV^0, VIb^0, VII^0\text{-tri}, II^0\text{-tri}, IV^0\text{-tri}, VIb^0\text{-tri}, V6m, I\#^0, I^0, IIIb^0, IIIb^0, IV\#^0, VI^0, II\}$

$P_s = \{C\}$

P_p está descrito abaixo nas tabelas 3.6, 3.7, 3.8, 3.9 e 3.10.

Tabela 3.6

Regras	Descrição
$C \grave{a} T D S D T$	Cadência perfeita simétrica
$\grave{a} T T S D T$	Cadência perfeita estendida
$\grave{a} T S S D T$	Cadência perfeita estendida
$\grave{a} S S D T$	Cadência perfeita estendida
$\grave{a} T S D T$	Cadência perfeita
$\grave{a} T D S T$	Cadência plagal estendida
$\grave{a} T S S T$	Cadência plagal estendida
$\grave{a} S D T$	Cadência perfeita
$\grave{a} D S T$	Cadência plagal estendida
$\grave{a} S S T$	Cadência plagal estendida
$\grave{a} T D T$	Cadência dominante
$\grave{a} T S T$	Cadência plagal

à D T	Cadência dominante
à S T	Cadência plagal

Tabela 3.7

Regras que geram os ‘clichês’ harmônicos:

C à X	Clichês
à Maex	Mini-anatole estendido

Tabela 3.8

Regras que geram funções harmônicas:

T à T	Tônica
à Tr	Tônica relativa
à Ta	Tônica anti-relativa
à SubNapT	Substituto da tônica
S à S	Sub-dominante
à Sr	Sub-dominante relativa
à Sr	Sub-dominante relativa
à Semp	Sub-dominante de empréstimo modal dórico
à SubIV	Substituto da sub-dominante (veja capítulo 2)
à SubNapS	Substituto da sub-dominante conhecido como sexta napolitana. Ilm com sexta no baixo no lugar da sub-dominante.
D à D	Dominante
à Dsemi	Acorde semi-diminuto dominante
à SubV7	Substituto da dominante (veja capítulo 2)
à D°	Acorde diminuto dominante

à D ⁰ -triade	Acorde diminuto (tríade) dominante
à D6m	Dominante com sexta menor
X à Cdpas T	Clichê dominante de passagem
à Cdaux T	Clichê dominante auxiliar

Tabela 3.9

Regras que geram graus:	Os graus se baseiam na escala menor harmônica.
T à Im	
Tr à III	
Ta à VIb	
SubNapT à VI semi	
S à IVm	
Sr à VIb	
Sa à IIb	
Semp à IV	
SubIV à VIb7M	O símbolo b (bemol) foi mantido como na cifragem popular que se baseia sempre na escala maior correspondente. Apesar da notação erudita ele não ser necessário.
SubNapS à IIIm	
D à V	
SubV7 à IIb7	
à VIbm6	
D ^o à VII ^o	
à II ^o	
à IV ^o	
à VIb ^o	
D ^o -triade à VII ^o -tri	

à II^o-tri
 à IV^o-tri
 à VIb^o-tri

 D6m à V6m

 Cd_{pas} à I^{#o}

 Cd_{aux} à I^o
 à IIIb^o
 à IV^{#o}
 à VI^o

 MA_{ex} à II II_m D T

Tabela 3.10

Regras para cadências interrompidas:

C à T T S D

à T S S D

à S S D

à T S D

à T D S

à S D

Cadência perfeita interrompida

3.4 Regras adicionais (meta gramaticais):

- Não permitimos que substitutos da tônica (tônica relativa e tônica anti-relativa) apareçam mais de uma vez em uma cadência, pois isto diminui o grau de plausibilidade da cadência. Fazemos uma concessão para a regra T T S D T, que pode derivar cadências com duas ocorrências de substitutos da tônica.
- Não permitimos repetição imediata de acordes com função subdominante por uma questão musical. Ex: [F F G C].
- Não permitimos a interpretação da seqüência C G significando respectivamente subdominante e tônica quando o primeiro for a tônica global, uma vez que esta interpretação gera ambigüidade. Por exemplo: no caso em que o compositor escreve (C G C G C G) em uma peça em Dó maior, o mecanismo da gramática não consegue impedir a interpretação errada. Musicalmente, esta proibição tem sentido já que é um caso raríssimo a tônica global ser interpretada como subdominante da dominante global.

3.5 Procedimento de instanciação gramatical

Utilizando as proto-gramáticas acima como ponto de partida podemos instanciar gramáticas para qualquer tonalidade.

Como visto nas tabelas acima, as proto-gramáticas não contém regras que derivam acordes. As regras presentes nas proto-gramáticas chegam somente ao nível de grau. Para realizar a instanciação, devemos permitir a derivação (conversão) de graus em acordes. Isto é alcançado através da inclusão de regras que reescrevem os não terminais (representando graus) na forma de acordes, que são os terminais da gramática.

Assim, a proto-gramática maior pode codificar qualquer tonalidade maior enquanto a proto-gramática menor pode codificar qualquer tonalidade menor.

Novamente, lembramos que estamos falando da tonalidade interna das cadências, e não da tonalidade da peça musical como um todo, que será levada em conta quando estivermos falando de aceitação de cadências.

O processo de instanciação ocorre em dois passos:

- 1) Escolhemos a proto-gramática adequada de acordo com o modo da tonalidade (maior ou menor).
- 2) Para cada não terminal do nível de grau, e cada acorde relacionado a este não terminal na tonalidade em questão, incluímos uma regra do tipo:
NTGrau à Acorde.

Definição 3.1: Acorde relacionado a um grau

Definimos que um acorde está relacionado a um grau em uma tonalidade quando:

- A raiz do acorde corresponde à indicada pelo grau para a tonalidade
- O modo do acorde corresponde ao modo do grau
- A quinta do acorde corresponde à quinta do grau
- A sétima do acorde corresponde à sétima do grau

Notas que correspondem a outros intervalos dentro do acorde são consideradas ‘embelezamentos’ do acorde e são consideradas apenas em casos específicos.

Note que obtemos resultados conclusivos considerando apenas os quatro sons da tétrade. A análise dos embelezamentos, inesperadamente, não se revelou primordial na detecção da tonalidade. Do mesmo modo não usamos noções de métrica, forma ritmo harmônico ou informações sobre estilo de época ou mesmo um estilo de autor em particular.

3.6 Exemplos de Instanciação de Gramáticas

Para exemplificar o processo de instanciação, estudaremos duas tonalidades, Dó maior e Lá menor.

3.6.1 Exemplos de Instanciação para Tonalidade Dó maior

Não terminais do nível de grau:

I, II_m, III_m, IV, V, VI_m, VII_{5d7},

VII^o, II^o, IV^o, VI^o,

VII^o-tri, II^o-tri, IV^o-tri, VI^o-tri,

I^{#o}, IV^{#o}, VI^o, I^o, III^b,

IV₇, IV_m, V_{5a}, V_{79/3}, II_{b7}, VII_b, II

Regras sobre acordes relacionados:

Devido à quantidade de acordes relacionados a um grau, listaremos aqui apenas as regras para os acordes mais comuns.

I à C

I à C_{7M}

I à C/E

II_m à D_m

III_m à E_m

IV à F

IV à F_{7M}

V à G

V à G₇

VI_m à A_m

VI_m à A_{m7}

VII* à B* (B_{m5d7m})

VII^o à B^o

II^o à D^o

IV^o à F^o

VI^o à Ab^o

VII^o-tri à B^o-tri

II^o-tri à D^o-tri

IV^o-tri à F^o-tri

VI^o-tri à Ab^o-tri

I^{#o} à C^{#o}

IV^{#o} à F^{#o}

VI^o à A^o

I^o à C^o

III^b à Eb^o

IV₇ à F₇

IV_m à F_m

V_{5a} à G_{5a}

V_{79/3} à G_{79/3}

II_{b7} à Db₇

bVII à B_b

VI_{m6} à Ab_{m6}

De acordo com o formalismo desenvolvido na sessão 3.3, a gramática de Dó maior pode ser definida como $Cc = \langle A, N, P, S \rangle$ onde:

- $A = \{C, C7M, C/E, Dm, Em, F, F7M, G, G7, Am, Am7, B^*, B^\circ, D^\circ, F^\circ, Ab^\circ, B^\circ\text{-tri}, \dots\}$
- $N = P_n$ é o conjunto de não terminais da proto-gramática maior
- $P = (P_p \cup G_p)$, conjunto de regras da gramática, onde P_p é o conjunto de regras da proto-gramática maior e G_p o conjunto de regras formado pelas regras listadas na tabela acima.
- $S = S_p$, conjunto contendo o símbolo inicial da proto-gramática maior.

3.6.2 Exemplos de Instanciação para Tonalidade Lá menor

Não terminais do nível de grau:

Im, I#°, I°,
 IIb, IIb7, IIIm, II°, II°-tri, II IIIm
 III, IIIb°
 IV, IVm, IV°, IV°-tri, IV#°
 V, V6m
 VIb, VIb7M, VIsemi, VIbm6, VIb°, VIb°-tri, VI°
 VII°, VII°-tri

Regras sobre acordes relacionados:

Devido à quantidade de acordes relacionados a um grau, listaremos aqui apenas as regras para os acordes mais comuns.

Im à Am	IV à F
Im à Am6	IVm à Fm
Im à Am7	V à G
Im à Am7M	V à G7
Im à Am/F# (sexta napolitana)	
IIb à Bb	VIb à F
IIsemi à Bm5d7	VIb° à F
II°-tri à B°-tri	
III à C	VII* à B* (Bm5d7m)
	VII° à B°
	VII°-tri à G#°-tri

Formalmente, definimos a gramática de Lá maior, $Cam = \langle A, N, P, S \rangle$ onde:

- $A = \{Am, Am6, Am7, Am7M, Am/F\#, Bb, Bm5d7, B^\circ\text{-tri}, C, F, Fm, \dots\}$
- $N = P_n$ é o conjunto de não terminais da proto-gramática menor
- $P = (P_p \cup G_p)$, conjunto de regras da gramática, onde P_p é o conjunto de regras da proto-gramática menor e G_p o conjunto de regras formado pelas regras listadas na tabela acima.
- $S = S_p$, conjunto contendo o símbolo inicial da proto-gramática menor.

3.7 Tipos de cadência reconhecidas pelo Aho:

As cadências reconhecidas pelo Aho se dividem em dois grupos, as que são reconhecidas diretamente por uma das gramáticas e as que são obtidas devido a um encadeamento dessas cadências. Chamamos as cadências do primeiro grupo de simples e as do segundo de cadências compostas. Classificamos também as cadências de acordo com o modo pelo qual são concluídas. Sob este aspecto as cadências podem ser comuns, de engano ou interrompidas.

Cadências simples

As cadências simples são aquelas geradas pelas gramáticas.

Cadência comum

Uma cadência comum é uma cadência musical bem comportada (a tônica da tonalidade local é o último acorde da seqüência).

Cadência de Engano

A cadência de engano ocorre quando o último acorde da cadência é o substituto da tônica na tonalidade local, isto é, ele é derivado por uma das regras abaixo:

T à Tr
T à Ta

Cadência Interrompida

Musicalmente, as cadências interrompidas são aquelas que não apresentam o acorde de chegada. O Aho as deriva utilizando as regras:

C à TSSD
à SSD

à TSD
à TDS

à SD

Note que as regras acima não terminam com o não terminal T, que corresponde à função de tônica, este é o fator que caracteriza a interrupção. Note que estas regras foram baseadas em alguns padrões de cadências fundamentais, mas não em todos. Escolhemos aqueles padrões de cadência em cujo corpo haja um nível suficiente de “convencimento harmônico”, ou seja, pequenas variações da **cadência perfeita** e um caso particular de **cadência plagal**.

A escolha das regras para interrompidas baseadas na cadência perfeita segue do efeito conclusivo da dominante. A cadência plagal, apesar de não conservar o efeito de dominância, possui o efeito de sub-dominância, considerado pelos estudiosos da música

erudita e consagrado, através do uso, pelos compositores como o segundo efeito harmônico em importância.

Cadências compostas

Uma cadência composta é um encadeamento de cadências simples onde o acorde de chegada de uma cadência é o primeiro acorde da cadência seguinte.

Apenas cadências pequenas, de tamanho menor ou igual a cinco, são implementadas diretamente. O Aho utiliza o conceito de cadência composta para reconhecer cadências grandes a partir do encadeamento das cadências simples reconhecidas pelas gramáticas. Assim, somos capazes de reconhecer cadências não previstas a partir dos formatos de cadência mais conhecidos, caracterizando a capacidade indutiva do Aho.

Definição 3.2: Tonalidade de cadência composta.

A tonalidade local da cadência composta é definida como a **tonalidade local** da última cadência que a compõe.

Por exemplo, analisemos o caso abaixo:

A be le za que não é só min ha que tam bém pas-sa so - sin - lu ah

Exemplo 3. 1: Tonalidade Local de Cadência Composta.

No extrato de “Garota de Ipanema” identificamos uma cadência composta [Am^7 , $\text{D}^{7(\text{b}9)}$, Gm^7 , $\text{C}^{7(\text{b}9)}$, Fmaj^7] na tonalidade de Fá maior.

Os cinco acordes da seqüência acima são vistos como dois grupos menores, sendo cada um uma cadência simples. A primeira, [Am^7 , $\text{D}^{7(\text{b}9)}$, Gm^7] está na tonalidade de Sol menor, e a segunda, [Gm^7 , $\text{C}^{7(\text{b}9)}$, Fmaj^7] na tonalidade de Fá maior. Vistos como uma seqüência única, eles formam uma cadência composta da seguinte maneira:

$$\begin{aligned} &[\text{Am}^7, \text{D}^{7(\text{b}9)}, \text{Gm}^7] \\ &[\text{Gm}^7, \text{C}^{7(\text{b}9)}, \text{Fmaj}^7] \end{aligned}$$

Observe que o acorde de Sol menor desempenha um duplo papel, contando como o último de uma cadência e como primeiro de outro. A tonalidade da cadência composta como um todo é, por definição, a tonalidade da segunda cadência, Fá maior.

Uma restrição na formação das cadências compostas é que não podem conter cadências interrompidas, a não ser que como última cadência, pois a interrupção da cadência identifica o fim de um movimento harmônico.

3.8 Exemplos de derivação

Para exemplificar o uso das gramáticas e mostrar como podemos derivar os vários tipos de cadência, vamos apresentar alguns exemplos.

Caso 1: Cadência Simples

Exemplo 3.2: Cadência Simples.

Acima temos um fragmento de “Garota de Ipanema” de Tom Jobim e Vinícius de Moraes na sua tonalidade original de Fá maior, onde vemos a seqüência de acordes **Gm⁷**, **C^{7(b9)}** e **Fmaj⁷** correspondendo aos graus **II^{m7}**, **V^{7(b9)}** e **I^{maj7}** da tonalidade de Fá maior. Tal seqüência constitui uma variação de cadência perfeita, uma vez que estes graus têm as funções de subdominante relativa, dominante e tônica da tonalidade de fá maior, **Sr**, **D** e **T**, respectivamente.

O que notamos assim:

Tonalidade local da cadência: Fá maior

Em acordes:

[**Gm⁷**, **C^{7(b9)}**, **Fmaj⁷**]

Em graus:

[**II^{m7}**, **V^{7(b9)}**, **I^{maj7}**]

Em sub-funções:

[**Sr**, **D**, **T**]

Em funções:

[S, D, T]

Derivação:

C			C -> SDT	(proto-gramática maior)
S	D	T	S -> Sr	(proto-gramática maior)
Sr	D	T	Sr -> IIm ⁷	(proto-gramática maior)
IIm ⁷	D	T	IIm ⁷ -> Gm ⁷	(regra sobre acorde rel.)
Gm ⁷	D	T	D -> D	(proto-gramática maior)
Gm ⁷	D	T	D -> D	(proto-gramática maior)
Gm ⁷	V ^{7(b9)}	T	D -> V ^{7(b9)}	(proto-gramática maior)
Gm ⁷	C ^{7(b9)}	T	V ^{7(b9)} -> C ^{7(b9)}	(regra sobre acorde rel.)
Gm ⁷	C ^{7(b9)}	T	T -> T	(proto-gramática maior)
Gm ⁷	C ^{7(b9)}	I ^{7M}	T -> I ^{7M}	(proto-gramática maior)
Gm ⁷	C ^{7(b9)}	Fmaj ⁷	I ^{7M} -> Fmaj ⁷	(regra sobre acorde rel.)

Caso 2: Cadência Simples Interrompida

Amaj⁷ F[♯]m⁷ Bm⁷ E⁷⁽⁹⁾ Bm⁷

Eu sei e vo cê sa be já quea vi da quis as sim que na da nes ta vi da ...

Exemplo 3.3: Cadência Simples Interrompida

Acima temos um fragmento de “Eu Não Existo Sem Você” novamente uma composição de Tom Jobim e Vinícius de Moraes, desta vez na tonalidade de Lá maior, onde encontramos a seqüência de acordes A^{7M} , $F\#m^7$, Bm^7 , $E^{7(9)}$ e Bm^7 correspondendo aos graus I^{7M} , VIm^7 , $IIIm^7$, $V^{7(b9)}$ e $IIIm^7$ da tonalidade de Lá maior e que constituiria uma variação de cadência perfeita³ se, na conclusão, houvesse o acorde de tônica A , ou um de seus substitutos, $F\#m$ ou $C\#m$.

Como na conclusão encontramos um acorde (Bm) que não se enquadra como uma **tônica** possível, consideramos apenas os quatros primeiros acordes formando uma cadência interrompida.

O que notamos assim:

Tonalidade local da cadência: Lá maior

Em acordes:

$$[A^{7M}, F\#m^7, Bm^7, E^{7(9)}]/A$$

Em graus:

$$[I^{7M}, VIm^7, IIIm^7, V^{7(b9)}]/I$$

Em sub-funções:

$$[T, Tr, Sr, D]/T$$

Em funções:

$$[T, T, S, D]/T$$

³ Esta cadência é conhecida entres os músicos populares europeus como “Anatole”.

Derivação:

C			
T	T	S	D
T	T	S	D
I^{7M}	T	S	D
A^{7M}	T	S	D
A^{7M}	T	S	D
A^{7M}	Tr	S	D
A^{7M}	VIm^7	S	D
A^{7M}	$F\#m^7$	S	D
A^{7M}	$F\#m^7$	Sr	D
A^{7M}	$F\#m^7$	$IIIm^7$	D
A^{7M}	$F\#m^7$	Bm^7	D
A^{7M}	$F\#m^7$	Bm^7	D
A^{7M}	$F\#m^7$	Bm^7	$V^{7(b9)}$
A^{7M}	$F\#m^7$	Bm^7	$E^{7(9)}$

Caso 3: Cadência de Engano Simples

Eu não sei com você não sei se eu sei de sua

Exemplo 3.4: Cadência de Engano Simples

Acima temos um fragmento de “Lígia” de Tom Jobim na sua tonalidade original de Si maior, onde vemos a seqüência de acordes **C#m⁷⁽⁹⁾**, **F#^{7(#5)}** e **D#m⁷⁽⁹⁾** correspondendo aos graus **IIIm⁷**, **V^{7(b9)}** e **IIIIm⁷⁽⁹⁾** da tonalidade de Si maior e que constituiria uma variação de cadência perfeita se, o último acorde fosse **B**. No seu lugar encontramos o terceiro grau **D#m**. Houve assim uma cadência de engano, preparou-se uma conclusão e chegou-se a outra.

Os graus que correspondem aos acordes têm as funções de subdominante relativa, dominante e tônica ante-relativa da tonalidade de Sí maior, **Sr**, **D** e **Ta**, respectivamente.

O que notamos assim:

Em acordes:

[**C#m⁷⁽⁹⁾**, **F#^{7(#5)}** e **D#m⁷⁽⁹⁾**]

Em graus:

[**IIIm⁷**, **V^{7(b9)}** e **IIIIm⁷⁽⁹⁾**]

Em sub-funções:

[**Sr**, **D**, **Ta**]

Em funções:

[**S**, **D**, **T**]

Derivação:

C		
S	D	T
Sr	D	T
IIIm ⁷	D	T
C#m ⁷⁽⁹⁾	D	T
C#m ⁷⁽⁹⁾	D	T
C#m ⁷⁽⁹⁾	V ^{7(b9)}	T
C#m ⁷⁽⁹⁾	F# ^{7(#5)}	T
C#m ⁷⁽⁹⁾	F# ^{7(#5)}	Ta
C#m ⁷⁽⁹⁾	F# ^{7(#5)}	IIIm ⁷⁽⁹⁾
C#m ⁷⁽⁹⁾	F# ^{7(#5)}	D#m ⁷⁽⁹⁾

Caso 4: Cadência Composta

A be le za que não é só min ha que tam bém pas-sa so - sin - ha Ah

Exemplo 3.5: Cadência Composta

Acima temos uma expansão do fragmento de “Garota de Ipanema” do exemplo XX ainda na tonalidade original de Fá maior, vemos um par de acordes antecedendo os que antes havia Am^7 , $\text{D}^{7(\text{b}9)}$, correspondendo aos graus IIIm^7 , $\text{V}^{7(\text{b}9)}$ da tonalidade de Sol menor.

Quando acoplados ao Gm^7 , temos a seqüência Am^7 , $\text{D}^{7(\text{b}9)}$, Gm^7 , correspondendo aos graus IIIm^7 , $\text{V}^{7(\text{b}9)}$ e Im^7 que constitui uma variação de cadência perfeita desta vez na tonalidade de Sol menor.

Se considerarmos os cinco acordes em grupo, temos uma cadência composta Am^7 , $\text{D}^{7(\text{b}9)}$, Gm^7 , $\text{C}^{7(\text{b}9)}$ e Fmaj^7 onde o acorde central Gm^7 , tem um duplo papel, cabeça de uma cadência e corpo da outra, simultaneamente.

O que notamos assim:

Em acordes:

$$\begin{aligned} &[\text{Am}^7, \text{D}^{7(\text{b}9)}, \text{Gm}^7] \\ &[\text{Gm}^7, \text{C}^{7(\text{b}9)}, \text{Fmaj}^7] \end{aligned}$$

Em graus:

$$\begin{aligned} &[\text{IIIm}^7, \text{V}^{7(\text{b}9)}, \text{Im}^7] \\ &[\text{IIIm}^7, \text{V}^{7(\text{b}9)}, \text{I}^{7\text{M}}] \end{aligned}$$

Em sub-funções:

$$\begin{aligned} &[\text{SubNap}, \text{D}, \text{T}] \\ &[\text{Sr}, \text{D}, \text{T}] \end{aligned}$$

Em funções:

$$\begin{aligned} &[\text{S}, \text{D}, \text{T}] \\ &[\text{S}, \text{D}, \text{T}] \end{aligned}$$

Derivação da cadência [**Am**⁷, **D**^{7(b9)}, **Gm**⁷]:

C		
S	D	T
SunNap	D	T
IIIm ⁷	D	T
Am ⁷	D	T
Am ⁷	D	T
Am ⁷	V ^{7(b9)}	T
Am ⁷	D ^{7(b9)}	T
Am ⁷	D ^{7(b9)}	T
Am ⁷	D ^{7(b9)}	T
Am ⁷	D ^{7(b9)}	Im ⁷
Am ⁷	D ^{7(b9)}	Gm ⁷

Derivação da cadência [**Gm**⁷, **C**^{7(b9)}, **Fmaj**⁷]:

C		
S	D	T
Sr	D	T
IIIm ⁷	D	T
Am ⁷	D	T
Am ⁷	D	T
Am ⁷	V ^{7(b9)}	T
Am ⁷	C ^{7(b9)}	T
Am ⁷	C ^{7(b9)}	T
Am ⁷	C ^{7(b9)}	I ⁷
Am ⁷	C ^{7(b9)}	Fmaj ⁷

Caso 5: Cadência Composta Interrompida

Bm⁷ **E⁷** **A⁷maj⁷** **F[#]m⁷** **Bm⁷** **E⁷** **G[#]m⁷**

O lha q' o amor Luci a na É co mo a flôr Luci a na

Exemplo 3.6: Cadência Composta Interrompida

Neste exemplo analisaremos um trecho da música 'Luciana' de Tom Jobim.

Bm⁷, **E⁷**, **A^{7M}**, **F[#]m⁷**, **Bm⁷**, **E⁷** e **G[#]m⁷** correspondendo aos graus **IIIm⁷**, **V⁷**, **I^{7M}**, **VIIm⁷**, **IIIm⁷**, **V⁷** e **VI[#]m⁷**.

Estamos diante de uma Cadência Composta Interrompida organizada da seguinte maneira:

Trata-se de um conjunto de sete acordes onde os três primeiros constituem uma cadência perfeita e do terceiro até o sexto acorde temos uma cadência interrompida uma vez que o sétimo acorde não é o de tônica, nem algum de seus substitutos, como seria esperado, caracterizando-se a interrupção. O fato de o terceiro acorde participar das duas cadências justifica a composição, melhor dizendo: A presença do acorde pivô desempenhando dois papéis faz com que o todo seja uma cadência composta.

Em acordes:

$$[\mathbf{Bm}^7, \mathbf{E}^7, \mathbf{A}^{7M}]$$

$$[\mathbf{A}^{7M}, \mathbf{F\#m}^7, \mathbf{Bm}^7, \mathbf{E}^7] / \mathbf{A}^{7M}$$

Em graus:

$$[\mathbf{IIIm}^7, \mathbf{V}^7, \mathbf{I}^{7M}]$$

$$[\mathbf{I}^{7M}, \mathbf{VIIm}^7, \mathbf{IIIm}^7, \mathbf{V}^{7(b9)}] / \mathbf{I}^{7M}$$

Em sub-funções:

$$[\mathbf{Sr}, \mathbf{D}, \mathbf{T}]$$

$$[\mathbf{T}, \mathbf{Tr}, \mathbf{Sr}, \mathbf{D}] / \mathbf{T}$$

Em funções:

$$[\mathbf{S}, \mathbf{D}, \mathbf{T}]$$

$$[\mathbf{T}, \mathbf{T}, \mathbf{S}, \mathbf{D}] / \mathbf{T}$$

Derivação da cadência [**Bm**⁷, **E**⁷, **A**^{7M}]:

C		
S	D	T
Sr	D	T
IIIm ⁷	D	T
Bm ⁷	D	T
Bm ⁷	D	T
Bm ⁷	V ⁷	T
Bm ⁷	E ⁷	T
Bm ⁷	E ⁷	T
Bm ⁷	E ⁷	T
Bm ⁷	E ⁷	I ⁷
Bm ⁷	E ⁷	A ^{7M}

Derivação da cadência [**A**^{7M}, **F#m**⁷, **Bm**⁷, **E**⁷] / **A**^{7M}:

C			
T	T	S	D
T	T	S	D
I ^{7M}	T	S	D
A ^{7M}	T	S	D
A ^{7M}	T	S	D
A ^{7M}	Tr	S	D
A ^{7M}	VIm ⁷	S	D
A ^{7M}	F#m ⁷	S	D
A ^{7M}	F#m ⁷	Sr	D
A ^{7M}	F#m ⁷	IIIm ⁷	D
A ^{7M}	F#m ⁷	Bm ⁷	D
A ^{7M}	F#m ⁷	Bm ⁷	D
A ^{7M}	F#m ⁷	Bm ⁷	V ^{7(b9)}
A ^{7M}	F#m ⁷	Bm ⁷	E ⁷⁽⁹⁾

3.9 Aceitação de cadências

Utilizando os conceitos de tonalidade local e de gramática, somos capazes de reconhecer cadências harmônicas que ocorrem em uma peça musical. Porém não são todas as cadências possíveis que fazem sentido quando são confrontadas com a tonalidade global da música. Ou seja, nem toda cadência serve como confirmação de tonalidade.

Consideramos que uma cadência é aceita quando ela confirma a tonalidade global. Esta confirmação é verificada quando a tonalidade local da cadência é induzida por algum dos acordes diatônicos da tonalidade global⁴.

Para tornar mais claro este conceito, estudaremos algumas cadências e sua relação de aceitação com a tonalidade global.

Considere que a tonalidade global da peça é Dó maior, cujos acordes diatônicos são: **C Dm Em F G Am Bm5b**.

Caso 1: Sequência formada por quatro acordes, dó maior, fá maior, sol maior e, novamente dó maior, [C F G C].

Musicalmente, esta sequência de acordes é uma cadência, pois os acordes **C F G** geram uma sensação de conclusão no acorde **C** que aparece logo a seguir. Desta forma, a tonalidade local desta cadência é Dó maior, e os acordes desempenham, respectivamente, as funções de tônica, subdominante, dominante e tônica em relação à tonalidade local.

Derivação da cadência na gramática:

C
 T S D T
 T S D T
 I S D T
C S D T
C S D T
C IV D T
C F D T
C F V T
C F G T
C F G T
C F G I
[C F G C]

A análise desta cadência em relação à tônica local:

[C F G C] [I IV V I] [T S D T] [T S D T]

⁴ O que fazemos é, usando os termos de Carnap, usar definição de cadência como *explicação* para o fenômeno da tonalidade.

A cadência é aceita na tonalidade global, pois sua tonalidade local é induzida pelo acorde de **C**, que é diatônico na tonalidade global.

Caso 2: Seqüência formada por quatro acordes, si bemol maior, dó maior, fá maior e, novamente si bemol maior, [**Bb C F Bb**].

Como o exemplo mostrado acima, esta seqüência de acordes é uma cadência. Porém, a sua tonalidade local não é Dó maior, e sim Si bemol maior.

Derivação da cadência na gramática:

C
 T S D T
 T S D T
 I S D T
Bb S D T
Bb S D T
Bb IV D T
Bb C D T
Bb C V T
Bb C F T
Bb C F T
Bb C F I
[Bb C F Bb]

A análise desta cadência em relação à tônica local:

[Bb C F Bb] [I IV V I] [T S D T] [T S D T]

Esta cadência não é aceita, pois ela é reconhecida pela gramática com tonalidade local de Sí bemol maior, induzida pelo acorde **Bb**, que não é um acorde *diatônico* da tonalidade global, Dó maior.

Caso 3: Sequência formada por quatro acordes, dó maior, fá maior, sol maior e, lá menor, [C F G Am].

Musicalmente, esta é uma cadência de engano, pois o corpo da cadência conduz para o acorde **C**, mas o acorde que, de fato, é tocado é **Am**. O acorde de **Am** substitui o de **C** e assume o papel de tônica da cadência. Quando isto ocorre, dizemos que **Am** desempenha o papel de tônica relativa.

Esta cadência não é reconhecida pela gramática de Lá menor, pois não há nenhuma derivação desta gramática que gere esta cadência. Seu reconhecimento é feito pela gramática de Dó maior, apesar da cabeça não corresponder à tônica da cadência. (a cabeça da cadência não é **C**). **Am** é interpretado como VI_m da tonalidade local, com função de tônica e com sub-função de tônica relativa.

Derivação da cadência na gramática:

C
 T S D T
 T S D T
 I S D T
C S D T
C S D T
C IV D T
C F D T
C F V T
C F G T
C F G Tr
C F G VI
C F G Am

A análise desta cadência em relação à tônica local:

[**C F G Am**] [I IV V VI] [T S D Tr] [T S D T]

Como a tonalidade global da cadência, Dó maior, é induzida pelo acorde **C**, que é um acorde diatônico na tonalidade global, a cadência é aceita.

Caso 4: Seqüência formada por três acordes, dó maior, fá maior, sol maior, [C F G].

Esta seqüência de acordes é reconhecida como uma cadência interrompida. Como visto anteriormente, uma cadência interrompida ocorre quando o último acorde da cadência não é tocado. A justificativa musical para esta cadência é que o efeito de condução ocorre, mesmo quando o acorde final é omitido. Consideramos, então, que o acorde omitido é a tônica da tonalidade local da cadência.

Esta cadência é reconhecida pela gramática de Dó maior. Assim consideramos que o corpo da cadência conduz para o acorde de **C**, tônica da tonalidade local.

Derivação da cadência na gramática:

C
T S D
T S D
I S D
C S D
C S D
C I V D
C F D
C F V
[C F G]

A análise desta cadência em relação à tônica local:

[C F G]/C [I IV V] [T S D] [T S D]

Como a tonalidade local da cadência é induzida pelo acorde **C**, que é um acorde diatônico na tonalidade global, a cadência é aceita.

Caso 5: Seqüência formada por quatro acordes, lá maior, ré maior, sol maior e, novamente dó maior, [A D G C]

A seqüência de acordes acima é analisada como uma cadência composta. Isto quer dizer que ela é um encadeamento de cadências menores onde o último acorde de uma é o acorde inicial da seguinte.

A decomposição da cadência é mostrada abaixo:

[A D]
 [D G]
 [G C]

A análise de cada cadência é mostrada a seguir:

[A D]
 C
 D T
 D T
 A T
 A T
 [A D]

A análise desta cadência em relação à tônica local:

[A D] [V I] [D T] [D T]

Tonalidade local:
 Ré maior

[D G]
 C
 D T
 D T
 D T
 D T
 [D G]

A análise desta cadência em relação à tônica local:

[D G] [V I] [D T] [D T]

Tonalidade local:
Sol maior

[**G C**]

C
D T
D T
G T
G T
[**G C**]

A análise desta cadência em relação à tônica local:

[**G C**] [V I] [D T] [D T]

Tonalidade local:
Dó maior

O critério de aceitação para cadeias compostas é o seguinte: Uma cadência composta é aceita em uma tonalidade quando a última cadência que a compõe é aceita. Isto é, a tonalidade local da última cadência da cadência composta é induzida por um acorde diatônico da tonalidade global.

Desta forma, consideramos a tonalidade local da cadência composta a tonalidade local da última cadência que a compõe.

No exemplo em questão, temos que a tonalidade local da última cadência, [**G C**], é Dó maior. Assim, a tonalidade local da cadência composta, [**A D G C**], fica sendo Dó maior. Assim, consideramos que ela é aceita.

Note que a cadência [**A D**] não é aceita inicialmente, pois sua tonalidade local, Ré menor, é induzida pelo acorde **D**, que não é diatônico em Dó maior, a tonalidade global. Porém ela é tolerada por ser um dos componentes de uma cadência composta aceita.

3.10 Descrição do processo de análise

Como exposto anteriormente, objetivo do Aho é determinar a tonalidade de uma peça musical, assim como sua estrutura cadencial de acordo com esta tonalidade e produzir uma análise funcional detalhada. Vimos também que para obter este resultado, primeiro geramos o conjunto de tonalidades possíveis, depois submetemos a seqüência de acordes da peça e cada tonalidade candidata a um algoritmo que tem como entrada uma seqüência de acordes e uma tonalidade global. Este algoritmo tem como saída uma estrutura cadencial produzida levando em conta a tonalidade global fornecida, assim como um escore que indica o nível de adequação da estrutura cadencial a esta tonalidade. Nesta sessão estudaremos este algoritmo, que chamaremos de **algoritmo de análise**.

O algoritmo funciona, basicamente, posicionando o ponto inicial da busca no primeiro acorde da seqüência e executando os passos abaixo:

1. Reconhece uma cadência aceita
2. Posiciona o ponto inicial da busca no acorde imediatamente posterior à cadência reconhecida.

Até que a seqüência de acordes seja percorrida por completo.

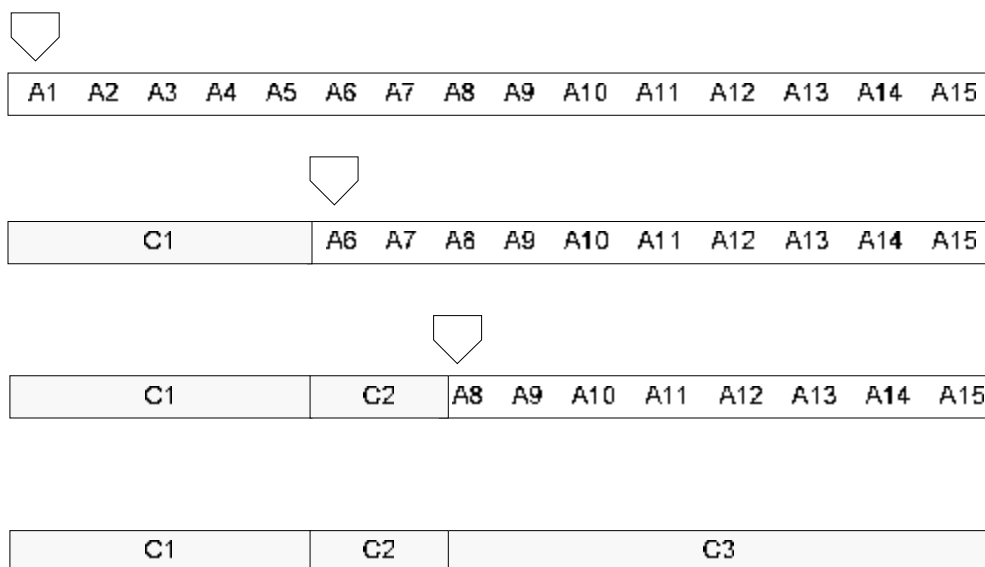


Figura 3.9: Execução do programa

3.11 Funções de busca

Vimos acima que as cadências são divididas em dois grandes grupos; simples e compostas, e que as cadências compostas nada mais são do que um encadeamento de cadências simples. Lembrando ainda que as cadências simples podem ainda ser comuns, interrompidas ou de engano.

Para reconhecer as cadências simples de acordo com as gramáticas, temos as seguintes funções:

Busca (a, b, c, d, e);

Busca (a, b, c, d);

Busca (a, b, c);

Busca (a, b);

BuscaInterrompida (a, b, c, d);

BuscaInterrompida (a, b, c);

BuscaInterrompida (a, b);

Como o nome sugere, as funções *buscaInterrompida* identificam as cadências interrompidas. As funções *Busca* identificam as demais cadências simples (comuns e de engano).

Observe que o tamanho máximo de uma cadência simples no Aho é de cinco acordes. Apesar de musicalmente existirem encadeamentos com mais de cinco acordes, tais encadeamentos podem ser interpretados como uma composição de componentes menores.

Os componentes menores são reconhecidos através de funções de busca vistas acima e os encadeamentos maiores, o Aho os reconhece como cadências compostas.

Funcionamento:

As funções busca (a, ... ,x) funcionam repetindo um ciclo de instanciação de gramática seguida de avaliação da seqüência a...x de acordo com a gramática, até que a seqüência seja reconhecida ou que todas as gramáticas relevantes sejam instanciadas, sem que nenhuma a reconheça:

1. Instancia a gramática cuja tonalidade local é induzida pelo acorde x.
2. Tenta reconhecer a seqüência a, ... , x de acordo com a gramática.

Caso a seqüência não seja reconhecida

3. Instancia a gramática cuja tonalidade local é induzida pelo acorde do qual x é tônica relativa.
4. Tenta reconhecer a seqüência a, ... , x de acordo com a gramática.

Caso a seqüência não seja reconhecida

5. Instancia a gramática cuja tonalidade local é induzida pelo acorde do qual x é tônica anti-relativa.
6. Tenta reconhecer a seqüência a, ... , x de acordo com a gramática.

Se no final a seqüência não tiver sido reconhecida, a função retorna **fracasso**. Caso contrário, retorna **sucesso**.

As funções de *buscaInterrompida*(a, ... ,x) funcionam, como no caso acima, utilizando um ciclo de instanciação de gramática e avaliação da seqüência. A diferença entre a *busca* e a *buscaInterrompida* é que, na primeira, as gramáticas são instanciadas com base no último acorde da seqüência. Já no caso da *buscaInterrompida*, as gramáticas são instanciadas a partir dos acordes diatônicos da tonalidade global:

Para cada c, acorde diatônico da tonalidade global:

1. Instancia a gramática cuja tonalidade local é induzida por c.
2. Tenta reconhecer a seqüência a, ..., x de acordo com a gramática
3. Se a seqüência for reconhecida, para e retorna **sucesso**.

Se, no final do processo, nenhuma das gramáticas reconhecer a seqüência, retorna **fracasso**.

Utilizamos somente os acordes diatônicos para induzir as gramáticas que reconhecem cadências interrompidas, pois estas só ocorrem em duas situações:

- Como cadência simples
- Como cadência final de uma cadência composta

Em ambos os casos, se a tonalidade local da cadência interrompida não for induzida por um acorde diatônico da tonalidade global, ela não será aceita.

Exemplos:

Caso 1: Analisando a seqüência de acordes, Fá maior **F**, Sol maior **G**, e Dó maior, **C**:

Busca (**F, G, C**):

1. Instancia a gramática induzida por **C**
2. Reconhece a seqüência.
3. Retorna **sucesso**.

Caso 2: Suponha que a seqüência não se concluísse de maneira convencional e terminasse em **Am**. Teríamos então, Fá maior **F**, Sol maior **G**, e Lá menor, **Am**:

Busca (**F, G, Am**):

1. Instancia a gramática induzida por **Am**
2. Não reconhece a seqüência.
3. Instancia a gramática induzida por **C**, que tem como tônica relativa **Am**.
4. Reconhece a seqüência.
5. Retorna **sucesso**.

Caso 3: Suponha agora a seqüência terminando em **Em**; Fá maior **F**, Sol maior **G**, e Mi menor, **Em**:

Busca (**F, G, Em**):

1. Instancia a gramática induzida por **Em**
2. Não reconhece a seqüência.
3. Instancia a gramática induzida por **G**, que tem como tônica relativa **Em**.
4. Não reconhece a seqüência.
5. Instancia a gramática induzida por **C**, que tem como tônica anti-relativa **Em**.
6. Reconhece a seqüência.
7. Retorna **sucesso**.

Observe que se outro acorde diferente de **C**, **Am** e **Em** aparecer no final da seqüência, esta não será aceita pela gramática de Dó maior. Isto ocorre, uma vez que nenhum outro acorde pode assumir função de tônica na tonalidade local de Dó maior.

Para exemplificar o funcionamento da função *buscaInterrompida*, vamos supor que a tonalidade global seja Dó maior.

Vetor de acordes diatônicos da tonalidade de Dó maior: { **C Dm Em F G Am Bm5b** }

BuscaInterrimpida (**F, G**)

1. Instancia a gramática induzida por **C**
2. Reconhece a seqüência.
3. Retorna **sucesso**.

Esta cadência é interpretada como [**F G**]/**C**.

BuscaInterrimpida (**Bb, C7**)

1. Instancia a gramática induzida por **C**
2. Não reconhece a seqüência.
3. Instancia a gramática induzida por **Dm**
4. Não reconhece a seqüência.
5. Instancia a gramática induzida por **Em**
6. Não reconhece a seqüência.
7. Instancia a gramática induzida por **F**
8. Reconhece a seqüência.
9. Retorna **sucesso**.

Esta cadência é interpretada como [**Bb C7**]/**F**.

BuscaInterrimpida (**Dm, E**)

1. Instancia a gramática induzida por **C**
2. Não reconhece a seqüência.
3. Instancia a gramática induzida por **Dm**
4. Não reconhece a seqüência.

5. Instancia a gramática induzida por **Em**
6. Não reconhece a seqüência.
7. Instancia a gramática induzida por **F**
8. Não reconhece a seqüência.
9. Instancia a gramática induzida por **G**
10. Não reconhece a seqüência.
11. Instancia a gramática induzida por **Am**
12. Reconhece a seqüência.
13. Retorna **sucesso**.

Esta cadência é interpretada como [**Dm E**]/**Am**.

3.12 Reconhecimento de cadências compostas

As cadências compostas são encadeamentos de cadências simples. Para reconhecê-las devemos ser capazes de reconhecer as cadências simples e de verificar o encadeamento destas cadências.

Para reconhecer as cadências simples utilizamos as funções de *Busca* e *BuscaInterrompida* vistas acima.

Mesmo não levando em conta a aceitação das cadências na tonalidade global, devemos considerá-la, pois precisamos do vetor de acordes diatônicos para realizar a busca por cadências interrompidas, *BuscaInterrompida*.

O algoritmo que reconhece cadências compostas funciona basicamente executando os passos:

1. Posiciona o índice de busca, **i**, em um acorde **m** do vetor de acordes **S**.
2. Repete os passos abaixo até que; **a**) o vetor de acordes tenha sido completamente lido ou **b**) que nenhuma cadência seja reconhecida a partir do acorde apontado por **i** ou **c**) uma cadência interrompida tenha sido reconhecida, pois estas, quando identificadas, determinam o fim de uma cadência compostas:
 - 1) Encontra uma cadência simples utilizando as funções de busca na seguinte ordem:
 - i. *Busca*(**S**[**i**], **S**[**i**+1], **S**[**i**+2], **S**[**i**+3], **S**[**i**+4])
 - ii. *Busca*(**S**[**i**], **S**[**i**+1], **S**[**i**+2], **S**[**i**+3])
 - iii. *Busca*(**S**[**i**], **S**[**i**+1], **S**[**i**+2])
 - iv. *Busca*(**S**[**i**], **S**[**i**+1])
 - v. *BuscaInterrompida*(**S**[**i**], **S**[**i**+1], **S**[**i**+2], **S**[**i**+3])
 - vi. *BuscaInterrompida*(**S**[**i**], **S**[**i**+1], **S**[**i**+2])
 - vii. *BuscaInterrompida*(**S**[**i**], **S**[**i**+1])
 - 2) Posiciona o índice de busca no último acorde da cadência reconhecida.
3. Ao final do processo, a cadência encontrada é formada pelos acordes **S**[**m**]..**S**[**i**]. Caso no final tenhamos **i**=**m**, nenhuma cadência foi reconhecida pelo algoritmo.

Note que a ordem de execução das buscas determina uma relação de prioridade no reconhecimento de cadências simples. Esta relação de prioridade pode ser resumida nas frases abaixo:

- As cadências maiores devem ser priorizadas.
- As cadências interrompidas têm menor prioridade em relação às demais.

O procedimento descrito acima pode ser codificado em pseudo-código como podemos ver a seguir:

Seja $S[m..n]$ o vetor de acordes e T a tonalidade global sugerida

```

i B m; //índice de busca
rp B sucesso; //resultado parcial
interrompida = 0; //indica se a última cadência encontrada é
interrompida
resultado B fracasso; //resultado final

Enquanto (i <= n e rp != fracasso e interrompida !=1)
    /*enquanto: 1) i for menor ou igual a n
    2) Uma cadência tenha sido reconhecida na iteração anterior
    3) A cadência reconhecida na iteração anterior não for interrompida
    */
    rp B fracasso;
    Se (i <= n-4) rp B Busca (S[i], S[i+1], S[i+2], S[i+3], S[i+4]);

    Se (rp = sucesso) i B i+4; resultado B sucesso;
    Senão Se (i <= n-3) rp B Busca (S[i], S[i+1], S[i+2], S[i+3]);

    Se (rp = sucesso) i B i+3; resultado B sucesso;
    Senão Se (i <= n-2) rp B Busca (S[i], S[i+1], S[i+2]);

    Se (rp = sucesso) i B i+2; resultado B sucesso;
    Senão Se (i <= n-1) rp B Busca (S[i], S[i+1]);

    Se (rp = sucesso) i B i+1; resultado B sucesso;

    Senão Se (i <= n-3) rp B BuscaInterrompida (S[i], S[i+1], S[i+2],
    S[i+3]);

    Se (rp = sucesso) i B i+3; resultado B sucesso; interrompida = 1;
    Senão Se (i <= n-2) rp B BuscaInterrompida (S[i], S[i+1], S[i+2]);

    Se (rp = sucesso) i B i+2; resultado B sucesso; interrompida = 1;
    Senão Se (i <= n-2) rp B BuscaInterrompida (S[i], S[i+1]);

    Se (rp = sucesso) i B i+1; resultado B sucesso; interrompida = 1
Fim Enquanto;

```

3.13 Levando em conta a tonalidade global

Na sessão anterior vimos um procedimento que pode ser utilizado para reconhecer cadências compostas em uma seqüência de acordes. Este algoritmo, porém, não leva em conta o contexto mais externo onde as cadências estão inseridas e com o qual elas devem concordar, a tonalidade global. Nesta sessão estudaremos um procedimento que reconhece apenas cadências aceitas na tonalidade global. Chamaremos este algoritmo de *reconheceCadenciaAceita*.

Para chegarmos no procedimento adequado, modificaremos o algoritmo estudado na sessão anterior para que ele seja capaz de julgar se uma cadência reconhecida é aceita na tonalidade global.

Note que, no caso das cadências interrompidas, simples ou compostas, isto já acontece. Quando uma cadência interrompida é reconhecida, ela é sempre aceita na tonalidade global. Podemos verificar isto analisando os dois casos possíveis de cadência interrompida, a simples e a composta. Lembre que sempre que uma cadência interrompida é reconhecida, a busca para. Além disso, a tonalidade local das cadências interrompidas sempre é induzida por acordes diatônicos.

Caso 1: cadência interrompida simples:

- Se a cadência reconhecida for simples, ela é aceita, pois a tonalidade local da cadência é induzida por um acorde diatônico.

Caso 2: cadência interrompida composta:

- Se a cadência reconhecida for composta, ela é aceita. Verificamos este fato, pois a tonalidade local da última cadência, a cadência interrompida, é induzida por um acorde diatônico. Assim, sendo a tonalidade local da cadência composta é definida como a tonalidade local de sua última cadência, esta é induzida por um acorde diatônico, logo a cadência composta é aceita na tonalidade global.

Precisamos, então, incluir no algoritmo a verificação de aceitação das cadências não interrompidas na tonalidade global.

Esta verificação não deve, porém, ser um entrave na busca por cadências compostas grandes, isto é, o reconhecimento das cadências compostas não deve ser interrompido tão logo se verifique a aceitação. O processo deve ser 'otimista', isto é, prosseguir buscando reconhecer uma cadência aceita cada vez maior até que as possibilidades se esgotem. Adotamos este procedimento porque uma análise que envolve um conjunto maior de acordes é geralmente preferível.

O algoritmo que reconhece cadências aceitas funciona basicamente executando os passos:

1. Posiciona o índice de busca, **i**, em um acorde **m** do vetor de acordes **S**.
2. Posiciona **k**, que indica a posição do último acorde da cadência aceita, no acorde **m**.
3. Repete os passos abaixo até que; **a**) o vetor de acordes tenha sido completamente lido ou **b**) que nenhuma cadência seja reconhecida a partir do acorde apontado por **i** ou **c**) uma cadência interrompida tenha sido reconhecida, pois estas, quando identificadas, determinam o fim de uma cadência compostas:

- 1) Encontra uma cadência simples utilizando as funções de busca na seguinte ordem:

- i. Busca(S[i], S[i+1], S[i+2], S[i+3], S[i+4])*
- ii. Busca(S[i], S[i+1], S[i+2], S[i+3])*
- iii. Busca(S[i], S[i+1], S[i+2])*
- iv. Busca(S[i], S[i+1])*
- v. BuscaInterrompida(S[i], S[i+1], S[i+2], S[i+3])*
- vi. BuscaInterrompida(S[i], S[i+1], S[i+2])*
- vii. BuscaInterrompida(S[i], S[i+1])*

- 2) Se a cadência for aceita, isto é, se a tonalidade local da cadência for induzida por um acorde diatônico, Atualiza **k** para que este aponte para o último acorde da cadência reconhecida.
- 3) Posiciona o índice de busca, **i**, no último acorde da cadência reconhecida.
4. Ao final do processo, a cadência aceita encontrada é formada pelos acordes **S[m]..S[k]**. Caso no final tenhamos **k=m**, nenhuma cadência aceita foi reconhecida pelo algoritmo.

Note que o processo não pára com o reconhecimento de uma cadência aceita. Ele continua tentando compor cadências maiores até chegar no fim da seqüência de acordes ou até não encontrar mais nenhuma cadência simples iniciando no último acorde da cadência reconhecida até o momento.

Note também que o último ponto de aceitação é sempre guardado por **k**. Desta forma, o processo de busca avança na seqüência de acordes, mas sempre sabemos qual é a maior cadência aceita em cada interação.

Se a cadência for interrompida, o processo de busca pára. A cadência interrompida resultante, composta ou não, é aceita na tonalidade global, conforme explicado acima.

Representaremos abaixo o procedimento *reconheceCadenciaAceita* utilizando pseudo-código:

Algoritmo: reconheceCadenciaAceita

Objetivo: Reconhecer uma cadência aceita na seqüência de acordes a partir de uma posição.

Entrada: uma tonalidade global T, um vetor de acordes S, o ponto inicial da busca i e o tamanho do vetor, n.

Saída: A análise da cadência aceita reconhecida e a posição de seu último acorde.

Seja S[m..n] o vetor de acordes e T a tonalidade global sugerida

i **B** m; //índice de busca

k **B** m; //posição do último acorde da cadência aceita

tonalidadeLocalAceita **B** falso;

//variável alterada pelas funções Busca, que indica se a

//tonalidade local da cadência é aceita, ou seja, é

//induzida por um acorde diatônico da tonalidade global.

rp **B** sucesso; //resultado parcial

interrompida = 0; //indica se a última cadência encontrada é

interrompida

resultado **B** fracasso; //resultado final

Enquanto (i <= n e rp != fracasso e interrompida != 1)

/*enquanto:

1) i for menor ou igual a n

2) Uma cadência tenha sido reconhecida na iteração anterior

3) A cadência reconhecida na iteração anterior não for interrompida*/

rp **B** fracasso;

Se (i <= n-4) rp **B** Busca (S[i], S[i+1], S[i+2], S[i+3], S[i+4]);

Se (rp = sucesso)

i **B** i+4;

Se (tonalidadeLocalAceita) k **B** i;

Senão Se (i <= n-3) rp **B** Busca (S[i], S[i+1], S[i+2], S[i+3]);

Se (rp = sucesso)

i **B** i+3;

Se (tonalidadeLocalAceita) k **B** i;

Senão Se (i <= n-2) rp **B** Busca (S[i], S[i+1], S[i+2]);

Se (rp = sucesso) i **B** i+2;

Se (tonalidadeLocalAceita) k **B** i;

Senão Se (i <= n-1) rp **B** Busca (S[i], S[i+1]);

Se (rp = sucesso) i **B** i+1;

Se (tonalidadeLocalAceita) k **B** i;

Senão Se (i <= n-3) rp **B** BuscaInterrompida (S[i], S[i+1], S[i+2], S[i+3]);

Se (rp = sucesso) i **B** i+3; k **B** i; interrompida = 1;

Senão Se (i <= n-2) rp **B** BuscaInterrompida (S[i], S[i+1], S[i+2]);

Se (rp = sucesso) i **B** i+2; k **B** i; interrompida = 1;

Senão Se (i <= n-2) rp **B** BuscaInterrompida (S[i], S[i+1]);

Se (rp = sucesso) i **B** i+1; k **B** i; interrompida = 1

Fim Enquanto;

3.14 O algoritmo de análise

Nesta sessão iremos detalhar o **algoritmo de análise**. A tarefa do **algoritmo de análise** é percorrer toda a seqüência de acordes da peça musical analisando-a de acordo com uma tonalidade global sugerida. Para fazer isto ele deve:

1. Reconhecer cadências simples e compostas respeitando a tonalidade global.
2. Reconhecer acordes diatônicos isolados, isto é, que não estão inseridos em nenhuma cadência identificada.
3. Classificar os demais acordes isolados como erro.
4. Gerar um escore que representa o grau de adequação da estrutura cadencial em relação à tonalidade global.

O reconhecimento das cadências simples e compostas respeitando a tonalidade global é feito usando a função *reconheceCadenciaAceita* vista acima, que retorna a posição do último acorde da cadência aceita reconhecida.

Para determinar se um acorde é diatônico, usaremos a função *diatônico(a)* que retorna *sim* caso o acorde *a* seja diatônico na tonalidade global. O conceito de acorde diatônico que utilizamos verifica se o acorde analisado se enquadra em algum padrão de acorde diatônico da tonalidade global levando em conta a raiz, o modo, a quinta e a sétima. Caso o acorde não se enquadre em nenhum dos padrões de acordes diatônicos, a função responde negativamente.

O quarto item, a geração do escore que representa o grau de adequação da estrutura cadencial em relação à tonalidade global, é contemplado pela função *geraEscore(a,b,S)*. Esta função recebe a posição do primeiro e do último acorde de uma cadência aceita assim como a seqüência de acordes. A função retorna um escore para a cadência aceita em relação à tonalidade global. A soma dos resultados desta função aplicada às cadências aceitas reconhecidas gera o escore de adequação da estrutura cadencial com a tonalidade global.

A função *geraEscore* será explicada na próxima sessão.

O algoritmo de análise funciona executando os passos abaixo:

1. Posiciona o índice de busca, **i**, no primeiro acorde do vetor de acordes **S**.
2. Repete os passos até que o índice de busca chegue ao fim do vetor de acordes:
 - 1) Utiliza o subprograma *reconheceCadenciaAceita* para reconhecer uma cadência aceita a partir do acorde **i**.

Caso alguma seqüência aceita seja reconhecida

- i*. Adiciona a análise da seqüência reconhecida à solução
- ii*. Adiciona o valor de *geraEscore* ao escore
- iii*. Posiciona o índice de busca no acorde imediatamente posterior à cadência reconhecida

Caso nenhuma seqüência aceita seja reconhecida

Se o acorde apontado por i, S[i], for diatônico

- i*. Adiciona a análise da seqüência reconhecida à solução
- ii*. Posiciona o índice de busca no acorde imediatamente

Caso contrário

- iii*. Adiciona a análise da seqüência reconhecida à solução
- iv*. Posiciona o índice de busca no acorde imediatamente

3. Ao final do processo, teremos a estrutura cadencial da peça musical para a tonalidade global sugerida.

O procedimento de análise é descrito em pseudo-código abaixo:

Seja $S[1..n]$ o vetor de acordes e T a tonalidade global sugerida

```

i B 1; //índice de busca
escore B 0; //escore que representa a adequação da estrutura
cadencial com a
//tonalidade global
Enquanto (i <= n)
  j B i;
  //função que reconhece cadências aceitas retornando
  //a posição do último acorde da cadência.
  //se não achar nada retorna i.
  i B reconheceCadenciaAceita(T,S, i, n);
  se (i != j)
    //cadência reconhecida
    Inclui a análise da cadência S[i]..S[j] na resposta.
    escore B escore + geraEscore(i,j,S);
  senão
    //não foi reconhecida nenhuma cadência aceita a partir de i
    se (diatônico (S[i]))
      Inclui a análise de grau do acorde S[i] na resposta.
    senão
      Reconhece S[i] como erro.
  //incrementa i tornando o próximo acorde da seqüência o início
  da busca.
  i B i + 1;
Fim Enquanto;
```

3.15 Escore de adequação e a função *geraEscore*

A determinação da tonalidade global da peça em estudo é obtida através da avaliação da adequação da estrutura cadencial determinada pelo Aho a cada uma das tonalidades candidatas. Tal avaliação é feita através de uma medida.

Para gerar esta medida, o escore de adequação da estrutura cadencial em relação à tonalidade global, analisamos separadamente cada cadência aceita que tenha sido reconhecida durante o processamento. Cada cadência aceita é submetida à função *geraEscore* que avalia a cadência considerando a tonalidade global e retorna o 'escore da cadência'. O escore da estrutura cadencial é o somatório dos escores das cadências aceitas. Esta decisão está em coerência com nossa idéia inicial de usar o conceito de cadência como explanação do conceito de tonalidade global.

A avaliação feita pela função *geraEscore* é muito simples. Ela verifica se a tonalidade local da cadência aceita é induzida pela tônica da tonalidade global. Se isso for verdade, a função retorna a quantidade de acordes da cadência. Caso contrário, retorna 0.

O critério que utilizamos se baseia nas propriedades da cadência composta e da busca do Aho. Como foi visto acima, o processo de encadeamento do Aho não é interrompido logo que encontramos uma cadência aceita. Ele continua tentando compor esta cadência até que não reste nenhuma opção de encadeamento e retorna a maior cadência aceita reconhecida. O que notamos é que as cadências resultantes deste processo extrapolam o conceito de cadência musical, passando a representar estruturas harmônicas maiores.

Verificamos, então, que estas estruturas harmônicas reconhecidas pelo Aho através das cadências compostas, nas músicas tonais, tendem a ser concluídas em um repouso tonal. Este repouso ocorre quando a cadência chega na tônica da tonalidade global, no caso das cadências comuns, ou em um substituto da tônica, no caso das cadências de engano, ou provocam a sensação de chegada na tônica, mesmo que esta não esteja presente, como se verifica no caso das cadências interrompidas. Assim, temos que a tonalidade local da cadência aceita, nestes casos, é induzida pelo acorde de tônica da tonalidade global.

Capítulo 4

Resultados e Discussão

4.1 Introdução

O objetivo principal deste trabalho foi a produção de um software que realizasse a análise harmônica de uma peça musical. Tal objetivo foi atingido e neste capítulo discutiremos os resultados alcançados e, em detalhes, realizaremos uma leitura detalhada do documento produzido durante a análise musical automática.

É óbvio, porém digno de citação, o fato de uma análise harmônica satisfatória não ser possível sem a exata determinação da tonalidade global da peça. Uma vez que a tonalidade é, no fundo, a abstração das relações mantidas entre os acordes formando cadências e, por sua vez, entre as cadências formando as estruturas cadenciais. Assim acreditamos que a conclusão sobre a tonalidade deve ser uma das conclusões da análise e não seu ponto de partida.

O Aho se alimenta exclusivamente de uma seqüência de acordes e representando a harmonia de uma peça musical, a partir dela, deriva a tonalidade global, captura o inter-relacionamento cadencial. Este era seu objetivo principal. Porém ele vai um pouco além. Como veremos a seguir, o Aho também detecta modulações e, para certos períodos estilísticos, infere padrões da estrutura de forma. Por hora falaremos do segundo e não menos importante objetivo deste trabalho: um documento que explicita o resultado da análise de forma a poder ser usado como um guia para o aprendizado da análise harmônica.

As cadências identificadas serão expostas em diferentes níveis de abstração, o grau ocupado dentro da tonalidade local à cadência, suas sub-função harmônica dentro da cadência e sua função de aproximação harmônica em relação à tonalidade global da peça.

4.2 O Documento

A seguir temos uma descrição detalhada do relatório produzido pelo Aho. O documento é composto de três partes, a saber, Cabeçalho, Pré-análises e Conclusão.

- **Cabeçalho**

A primeira linha apresenta o nome do autor e o título da música. Na segunda linha encontra-se a harmonia integral da música, ou seja, a lista de acordes na seqüência. Na terceira Linha encontram-se as tonalidades plausíveis, ou seja, entre todas as tonalidades possíveis, o Aho escolhe apenas aquelas para as quais há evidência positiva, o que reduz significativamente o espaço de busca.

- **Pré-análises**

A peça musical foi submetida a várias pré-análises. Uma para cada tonalidade plausível. Ou seja, de maneira independente, cada tonalidade plausível será considerada hipoteticamente como tônica global e, conseqüentemente, a instanciação das gramáticas e o próprio funcionamento do algoritmo que as gere será parametrizado por esta hipótese. Cada pré-análise então realizada receberá um ‘score’ e uma ‘taxa’ cuja finalidade é aferir a adequação harmônica entre a tonalidade plausível sugerida e a seqüência de acordes. As tonalidades que receberem ‘score’ superior a zero, serão listadas.

Embora o objetivo da IA esteja mais ligado à solução de um problema do que na simulação do processo pelo qual o ser humano atinge a solução, a confecção do Aho foi guiada pela idéia de uma solução obtida por um processo próximo ao realizado pelos músicos.

- **Conclusão**

A fase anterior forneceu um escore para cada pré-análise. A conclusão do processo consiste, então, de selecionar qual destas pré-análises, com sua tonalidade e estrutura cadencial, como solução.

Esta escolha é, geralmente, feita apenas verificando qual pré-análise obteve maior escore. Existem, porém, alguns casos onde os escores ficam muito próximos, diminuindo o grau de confiabilidade da solução.

Aplicamos, nestes casos, critérios de desempate que vão desde uma sofisticada busca de adequação entre a estrutura cadencial inferida e a estrutura formal, até critérios espartanamente simples como a “regra prática” “Uma música tradicionalmente começa e termina no acorde de tônica”.

<p>(D E) [bVII_Mixolidio I] {EMP_Mixolidio T} [EMP T] OT fim [Em] erro (A) [IV] [D] erro</p> <p>(B7m E7m) [V7m I7m] {D T} [D T] (E7m A) [V7m I] {D T} [D T] (A E D A) [I V IV I] {T D S T} [T D S T] (A E D A) [I V IV I] {T D S T} [T D S T] (A D A) [I IV I] {T S T} [T S T] (A D E A) [I IV V I] {T S D T} [T S D T] OT fim</p>
<p>tom: D Maior score: 3 taxa: 0.054545</p> <p>(A E D E A) [I V IV V I] {T D S D T} [T D S D T] (A E D E A) [I V IV V I] {T D S D T} [T D S D T] (A E D A) [I V IV I] {T D S T} [T D S T] (A E D E A) [I V IV V I] {T D S D T} [T D S D T] (A E D E A) [I V IV V I] {T D S D T} [T D S D T] (A E D E A) [I V IV V I] {T D S D T} [T D S D T] (A D E A) [I IV V I] {T S D T} [T S D T] (A E D E A) [I V IV V I] {T D S D T} [T D S D T] (A E D E A) [I V IV V I] {T D S D T} [T D S D T] OT fim</p> <p>[E] erro</p> <p>(D E)/A [IV V I] {S D T} [S D T] interrompida OT fim</p> <p>(Em A D) [I I m V I] {S r D T} [S D T] OT fim</p> <p>(B7m E7m) [V7m I7m] {D T} [D T] (E7m A) [V7m I] {D T} [D T] (A E D A) [I V IV I] {T D S T} [T D S T] (A E D A) [I V IV I] {T D S T} [T D S T] (A D A) [I IV I] {T S T} [T S T] (A D E A) [I IV V I] {T S D T} [T S D T] OT fim</p>
<p>6 1 52 3 1 38 2 1 3 3 2 0 7 1 0</p>

No cabeçalho foram citadas cinco tonalidades plausíveis, Lá Maior, Mi Maior, Ré Maior, Em Menor, Si Maior. Porém, só vimos as listagens correspondentes a três delas, Lá Maior, Mi Maior, Ré Maior. Isso se deve ao fato das outras duas terem obtido ‘score’ nulo, ou seja, nem mesmo uma única cadência que pudesse corroborar a suposta tonalidade foi encontrada.

(A) [I] {Tonica} O acorde de Lá maior (A) é identificado e considerado como suposta tônica.

(A E D E A) [I V IV V I] {T D S D T} [T D S D T]

A seqüência de cinco acordes A E D E A é identificada como uma variação da cadência perfeita na tonalidade de Lá maior. A partir daí cada um dos cinco acordes lidos é associado às sub-funções harmônicas correspondentes. Observe que a única alusão à existência de uma suposta tonalidade global é a verificação do último dos cinco acordes ser diatônico à tonalidade global.

Como já foi dito, a listagem contém três níveis de abstração. Os nomes dos acordes, (A E D E A), os graus que eles ocupam na tonalidade interna da cadência $\{V IV V\}$, suas sub-funções $\{T D S D T\}$ e suas funções primitivas $\{T D S D T\}$ ⁵.

Porém o Aho não encerra sua busca aqui, com seu algoritmo gestor de gramática busca identificar uma cadência harmônica mais complexa da qual a cadência recém encontrada de tamanho cinco seja apenas o começo. Como não se implementou cadências grandes diretamente e sim as pequenas na suposição de que todo o universo harmônico fosse uma composição delas, o algoritmo recua um passo e considera o quinto acorde, A, como o primeiro de outra cadência possível.

Mais cinco acordes são lidos e o próximo achado é novamente uma seqüência correspondente a uma variação da cadência perfeita na tonalidade de Lá maior. As duas seqüências são então compiladas e o processo se repete até não seja mais possível o acréscimo de nenhuma seqüência simples. Este é o momento de concluir então a primeira seqüência composta da música. Neste exemplo oito variações da cadência perfeita foram combinadas em uma única cadência composta.

```
(A E D E A) {V IV V} {T D S D T} {T D S D T}
(A E D E A) {V IV V} {T D S D T} {T D S D T}
(A E D A) {V IV} {T D S T} {T D S T}
(A E D E A) {V IV V} {T D S D T} {T D S D T}
(A E D E A) {V IV V} {T D S D T} {T D S D T}
(A E D E A) {V IV V} {T D S D T} {T D S D T}
(A E D E A) {V IV V} {T D S D T} {T D S D T}
(A E D A) {V IV} {T D S T} {T D S T}
(A E D E A) {V IV V} {T D S D T} {T D S D T}
(A E D E A) {V IV V} {T D S D T} {T D S D T}
(A E D E A) {V IV V} {T D S D T} {T D S D T}
(A E D E A) {V IV V} {T D S D T} {T D S D T}
(A E D E A) {V IV V} {T D S D T} {T D S D T}
(A E D E A) {V IV V} {T D S D T} {T D S D T}
(A E D E A) {V IV V} {T D S D T} {T D S D T}
(A E D E A) {V IV V} {T D S D T} {T D S D T}
interrompida OT fim
```

Exemplo 4.1: Primeira Cadência Composta encontrada.

O processo continua e, dessa vez não foi possível a identificação de nenhuma das cadências simples de tamanho cinco implementadas. Tampouco a busca por cadências simples de tamanho quatro foi frutífera. O que foi possível encontrar foi uma cadência de tamanho três (Em A D), correspondendo aos graus $\{III V I\}$ e às sub-funções $\{Sr D T\}$, $\{S D T\}$ da tonalidade de Ré maior. Como não foi possível se encontrar nada mais para se associar a estes três acordes, seja ... ou ..., a cadência composta terá tamanho um, resumindo-se a uma única cadência simples cuja tonalidade local é Ré maior. Observe que a tonalidade local desta cadência composta não corresponde à suposta tonalidade global que é Lá maior, o que, em si, não representa empecilho uma vez que é Re maior é mantém com a tonalidade de Lá maior a relação de sub-dominância, o que autoriza a aceitação da cadência recém identificada como uma corroboração da tonalidade global suposta.

(Em A D) {III V I} {Sr D T} {S D T} OT fim

Exemplo 4.2: Segunda Cadência Composta encontrada.

Ainda considerando Lá maior como tonalidade global o Aho encontrará a seguir uma cadência composta montada a partir de cinco cadências simples de variados tamanhos,

⁵ Neste exemplo assaz simples, há uma correspondência exata entre estes último dois níveis, retratando o caráter direto da harmonização empregada pelo compositor.

quatro, três e, até mesmo, dois. Observe que, desta vez, a harmonia varia um pouco mostrando a liberdade a que o compositor se autorizou próximo ao final da peça.

(B7m E7m) [V7m I7m] {D T} [D T]
 (E7m A) [V7m I] {D T} [D T]
 (A E D A) [I V IV I] {T D S T} [T D S T]
 (A E D A) [I V IV I] {T D S T} [T D S T]
 (A D A) [I IV I] {T S T} [T S T]
 (A D E A) [I IV V I] {T S D T} [T S D T] OT fim

Exemplo 4.3: Segunda Cadência Composta encontrada.

Encontramos a primeira cadência simples na tonalidade (local) de Mi maior, composta pelos acordes (B7m E7m) que correspondem localmente aos graus [V7m I7m] e às funções de dominante e tônica [D T]. Observe que esta cadência em Mi maior é aceita como corroboração da tonalidade global, Lá maior, pois guarda com ela a relação de dominância. A continuação da busca nos mostra o segundo acorde da primeira cadência simples cumprindo o papel de dominante na segunda cadência simples, cuja tonalidade local é , agora Lá maior. Uma série de cadências simples, todas em Lá maior encerra esta terceira cadência composta e de resto a música como um todo.

4.4 Detecção de Modulações

4.4.1 Música Modulante 1

Cabeçalho

Valsa_de_uma_cidade tom sugerido: C harmonia: C Am Dm G7m C Am Dm G7m C Am Dm G7m C Am7m F#m7m B7m E C#m F#m B7m E C#m F#m B7m E C#m5d7d Dm7m G7m C Am Dm G7m C Am Dm G7m Cm G7m Cm G7m C Am Dm G7m Dm G7m C Am Dm Db7m9M C Am Dm G7m C Am Dm G7m C C
Tonalidades Plausíveis: Dó Maior, Lá menor, Ré menor, Mi Maior, Dó # menor, ...

Pré-análises

Primeira pré-análise tom: C Maior score: 47 taxa: 0.783333
(C) [I] {Tonica} (C) [I]
(Am Dm G7m C) [VIm IIm V7m I] {Tr Sr D T} [T S D T] OT fim
(Am Dm G7m C) [VIm IIm V7m I] {Tr Sr D T} [T S D T] OT fim
(Am Dm G7m C) [VIm IIm V7m I] {Tr Sr D T} [T S D T] OT fim
(Am7m) [VIm7m] [F#m7m] erro [B7m] erro [E] erro [C#m] erro [F#m] erro [B7m] erro [E] erro [C#m] erro [F#m] erro [B7m] erro [E] erro
(C#m5d7d Dm7m) [Vllo Im7m] {D-VII° T} [D T] (Dm7m G7m C) [IIm7m V7m I] {Sr D T} [S D T] OT fim
(Am Dm G7m C) [VIm IIm V7m I] {Tr Sr D T} [T S D T] OT fim
(Am Dm G7m)/C [VIm IIm V7m I] {Tr Sr D T} [T S D T] interrompida OT fim
(Cm G7m Cm) [Im V7m I] {T D T} [T D T] (Cm G7m) [IVm_ETH I7m] {S[emp] T} [S T] (G7m C) [V7m I] {D T} [D T] OT fim
(Am Dm G7m)/C [VIm IIm V7m I] {Tr Sr D T} [T S D T] interrompida OT fim
(Dm G7m C) [IIm V7m I] {Sr D T} [S D T] OT fim
(Am Dm Db7m9M C) [VIm IIm bII7m9M I] {Tr Sr SubV7 T} [T S D T] OT fim
(Am Dm G7m C) [VIm IIm V7m I] {Tr Sr D T} [T S D T] OT fim
(Am Dm G7m C) [VIm IIm V7m I] {Tr Sr D T} [T S D T] (C C) [Retardo Harmonico] OT fim
6 1 52 3 1 38 2 1 3 3 2 0

7 1 0

Segunda pré-análise

tom: E Maior

score: 8

taxa: 0.133333

[C] erro
 [Am] erro
 [Dm] erro
 [G7m] erro
 [C] erro
 [Am] erro
 [Dm] erro
 [G7m] erro
 [C] erro
 [Am] erro
 [Dm] erro
 [G7m] erro
 [C] erro

(Am7m F#m7m B7m E) [IVm7m_ETH IIm7m V7m I] {S[emp] Sr D T} [S S D T] OT fim

(C#m F#m B7m E) [VIm IIm V7m I] {Tr Sr D T} [T S D T] OT fim

(C#m F#m B7m E) [VIm IIm V7m I] {Tr Sr D T} [T S D T]
 (E C#m5d7d)/B [IV VIIo-1 alnv I] {S D-VIIº T} [S D T] interrompida OT fim

[Dm7m] erro
 [G7m] erro
 [C] erro
 [Am] erro
 [Dm] erro
 [G7m] erro
 [C] erro
 [Am] erro
 [Dm] erro
 [G7m] erro
 [Cm] erro
 [G7m] erro
 [Cm] erro
 [G7m] erro
 [C] erro
 [Am] erro
 [Dm] erro
 [G7m] erro
 [Dm] erro
 [G7m] erro
 [C] erro
 [Am] erro
 [Dm] erro
 [Db7m9M] erro
 [C] erro
 [Am] erro
 [Dm] erro
 [G7m] erro
 [C] erro
 [Am] erro
 [Dm] erro
 [G7m] erro
 [C] erro
 [C] erro

6 1 52
3 1 38
2 1 3
3 2 0
7 1 0

Do acorde 15 ao acorde 25 obtemos uma sucessão de erros que significam o seguinte: na suposta tonalidade global de Dó maior, estes onze acordes não se encaixam, não sendo nem diatônicos nem constituem cadências que conduzam a diatônicos.

(Am7m)	[V7m 7m] {Tr} [T]
(F#m7m)	erro
(B7m)	erro
[E]	erro
[C#m]	erro
[F#m]	erro
[B7m]	erro
[E]	erro
[C#m]	erro
[F#m]	erro
[B7m]	erro
[E]	erro

Exemplo 4.4: O trecho ‘mal interpretado’ em Dó maior. Primeira pré-análise.

Observando a segunda pré-análise na tonalidade de Mi maior, verificamos que este mesmo trecho é bem interpretado e três cadências compostas são identificadas. Duas conduzindo à tonalidade local de mi maior e outra à de si maior, que, em conjunto confirmam, para este trecho, a tonalidade de Mi maior. Alguns acordes passam a ser diatônicos e todos são enquadrados em cadências reconhecidas.

```
(Am7m F#m7m B7m E) [IVm7m_Th IIm7m V7m I] {S[emp] Sr D T} [S S D T] OT fim
(C#m F#m B7m E) [VIIm IIm V7m I] {Tr Sr D T} [T S D T] OT fim
(C#m F#m B7m E) [VIIm IIm V7m I] {Tr Sr D T} [T S D T]
(E C#m5d7d)/B [IV VIIm-1alnv I] {S D-VII° T} [S D T] interrompida OT fim
```

Exemplo 4.5: O mesmo trecho, agora ‘bem interpretado’ em Mi maior. Segunda pré-análise.

A conclusão é que o trecho em questão é uma modulação. A primeira pré-análise capturou a tonalidade global e, através dos erros, detectou uma modulação. Enquanto a segunda pré-análise capturou a tonalidade da modulação.

Se obtivermos um número de erros superior a n, verificamos em qual das outras pré-análises com escore superior a zero, o mesmo trecho harmônico foi melhor validado. Desta forma conseguimos detectar modulações.

4.5 Resultados

Como resultado deste trabalho de dissertação, desenvolvemos uma solução o problema da análise harmônica automática. Do ponto de vista teórico a solução se baseia na representação de cadências através das gramáticas e do ponto de vista prático, através da confecção de um *software*, o Aho – analisador Harmônico Otimista.

Salientamos que o problema a que nos propusemos foi solucionado usando gramáticas livres de contexto, uma ferramenta teórica relativamente simples, porém empregada de maneira engenhosa.

Comparações:

Em [Tem99], o autor realiza uma análise harmônica simplória, não apresentando a capacidade de reconhecer as cadências formadas pelos acordes. A abordagem desenvolvida por Temperley, por não fazer referência explícita ao conceito de cadência, produz uma análise que relaciona os acordes somente com a tonalidade global, não evidenciando as cadências, isto é, o relacionamento entre os acordes. Neste trabalho a tonalidade global já é conhecida, ao contrário do nosso onde ela é determinada no decorrer da análise.

Apesar disto, devemos atribuir a Temperley o crédito merecido pela completude de seu trabalho, que consiste da análise da peça musical desde a correta nomeação das notas, passando pela análise rítmica e descoberta da tonalidade e chegando finalmente na análise harmônica, mesmo que limitada.

Em [Ste84] e [Ste96], o autor restringiu seu trabalho à análise de seqüências de jazz em 12 compassos. O Aho não apresenta restrições quanto à forma e ao estilo das peças, executando a análise harmônica de peças musicais tonais como um todo.

Steedman não apresenta nenhuma implementação de suas soluções. Além disso, ele não apresenta resultados da aplicação das soluções.

Resultados:

Como a matéria prima com a qual estamos tratando pertence ao campo das atividades artísticas, o procedimento de verificação do software se aproxima das atividades da ciência natural do que das ciências exatas. Vamos para a ‘bancada’ de trabalho e vamos aplicar o programa em exemplares vivos, ou seja, músicas.

Escolhemos para compor o corpo de testes músicas de diversos estilos; Música popular brasileira, Bossa Nova e Música Erudita

Os testes envolvendo música erudita incluíram o concerto de Brandemburgo nº 3 de J. S. Bach, o concerto para cordas “A Primavera” de Antônio Vivaldi e um quarteto de cordas de W. A. Mozart. A estas foram acrescentadas músicas eruditas populares brasileiras e Bossa Nova no total de 200 composições.

São aprovadas as análises em que o Aho explica a totalidade da peça avaliada e, além disso, e onde a tonalidade global inferida corresponde, de fato à tonalidade correta da peça. Ou seja, a análise produzida pelo Aho foi checada com análises produzidas por humanos, o que explica o total de apenas 200 composições testadas até agora.

4.6 Conclusão e Perspectivas

Fizemos a primeira avaliação utilizando apenas o escore obtido para a tonalidade a partir da estrutura cadencial. Nesta avaliação, dispensamos critérios ‘topológicos’ de aferição da tonalidade, como o tão conhecido “*Uma música, geralmente, termina e começa na tônica*”. Tampouco usamos uma sofisticação desse princípio que seria, diante do problema das modulações onde a parte modulante é numericamente maior que a parte da tonalidade principal, valorar as cadências iniciais e finais da peça.

A explicação para o abandono de ajuda tão forte e que vem da própria prática humana, é que, neste trabalho, desejamos extrair o máximo possível de informação das relações harmônicas. Acreditamos que para músicas compostas em um elevado nível intelectual e artístico, como é o caso daquelas dos grandes mestres, a harmonia de pode, se bem sondada, revelar segredos que vão além do próprio escopo harmônico, como a estrutura frasal e a delimitação da própria da estrutura formal da peça.

O resultado obtido nos testes foi de 85% de acerto. Este resultado indica que a análise do Aho está produzindo boas estruturas cadenciais na grande maioria dos casos.

Verificamos também que, em muitos casos, o fracasso na determinação da tonalidade da peça se deve a uma cifragem incorreta. Lembramos que uma parte das músicas testadas foi recolhida diretamente da Internet.

A explicação para o fato de se submeter o programa a tais casos é o desejo de que ele seja usado pelo público como instrumento de aprendizado. Assim ele dever ser robusto o suficiente para suportar entradas incorretas. Em um próximo passo, o Aho será usado para correção ortográfica de acordes (Chord Spelling).

4.6.1 Trabalhos futuros:

Até aqui se falou no Aho como um produto isolado, a seguir temos uma breve idéia de um projeto maior no qual o Aho se insere como um dos componentes:

A Apreciação Musical Automática

O problema da apreciação musical é uma atividade humana complexa e que, freqüentemente, desperta admiração e curiosidade. Como é possível que, apenas ouvindo, ou seja, “passivamente”, alguém possa decifrar um código tão intrincado e que custou séculos de genialidade humana para se consolidar?

A compreensão do fenômeno musical, no que se refere à análise musical, é o objetivo amplo do presente trabalho. Acreditamos que tal fenômeno não se revelará a não ser que o abordemos como um todo. Assim sustentamos que, por exemplo, o problema da análise harmônica, o da correta escrita musical (doravante chamado ortografia, neste texto) o problema da detecção de tonalidade e o da nomeação de acordes, não devem (e não podem) ser solucionados de maneira isolada.

A idéia então é um sistema composto por diferentes programas, um para cada problema citado anteriormente, porém as soluções produzidas por uns, serão consideradas como intermediárias e servirão como dados iniciais para outros, formando uma rede de informações. Este processo de alimentação e retro-alimentação se repetirá até que a análise atinja um grau de depuração esperado.

A Apreciação Musical Automática

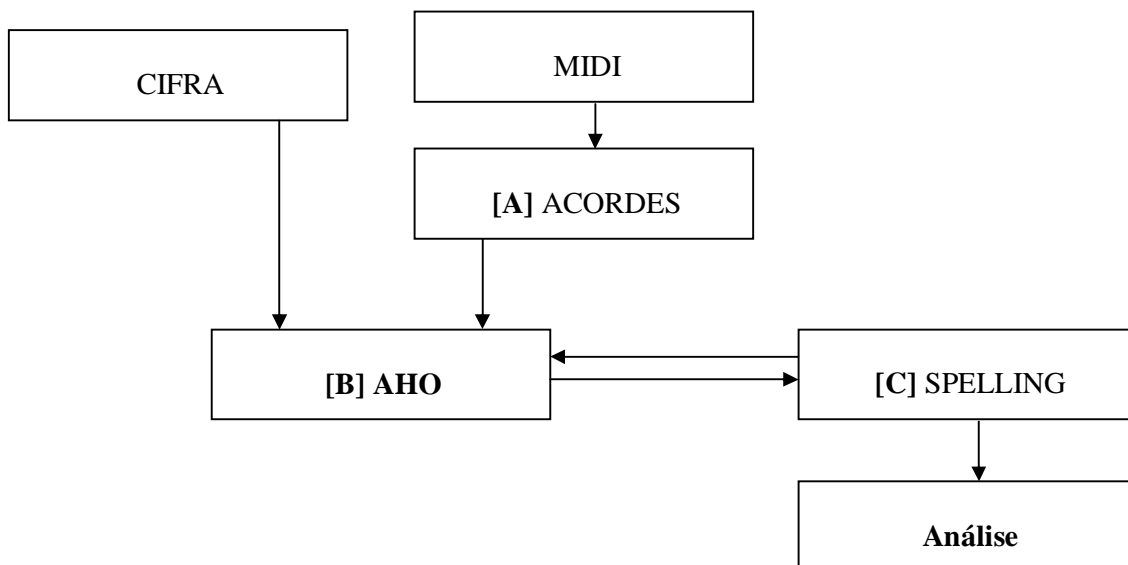
A entrada do sistema é uma peça musical que pode ser codificada em cifras ou em um arquivo MIDI.

[A] O módulo A induz os possíveis nomes de acordes da peça, ainda sem juízo sobre ortografia.

[B] O resultado do programa anterior alimentará um segundo com uma seqüência de acordes. Este realiza a análise harmônica (AHO).

[C] Um terceiro programa avalia o resultado obtido pelo programa de análise harmônica. C decide, então, se o resultado este resultado pode ser melhorado. Se não, modifica o nome de alguns acordes e envia a seqüência alterada para B.

Este ciclo se repete até que [C] verifique que o resultado de [B] não pode ser melhorado.



Bibliografia

- [Car63] R. Carnap.
Logical Foundations of Probability
The University of Chicago Press, Chicago, USA, 1963.
- [Che84] A. Chediak.
Dicionário de Acordes Cifrados
Irmãos Vitale, São Paulo, BR, 1984.
- [Lug98] G. Luger, W. Stubblefield.
Artificial Intelligence, Structures and Strategies for Complex Problem Solving.
Addison Wesley Longman, 1998.
- [Rus95] S. Russell, P. Norvig.
Artificial Intelligence, a Modern Approach
Prentice-Hall, 1995.
- [Shc78] A. Schoenberg.
Theory of Harmony.
University of California Press, 1978
- [Ste84] M. Steedman.
A Generative Grammar for Jazz Chord Sequences.
Music Perception, 2, 52-77.
- [Ste96] M. Steedman.
The Blues and the Abstract Truth: Music and Mental Models.
In A. Garnham and J. Oakhill, (eds.), *Mental Models In Cognitive Science.* Mahwah, NJ: Erlbaum 1996, 305-318.
- [Tem04] D. Temperley.
The Cognition of Basic Musical Structures.
The MIT Press, 2004.
- [Ben91] J. Benthem.
Categorical Grammar and Type Theory.
Journal of Philosophical Logic 20:225-263, 1991