



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO  
FACOLTÀ DI SCIENZE MATEMATICHE, FISICHE, NATURALI

Corso di Laurea in  
Scienze e tecnologie per la comunicazione musicale

ALGORITMI PER L'ANALISI ARMONICA  
IN DOCUMENTI IEEE 1599

Relatore: Chiar.mo Prof. Luca Andrea Ludovico

Correlatore: Dott. Adriano Baratè

Autore: Daniele Moiraghi  
Matr. 691774

Anno Accademico 2010/2011

# Indice generale

1. Introduzione	1
1.0 Premessa	1
1.1 Armonia e classificazioni armoniche	2
1.1.1 Un sistema, diverse “armonie”	2
1.1.2 A cosa serve l'analisi armonica?	3
2. Materiale dell'analisi armonica	4
2.1 Intervalli	4
2.2 Scale	9
2.3. La formazione degli accordi: due metodi	12
2.4 Sigle e accordi particolari	16
3. Definizione del progetto	21
3.1 Obiettivi e scelte progettuali	21
3.2 Lo standard IEEE 1599	22
3.3 Analisi dei problemi	27
3.3.1 Un requisito fondamentale: la correttezza formale	27
3.3.2 Logical Organized Spine (LOSP)	28
3.4 Strumenti di sviluppo: LINQ to XML	30
3.5 Esempi di queries	31
4. Algoritmi utilizzati	33
4.1 Individuazione dei parametri necessari all'analisi armonica	33
4.1.1 Organizzazione del LOSP	35
4.1.2 Calcolo dei VTU	36
4.1.3 Individuazione della nota fondamentale	37
4.1.4 Individuazione della specie di accordo	39
4.1.5 Rivolti	41
4.1.6 Adattamenti	41
4.2 Analisi armonica	42
4.2.1 Indicazione dei gradi	42
4.2.2 Individuazione della modalità	43

4.2.3 Adattamenti alla modalità	44
4.2.4 Funzioni armoniche particolari: dominanti secondarie e sostituzioni	44
5. Considerazioni finali	47
5.1 Correttezza formale: il caso di “King Porter Stomp”	48
5.2 Timebox non coerenti e modulazioni: “Promenade”	49
5.3 Le “Invenzioni a due voci”	50
Bibliografia	51

# 1. Introduzione

## 1.0 Premessa

Prima di presentare il progetto sembra doveroso fare una premessa: è ben chiaro ai trattatisti (e dovrebbe esserlo a chiunque si occupi di musica) che «l'armonia "pura" è un prodotto della teoria, utile per dimostrare alcuni rapporti in astratto; quando però si analizzano i rapporti armonici in un particolare brano musicale non si tratta più di teoria, ma di pratica, di applicazione della teoria e tali rapporti devono essere valutati in relazione agli altri elementi musicali»[17]. Essendo la pratica dell'analisi armonica un argomento estremamente vasto e, anche se regolato da norme teoriche precise, tutt'altro che una scienza esatta (anzi, spesso soggetta alla possibilità di diverse interpretazioni dello stesso fenomeno), il lavoro qui descritto non si prefigge l'obiettivo di sostituirsi all'operazione di analisi dei teorici musicali, ma piuttosto di porre l'attenzione sulle problematiche incontrate cercando di automatizzare tale operazione di analisi.

## 1.1 Armonia e classificazioni armoniche

### 1.1.1 Un sistema, diverse "armonie"

Quando si parla di Armonia, si intende l'insieme delle leggi che regolano i rapporti tra suoni simultanei. Riferendosi all'Armonia *tonale*, si indica in modo universalmente accettato lo studio di tali leggi applicate al sistema musicale sviluppatosi in Occidente a partire dal XVII secolo (il *Sistema tonale*), che stabilisce un rapporto di gerarchia tra la tonica (nota principale) e tutti gli altri suoni di una scala diatonica (cioè formata da una successione stabilita di toni e semitoni, determinati in base ai rapporti tra le frequenze (ad esempio, la scala maggiore). Seguendo la divisione operata in [21], le aree di applicazione dell'Armonia tonale possono essere identificate come segue:

- musica *colta* dei secc. XVII-XIX, ovvero una produzione musicale che implica avanzate considerazioni strutturali e teoriche e una trasmissione musicale scritta (definizione largamente diffusa e condivisa, nonostante tali caratteristiche siano ben presenti in molti altri generi musicali nati nel XX secolo e considerati in contrapposizione ad essa), i cui studiosi applicano le regole armoniche secondo un'impostazione definita *accademica*;
- musica pop o *leggera* (così definita perché si rivolge, con le dovute eccezioni, ad un pubblico mediamente meno istruito dal punto di vista musicale), le cui caratteristiche mutano in breve tempo, spesso dettate dalle esigenze dell'industria discografica, e musica derivata dalla tradizione popolare afroamericana (*e.g.*, jazz, blues *etc.*). Per la descrizione armonica di tali pratiche musicali si è sviluppato un metodo definito *moderno*.

Nonostante il "materiale di base" sia comune (scale, accordi, consonanze, ...) e le regole di analisi seguano molto spesso gli stessi principi, tra i due approcci esistono sostanziali differenze: l'Armonia classica è incentrata sullo studio della *condotta delle parti*, disciplina che regola, attraverso norme piuttosto rigorose, il movimento delle singole voci nei collegamenti armonici; regola molto nota ai teorici è, ad esempio, quella che stabilisce di evitare l'uso di alcune successioni di suoni quali, ad esempio, le "quinte parallele", che rappresentano invece una caratteristica peculiare di generi

come il rock (i cosiddetti *power chords*). L'Armonia moderna, al contrario, non preclude al compositore alcuna possibilità a riguardo, rendendo quindi la composizione una pratica meno soggetta a vincoli e restrizioni.

### *1.1.2 A cosa serve l'analisi armonica?*

Se analizzare significa “svelare la struttura della musica [...], e questo tipo di comprensione comporta un ascolto più consapevole” [17], lo studio dell'armonia di un brano è di fondamentale importanza per “capire” il brano stesso; l'analisi armonica, nonostante tenda a schematizzare solo una delle tante fasi del processo compositivo, rappresenta un strumento di comprensione che può risultare molto utile dal punto di vista dell'esecutore (agevola trasposizioni immediate, può evidenziare cadenze e *pattern* armonici su cui improvvisare, ...), del teorico, del musicologo (permette uno studio più consapevole di ciò che il compositore intende trasmettere attraverso la sua musica), dell'allievo...

## 2. Materiale dell'analisi armonica

Il presente progetto si rivolge in primo luogo a chi, a qualsiasi livello e per qualsiasi scopo, è attivo nell'ambito musicale. Il capitolo che segue non nasce dalla pretesa di inserire una guida o un manuale di teoria musicale (a riguardo si segnala il trattato di W. Piston, riportato in bibliografia) ma è sembrato opportuno riportare alcune regole fondamentali sulle quali si fonda lo studio dell'Armonia, se non altro per fornire un riscontro sui motivi di alcune scelte progettuali descritte nei prossimi capitoli.

### 2.1 Intervalli

L'intervallo è la distanza tra due suoni, misurata a partire dalla nota più grave. Nel Sistema tonale l'*ottava*, cioè la distanza tra due suoni di frequenza doppia l'uno rispetto all'altro (le cui note corrispondenti hanno nome uguale), è suddivisa in dodici parti uguali chiamate *semitoni*, che costituiscono l'unità di misura degli intervalli.<sup>1</sup> Una prima categorizzazione di un intervallo può essere fatta confrontandone l'ampiezza con quella dell'ottava: si dice *proprio* un intervallo la cui ampiezza è minore di 12 semitoni (dall'intervallo di *prima* o *unisono* fino a quello di *settima*). Viceversa, l'intervallo è definito *improprio*: *nona*, *decima* etc.<sup>2</sup>

---

1 Nel *Sistema temperato* o *Temperamento equabile*, ovvero il sistema attualmente utilizzato per la pratica musicale in Occidente, la differenza tra le frequenze del primo e dell'ultimo suono di un'ottava (ad esempio  $Do_4 - Do_5$ ) è pari a 1200 *cents*. Un semitono equivale quindi a 100 *cents*. Per una trattazione più ampia di tutti gli aspetti di fisica acustica, cfr. [5].

2 Teoricamente è corretto affermare che gli intervalli impropri siano infiniti. Nonostante non sia impossibile imbattersi in composizioni del XX sec. in cui siano indicate sigle di accordi di *ventisettesima*, *trentaseiesima* etc., è comunque d'uso comune considerare fino all'intervallo di tredicesima, cioè di sesta all'ottava superiore.

È interessante notare come, diminuendo di un'ottava la nota superiore di un intervallo improprio, si origini un intervallo proprio tale per cui

$$N_i - 7 = N_p$$

dove  $N_i$  è il valore dell'intervallo improprio e  $N_p$  quello dell'intervallo proprio. Ad esempio:

$La_4 - Si_5$	Intervallo di nona
$La_4 - Si_4$	Intervallo di seconda ( $9 - 7 = 2$ )

Vi sono casi in cui la differenza di ottava tra le due note che compongono l'intervallo deve essere ignorata e un intervallo improprio deve essere considerato come il corrispondente proprio; prima di procedere con l'analisi armonica è perciò importante conoscere la semplificazione di tali intervalli.

Un'ulteriore classificazione può essere effettuata considerando i parametri di *specie*. La successione dei suoni di cui è composta una *scala maggiore* (si veda il prossimo paragrafo) determina la formazione di due specie di intervalli:

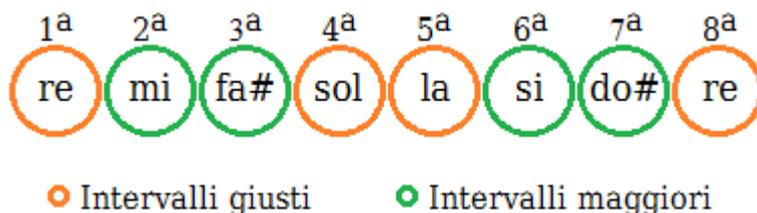
Intervalli giusti	1 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>	(8 <sup>a</sup> )
Intervalli maggiori	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	6 <sup>a</sup>	7 <sup>a</sup>

Questa classificazione si deve a Pitagora, il quale scoprì che i rapporti tra le frequenze che formano gli intervalli poi definiti *giusti* danno luogo a risultati molto semplici (1, 2/3, 3/4, 2), risultano quindi *consonanti* (ovvero, si scoprirà in futuro, molto simili per quanto riguarda la composizione armonica) e di conseguenza semplici all'ascolto.

Considerando la struttura di una scala maggiore, si osserva che gli intervalli hanno queste “distanze” in semitoni:

unisono	0 semitoni
seconda maggiore	2 st
terza maggiore	4 st
quarta giusta	5 st
quinta giusta	7 st
sesta maggiore	9 st
settima maggiore	11 st
ottava	12 st
nona (ottava + seconda)	12 + 2 st
...	

Nella costruzione degli intervalli sopraindicati le distanze dovranno essere rispettate a partire da qualunque tonica; poiché la distanza tra gradi congiunti non è sempre uguale (tra il terzo e il quarto grado, come tra il settimo e l'ottavo, la distanza è di un semitono, mentre tra tutti gli altri è di due), cambiando tonica di riferimento alcune note risulteranno alterate, secondo il principio del Circolo delle quinte<sup>3</sup>.



Scala di Re maggiore. Per rispettare le distanze in semitoni, è necessario l'utilizzo delle alterazioni.

3 Si tratta di un sistema per misurare la “distanza” tra le note in termini di consonanza, ovvero di similarità nella composizione armonica. L'unità di misura considerata è la quinta giusta, che rappresenta l'intervallo più consonante dopo l'ottava.

Oltre agli intervalli *naturali* (giusti e maggiori), due note possono generare intervalli *alterati*, cioè ridotti o ampliati di uno o più semitoni. È importante sottolineare che, poiché nel Sistema tonale esistono note *omofone*, ovvero note con nome diverso ma altezza uguale (e.g., fa diesis e sol bemolle), questa caratteristica si ripercuote anche sugli intervalli (re - fa diesis è costruito usando le stesse frequenze di re - sol bemolle ma, per le leggi dell'Armonia, gli intervalli che si formano sono, come si vedrà in seguito, concettualmente molto diversi tra loro).

Tutti gli intervalli, maggiori o giusti, se ampliati di un semitono, diventano *aumentati* o *eccedenti*:

mi - la		<i>quarta giusta</i>
mi - la <sup>#</sup>	}	<i>quarta aumentata</i>
mi <sup>b</sup> - la		

Gli intervalli maggiori, se ridotti di un semitono, si dicono *minori*, se di due, *diminuiti*:

fa - la		<i>terza maggiore</i>
fa - la <sup>b</sup>	}	<i>terza minore</i>
fa <sup>#</sup> - la		
fa - la <sup>b</sup> <sup>b</sup>	}	<i>terza diminuita</i>
fa <sup>#</sup> - la <sup>b</sup>		
fa <sup>x</sup> - la		

Gli intervalli giusti sono chiamati *diminuiti* se ridotti di un semitono, *più che diminuiti* se la riduzione è di due semitoni. È teoricamente possibile aumentare o diminuire all'infinito qualsiasi intervallo, nella pratica tonale è comunque difficile trovare intervalli alterati per più di due semitoni.

Un altro aspetto fondamentale riguardante gli intervalli utile per svolgere l'analisi armonica è quello che riguarda i *rivolti*, ovvero il “ribaltamento” di un intervallo, tenendo come “nota perno” quella con altezza maggiore e portando l'altra all'ottava superiore (la cifra a pedice indica l'ottava):  $la_4 - re\ diesis_5$  è il rivolto di  $re\ diesis_4 - la_4$ . Le norme che regolano i rivolti possono essere riassunte come segue:

- il grado di un rivolto è tale per cui

$$G_r = 9 - G_i$$

dove  $G_r$  è il grado del rivolto risultante e  $G_i$  è il grado dell'intervallo di partenza;

- il rivolto di un intervallo giusto è un intervallo giusto. *E.g.*,  $fa_3 - do_4$  (quinta giusta) →  $do_4 - fa_4$  (quarta giusta),  $do_3 - do_3$  (unisono o prima giusta) →  $do_3 - do_4$  (ottava);
- Il rivolto di un intervallo maggiore è un intervallo minore e viceversa. *E.g.*,  $re - si$  (sesta maggiore) →  $si - re$  (terza minore);
- Il rivolto di un intervallo eccedente è un intervallo diminuito e viceversa. *E.g.*,  $si - fa$  (quinta diminuita) →  $fa - si$  (quarta eccedente).

## 2.2 Scale

Per poter essere organizzati in un sistema, i suoni devono essere ordinati in successioni definite chiamate *scale*, secondo rapporti tra le altezze che variano da scala a scala. Come già visto, il Sistema tonale prevede la suddivisione dell'ottava in dodici suoni distinti. La scala che contiene tutti i dodici semitoni è detta *scala cromatica*.

La storia della musica occidentale, pur contemplando l'uso di dodici note, si basa su scale formate da sette suoni più l'ottava dette *diatoniche*. Una scala diatonica si dice *maggiore* se tra la prima e la terza nota si forma un intervallo di terza maggiore (cioè di quattro semitoni di distanza), e prevede la seguente suddivisione dei toni e semitoni:

1    2    3    4    5    6    7    (8)  
  T    T    ST    T    T    T    ST

Da questa scala deriva un'ulteriore scala diatonica, detta *minore naturale*:

1    2    3    4    5    6    7    (8)  
  T    ST    T    T    ST    T    T

Si può notare come la successione di toni e semitoni sia equivalente a quella della scala maggiore considerata a partire dal sesto grado (le due scale si dicono *relative*), come in questo caso:

do re mi fa sol la si do            Scala di *Do maggiore*  
la si do re mi fa sol la            Scala di *La minore*

ma anche che le due scale hanno caratteristiche comuni e differenze interessanti:

do	re	mi	fa	sol	la	si	do	Scala di <i>Do maggiore</i>
do	re	mi $\flat$	fa	sol	la $\flat$	si $\flat$	do	Scala di <i>Do minore</i>

Da quest'ultimo confronto si osserva che, mantenendo la stessa tonica e cambiando il *modo* da maggiore a minore (scale *parallele*), gli intervalli giusti non mutano, mentre gli intervalli maggiori (terza, sesta e settima) diventano minori. La scala minore presenta però una forte controindicazione: non contiene, infatti la *sensibile*, cioè il settimo grado a distanza di un semitono dall'ottava (infatti il settimo grado di una scala minore naturale è chiamato *sottotonica*, a sottolineare questa differenza). Essa assume fondamentale importanza per quanto riguarda la successione delle consonanze e dissonanze nella scala, poiché crea un forte senso di tensione verso la tonica. Per ovviare a questa mancanza di “movimento” può essere introdotta una nuova scala, chiamata scala minore *armonica*, dove il settimo grado è maggiore, come nella scala maggiore:

do	re	mi	fa	sol	la	si	do	Scala di <i>Do maggiore</i>
do	re	mi $\flat$	fa	sol	la $\flat$	si	do	Scala di <i>Do minore armonica</i>

In questo caso, però, la scala che si forma non è utile per descrivere un contesto “occidentale”; l'intervallo di seconda eccedente (tre semitoni) che si forma tra sesto e settimo grado suggerisce sonorità orientaleggianti, molto interessanti in alcuni contesti ma poco utili per essere considerate la base di un sistema musicale occidentale.

I due problemi incontrati precedentemente possono essere risolti introducendo una terza scala minore, chiamata *melodica*, in cui, oltre al settimo grado, viene innalzato il sesto grado, in modo che anch'esso risulti maggiore e l'intervallo di seconda eccedente

si trasformi in seconda maggiore. Dallo schema seguente si nota tuttavia come la scala melodica sia molto simile alla scala maggiore:

do	re	mi	fa	sol	la	si	do	Scala di <i>Do maggiore</i>
do	re	mi $\flat$	fa	sol	la $\flat$	si $\flat$	do	Scala di <i>Do minore melodica</i>

La differenza tra le due scale risiede unicamente nella terza, quindi esse sono difficilmente distinguibili all'ascolto in modo netto, soprattutto in direzione discendente. Al posto della scala melodica *discendente* (chiamata scala *bachiana* o *di Bach* a causa del largo uso di questa soluzione da parte del compositore tedesco) si preferisce, per marcare la distinzione tra maggiore e minore, l'uso della scala minore naturale. La descrizione della scala minore melodica include quindi la distinzione tra scala ascendente e discendente:

do	re	mi $\flat$	fa	sol	la $\flat$	si $\flat$	do	Scala melodica ascendente
do	si $\flat$	la $\flat$	sol	fa	mi $\flat$	re	do	Scala melodica discendente

## 2.3. La formazione degli accordi: due metodi

In musica, con il termine *accordo*, si indica una sovrapposizione di tre o più suoni a distanza di terza l'uno dall'altro.<sup>4</sup> A seconda delle *specie* di terza impiegate, l'accordo risultante avrà nome, caratteristiche, sonorità differenti.

1P	3M	5P		
do	mi	sol	TRIADE MAGGIORE	C
	3M + 3m			
1P	3m	5P		
do	mi $\flat$	sol	TRIADE MINORE	Cm o Cmin o C-
	3m + 3M			
1P	3M	5e		
do	mi	sol $\sharp$	TRIADE ECCEDENTE	C( $\sharp$ 5) o Caug o C+
	3M + 3M			
1P	3m	5d		
do	mi $\flat$	sol $\flat$	TRIADE DIMINUITA	Cdim o Cm( $\flat$ 5) o C°
	3m + 3m			

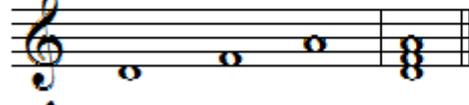
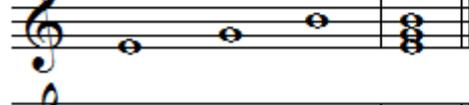
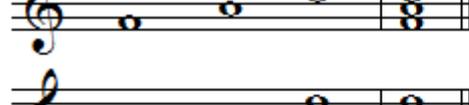
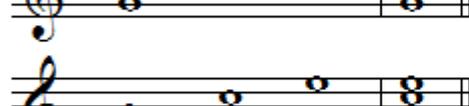
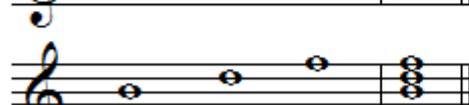
### LEGENDA

- 1P = intervallo di "prima" giusta o perfetta (unisono).  
Indica che il do è il primo grado partendo da do
- 3M = terza maggiore (distanza di 4 semitoni)
- 3m = terza minore (3 semitoni)
- 5P = quinta giusta o perfetta (7 semitoni)
- 5aug = quinta aumentata (8 semitoni)
- 5dim = quinta diminuita (6 semitoni)

---

4 Nonostante le prime pagine di quasi tutti i maggiori trattati di Armonia e Teoria musicale contengano definizioni equivalenti a quella proposta in questa pagina, che rappresenta la più diffusa e accettata tra coloro che operano in campo musicale, alle due caratteristiche espresse in tale definizione si contrappongono altrettante eccezioni (descritte in dettaglio nel corso dei manuali stessi e riprese nei prossimi capitoli di questo documento): anche in presenza di due suoni, infatti, è possibile che si possano riconoscere accordi, che vengono nominati *incompleti*, la cui funzione rimane esattamente la stessa dell'accordo *completo* equivalente. Si tratta di casi particolari ma comunque non rari nella prassi musicale: ne è un esempio il già citato *power chord* (non contiene, infatti, la terza).

La costruzione può essere effettuata anche a partire da una scala, in cui ogni nota può diventare la nota fondamentale di un accordo:

	SCALA DI DO MAGGIORE
	C (I)
	Dm (IIIm)
	Em (IIIIm)
	F (IV)
	G (V)
	Am (VIIm)
	Bdim (VIIIdim)

Armonizzazione a triadi della scala di Do maggiore.

Come precedentemente accennato, il Sistema tonale si basa su rapporti di gerarchia tra le note della scala, definiti secondo gradi di consonanza rispetto alla nota principale o *tonica* (quella che dà il nome al *tono* o *tonalità*, cioè alla scala - ad esempio, la nota *fa* sarà la tonica della *scala di Fa*). Ne deriva che il “movimento armonico”, vale a dire l'alternanza tra *tensione* e *distensione* (dissonanza e consonanza) che si crea in base costruzione di accordi su gradi definiti più o meno *stabili* (cioè consonanti), può essere descritto attraverso una serie di *gradi*, che stabiliscono in modo univoco (poiché frutto di rapporti matematici tra le frequenze dei suoni prodotti) la gerarchia tra gli accordi.

Per descrivere meglio questo rapporto di gerarchia è possibile individuare, negli accordi chiamati *primari*, cioè quelli costruiti sui gradi *giusti* della scala (ovvero gli accordi maggiori della tonalità), le strutture cardine dell'Armonia tonale:

- l'accordo di tonica, attorno al quale si sviluppa l'armonia, il più "stabile" e consonante, ideale per dare ad una successione di accordi un senso di risoluzione;
- l'accordo di dominante, il più dissonante, in contrasto con l'accordo di tonica, con il quale stabilisce un movimento armonico molto marcato che rappresenta la caratteristica fondamentale dell'Armonia tonale;
- l'accordo di sottodominante, che deve la sua instabilità alla presenza del quarto grado, il quale tende naturalmente a risolvere verso il terzo.

Gli altri accordi della scala possono essere assimilati a questi tre accordi tramite un confronto sulle note di cui sono composti ed essere inseriti nelle rispettive *famiglie*: della famiglia di tonica fanno parte anche terzo grado minore (infatti ha in comune con l'accordo di tonica il terzo e il quinto grado della scala) e sesto grado minore (in comune: primo e terzo grado); alla famiglia di dominante appartiene il settimo grado diminuito, a causa della presenza del *tritono*, ovvero dell'intervallo che si forma tra il quarto e il settimo grado della scala, il più dissonante nell'ambito del Sistema tonale; nella famiglia di sottodominante, che media tra le consonanze della famiglia di tonica e le dissonanze della dominante, oltre al quarto grado rientra anche l'accordo di sopratonica minore (questi due accordi hanno in comune il quarto grado della scala, ma non contengono il settimo).

Oltre alle tre note di base per la costruzione degli accordi (fondamentale, terza e quinta), è possibile sovrapporre ulteriori note, sempre a distanza di terza<sup>5</sup>, definite *tensioni*.

La *settima* è sicuramente la tensione più conosciuta; anzi, se dal punto di vista formale rimane comunque considerata una funzione superiore degli accordi, in alcune pratiche musicali (come il jazz, in cui gli accordi in forma triade non vengono quasi mai utilizzati) la settima è a tutti gli effetti un grado fondante dell'accordo.

Gli accordi a quadriade, a seconda della specie di terza ulteriormente sovrapposta alla triade di base, risulteranno come segue:

accordo di <i>settima maggiore</i>	triade maggiore o minore + settima maggiore
accordo di <i>dominante</i>	triade maggiore <sup>6</sup> + settima minore
accordo <i>minore settima</i>	triade minore + settima minore
accordo <i>semidiminuito</i>	triade diminuita + settima minore
accordo <i>diminuito settima</i>	triade diminuita + settima diminuita

Gli accordi fin ora considerati si presentano in *stato fondamentale*, le note di cui sono composti risultano cioè ordinate secondo il grado che rappresentano: fondamentale, terza (o seconda o quarta), quinta, settima *etc.* È molto comune, nella pratica musicale, l'utilizzo degli accordi *rivoltati*, ovvero in cui le note sono disposte in posizione diversa dallo stato fondamentale. Questa pratica risulta utile per mantenere la stessa nota al basso anche in presenza di un cambio d'accordo o per evitare "salti" eccessivi tra le note, che creerebbero un movimento delle voci assai poco gradevole all'ascolto.

---

5 L'armonizzazione a *quadriadi* prevede anche l'uso della *sesta maggiore*; essa non viene però considerata una tensione, quanto piuttosto un grado di risoluzione, per via della forte consonanza con la fondamentale.

6 È d'uso soprattutto nel jazz utilizzare come base degli accordi di dominante anche triadi *alterate* (eccedenti o maggiori con la quinta diminuita)

Un rivolto si ha quando il basso dell'accordo, cioè la nota più grave, è rappresentato da una nota diversa rispetto alla fondamentale: se la nota al basso è la terza, indipendentemente dalla specie dell'intervallo e dell'accordo, tale accordo si dice *in primo rivolto*; l'accordo è in secondo rivolto se al basso ha la quinta; una quadriade con la settima al basso è invece in terzo rivolto. Di seguito alcuni esempi:

	posizione fondamentale
	primo rivolto
	secondo rivolto
	terzo rivolto

## 2.4 Sigle e accordi particolari

Una volta individuate le caratteristiche di un accordo, è necessario stabilire un modo chiaro e semplice per renderle accessibili e facilmente interpretabili. Il sistema delle *sigle*, che si è sviluppato soprattutto con l'avvento del pop e del jazz, rappresenta il metodo più utilizzato a questo scopo.

Va precisato che, nonostante vi siano alcune convenzioni ormai radicate e universalmente accettate, a tutt'oggi non esiste un dizionario delle sigle: ne deriva che lo stesso accordo possa essere indicato in diversi modi, ma soprattutto che la stessa sigla possa dare luogo a diverse interpretazioni anche estremamente differenti. Non è raro trovare, contestualmente alla partitura di un brano, una legenda che spieghi il significato delle sigle usate nel brano stesso. È quindi opportuno, per una migliore comprensione di questo documento e dei risultati ottenuti dal software relativo

presente progetto (di seguito denominato *1599 HarmAnalyzer*), riportare di seguito alcune indicazioni sulle sigle utilizzate.

La notazione scelta per gli accordi è quella di derivazione anglosassone (le note fondamentali sono così indicate: A = la; B = si; C = do, ..., G = sol); per quanto riguarda, invece, note singole e tonalità, per evitare possibili fraintendimenti si è preferito utilizzare la nomenclatura italiana (le note sono indicate in minuscolo, le tonalità in maiuscolo): *Re*, quindi, sarà la tonalità con due diesis; *re* indicherà la nota dopo il *do*; *D* sarà la sigla usata per gli accordi con fondamentale *re*. Nelle sigle degli accordi, di seguito alla lettera e all'eventuale alterazione indicanti la fondamentale, saranno utilizzati alcuni simboli aggiuntivi mostrati di seguito, applicati agli accordi di *do* diesis:

Triade maggiore	nessun simbolo aggiuntivo: C#
Triade minore	C#m
Triade diminuita	C#°
Triade eccedente	C#(#5)
Accordo semidiminuito	C#m7(b5)
Accordo con settima maggiore	C#Maj7 o C#m(Maj7)
Accordo di dominante	C#7 o C#7(b5) o C#7(#5)
Accordo diminuito settima	C#°7
Accordo sospeso	C#sus2 o C#sus4 o C#sus2/4
	(se in forma di quadriade C#7sus2 / C#7sus4 / C#7sus2/4)
Accordo di quinta (senza terza)	C#5(no 3rd)

Per quello che concerne la descrizione delle funzioni armoniche, i gradi diatonici sono riferiti alla tonalità d'impianto, descritti tramite numeri romani (da I a VII), seguiti dalla specie dell'accordo (salvo in caso di un accordo maggiore) e dal rivolto relativo.

L'analisi "moderna" indica il rivolto di un accordo aggiungendone al grado e alla specie il grado della nota al basso rispetto alla fondamentale. Ad esempio, considerando un accordo di Am/C in tonalità di Do, esso sarà indicato come VIm/3, poiché il do è la terzo grado di la.

Il metodo accademico, invece, prevede l'uso di sigle che indicano il rivolto esplicitando gli intervalli che si formano a partire dalla nota al basso. In una triade in primo rivolto, la nota al basso genera un intervallo di terza e un intervallo di sesta: il rivolto sarà quindi "di terza/sesta"; le note di un accordo in secondo rivolto formano un rivolto "di quarta/sesta"; il terzo rivolto si ha in una quadriade con la settima al basso (rivolto "di seconda/quarta/sesta" o semplicemente "di seconda").

Accordo	Analisi accademica	Analisi moderna
F7	V7	V7
F7/A	V7 $\frac{6}{3}$	V7/3
F7/C	V7 $\frac{6}{4}$	V7/5
F7/E $\flat$	V7 $\frac{6}{4}$ $\circ$ V7 $\frac{6}{2}$	V7/ $\flat$ 7

Le due modalità sono pressoché equivalenti: per la realizzazione del progetto in questione è stato adottato il metodo accademico.

Nel caso di un brano in minore, poiché la scala minore naturale presenta terza, sesta e settima minore, questi gradi saranno indicati come  $\flat$ III,  $\flat$ VI,  $\flat$ VII, proprio in virtù del fatto che gli intervalli che si formano tra la tonica della scala e la fondamentale di questi accordi sono ridotti di un semitono rispetto a quelli *naturali* (se aumentati, vi si antepone un diesis). Lo stesso principio è applicato agli accordi non diatonici, ovvero costruiti su gradi *alterati* (ridotti o aumentati) rispetto alla tonica di riferimento.

Considerando un accordo di mi settima di dominante (E7) e tre tonalità di riferimento (ad esempio, La maggiore, Sol minore e Mi bemolle maggiore), è possibile evidenziare

ciascuno dei casi sopra indicati:

- in tonalità di La maggiore (che presenta tre alterazioni in chiave, fa diesis, do diesis e sol diesis), l'accordo sarà diatonico poiché tutte le note di cui è composto (mi, sol diesis, si, re) appartengono alla scala di riferimento. Esso sarà quindi analizzato come V7;
- in Sol minore (si bemolle e mi bemolle in chiave), l'accordo non è diatonico poiché contiene note che non sono presenti nella scala. È da osservare, però, che il mi è la quinta giusta di la, che è una nota diatonica (la seconda o *sopratonica*). In questo caso, quindi, l'accordo di E7 ha la funzione di *dominante secondaria*, la cui indicazione risulta del tipo *V/n* dove *n* è il grado, espresso in numeri romani, della *tonica secondaria* (in questo caso, essendo  $n = 2$ , sarà V/II), indipendentemente dalla specie di quest'ultima;
- in Mi bemolle maggiore (si bemolle, mi bemolle e la bemolle in chiave) l'accordo non è diatonico, non ha funzione di dominante nei confronti di nessun grado diatonico ed è costruito su un grado non diatonico: l'unisono eccedente. Essendo un accordo non diatonico, potrebbe essere classificato come  $\sharp I$ , indicazione corretta ma poco attenta alla funzione di tale accordo nel contesto attuale. Infatti, le note che compongono il tritono (v. anche sottopar. 1.2.3) di E7, cioè re e sol diesis, se rivoltate (trasformando sol diesis in la bemolle, per mantenere l'intervallo di quarta eccedente, anziché l'enarmonico quinta diminuita), danno origine ad un ulteriore tritono (l'intervallo di sei semitoni è infatti simmetrico nei confronti del suo rivolto). Il *diabolus*<sup>7</sup> che si forma può essere considerato il tritono di un nuovo accordo, che ha come terza maggiore il re e come settima maggiore il la bemolle, vale a dire Si bemolle settima di dominante, cioè il quinto grado della scala di partenza. In questo caso l'accordo di E7 svolge la funzione di *sostituzione* della dominante, e viene chiamato *sostituto del tritono*.

---

<sup>7</sup> Durante il Medioevo, l'intervallo di quarta eccedente veniva definito *diabolus in musica*, a causa della forte dissonanza prodotta.

L'ultimo caso da analizzare riguarda la presenza di un accordo diminuito. Esso può avere come fondamentale una nota

- diatonica: in questo caso la funzione è di tipo cromatico, infatti tale accordo si trova spesso prima dell'accordo diatonico costruito sulla medesima fondamentale, in modo che il basso rimanga fermo e le altre note risolvano sui gradi diatonici;
- non diatonica: in Armonia, l'accordo di *nona (maggiore o minore) incompleta* è un accordo di dominante (con aggiunta la nona maggiore o minore), di cui viene omessa la nota fondamentale; l'accordo che ne risulta è una quadriade *semidiminuita* o *di settima diminuita*, che sostituisce quindi la dominante costruita sulla terza maggiore discendente rispetto alla fondamentale dell'accordo diminuito:

G#°7	→		sol#	si	re	fa
E7(9)	→	mi	sol#	si	re	fa
G#m7(b5)	→		sol#	si	re	fa#
E7(9)	→	mi	sol#	si	re	fa#

## 3. Definizione del progetto

### 3.1 Obiettivi e scelte progettuali

Lo scopo principale del progetto qui descritto è rappresentato dalla realizzazione di un applicativo software che, ricevendo in input un file contenente informazione musicale ed elaborandone il contenuto, restituisca una serie di sigle di accordi ed una lista di simboli che ne descrivano la funzione armonica.

A questo scopo, durante la fase di analisi sono state individuate tre parti fondamentali di cui il software risulterà composto: la prima dovrà contenere gli algoritmi per l'individuazione e l'organizzazione dei dati preesistenti; la seconda fornirà gli strumenti necessari all'interpretazione e all'elaborazione dei risultati delle ricerche, generando nuova informazione; la terza racchiuderà le istruzioni per la corretta visualizzazione dei risultati ottenuti dal software. Il significato di tale suddivisione è principalmente concettuale ed è stato utile soprattutto durante la fase di progettazione, tuttavia già un primo sguardo al codice permette di individuare in maniera piuttosto definita queste tre aree, concatenate ma ben distinte tra loro.

Un'ulteriore questione di studio in fase preliminare è stata la scelta del formato di input. Sono state prese in esame diverse codifiche, tra le quali merita di essere menzionato il MIDI, possibilità interessante ma non ottimale: come tutti i formati orientati alla *performance*, a causa della mancanza della descrizione di parametri fondamentali quali ad es. indicazioni univoche sull'altezza delle note: nel formato MIDI, infatti, l'altezza delle note è codificata con un valore da 0 a 127, e non vi è indicazione sulla tonalità corrente (*e.g.*, il pitch MIDI numero 60 può corrispondere al do centrale ma anche a si diesis e re doppio bemolle). Ne consegue un consistente rischio di omofonie le quali, come si è visto, non possono essere tollerate durante l'operazione di analisi armonica, poiché fonte certa di errore.

A questo proposito, sono molto noti in letteratura algoritmi di predizione della tonalità e di *pitch spelling* (ad es., l'algoritmo di Cambouropoulos [4]), efficaci per processare

dati come quelli previsti dal MIDI ma molto dispendiosi in termine di calcolo. Sono molto più efficaci, da questo punto di vista, formati *orientati alla notazione*, come quelli basati su XML<sup>8</sup>, che contengono già la maggior parte dell'informazione necessaria all'analisi armonica. Tra questi, merita particolare interesse lo standard IEEE 1599.

## 3.2 Lo standard IEEE 1599

Negli ultimi decenni, grazie all'introduzione delle tecniche di codifica digitale dell'informazione, si è assistito alla nascita di numerosi strumenti informatici per l'elaborazione e la fruizione dei contenuti multimediali. L'informazione musicale, a causa della sua complessità e profonda stratificazione, rappresenta un settore di applicazione dell'informatica estremamente vasto e poliedrico e suggerisce numerosissimi punti di vista sotto i quali può essere considerata. L'informatica dell'ultimo periodo ha saputo creare tecnologie a favore di ognuno di questi ambiti (database per la catalogazione e la gestione delle informazioni su autori, compositori, anno di pubblicazione *etc.*, software per la produzione o l'analisi del suono, strumenti di individuazione e analisi delle strutture compositive, ear-training, scrittura di partiture, ...), tralasciando però un aspetto fondamentale dell'informazione musicale, ovvero la connessione logica e la sincronizzazione delle diverse modalità di rappresentazione degli oggetti musicali. La proposta di sviluppare uno standard per codificare l'informazione in maniera completa ed integrata venne lanciata da IEEE che, con l'apertura nel 2002 della Project Approval Request 1599 intitolata *Recommended Practice for Definition of a Commonly Acceptable Musical Application Using the XML Language*, chiedendo quindi esplicitamente l'utilizzo del linguaggio XML, diede seguito ai riusciti tentativi degli anni precedenti di adottare tale linguaggio per la descrizione dell'informazione di natura musicale (vedi nota nella pagina precedente). La logica con cui è progettato il linguaggio XML, infatti, si adatta perfettamente con la struttura multilivello dell'informazione musicale; il formato testuale ne rende estremamente

---

<sup>8</sup> Ad esempio, il formato di interscambio notazionale MusicXML, sviluppato da Michael Good e dal gruppo *Recordare* (<http://www.recordare.com>), o MusiXML (Gerd Castan, 1998).

facile la lettura, l'indipendenza dalla piattaforma ne agevola la possibilità di comunicare e condividere i contenuti codificata, anche in ambienti distribuiti (Internet), mentre la disponibilità di tools per l'implementazione e la predisposizione ad integrazioni e modifiche lo rendono un linguaggio potenzialmente mai obsoleto e sempre migliorabile.

Il progetto sviluppato dal Laboratorio di Informatica Musicale dell'Università degli Studi di Milano, che ha poi ottenuto il riconoscimento dello standard IEEE 1599 nel 2008, si basa sull'organizzazione della codifica secondo sei livelli di astrazione (*layers*), che costituiscono una mappa di collegamento tra l'informazione musicale presente all'interno del documento XML (dati musicali veri e propri e metadati informativi) e file esterni di diversa natura, sincronizzati tra loro: il contenuto musicale dei file multimediali associati non viene modificato e rimane manipolabile in modo indipendente all'esterno del file XML secondo gli standard di codifica già affermati.

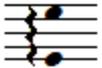
All'interno di un documento IEEE 1599, il fulcro della sincronizzazione dell'informazione è rappresentato dal layer *LOGIC*, a sua volta suddiviso in tre sottolivelli: *Spine*, che rappresenta la mappa temporale di tutti gli eventi musicali descritti; *LOS* (acronimo di *Logically Organized Symbols*), ovvero la descrizione di tutti gli eventi significativi all'interno della partitura; *layout*, sottolivello dedicato alla visualizzazione, non obbligatorio e variabile a seconda del media di output.

Poiché *Spine* e *LOS* hanno avuto un ruolo fondamentale nella realizzazione del presente progetto, sembra utile approfondirne le peculiarità; per ulteriori chiarimenti si rimanda al *Manuale di MX* [12].

Lo *Spine* è costituito da una serie di *tag* o etichette denominate *event*, che presentano tre attributi:

- *id*, che rappresenta un identificativo univoco, arbitrario, usato come riferimento ad uno specifico evento per tutte le manifestazioni o istanze dell'informazione musicale associata: il simbolo grafico in partitura, l'istante del filmato di un'esecuzione, il suono corrispondente, *etc.*;
- *timing*, che indica, attraverso un valore intero chiamato *VTU* (Virtual Timing Units, unità di tempo virtuali), la temporizzazione dell'oggetto descritto relativa all'evento precedente);

- *hpos*, che determina la spaziatura (relativa) tra gli eventi, utile in caso di elaborazione grafica degli stessi da parte di un editor. Essendo pratica comune, nel sistema di notazione occidentale *CWN* (*Common Western Notation*), quella di distanziare graficamente note e pause in rapporto alla loro durata, è intuibile come i valori di *timing* e di *hpos* riferiti al medesimo oggetto siano spesso coincidenti. In particolare, valori pari a zero indicheranno rispettivamente contemporaneità e verticalità spaziale che, nell'ambito della scrittura musicale, rappresentano, nella maggior parte dei casi, concetti assimilabili.

	<code>timing = 0</code>	<code>hpos = 0</code>
	<code>timing = 0</code>	<code>hpos = 2</code>
	<code>timing = 12</code>	<code>hpos = 0</code>

Esempi di codifica dei valori di *timing* e *hpos* in presenza di figure musicali particolari. I valori indicati si riferiscono alla nota più acuta.

Il concetto di VTU è simile a quello di *tick* di metronomo, la cui cadenza è definita di volta in volta in maniera arbitraria; il valore di VTU impostato in fase di creazione del file (*vtu\_amount* è, all'interno del layer LOS, attributo degli elementi *time\_signature*, ovvero le indicazioni di tempo), è rappresentato da un numero intero, e definisce in modo implicito la granularità degli eventi rappresentabili: un valore di 4 VTU per una misura da 4/4 non permetterà la descrizione di note di durata inferiore alla semiminima (escludendo anche le terzine di minime, poiché 4/3 non è un numero intero), impostandone invece il *vtu\_amount* a 192 sarà possibile rappresentare fino alle terzine di sessantaquattresimi ( $192 / 64 / 3 = 1$ ), ma resteranno comunque esclusi altri gruppi irregolari, come le quintine o le settimine.

È quindi fondamentale, di volta in volta, calcolare il valore di `vtu_amount` più appropriato per permettere la descrizione di tutte le suddivisioni presenti nel brano in esame, sempre con un occhio di riguardo nei confronti dell'ottimizzazione delle operazioni di calcolo.

Il LOS è il sublayer che contiene la descrizione di tutti i simboli rappresentati in partitura associati agli eventi; oltre alla notazione tipica occidentale (la già citata *Common Western Notation*), il formato prevede la possibilità di descrivere tali simboli tramite notazione neumatica o sotto forma di intavolature per strumenti a corda.

Rispettando l'idea di base di creare un formato naturalmente predisposto a successive implementazioni, IEEE 1599 è stato progettato in modo da consentire l'eventuale estensione ad altri sistemi di scrittura. La descrizione del foglio musicale è organizzata gerarchicamente secondo i principi stessi del formato XML:

- l'intera partitura è formata da una o più accollature (*staves*), a loro volta costituite da uno o più pentagrammi (sono ad esempio due nel caso del pianoforte o diversi considerando i legni dell'orchestra). Ciò farebbe sottintendere l'esclusione della possibilità di descrivere eventi che prevedono la "migrazione" di una voce da un pentagramma ad un altro, come mostrato in figura:



La descrizione di accollature e pentagrammi, tuttavia, si trova allo stesso livello gerarchico all'interno del LOS: ciò permette, attraverso l'utilizzo di appropriate indicazioni (attributi come *staff\_ref*, che indica il riferimento di un oggetto, in questo caso di una parte, ad un altro di livello più alto), di gestire in maniera corretta casi particolari come quello dell'esempio di cui sopra, offrendo la possibilità di cambiare dinamicamente i riferimenti tra parti e pentagrammi;

- ogni pentagramma contiene una o più voci (come nel caso di una partitura per coro o di due flauti che suonano parti differenti, oppure di uno strumento armonico) che viene considerata battuta per battuta;
- ciascuna battuta è formata da pause e accordi, i quali contengono una o più note di uguale durata. La scelta di descrivere le battute parte per parte e non in modo “verticale” e gli accordi come sovrapposizione di note appartenenti unicamente alla stessa voce, unita alla mancanza nello Spine di informazioni riguardo alla durata di un evento nota, rendono meno immediata l'interpretazione di tipo armonico.

### 3.3 Analisi dei problemi

La fase preliminare allo sviluppo di 1599 HarmAnalyzer ha coinciso con un periodo di studio e analisi degli eventuali problemi di cui tenere conto per raggiungere l'obiettivo prefissato.

#### 3.3.1 Un requisito fondamentale: la correttezza formale

Concentrando innanzitutto l'attenzione su ciò che avrebbe costituito l'input del programma, la prima questione che è stata analizzata deriva da un fenomeno strettamente legato all'ambito musicale: l'omofonia (si veda il sottopar. 1.2.1, *Intervalli*). È consuetudine, tra i compositori e i trascrittori di musica, inserire note omofone all'interno della partitura con lo scopo di ridurre l'uso delle alterazioni momentanee. Pur essendo vero che questa pratica agevola molto spesso un esecutore nella lettura, la scrittura che ne risulta è formalmente scorretta.



Una situazione del tipo mostrato in figura implica necessariamente un ragionamento rispetto alla trascrizione delle note, e non esclude possibili equivoci ed ambiguità anche a livello umano. Non da ultimo, la scorrettezza formale non consente l'applicazione di determinate procedure, descritte in dettaglio in seguito, su cui pone le basi l'intero sistema di funzionamento del software qui descritto: ad esempio, l'individuazione della nota fondamentale di un accordo (si veda il cap. 4, *Algoritmi utilizzati*).

### 3.3.2 Logical Organized Spine (LOSP)

Un'altra importante problematica analizzata in fase di analisi riguarda la temporizzazione: per individuare le diverse strutture armoniche è fondamentale ottenere una descrizione delle sovrapposizioni di suoni, conoscere istante per istante (o all'interno di un intervallo temporale) tutti gli eventi-nota che stanno *suonando*.

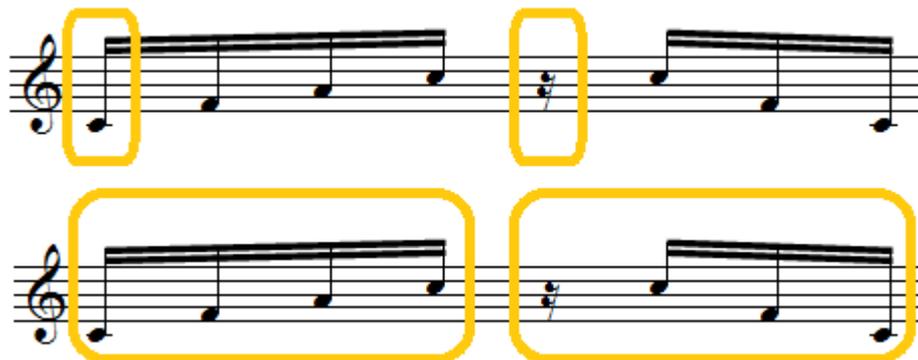
Il sublayer Spine rappresenta un ottimo punto di partenza, ma le informazioni in esso contenute non risultano sufficienti allo scopo: le indicazioni di sincronizzazione presenti, infatti, si riferiscono unicamente al momento di *attacco* dell'evento musicale associato, manca quindi qualsiasi informazione che ne riguardi la durata.

Inoltre, lo Spine stabilisce la successione temporale in maniera *relativa*: un'analisi superficiale potrebbe individuare la soluzione al problema nell'indicazione di timing uguale a zero (contemporaneità). Tuttavia, per lo stesso motivo sopra menzionato, tale valore, se preso singolarmente, non è significativo, poiché indica unicamente la contemporaneità tra gli istanti iniziali di un evento e di quello immediatamente precedente.

È quindi necessario organizzare un sistema per far corrispondere in modo coerente le informazioni di temporizzazione presenti nei sottolivelli Spine (di tipo relativo e riferite solo al momento di attacco) e LOS (indicazioni di durata sotto forma di frazione); tale sistema può essere progettato a partire dagli attributi *id* e *event\_ref* dei nodi di tipo nota (presenti rispettivamente nello Spine e nel LOS), uniti all'indicazione dei VTU (v. par. 3.2). Essi rappresentano la base per la creazione di una mappa di temporizzazione assoluta che evidenzia le note *attive* in qualunque istante del brano: il *LOSP (Logical Organized SPine)*.

La prima soluzione presa in esame per la realizzazione del LOSP prevedeva la focalizzazione della ricerca sugli istanti armonicamente più significativi (ad esempio, i tempi forti): tale possibilità è stata immediatamente accantonata, poiché di scarsa efficacia se applicata a sovrapposizioni armoniche non ben definite (ad es., in presenza di un arpeggio). L'idea di suddividere il brano in *finestre* temporali all'interno delle quali individuare gli accordi è risultata più convincente. Questa segmentazione, riprendendo il concetto di *beat-space* illustrato in [8], individua una serie di *timeboxes* (letteralmente “contenitori di tempo”), ognuno dei quali include più note anche non

sincroniche o non posizionate *in battere*.

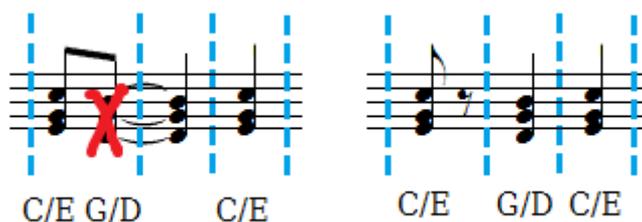


Un altro aspetto non indifferente che è stato analizzato per una gestione coerente del LOSP è la presenza di *anticipazioni ritmiche*:



Un caso simile a quello illustrato porterebbe il programma a considerare le note in levare come facenti parte del primo accordo, mentre esse sono chiaramente un'anticipazione dell'accordo successivo. Dato che il concetto alla base è uno *spostamento* dell'accento ritmico da un battere al levare del movimento precedente, è possibile trattare le anticipazioni ignorando la porzione "anticipata" delle note in esame, cioè quella che precede il battere (indicata graficamente alla sinistra della legatura di valore, e corredata dell'elemento *tie* all'interno del documento IEEE 1599).

Così facendo, le note non saranno considerate attive nel timebox relativo al movimento contenente l'anticipazione, ma verranno analizzate unicamente nel timebox successivo.



## 3.4 Strumenti di sviluppo: LINQ to XML

LINQ to XML fornisce un'interfaccia di programmazione che sfrutta .NET LINQ (Language-Integrated Query) Framework. LINQ to XML utilizza le funzionalità del linguaggio .NET Framework più recenti e può essere paragonato a un'interfaccia di programmazione XML DOM aggiornata e riprogettata. Essa comprende un *DOM* (Document Object Model) compatibile con LINQ, e un set supplementare di operatori di query.

La famiglia di tecnologie LINQ assicura una maggior coerenza per l'esecuzione di query su oggetti (LINQ to Objects), database relazionali (LINQ to SQL) e XML (LINQ to XML).

Grazie a tale integrazione tra LINQ e LINQ to XML, è possibile scrivere query sul documento XML in memoria per recuperare raccolte di elementi e di attributi.

Una peculiarità interessante di LINQ to XML è costituita dalla possibilità di utilizzare risultati di query come parametri di costruttori di oggetti *XElement* e *XAttribute*, consentendo di disporre di un potente approccio per la creazione di strutture ad albero XML.

La classe principale è *XDocument*: attraverso l'uso dei metodi *Load*, *Parse* e *Save*, essa permette di caricare, decodificare o salvare un documento XML. Da esso, tramite la proprietà *Root*, si ha accesso all'elemento radice sul quale è possibile invocare una serie di metodi per ottenere uno specifico elemento figlio o un attributo.

```
// Crea l'XDocument a partire dal documento caricato.  
  
documentoCaricato = XDocument.Load(openFileDialog.FileName);  
  
// Ottieni la root.  
  
XElement elementoradice = documentoCaricato.Element("ieee1599");
```

## 3.5 Esempi di queries

Lo standard IEEE 1599 costituisce un campo di applicazione estremamente ampio degli strumenti offerti da LINQ, che possono essere sfruttati per effettuare ricerche complesse all'interno della struttura gerarchizzata del file XML. Di seguito sono riportati alcuni esempi di queries che rappresentano i passaggi salienti della programmazione del software.

```
IEnumerable<XElement> eventoCorrispondente =  
    from eventi in elementoradice.Descendants("los").Descendants()  
    where eventi.Attribute("event_ref") != null &&  
    eventi.Attribute("event_ref").Value ==  
    listaEventiInSpine[indiceListaSpine].Attribute("id").Value  
    select eventi;
```

Query di preambolo alla creazione del LOSP, in cui vengono messi in relazione gli elementi del LOS con quelli dello Spine. La clausola *where* specifica che l'elemento trovato dovrà avere un *event\_ref* uguale all'*id* del suo corrispondente.

```
for (int numeroTimeBox = 1; numeroTimeBox <= quantitàTimeBox; numeroTimeBox++)  
{  
    IEnumerable<noteStruct> noteComprese = from note in listaDescrizioneNote  
    where (note.timingInizio >= timeBox.timingInizio &&  
    note.timingInizio <= timeBox.timingFine) ||  
    (note.timingFine >= timeBox.timingInizio &&  
    note.timingFine <= timeBox.timingFine) ||  
    (note.timingFine >= timeBox.timingFine &&  
    note.timingInizio <= timeBox.timingInizio)  
    select note;  
}
```

Query di ricerca delle note *attive* all'interno di un timebox: sono incluse le note che attaccano, che terminano o che attraversano per intero la finestra temporale corrente.

```

IEnumerable<noteAccordoStruct> bassi = from note in descrizioneAccordo.listaNote
    where note.nomeNota == scalaDiDo[indiceNotaAlBasso] &&
        note.ottavaNota == ottavaMinima
    select note;

descrizioneAccordo.notaAlBasso = bassi.First();

```

Ricerca della nota al basso. La lista denominata *scalaDiDo* contiene uno schema per il calcolo delle distanze di tutte le note da do, preso come punto di riferimento comune.

```

IEnumerable<XElement> eventiPrimaVoce =
    from eventi in elementoradice.Descendants("voice").Descendants()
    where eventi.Name == "chord" || eventi.Name == "rest" &&
        eventi.Parent.Attribute("voice_item_ref").Value == primaVoce
    select eventi;

```

Query per l'individuazione degli elementi “nota” o “pausa” della prima voce. L'uso della proprietà *Parent* permette di eseguire la ricerca a partire da caratteristiche specifiche del nodo *padre* del nodo considerato.

## 4. Algoritmi utilizzati

### 4.1 Individuazione dei parametri necessari all'analisi armonica

Le prime operazioni eseguite dal programma riguardano una serie di ricerche da condurre per ricavare tutte le informazioni necessarie al fine di eseguire una coerente analisi armonica: tonalità, indicazioni di tempo, note e relative caratteristiche, vale a dire la quasi totalità dell'informazione deducibile da una partitura. Il target di questa ricerca è facilmente individuabile nel sublayer LOS.

La grande problematica che si genera a questo punto è rappresentata dalla temporizzazione, ovvero la descrizione degli elementi musicali come successione di eventi: il LOS contiene informazioni relative alla durata, espressa in frazione, di un evento di tipo nota o pausa ma non ne permette la localizzazione e la descrizione fortemente strutturata del contenuto musicale non ne agevola la sovrapposizione agli eventi contemporanei presenti in altre voci.

Tale questione non è quindi risolvibile in modo efficace estrapolando unicamente informazione dal LOS, ma può essere gestita agevolmente tramite la creazione di una mappa temporale (che tenga conto perciò della temporizzazione descritta nel sottolivello Spine) alla quale siano però associati, in maniera diretta e facilmente accessibile, tutti i parametri musicali relativi.

Poiché molta dell'informazione necessaria è già racchiusa all'interno del documento di input, è stata esclusa, in fase di progettazione, la possibilità di integrare algoritmi di ottimizzazione degli intervalli<sup>9</sup>, tenendo conto del fatto che:

- 1) la quasi totalità dell'informazione relativa alle altezze è già descritta in modo corretto nel formato di input, per cui il rapporto tra il peso computazionale

---

<sup>9</sup> Tali algoritmi sono molto efficaci nell'interpretazione di dati codificati secondo formati di performance (come il MIDI) ma poco utili una volta stabilito lo sviluppo del progetto a partire da un input di tipo IEEE 1599 (v. par 3.1 e cfr. [3], [4] e [14]).

dell'algoritmo (che dovrebbe essere applicato a tutte le note, anche quelle corrette) e la quantità di informazioni effettivamente ricavate risulterebbe molto svantaggioso;

- 2) gli errori formali derivanti dall'uso di simboli omofoni costituiscono una percentuale irrisoria rispetto alla quantità di dati corretti;
- 3) la correttezza formale può essere considerata un giusto requisito per il raggiungimento dello scopo prefissato (anche nella pratica non automatizzata, il teorico "corregge" gli intervalli prima di procedere all'analisi).

Dato che l'analisi armonica definisce le funzioni degli accordi in rapporto alla tonica, è invece risultato necessario implementare un algoritmo per l'individuazione della modalità. Infatti, ad ogni serie di alterazioni (già esplicitata all'interno del documento IEEE 1599) corrispondono due scale o tonalità differenti (maggiore e relativa minore).

```
<key_signature event_ref="keysig_0">  
<flat_num number="2"/>  
</key_signature>
```

Descrizione della quantità e del tipo di alterazioni in un documento IEEE 1599. La modalità di riferimento non è direttamente deducibile.

Dato che l'algoritmo in questione riceve in input dati già relativi all'analisi, esso sarà descritto in dettaglio nel par. 4.2, *Analisi armonica*.

### 4.1.1 Organizzazione del LOSP

L'idea di base che ha accompagnato la creazione del LOSP (cfr. sottopar. 3.3.2) deriva dall'esigenza di organizzare gli eventi di tipo nota secondo una temporizzazione di tipo assoluto, condizione necessaria per localizzare le sovrapposizioni armoniche in atto nei diversi momenti del brano. Questa *linea del tempo* risulterà suddivisa in una serie di finestre temporali di ampiezza fissata (*timeboxes*), che costituiranno i “contenitori” degli accordi.

La durata della singola finestra è calcolata utilizzando un algoritmo che tiene conto dei seguenti parametri:

- durata, espressa in VTU, di una misura, definita dall'attributo *vtu\_amount* di ciascuna indicazione di tempo (elemento *key\_signature*) o eventualmente calcolata tramite l'applicazione dell'algoritmo di cui al sottopar. 4.1.3;
- valore del denominatore (attributo *den* di *key\_signature*) che, unito al valore del numeratore, definisce il numero di suddivisioni da operare, ovvero la quantità di *timeboxes* contenute in una battuta<sup>10</sup>;

L'ampiezza in VTU di una singola *timebox* si ottiene dividendo il valore di *vtu\_amount*, cioè la durata di una misura, per il numero di *timeboxes* in essa contenute.

---

<sup>10</sup> Nei tempi musicali *binari* o *semplici* (4/4, 2/2, 3/4, ...) il numero di accenti *principali* in una battuta corrisponde al numero di suddivisioni indicato dal numeratore della frazione (in 4/4, vi sarà un accento in corrispondenza di ogni quarto). Nei tempi *ternari* o *composti*, invece, l'accento cade ogni tre suddivisioni (una battuta da 6/8 avrà accenti sul primo e sul quarto ottavo).

### 4.1.2 Calcolo dei VTU

Nel DTD<sup>11</sup> di IEEE 1599, il valore di *vtu\_amount* fa riferimento ad un attributo opzionale dell'elemento *key\_signature*.

Essendo un parametro fondamentale per la suddivisione e l'organizzazione del LOSP, in assenza della sua dichiarazione è necessario utilizzare un algoritmo per il calcolo del suo valore.

L'algoritmo per il calcolo dei VTU estrapola l'informazione relativa sia all'indicazione di tempo (durata totale, ovvero la differenza tra i valori di *timing* dell'indicazione di tempo successiva - o, se l'indicazione attuale è unica o ultima, l'istante finale del brano - e dell'indicazione attuale stessa) che al primo evento della prima voce, di cui può ricavare la durata in VTU (che è pari al valore di *timing* del secondo evento della prima voce, indicato nello Spine) e la frazione equivalente all'interno del LOS. La formula che ne descrive il principio è la seguente:

$$vtu = \frac{d \cdot F}{f}$$

dove *d* è la durata in VTU del primo evento, *f* la sua durata espressa sotto forma di frazione e *F* è il rapporto tra i valori di *num* e *den* dell'indicazione di tempo. Ad esempio, avendo una battuta di 3/4 e un primo evento di 1/8 con durata pari a 100 VTU, applicando la formula si ha:

$$vtu = \frac{100 \cdot \frac{3}{4}}{\frac{1}{8}} = 75 \cdot 8 = 600$$

che corrisponde alla durata di sei note da un ottavo ciascuna (ovvero l'equivalente dei tre quarti di una misura).

---

<sup>11</sup> Acronimo di *Document Type Definition*, ovvero uno strumento utilizzato ad integrazione dei linguaggi di *markup*, una sorta di “regolamento” che ne definisce gli elementi e gli attributi ammessi, con indicazioni sulle relative cardinalità.

### 4.1.3 Individuazione della nota fondamentale

Una volta individuate le note contenute all'interno del primo timebox, è necessario stabilire quale tra queste sia la fondamentale dell'accordo. Essa, oltre ad essere la nota che dà il nome all'accordo, è la "radice" alla quale fare riferimento per stabilire gli intervalli che si formano e, quindi, il tipo di accordo.

Un algoritmo utile a questo scopo è quello sviluppato da Craig Sapp (cfr. [19]): tale procedimento si basa sul principio della "distanza di terze", ovvero un confronto degli intervalli che le diverse note dell'accordo formano con ciascuna delle sette note naturali, misurati secondo un *circolo di terze*<sup>12</sup>.

Se, ad esempio, si volesse stabilire la fondamentale di un accordo formato da re, fa diesis, la e do, basterebbe localizzare la distanza di ogni nota da ciascuna potenziale fondamentale. Il calcolo per la nota re sarebbe basato su questa successione:

	0	1	2	3	4	5	6	(0)
do	<i>do</i>	<i>mi</i>	<i>sol</i>	<i>si</i>	<u><i>re</i></u>	<i>fa</i>	<i>la</i>	( <i>do</i> )
re	<u><i>re</i></u>	<i>fa</i>	<i>la</i>	<i>do</i>	<i>mi</i>	<i>sol</i>	<i>si</i>	( <i>re</i> )
mi	<i>mi</i>	<i>sol</i>	<i>si</i>	<u><i>re</i></u>	<i>fa</i>	<i>la</i>	<i>do</i>	( <i>mi</i> )
...								
si	<i>si</i>	<u><i>re</i></u>	<i>fa</i>	<i>la</i>	<i>do</i>	<i>mi</i>	<i>sol</i>	( <i>si</i> )

"Circolo delle terze" a partire da ciascuna nota naturale. Le cifre in ascissa indicano la distanza in termini di terze.

La nota re si troverebbe quindi a distanza 4 da do, 0 da re, 3 da mi...

---

<sup>12</sup> Il concetto alla base di questa costruzione è molto simile a quello riferito al più noto *Circolo delle quinte*, utilizzato in ambito teorico per stabilire, ad esempio, le successioni delle alterazioni nelle diverse tonalità. L'algoritmo in questione non contempla di proposito le note con alterazioni, poiché la distanza non è influenzata dalla specie di terza che si forma. La distanza in termini di terze tra do e mi, tra do e mi diesis o tra do diesis e mi doppio bemolle, è comunque pari a uno.

Ripetendo la stessa operazione per le altre note, e sommando le distanze delle diverse note riferite alla stessa fondamentale, risulterebbe:

$$\text{distanza da do} = 4 + 5 + 6 + 7 = 22$$

$$\text{da re} = 0 + 1 + 2 + 3 = 6$$

...

$$\text{da si} = 1 + 2 + 3 + 4 = 10$$

La fondamentale dell'accordo risulta quella con associata la somma minima, in questo caso il re.

Ovviamente, in caso di presenza di un'alterazione alla nota individuata come fondamentale, non contemplata in fase di confronto fra terze, essa farà parte del nome dell'accordo trovato e sarà considerata durante la successiva fase di individuazione della specie di accordo.

L'algoritmo è estremamente affidabile in caso di un'occorrenza per ciascuna nota. Riprendendo l'esempio di cui sopra, se la nota do occorresse molte volte, mentre le altre una volta sola, la distanza da re sarebbe incrementata di tre ad ogni nota do considerata, mentre la distanza da do rimarrebbe uguale, poiché do dista tre "terze" da re ma zero da do. La somma delle distanze relative al re potrebbe quindi superare quella relativa al do, generando evidentemente un errore. Al fine di ottenere un'applicazione coerente dell'algoritmo, il calcolo è stato impostato in modo da operare il confronto una volta sola per ogni altezza (nome di nota) trovata (tramite il metodo *Distinct*<sup>13</sup>), e non per ognuna delle note presenti nel timebox.

---

<sup>13</sup> Per approfondimenti sulla programmazione e sul linguaggio C#, cfr. [2], [15] e [20]

#### 4.1.4 Individuazione della specie di accordo

Definita la fondamentale, si procede all'individuazione degli intervalli che le altre note formano con essa. Il concetto che è stato applicato a questo passaggio si basa sulla ricerca degli intervalli per la costruzione dell'accordo:

- se non è riconoscibile alcun intervallo, ovvero le altezze contenute all'interno del timebox corrente (considerate distintamente, come per l'algoritmo descritto nel sottoparagrafo precedente) sono in numero minore di due, l'algoritmo restituisce "n.c.", cioè *no chord*;
- il primo grado oggetto di ricerca è il terzo. L'algoritmo è costruito in modo che la terza maggiore prevalga in caso di presenza di più specie di terze, quando sono presenti cromatismi o in alcune pratiche musicali di derivazione blues<sup>14</sup>. Poiché terza maggiore e terza minore sono le uniche che concorrono, nel Sistema tonale, alla formazione degli accordi, se la ricerca restituisse solo specie di terze diverse da queste (terza eccedente o diminuita), si tratterebbe evidentemente di un caso di omofonia (cfr. sottopar. 1.2.1, *Intervalli*): in questo caso gli intervalli vengono trattati come gradi *sospesi* (v. prossimo caso);
- quando la terza non è presente, l'algoritmo procede con la ricerca dei gradi sospesi, ovvero quarta giusta e seconda maggiore.

Si noti che le coppie di intervalli quarta giusta - terza eccedente e seconda maggiore - terza diminuita sono coppie di intervalli enarmonici. Il motivo per cui si è deciso di trattare questi valori in modo equivalente sta nel fatto che tali intervalli vengono considerati esclusivamente dopo aver appurato l'assenza di altre specie di terze: ne consegue che la funzione di tali note è sicuramente assimilabile a quella dei gradi sospesi omofoni.

---

<sup>14</sup> La scala blues (che deriva dalla scala pentatonica minore, a cui è aggiunta la cosiddetta *blue note*, ovvero la quarta eccedente) contiene infatti la terza minore, ma essa viene tipicamente usata in sovrapposizione ad accordi di dominante, che contengono la terza maggiore.

A seconda che sia restituito il primo, il secondo o entrambi gli intervalli, l'accordo risulterà *sospeso* sulla quarta (*sus4*), sulla seconda (*sus2*) o su tutt'e due (*sus2/4*);

- se anche i gradi sospesi o le terze loro omofone non sono presenti, l'accordo è classificato come *senza terza*;
- il passo successivo riguarda l'individuazione della quinta. In questa operazione è l'intervallo giusto a prevalere sugli altri o sull'eventuale assenza dell'intervallo<sup>15</sup>: la non presenza di essa all'interno del timebox non rappresenta un punto critico come nel caso della terza, e la quinta giusta è assegnata come valore di default;
- terminata questa ricerca gli accordi si presenteranno sotto forma di triadi: maggiori, minori, aumentate, diminuite. Come già visto nel par. 2.3, sovrapponendo alle triadi ulteriori note a distanza di terze è possibile individuare le cosiddette *funzioni superiori* o *tensioni* degli accordi. Nella pratica dell'analisi armonica applicata ad entrambi gli ambiti presi in considerazione, l'Armonia “moderna” e l'Armonia “classica”, non è consuetudine indicare l'eventuale presenza di tensioni superiori alla settima che, essendo la frequenza preponderante tra le tensioni, riassume in sé la funzione delle terze ad essa sovrapposte: un accordo di dominante, ad esempio, è sempre indicato come V7, anche in presenza di none o tredicesime. Posto quindi che, a fronte di un aumento non trascurabile della complessità dell'algoritmo<sup>16</sup> (ai quattro gradi già presi in considerazione si aggiungerebbero altre tre tensioni: *nona*, *undicesima* e *tredicesima*) e le quadriadi individuate saranno esclusivamente quelle descritte nello schema al par. 2.4.

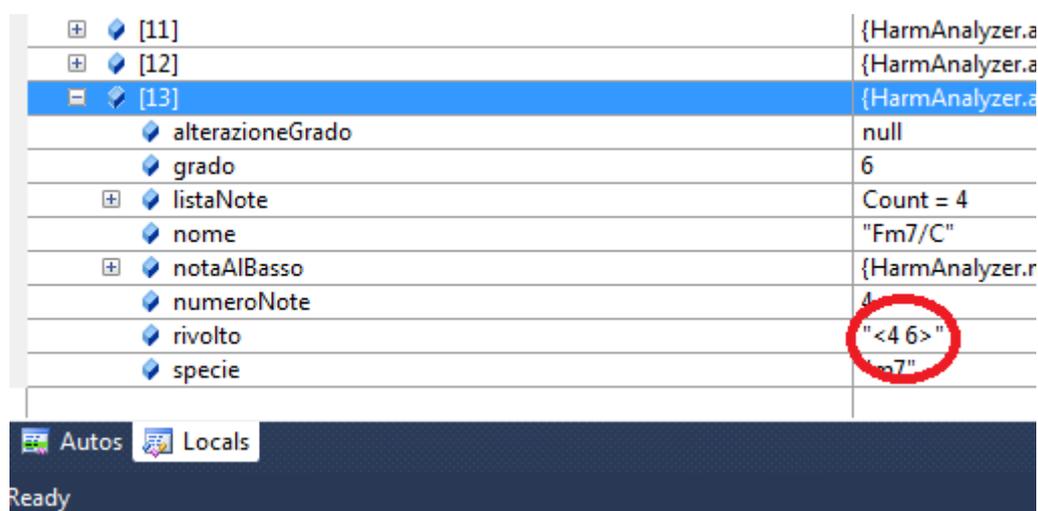
---

15 Poiché le frequenze dell'intervallo di quinta giusta sono, dopo l'ottava, le più presenti all'interno dello spettro armonico di un suono, la sua omissione dalle sovrapposizioni accordali è contemplata dalle regole dell'Armonia, in quanto già presente in maniera ben percepibile nel suono della fondamentale dell'accordo. Questa regola è molto utile nello svolgimento di riduzioni, semplificazioni *etc.* Ad es., un *bicordo* formato solo da fondamentale e terza minore può essere considerato a tutti gli effetti un accordo minore.

16 È comprensibile anche intuitivamente che la complessità di un algoritmo dovuta alla gestione di  $n$  parametri in input aumenti al crescere di  $n$ . Per un approfondimento a riguardo si segnala il libro di

### 4.1.5 Rivolti

Gli accordi che risultano dalle ricerche fin ora condotte si presentano come accordi *in stato fondamentale*. Un ulteriore algoritmo individua la nota al basso (tipicamente, la nota con altezza inferiore a tutte le altre) e, in base al grado di questa all'interno dell'accordo, restituisce l'indicazione del rivolto relativo, indicato usando la simbologia tipica dell'analisi di tipo accademico (cfr. par. 2.4):



[11]	{HarmAnalyzer.a
[12]	{HarmAnalyzer.a
[13]	{HarmAnalyzer.a
alterazioneGrado	null
grado	6
listaNote	Count = 4
nome	"Fm7/C"
notaAlBasso	{HarmAnalyzer.r
numeroNote	4
rivolto	"<4 6>"
specie	m7"

### 4.1.6 Adattamenti

Conclusa la costruzione degli accordi, è possibile individuare alcuni elementi che, pur corretti, restituiscono un risultato formalmente migliorabile. Un esempio tipico è rappresentato da una triade maggiore con al basso la seconda maggiore (*e.g.*, C/D): tale struttura è assolutamente assimilabile ad un accordo sospeso costruito sulla nota al basso (dall'esempio precedente risulterebbe Dsus2/4).

## 4.2 Analisi armonica

### 4.2.1 Indicazione dei gradi

La descrizione della funzione armonica di un accordo si basa innanzitutto sul rapporto che esso stabilisce con la tonalità d'impianto.

Le istruzioni create per gestire questi parametri si possono suddividere in due categorie:

- algoritmi applicati agli accordi diatonici o derivati da modi paralleli;
- algoritmi per la classificazione delle funzioni degli accordi costruiti su gradi estranei alla tonalità e/o con una funzione particolare formalizzata dalle regole dell'Armonia.

Il risultato di a) sarà costituito da una serie di numeri romani indicanti il grado relativo alla tonalità, seguiti dalla specie dell'accordo di riferimento ed eventualmente preceduti da una o più alterazioni nel caso di gradi non diatonici.

I risultati delle operazioni di cui al punto b), invece, riguarderanno diverse categorie di accordi non diatonici che assumono, all'interno del contesto in cui sono inseriti, particolari funzioni più o meno in relazione con determinati gradi della tonalità.

(HER JAZZ) **AUTUMN LEAVES** - JOHNNY MERCER

IIIm7 A-7 V7 D7 IMAJ7 Gmaj7

IVMAJ7 Cmaj7 VIIIm7(b5) F#-7 b5 2. b7 V7/VI E- VIIm

The image shows a handwritten musical score for the jazz standard "Autumn Leaves" by Johnny Mercer. The score is written on three staves. The first staff is a treble clef with a key signature of one sharp (F#) and a 4/4 time signature. The second and third staves are bass clefs. The music is annotated with Roman numerals and chord symbols in red ink. The first staff has three measures with annotations: IIIm7 A-7, V7 D7, and IMAJ7 Gmaj7. The second staff has two measures: IVMAJ7 Cmaj7 and VIIIm7(b5) F#-7 b5. The third staff has two measures: 2. b7 and V7/VI E- VIIm. The annotations indicate the harmonic function of each chord relative to the key of A major.

## 4.2.2 Individuazione della modalità

La logica dell'algoritmo in questione, realizzato *ex novo*, si basa sul calcolo della probabilità che un brano sia costruito, una volta stabilita la tonalità, a partire dal modo maggiore o *ionico* oppure dal modo minore o *eolio*, ricalcando le operazioni compiute da un teorico che esegua questa procedura in modo non automatizzato, ed attribuendo a ognuno di questi parametri un peso probabilistico che concorra a stabilire l'affinità del brano esaminato con ciascuna delle due modalità. Le informazioni che l'algoritmo elabora sono:

- 1) la presenza o meno dell'accordo di tonica del modo maggiore o minore all'inizio o al termine del brano;
- 2) il confronto tra il numero di accordi di tonica del modo maggiore e tonica del modo minore;
- 3) l'eventuale presenza di un accordo finale classificabile come *terza di Piccardia*<sup>17</sup>, tipico esempio di cadenza conclusiva di un brano in minore; non è da escludere, tuttavia, che questo accordo faccia parte di successioni di tipo diverso, come la cadenza IV - V - VI, tipica del finale di alcuni brani rock;
- 4) un confronto analogo per gli accordi di dominante. Tuttavia, è importante evidenziare che il coefficiente attribuito a questo confronto è maggiore rispetto al precedente: risulta infatti piuttosto facile che in un brano sviluppato nel modo maggiore sia presente un buon numero di occorrenze di un accordo come il VI<sub>m</sub> (cioè la tonica del modo minore), rispetto ad accordi di dominante secondaria (come il V/VI, ovvero la dominante del modo minore), che risulta quindi un parametro molto più caratterizzante;
- 5) la presenza o meno della quinta aumentata della tonalità: essendo una nota non diatonica nella tonalità maggiore (è costruita sul V/V) ma rappresentando la sensibile della scala minore, porta un buon contributo al punteggio in favore del modo eolio; tale punteggio viene ulteriormente incrementato nel caso in cui, oltre alla quinta, sia presente anche la quarta aumentata (rappresenta infatti il

---

<sup>17</sup> Viene così chiamato l'ultimo accordo di un brano in minore, quando esso è maggiore ed è costruito sul primo grado di un brano in modalità minore (es. accordo di La maggiore in tonalità di La minore). L'uso di questo accordo era una pratica molto diffusa soprattutto tra i compositori dei secc. XVI e XVII, prima dell'avvento del Sistema Temperato.

sesto grado della scala minore melodica). Al pari della quinta, anche essa rappresenta, nel modo maggiore, un grado non diatonico usato su una dominante secondaria, il V/IV).

Al termine della fase di analisi dei parametri, una volta sommati i punteggi, un semplice confronto tra le due somme risultanti permette di individuare il modo del brano.

### 4.2.3 Adattamenti alla modalità

La prima trasformazione dei dati fin ora raccolti è eseguita a partire dal risultato dell'algoritmo descritto nel sottoparagrafo precedente.

Nel caso in cui questo risultato evidenzia che il brano è costruito in modo minore, tutti gli intervalli precedentemente calcolati dovranno essere adattati nei confronti della nuova tonica di riferimento, sia per quanto riguarda il valore numerico del grado che nell'adattamento della specie (se ad esempio il brano fosse in La minore, scala relativa di Do maggiore, un accordo costruito sul fa, precedentemente classificato come IV grado, diventerebbe il sesto grado minore, indicato quindi come  $\flat VI$ ).

### 4.2.4 Funzioni armoniche particolari: dominanti secondarie e sostituzioni

Tra gli accordi non diatonici, ve ne sono alcuni che tuttavia hanno un rapporto stretto con determinati gradi della tonalità, il cui utilizzo ha alla base l'applicazione del concetto di *tonalità allargata*. L'analisi funzionale di questi accordi ne sottolinea il ruolo in modo evidente.

Il primo esempio di struttura non diatonica fortemente in relazione con la tonalità è dato dagli accordi di dominante secondaria (v. anche par. 2.4, *Sigle e accordi particolari*): ogni tonalità contempla l'uso di cinque dominanti, ciascuna riferita ad un

grado della scala, tonica e sensibile escluse.

In tonalità di Fa maggiore, esse saranno:

F7 (dom. di B $\flat$ , cioè del IV grado)

G7 (dom. di C, V grado)

A7 (dom. di Dm, IV grado)

D7 (dom. di Gm, II grado)

E7 (dom. di Am, III grado)

È interessante notare come tutte le dominanti secondarie siano costruite su gradi diatonici. Ne consegue che, una volta individuato un accordo di dominante costruito su un grado diatonico diverso dal quinto, si è certamente in presenza di una dominante secondaria.

La sigla che descrive questa funzione sarà  $V/n$ , con  $n = n_i + 3$  (eventualmente ridotta ad intervallo proprio), dove  $n$  è il grado di cui l'accordo svolge la funzione di dominante e  $n_i$  l'intervallo che la fondamentale dell'accordo di dominante forma con la tonica della scala. Ad esempio, l'accordo E7 in tonalità di Re maggiore, costruito sul secondo grado ( $n_i = 2$ ) sarà la dominante secondaria del quinto grado ( $n = 2 + 3 = 5$ ); in tonalità di Sol maggiore, invece, per lo stesso accordo risulta  $n_i = 6$ , per cui  $n = 9$ .

Essendo un intervallo improprio, si riduce a  $9 - 7 = 2$ , risultando quindi una dominante secondaria del secondo grado (V/II).

Nel caso in cui l'accordo di dominante trovato sia costruito su un grado non diatonico, potrebbe trattarsi di una *sostituzione di tritono* (v. par. 2.4, *Sigle e accordi particolari*): l'accordo sostituito è costruito una quarta eccedente sopra rispetto alla fondamentale della dominante sostitutiva.

Un ulteriore caso particolare si ha in presenza di un accordo diminuito costruito su un

grado diverso dal settimo: le regole dell'armonia stabiliscono che un accordo di dominante possa essere costruito omettendo la fondamentale, senza alterarne il significato armonico. Da questa riduzione risulta appunto un accordo diminuito (con eventualmente l'aggiunta della settima minore o diminuita, a seconda che la dominante di partenza contenga la nona maggiore o minore), costruito una terza maggiore sopra rispetto alla fondamentale della dominante sostituita. L'analisi armonica relativa a queste due sostituzioni riporta, al solito, il grado sostituito, preceduto dall'indicazione di sostituzione.

## 5. Considerazioni finali

La fase di testing è stata effettuata a partire da trascrizioni in documenti IEEE 1599 di brani celebri della letteratura musicale, il più possibile eterogenei per quanto concerne l'organico, la forma, il genere e lo stile musicale: hanno costituito oggetto di analisi diverse *Invenzioni a due voci* di Bach e alcune danze composte da Haendel, un Lied di Beethoven, la *Marcia trionfale* da *Aida*, brani da *Pictures at an exhibition* di Mussorgskij, e ancora Puccini, Paisiello e alcune composizioni jazz.

Le diverse peculiarità dei brani analizzati hanno fatto emergere aspetti rilevanti per quanto riguarda la valutazione del lavoro svolto, che hanno contribuito a confermare la bontà della trasformazione dei processi teorici per l'analisi armonica nel risultante prodotto automatizzato, ma hanno anche permesso di individuare problematiche rilevanti, alcune delle quali sono state risolte in fase di testing, altre (riguardanti soprattutto l'impossibilità di formalizzare determinati fenomeni) hanno avallato la tesi iniziale: poiché l'analisi armonica si basa su un insieme di operazioni sia logiche, quindi formalizzabili, sia artistiche ed interpretative, in alcuni casi estremamente soggettive, risulta perciò un processo difficile da automatizzare. Di seguito vengono riportati esempi delle principali problematiche emerse.

## 5.1 Correttezza formale: il caso di “King Porter Stomp”

♩ = c. 149 - 151

*mf*

1  $A\flat$   $A\flat$   $A\flat$

2  $A\flat$

3  $A\flat$

Già nella prima battuta di questo brano jazz viene evidenziato il problema derivante dal fenomeno dell'enaarmonia, descritto nel sottopar. 3.3.1 (v. anche par. 2.1).

L'analisi proposta in figura è corretta e facilmente condivisibile (l'accordo diminuito del terzo movimento svolge funzione cromatica nei confronti dell'accordo successivo - v. par. 2.4), ma questa è possibile solo a partire dalla trasformazione delle note indicate. Nella forma in cui si presenta, l'accordo compreso nel terzo timebox contiene le note re, la bemolle, si, fa, sol, che corrispondono alle note di  $G7(\flat 9)/D$ ; l'algoritmo di individuazione della fondamentale (che, come illustrato nel sottopar. 4.1.3, risulta fortemente influenzato da casi di enarmonia) restituisce questi risultati:

do 20	sol 10
re 14	la 18
mi 15	si 12
fa 16	

Si osservi che la somma relativa al la (cioè alla presunta nota fondamentale) risulta la più alta dopo quella relativa a do. Se invece le note vengono inserite secondo la forma enarmonica corretta (cioè mi doppio bemolle, la bemolle, do bemolle, fa, sol doppio bemolle), i risultati ottenuti sono i seguenti:

do 7	sol 15
re 9	la 3
mi 11	si 12
fa 6	

La fondamentale risulta quindi la (bemolle) e gli algoritmi successivi individuano correttamente l'accordo di la bemolle diminuito settima.

## 5.2 Timebox non coerenti e modulazioni: “Promenade”

Un'interessante motivo di discussione riguarda l'impostazione della durata delle finestre temporali: si è scelto, in fase di progettazione, di considerare appartenenti ad uno stesso timebox tutte le note comprese tra due accenti forti, escludendo eventuali legature di anticipazione (v. sottopar. 3.3.2). Era già ben chiaro in fase di sviluppo che il sistema di divisione in timeboxes non potesse essere coerente in assoluto: il brano “Promenade”, tratto dalla suite per pianoforte *Pictures at an exhibition* di M. P. Mussorgskij, costituisce una conferma a riguardo. Osservando le misure 10 e 13, si nota che ogni timebox contiene due cambi d'accordo, uno per ogni ottavo.

Il brano del compositore russo offre un ottimo spunto per un'integrazione futura, riguardante le modulazioni temporanee (dove cioè non vi sia indicazione esplicita del cambio di tonalità): non c'è modo, a partire dai dati messi a disposizione dai documenti

IEEE 1599<sup>18</sup>, di riconoscere il punto di modulazione di un brano. Esiste un solo caso in cui il programma gestisce il problema in maniera corretta, ovvero la modulazione alla tonalità parallela minore.

### 5.3 Le “Invenzioni a due voci”

Le *Invenzioni a due voci*, al contrario di quanto previsto a causa della complessità armonica e della presenza di note molto brevi che avrebbero potuto creare confusione nei risultati, hanno evidenziato una notevole compatibilità con il software. Del resto, la correttezza formale e la linearità compositiva caratteristiche dei lavori di J. S. Bach, ben note ed apprezzate dagli addetti ai lavori, concordano in modo egregio con la logica di quanto descritto in questo lavoro di tesi.

---

18 Si ricorda che lo scopo dei formati *notational-oriented*, come IEEE 1599, è quello di descrivere gli oggetti presenti in partitura, dove non sono presenti indicazioni esplicite riguardanti le modulazioni. Il fatto di non contemplare indicazioni sui cambi di tonalità temporanei è quindi assolutamente coerente con i presupposti progettuali alla base del formato stesso.

# Bibliografia

- [1] AA.VV. (HAUS, G., PIGHI, I., editors), *Standards in Computer Generated Music*, IEEE Computer Society Press, Washington, D.C., 1996.  
ISBN: 0818673850.
- [2] ALBAHARI, B., ALBAHARI, J., *C# 4.0 in a nutshell - The definitive reference*, O'Reilly, Sebastopol, CA, 2010. ISBN: 978-0-596-80095-6.
- [3] BARATÈ, A., HAUS, G., LUDOVICO, L.A., *Music representation of score, sound, MIDI, structure and metadata all integrated in a single multilayer environment based on XML*. In (CUI, B., LIU, L., SHEN, J., SHEPERD, J., editors): *Intelligent music information systems: tools and methodologies*, pp. 305-328, Information Science Reference, Hershey, PA, 2008.  
ISBN: 978-1-59904-663-1 (hardcover); 978-1-59904-665-5 (ebook).
- [4] CAMBOUROPOULOS, E., *Automatic Pitch Spelling: From Numbers to Sharps and Flats*. Proceedings of the VIII Brazilian Symposium on Computer Music, Fortaleza, 31 luglio - 3 agosto 2001. <http://users.auth.gr/~emilios/papers/fortaleza2001.pdf>
- [5] CINGOLANI, S., SPAGNOLO, R., *Acustica musicale e architettonica*, UTET, Torino, 2008. ISBN: 88-7750-941-4.
- [6] CORMEN, T.H., LEISERSON, C.E., RIVEST, R.L., STEIN, C., *Introduction to Algorithms*, MIT Press, Cambridge, MA, 2009.  
ISBN: 978-0-262-03384-8.
- [7] D'ANTONA, O.M., LUDOVICO, L.A., *Una classificazione formale degli intervalli musicali*, Università degli Studi di Milano, 2004.
- [8] FERKOVA, E., ŽDIMAL, M., ŠIDLIK, P., *Chordal Evaluation in MIDI-Based Harmonic Analysis: Mozart, Schubert, and Brahms*. In (HEWLETT, W. B., SELFRIDGE-FIELD, E.,

CORREIA, E. Jr., editors): *Tonal Theory for the Digital Age (Computing in Musicology, Vol. 15)*, pp. 172-186, Stanford University, CA, 2007. ISBN: 978-0-936943-17-6.

[9] GOOD, M., *Representing music using XML*. Proceedings of the International Symposium of Music Information Retrieval (ISMIR 2000), Plymouth, MA, 23-25 Ottobre 2000.

<http://ciir.cs.umass.edu/music2000/posters/good.pdf>

[10] IEEE P1599 Working Group, *Recommended practice for definition of a commonly acceptable music application using the XML language*. IEEE Computer Society Press, Washington, D.C., 2008.

[11] KRUMHANSL, C.L., *Cognitive foundations of Musical pitch*. Oxford University Press, Oxford, UK, 2009.

[12] LUDOVICO, L.A. *Manuale di MX*. Laboratorio di Informatica Musicale - Università degli Studi di Milano, 2005.

[13] LUDOVICO, L.A., *Outline of the MX Standard*. In (AVRITHIS, Y., BUITELAAR, P., FALCIDIENO, B., KOMPATSIARIS, I., SPAGNUOLO M., editors): *Semantic multimedia: Proceedings of Second International Conference on Semantic and Digital Media Technologies, SAMT 2007, Genoa, Italy, December 5-7, 2007*. ISBN: 978-3-540-77033-6.

[14] LUDOVICO, L.A., *Key concepts of the IEEE 1599 Standard*. In (BAGGI, D., HAUS, G., editors): *The Use of Symbols To Represent Music And Multimedia Objects: Proceedings of the IEEE CS Conference*, pp. 15-26, Lugano, CH, 2008. ISBN: 88-7595-010-5.

[15] MARSHALL, D., *Programming Microsoft(R) Visual C#(R) 2008: The language*. Microsoft Press, 2008. ISBN: 978-0735625402.

[16] MAUCH, M., DIXON, S., *Approximate note transcription for the improved identification of difficult chords*. Proceedings of the 11th International Society for Music Information Retrieval Conference (ISMIR 2010), pp. 135-140, Utrecht, NL, 9 - 13 Agosto 2010.

- [17] PISTON, W., *Armonia*. Trad. di G. Gioanola, EDT, Torino, 1989.  
ISBN: 88-7063-049-8.
- [18] RHODES, C., LEWIS, D., MÜLLENSIEFEN, D., *Bayesian Model selection for harmonic labelling*. In: *Mathematics and Computation in Music*, Berlin, 2007.  
ISBN: 978-3-642-04578-3.
- [19] SAPP, C., *Computational Chord-Root Identification in Symbolic Musical Data: Rationale, Methods, and Applications*. In (HEWLETT, W. B., SELFRIDGE-FIELD, E., CORREIA, E. Jr., editors): *Tonal Theory for the Digital Age (Computing in Musicology, Vol. 15)*, pp. 99-119.
- [20] SOLIS, D.M., *Illustrated C#2010*, APRESS, New York, NY, 2010.  
ISBN: 978-1-4302-3282-7.
- [21] SPAZIANTE, L., *Sociosemiotica del pop*, Carocci, Roma, 2007.  
ISBN: 8843036181.
- [22] TEMPERLEY, D., *The Cognition of Basic Musical Structures*. MIT Press, Cambridge, MA, 2001. ISBN 0-262-20134-8.