Síntesi expressiva de notes d'ornament de fagot mitjançant la caracterització automàtica d'enregistraments

Montserrat Puiggròs i Maldonado

Projecte Fi de Carrera
Director/a: Emilia Gómez Gutiérrez i Rafael Ramírez Melendez
28 de Novembre del 2005
Enginyeria Informàtica
Universitat Pompeu Fabra

Als meus pares, els que m'han estat recolzant tots aquests anys.

Agraïments especials a Emilia Gómez i Rafael Ramírez, gràcies
als quals he pogut realitzar un projecte on, a part d'aprendre,
m'he pogut divertir i combinar allò que creia impossible:
la meva professió amb la meva passió per la música.

Resum

El que hem fet en el projecte ha estat un estudi d'unes notes ornamentals, anomenades trinos, en el fagot, un instrument de vent fusta. Aquest tipus d'anàlisi s'ha fet anteriorment amb altres instruments, l'exemple més nombrós i habitual és el piano. Per aquest motiu, hem cregut interessant estendre aquest estudi a un nou instrument, el fagot, per intentar complementar els estudis fets fins ara i ajudar a millorar la síntesi de melodies d'aquest instrument.

Per poder arribar a fer la síntesi dels trinos, inicialment els hem hagut d'estudiar. Per aquest motiu, hem fet servir unes gravacions de fagot tocades per un instrumentista professional. Aquest estudi està basat en el càlcul de descriptors de freqüència fonamental (corresponent a l'alçada), inici i final de cada nota,. A partir d'aquests descriptors, i combinant-los amb altres característiques de més alt nivell, hem caracteritzat el seu comportament de manera que puguem imitar-los, generar-los i afegir-los a la melodia corresponent perquè, posteriorment, es pugui sentir en format MIDI.

Índex

1. Introducció **11**
1.1 Context 11
1.2 Objectius 11
1.3 Metodologia 11
1.4 Estructura del document 12

2. Context musical **13**
2.1 El fagot 13
2.1.1 Història del fagot 13
2.1.2 Acústica del instrument 14
2.1.3 Classes de fagot 14
2.1.4 Fagots històrics 15
2.2 Michel Corrette (1707 - 1795) 16
2.3 Recursos expressius: ornamentació 17
2.3.1 Apoiatura breu o “Acciaccatura” 17
2.3.2 Apoiatura 17
2.3.3 Mordent 18
2.3.4 Trino 19
2.3.5 Grupet 20

3. Context tecnològic **23**
3.1 Freqüència i to 23
3.1.1 Freqüència fonamental i harmònics 23
3.1.2 Hz vs cents vs interval 26
3.2 Energia 27
3.3 Inici i final de nota 27
3.4 Machine Learning 29
3.5 Investigació relacionada 30

4. Requeriments **31**
4.1 Requeriments funcionals 31
4.2 No funcionals 34

5. Eines utilitzades **35**
5.1 Sound Forge 6.1 35
5.2 Finale 2005 35
5.3 Wavesurfer 35
5.4 C++ 35
5.5 Visual Studio. NET 37
5.6 CLAM 7.0: C++ Library for Audio and Music 37
5.7 MATLAB: "MATrix LABoratory" 38
5.8 WEKA 39

6. Material sonor utilitzat **41**
6.1 Partitures 41
6.2 Organització dels fitxers d’àudio 42

7. Descripció melòdica del material sonor: de l’àudio cap a la melodia **47**
7.1 Esquema de descripció 47
7.2 Algorisme d’extracció de paràmetres 48
7.2.1 Diagrama de classes 49
7.3 Explicació de l’algorisme 50
7.3.1 Detecció d’onsets d’energia 50
7.3.2 Estimació de la freqüència fonamental 51
7.3.3 Segmentació a partir de la freqüència fonamental 52
7.3.4 Segmentació de notes a partir d’onsets d’energia i de freqüència fonamental 52
7.3.5 Càlcul dels descriptors de nota 53
7.3.6 Postprocessat 53
7.3.7 Emmagatzematge de descriptors 54
7.4 Exemples (joc de proves) 54
7.4.1 Detecció de la freqüència fonamental mitjançant la derivada 54
7.4.2 Detecció dels trinos mitjançant els onsets de freqüència i l’energia 55

7.4.3 Estudi dels onsets finals 55
7.5 Problemes trobats 56
7.5.1 Complicacions de l'instrument 56
7.5.2 Correcció dels resultats 57

8. Anàlisi del comportament de l'ornamentació 59
8.1 Resultats 59
8.1.1 Distribució del nombre de notes del trino 59
8.1.2 Evolució de la durada de les notes del trino 61
8.1.3 Regularitat de les notes del trino 68
8.2 Anàlisi amb eines d'intel·ligència artificial (Machine Learning) 73
8.2.1 Estudi del comportament dels trinos 73

9. Síntesi de l'àudio: generació de trinos 77
9.1 Esquema de descripció 77
9.2 Algorisme de generació de trinos 77
9.2.1 Diagrama de classes 79
9.3 Explicació de l'algorisme 80
9.3.1 Càrrega del fitxer MIDI 80
9.3.2 Lectura dels fitxers que caracteritzen els trinos: XML i TXT 80
9.3.3 Nearest Neighbour 81
9.3.4 Generació i inserció de les notes del trino 81
9.3.5 Guardar la cançó en format MIDI 82
9.4 Exemples (joc de proves) 82
9.5 Problemes trobats 85

10. Conclusions i ampliacions futures 87
10.1 Conclusions 87
10.2 Ampliacions futures 87

Glossari 89

Bibliografia 91
Referències bibliogràfiques 91
Referències de Internet 92

11. Annex (I): Fitxers analitzats 95
11.1 Affettuoso 95
11.1.1 Tempo Affetuoso 60 96
11.1.2 Tempo Affetuoso 92 101
11.1.3 Tempo Affetuoso 120 106
11.2 Allegro Moderato 111
11.2.1 Tempo Allegro Moderato 60 111
11.2.2 Tempo Allegro Moderato 92 113
11.2.3 Tempo Allegro Moderato 120 115
11.3 Adagio 117
11.3.1 Tempo Adagio 50 117
11.3.2 Tempo Adagio 68 122
11.3.3 Tempo Adagio 100 127

12. Annex (II): Contingut del CD 133

Llista de Figures

Figura 2. Exemples de l'evolució del fagot (Basson 2005) 15
Figura 5. Acciaccatura (a) Acciaccatura (b) 17
Figura 6. Acciaccatura (c) 17
Figura 7. Apoiatura sobre blanca 18
Figura 8. Diverses apoiatures 18
Figura 9. Mordent Simple sense alteració 19
Figura 10. Mordent Llarg amb alteració 19
Figura 12. Representació de diferents trinos 19
Figura 13. Exemple de trino 20
Figura 14. Exemple de trino amb apoiatura 20
Figura 15. Exemple de trino amb alteració 20
Figura 16. Exemple de trino amb notes dobles 20
Figura 17. Figures del grupet 21
Figura 18. Grupet amb alteració 21
Figura 19. Exemple de grupet sobre la figura 21
Figura 20. Exemple de grupet entre dues figures 21
Figura 26. λ = longitud d'ona | L = longitud de la corda 24
Figura 27. Relació entre longitud d'ona i longitud de la corda 25
Figura 28. Relació entre longitud d'ona i freqüència 26
Figura 29. Divisió de la octava en cents 27
Figura 30. L'energia del senyal és la part subratllada. 27
Figura 31. So d'un trino 28
Figura 32. Onsets i offsets d'energia 28
Figura 33. Onsets i offsets de freqüència fonamental 29
Figura 34. Onsets i offsets d'energia i freqüència fonamental 29
Figura 35. Serveis del sistema 31
Figura 36. Diagrama de casos d'ús 33
Figura 37. Exemple d'encapsulament 36
Figura 38. Exemple d'herència múltiple 37
Figura 39. Les Delices de la Solitude: Adagio 41
Figura 40. Les Delices de la Solitude: Affettuoso 42
Figura 41. Les Delices de la Solitude: Allegro moderato 42
Figura 42. Diagrama de metadades de l'anàlisi 47
Figura 43. Format del fitxer que de les dades de l'anàlisi 48
Figura 44. Diagrama de flux de l'algorisme de l'anàlisi 48
Figura 46. Passos de l'algorisme d'extracció de paràmetres 50
Figura 47. Sèrie harmònica (Gómez 2002) 51
Figura 48. Unificació d'onsets 53
Figura 49. Resultat de la unificació d'onsets 53
Figura 50. Freqüència fonamental (figura superior) vs. la seva derivada (figura inferior) 54
Figura 51. Exemples de la visualització de la derivada a través del programa wavesurfer 54
Figura 52. Comparació entre els onsets d'energia i els de freqüència fonamental 55
Figura 53. Onsets finals amb la freqüència corresponent 56
Figura 54. Gràfica de notes vs durada 59
Figura 55. Histograma 1 de nombre de notes 60
Figura 56. Histograma 2 de nombre de notes 60
Figura 57. Comportament dels deu trinos més llargs (gràfica esquerra) i curts (gràfica dreta) 61
Figura 58. Trino de rodona: Adagio núm. 3 62
Figura 59. Trino de blanca amb punt: Adagio núm 4 63
Figura 60. Trino de blanca amb punt: Adagio núm. 5 63
Figura 61. Trino de blanca: Adagio núm. 2 64
Figura 62. Trino de blanca: Affettuoso núm. 8 64
Figura 63. Trino de negra amb punt: Affettuoso núm. 10 65
Figura 64. Trino de negra: Allegro núm. 1 66
Figura 65. Trino de negra: Affettuoso núm. 5 66
Figura 66. Trino de corxera: Affettuoso núm. 9 67
Figura 67. Trino de corxera: Affettuoso núm. 4 67
Figura 68. Adagio a tempo 50: blanca a la segona pulsació 68
Figura 69. Adagio a tempo 50: blanca amb punt a la primera pulsació 68
Figura 70. Adagio a tempo 50: blanca a la tercera pulsació 69

Figura 71. Adagio a tempo 50: rodona a la primera pulsació 69
Figura 72. Allegro Moderato a tempo 60: negra a la tercera pulsació 69
Figura 73. Affettuoso a tempo 60: blanca a la primera pulsació 70
Figura 74. Adagio a tempo 100: blanca a la segona pulsació 70
Figura 75. Adagio a tempo 100: blanca amb punt a la primera pulsació 71
Figura 76. Adagio a tempo 100: blanca a la tercera pulsació 71
Figura 77. Adagio a tempo 100: rodona a la primera pulsació 71
Figura 78. Allegro Moderato a tempo 120: negra a la tercera pulsació 72
Figura 79. Affettuoso a tempo 120: blanca a la primera pulsació 72
Figura 80. Arbre de decisió 75
Figura 81. Exemple explicatiu de la matriu 76
Figura 82. Matriu de classificació 76
Figura 83. Diagrama de metadades de la síntesis 77
Figura 84. Diagrama de flux de l'algorisme de generació de trinos 77
Figura 86. Passos de l'algorisme de generació de trinos (síntesi) 80
Figura 87. Generació del trino 81
Figura 88. Partitura original (Adagio) amb els trinos que s'han d'efectuar marcats 82
Figura 89. Partitura (Adagio) amb els trinos generats 83
Figura 90. Partitura original (Affettuoso) amb els trinos que s'han d'efectuar marcats 84
Figura 91. Partitura (Affettuoso) amb els trinos generats 84

1. Introducció

1.1 Context

Un dels objectius dels sistemes que treballen la síntesi de sons és aconseguir imitar, el més semblant possible, els sons dels instruments acústics. Al llarg de tota la historia dels sintetitzadors, la recerca ha anat dirigida cap a aconseguir timbres semblants als dels instruments acústics (Chafe 1999).

Més enllà de les característiques tímbriques pròpies d'un instrument acústic, molts sistemes intenten imitar la manera que tenen els instrumentistes de controlar aquest material sonor, i es concentren en l'estudi del músic. Molts sistemes tenen per objectiu estudiar i imitar les característiques de l'expressivitat de les interpretacions o expressivitat musical (Juslin 2002). Aquests sistemes estudien les desviacions que es fan en les execucions respecte a la partitura.

Aquest és l'objectiu d'aquest projecte de final de carrera, que es centra en generar de manera automàtica els ornaments a partir de l'anàlisi de diferents interpretacions.

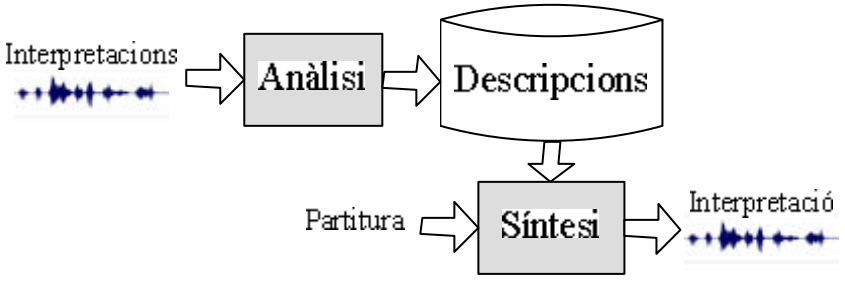
1.2 Objectius

Actualment els sintetitzadors no inclouen un model de trino que permeti generar-los d'una manera expressiva, és a dir, com ho faria un instrumentista. L'objectiu principal d'aquest projecte final de carrera és implementar un sistema que pugui generar automàticament les notes corresponents a una ornamentació, tal i com ho faria un instrumentista professional.

Per això és necessària una caracterització prèvia de com un instrumentista executa ornaments, per tal de trobar patrons o generar un model. Aquest seria el segon objectiu del projecte, la caracterització del comportaments de les ornamentacions, i es realitzarà mitjançant l'anàlisi automàtic de gravacions de fagot. Això requereix una extracció automàtica de paràmetres a partir del senyal d'àudio.

El projecte es centrarà a analitzar gravacions de fagot i en l'estudi dels trinos. Les gravacions han segut realitzades per un fagotista professional, triant unes peces i un estil dotats d'una gran riquesa ornamental.

Resumint, l'objectiu del projecte és estudiar els trinos produïts per un fagot, un instrument de vent fusta, i posteriorment, a partir d'unes característiques definides adients a una partitura concreta, sintetitzar-los i inserir-los dins de la melodia pertinent. L'esquema general del sistema que es pretén implementar esta representat en la següent figura:



1.3 Metodologia

Per poder dur a terme aquest projecte ens centrarem en la ornamentació dels trinos, tot i que en alguns casos són apoiatures provocat pel temps d'execució, que és molt petit (per tant dóna com

a resultat trinos molt curts, d'una sola nota). Hem de tenir en compte que el tipus de música en que ens centrarem és molt rica amb notes ornamentals, sobretot amb trinos. És una música del segle XVIII on la tendència, herència del renaixement, era fer música molt carregada i ornamentada d'una manera metòdica, sense deixar pas a la improvisació. Per tant, totes les floritures (ornamentacions) que el compositor creia necessàries perquè la seva música fos rica les deixava anotades.

El projecte el podríem dividir en dos grans blocs: l'anàlisi i la síntesi.

- *Anàlisi*: En l'anàlisi hem d'estudiar els trinos, on cada fitxer d'àudio tan sols conté un trino separat prèviament de la melodia. Per tal de dur a terme aquest anàlisi necessitem detectar el inici (*onset)* i final (*offset)* de cada nota del trino així com la seva freqüència fonamental. Un cop obtenim aquests descriptors hem d'estudiar el comportament i intentar extreure'n algun patró en el comportament d'aquests descriptors.
- *Síntesis*: En la síntesis inicialment farem un estudi del comportament dels trinos a través d'un programa d'intel·ligència artificial, el WEKA. Posteriorment generarem un trino MIDI a través del mètode "Nearest neighbour" i, per poder-ho fer, hem de mirar les característiques que el defineixen i comparar-les amb les característiques dels trinos que tenim a la base de dades. Tot seguit hem d'agafar el trino més semblant, que és el que utilitzarem per copiar-li el comportament i adaptar-lo a les característiques del nou trino, el que volem generar. Finalment, i un cop obtingut tots els trinos de la cançó, els hem d'introduir a la melodia per poder-lo sintetitzar en MIDI.

1.4 Estructura del document

En els dos capítols següents explicarem les coses que hem cregut necessàries per posar en situació i perquè es pugui entendre el projecte, tant pel que està relacionat amb la part musical (capítol 2) com amb la part tecnològica (capítol 3).

Seguidament, en el capítol 4, es farà referència als requeriments funcionals i no funcionals que es necessiten per dur a terme correctament el projecte i comprovar que els objectius que ens proposem són viables.

En el capítol 5 i 6 (respectivament) explicarem tant les eines i programes que haurem d'utilitzar per realitzar el projecte com als àudios que utilitzarem per poder fer l'anàlisi dels trinos.

Posteriorment, en els tres capítols que venen a continuació, explicarem l'anàlisi de la descripció melòdica (capítol 7), l'anàlisi del comportament dels trinos (capítol 8) i la síntesi de l'àudio (capítol 9). A més a més, ens els capítols 7 i 8, hi haurà una expilació de l'algorisme de l'anàlisi de la descripció melòdica i de la síntesi de l'àudio. També afegirem uns exemples dels resultats obtinguts i les dificultats trobades.

Finalment, en el capítol 10, exposarem les conclusions i el treball que es podrà fer en un futur. Per acabar podrem trobar un glossari amb les definicions dels mots que ens semblen més difícils d'entendre a causa del seu àmbit musical i un llistat de la bibliografia consultada.

Cal anomenar que hi haurà dos últims capítols amb l'annex (capítol 11 annex I, capítol 12 annex II). En l'annex I s'explicarà detalladament la revisió i correcció de cada àudio analitzat per poder tenir les dades correctes alhora de fer la síntesi. En cada àudio s'explicarà si la freqüència fonamental, els onsets i offsets trobats són correctes i si no ho són direm que hem de modificar i quin serà el valor que el substituirà. En canvi, en l'annex II, explicarem breument el contingut del CD, necessari per acabar d'entendre el projecte i veure els resultats definitius.

2. Context musical

En aquest capítol introduirem el context musical d'aquest projecte, explicant els conceptes musicals més rellevants: l'instrument estudiat, la seva acústica, les obres i el seu compositor i per últim farem una breu explicació de les notes ornamentals més rellevants. Aquests conceptes seran necessaris a l'hora d'implementar algorismes d'anàlisi d'interpretacions.

2.1 El fagot

2.1.1 Història del fagot

Es sol dir que la primera persona que va utilitzar un primitiu fagot en la orquestra va ser Robert Cambert l'any 1659 per interpretar *"La pastorale d´lssy"*.

Aquest instrument, com la majoria que formen part del marc europeu, té nombrosos precedents, un d'ells es pot veure reflectit en l'època romana. Els músics es van veure impulsats a ampliar la part greu mitjançant el aulos, un instrument, semblant al oboè, que van heretar dels grecs i es podria considerar un primer antecedent.

Es poden trobar moltes hipòtesis que parlen sobre l'inici del fagot i la més estesa, tot i que no és la que té més credibilitat, és la de Afranio Teseo (nascut a Pavia l'any 1495) la qual diu que es va crear un instrument inspirat en un exemplar serbo-croata semblant a la gaita. En el segle XVI el fagot té la seva primera aparició en els tractats teòrics però, un segle més tard, ja se l'anomena amb més freqüència i se'l coneix com a "dulcinea" o fagot. Arribat aquest moment, diversos teòrics comencen a mostrar-li interès. Marin Meresenne (1636-1637) es podria considerar el teòric més important, el qual va presenta un fagot força evolucionat amb tres claus. A més a més, en aquest segle, sobre l'any 1620 sorgeix el contrafagot, un instrument de la mateixa família que encara sona més greu, una octava per sota.

Figura 1. Fagot actual

La seva evolució va ser escassa fins a mitjans del segle XVIII però, a partir d'aquest moment, va evolucionar d'una manera important. En aquest mateix segle, concretament l'any 1751, Brujin va crear el primer fagot amb quatre claus tot i que, quasi deu anys més tard (1760), l'anglès Kusder li va afegir una més. La seva evolució va fer que anés incrementant el nombre de claus (actualment en té 22 o 24) i a principis del segle XIX ja va arribar a un desenvolupament prou important al tenir un so nítid i un registre ampli.

Avui en dia el fagot exhibeix una amplia gamma tímbrica, la qual cosa fa que hagi aconseguit la seva plenitud. Aquest fet es demostra amb les obres per a orquestra de diversos compositors, com poden ser Wargner, Richard, Strauss, Berlioz, etc. La seva sonoritat és difícil de descriure, però podríem dir que parteix de la brillantor de l'oboè i es transforma en una suavitat fosca que està entre una veu masculina i un corn, però és molt més dolça i agradable.

Les característiques actuals d'aquest instrument les va aconseguir Jean Nicolas Savary entre el 1820 i el 1830, reforçat per la incorporació del sistema de claus de Theobald Böhn en el 1855.

El seu gran registre (equivalent a la veu del tenor) ha fet que aquest instrument s'utilitzés d'una manera continua per realitzar melodies de solista en la orquestra, en la música de cambra i en els quartets (quartets de fagot), tot i que últimament està sent introduint en el jazz impulsat, principalment, pel músic Michael Rabinowitz (Fletcher 2005, Baines 2005).

2.1.2 Acústica del instrument

És un instrument de fusta, amb embocadura de doble canya i format per un tub cònic. La llargada del seu cos oscil·la entre 1.30 i 1.35 metres aproximadament, la qual cosa li permet aconseguir una extensió de 3 octaves i mitja. Amb això aconsegueix que el seu registre vagi des de un Si b1 (freqüència fonamental de 61.7 Hz) a un Si4 (freqüència fonamental de 494 Hz) o Do5 (freqüència fonamental de 523 Hz).

S'ha de destacar, de les seves característiques fonamentals, que les notes més agudes (Si b4, Si4 i Do5) és convenient no atacar-les directament, és millor que vinguin lligades amb notes properes més greus. Tot i així, són molt difícils d'aconseguir i només les poden arribar a tocar els fagotistes més experts jugant amb la pressió de l'aire expulsat. La dinàmica en el fagot, si parlem del *piano*, pot ser força complicada sobretot en les notes més greus (concretament entre el Si b1 i el Do2) que no poden ser atacades directament amb aquest dinamisme. D'altra banda, el *forte* fa que tots els sons del fagot siguin excel·lents, sobretot en aquest registre greu.

Com ja s'ha anomenat anteriorment, aquest instrument posseeix unes característiques tímbriques molt semblants a les del oboè. El seu registre greu és molt potent i ple, sobretot la primera quinta, convertint-se així en un bon baix pels instruments de fusta i les trompes. El seu registre mig és més prim i sense color, la qual cosa li permet combinar-se perfectament amb trompes i violoncels i sobre el registre dels aguts, concorda perfectament amb la flauta travessera. Finalment podem afegir que el fagot és un instrument àgil i permet certes acrobàcies tècniques però els intervals descendents no es poden fer amb gran velocitat (Piston 2005, Rossing 2005).

2.1.3 Classes de fagot

En l'evolució del fagot s'ha de destacar que han sorgit dues variants al llarg de la seva història, el francès i l'alemany, amb característiques molt semblants però lleugerament divergents entre ells, tot i que el sistema dominant és l'alemany (Baines 2005).

Fagot Francès

És de gran flexibilitat però es necessita una gran tècnica i un gran domini per part del músic per poder-lo tocar d'una manera correcta i afinada.

Fagot Alemany

L'origen d'aquest tipus de fagot va ser sobre el 1925, quan el director Carl Almenraeder va agafar un fagot francès i el va tractar amb l'objectiu de que aquest instrument pogués ser tocat d'una manera afinada per a músics no gaire professionals. Aquests canvis van donar resultat però van introduir un inconvenient, es va perdre la qualitat del so. Posteriorment, a principis del segle XIX, una família de constructors de fagots, la família Heckel, va revisar i restaurar la sonoritat del fagot de Carl Almenraeder sense perdre els avantatges que aquest havia aconseguit, donant lloc al fagot més utilitzat avui en dia arreu del món, conegut amb el nom del sistema Heckel.

2.1.4 Fagots històrics

Fagot a 3 claus
(Segle XVII)

Fagot a 4 claus
(Segle XVIII)

Aquest Fagot és de fabricació Suiza i era un instrument d'església

Fagot fabricat per Winen a París l'any 1830, destinat a la música militar

Contrafagot anglès del 1739

Contrafagot actual

Figura 2. Exemples de l'evolució del fagot (Basson 2005)

2.2 Michel Corrette (1707 - 1795)

Michel Corrette, de nacionalitat francesa, va néixer el 10 d'abril de l'any 1707 i va morir el 21 de juny del 1795, vivint a cavall entre l'època barroca (1600-1750) i la clàssica (1750-1810). Va treballar com a mestre, compositor, adaptador i autor de diversos llibres de mètode, a més a més de ser organista, exercint-hi, tot i que de forma irregular, entre el 1737 i el 1780 aproximadament. Tot i això, no era considerat una de les figures europees més conegudes ni rellevants. Una de les feines més importants que va tenir en aquest sentit va ser la d'organista en l'escola jesuïta "Ste Marie" de París on també hi va exercir de mestre.

Figura 3. Michel Corrette

La seva reputació és coneguda inicialment per ser el director musical de "Foire St Germain" i "Foire St Laurent", on va realitzar arranjaments i composicions de "vaudevilles" (comèdies lleugeres) i de certes òperes còmiques. A part d'això, la seva vida és força desconeguda tot i que els seus treballs, que s'estenen durant quasi 75 anys, ens deixen una àmplia visió sobre la música Francesa del segle XVIII. A més a més, els seus llibres de mètode són una font rica d'informació sobre la practica artística i musical d'aquest període.

Una gran proporció dels seus treballs són arranjaments d'harmonitzacions simples de cançons, melodies populars, treballs de cambra instrumental, etc.

Els quasi vint mètodes que va escriure per a instruments (entre els quals estan inclosos el fagot, el violí, el violoncel, el baix, l'arpa, el clavicordi, la flauta i la mandolina) proporcionen una informació molt important sobre com es realitzava la pràctica d'aquest en el segle XVIII. Entre d'altres temes, va tractar la música contemporània anglesa, les diferències entre l'estil francès i l'italià i l'art d'acompanyar les cançons amb el clavicordi, incloent-hi nombrosos exercicis musicals (Corrette 2005).

Obra

Entre el seu repertori trobem "*Les Delices de la Solitude*" Opus 20 (1739), la qual engloba un conjunt de sonates per a viola, violoncel i fagot.

Les sis sonates per a fagot són contemporànies a les de Boismortier (Opus 26 i Opus 50) i, igual que ell, Corrette utilitza en elles un conjunt de termes francesos i italians. Aquesta obra transmet una gran alegria, un humor tranquil i una veritable "*joie de vivre*". En el 1766, Corrette realitza una segona edició adaptant la obra tan sols per a violoncel, però li falta credibilitat respecta a l'obra original, composada per a fagot. Tot i així, la gran obra d'aquest compositor per a fagot va ser "*Le phénix*".

L'estudi que presentem es centra en la Sonata IV d'aquesta obra, concretament en els moviments Adagio, Allegro Moderato i Affettuoso, realitzats a diferents tempos: l'Adagio a 50, 68 i 100 i l'Allegro Moderato i Affettuoso a 60, 92 i 120 (Corrette works 2005).

2.3 Recursos expressius: ornamentació

Quan es parla en termes musicals, la ornamentació es considera un art pel mitjà del qual es pot variar la línia melòdica. En un principi, aquesta variació era de caràcter improvisat però, poc a poc, els compositors van acabar escrivint els seus propis ornaments. N'hi ha diversos tipus, com per exemple la cadència, un ornament que es sol utilitzar en una conclusió o caiguda d'una frase en un moment determinat, la cascada, que es realitza amb una caiguda mitjançant una escala cromàtica, etc.

Ens centrarem en els ornaments més importants, els que més s'utilitzen en els instruments, els quals els descriurem a continuació (Adorno 2005, Ornament 2005).

2.3.1 Apoiatura breu o "Acciaccatura"

És un ornament musical que consisteix en l'execució ràpida d'una o diverses notes davant la nota, o acord, natural. Aquest ornament és representat, com podem veure en la Figura 4, mitjançant una petita nota, normalment un corxera amb un segment inclinat a sobre d'ella, situada a l'esquerra de la nota principal. L'acciaccatura tant pot ser ascendent (Figura 5, a) com descendent (Figura 5, b), com es pot veure en els exemples que es mostren a continuació.

Figura 4. Representació de Acciaccatura

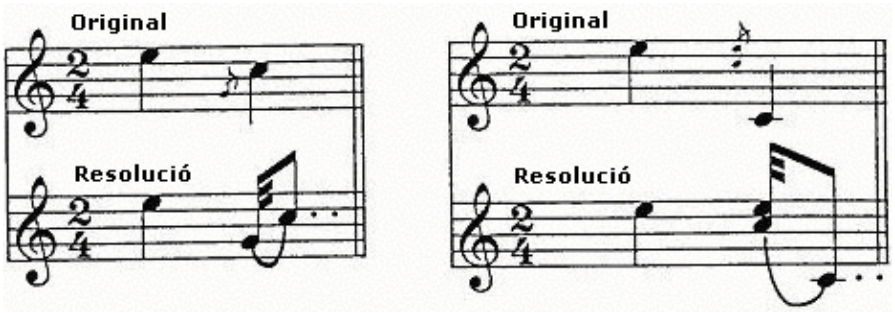


Figura 5. Acciaccatura (a) **Acciaccatura (b)**

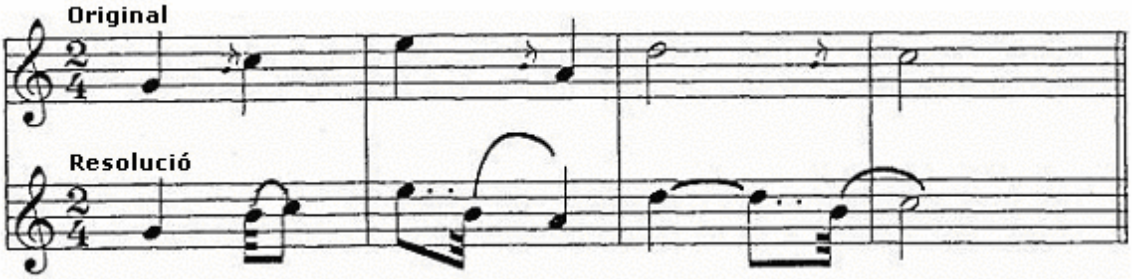


Figura 6. Acciaccatura (c)

2.3.2 Apoiatura

Aquest ornament deriva de la acciaccatura i consisteix en afegir una nota just abans de la nota principal, a la qual va lligada. Sovint l'apoiatura és una nota natural que segueix o precedeix a la principal en l'escala diatònica, però no existeix cap norma per regular aquesta forma musical. Això implica que hi hagin apoiatures de diferents notes col·locades de manera més lliure. La seva duració, normalment, depèn de la nota a la qual precedeix, la nota principal, ja que agafa la meitat del seu valor. És a dir, si l'apoiatura està realitzada sobre una blanca el valor d'aquesta serà de negra, si està sobre una corxera el seu valor serà de semicorxera i així successivament.

Tot i així, a vegades s'indica explícitament el temps de la seva duració escrivint la figura desitjada (un exemple d'això es pot veure en la Figura 7).

Podem trobar les apoiatures tant ascendents com descendents. A continuació mostrarem uns quants exemples:

En la Figura 8 podem veure una apoiatura sobre una blanca i com seria la seva resolució. Seguidament, podem veure un exemple més extens d'aquesta figura musical.

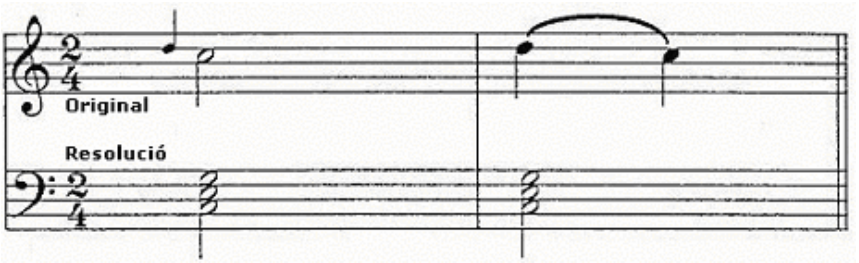


Figura 7. Apoiatura sobre blanca

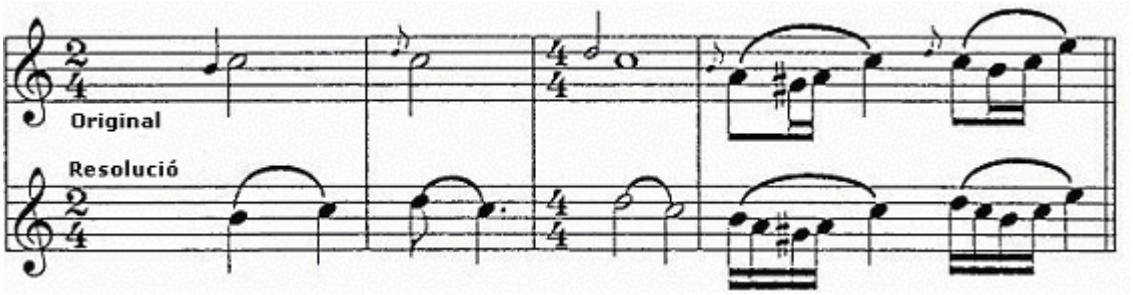


Figura 8. Diverses apoiatures

2.3.3 Mordent

El mordent, com les figures anteriors, és un ornament musical. Aquest és un conjunt de petites notes agrupades d'una a quatre sense duració pròpia i, per tant, agafen el tempo de la nota principal a la qual van lligades. El símbol d'aquest pot ser representat de les següents maneres, segons el que s'hagi d'interpretar:

Mordent simple ascendent

Mordent simple descendent

Mordent llarg ascendent

Mordent llarg descendent

Hi ha diversos criteris de classificació:

- *Ascendents o Descendents*: Segons la seva col·locació, si són més aguts o més greus que la nota principal. Aquesta és la classificació més habitual i la que s'ha utilitzat anteriorment per mostrar com es representa.
- *De grau o de salt*: Depenent de la seva última nota, si està a una distància de una segona o a una distància major.
- *Directes o circulars*: Si van o no directament a la nota principal.
- *D'anticipació o de retard*: Dependrà de si van units a la nota anterior o a la següent. Si van units a la nota anterior s'anticipen a la nota sense produir retard. En canvi, si van units a la següent, retarden la seva execució.

Les notes que composen el mordent poden anar alterades sense que dita alteració afecti a la resta del compàs.

A continuació es mostraran alguns exemples:

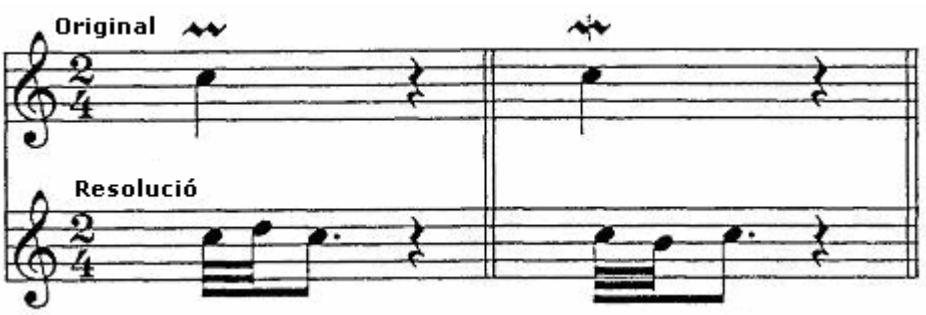


Figura 9. Mordent Simple sense alteració

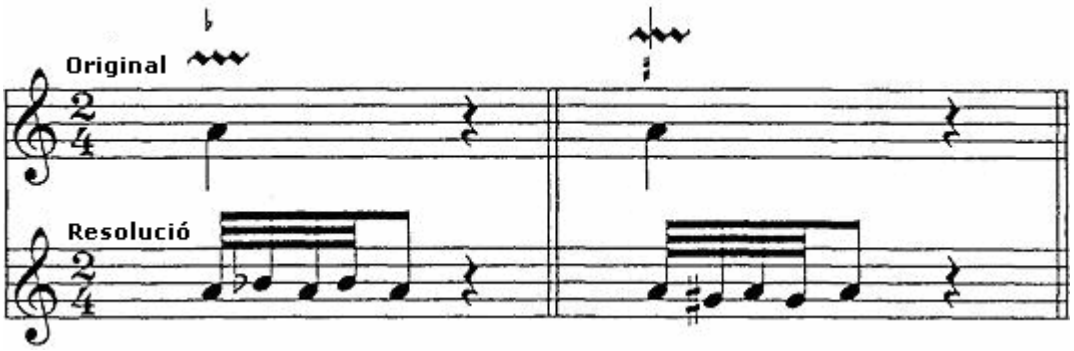


Figura 10. Mordent Llarg amb alteració

2.3.4 Trino

Aquest ornament musical consisteix en alternar ràpidament, amb la durada de la nota sobre la qual està, la nota principal amb la nota que la segueix, la qual és, normalment, la posterior en l'escala diatònica tot i que si està explícitament indicat es pot realitzar mitjançant una alteració, de manera que s'acaba utilitzant l'escala cromàtica.

Figura 11. Representació del trino

La representació més freqüent del trino ve donada per les consonants "tr" (extretes del seu propi nom) seguides d'una línia ondulant, com es mostra en la Figura 11. Tot i que aquesta és la representació més comú, n'hi ha d'altres possibles amb petites modificacions, algunes de les quals les podem veure a continuació (Figura 12).

Figura 12. Representació de diferents trinos

Podem classificar els trinos distingint-ne dos tipus: el clàssic, on escoltem primer la nota fonamental, i el barroc, que s'interpreta com si hi hagués inicialment una apoiatura.

A continuació mostrarem alguns exemples de com s'interpreten i es resolen els trinos. Podem veure que la notació d'un mateix trino es pot executar de diferents maneres.

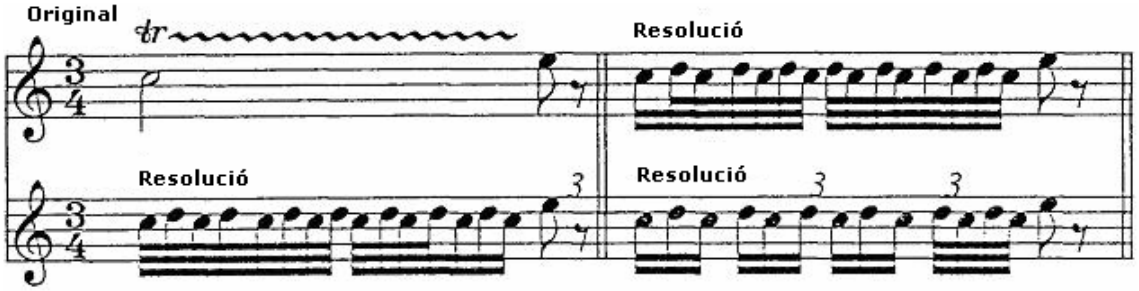


Figura 13. Exemple de trino

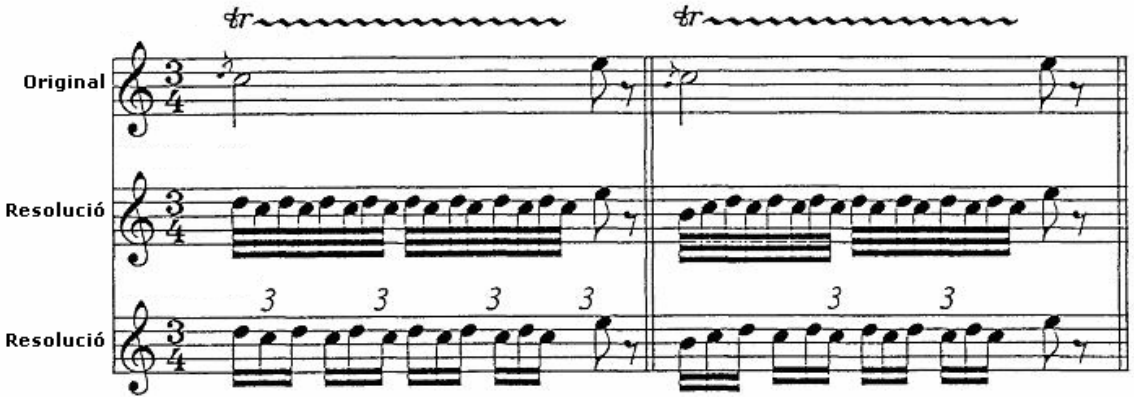


Figura 14. Exemple de trino amb apoiatura

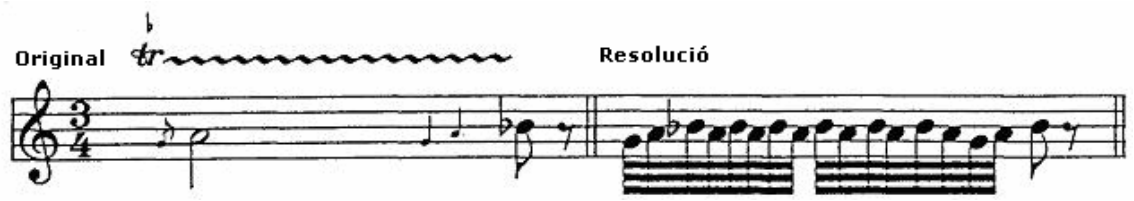


Figura 15. Exemple de trino amb alteració

Figura 16. Exemple de trino amb notes dobles

En els exemples anteriors podem veure com el trino no té tan sols una manera d'interpretació, si no que en pot tenir diverses, com es veu en la Figura 13. A més a més, aquest no només es pot interpretar amb una sola nota sinó que també mitjançant un grup, com és el cas de la Figura 16, o també es pot realitzar utilitzant l'escala cromàtica, com en la Figura 15.

Fent referència a la classificació esmentada anteriorment, podem observar que la Figura 13 i la Figura 15 es podrien considerar clàssiques, mentre que la Figura 14 i la Figura 16 es considerarien barroques (Trills 2005).

2.3.5 Grupet

El grupet (Figura 17) és un ornament melòdic de cinc notes musicals ascendents i descendents que inclou la nota superior i inferior de la nota principal i ella mateixa. Aquest pot estar situat sobre la nota natural (Figura 19) o bé entremig de dues notes (com és el cas de la Figura 20) amb la diferència que l'ornament, en aquest segon cas, el trobem en el temps feble.

El grupet es simbolitza mitjançant una “S” amb una rotació de 90 o 270 graus indicant la ruta o el camí que hauran de seguir les notes.

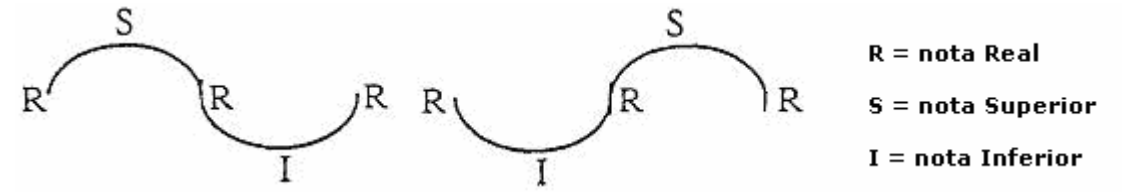


Figura 17. Figures del grupet

Aquestes notes auxiliars poden estar alterades i dita alteració es localitza a sobre i/o a sota del símbol del grupet (Figura 18).

A continuació mostrarem alguns dels símbols que s’utilitzen per fer la representació esmentada i alguns dels possibles exemples.

Figura 18. Grupet amb alteració

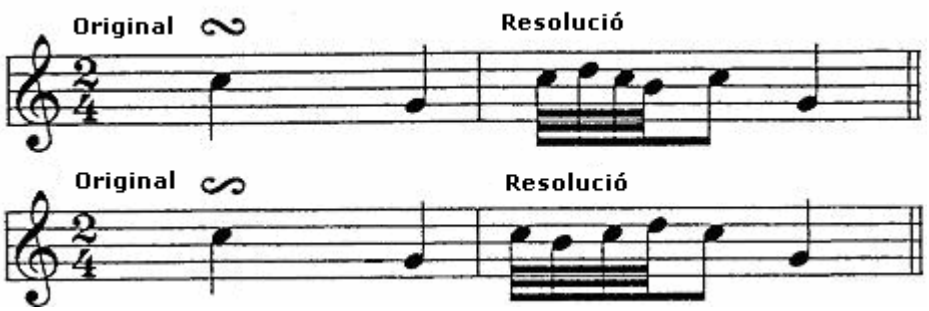


Figura 19. Exemple de grupet sobre la figura

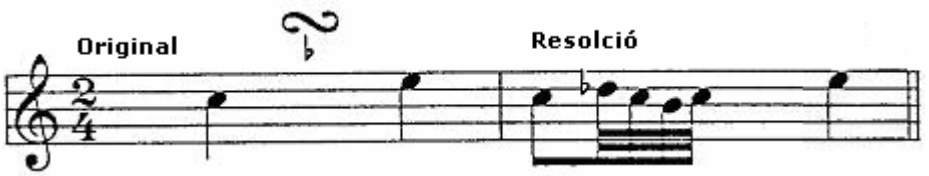


Figura 20. Exemple de grupet entre dues figures

3. Context tecnològic

En aquest capítol introduirem els conceptes tecnològics que s'han fet servir al llarg del projecte, com són la freqüència fonamental, el to, l'energia, el concepte d'inici (onset) i final (offset) de nota, el "Machine Learning", així com la recerca relacionada amb l'objectiu d'aquest projecte.

3.1 Freqüència i to

Podríem definir la freqüència (que és inversament proporcional al període) com el número d'oscil·lacions que efectua una ona en un interval de temps determinat, mesurada en herzs (Hz), que és el nombre de cicles per segon que realitza una ona.

Els humans podem arribar a sentir sons amb freqüències que oscil·len entre els 16 i 20.000 Hz però depèn de l'edat ja que, quan aquesta avança, aquest rang tendeix a disminuir.

Musicalment, la freqüència es relaciona amb l'altura corresponent a una nota, altrament anomenada to, la qual cosa implica que com més gran és la freqüència més agut és el to, que es caracteritza per la velocitat específica de vibració.

Com ja hem dit, a cada nota li correspon una freqüència determinada, un to, però aquest pot variar segons l'escala de referència que es prengui, ja que existeixen diversos models: l'escala temperada, la pentatònica, la Shree de l'Índia o la Sorog de Bali, entre d'altres.

El nostre sistema musical es basa en l'escala temperada, la qual va sorgir a causa de l'afinació fixa d'alguns instruments, com per exemple el piano. Aquesta escala consta de dotze notes equidistants amb una relació entre elles, anomenada semitò, de $\sqrt[12]{2}$. Al 1939 es va fixar un to de referència, el La4 a 440 Hz, per afinar la resta de les notes (XTEC 2005).

S'ha de tenir en compte però, que l'escala temperada manté una relació logarítmica i no lineal entre els semitons. Això significa que com més greu sigui la freqüència menor serà la distància presa entre els semitons i com més aguda sigui la distància entre els semitons serà major. Per exemple, si agafem el La4 a 440 manté una relació de 440 Hz amb la octava superior, és a dir, el La5 està a 880 Hz, per tant la diferència de tons és de 440 Hz com ja hem dit. Però en canvi, si el relacionem amb el La3, que té una freqüència de 220 Hz, tot i tenir la mateixa distància, és una octava inferior, la diferència és menor, de 220 Hz.

La freqüència és una magnitud instantània que pot anar variant, i aquests canvis poden ser deguts a vibratos, canvis d'afinació, etc.

3.1.1 Freqüència fonamental i harmònics

La freqüència fonamental la podem definir com la component principal d'una ona sonora, la qual té la major longitud d'ona i està relacionada amb el seu to.

Per exemple, si agafem una guitarra i pincem una corda, la vibració produeix els resultats d'un patró o model d'ona, però aquest model només es crea en instruments que tenen una vibració específica i regular de freqüència, coneguda com a freqüència harmònica o harmònics. La corda d'una guitarra, que té freqüència harmònica, està subjecte pels extrems mitjançant dos nodes (N) fixes i quan es produeix la vibració enmig d'aquests dos nodes es produeixen els anomenats antinodes (AN). L'harmònic més fonamental (Figura 21),

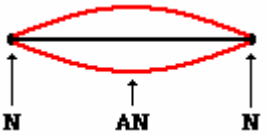


Figura 21. Freqüència fonamental o 1er harmònic

anomenat **freqüència fonamental**, és el que està associat al primer antinode que apareix, posicionat al centre dels dos nodes, és a dir, situat al centre de la corda el qual té la freqüència més baixa i la longitud d'ona més llarga. Hem de tenir en compte que aquest harmònic no és una ona completa dins el patró, ja que per ser així la ona, a part del moviment mostrat, hauria de deixar-se caure i retornar a un nou node, com es mostra en la Figura 22.

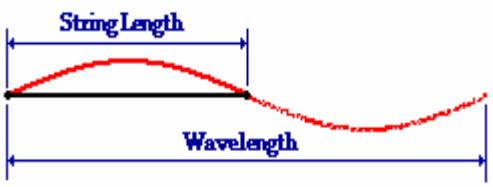


Figura 22.
En el primer harmònic la longitud d'ona és dues vegades la longitud de la corda

El segon harmònic (Figura 23) es produeix afegint un node més als nodes de la corda, concretament al centre situat entre els dos nodes inicials. D'aquesta manera, si un nou node és afegit al patró, l'antinode també s'ha d'inserir de tal manera que es mantingui l'ordre altern entre node i antinode per poder mantenir així el patró regular i repetitiu. Aquest node addicional dóna, com ja hem explicat, el segon harmònic amb tres nodes i dos antinodes. Contràriament al primer harmònic, aquest conté exactament una ona completa dins de la corda i per aquesta raó la longitud de la corda és igual a la longitud de la ona. La freqüència de vibració del segon harmònic és el doble que la freqüència fonamental.

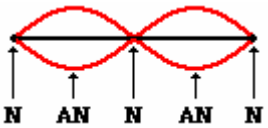


Figura 23.
2n harmònic

El tercer harmònic (Figura 25) de la corda d'una guitarra s'aconsegueix introduint dos nodes entre els nodes extrems de la guitarra i, per tant, afegir dos antinodes més (conservant l'antinode inicial) en un ordre determinat per mantenir el patró anterior: alternar un node amb un antinode. Els dos nodes addicionals han de ser introduïts de tal manera que quedin equidistants amb els nodes extrems de la corda. Per tant, en el tercer harmònic queda un total de quatre nodes i tres antinodes. En el tercer harmònic podem observa, com és el cas de la freqüència fonamental, que no hi ha la ona completa, més ben dit, hi ha dues ones, tot i que la última no està completa, com mostrem en la Figura 24. La freqüència de vibració del tercer harmònic és el triple que la freqüència fonamental.

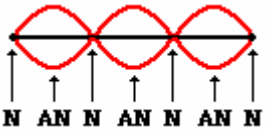


Figura 25.
3r harmònic

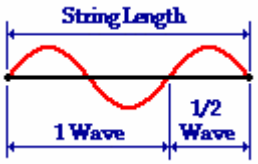


Figura 24.
En el tercer harmònic hi ha tres meitats d'ona dins la longitud de la corda

Després de la observació dels tres primers harmònics, podem reconèixer un patró: cada harmònic és el resultat d'afegir un node addicional (amb el seu antinode corresponent) i la meitat d'una ona. Si el nombre d'ones en la corda és reconegut podem extreure'n una equació que relacioni el patró de la longitud d'ona amb la longitud de la corda (Figura 26).

$$L=\frac{1}{2}\lambda \xrightarrow{\text{algebra}} \lambda=\frac{2}{1}L \qquad L=\frac{2}{2}\lambda \xrightarrow{\text{algebra}} \lambda=\frac{2}{2}L \qquad L=\frac{3}{2}\lambda \xrightarrow{\text{algebra}} \lambda=\frac{2}{3}L \qquad L=\frac{4}{2}\lambda \xrightarrow{\text{algebra}} \lambda=\frac{2}{4}L$$

Figura 26. l **= longitud d'ona | L = longitud de la corda**

Número de harmònics	Número d'ones en la corda	Número de nodes	Número d'antinodes	Relació entre la longitud d'ona i la corda	Relació de freqüència amb la freqüència fonamental (f)
1	1/2	2	1	λ = (2/1)*L	f
2	1 o 2/2	3	2	λ = (2/2)*L	2·f
3	3/2	4	3	λ = (2/3)*L	3·f
4	2 o 4/2	5	4	λ = (2/4)*L	4·f
5	5/2	6	5	λ = (2/5)*L	5·f

Figura 27. Relació entre longitud d'ona i longitud de la corda

Ara, a través de les relacions establertes anteriorment, desenvoluparem relacions entre longituds d'ona i freqüències per diversos harmònics:

Considerem que tenim una corda de guitarra amb una longitud de 80 cm. amb una freqüència fonamental de 400 Hz. Per aquest primer harmònic tenim que la longitud d'ona (que és dues vegades la longitud de la corda) és de 160 cm. Per tant, la velocitat d'ona ve determinada per la freqüència i la longitud d'ona.

$$V = f * \lambda$$

$$V = 400 \text{ Hz} * 1.6 \text{ m}$$

$$V = 640 \text{ m/s}$$

Aquesta velocitat correspon a qualsevol ona realitzada dins la corda de la guitarra, això implica que qualsevol model d'ona associat al segon harmònic, tercer, quart, etc. també tindrà dita velocitat, sense que afecti el canvi de freqüència. Per exemple el segon harmònic, utilitzant la taula anterior, seria 0.8 m (igual que la longitud de la corda). Per tant, utilitzant la equació anterior podem denotar que la freqüència del segon harmònic és de:

$$f_2 = V / \lambda$$

$$f_2 = \frac{640 m/s}{0.8 m}$$

$$f_2 = 800 \text{ Hz}$$

Si volem esbrinar la freqüència del tercer harmònic hem d'utilitzar la fórmula anterior canviant la longitud d'ona, que en aquest cas seria 0.533 m (mirant en la taula anterior λ = (2/3)*L), fent que la freqüència del tercer harmònic sigui:

$$f_3 = V / \lambda$$

$$f_3 = \frac{640 m/s}{0.533 m}$$

$$f_3 = 1200 \text{ Hz}$$

Podem veure que a partir d'aquests càlculs se'n pot treure un patró per calcular qualsevol freqüència, ja que el segon harmònic és dues vegades la freqüència del primer i el tercer també és tres vegades la freqüència del primer. Això significa que la relació entre la freqüència i els harmònics és la següent:

$$f_n = n * f_1$$

A més a més, la inversa d'aquesta equació ens dóna la longitud d'ona dels diferents harmònics:

$$\lambda_n = (1 / n) * \lambda_1$$

Número d'harmònics.	Freqüència. (Hz)	Longitud d'ona (l) (m)	Velocitat (m/s)	f_n / f_1	l_n / l_1
1	400	1.60	640	1	1/1
2	800	0.800	640	2	1/2
3	1200	0.533	640	3	1/3
4	1600	0.400	640	4	1/4
5	2000	0.320	640	5	1/5
n	n * 400	(2/n)*(0.800)	640	n	1/n

Figura 28. Relació entre longitud d'ona i freqüència

Quan es toca la guitarra, la corda, la caixa de ressonància i la vibració de l'aire en un conjunt de freqüències produeixen una ona amb barreja d'harmònics els quals, determinen el timbre i la qualitat del so que escoltem. Si el so que sona tan sols té un harmònic (la freqüència fonamental) aquest serà un so pur i pobre, mentre que si el so conté diversos harmònics (diverses freqüències) el seu timbre té una qualitat considerablement bona (Glenbrook 2005).

3.1.2 Hz vs cents vs interval

Anomenem interval al quocient donat per dos tons caracteritzats per les seves freqüències f_2/f_1. Aquestes fraccions (intervals) es representen simplificades al màxim, és a dir, amb una fracció irreductible. Per exemple, si nosaltres volem calcular el interval entre els sons a 240 Hz i 320 Hz seria:

$$\frac{f2}{f1} = \frac{320}{240} = \frac{4}{3}.$$

Podem dir que la nostra percepció entre la diferència de dos sons correspon als quocients entre les freqüències, la qual cosa implica que la percepció dels tons és de naturalesa logarítmica. Per aquest motiu podem mesurar els intervals mitjançant els logaritmes entre les freqüències de dos tons utilitzant l'escala de cents.

L'expressió dels intervals mitjançant cents es relaciona directament amb l'escala temperada (explicada anteriorment), per tant un cent és l'interval definit com:

$$2^{1/1200} = 1.000577895$$

L'exponent 1/1200 és així perquè l'octava conté 1200 cents (equivalents als 12 semitons) la qual cosa fa que cada semitò de l'escala temperada correspongui a 100 cents.

D'aquesta manera el càlcul del valor en cents d'un interval es realitza (i_c = interval en cents):

$$i_c = 1200 * \log_2 i$$

Si volem treballar amb logaritme de base 10 la fórmula anterior canvia lleugerament:

$$i_c = (1200 * \log i) / \log 2$$

i si volem trobar la fracció a partir dels cents simplement hem d'invertir la fórmula (Cents 2005).

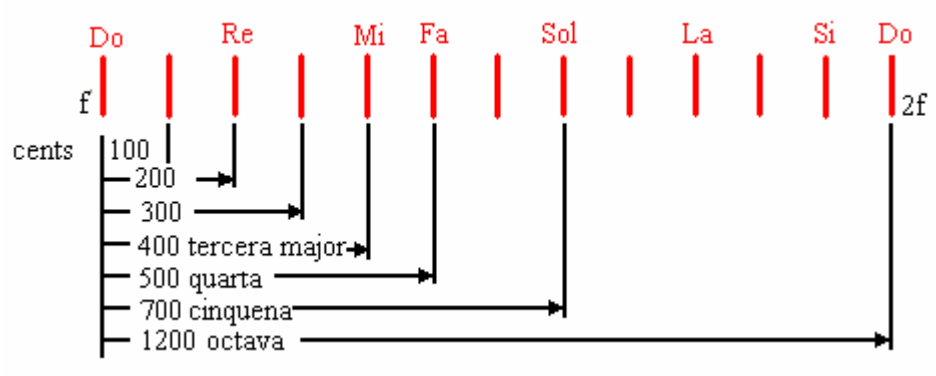


Figura 29. Divisió de la octava en cents

3.2 Energia

A més de caracteritzar una ona per a la seva freqüència, és necessari mesurar la mida d'una ona sonora, és a dir, la seva energia, que determina el seu volum.

Normalment, pensem en un senyal com una evolució de l'amplitud al llarg del temps. Per tant, aquesta pot semblar una bona raó per adoptar com a mida d'un senyal la part inferior de la corba. Tot i així, aquesta àrea pot ser negativa i no per aquesta raó ha de deixar de tenir importància, la qual cosa implica que s'hagi d'agafar el valor absolut de la senyal. El resultat que queda per sota de la corba, en valor absolut, és el que nosaltres anomenem energia (Energy 2005).

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} (|f(t)|)^2 dt$$

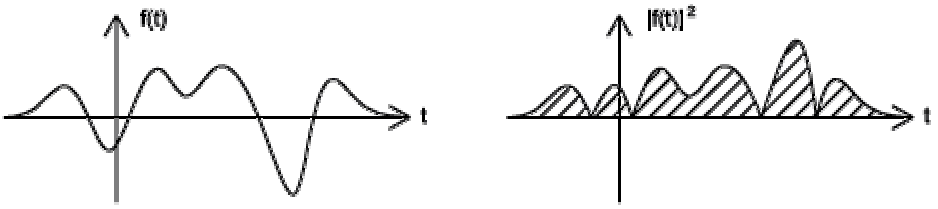


Figura 30. L'energia del senyal és la part subratllada.

En un senyal digital (que és el que nosaltres utilitzarem per a realitzar el projecte) el mostreig de la integral es converteix en un sumatori.

$$E = \sum_{n} |x(n)|^2$$

3.3 Inici i final de nota

Un cop hem definit la freqüència fonamental d'una nota i la seva energia instantània, podem dividir una ona d'un instrument en les seves notes.

Podríem definir inici (onset) i final (offset) d'un segment de nota com la indicació, en temps, d'un canvi significatiu d'energia o freqüència fonamental en una ona. Concretament un onset indica l'inici del canvi efectuat i un offset indica el final d'aquest esdeveniment, és a dir, el onset i el offset determinen l'inici i el final de cada nota. A continuació veurem un exemple per aclarir aquests conceptes a través del so d'un trino.

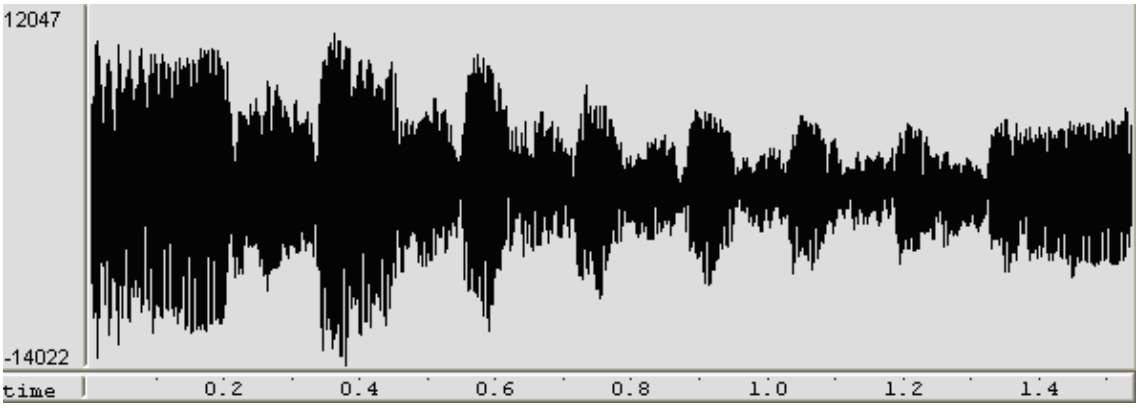


Figura 31. So d'un trino

Si volem marcar amb onsets i offsets el so anterior ho podem fer mitjançant l'energia, la freqüència fonamental o ambdues alhora. En aquest cas, l'energia es pot veure clarament marcada en el mateix so, tot i que no sempre és així. En la Figura 32 podem veure marcats els onsets i els offsets que es detectarien mitjançant l'energia, mentre que en la Figura 33 els podem veure a través de la freqüència fonamental.

Hem de ressaltar que la detecció dels onsets no seria possible en el cas de l'energia quan les notes són legatto i, en el cas de la freqüència, quan les notes canvien a través d'un glissando.

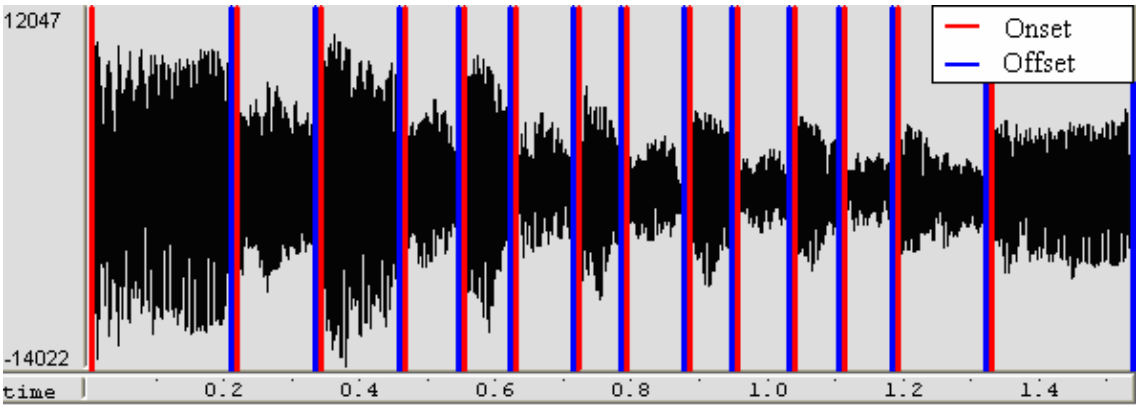


Figura 32. Onsets i offsets d'energia

Un exemple de la separació en onsets i offsets en segons respecte l'energia seria la següent:

	onset	–	**offset**		**onset**	–	**offset**
Primer:	0.0 s	–	0.2 s	Tercer:	0.35 s	–	0.47 s
Segon:	0.2 s	–	0.35 s	Quart:	0.47 s	–	0.57 s

Com podem observar, normalment els offsets i els onsets es detecten conjuntament, ja que el final d'una energia (offset) indica l'inici d'una altre (onset).

En el cas de la detecció d'onsets a través de la freqüència fonamental succeeix el mateix que en el cas de l'energia, que el final d'una freqüència fonamental (offset) indica l'inici d'una nova (onset), exceptuant l'inici i el final del so.

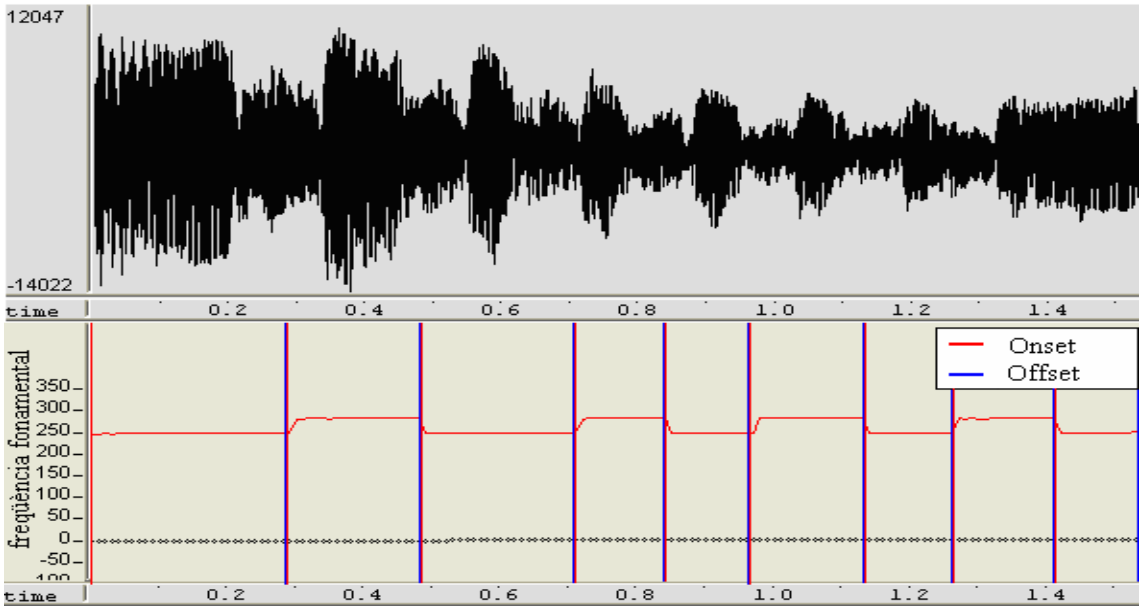


Figura 33. Onsets i offsets de freqüència fonamental

Tot i que l'essència de l'onset i l'offset és la mateixa els temps d'aquests varien:

	onset	–	**offset**		**onset**	–	**offset**
Primer:	0.0 s	–	0.29 s	Tercer:	0.48 s	–	0.71 s
Segon:	0.29 s	–	0.48 s	Quart:	0.71 s	–	0.84 s

En el cas de voler fer la detecció conjunta de onsets i offsets (Figura 34), el nombre d'aquests augmentaria ja que s'han d'unir els dos resultats anteriors (Figura 32 i Figura 33).

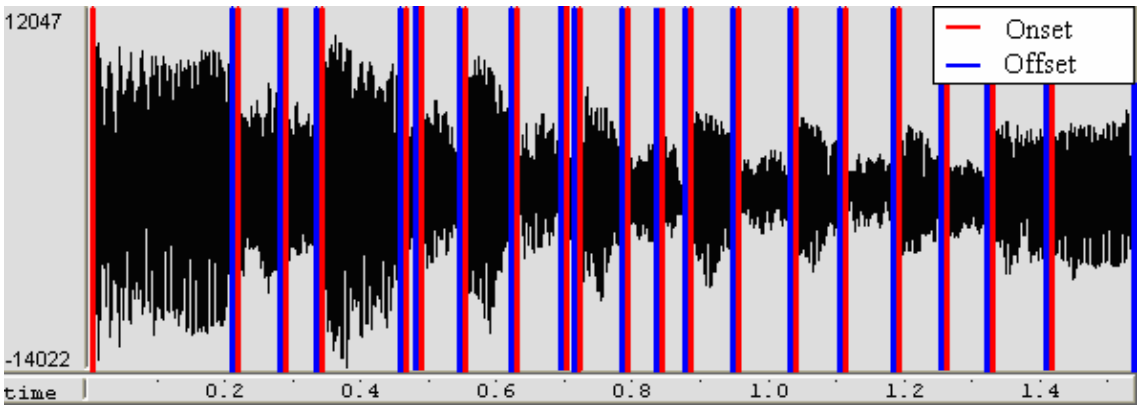


Figura 34. Onsets i offsets d'energia i freqüència fonamental

3.4 Machine Learning

"Machine learning" és una àrea d'intel·ligència artificial que investiga el desenvolupament de les tècniques que permeten que els ordinadors aprenguin. Més específicament el "Machine learning" és un aprenentatge basat en l'anàlisi de bases de dades. És molt semblant a la utilització de la estadística però amb la diferència que està preocupada amb la complexitat algorísmica de les implementacions computacionals.

El "Machine learning" té un gran ventall d'utilitzacions que inclou motors de cerca, diagnòstics mèdics, detecció de frau de les targetes de crèdit, anàlisi de la borsa, classificació de ADN, reconeixement d'escriptura o de parla, extracció de regles, etc (Machine learning 2005).

3.5 Investigació relacionada

En el camp musical la informació digital és molt abundant, com passa també en altres àmbits, tot i que moltes vegades aquesta és redundant. Fa uns deu anys es va intentar reduir aquest volum de dades utilitzant el PCA ("Principal Component Analysis", relacionat amb la intel·ligència artificial), que és un procediment estadístic de multivariants que sistemàticament identifica les dades redundants i ofereix un mètode per a redistribuir-les i eliminar aquelles que estan replicades innecessàriament, basat en estudis fets anteriorment per Kramer i Mathews l'any 1956, Stapleton i Bass al 1988 i, finalment, estudis realitzats per Sandell i Martens l'any 1995 (Sandell 1995).

D'aleshores ençà s'han fet diversos algorismes, dels quals podríem destacar el de ICA ("*Independent Component Analysis*", relacionat amb la intel·ligència artificial), que separa l'àudio original amb èxit, tot i que aquesta solució es realitza sota certes restriccions, una de les quals és que el número de micròfons ha de ser igual o major al número de fonts.

Recents informes (Casey i Westner 2000, Smaragdis 2001, Brown 2003 i Smaragdis, 2002) diuen que si el senyal és processat en frames de característiques de magnitud espectral, llavors l'anàlisi independent pot ser aplicat sense utilitzar diversos micròfons que extreguin els trets d'informació major.

Aquest mètode ha estat desenvolupat i ampliat per Judith C. Brown (Brown 2003) per tal de dur a terme un anàlisi de trinos ja que ICA és eficaç per extreure informació d'una manera ràpida, senzilla i amb una gran exactitud i, a més a més, aquestes dades són aprofitades per crear bases de dades. Ha escollit els trinos, concretament tocats en un piano, perquè són extremadament difícils d'analitzar, ja que el ràtio de la nota és molt ràpid i quan s'aplica el pedal hi ha, temporalment, dues notes superposades.

L'execució dels trinos ha estat estudiada per grups interessats en el funcionament d'instruments musicals o en els límits de percepció en la detecció de dos tons purs. Palmer al 1996 (Palmer 1996), va trobar que el nombre de notes que es poden realitzar en un trino depèn del tempo, la qual cosa implica que el ràtio del trino canvia menys del que es podria esperar. El ràtio de les notes varia des de 11 Hz (mesurant més de 11 parells de trino) en passatges lents, fins a 13.4 Hz (mesurant per sobre de 9 parells de trinos) en un passatge ràpid. Altrament, també s'ha declarat (Moore 1992) que els trinos del piano requereixen un dels moviments alterns més ràpids que és capaç de realitzar una mà, el límit està entre 12 i 14 notes/s si el trino es fa amb control i 16 notes/s si no s'exerceix cap mena de control sobre el trino (el nombre màxim de notes en un trino varia segons l'intèrpret i l'instrument).

4. Requeriments

L'objectiu del projecte és fer un anàlisi de notes ornamentals de gravacions de fagot per aconseguir modelar el comportament d'aquestes dins d'un sintetitzador expressiu, tal i com ho faria un instrumentista.

Per a arribar a aquest objectiu fan falta una sèrie de passos:

1. Analitzar gravacions de fagot i extreure'n els principals ornaments.

2. Fer un anàlisi automàtic dels ornaments per tal d'extreure una descripció melòdica que inclou l'inici, final i to de cada una de les notes presents en l'ornamentació.

3. Analitzar el comportament dels ornaments i les característiques essencials d'interpretació, és a dir, analitzar com es realitzen els trinos amb un fagot per poder-los reproduir posteriorment en MIDI d'una manera més natural, més propera a com ho faria un humà i no pas un ordinador.

Per dur a terme aquest propòsit hem de tenir en compte certs criteris inicials, els quals els classificarem en requeriments funcionals i requeriments no funcionals per tal de poder-los detectar i veure si la seva realització és viable.

A més a més hem de tenir en compte que aquest requeriments els hem de poder verificar per poder comprovar que no siguin pas objectius, i això ho hem de fer a través de la visualització de les dades obtingudes, la comparació d'aquestes amb les dades reals i veure el percentatge de resultats correctes obtinguts.

Hem de tenir en compte que, tot i tenir els requeriments definits, el cicle de vida utilitzat en aquest projecte és el desenvolupament evolutiu, ja que les fases d'especificació i desenvolupament les hem realitzat de manera entrellaçada.

4.1 Requeriments funcionals

Els requeriments funcionals són aquells que ens descriuen els serveis que ha d'oferir el sistema i com hauria de reaccionar aquest segons les entrades donades.

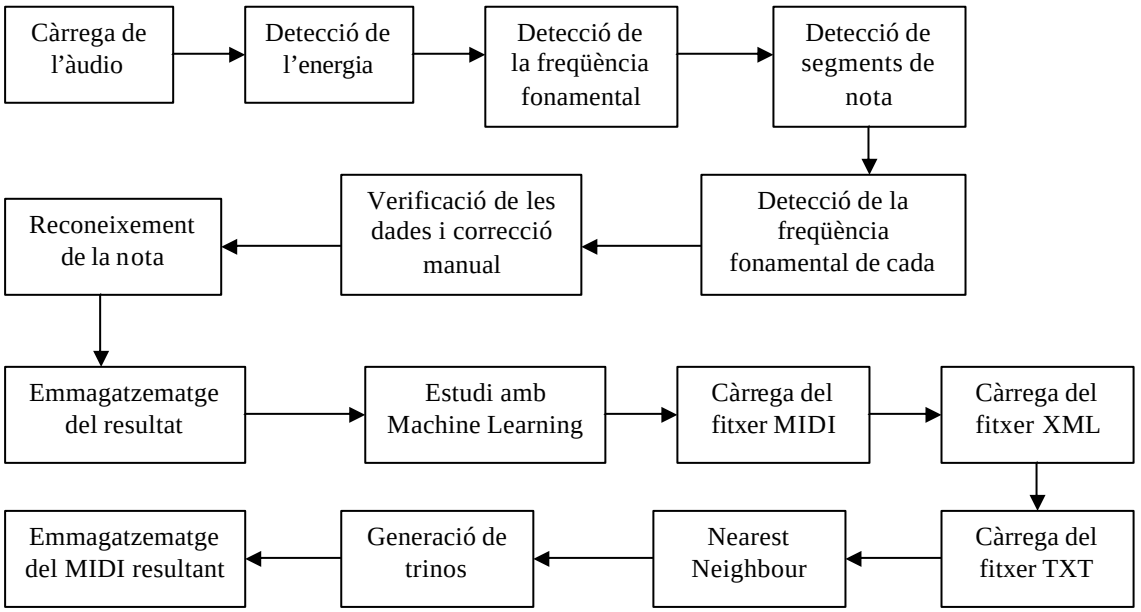


Figura 35. Serveis del sistema

- Càrrega de l'àudio: El programa ha de configurar les dades de l'àudio indicat.
- Detecció de l'energia: El sistema ha de detectar els canvis d'energia i guardar el temps en que aquests s'han produït.
- Detecció de la freqüència fonamental: El sistema ha de detectar els canvis en la freqüència fonamental i guardar el temps en que s'han produït.
- Detecció de segments de nota: Un cop obtinguts els onsets de l'energia i de la freqüència s'ha de seleccionar quins són els instants inicials (onsets) i finals (offsets) que descriuen millor les notes d'ornament del trino, seleccionar-los i emmagatzemar-los.
- Detecció de la freqüència fonamental (to) de cada nota: Un cop obtingut tots els onsets que descriuen les notes d'ornament del trino, s'han de calcular les freqüències fonamentals de cada nota d'aquests per, posteriorment, poder-los assignar una alçada.
- Verificació de les dades i correcció manual: L'estudi requereix una gran precisió temporal, que actualment no es pot obtenir mitjançant un anàlisi totalment automàtic. L'aplicació ha de permetre la correcció de dades que no hagin estat correctament analitzades, tant sigui perquè s'ha detectat una freqüència fonamental inferior o superior a l'escala que li pertoca o bé que s'hagin detectat dos o més onsets que tenen la mateixa freqüència fonamental i, per tant, n'hauria de ser un de sol.
- Reconeixement de la nota: El programa ha de detectar el nom de la nota i el seu equivalent en MIDI a partir de la freqüència obtinguda.
- Emmagatzemament del resultat: El sistema ha de guardar les dades dels onsets i de les freqüències fonamental en Hz en un fitxer.
- Estudi amb tècniques de Machine Learning: Hem d'estudiar com es comporten els trinos i les característiques d'aquest comportament per tal de poder, posteriorment, fer una simulació a través del MIDI. L'estudi el centrarem en el número de notes i la manera, en el temps, d'executar-les.
- Càrrega del MIDI: El programa ha de llegir la cançó MIDI sense trinos.
- Càrrega del fitxer XML: S'indica el nom del fitxer XML on estan indicats quines notes han de portar un trino i les característiques de cadascun d'ells.
- Càrrega del fitxer TXT: S'ha de carregar un fitxer TXT amb el contingut de les dades de l'anàlisi dels trinos realitzats amb el "Machine Learning".
- Nearest Neighbour: Per cada trino que s'hagi de generar, a partir de les característiques definides en el XML, busquem el trino analitzat amb "Machine Learning" més semblant i es crea el nom del fitxer on hi podem trobar els descriptors d'aquest trino.
- Generació de trinos: Per a cada nota de la melodia que s'hagi de substituir per un trino, a partir dels descriptors trobats en el fitxer obtingut del "Nearest Neighbour", s'ha de fer una imitació dels descriptors trobats i adaptar-los a la nova nota.
- Emmagatzemament del MIDI: S'ha de guardar la melodia amb els trinos generats en un fitxer MIDI.

A continuació mostrarem el diagrama de casos d'ús, que és una representació d'alt nivell de les funcionalitats del sistema, per tal de representar d'una manera més entenedora els requeriments funcionals.

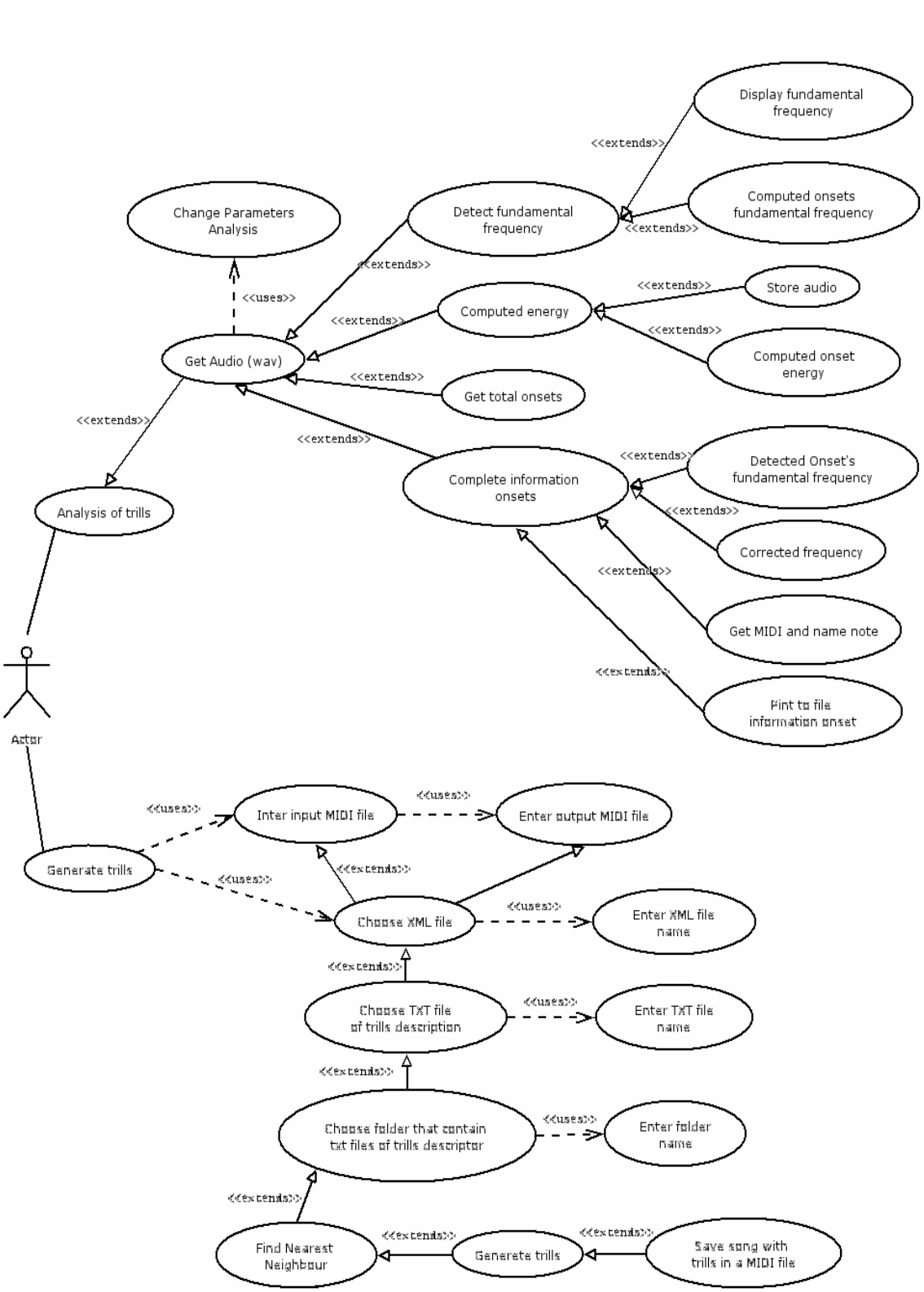


Figura 36. Diagrama de casos d'ús

4.2 No funcionals

Els requeriments no funcionals, que detallarem a continuació, són aquells que ens parlen de com ha de ser el sistema: quins són els seus serveis, les seves funcions i restriccions, quin ha de ser el llenguatge de programació utilitzat, etc.

- Tipus de gravacions: Les gravacions han d'estar en mode mono i per aquesta raó les hem hagut de transformar ja que inicialment estaven en estèreo.
- Format dels fitxers de l'anàlisi: Els fitxers d'àudio que contenen els trinos han d'estar en format wav perquè l'aplicació sigui capaç de llegir-los i alhora analitzar-los.
- Format dels fitxers de la síntesi: Els fitxers d'àudio tant de la melodia inicial (sense trinos) com de la melodia final (amb trinos) han de ser en format MIDI. El fitxer amb les característiques de cada trino que s'ha de generar ha d'anar en format XML. Finalemtn, els fitxers dels descriptors i el dels resultats de l'anàlisi del "Machine Learning" han de ser en format txt.
- Visualització dels sons (melodies complertes i trinos): Ho hem de fer a través d'un editor de sons (Sound Forge o wavesurfer, explicats a l'apartat d'eines) per tal de poder extreure els trinos de la melodia i analitzar-los en detall.
- Utilització de CLAM: Hem d'utilitzar l'entorn CLAM 7.0 per a la detecció dels onsets, ja que ens facilita la detecció de la freqüència fonamental (bàsica per a realitzar el projecte).
- Utilització del Visual Studio.Net: Hem d'utilitzar aquesta versió a causa de la compatibilitat amb la versió utilitzada de CLAM: CLAM 7.0.
- Utilització del SMSTools: Necessari per visualitzar l'espectre dels sons i veure la evolució de l'energia i la freqüència fonamental i poder així comprovar els resultats.
- Utilitzavió de WEKA: Hem d'utilitzar WEKA per realitzar el "Machine Learning" de l'anàlisi dels trinos.

5. Eines utilitzades

El projecte s'ha realitzat a través del sistema operatiu de Windows XP perquè teníem un coneixement previ de les eines necessàries, ja que les hem utilitzat (la majoria d'elles) anteriorment.

A continuació comentarem les diverses eines que hem utilitzat per a la realització del projecte, segons les necessitats que ens hem trobat.

5.1 Sound Forge 6.1

Aquest és un editor d'àudio que inclou eines per al processat d'àudio, el seu enregistrament i la seva manipulació a part de proporcionar elements de tractament d'efectes de so com distorsió, modulació de l'amplitud, modificació del pitch, entre d' altres.

Tot i les seves prestacions nosaltres hem utilitzat aquest programa simplement per realitzar la separació i classificació de les gravacions inicials i poder fragmentar-les (en trinos) i estudiar-les.

5.2 Finale 2005

Finale és un programa estàndard de notació musical creat a finals de l'any 1988 per l'empresa "Coda Music Software", actualment anomenada "MakeMusic", que va revolucionar la manera de treballar dels músics, ja que facilitava molt l'escriptura de la música (Finale 2005).

Aquest programa dóna control de la major part dels aspectes musicals, com podrien ser les notes, els ritmes, les dinàmiques, les notes ornamentals, etc. per poder escriure obres d'una manera professional. A més a més, proporciona un control sobre l'entrada i sortida MIDI augmentant les avantatges de la seva utilitat.

Hem utilitzat el Finale per reproduir les partitures de les que hem extret els trinos i poder així mostrar l'enumeració que hem realitzat d'aquests per tal de poder-hi treballar.

5.3 Wavesurfer

Wavesurfer és un programari lliure per a la visualització i manipulació del so. Les aplicacions més típiques en que es fa servir aquest programa és l'anàlisi del so i la transcripció i anotació d'aquest. Wavesurfer també pot servir com a plataforma per aplicacions més avançades o especialitzades gràcies a, entre d'altres factors, a nous components de visualització avançats (Wavesurfer 2005).

Aquest programa l'hem utilitzat per a la visualització, comprovació i correcció dels onsets i offsets detectats mitjançant l'anàlisi del so.

5.4 C++

C++ és un llenguatge de programació orientat a objectes (OOP) creat per Bjarne Stroustrup entre el 1983 i el 1985 en els laboratoris "Bell Labs". Aquest llenguatge és una

extensió del C i es va formar quan Stroustrup afegeix (abans del 1983) trets al llenguatge C, anomenant-lo així "C amb classes". El que va fer és combinar la simulació de classes i objecte orientats a la potència i eficàcia de C. El terme de C++ va ser utilitzat per primera vegada l'any 1983.

Aquest llenguatge, al ser orientat a objectes, facilita la reutilització i extensió de codi i a més a més, afegeix un nou concepte anomenat "operador de sobrecàrrega" la qual cosa no s'havia vist mai abans en la OOP. A part, C++ manté els aspectes del llenguatge C, com per exemple els trets que simplifiquen l'accés a memòria, però amb la diferència que C està preparat per accedir-hi a baix nivell.

Tot i que C i C++ siguin dos llenguatges amb una sintaxis molt similar són molt diferents en la seva naturalesa: C és un llenguatge processal que per resoldre un programa ha de trossejar la feina a realitzar en tasques consecutives més petites i concretes, conegut com el disseny descendent. En canvi C++, al ser una OOP, el que hem de fer és dissenyar classes que són extraccions de objectes físics i reals, les quals contenen l'estat de l'objecte, els seus membres i les seves operacions, amb les que s'escriu el programa per resoldre les tasques proposades.

Un servei molt important que proporcionen les classes i que cal destacar és l'encapsulament, que és la ocultació intencionada d'informació per facilitar al programador un control precís sobre els estats de l'objecte. A part de l'avantatge de protegir les dades d'accessos indeguts hi ha una disminució de l'acoblament amb el qual podem fer més modificacions en les classes sense que tingui tantes repercussions, per tant fa que hi hagi un disseny més senzill i més fàcil de mantenir. Hi ha tres nivells d'encapsulament: el públic (public, +), on els atributs i operacions són visibles pels mètodes de qualsevol classe, el protegit (protected, #) on els atributs són visibles i operacions són visibles, a part de la pròpia classe, per totes aquelles que hi deriven i finalment tenim el privat (private, –), els atributs i operacions dels quals només s'hi pot accedir des dels mètodes de la pròpia classe (C++ 2005).

```
class myClass
{
        public:
                // Declaració dels atributs i operacions de caràcter públic,
                // visibles per a totes les classes
        protected:
                // Declaració dels atributs i operacions protegides,
                // visibles només per la pròpia classe i aquelles que hi deriven
        private:
                // Declaració dels atributs i operacions privades,
                // visibles només per a mètodes de la pròpia classe
};
```

Figura 37. Exemple d'encapsulament

Un altre element molt important en C++, i que no podem oblidar, és que aquest és un llenguatge orientat a objectes que permet l'herència múltiple, és a dir, que una subclasse té més d'una superclasse, manera en que la subclasse pren totes les propietats de cadascuna de les superclasses (Software 2004).

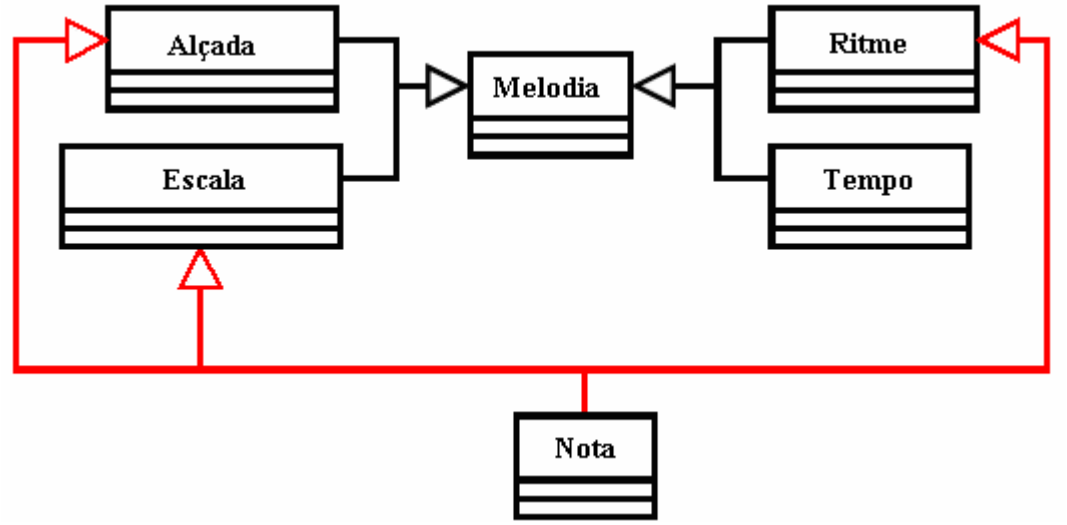


Figura 38. Exemple d'herència múltiple

Aquest llenguatge l'hem utilitzat per realitzar el codi del projecte, amb el qual s'analitza l'àudio i s'extreu la freqüència fonamental, l'energia i es tracten aquestes dades per poder obtenir el resultat més òptim possible.

5.5 Visual Studio. NET

El Visual Studio. Net és la última versió del Visual C++ i és un producte IDE: "Integrated Development Enviroment" creat l'any 1998. Concretament és un compilador per als llenguatges de programació C i C++ realitzat per Microsoft el qual ajuda a trobar errades en el codi realitzat en aquests llenguatges i poder-ho així corregir (Visual 2005).

Hem utilitzat aquest compilador de programació en C++ per tal de poder dur a terme tots els algorismes necessaris per a fer l'anàlisi del so i extreure'n així totes les característiques necessàries utilitzades posteriorment per a reproduir un so similar en MIDI.

5.6 CLAM 7.0: C++ Library for Audio and Music

CLAM és un framework de lliure distribució creat l'octubre del 2000 com un projecte intern del MTG (Music Technology Group) en la UPF (universitat Pompeu Fabra). Aquest projecte està sota la llicència GNU-GPL que permet el desenvolupament d'aplicacions d'àudio sobre les plataformes GNU/ Linux, Windows i OSX a través de la programació en C++ i la utilització avançada d'algorismes de processament. Però no està limitat tan sols a la part del processament sinó que també pot ajudar en molts altres aspectes, alguns dels quals anomenem a continuació:

- Accés a dispositius d'àudio i MIDI
- Gestió de fils d'execució, els threads
- Serialització d'objectes en formats com el XML i SDIF
- Visualització i control sobre les dades
- Integració de la visualització mitjançant la utilització de diversos "toolkits"
- Interconnexió dels mòdils de la aplicació de forma independent

A més a més CLAM també està capacitat per a realitzar processo complexes com per exemple:

- Tractament de dades heterogènies: mostres, informació espectral, símbols, informació estructurada...
- Fluxos de dades complexes amb events asíncrons (controls), diferents mecanismes d'alimentació...
- Escalabilitat mitjanant composició de processos petits
- Creació dinàmica i interconnexió de xarxes de processos.

Finalment també ofereix eines que disposen d'algorismes preparats per a realitzar, per exemple:

- Models espectrals i transformacions
- Extracció de característiques
- Classificació

Els objectius inicials d'aquest projecte, tot i que han anat evolucionant, eren crear una llibreria de classes en C++ per utilitzar en projectes interns del MTG a través d'un entorn flexible, complet i independent de la plataforma per realitzar l'anàlisi i la síntesi de sons mitjançant tres característiques principals:

- Completitud: Ha d'incloure totes les eines que puguin ser necessàries per la implementació d'un projecte sobre el preocessament d'àudio (entrada/sortida, processat, càrrega, visualització...)
- Flexibilitat: Ha de ser fàcil d'utilitzar i adaptar-se a tot tipus d'utilitats
- Independència de la plataforma: Ha de compilar sota les plataformes Windows, Linus i Mac

Finalment, podem dir que el principal element de CLAM és el procés. Un procés té associat una classe per cada configuració i unes dades per a processar a través de l'aplicació d'algun algorisme. Els processos s'inicien, s'executen i s'aturen a través de mètodes comuns a tots ells, ja que tots deriven de la mateixa classe: Processing (CLAM 2005).

CLAM l'hem utilitzar per a realitzar l'anàlisi de l'àudio i poder-ne extreure la freqüència fonamental, l'energia i, posteriorment, tractar aquestes dades per obtenir els onsets i offsets més adients de cada trino.

5.7 MATLAB: "MATrix LABoratory"

Matlab és un llenguatge inventat per Cleve Moler, president del departament de ciència computacional de la universitat de "New Mexico", a finals dels anys 1970 per facilitar l'accés a LINPACK, un software per la realització d'àlgebra numèrica. Posteriorment, al exposar-ho a la universitat de Stanford l'any 1983 es va reconèixer el seu potencial, fent que aquest es reescrivís en C i aparegués un any més tard sota el nom de MATLAB. Inicialment MATLAB va ser adoptat per enginyers de control, però ràpidament el seu ús va ser generalitzat (MATLAB 2005).

Nosaltres l'hem utilitzat per obtenir dades que ens ajudessin a fer estadístiques sobre diferents aspectes dels trinos, com poden ser la velocitat, el nombre de notes en cada trino, el comportament general, etc.

5.8 WEKA

L'octubre del 1973, Warner i Karin Mützel van fundar "WEKA Specialist Publishing House for Public Authorities and Industry". D'aleshores ençà aquest grup corporatiu ha passat a ser un dels més grans d'Europa.

Des de l'abril del 2001 "WEKA Corporate Group" ha estat estructurada en quatre divisions: "Bussines information", "Journals Group", "Info Brochures and Cartography" i "Creative Design" (WEKA 2005).

El programa que nosaltres hem utilitzat de WEKA és el "Weka Machine Learning", que és una col·lecció d'algorismes d'aprenentatge per resoldre problemes amb dades reals. Aquest està escrit en java i corre sobre pràcticament qualsevol plataforma i es pot aplicar directament o cridar-lo des del seu propi codi java (WEKA 2005).

6. Material sonor utilitzat

Per a aquest projecte hem fet servir unes gravacions d'un professor i instrumentista de fagot. En aquestes gravacions se li va demanar a l'instrumentista tocar una obra del segle XVIII amb ornaments, principalment trinos, i les va tocar amb i sense ornaments i en 3 tempos diferents cadascuna d'elles. L'Adagio està tocat a tempo 50, 68 i 100, mentre que l'Allegro Moderato i l'Affettuoso està tocat a 60, 92 i 120. Les obres es presenten a continuació.

6.1 Partitures

Les partitures sobre les que estan basades les gravacions que hem utilitzat per realitzar l'anàlisi són tres fragments sobre tres moviments de "Les Délices de la Solitdude, Sonata IV" de Michel Corrette. En la partitura, sota cada nota on hi ha un trino, es troben uns números indicant quin és el trino al que ens referim; si és el primer, segon, tercer...

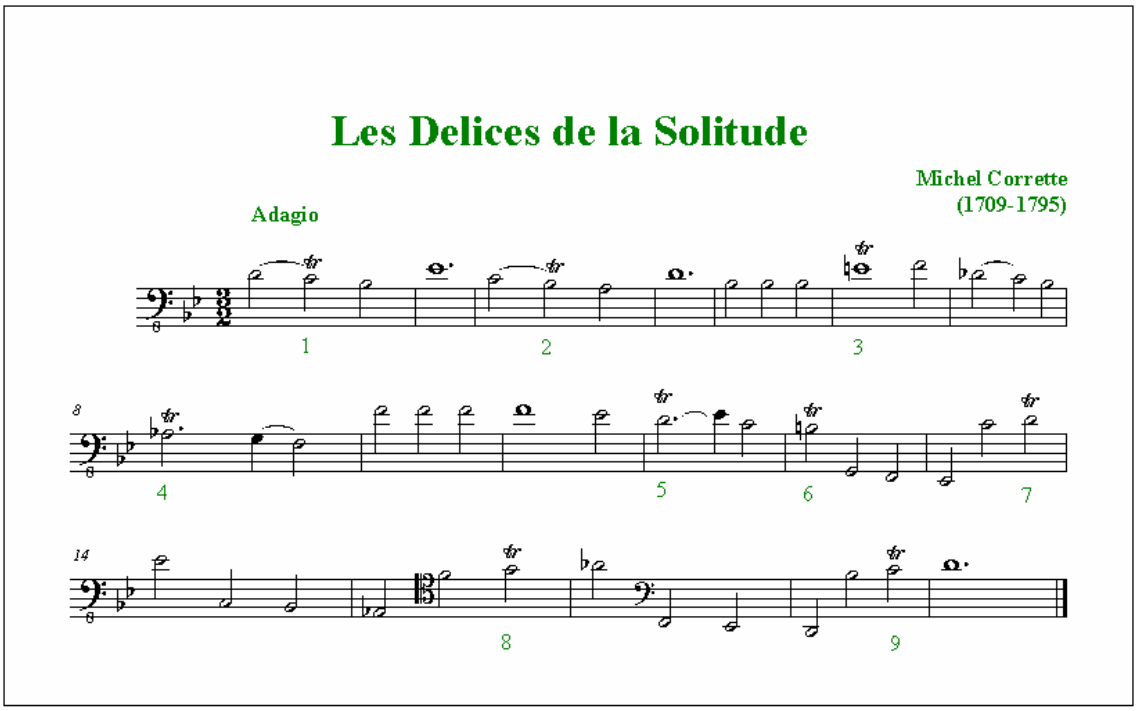


Figura 39. Les Delices de la Solitude: Adagio

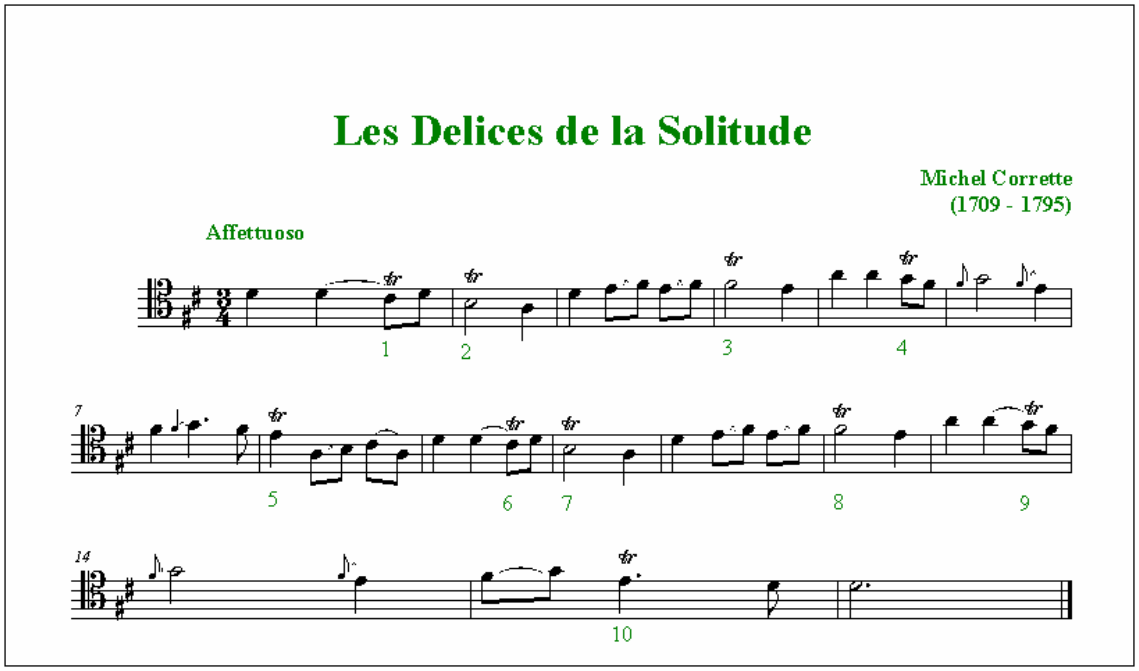


Figura 40. Les Delices de la Solitude: Affettuoso

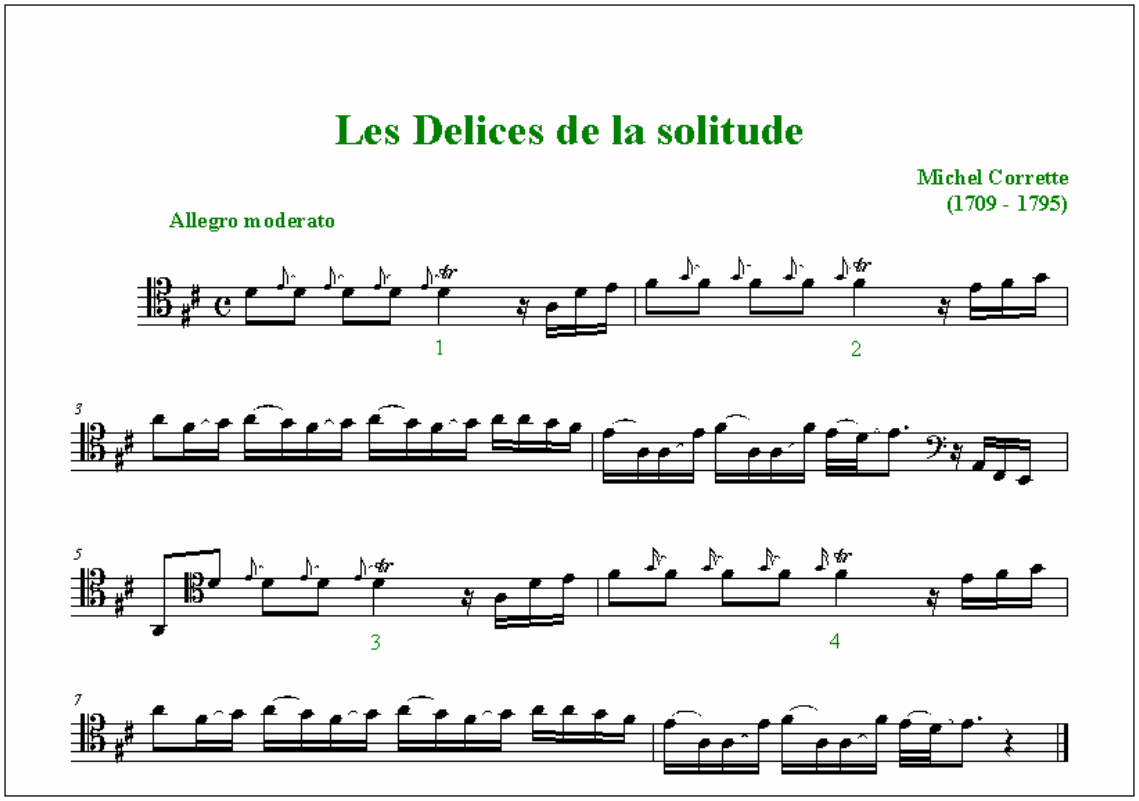


Figura 41. Les Delices de la Solitude: Allegro moderato

6.2 Organització dels fitxers d'àudio

Un cop ens hem estudiat totes les partitures (tot i que només hem mostrat aquelles que han estat utilitzades, les referents al tape2), hem escoltat les gravacions i les hem separat en tres pistes (tapes) introduint-les cadascuna d'elles en un directori amb el seu mateix nom, que explicarem a continuació:

Tape1

En el primer hem posat els enregistraments que fan referència a l'estudi de l'expressivitat. Són tres fragments de peces diferents i cadascuna d'elles està tocada diverses vegades modificant l'expressivitat amb la qual s'interpreta. Alhora, cadascuna d'elles, té dues gravacions amb poca i molta expressivitat. Aquestes són: Indifferent, Happiness, Love, Pride, Tenderness, Curiosity, Contentment i Anger.

Dins el directori *tape1* els noms dels fitxers guardats estan de la següent manera:

El número inicial correspon al Tape, en aquest cas el 1. A continuació, s'indica el número de pista seguit de l'expressivitat corresponent indicant si aquesta està interpretada amb menor (Low) o major (High) intensitat. En el cas que l'expressivitat fos Indifference no s'indica la seva intensitat ja que no expressa cap emotivitat.

Exemples:

Tape 1, primera pista, expressivitat Indifference:

1_1_Indifference

Tape 1, novena pista, expressivitat Contentment amb una intensitat d'expressivitat elevada (High):

1_9_Contentment_High

Tape 1, sisena pista, expressivitat Contentment amb una intensitat d'expressivitat baixa (Low):

1_6_Tenderness_Low.wav

Observacions:

- 1_2_Happiness_Low: Falta una nota, concretament el segon mi del primer compàs.
- 1_32_Shame_High: El sol del compàs 7 s'executa molt ràpid.
- 1_63_Disgust_High: S'incereix una nota en el compàs 5 entre el DO i el LA

Tape2

Aquí hem guardat les gravacions que fan referència a l'obra del compositor francès Michael Correte (Figura 39, Figura 40 i Figura 41), de la qual estudiarem els trinos. Ja que hem utilitzat aquestes gravacions per dur a terme el projecte, les hem hagut de preparar d'una manera més específica (respecte a les altres dues) per poder-hi treballar i que no hi hagi confusió.

Inicialment hem separat la melodia segons els moviments i els tempos establerts, classificant-los de la següent manera dins del directori amb el mateix nom: El número inicial correspon al Tape, en aquest cas 2, a continuació s'indica el número de pista seguit de l'expressivitat (el moviment) corresponent, el tempo i, finalment, si hi ha notes d'ornament. Si la gravació està amb notes d'ornament s'indica mitjançant la paraula With i si no en porta amb la paraula Without.

Exemple:

Tape 2, segona pista, expressivitat Affettuoso, tempo 60, amb ornament.

2_2_Affettuoso_60_With

Tape 2, quarta pista, expressivitat Affettuoso, tempo 60, sense ornament.

2_4_Affettuoso_60_Without

Dins del directori *tape2*, a part del directori melodia, hi ha tres directoris més: trino, trino_mono i tots_trinos.

Directori trino

En aquest hi trobem altres directoris corresponents al nom de les melodies del tape2, on s'indica el tape, la pista, l'expressivitat (o moviment), el tempo i que el trino està amb notes d'ornamentació (With).

Exemple:

Tape 2, segona pista, expressivitat Affettuoso, tempo 60, amb ornament

2_2_Affettuoso_60_With

Tape 2, dinovena pista, expressivitat Allegro Moderato, *tempo 120, amb ornament*

2_19_AllegroModerato_120_With

A més a més, dins de cadascun d'ells es troben els trinos gravats en estèreo anomenant-los de la següent manera (cadascun relacionat amb el directori on es troba): El tape, la pista, l'expressivitat (o moviment), el tempo, dient que el trino està amb notes d'ornamentació (With) i el número de trino, agafat de la partitura (Figura 39, Figura 40 i Figura 41):

Exemple

Directori 2_2_Affettuoso_60_With:

Tape 2, segona pista, expressivitat Affettuoso, tempo 60, amb ornament, primer trino.

2_2_Affettuoso_60_With_1

Directori_2_26_Adagio_100_With:

Tape 2, pista 26, expressivitat Adagio, tempo 100, amb ornament, setè trino.

2_26_Adagio_100_With_7

Directori trino_mono

En el directori trino_mono trobem el mateix i classificat de la mateixa manera que en els directoris i fitxers que es troben dins del directori trino però amb una petita diferència, que aquests ja estan passats a mono (els anteriors estaven en estèreo). Per tant, els nom dels directoris i fitxers serà el següent: el tape, la pista, l'expressivitat (o moviment), el tempo, dient que el trino està amb notes d'ornamentació (With), la indicació que està en mono i, en el cas dels fitxers, abans d'indicar que és mono s'indica el número del trino (prenent també l'ordre les partitures de les Figura 39, Figura 40 i Figura 41.

Exemple:

Directori 2_2_Affettuoso_60_With_mono:

Tape 2, segona pista, expressivitat Affettuoso, tempo 60, amb ornament, primer trino, en mono.

2_2_Affettuoso_60_With_1_mono

Directori 2_26_Adagio_100_With_7_mono:

Tape 2, pista 26, expressivitat Adagio, tempo 100, amb ornament, setè trino, en mono.

2_26_Adagio_100_With_7_mono

Directori tots_trinos

Aquest directori, a diferència dels altres, és que no conté subdirectoris, si no que tots els trinos (en mono) estan introduïts junts amb els següents noms: el tape, la pista, l'expressivitat (o moviment), el tempo, dient que el trino està amb notes d'ornamentació (With), el número de trino i la indicació que està en mono.

Exemple:

Tape 2, segona pista, expressivitat Affettuoso, tempo 60, amb ornament, desè trino, en mono.

2_2_Affettuoso_60_With_10_mono.wav

Tape 2, pista 14, expressivitat Allegro Moderato, tempo 92, amb ornament, segon trino, en mono.

2_14_AllegroModerato_92_With_2_mono.wav

Tape3

Finalment hem separat les improvisacions que s'havien fet de diverses expressivitats, les quals són: Happiness, Sadness, Anger i Tenderness (cadascuna d'elles amb dues interpretacions diferents, excepte la última que en té tres).

Dins el directori *tape3* els noms dels fitxers guardats estan de la següent manera:

El número inicial correspon al Tape, en aquest cas el 3. A continuació s'indica el número de pista seguit de l'expressivitat improvisada corresponent.

Exemple:

Tape 3, segona pista, expressivitat Happiness1

3_2_Happiness1

Tape 3, cinquena pista, expressivitat Tenderness1

3_5_Tenderness1

7. Descripció melòdica del material sonor: de l'àudio cap a la melodia

En aquesta secció parlarem de com hem fet l'anàlisi dels trinos. Per això hem fet servir una sèrie d'algorismes implementats en l'entorn CLAM, com veurem a continuació, adaptant-los a les particularitats de l'anàlisi del fagot, de notes curtes i a les particularitats d'aquest projecte.

7.1 Esquema de descripció

Per realitzar l'anàlisi dels trinos hem realitzat un programa amb C++ i CLAM que extreu les característiques bàsiques dels trinos un cop s'han separat de la melodia. Aquestes característiques bàsiques consisteixen en els onsets (inici), offsets (final) i freqüències fonamentals de totes les notes ornamentals. Aquests dades s'obtenen a partir de la combinació dels resultats obtinguts a través de la detecció de l'energia, la freqüència fonamental i mètodes per corregir possibles errors. Aquesta combinació l'hem realitzat per millorar l'algorisme, ja que si mancava alguna d'aquestes parts el resultat obtingut no era gaire correcte i, d'aquesta manera, és un resultat millorable però força eficient.

Un cop hem obtingut els resultats, els hem guardat en un fitxer de text per poder-los comprovar, verificar i utilitzar posteriorment. També s'han inclòs metadades de localització del trino, del tempo al qual s'ha tocat la partitura, etc.

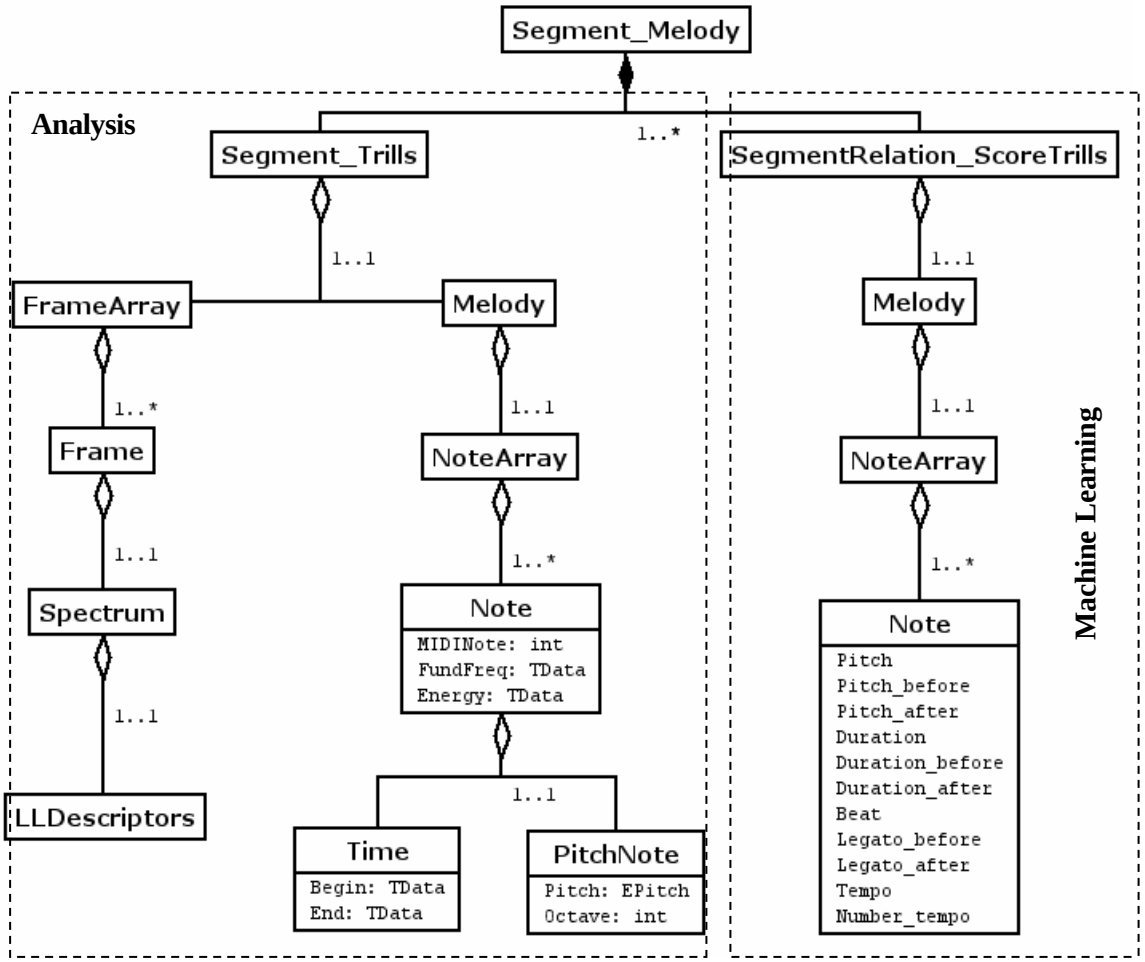


Figura 42. Diagrama de metadades de l'anàlisi

El format utilitzat en el nom d'aquests fitxers i en el seu contingut són:

Nom: En el nom indiquem el tape, la pista, el moviment, el tempo, que està amb notes d'ornament (With), el número de trino i que està gravat en mono.

Exemple:

2_11_AllegroModerato_60_With_2_mono.wav

Contingut: Està format per l'onset, l'offset i la freqüència fonamental.

Exemple:

onset	***offset***	***freqüència***
0.0000000	*0.0480746*	*370.00*
0.0480746	*0.0979592*	*330.697*
0.0979592	*0.1741500*	*370.00*
0.1741500	*0.3020064*	*331.888*
0.3020064	*0.3632650*	*365.87*
0.3632650	*0.5166440*	*337.193*

Figura 43. Format del fitxer que de les dades de l'anàlisi

7.2 Algorisme d'extracció de paràmetres

A continuació mostrarem un diagrama de flux on es pot veure el procés seguit per realitzar la detecció dels trinos que, posteriorment explicarem.

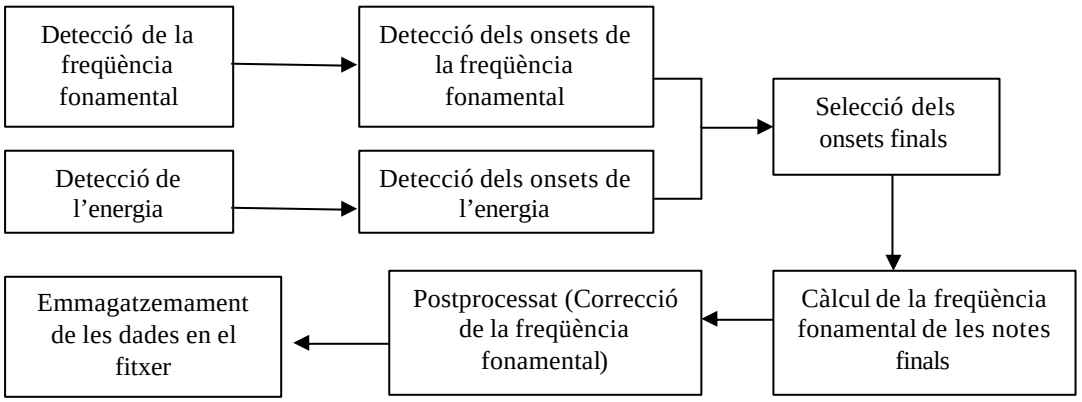


Figura 44. Diagrama de flux de l'algorisme de l'anàlisi

El nostre algorisme està contingut dins de quatre fitxers:

El fitxer principal que conté el main i s'encarrega de guardar els resultat finals en un fitxer, s'anomena *TrillsDetection.cxx*. En el fitxer *SegmentOnset.cxx* és on es detecten, per separat, els onsets d'energia i els onsets de freqüència. A continuació es decideix quins són els onsets, tant de freqüència com d'energia, que descriuen millor el trino que s'està analitzant a través de mètodes situats en el fitxer *NoteOnset.cxx*. Finalment, en el fitxer *CorrectFreq.cxx* trobem els mètodes encarregats de calcular la freqüència fonamental de cada onset seleccionat anteriorment, de corregir algunes possibles errades i, a més a més, de detectar i emmagatzemar el nom de les notes i el valor MIDI de cadascuna de les freqüències trobades. Hem de destacar que les tres classes (*SegmentOnset*, *NoteOnset* i *CorrectFreq*) dervien de la classe *Processing*.

7.2.1 Diagrama de classes

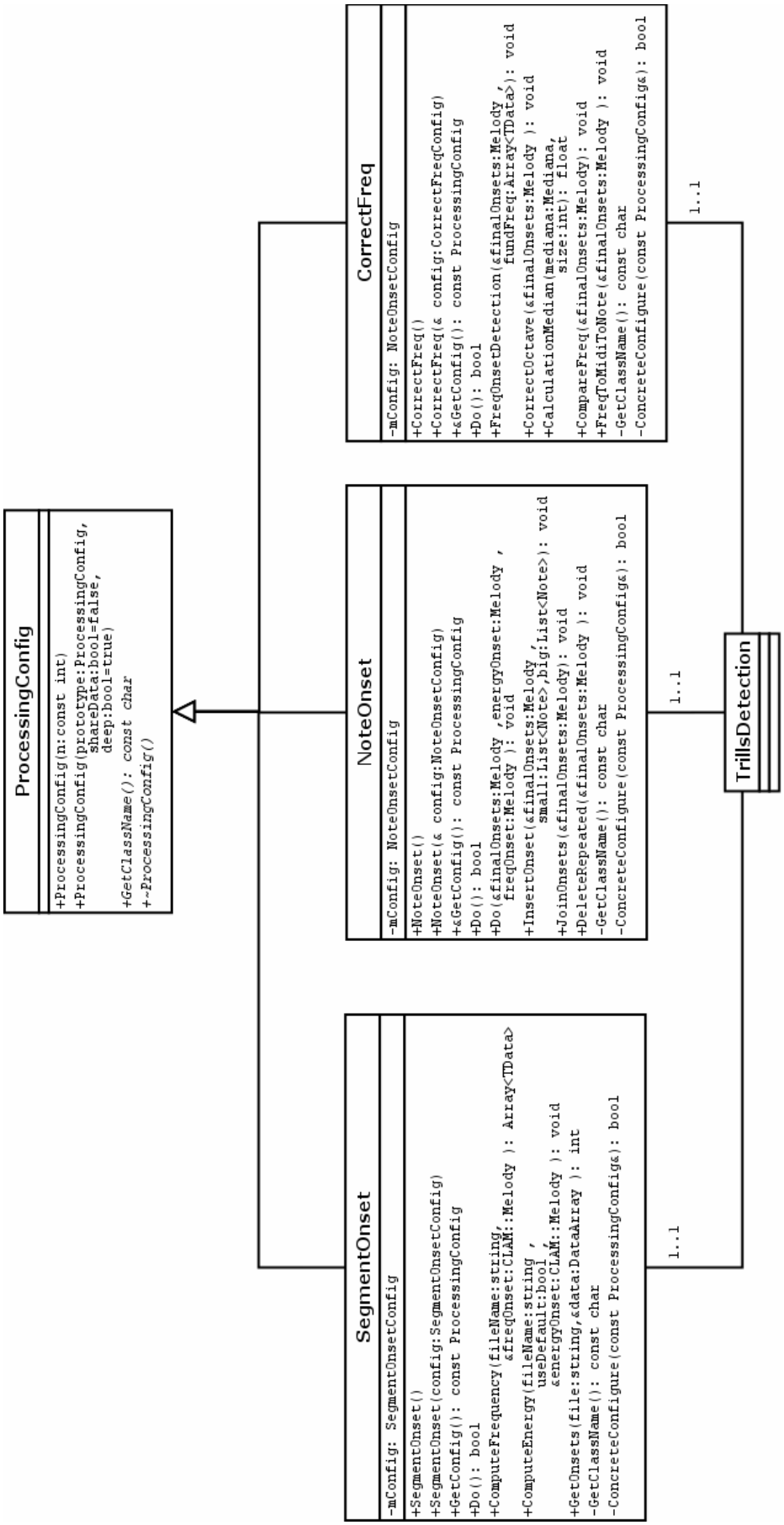


Figura 45. Diagrama de classes de l'anàlisi

7.3 Explicació de l'algorisme

Inicialment demanem el nom del fitxer d'àudio que es vol analitzar (on simplement hi trobarem el trino, seleccionat prèviament, i no tota la melodia) i si es volen modificar els valors dels paràmetres d'entrada que, per defecte, estan fixats per analitzar l'àudio corresponent a l'instrument del fagot de la següent manera: Number Of Bands, Lowest Central Frequency, Highest Central Frequency, Smoothing Filter Size, Energy Band Threshold, Minimum Segment, Length, Global Threshold i Noise Threshold.

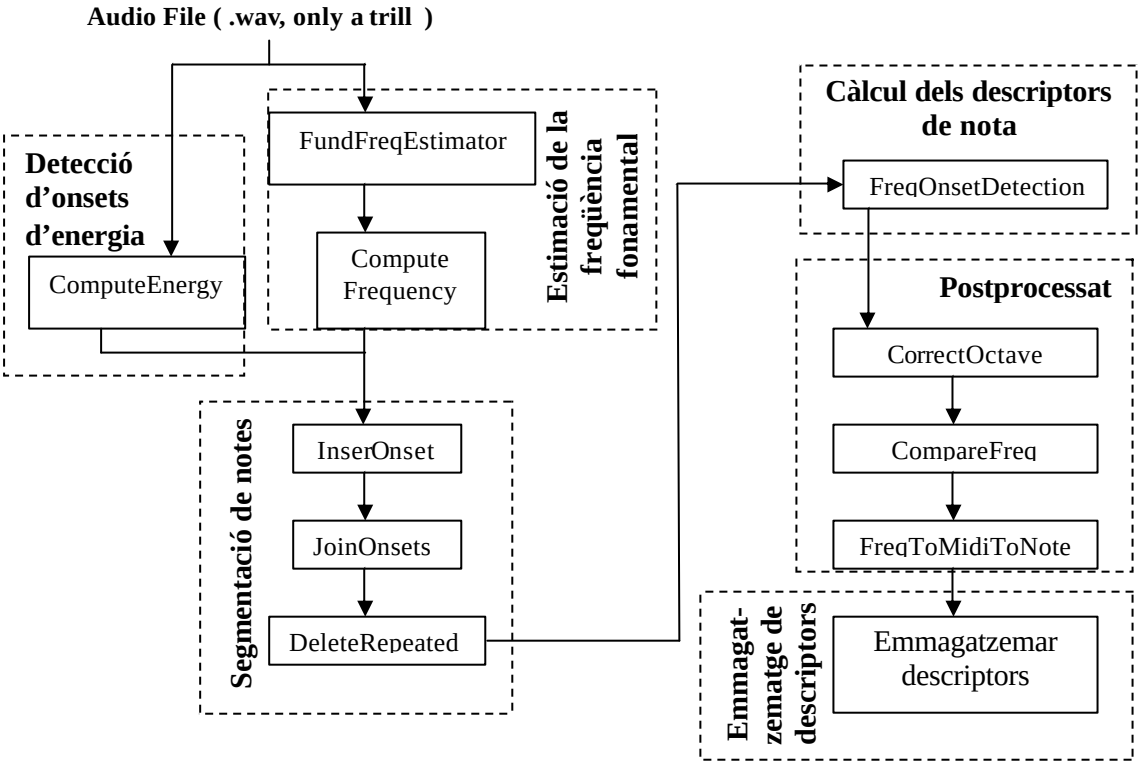


Figura 46. Passos de l'algorisme d'extracció de paràmetres

7.3.1 Detecció d'onsets d'energia

El primer pas (Figura 46) ha estat detectar els onsets i offsets d'energia mitjançant uns paràmetres d'entrada predeterminats, tot i que aquests es poden canviar. Amb això realitzem la configuració del fitxer. Un cop carregats els paràmetres i llegit el fitxer, es realitza la detecció dels segments de l'energia i, en conseqüència, dels onsets i offsets. Aquests es calculen a través dels segments, agafant el temps inicial (onset) i final (offset) de cadascun d'ells i dividint-lo entre 1000 (per passar-ho a segons). Finalment, els onsets d'energia trobats són els que utilitzarem posteriorment.

Per a la detecció d'onsets d'energia hem fet servir un càlcul basat en un l'energia en diferents bandes de freqüència (Klapuri 1999) amb els paràmetres que mostrarem tot seguit.

Hem de tenir en compte que tots els paràmetres utilitzats han estat adaptats a les característiques del fagot, que és un instrument greu i de vent fusta.

Number Of Bands = 20

Lowest Central Frequency = 100

Highest Central Frequency = 10000

Smoothing Filter Size = 10

Energy Band Threshold = 0.05

Minimum Segment Length = 23

Global Threshold = 25

Noise Threshold = 0.01

7.3.2 Estimació de la freqüència fonamental

La detecció de la freqüència fonamental l'hem fet a través de la configuració de les dades necessàries de l'àudio que volem analitzar; com la mida del frame, el hopsize, la freqüència mínima i màxima, etc. Un cop feta la configuració es realitza l'estimació de la freqüència fonamental del trino, del qual obtenim un objecte de la classe *Segment* amb el que obtindrem el número de frames i la freqüència fonamental de cadascun d'ells.

El mètode està basat en l'algorisme Two-Way Mismatch que detecta els màxims locals de l'espectre i intenta trobar una sèrie harmònica (f, 2·f, 3·f, 4·f,...) propera al conjunt de pics espectrals (més detalls de l'algorisme els podem trobar a: Gómez 2002).

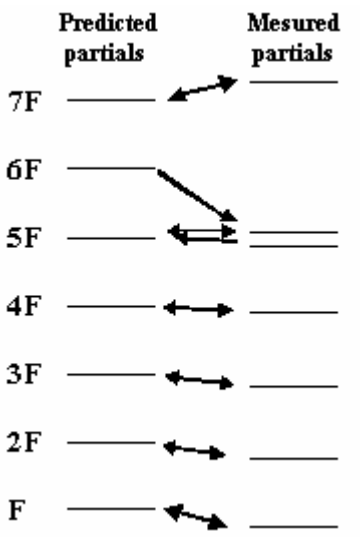


Figura 47. Sèrie harmònica (Gómez 2002)

Després, es calcula un valor de la freqüència fonamental per a cada fragment del senyal, anomenat finestra d'anàlisi. Aquesta finestra l'hem hagut d'agafar amb una mida gran ja que els períodes del fagot són amples, al tractar-se d'un instrument amb una tessitura greu, per tant si agafàvem una finestra petita no estàvem agafant realment el període del fagot i això provocava una mala anàlisi del so.

A continuació mostrarem els paràmetres que hem utilitzat, adaptats al fagot, per realitzar la detecció de la freqüència fonamental.

FrameSize: El valor de la mida del frame està fixat a 4096 a causa de les característiques del fagot perquè al tenir una longitud d'ona gran, la mida de la finestra s'ha d'adequar aquestes característiques i el valor esmentat és el més adient perquè el nombre de mostres agafades no siguin insuficients i puguin descriure el millor possible el període de les ones del fagot.

HopSize: El hopsize, que és el desplaçament que ha d'anar realitzant la finestra per analitzar un so, hem considerat que ha de ser de 256 perquè la finestra avanci lentament i es pugui agafar les característiques del so d'una manera més exacta, al tractar-se d'un so greu.

SampleRate (samplingrate): És la freqüència de mostreig i hem agafat l'estàndard, que està situada a 44100.

NoteDuration: La duració de la nota l'hem agafat a 0.05 segons perquè s'estan estudiant els trinos, que són notes molt curtes.

MinFundFreq i MaxFundFreq: Aquest paràmetres estan fixats a 40 Hz i 500 Hz respectivament, perquè les freqüències del fagot són baixes, ja que aquest té una tessitura greu.

7.3.3 Segmentació a partir de la freqüència fonamental

Un cop obtinguda la freqüència fonamental, per tal de trobar els punts de canvi de nota, calculem els punts màxims o mínims de la derivada de la freqüència fonamental per a cada trama en una escala de semitons.

L'algorisme de segmentació a partir de la freqüència és el següent: agafem la freqüència fonamental del següent frame (fundFreq[i+1]), la dividim per la del frame actual (fundFreq[i]), li apliquem el logaritme en base 2 i finalment ho multipliquem per 12 (número referent al nombre de semitons de l'escala temperada).

$$d = 12 * \log_2 \frac{fundFreq[i+1]}{fundFreq[i]}$$

Hem de tenir en compte que, en l'algorisme, aquest càlcul l'hem fet mitjançant un canvi de base 2 a base 10. Un cop fet el càlcul es fa un plot tant de la freqüència fonamental com de la seva derivada, bolcant posteriorment les dades obtingudes en un fitxer de text. Per tal d'obtenir els onsets i offsets de freqüència mirem quins frames tenen la derivada major a 0.7 en valor absolut, ja que això significa que hi ha un canvi de freqüència, i quan sigui el cas el que fem és calcular el temps inicial (onset) i final (offset) a partir de la multiplicació del número de frame pel hopsize, entre el número de mostres per segon (samplingrate).

7.3.4 Segmentació de notes a partir d'onsets d'energia i de freqüència fonamental

Posteriorment a la detecció dels onsets, a través dels dos mètodes explicats anteriorment, el següent pas que realitzem és decidir quins són els onsets que descriuen millor el so (Figura 46).

1. Inicialment, per fer la tria dels onsets, agrupem els onsets d'energia i freqüència en una sola llista, ordenant-la per onsets en ordre creixent.
2. Un cop obtenim la llista ordenada per onsets el que fem és triar els onsets i offsets més adients agafant cada onset de la llista com un nou onset i aquest com l'offset del seu antecessor, accepte el primer cas. És a dir, el primer onset el deixem tal i com està i en comptes de finalitzar-lo amb el seu offset agafem el següent onset que, a part de fer la pròpia funció d'onset, fa d'offset de l'onset anterior i així successivament fins arribar a l'últim onset, que és l'únic que conserva el seu offset original. A continuació mostrarem un exemple a través d'un gràfic perquè sigui més entenedor:

Onsets junts d'energia i freqüència

a.	0	0.02322
b.	0.00408163	0.102041
c.	0.02322	0.0696599
d.	0.0696599	0.0812698
e.	0.0812698	0.522449
f.	0.102041	0.538413
g.	0.522449	0.534059

Onsets ordenats

h.	0	0.00408163
i.	0.00408163	0.02322
j.	0.02322	0.0696599
k.	0.0696599	0.0812698
l.	0.0812698	0.102041
m.	0.102041	0.522449
n.	0.522449	0.534059

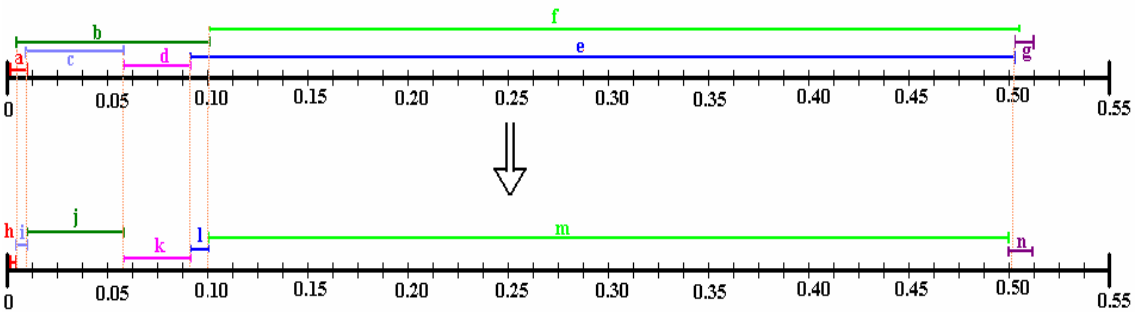


Figura 48. Unificació d'onsets

3. Finalment, per obtenir el conjunt d'onsets definitius, eliminem aquells que estan repetits. Això es du a terme decidint si un onset està repetit a partir de la distància entre aquest i el següent, ja que si aquesta és inferior a 0.03 segons el següent onset no s'agafa si no que s'agafa el seu offset i així successivament (si hi ha més de dos onsets detectats en un temps menor a 0.03 segons els ajunta tots i no només els dos primers).

Figura 49. Resultat de la unificació d'onsets

7.3.5 Càlcul dels descriptors de nota

Després d'agafar els onsets i offsets definitius calculem la freqüència fonamental de cadascun d'ells (Figura 46). Per calcular-la primer hem de calcular el frame que correspon tant a l'onset com a l'offset multiplicant el temps de l'onset i l'offset (separadament) pel resultat de dividir la freqüència de mostreig (samplingrate) entre el hopsize:

Número de frame inicial = temps de l'onset * (samplingrate/hopsize)

Número de frame final = temps de l'offset * (samplingrate/hopsize)

Un cop obtinguts el frame inicial i final que descriuen l'onset, es fa la mitja de les freqüències fonamentals (emmagatzemades en l'array fundFreq) dels frames indicats i el resultat obtingut és el resultat de la freqüència fonamental final.

7.3.6 Postprocessat

En aquest moment ja tenim totes les dades necessàries de l'anàlisi, però per perfeccionar l'algorisme hem afegit els mètodes per corregir possibles errors (Figura 46). Un d'ells és l'encarregat de calcular la freqüència fonamental mediana de tot el trino i, a partir d'aquesta, mirar si hi ha alguna situada en una octava per sobre (seria superior al doble de la mediana de la freqüència fonamental) o per sota (inferior a la meitat de la mediana de la freqüència fonamental). Si fos el cas, es corregiria multiplicant o dividint per dos la freqüència fonamental (segons si s'ha trobat que està en una escala inferior o superior, respectivament, a la que hauria de ser). Un cop realitzat aquest procediment comprovem que dos onsets consecutius no tinguin la mateixa freqüència fonamental, i si és així, el segon onset s'ha d'eliminar. D'aquesta manera el resultat queda que l'onset és el que teníem originalment però l'offset correspon al del segon onset trobat (el que contenia la freqüència fonamental repetida). Hem d'esmentar que hem considerat que una freqüència fonamental és la mateixa si hi ha una variació menor a 50 cents.

A més a més, per poder completar aquestes dades i enriquir la informació, hem posat el nom de la nota (si és un do, re, mi...) i la nota MIDI a les freqüències fonamentals trobades.

7.3.7 Emmagatzematge de descriptors

Per finalitzar l'algorisme simplement hem bolcat les dades en un fitxer txt (Figura 46), les quals són onsets, offsets i freqüències fonamentals (Figura 43). També es pot genera una sortida XML de les dades, però hem fet servir txt, ja que permet la visualització de les dades mitjançant el programa wavesurfer i la lectura des del MATLAB per a l'anàlisi dels resultats.

7.4 Exemples (joc de proves)

7.4.1 Detecció de la freqüència fonamental mitjançant la derivada

Primerament veurem un parell d'exemples dels plots realitzats en l'algorisme on es mostren: en la figura superior la freqüència fonamental i en la figura inferior la seva derivada (Figura 50). A continuació veurem alguns exemples dels resultats obtinguts en la detecció de la freqüència fonamental i la seva derivada a través del programa wavesurfer que serveix per a visualitzar fitxers d'àudio. Les figures mostren (verticalment i en l'ordre que anomenem) el so original, la freqüència fonamental i la derivada. La transcripció txt correspon als onsets d'energia, per poder-los comparar amb les freqüències obtingudes (Figura 51).

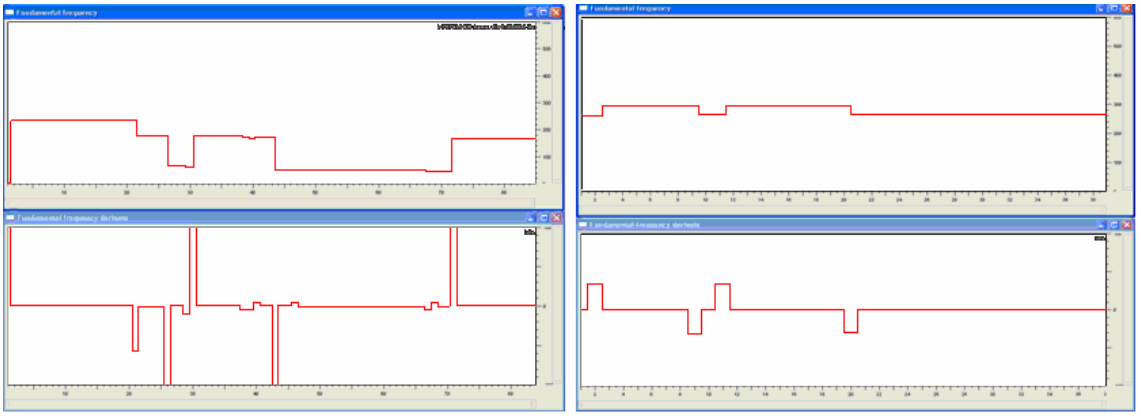


Figura 50. Freqüència fonamental (figura superior) vs. la seva derivada (figura inferior)

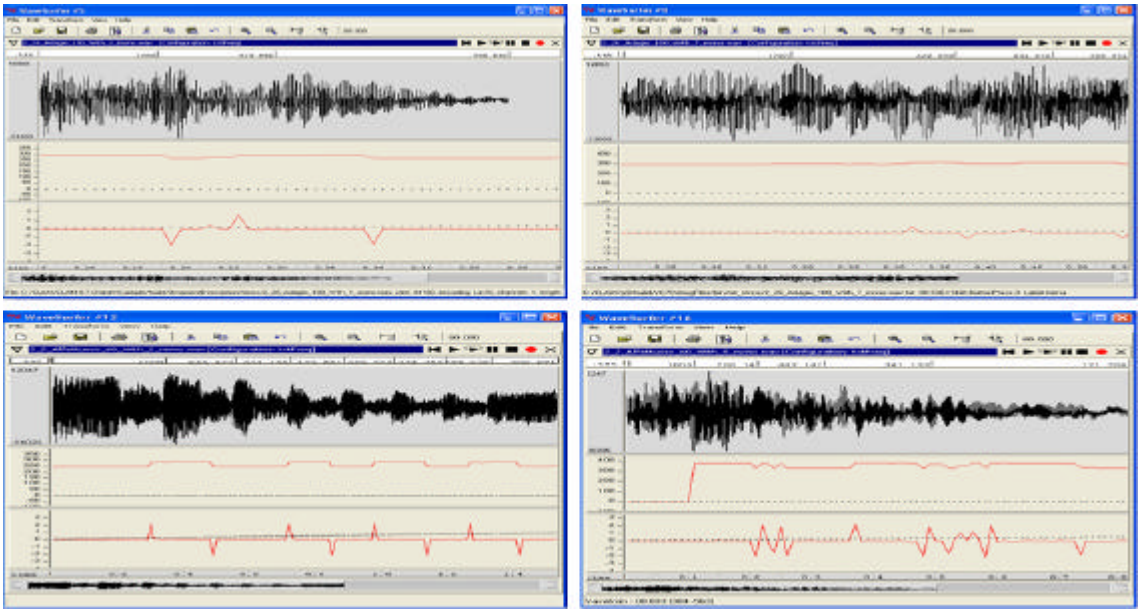


Figura 51. Exemples de la visualització de la derivada a través del programa wavesurfer

7.4.2 Detecció dels trinos mitjançant els onsets de freqüència i l'energia

Seguidament ensenyarem els diferents resultats obtinguts a través d'una comparació entre els onsets d'energia i els onsets de freqüència fonamental. En les figures següents es mostren tres transcripcions que indiquen el següent:

.txt ➔ onsets d'energia

.lab ➔ onsets de freqüència

.txt ➔ onsets d'energia i freqüència

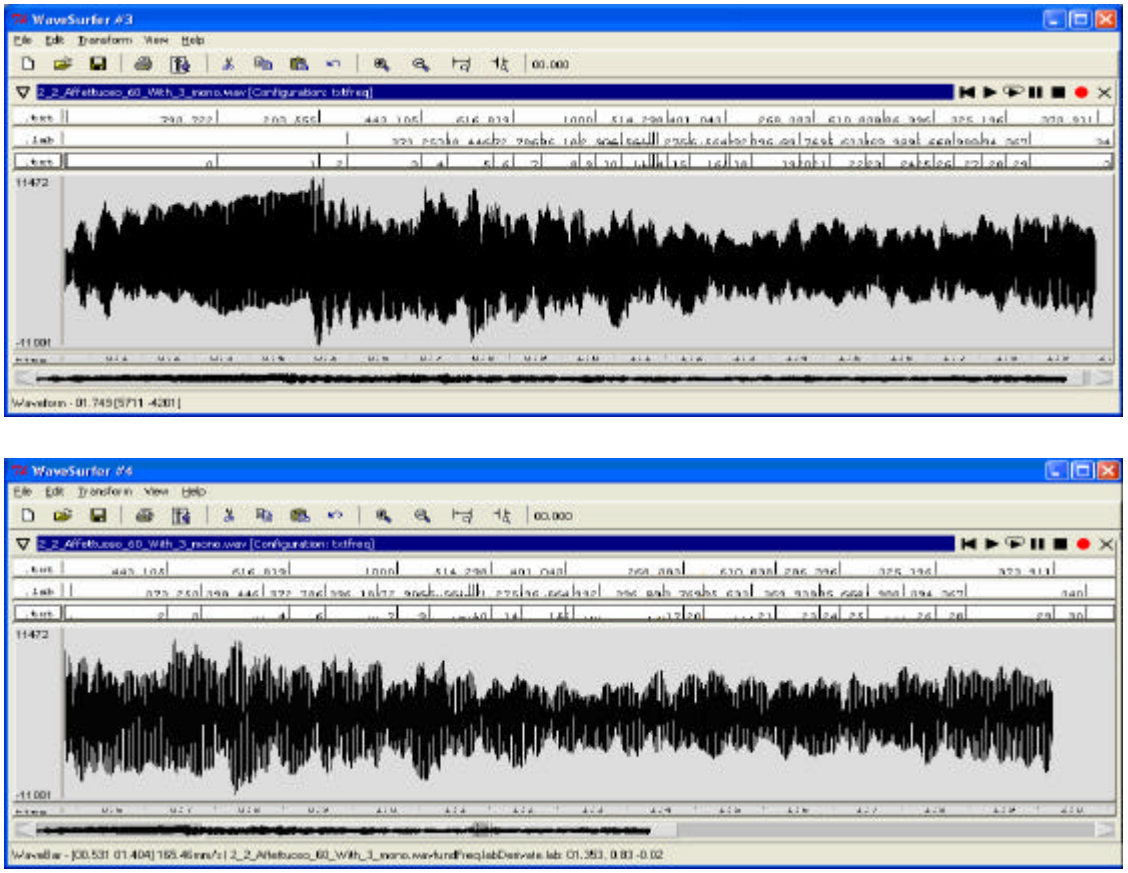


Figura 52. Comparació entre els onsets d'energia i els de freqüència fonamental

7.4.3 Estudi dels onsets finals

A partir de la comparació realitzada entre els onsets d'energia i els onsets de freqüència, hem pogut obtenir els onsets finals, és a dir, les notes d'ornament del trino. A continuació explicarem que hem tingut en compte i algun exemple d'aquests resultats, tot i que les notes d'ornament de cada trino explicades detalladament les trobarem en l'annexa.

Els valors introduïts en el panell .txt que es pot veure en els gràfics indica la freqüència de cada nota ornamental trobada.

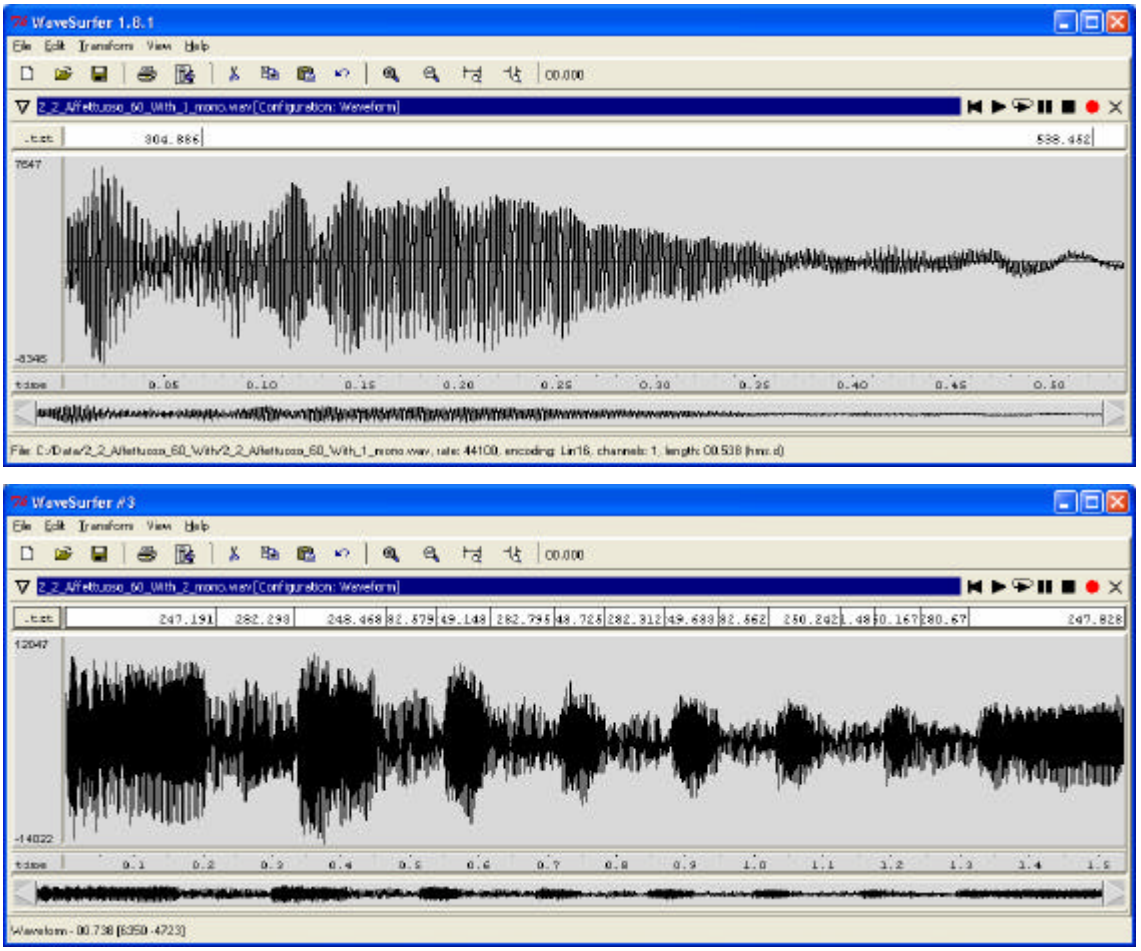


Figura 53. Onsets finals amb la freqüència corresponent

7.5 Problemes trobats

7.5.1 Complicacions de l'instrument

Atacs poc destacats

Hem de tenir en compte que estem utilitzant un instrument de vent, concretament de vent fusta, la qual cosa fa que tingui certes característiques que poden dificultar una detecció clara de les notes a través de l'atac d'energia, que normalment estan poc definits. Si en comptes d'utilitzar aquest instrument utilitzéssim per exemple el piano, els atacs estarien més clars, ja que per produir el so de la nota, per molt que es vulgui lligar amb l'anterior, es colpeja. En canvi, en el fagot moltes vegades la lligadura (legatto) de les notes és molt extrema, ja que depenen de la respiració. Un atac d'energia clar, generalment, es troba en les notes principals o aquelles que requereixen una certa atenció. Per tant, alhora d'executar un trino, com aquest es tracta de notes molt curtes i ràpides, la majoria de les vegades l'atac està poc definit ja que el temps de reacció del que disposa l'instrumentista és mínim. Per aquest motiu, si l'atac no es pot detectar amb facilitat, dificulta la detecció dels canvis de nota.

Lligadura de les freqüències

Un altre motiu pel qual hem tingut dificultat alhora de detectar les notes és que les freqüències són difícils de detectar perquè moltes vegades es produeixen glissandos, la qual cosa implica que n'hi hagi més de les que pertoquen realment.

Un altre problema relacionat amb la freqüència, és la condició en que es va efectuar la gravació de les peces, ja que no era en un estudi i no es podia controlar ni el soroll ni la reverberació. El

soroll interfereix en les freqüències i fa que aquestes no siguin nítides i la reverberació provoca que quan es toca una nota en soni un altre (un harmònic), concretament la octava superior a la nota que s'està tocant, com si es toqués un acord.

7.5.2 Correcció dels resultats

La detecció dels onsets i les freqüències de cadascun dels trinos (en total 69), al no tenir cap garantia de la seva correctesa, les hem hagut de revisar a mà i corregir en els casos necessaris. Cal destacar que la majoria de correccions han sigut a causa de les freqüències, però pel que fa els onsets el resultat final és força bo.

També s'ha de tenir en compte que algún problema de detecció dels onsets podria estar produït per la mala selecció dels trinos, ja que per analitzar-los s'han de separar de la resta de la melodia. Si aquests no estan ben acotats és possible que es detectin més onsets provocats per soroll (quan ja no es sent la nota però en canvi es sent com el músic està bufant).

Els comentaris pertinents i correccions sobre els onsets i les seves freqüències les trobem en l'annexa (apartat 11).

8. Anàlisi del comportament de l'ornamentació

A continuació podrem veure alguns dels resultats obtinguts en l'anàlisi, amb els quals podrem extreure'n algun comportament i algun patró.

8.1 Resultats

Aquesta primera observació realitzada amb el MATLAB l'hem fet per poder observar i entendre d'una manera més intuïtiva quins són els comportaments bàsics dels trinos; quantes notes tenen de mitja (per poder-.ho observar hem hagut de normalitzar el temps a un segon), si hi ha alguna mena d'acceleració o "ritardando" en la seva execució i veure si això és molt comú, etc.

8.1.1 Distribució del nombre de notes del trino

Inicialment hem fet un estudi general amb tots els trinos, sense tenir en compte el moviment (Allegro moderato, Affettuoso o Adagio), el tempo (50, 68, 92...), o la figura. Simplement hem volgut observar el comportament general d'aquests.

En aquest primer gràfic (Figura 54) podem observar que com més llarga és la durada de la nota principal més notes ornamentals conté, la qual cosa és coherent i fa pensar que l'extracció de les dades és correcta.

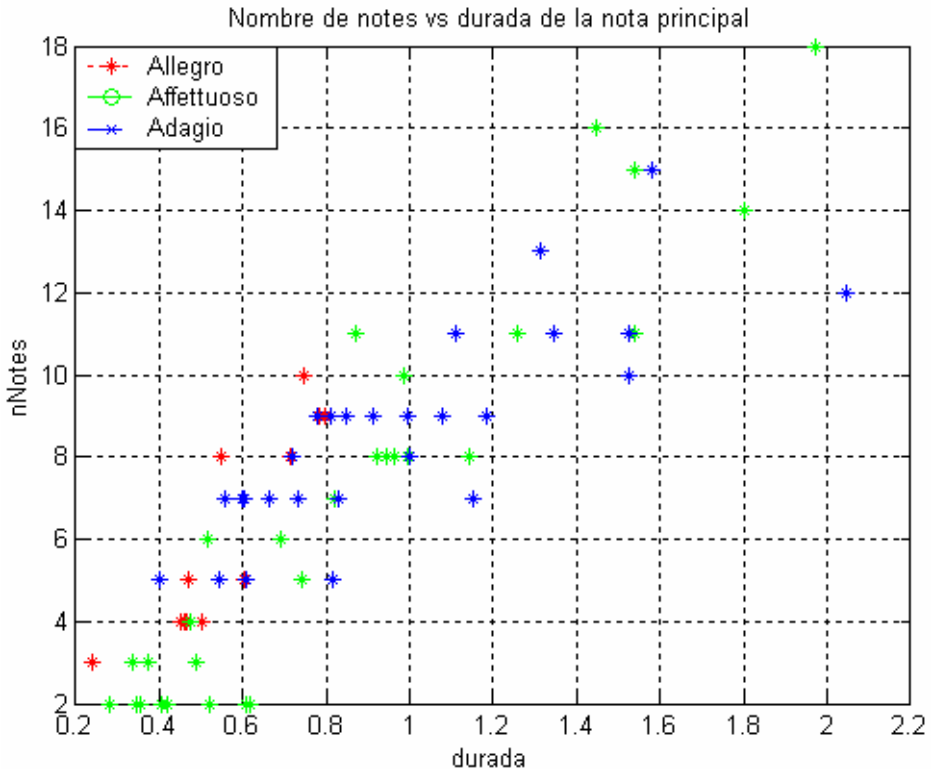


Figura 54. Gràfica de notes vs durada

En els dos gràfics següents veiem que la mitjana de notes que contenen els trinos dels tres moviments és d'unes 8 notes per segon. A més a més veiem que el tempo més ràpid, Allegro, és el que conté més trinos per segon i que en canvi el tempo lent, Adagio, al contrari del que es podria pensar manté una quantitat de notes ornamentals considerable, ja que hem de tenir en compte que com més temps es té per cada nota, tot i que sigui un temps lent, hi caben més notes ornamentals.

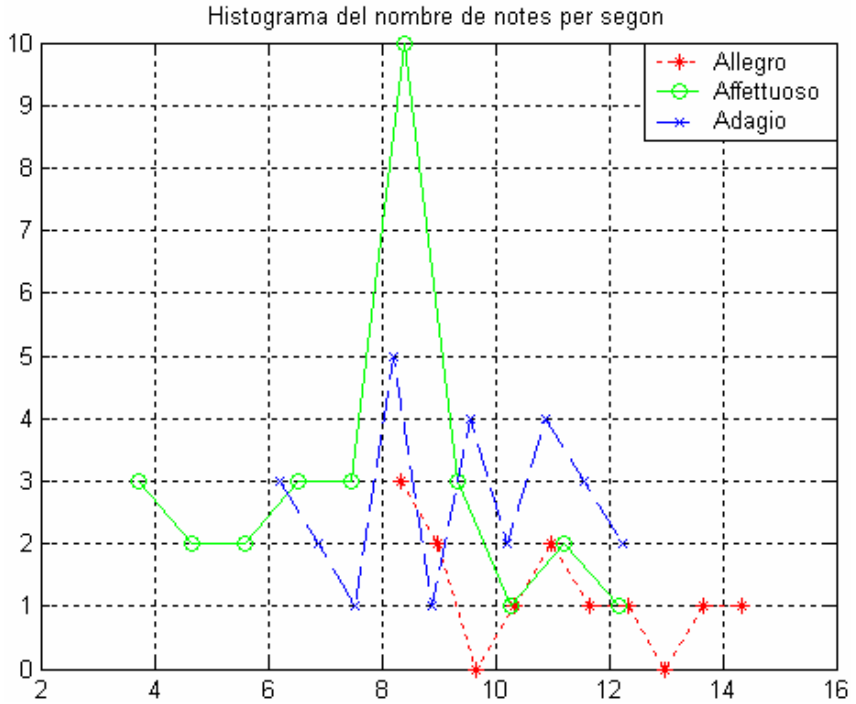


Figura 55. Histograma 1 de nombre de notes

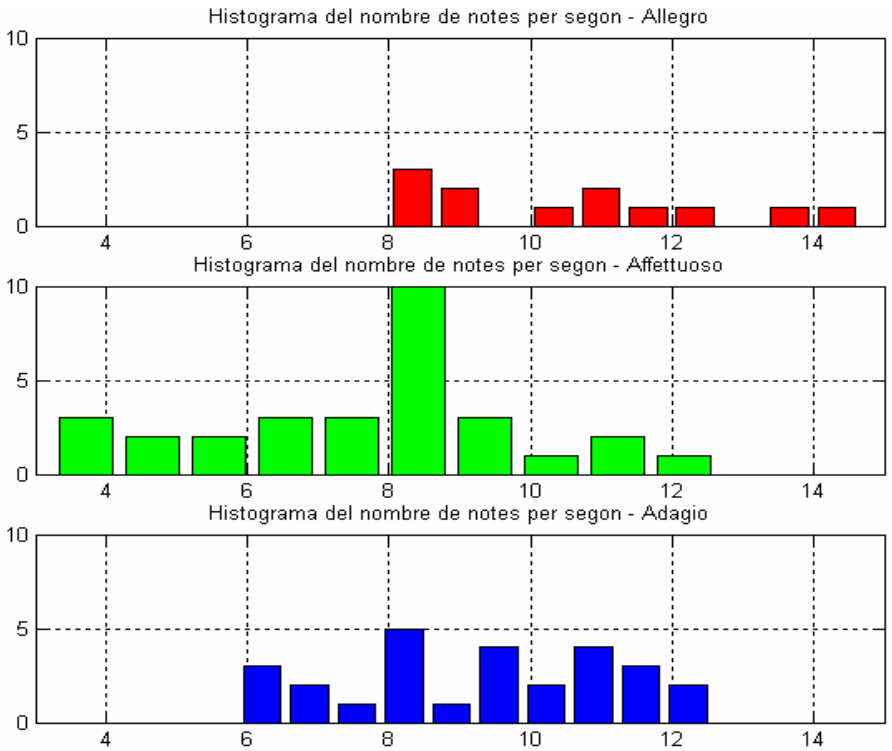


Figura 56. Histograma 2 de nombre de notes

Podem dir que el nombre de notes per segon trobat, generalment, està dins el rang en que feia referència Moore (1992) (explicat en la secció 3.5), on el nombre de notes màxim que la mà és capaç de tocar està entre 12 i 14, si es vol obtenir un trino "controlat" i de 16 si aquest no ho està. Tot i així, hi ha alguna excepció que podria ser causada perquè aquest estudi està fet sobre el piano, un instrument molt diferent al fagot.

8.1.2 Evolució de la durada de les notes del trino

A continuació farem un estudi sobre els trinos mitjançant diferents agrupacions, com poden ser els deu trinos amb més o menys duració, el tempo en que es troben, la posició mètrica, etc. Amb aquestes visualitzacions podrem veure si aquests tenen algun comportament semblant i establir similituds (patrons) i diferències entre ells.

Trinos "extrems"

En el primer cas, hem agafat els deu trinos més llargs i els deu trinos més curts (Figura 57) que hi havia per poder-los comparar, els qual són:

Els 10 trinos més llargs

- 2_21_Adagio_50_With_3_mono
- 2_21_Adagio_50_With_4_mono
- 2_21_Adagio_50_With_5_mono
- 2_21_Adagio_50_With_9_mono
- 2_23_Adagio_68_With_3_mono
- 2_2_Affettuoso_60_With_10_mono
- 2_2_Affettuoso_60_With_2_mono
- 2_2_Affettuoso_60_With_3_mono
- 2_2_Affettuoso_60_With_7_mono
- 2_2_Affettuoso_60_With_8_mono

Els 10 trinos més curts

- 2_14_AllegroModerato_92_With_3_mono
- 2_26_Adagio_100_With_6_mono
- 2_5_Affettuoso_92_With_1_mono
- 2_5_Affettuoso_92_With_4_mono
- 2_5_Affettuoso_92_With_6_mono
- 2_5_Affettuoso_92_With_9_mono
- 2_7_Affettuoso_120_With_1_mono
- 2_7_Affettuoso_120_With_4_mono
- 2_7_Affettuoso_120_With_6_mono
- 2_7_Affettuoso_120_With_9_mono

En aquestes dues gràfiques hem volgut comprovar si hi ha algun comportament similar entre els trinos d'una durada similar, d'aquesta manera la gràfica que hem extret ens indica el número de notes (eix d'abcises) i la durada de cadascuna d'elles en segons (eix d'ordenades).

En el cas dels més llargs (Figura 57, gràfica esquerra) podem veure que tenen aproximadament el mateix comportament, tan sols varia el moment en que aquest es produeix. Per tant podem observar com la nota inicial s'allarga mentre que les centrals s'acceleren i, finalment, la última nota torna a relentir el trino, provocant que aquesta sigui d'una durada major.

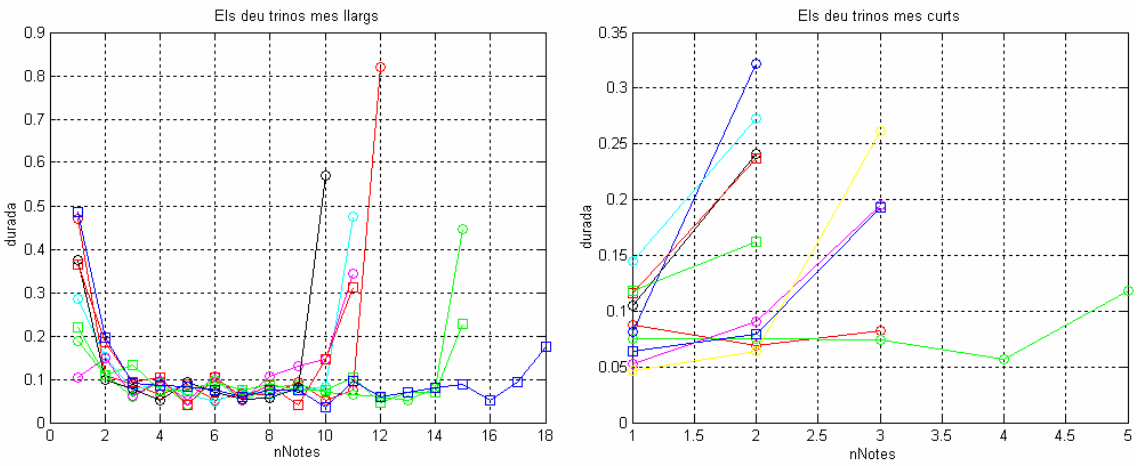


Figura 57. Comportament dels deu trinos més llargs (gràfica esquerra) i curts (gràfica dreta)

En canvi, en el cas dels trinos més curts (Figura 57, gràfica dreta) podem observar que la primera nota és la més curta i a partir d'ella les altres, si és que n'hi ha, tenen una durada similar i, finalment, la última és força més llarga que les anteriors. En aquesta gràfica es pot veure que els trinos més curts moltes vegades provoquen que hi hagi una apoiatura i no un trino, ja que aquest consta simplement de dues notes (la inicial molt més curta que la final).

Trino en diferents tempos

Tots els trinos que mostrarem a continuació estan agrupats moviment, figura i posició mètrica, és a dir, agafem el mateix trino i la única diferència amb la resta del seu grup és el tempo. Així, per exemple, del moviment Adagio agafem el trino número quatre, que en aquest cas correspon a un trino sobre una rodona, i el comparem amb ell mateix però en els tres tempos (50, 68, 100) que s'ha tocat.

Podem observar que els trinos referents a les rodones els podríem definir sota un mateix patró: la nota inicial té una duració notable provocant així una acceleració en les notes següents (on totes elles porten una velocitat similar) fins que arriba a la última, la qual desaccelera el trino ja que és la nota més llarga que hi trobem. S'ha de destacar que el trino de rodona es comporta de la mateixa manera en els tres tempos diferents.

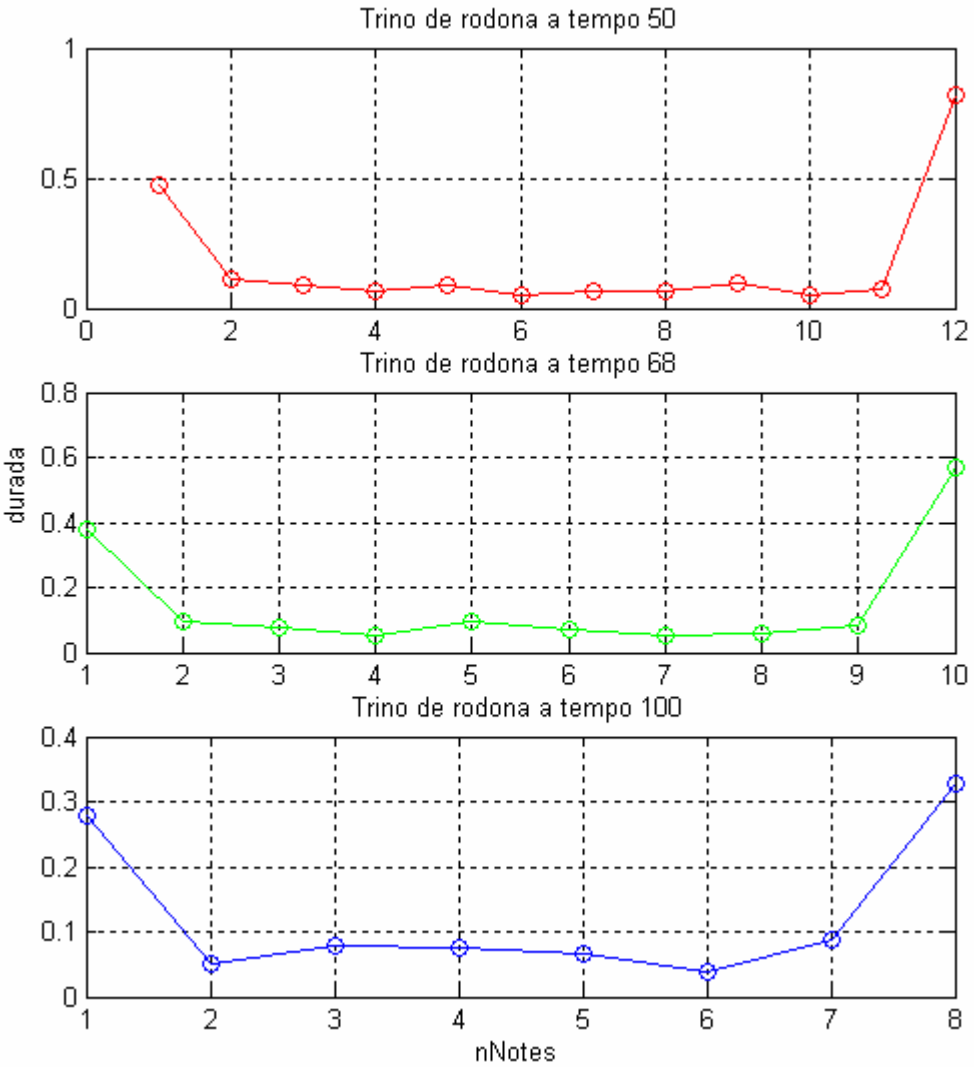


Figura 58. Trino de rodona: Adagio núm. 3

En els trinos de la blanca amb punt, podem observar que es manté el comportament (igual que passava en el cas anterior) i a més, totes les notes estan tocades més o menys a la mateixa velocitat excepte la última, la qual, com en el cas del trino de rodona, és notablement més llarga que totes les anteriors, com es pot veure en la Figura 32 i Figura 33.

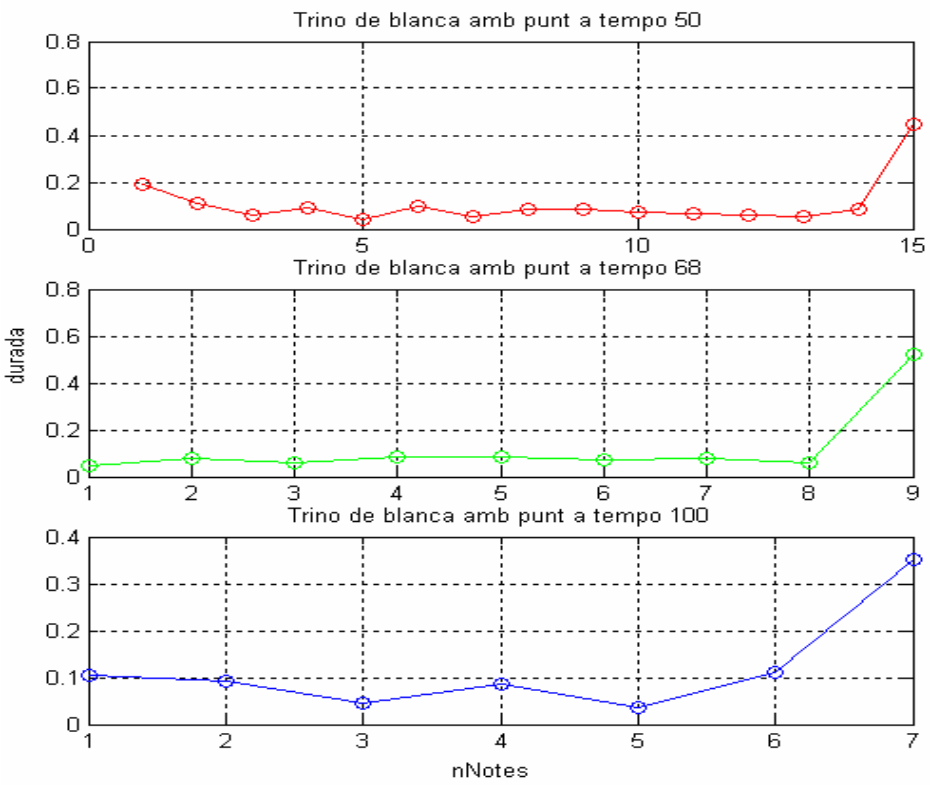


Figura 59. Trino de blanca amb punt: Adagio núm 4

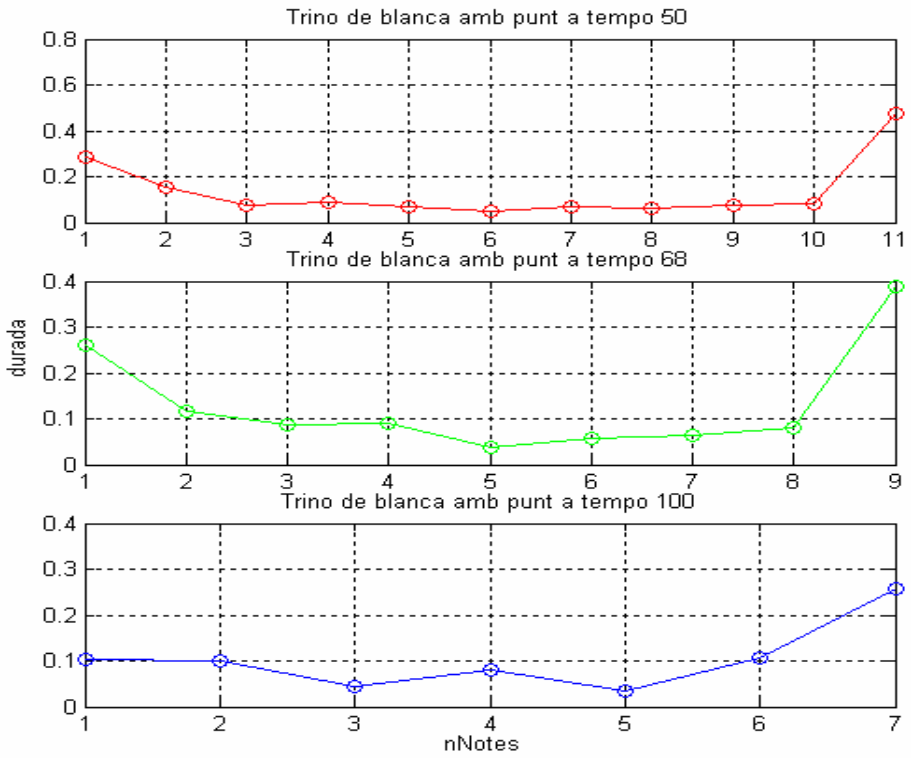


Figura 60. Trino de blanca amb punt: Adagio núm. 5

En el cas de la blanca passa una cosa força curiosa. Tant si mirem la blanca de l'Adagio com la de l'Affettuoso, si que influeix el tempo en que es toca (tenint en compte que tots els casos s'estudien normalitzats a un segon), ja que quan es toca a un tempo major a 60 el nombre de notes per trino es redueix quasi a la meitat. A més a més, també s'ha d'observar que en els temps menors a 60 hi ha menys contrastos en la duració de les notes del trino, és a dir, que no hi ha una acceleració o un retard notable.

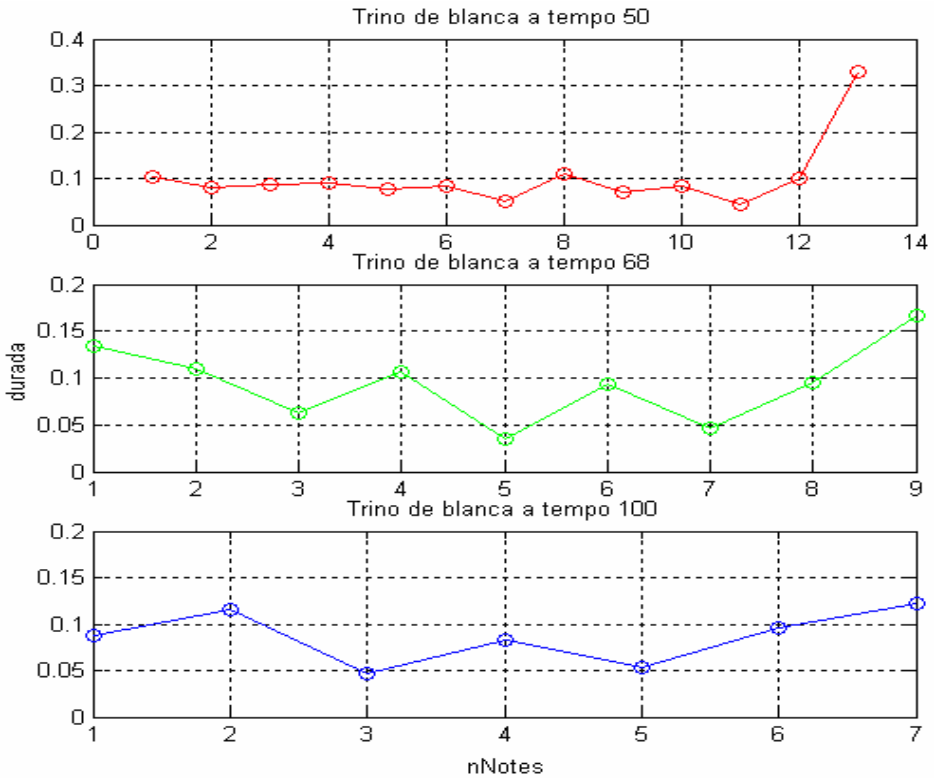


Figura 61. Trino de blanca: Adagio núm. 2

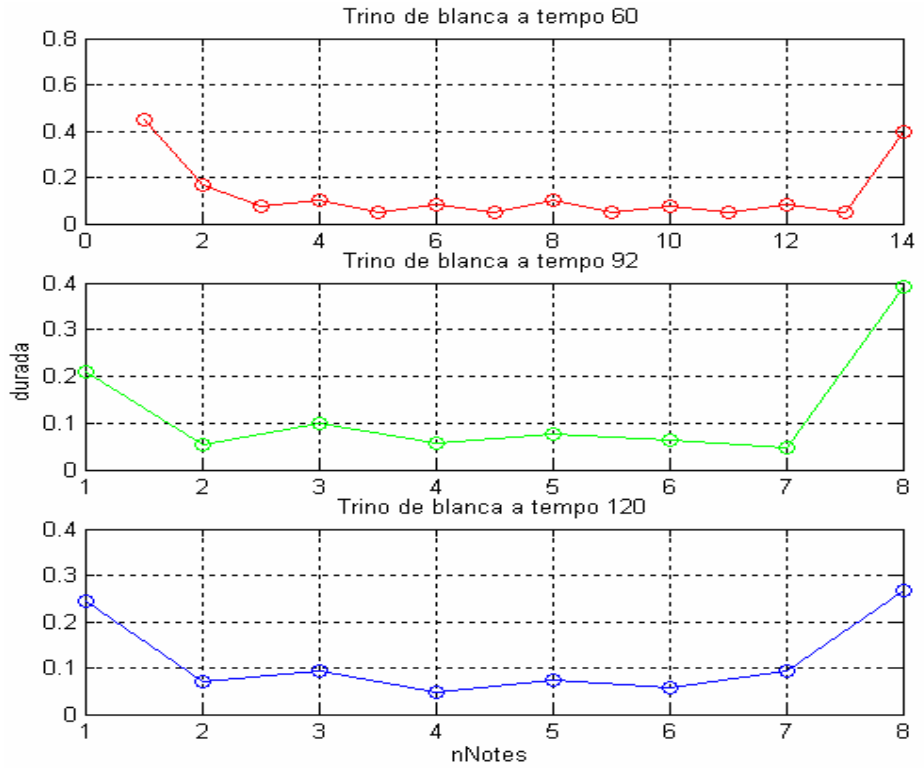


Figura 62. Trino de blanca: Affettuoso núm. 8

En el cas de la negra amb punt veiem que no té un comportament regular, ja que en el tempo més lent i més ràpid (60 i 120 respectivament) sembla que la primera i últim nota tenen una durada més llarga si les comparem amb les notes del propi trino però, si les comparem en trinos diferents, veiem que l'acceleració en un cas es produeix mitjançant la nota immediatament després a la inicial i en l'altre en fan falta un parell. A més a més, la duració de les notes en el cas del trino a tempo 60 és més variat i hi ha una major quantitat que en el trino a 120. Finalment el trino de negra amb punt a tempo 92, manté una duració força constant entre la majoria de les notes, només varia la última que té una durada, aproximadament, quatre vegades superior a les altres.

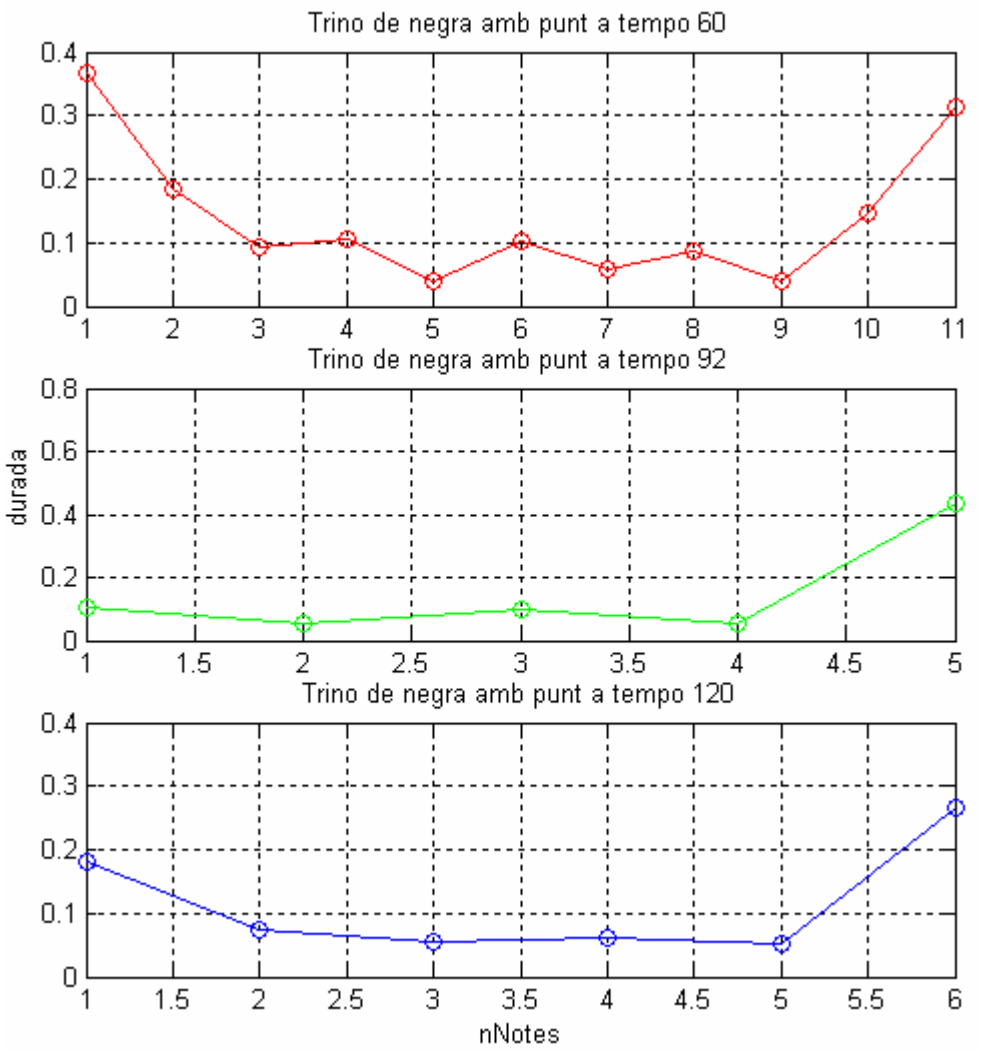


Figura 63. Trino de negra amb punt: Affettuoso núm. 10

Observant els trinos de negra podem veure que hi ha unes diferències notables entre tots ells, ja que només podríem trobar una mínima semblança en la nota final, que generalment és una mica més llarga, i en que com més lent és el tempo del trino més notes d'ornamentació conté. Una diferència considerable és l'acceleració de les notes, ja que no segueixen cap mètode aparent.

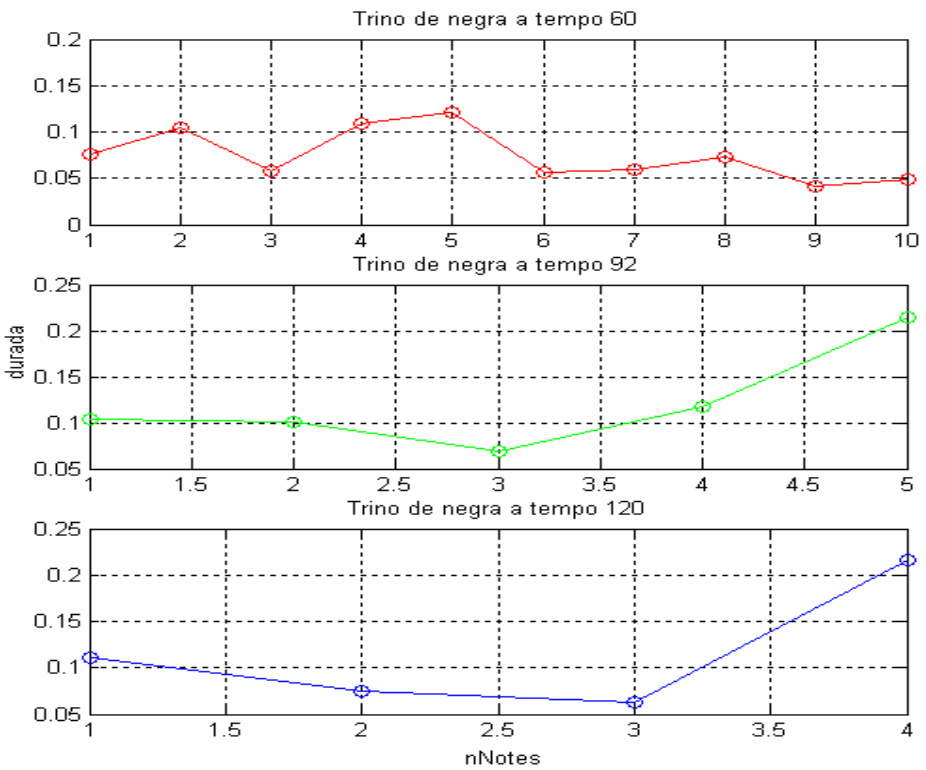


Figura 64. Trino de negra: Allegro núm. 1

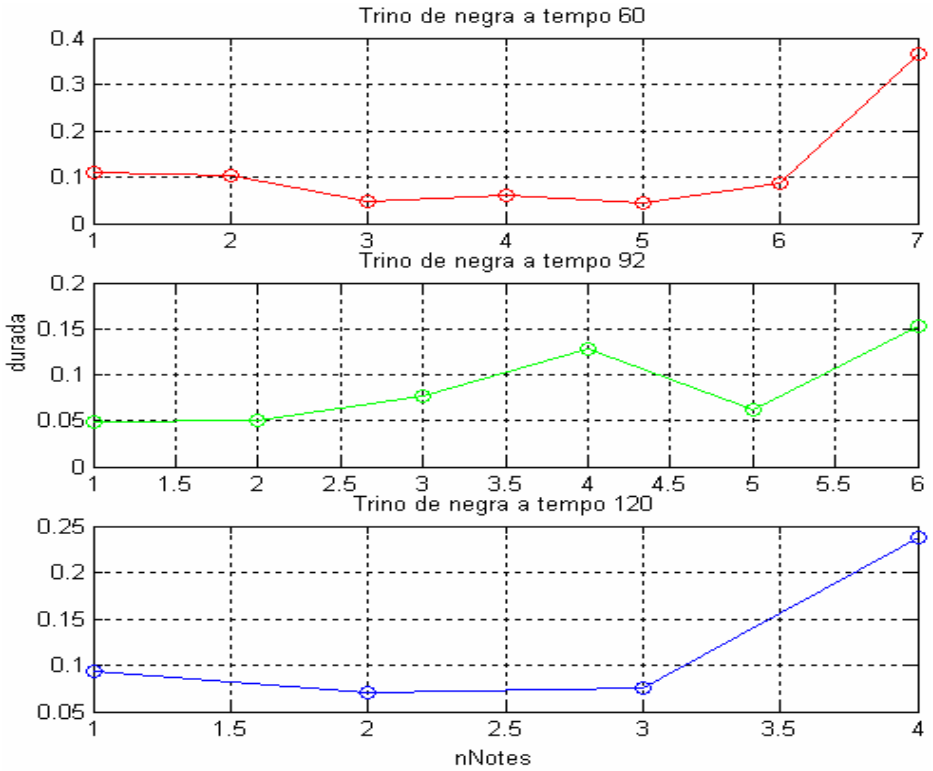


Figura 65. Trino de negra: Affettuoso núm. 5

En el trino de corxera hi ha un efecte molt evident, que en la majoria d'ells es produeix una apoiatura en comptes d'un trino degut a la rapidesa en que aquest s'ha d'efectuar. Tot i que podríem pensar que el trino s'hauria de produir en els tempos més lents, curiosament les poques vegades que apareix s'ha produït en els tempos més ràpids. Tot i aquesta diferència, hi ha un fet comú a tots: la primera nota és molt més curta que la últim (que en la majoria dels casos és la segona), podríem dir que la duració del la nota principal és proporcional a la duració de la última nota.

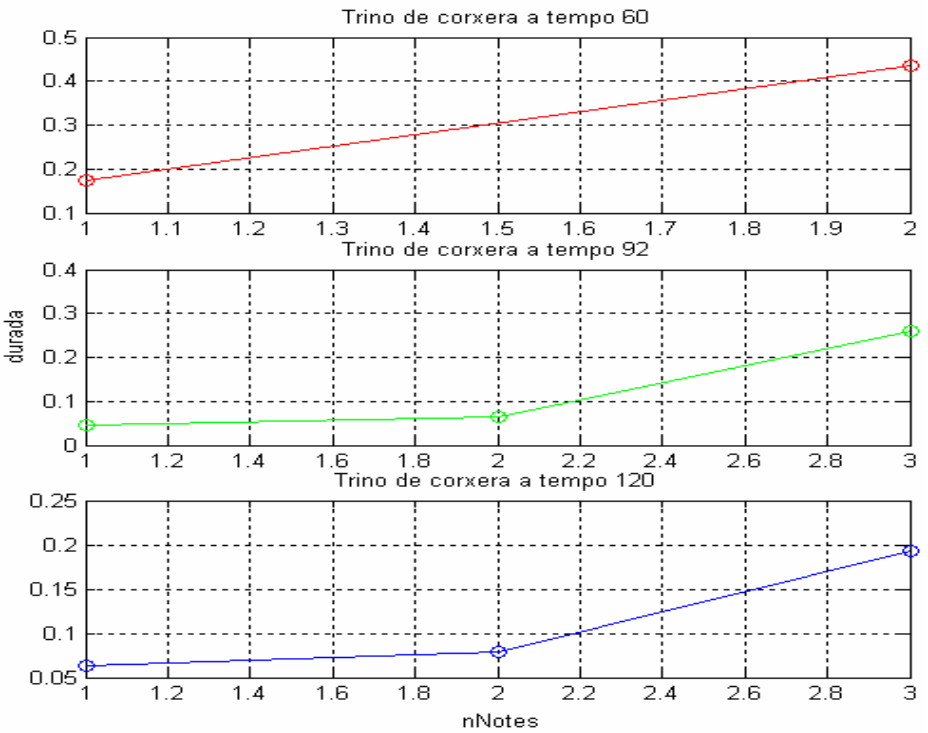


Figura 66. Trino de corxera: Affettuoso núm. 9

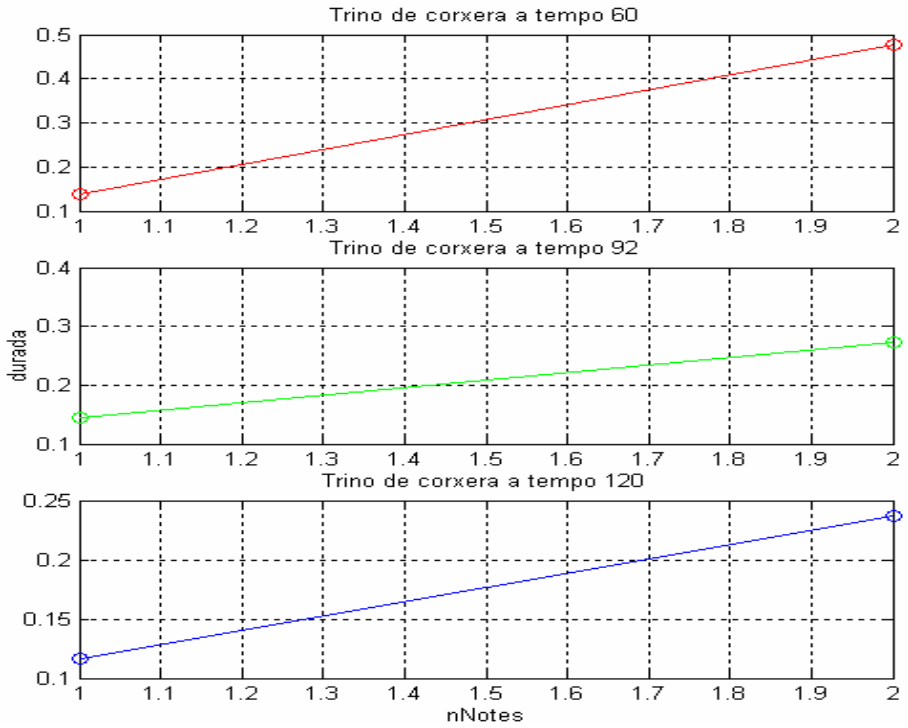


Figura 67. Trino de corxera: Affettuoso núm. 4

8.1.3 Regularitat de les notes del trino

A través dels gràfics que mostrem a continuació podem observar que, generalment, tot i tractar-se de la mateixa figura en la mateixa posició mètrica, el comportament de cadascuna d'elles aparentment és diferent. Tot i així, no podem dir res concloent fins que no analitzem les dades amb eines d'intel·ligència artificial, les quals ens donaran un resultat més objectiu.

D'altre banda, dins d'un mateix trino certes vegades podem identificar que les notes del trino s'associen en dos grups amb rítmica similar. Aquests dos grups corresponen a les notes situades en una posició parell i en una posició senar, és a dir, és com si un dels grups estigués portant la pulsació per tal de poder controlar l'execució dels trinos (trinos controlats), els quals es pot observar en les següents figures: Figura 68 el trino 1, Figura 72 els trinos 3 i 4, Figura 73 el trino 8, Figura 74 el trino 2, Figura 75 els trinos 4 i 5, Figura 76 el trino 7 i Figura 79 els trinos 3, 7 i 8. De tots els trinos esmentats, el ritme dominant es troba en la primera pulsació de cada dues, excepte en els de la Figura 79 que es troba en la segona pulsació de cada dues.

Hem de destacar que cada gràfic a representa el número de notes (eix d'abcises) i quina durada té cadascuna d'elles (eix d'ordenades). A més a més, cadascuna d'elles està formada per dos gràfics els quals corresponen al mateix trino, tot i que el gràfic superior (dibuixat en vermell) conté el trino íntegre i, en canvi, l'inferior (en blau) estan totes les notes del trino excepte la inicial i la final per poder comprovar millor el seu comportament (notes centrals), ja que aquestes tenen un comportament diferent a la resta perquè tendeixen a ser més llargues que les que estan al centre.

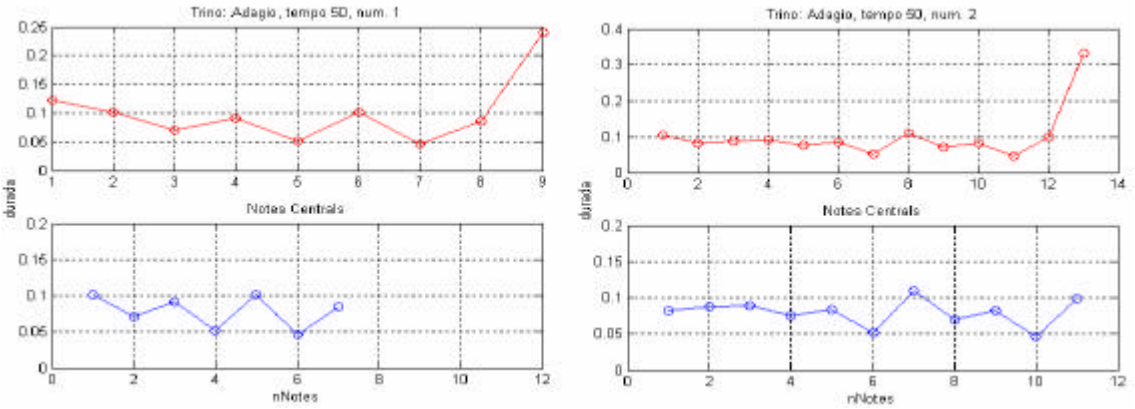


Figura 68. Adagio a tempo 50: blanca a la segona pulsació

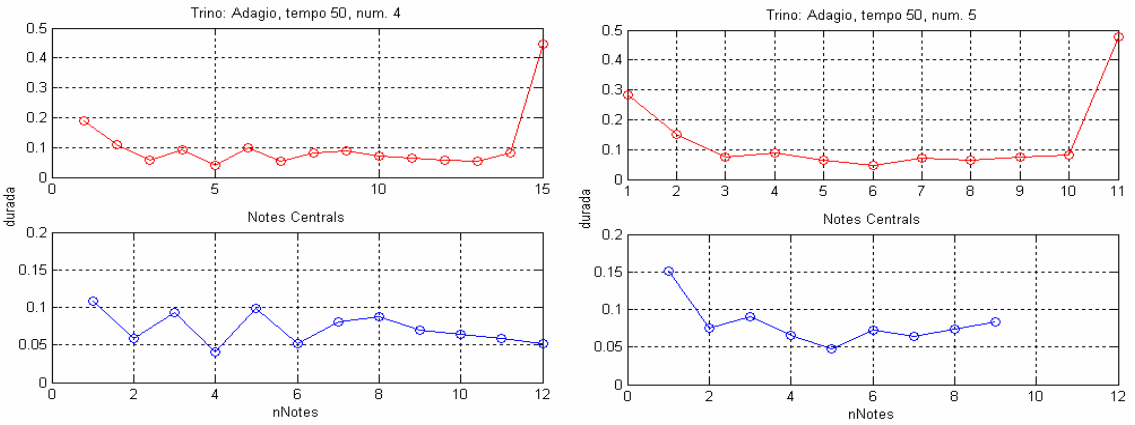


Figura 69. Adagio a tempo 50: blanca amb punt a la primera pulsació

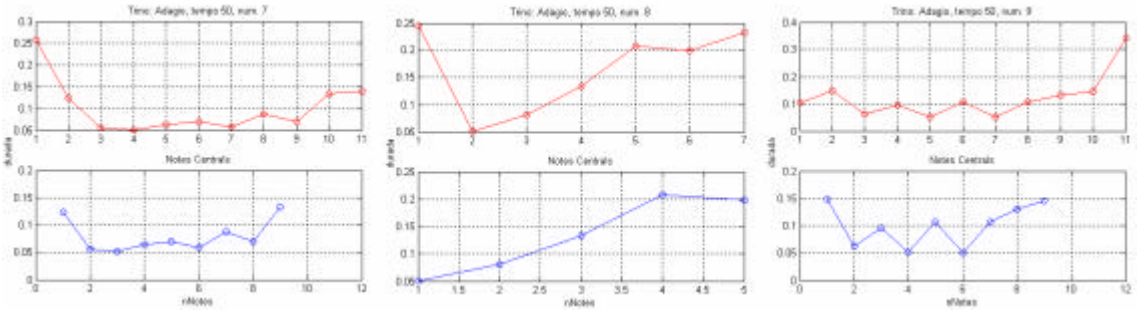


Figura 70. Adagio a tempo 50: blanca a la tercera pulsació

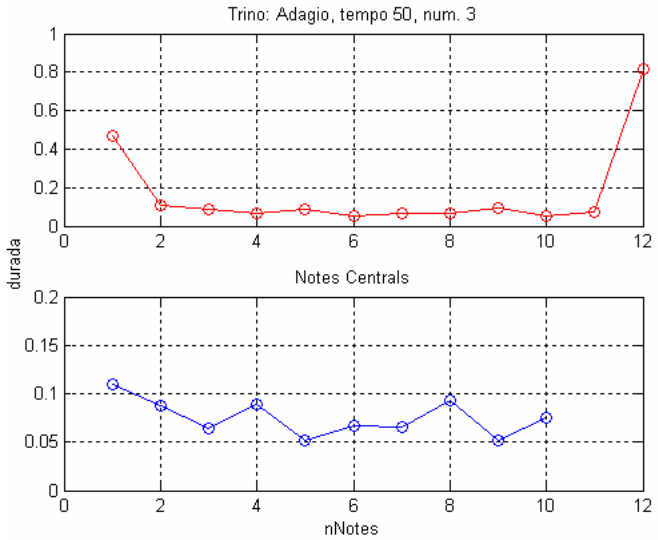


Figura 71. Adagio a tempo 50: rodona a la primera pulsació

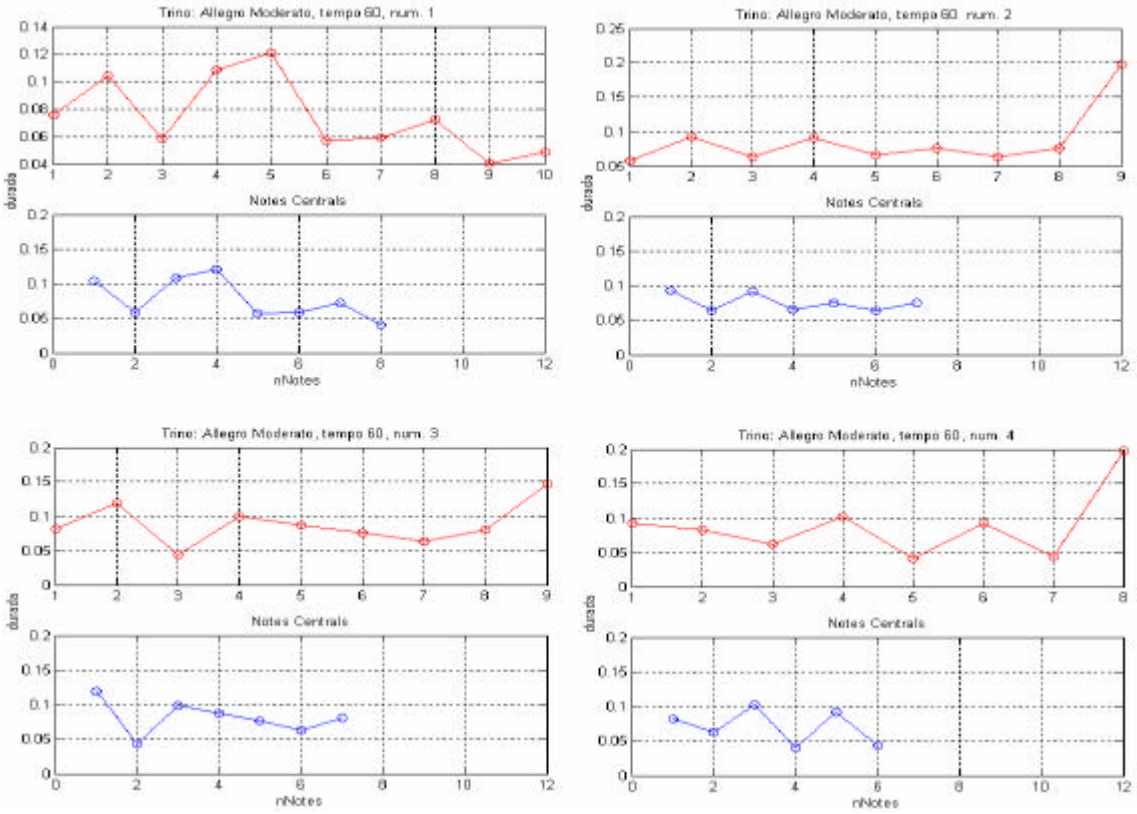


Figura 72. Allegro Moderato a tempo 60: negra a la tercera pulsació

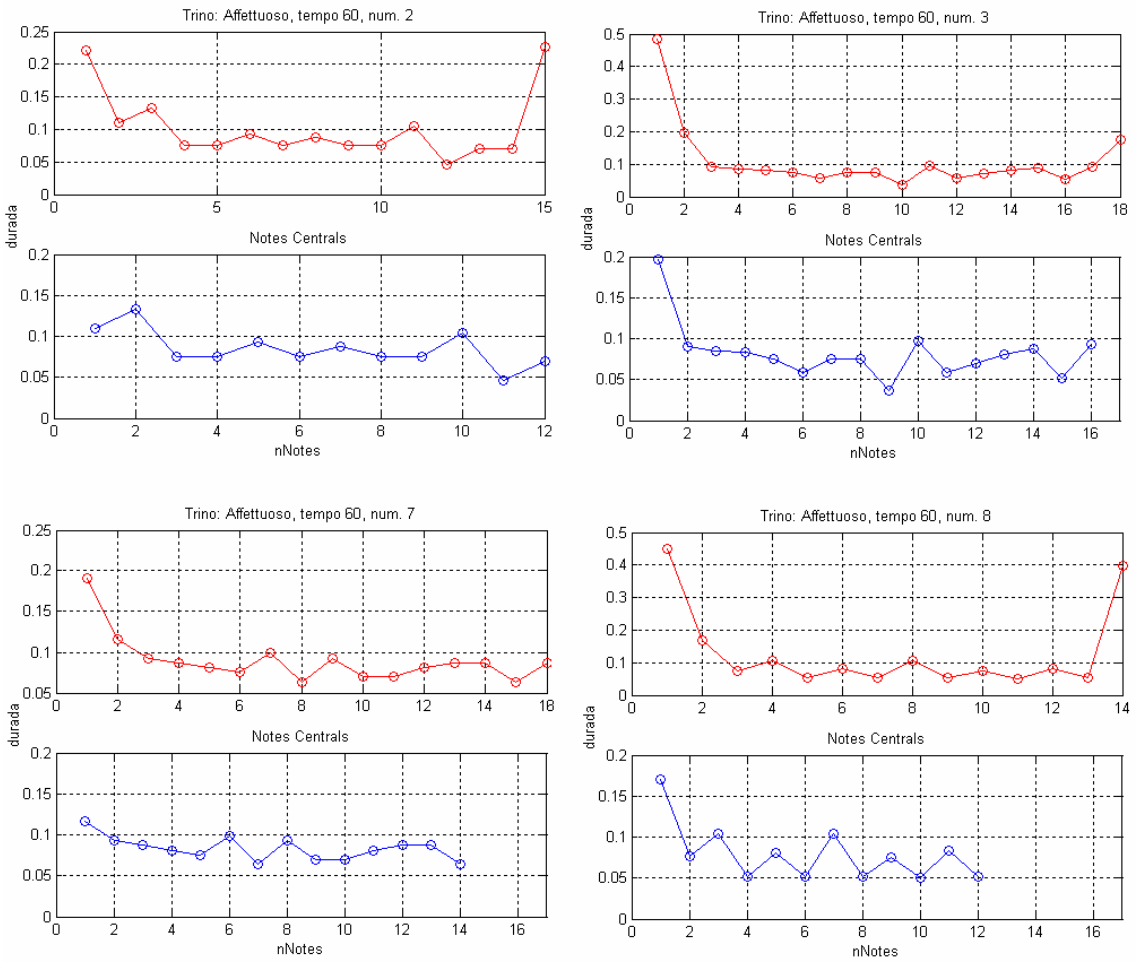


Figura 73. Affettuoso a tempo 60: blanca a la primera pulsació

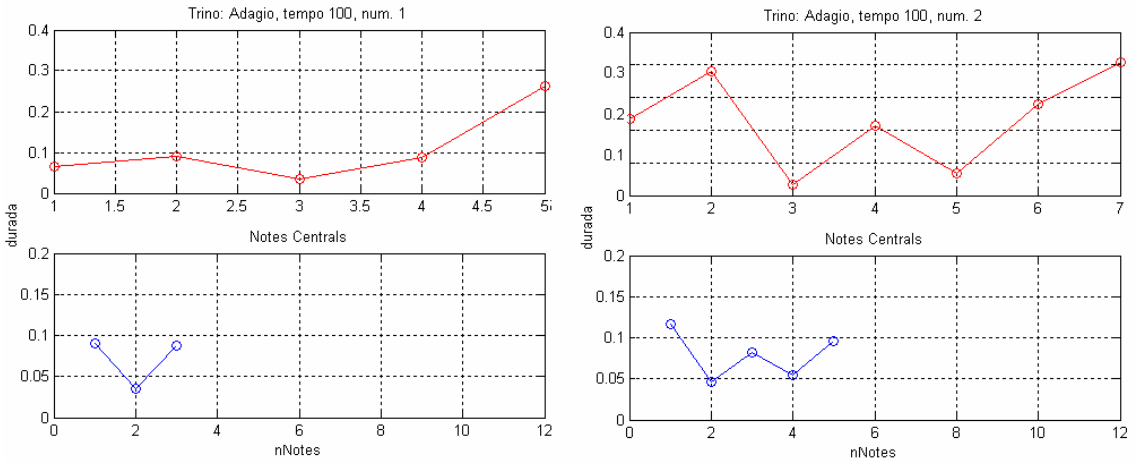


Figura 74. Adagio a tempo 100: blanca a la segona pulsació

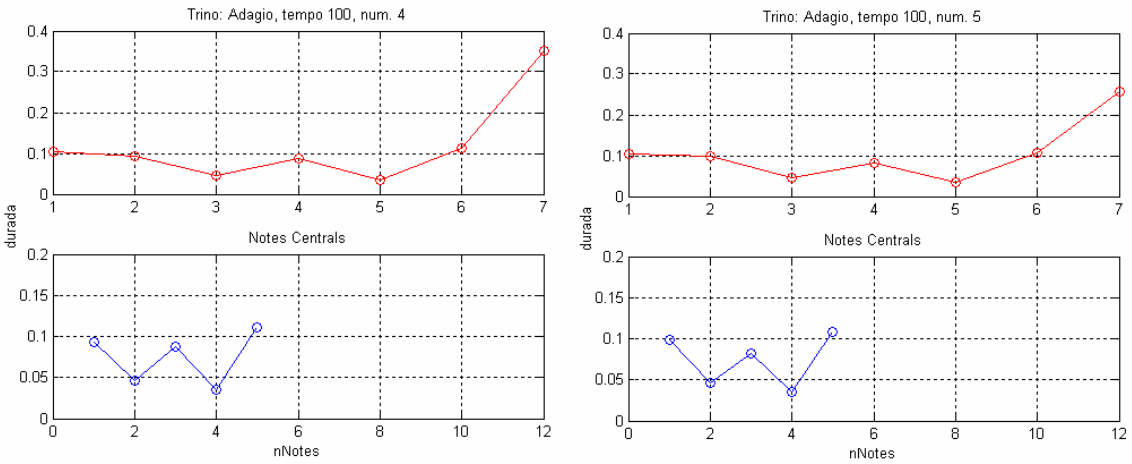


Figura 75. Adagio a tempo 100: blanca amb punt a la primera pulsació

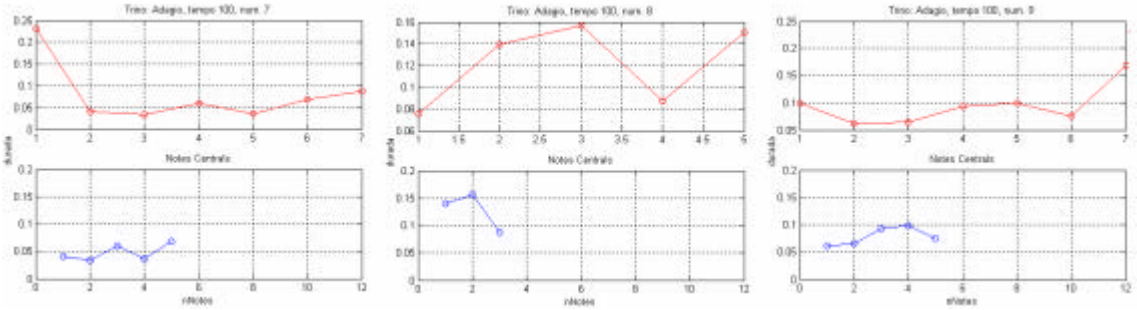


Figura 76. Adagio a tempo 100: blanca a la tercera pulsació

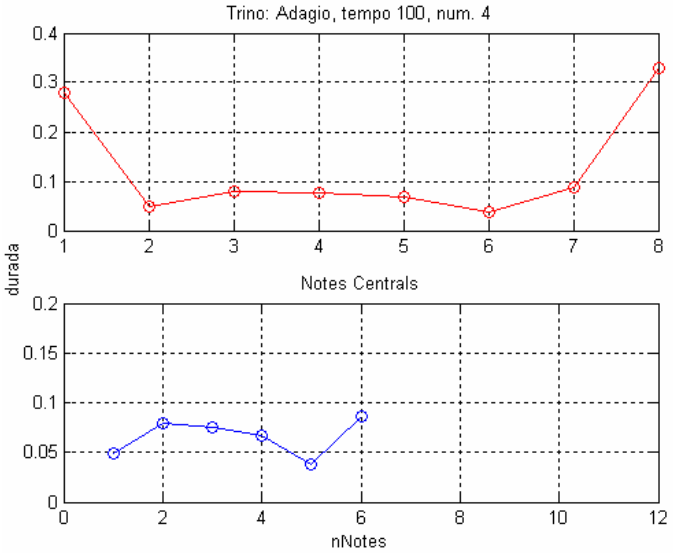


Figura 77. Adagio a tempo 100: rodona a la primera pulsació

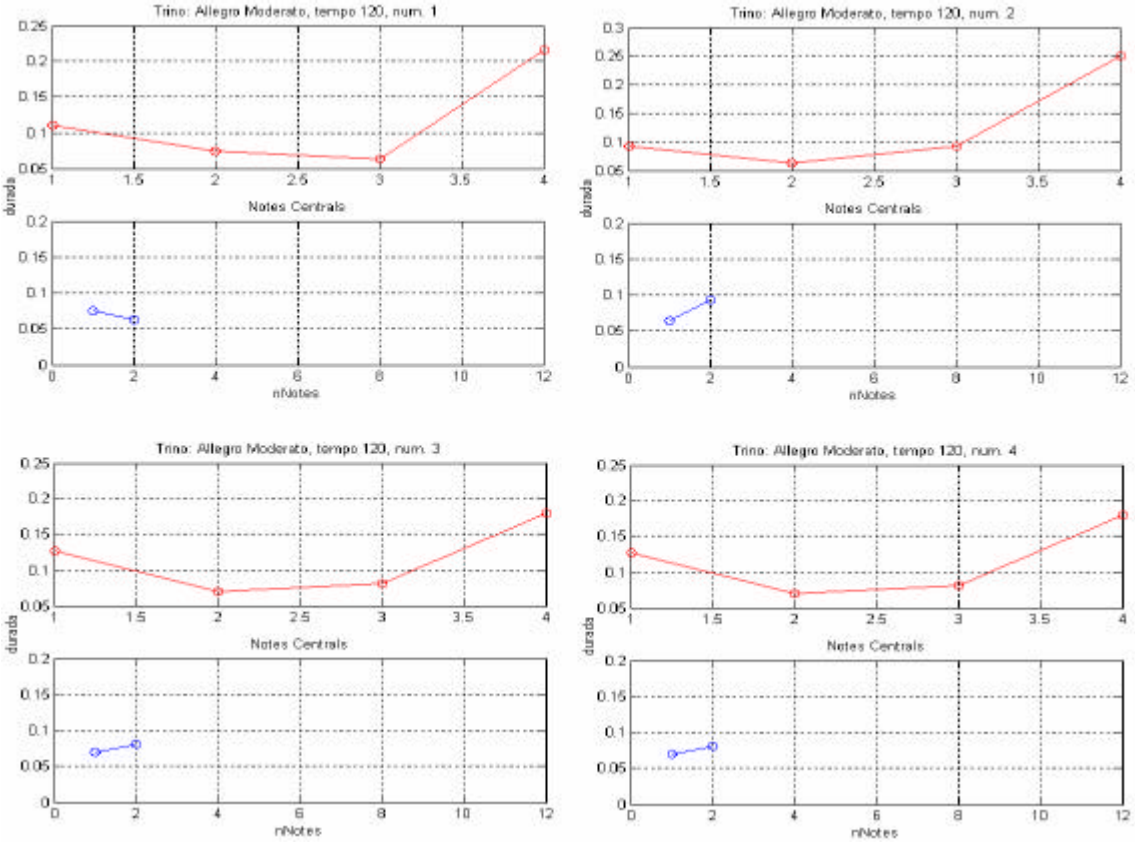


Figura 78. Allegro Moderato a tempo 120: negra a la tercera pulsació

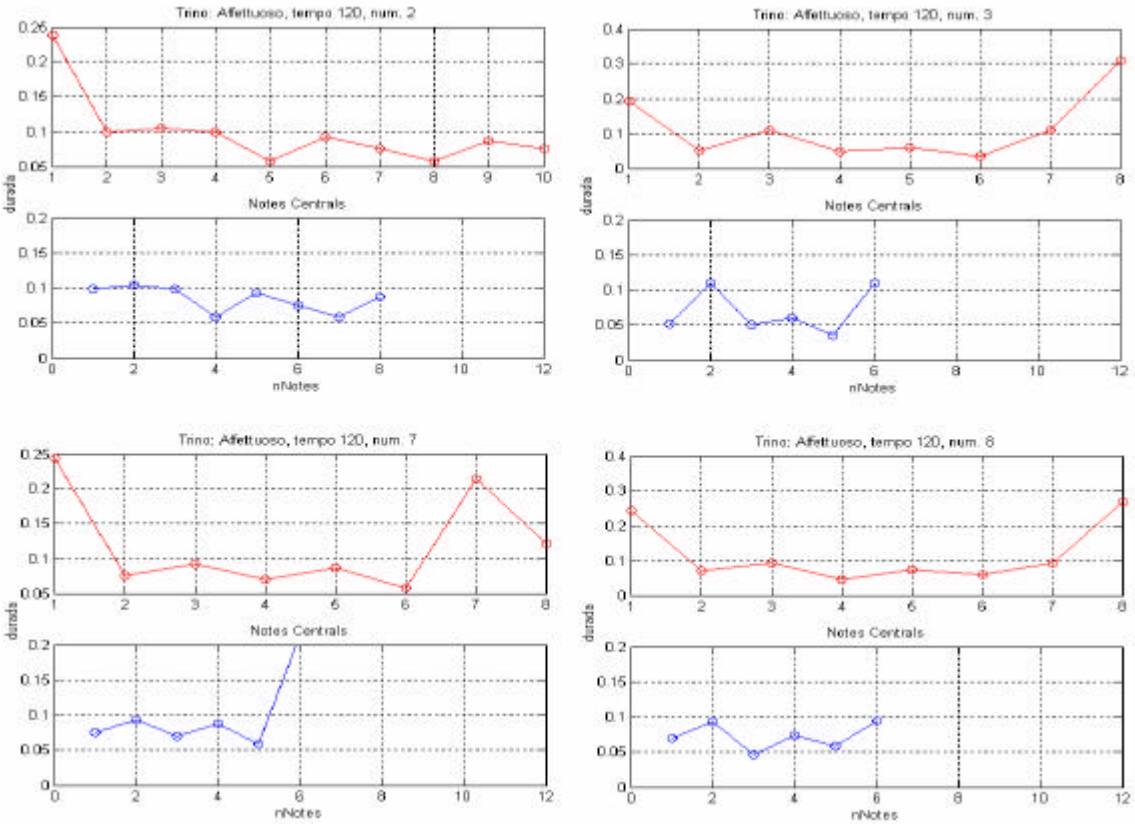


Figura 79. Affettuoso a tempo 120: blanca a la primera pulsació

8.2 Anàlisi amb eines d'intel·ligència artificial (Machine Learning)

A continuació explicarem com hem dut a terme l'anàlisi dels trinos per tal de poder extreure'n les similituds i algun patró per poder-lo aplicar i obtenir trinos en MIDI. La primera part del procediment l'hem realitzat a través del programa WEKA, un programa de Machine Learning que ens ajudarà a trobar el comportament i les regles generals, i la segona mitjançant CLAM i el llenguatge de programació C++.

8.2.1 Estudi del comportament dels trinos

Inicialment hem volgut observar si es podia predir el nombre de notes a través de WEKA i per tal d'estudiar-ho hem hagut de crear un fitxer posant les característiques dels trinos que ens han semblat més rellevants, les quals són:

El pitch, la duració i el beat (posició mètrica en la partitura) de la nota sobre on està el trino, el pitch i la duració de la nota anterior i posterior ($\frac{nota_actual}{nota_ant/post}$) indicant si aquestes estan lligades o no a la nota del trino, el tempo (Adagio, Allegro Moderato o Affettuoso), el tempo numèric (50, 60, 68, 92, 100 o 120) i, finalment, el número de notes (que és la dada que necessitem saber si "aprèn" correctament). La declaració d'aquests atributs és la següent:

@ATTRIBUTE pitch	REAL	@ATTRIBUTE legato_pos	{L,N}
@ATTRIBUTE duration	REAL	@ATTRIBUTE duration_pos	REAL
@ATTRIBUTE beat	{1,2,3}	@ATTRIBUTE tempo	{AD,AM,AF}
@ATTRIBUTE pitch_ant	REAL	@ATTRIBUTE tempo_num	
@ATTRIBUTE legato_ant	{L,N}		{50,60,68,92,100,120}
@ATTRIBUTE duration_ant	REAL	@ATTRIBUTE num_notes	
@ATTRIBUTE pitch_pos	REAL		{1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14}

Hi ha atributs que els hem declarat com a nombres reals, com per exemple el pitch, i n'hi ha d'altres que els hem declarat com a classe, com és el cas del tempo. Les classes ens indiquen que l'atribut només pot prendre el valor declarat, en el cas del tempo només podria prendre els valors AD (Adagio), AM (Allegro Moderato) o AF (Affettuoso).

A partir d'aquests atributs el que hem fet és descriure tots els trinos per tal de poder fer l'estudi de la predicció de notes a través de totes les característiques donades. Dit estudi l'hem fet a través de dos mètodes diferents, el "trees J48" i el "M5Rules" (en aquest cas l'atribut num_notes en comptes de declarar-lo com a classe s'ha hagut de declarar com a REAL) i els resultats obtinguts, que explicarem a continuació, són força bons tenint en compte que la predicció d'encert feta de manera aleatòria està sobre el 4% (tenim 69 trinos i 16 variants de notes) i la realitzada agafant la classe majoritària, és a dir, si sempre s'agafa el nombre de notes per trino que és més comú, el percentatge tan sols és d'un 13% aproximadament (dels 69 trinos, els que majoritàriament coincideixen en el mateix número de notes són 9).

Abans d'explicar cadascun dels mètodes, hem de matisar que tenim 16 variants de nombres de trinos (que van des de 2 notes fins a 18, tot i que no hi ha cap trino que tingui 17 notes), però els que contenen més de 14 notes per trino (15-18) els hem agrupat dins aquest valor, ja que només hi ha un trino per cada valor comprès entre el 15 i el 18. D'aquesta manera podem obtenir un número d'encerts significativament major i la variació realitzada no és molt rellevant, ja que afecta a un conjunt reduït de trinos.

Mètode M5Rules

Aplicant aquest mètode hem obtingut un percentatge d'encerts del 86%, tot i que els resultats obtinguts són unes fórmules poc entenedores però coherents. El resultat s'ha dividit en tres regles diferenciades per la duració de la nota: si és major a 1.25, més d'una negra, si és major a 0.75, més gran d'una corxera i la resta, que seria una corxera o menor. En la primera i segona regla el nombre de notes variarà, ja que la fórmula depèn dels paràmetres i els pesos assignats a cadascun d'ells. En canvi, la tercera regla ens dóna un valor fix molt petit, que hauríem d'acotar a un nombre enter, ja que fer un trino sobre una corxera o en una figura menor conté una gran dificultat perquè el temps és molt escàs.

Rule: 1

IF

duration > 1.25

THEN

num_notes =

-0.3682 * pitch

+ 0.4158 * duration

- 0.1932 * pitch_ant

+ 1.4033 * duration_ant

+ 1.8684 * tempo_num=68,60,50

+ 2.3841 * tempo_num=60,50

+ 26.2021 [42/45.564%]

Rule: 2

IF

duration > 0.75

THEN

num_notes =

3.6667 * duration

+ 3.0056 * tempo_num=100,68,60,50

+ 1.3315 [15/60.815%]

Rule: 3

num_notes = + 2.3333 [12/106.066%]

Mètode trees J48

El resultat obtingut a través del "trees J48" és molt diferent a l'anterior ja que amb aquest mètode, com genera un arbre de decisió perfectament intel·ligible, podem entendre el resultat. A més a més, finalment ens mostra una matriu on es poden veure els encerts, les errades i la distància d'aquestes.

El percentatge d'encerts obtinguts és del 46% aproximadament, tot i que aquest podria ser una mica major si es té en compte que "equivocar-se" amb un diferencial d'una nota de més o de menys no té cap mena d'importància. Però WEKA no té en compte si l'equivocació és propera o no, és a dir, no li importa si el nombre de notes detectades és una menys o una més a les que hauria de ser, perquè si no és exactament igual ho considera erroni, cosa que nosaltres considerem que aquesta diferència és gairebé imperceptible.

A continuació mostrarem l'arbre de decisió obtingut:

```
duration <= 0.5: 2 (12.0/4.0)
duration > 0.5
    | tempo_num = 50
    |     | legato_ant = L: 9 (2.0/1.0)
    |     | legato_ant = N
    |     |     | pitch_pos <= -1: 8 (2.0/1.0)
```

```
|       |       |       pitch_pos > -1
|       |       |       |       pitch <= 62: 11 (3.0)
|       |       |       |       pitch > 62: 7 (2.0/1.0)
|   tempo_num = 60
|       |       beat = 1: 14 (5.0/1.0)
|       |       beat = 2: 11 (1.0)
|       |       beat = 3: 9 (4.0/2.0)
|   tempo_num = 68
|       |       pitch <= 62: 9 (7.0/1.0)
|       |       pitch > 62: 5 (2.0/1.0)
|   tempo_num = 92
|       |       pitch <= 64
|       |       |       duration_pos <= 2: 11 (3.0/1.0)
|       |       |       duration_pos > 2: 5 (3.0/1.0)
|       |       pitch > 64: 8 (4.0/1.0)
|   tempo_num = 100
|       |       pitch_pos <= -2: 5 (2.0)
|       |       pitch_pos > -2
|       |       |       pitch <= 62: 7 (5.0)
|       |       |       pitch > 62: 5 (2.0/1.0)
|   tempo_num = 120
|       |       duration <= 1: 4 (5.0/1.0)
|       |       duration > 1
|       |       |       duration_ant <= 3: 6 (2.0/1.0)
|       |       |       duration_ant > 3: 8 (3.0)
```

Figura 80. Arbre de decisió

El que podem observar en l'arbre és quin es considera l'atribut més important, el qual és la duració, que decideix que succeeix inicialment. La següent decisió ve presa pel tempo numèric i, a arrel d'aquest, es decideix si és més important el beat, el pitch, si la nota està o no lligada i, novament, la duració. Aquests embrancaments es realitzen successivament fins arribar a l'últim nivell de decisió, que en el nostre cas ha arribat a una profunditat de 5 nodes. Aquest mètode intenta fer els camins de la manera més homogènia possible, si els atributs no tenen un grau de diferència notable o, d'altra banda, mirar quina és la característica més diferenciadora i així poder descartar casos erronis el més aviat possible.

A continuació mostrarem la matriu de classificació dels trinos (Figura 82) on ens mostra els encerts obtinguts per a cada trino i la seva classificació. Cada fila de la matriu ens indica el nombre de trinos que hi ha amb un nombre de notes en concret (el qual està indicat a la última columna) i cada columna fa referència a la posició que li pertoca a cada trino. Això significa que perquè un trino tingui el número de notes ben detectat ha d'estar indicat en la diagonal, però si tenim algun trino indicat fora de la diagonal és incorrecte, i com més allunyat estigui d'aquesta més diferent és el nombre de notes detectades respecte a la que hauria de ser. Per exemple, si tenim la vuitena fila:

a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	classified as
0	0	0	0	1	1	1	4	1	0	1	0	0	0	**h = 8**

Figura 81. Exemple explicatiu de la matriu

La última columna (h = 8), ens indica que la fila representa a tots els trinos que tenen vuit notes i dels quals, contant tots els valors de la fila, en tenim nou. El nombre marcat en vermell (4) indica la posició per on passa la diagonal, per tant sabem que ha detectat quatre trinos correctament, quatre trinos que tenen vuit notes. Però n'hi ha cinc que estan classificats d'una manera incorrecta, ja que s'indica que s'han trobat un trino amb 5 (e), 6 (f), 7 (g), 9 (i) i 11 (k) notes. És evident que com més lluny de la diagonal està indicat el trino trobat més erroni és el resultat. D'aquesta manera també podem saber quins no ha sabut classificar correctament i si l'errada és o no important, depenent de la diferència del nombre de trinos obtinguda amb la original (com hem dit anteriorment).

En la matriu hem marcat en verd la diagonal, on es troben els trinos que s'han detectat correctament. Tots aquells que estan fora la diagonal són incorrectes, tot i que hem considerat dues classes: els que podríem dir que la seva diferència audible és mínima i per tant els podríem considerar com a bons (marcats en groc) i els que s'han detectat incorrectament (marcats en vermell).

a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	classified as
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	**a = 1**
0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	**b = 2**
0	4	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	**c = 3**
0	0	0	3	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	**d = 4**
0	0	1	1	0	0	3	1	1	0	0	0	0	0	**e = 5**
0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	**f = 6**
0	0	0	0	0	0	5	0	2	0	1	0	0	0	**g = 7**
0	0	0	0	1	1	1	4	1	0	1	0	0	0	**h = 8**
0	0	0	0	0	0	0	3	6	0	0	0	0	0	**i = 9**
0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	**j = 10**
0	0	0	0	0	2	0	1	1	0	2	0	0	0	**k = 11**
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	**l = 12**
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	**m = 13**
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	4	**n = 14**

Figura 82. Matriu de classificació

9. Síntesi de l'àudio: generació de trinos

En aquesta secció parlarem de com hem det la síntesi dels trinos i de com els hem integrat dins de la melodia original. Per tal de dur a terme aquest propòsit hem fet servir una sèrie d'algorismes implementats de l'entorn CLAM.

9.1 Esquema de descripció

Per realitzar la síntesi de trinos hem realitzat un programa amb C++ i CLAM on es busca, per cada trino que s'ha de generar, el més semblant a partir dels que tenim emmagatzemats de l'anàlisi (mètode anomenat "Nearest Neighbour"). Aquesta semblança la obtenim a través dels atributs que caracteritzen, i alhora defineixen, cadascun dels trinos i estan relacionats directament amb l'escriptura de la partitura. Dites característiques s'han d'introduir manualment perquè computacionalment no es poden reconèixer i són, entre d'altres, el beat (pulsació del compàs), les lligadures (tant amb la nota anterior com en la posterior), el temps absolut de cada figura (rodona, blanca, negre....), etc. Un cop obtingut el trino més idoni ja podem passar a sintetitzar les notes del trino i substituir-lo per la nota pertinent dins de la peça. Finalment, un cop generats tots els trinos i introduïts dins la melodia, es genera a partir d'aquesta un fitxer MIDI per tal de poder escoltar i valoritzar el resultat final, el qual podem considerar molt correcte.

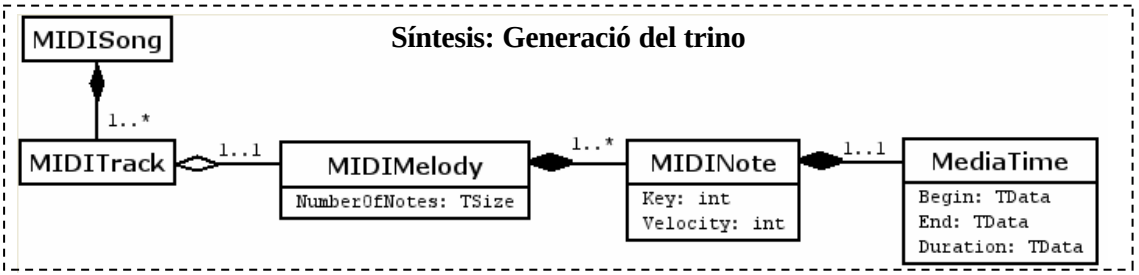


Figura 83. Diagrama de metadades de la síntesis

9.2 Algorisme de generació de trinos

A continuació mostrarem un diagrama de flux on es pot veure el procés seguit per realitzar la generació dels trinos que, posteriorment explicarem.

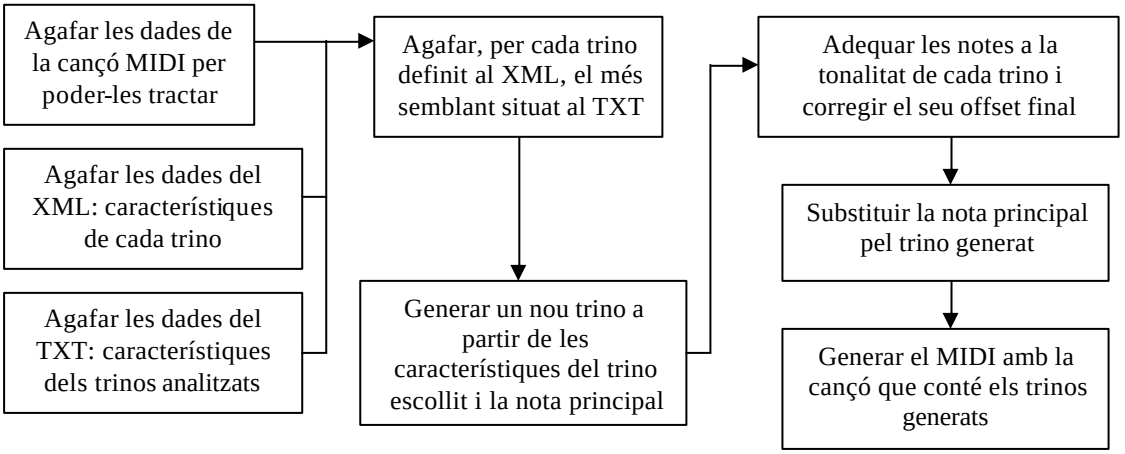


Figura 84. Diagrama de flux de l'algorisme de generació de trinos

L'algorisme està contingut dins dels fitxers que anomenarem a continuació:

El fitxer principal que conté el main i s'encarrega de generar el MIDI resultant, s'anomena *MIDIFile.cxx*. En el *fitxer ReadFileTrills.cxx* és on es llegeixen les dades del fitxer XML i la dels trinos analitzats (en format txt) per poder-les utilitzar posteriorment. A més a més, les dades que llegim del fitxer XML s'emmagatzemen gràcies als atributs obtinguts en l'arxiu *XMLTrillsAtributes.cxx*. Un cop obtinguts tots els atributs, amb els quals coneixem les característiques dels trinos, utilitzem el *NearestNeighbour.cxx* que, com indica el seu nom, conté mètodes per buscar el trino més proper (el més semblant). Finalment hem de generar els trinos que substituiran la nota principal indicada dins la melodia mitjançant mètodes del fitxer *GenerateTrills.cxx*, però per poder-ho fer necessitem tenir les notes midi en comptes de la freqüència fonamental dels atributs analitzats. Per aquest motiu, utilitzem el fitxer *CorrectFreq.cxx*, utilitzat anteriorment en la part de l'anàlisi.

A continuació mostrarem un diagrama de classes perquè tota l'estructura quedi molt més entenedora:

9.2.1 Diagrama de classes

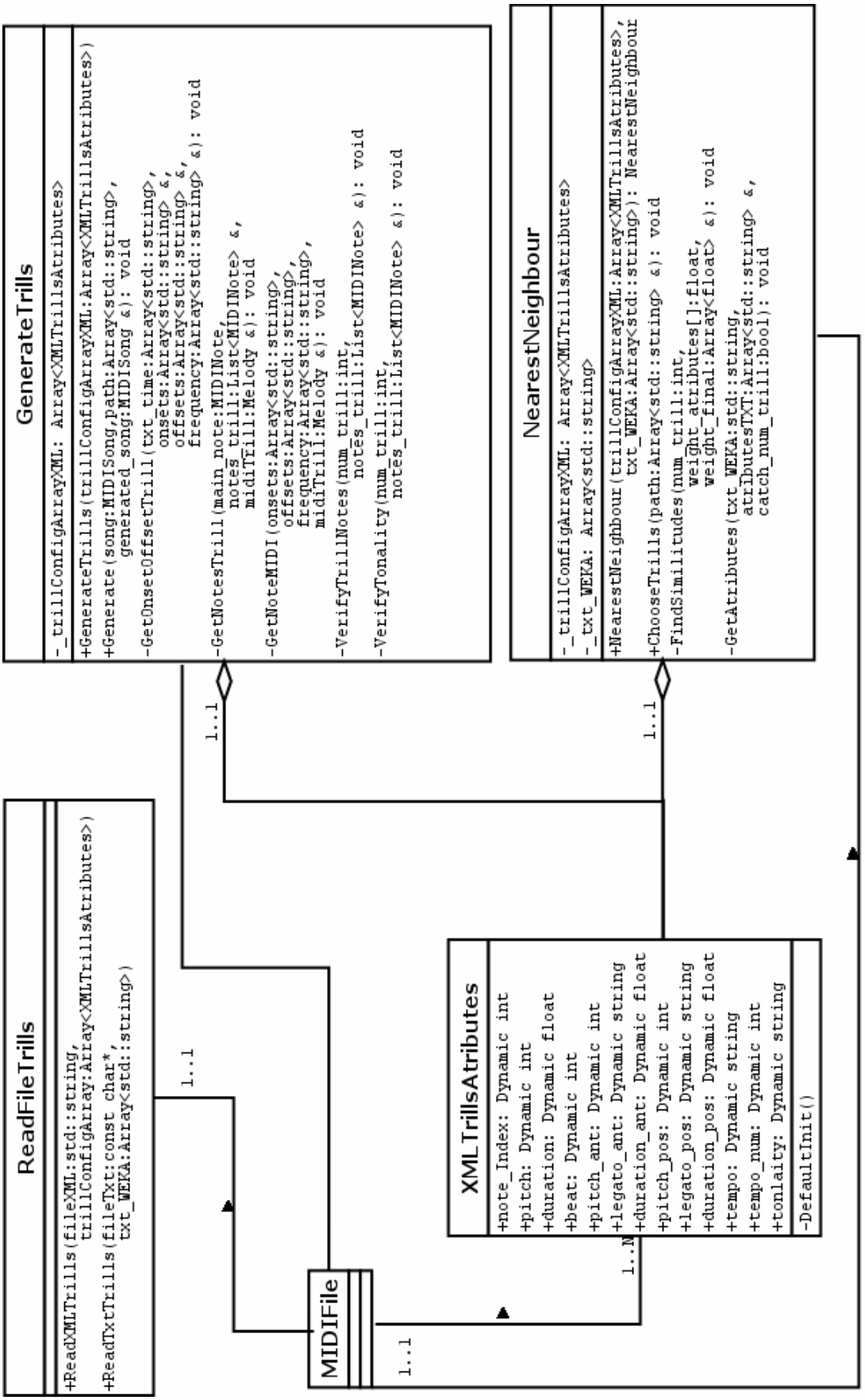


Figura 85. Diagrama de classes de la generació de trinos

9.3 Explicació de l'algorisme

Per fer la síntesi necessitem el nom del fitxer d'àudio sense trinos, el qual ha de ser un MIDI, el fitxer XML on estan indicades quines són les notes que s'han d'executar com un trino (amb totes les seves característiques) i, finalment, el fitxer de text on estan emmagatzemades les característiques dels trinos analitzats (aquesta serà la nostra base de dades). Un cop obtenim les dades de cadascun d'ells es generen els trinos adients.

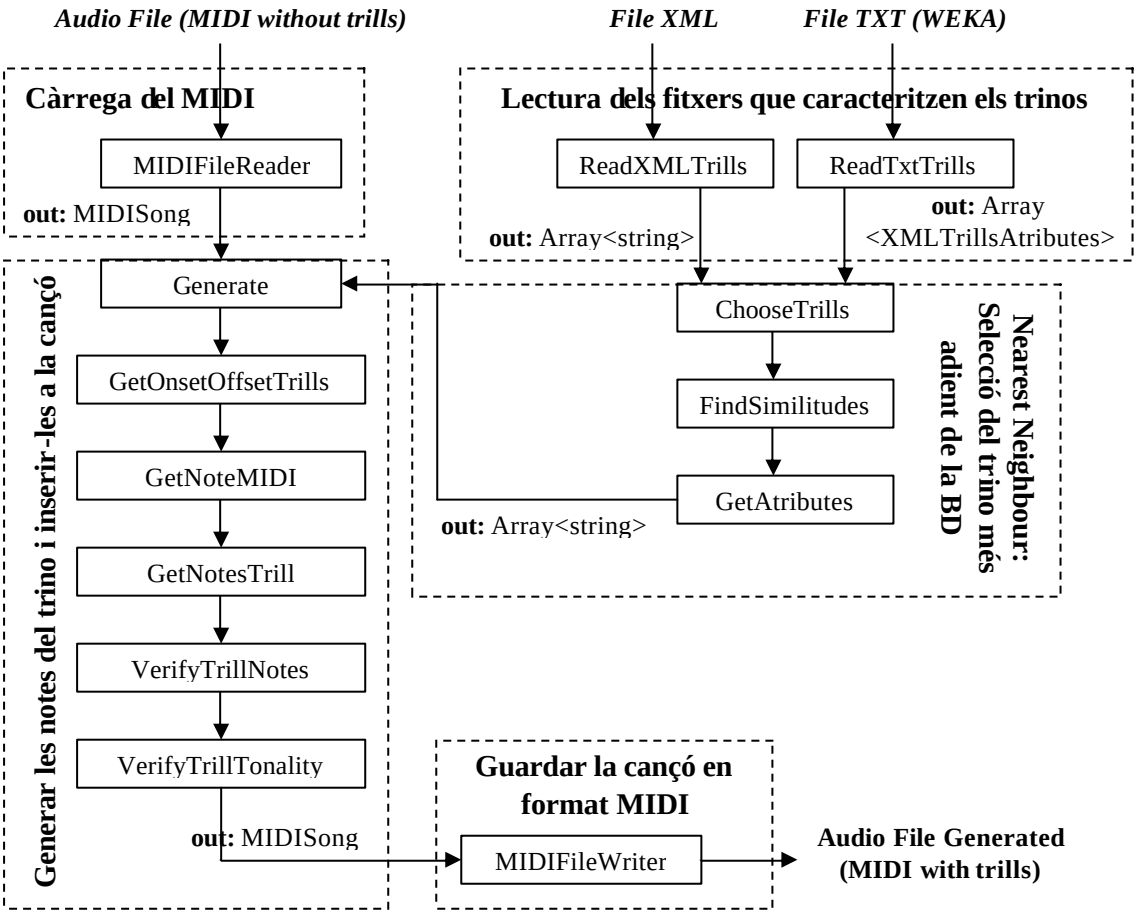


Figura 86. Passos de l'algorisme de generació de trinos (síntesi)

9.3.1 Càrrega del fitxer MIDI

Inicialment es carrega l'àudio MIDI (Figura 86), on es troba la cançó sense trinos, dipositant la informació pertinent en una estructura (classe) anomenada MIDISong, on s'emmagatzema el nombre de pistes i el seu contingut. Un cop s'obtenen aquestes dades ja es pot modificar la peça introduint-li els trinos pertinents.

9.3.2 Lectura dels fitxers que caracteritzen els trinos: XML i TXT

D'altre banda, també hem d'agafar els atributs del fitxer XML que conté les característiques i la posició de cada trino (Figura 86). A més a més, hem d'obtenir la informació dels trinos analitzats emmagatzemada en un del fitxer de text, el qual podríem dir que és la nostre base de dades obtinguda a partir de l'estudi del comportament dels trinos. Els atributs que defineixen cadascun dels trinos (fitxer XML) són molt semblants als que hem utilitzat en l'estudi del comportament d'aquests (els que trobem en el fitxer de text), tot i que amb un parell de diferències que esmentarem a continuació:

La primera definició del trino fa referència a la posició de la nota principal que s'ha de substituir, ja que agafarà les seves característiques: durada total, pitch i velocitat (intensitat). Posteriorment es defineix el pitch, la duració, el beat, el pitch i duració anterior i posterior, si la nota està lligada amb l'anterior i la posterior, el moviment i el tempo (característiques que ja fèiem servir en l'estudi del comportament). La nova característica inclosa en el XML, a part de la posició, és la tonalitat que és un factor molt important per poder saber quines notes poden ser tocades i quines no. Hem de saber quines pertanyen al "llenguatge" de la peça.

9.3.3 Nearest Neighbour

En aquesta part (Figura 86) hem seleccionat el trino més adient de la BD (on estan emmagatzemats els trinos obtinguts en l'anàlisi). Dita selecció l'hem fet a través del mètode nearest neighbour amb el que escollim el trino dipositat a la base de dades que tingui una major semblança amb les característiques del trino que volem generar. Aquesta semblança la mesurem a través del pes general del trino, el qual està format per la suma dels pesos de cada atribut (com més pes té més important és) que determinen la seva importància, tot i que de moment no hem donat cap prioritat. A part dels pesos també es té en compte la linealitat dels atributs numèrics, és a dir, quant de semblant és l'atribut. D'aquesta manera és molt més correcte l'aproximació ja que provoca que el pes sempre tingui valor, per molt petit que sigui, i que no valgui mai zero. Per tant, per determinar quin és el trino escollit, simplement hem de veure quin dels pesos, assignats als trinos, és més elevat.

Quan ja sabem quin dels trinos és l'adien el que fem és cercar el nom del fitxer (path) on està emmagatzemat les característiques del trino que volem imitar: onset, offset i freqüència fonamental.

9.3.4 Generació i inserció de les notes del trino

Per generar cadascun dels trinos (indicats en el XML) agafem els onsets, offsets i freqüència fonamental del fitxer obtingut en el procés del "Nearest neighbour" (Figura 86). Un cop obtinguts i separats aquests descriptors (els del trino de l'anàlisi) cerquem la nota MIDI que correspon a la freqüència fonamental, ja que el trino es genera en MIDI, i un cop obtinguda ja podem començar el procés de generar el trino.

El primer pas que hem de fer és identificar quines són les notes que s'han de substituir per un trino i ho fem a través de l'índex de la nota de la melodia on volem inserir-los, indicat en el fitxer XML. D'aquesta nota utilitzarem el temps total, la velocitat i, per suposat, la nota MIDI. Un cop tenim aquests atributs identificats generem el trino. Per generar-lo el que fem inicialment és escalar el temps del trino analitzat al temps de la nota de la melodia, i un cop tenim cada interval de temps hi introduïm la nota MIDI adient. La selecció de la nota MIDI es selecciona agafant com a referència la del trino analitzat, és a dir, la nota principal de la melodia. Aquesta es compara amb la primera nota del trino analitzat i, a partir d'aquí, s'imita el comportament agafant la diferència de semitons del trino analitzat i traspassant-lo al que estem generant. Finalment també li apliquem la mateixa velocitat de la nota de la melodia a cadascuna de les notes del trino.

Notes del trino analitzat		Notes Generades (nota principal = 36)
330.00	→ 64	36
373.145	→ 66	38
332.036	→ 64	36
375.771	→ 66	38
330.636	→ 64	36
370.736	→ 66	38
329.903	→ 64	36

Figura 87. Generació del trino

Posteriorment a la generació del trino verifiquem que les notes inserides són les adients, ja que hem d'evitar la repetició de notes (provocades pel pas de freqüència fonamental a MIDI, ja que no tenim un freqüència exacte i s'aproxima a la que s'utilitza per determinar el MIDI). A més a més hem de verificar si cadascuna de les notes pertany a la tonalitat corresponent i si no és així ho corregim pujant o baixant un semitò, fent que la diferència amb la nota anterior sigui la mínima.

Un cop obtingudes totes les notes del trino ja podem passar a generar la nova melodia amb els trinos substituint les notes indicades. Hem de tenir en compte que si la últim nota d'un trino i la següent nota de la melodia és la mateixa les hem de "lligar", és a dir, que la durada serà la del onset de trino més la nota de la melodia. D'aquesta manera no sonarà dues vegades la mateixa nota sinó que es sentirà una de sola sense el segon atac.

9.3.5 Guardar la cançó en format MIDI

Finalment, un cop ja tenim la nova melodia, generem la cançó en format MIDI, per la qual cosa el resultat final serà un fitxer MIDI on es podrà sentir la melodia inicial amb els trinos afegits en les notes que han estat indicades (Figura 86).

9.4 Exemples (joc de proves)

En aquest cas el joc de proves són els àudios resultants, però mostrarem un parell de partitures sense trinos i les generades amb els trinos.

Aquesta partitura (Figura 88) és la que hem utilitzat per fer la primera generació de trinos. Les notes assenyalades amb el símbol "tr" (trino) en vermell són les que seran substituïdes pel trino generat.

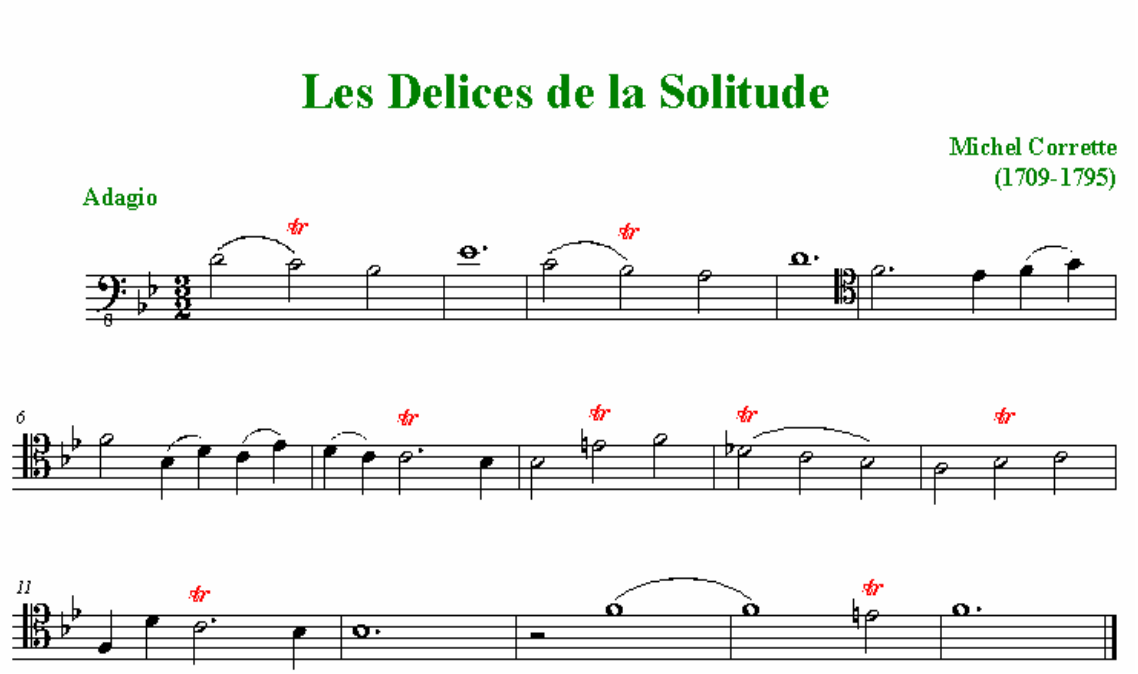


Figura 88. Partitura original (Adagio) amb els trinos que s'han d'efectuar marcats

La següent partitura que mostrarem (Figura 89) conté la melodia anterior amb els trinos generats. Per poder detectar-los, ja que la partitura al estar extreta d'un àudio no és tan llegible ni es pot comparar amb l'anterior, els hem assenyalat amb una clau amb el seu símbol, "tr", els dos de color vermell.

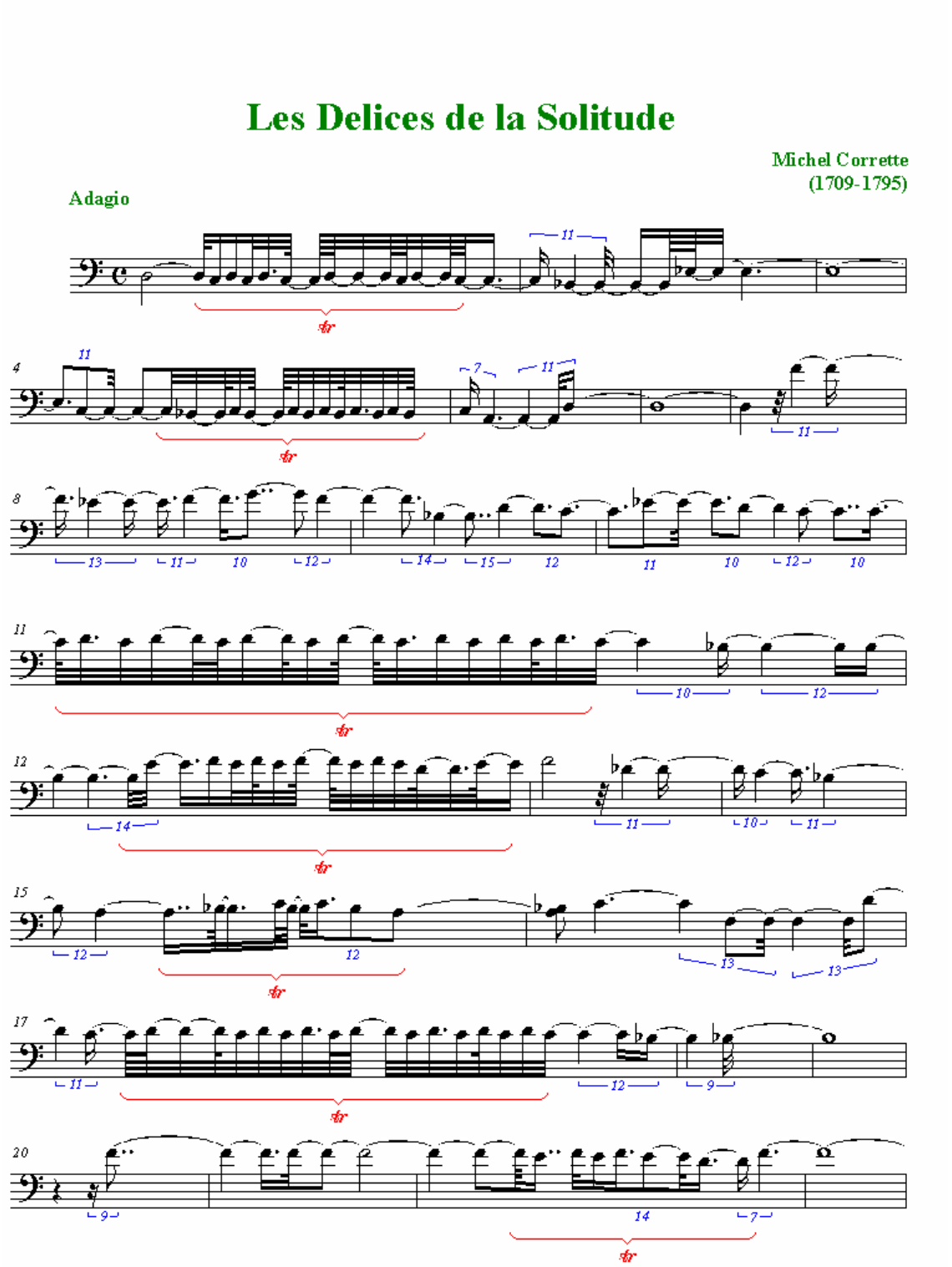


Figura 89. Partitura (Adagio) amb els trinos generats

A continuació mostrarem un segon exemple. Com en el cas anterior, la primera imatge (Figura 90) és de la partitura sense trinos, on també està indicat les notes que han de porta-los, mentre que en la segona imatge (Figura 91) els trinos, marcats amb el símbol "tr" i una clau en vermell, ja s'executen.

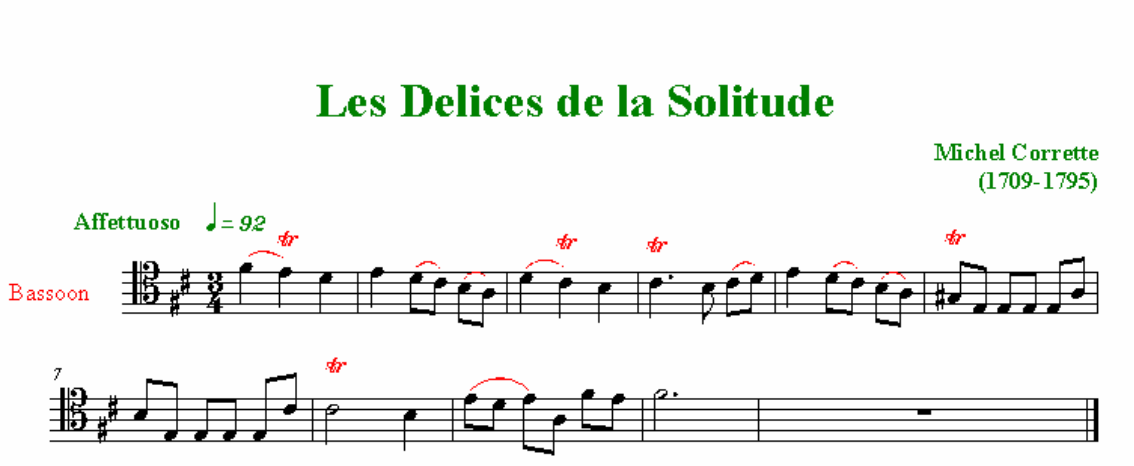


Figura 90. Partitura original (Affettuoso) amb els trinos que s'han d'efectuar marcats

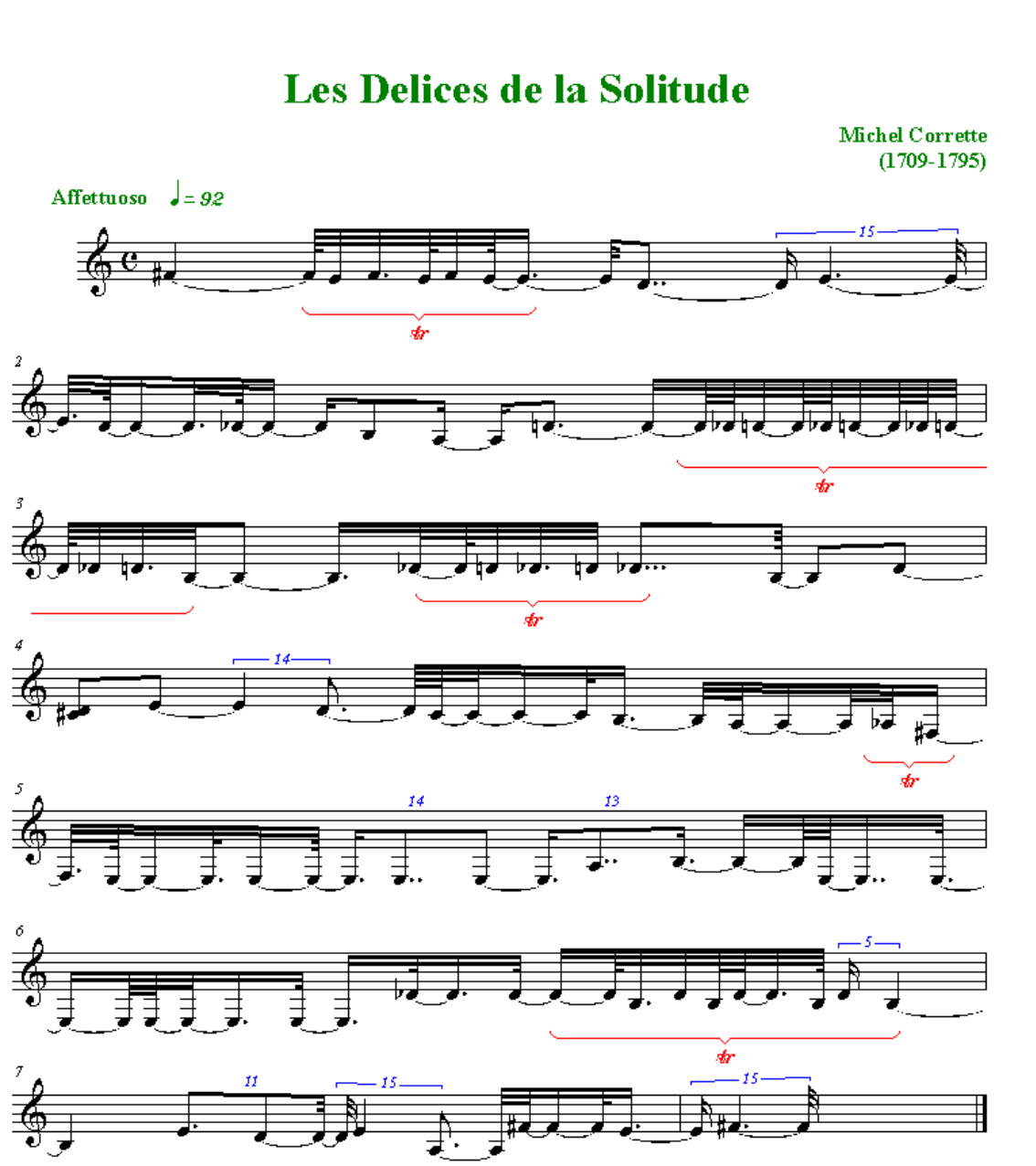


Figura 91. Partitura (Affettuoso) amb els trinos generats

9.5 Problemes trobats

Per poder treure el màxim rendiment del mètode "Nearest Neighbour" hauríem de tenir un nombre molt més elevat de trinos analitzats, la qual cosa no ha estat possible. Per tant l'aproximació és molt general, tot i que si s'agafa una peça de característiques semblants el resultat obtingut és considerablement bo.

El problema més rellevant de la generació de trinos és adequar cada trino a la tonalitat pertanyent, ja que pot ser que les notes que s'utilitzen per fer el trino estiguin alterades o bé s'hagi tret alguna alteració de la tonalitat principal. Per aquest motiu, és molt important tenir en compte la tonalitat del trino tant si és o no la mateixa que la principal, tot i que originalment (en la partitura) no hi hagi un canvi d'aquesta sinó una alteració de les notes. Per poder solucionar-ho necessitem conèixer la tonalitat de cada trino i ho fem a través de l'atribut *tonality* del fitxer XML.

10. Conclusions i ampliacions futures

10.1 Conclusions

Al llarg d'aquest projecte hem pogut implementar un sistema que permet generar automàticament els trinos d'una interpretació, de manera a com ho faria un intèrpret. Aquesta generació es basa en l'anàlisi d'interpretacions d'un fagotista professional.

En quant a l'anàlisi, es pot comprovar que els àudios pitjors descrits són els del moviment Adagio, cosa que podria ser degut a l'execució de figures llargues amb la dificultat afegida del temps, que és lent. Aquesta problema és degut: Primer, a que l'intèrpret ha de deixar anar més aire, fet que provoca la detecció d'onsets que en realitat no existeixen (a causa de l'energia trobada alhora d'expulsar l'aire) o, segon, que al no tenir aire suficient per poder aguantar la duració de la nota provoqui que no hi hagi prou energia com per poder ser detectada, fet que dificulta la detecció d'onsets a partir de la freqüència fonamental perquè aquesta, com està barrejada amb el soroll de l'aire, es confon i no es pot separar amb claredat causant la detecció d'un nombre inferior d'onsets dels que n'hi ha en realitat.

Hem de tenir en compte que tancar i obrir les claus de l'instrument provoca molt soroll perquè per fer els trinos aquest moviment s'ha d'executar amb rapidesa. Això fa que no es pugui posar l'atenció necessària en vigilar que les claus, que deixen o no passar l'aire, no colpegin l'instrument, provocant així el soroll.

També hem de tenir en compte que si els trinos estan seleccionats amb soroll a l'inici o al final dificulta i empitjora la seva detecció, ja que serà molt probable detectar un onset (segurament a causa de l'energia) que no sigui correcte.

L'execució del nombre de notes dels trinos analitzats les podem comparar amb un estudi sobre piano realitzat anteriorment per Judith C. Brown (Brown 2003), ja que els resultats obtinguts són molt similars (l'execució entre 12 i 14 notes/s) salvant les diferències entre els dos instruments, ja que el fagot podríem pensar que, al ser més suau de tocar, es podria fer alguna nota per segon de més. Quan ens posem a analitzar els trinos podem observar que segueixen una certa regularitat, com una mena de patró, això si, classificant-los en dos grups: trinos llargs i trinos curts.

- *Trinos llargs*: En aquests podem observar que el comportament és d'allargar la primera i última nota, amb la qual cosa les centrals són més ràpides i curtes.
- *Trinos curts*: Podem dir que els més curts de tots es comporten com una apoiatura i no com un trino, però en tots els casos es dóna que la última nota és la més llarga i les altres es fan, aproximadament, amb la mateixa velocitat.

Finalment podem arribar a sintetitzar en MIDI les notes adients per a cada trino tenint en compte les seves característiques com la duració, la tonalitat, el pitch de la nota principal, etc. Amb aquestes característiques podem arribar a simular el comportament dels trinos analitzats, comportament que hem explicat anteriorment.

10.2 Ampliacions futures

Per poder millorar la part de l'anàlisi, per poder detectar d'una manera més fiable i precisa els onsets i els offsets, hauríem d'aconseguir que les gravacions estiguessin realitzades en millors condicions per poder eliminar el soroll i la reverberació. A part d'aquesta millora hauríem

d'incrementar el nombre de trinos analitzats per poder augmentar la base de dades perquè l'actual (69 trinos) és molt petita i per fer un estudi com més mostres es té més fiables són els resultats obtinguts. A més a més d'augmentar el número de trinos hauríem d'aconseguir que les gravacions les realitzessin diferents intèrprets, ja que cadascun d'ells té la seva manera d'entendre i d'interpretar la música. D'aquesta manera, aconseguiríem una base de dades molt més amplia i fiable tot i que, segurament, la generalització del sistema seria molt més difícil. Per finalitzar, i obtenir una bona síntesi, hauríem estudiar la dinàmica dels trinos per poder-la aplicar alhora de generar-ne un.

A part de l'estudi i la síntesi dels trinos es podria estendre aquest a altres tipus d'ornaments, com l'apoiatura, el mordent... per tal de poder enriquir la síntesi d'aquest instrument.

Glossari

Alteració

Símbol que s'utilitza per modificar una nota. Aquesta pot ser un sostingut, un bemoll, un doble sostingut o un doble bemoll (els dos últims són poc utilitzats). La nota alterada pot tornar a ser natural mitjançant el símbol del becaire (Alteración 2005).

Escala cromàtica

Successió de dotze semitons continguts en una escala, on set d'ells són naturals i cinc alterats (Escalas 2005). Es pot comparar i veure fàcilment amb les notes d'un piano (les tecles blanques són les notes naturals i les negres són les alteracions).

Escala diatònica

És la formació d'una escala a partir de les distàncies de to i semitò. Aquesta és l'escala més utilitzada i, generalment, està formada per set notes, tot i que de vegades poden ser de sis o vuit (Escalas 2005).

Glissando

És un terme musical que fa referència a un desplaçament continu de to (freqüència) d'una nota a un altre. Aquests desplaçaments poden ser de molta o poca extensió, depenent de l'instrument que els efectuï (Definiciones 2005).

Legatto

Forma de fraseig on les notes estan lligades, és a dir, que quan es produeix el so no hi ha separació entre elles. És el cas oposar al staccato, on les notes són picades (Definiciones 2005).

Sonata

És la forma i estructura musical més important del classicisme. Aquesta consta generalment de tres moviments, tot i que a vegades són de quatre, i està escrita per a un o dos instruments (Definiciones 2005).

Tempos

S'utilitzen per a determinar la velocitat d'una obra musical. Els tempos estan classificats en lents, moderats i ràpids. En aquest cas es tracta d'una combinació (Tempos 2005):

Adagio: Tempo lent amb el que s'interpreta una peça musical.

Allegro: Allegro, que significa alegre, pertany als ràpids i d'ells és el més lent.

Moderato: Pertany als temps lents i dels quals és el més ràpid.

Affettuoso: Paraula que serveix per determinar l'expressivitat en una obra (o un fragment d'aquesta). Aquesta interpretació musical amb sentiment es pot atribuir a la tendresa.

Tessitura (registre)

Són extensions de notes que es capaç de produir tant la veu com un instrument, tot i que cadascun d'ells tindrà un rang determinat. Aquestes extensions normalment es classifiquen com aguda, sobreaguda, central i greu (Definiciones 2005).

Tonalitat

La tonalitat és una manera d'organitzar les alçades d'una escala i la primera i més important s'anomena tònica, tota la resta funcionen amb relació amb aquesta. A més a més aquestes escales poden ser majors o menors. Hi ha 15 tonalitats, cadascuna d'elles amb un mode major i un mode menor.

Bibliografia

Referències bibliogràfiques

- Baines, Anthony
    - *Woodwind Instruments and their history*
- Brown, Judith C.
    - *Independent component analysis for automatic note extraction from musical trills*, 2003
- Casey, M. A., i Westner, A.
    - *Separation of Mixed Audio Sources by Independent Subspace Analysis in Proceedings* of the International Computer Music Conference ICMC, pp. 154–161, 2000
- Chafe, Chris
    - *A Short History of Digital Sound Synthesis by Composers in the USA*, 1999
- Fletcher, Neville H.
    - *The Physics of Musical Instruments*, Addison Wesley, Second Edition 1990
- Gómez Emilia, Anssi Klapuri, Benoît Meudic
    - *Melody Description and Extraction in the Context of Music Content Processing*, Journal of New Music Research, 2003.
- Gómez E., Gratchen, M., Amatriain, X., and Arcos, J.L.
    - *Melodic characterization of monophonic recordings for expressive tempo transformations,*SMAC, 2003.
- Gómez, E.
    - *Melodic description of audio signals for music content processing*, PhD predoctoral Thesis, Universitat Pompeu Fabra, 2002
- Juslin, Patrik N., Sloboda, John A.
    - *Music and emotion*, Oxford University Press 2002
- Klapuri, A.
    - *Sound Onset Detection by Applying PsychoacousticKnowledge*. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, ICASSP 1999
- Moore, G. P.
    - *Piano trills*, Music Perception 9(3), 351–359, 1992
- Palmer, C.
    - *Anatomy of a performance: Sources of musical expression.* Music Perception. 13, 433–453, 1996
- Piston, Walter
    - *Orquestación*, Real Musical 1955
- Rossing, Thomas D., Fletcher, Neville H.
    - *The Physics of Musical Instruments*, Springer
- Rossing, Thomas D., Moore, Richard F., Wheeler, Paul A.

- *The Science of Sound*, Addison Wesley

- Sandell, Gregory J. i Martens, William L.
  - *Perceptual Evaluation of Principal-Component-Based Synthesis of Musical Timbres*, 1995

Referències de Internet

- Adorno 2005: http://es.wikipedia.org/wiki/Adorno
- Alteración 2005: http://es.wikipedia.org/wiki/Alteraci%C3%B3n_%28m%C3%BAsica%29
- Basson 2005: www.musicologie.org/sites/basson.html
- C++ 2005: www.hitmill.com/programming/cpp/cppHistory.html
  http://cplus.about.com/od/beginnerctutorial/l/aa010702a.htm
- Cents 2005: http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/music/cents.html#c1,
  www.webpersonal.net/avl3119/mus/05.htm#p6
- CLAM 2005: www.iua.upf.es/mtg/clam/ReleaseDocumentation-html/onepage.html
- Corrette 2005: www.hoasm.org/VIIE/Corrette.html
  http://members.ozemail.com.au/~tormus/pubs_4.htm
- Corrette works 2005: www.idrs.org/Publications/Journal/JNL13/JNL13Buko.html
- Definiciones 2005: http://usuarios.lycos.es/Papageno/glosario/glosario.htm
- Energy 2005: http://cnx.rice.edu/content/m10055/latest/
- Escalas 2005: http://es.wikipedia.org/wiki/Escala_%28m%C3%BAsica%29
- Finale 2005: www.gtpcc.org/gtpcc/finale2005.htm
- Glenbrook 2005: www.glenbrook.k12.il.us/gbssci/phys/Class/sound/u11l4d.html
- Machine learning 2005:
  www.algebra.com/algebra/about/history/Machine-learning.wikipedia
- MATLAB 2005: http://en.wikipedia.org/wiki/MATLAB#History
- MIDI 2005: http://www.borg.com/~jglatt/tutr/notefreq.htm
- Ornament 2005: http://gc-music.com/Ornament.htm
  www.earlybass.com/ornament.htm
  ww.interactivemusicnetwork.org/glossary
- Software 2004: www.iua.upf.es/~xamat/ES1
- Tempos 2005: http://eclasico.tripod.com/preguntas.html#quesignifica
- Trills 2005: http://baroque-music.com/frames/info/articles/ornaments/index3.shtml
- Visual 2005: http://en.wikipedia.org/wiki/Visual_C_Plus_Plus
- Wavesurfer 2005: www.speech.kth.se/wavesurfer/
- WEKA 2005: http://www.weka-holding.de/english/firmengruppe.php
  http://sourceforge.net/projects/weka/
- XTEC 2005: www.xtec.es/centres/a8019411/caixa

11. Annex (I): Fitxers analitzats

Els valors introduïts en el panell .txt que es pot veure en els gràfics indica la freqüència de cada nota trobada. Basarem la correcció de l'anàlisi sobre l'afinació al La4 a 440Hz.

Els noms dels fitxers indiquen: el "tape", la pista en que han estat gravats, el moviment on es troven, el tempo, que la gravació està amb notes d'ornament, si està en mono o estèreo i, finalment, l'últim número ens indica quin és el trino que estem analitzant dins del moviment i tempo establert.

> *Exemple: El número 1 de "2_2_Affettuoso_60_With_1_mono.wav" ens indica que analitzem el primer trino de la partitura del moviment Affetuoso amb un tempo a 60.*

11.1 Affettuoso

Les figures dels trinos d'aquest moviment són:

Corxeres: Els trinos 1, 4, 6 i 9.

Trino 1: Re4 (294 Hz) – Do#4 (277 Hz)

Trino 4: Sol4 (392 Hz) – La4 (440 Hz)

Trino 6: Do#4 (277 Hz) – Re4 (294 Hz)

Trino 9: La4 (440 Hz) – Sol4 (392 Hz)

Negres: Els trino 5.

Trino 5: Mi4 (330 Hz) – Fa#4 (370 Hz)

Negra amb punt: El trino 10.

Trino 10: Mi4 (330 Hz) – Fa#4 (370 Hz)

Blanques: Els trinos 2, 3, 7, 8.

Trino 2: Si3 (247 Hz) – Do#4 (277 Hz).

Trino 3: Sol4 (392 Hz) – Fa#4 (370 Hz)

Trino 7: Si3 (247 Hz) – Do#4 (277 Hz)

Trino 8: Sol4 (392 Hz) – Fa#4 (370 Hz)

S'ha de tenir en compte que tot i que s'estiguin representant els mateixos trinos no sempre s'inicien de la mateixa manera, és a dir, no sempre comencen amb la mateixa nota. Un exemple el podem veure entre els fitxers:

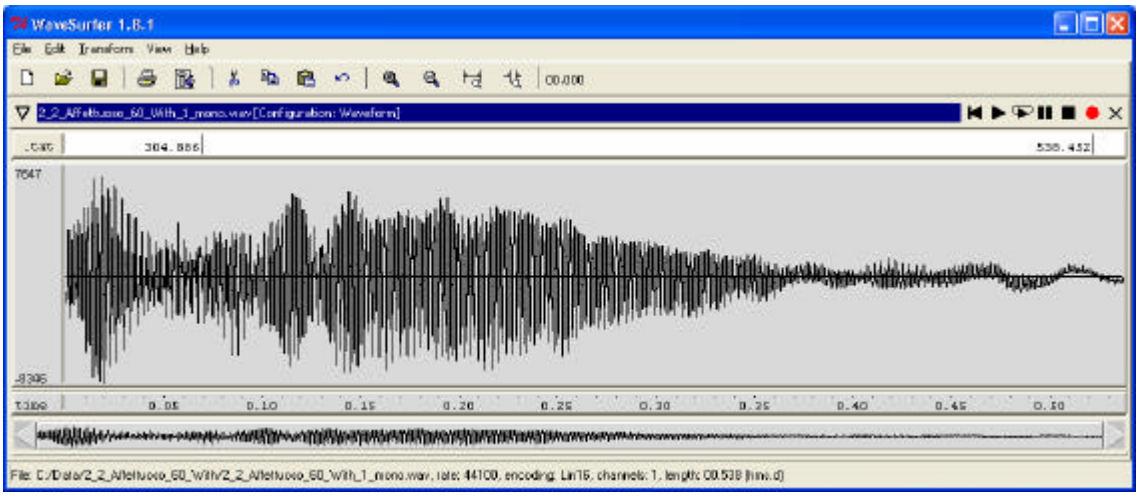
1. 2_2_Affettuoso_60_With_1_mono.wav
2. 2_7_Affettuoso_120_With_1_mono.wav

En ells es fa el trino Re4 (294 Hz) – Do#4 (277 Hz) però el primer el comença pel Do#4 mentre que el segon el comença pel Re4. Teòricament els trinos haurien de ser sempre de la mateixa manera, però alhora de interpretar-los (degut a la seva dificultat) el músic no sempre l'executa de la mateixa manera.

11.1.1 Tempo Affetuoso 60

2_2_Affettuoso_60_With_1_mono.wav

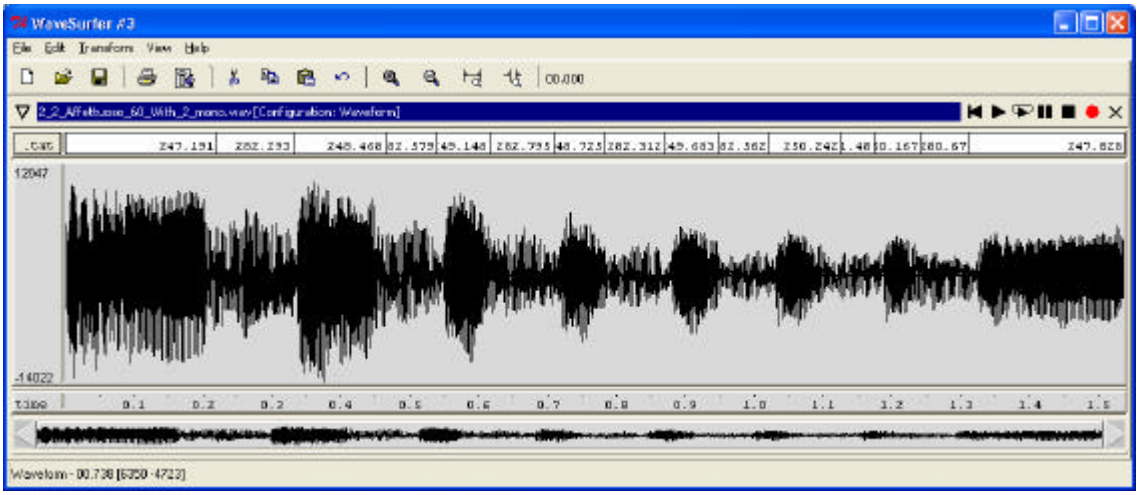
Les notes està ben detectats tot i que les freqüències indicades no són correctes (sobretot la última que està en una escala diferent a la qual li pertoca). Aquest trino, al estar a sobra d'una figura curta (una corxera) es podria considerar una apoiatura.



2_2_Affettuoso_60_With_2_mono.wav

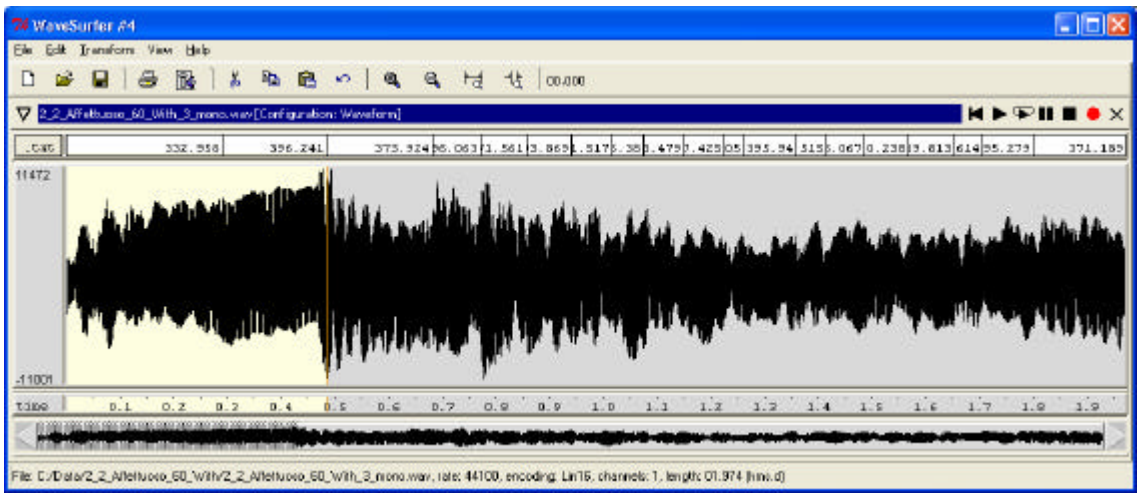
Les notes detectats són correctes i les freqüències més o menys corresponen a les que haurien de ser.

Podem dir que les notes Si3 estan força ben detectades perquè la freqüència està compresa entre 247 i 250 Hz. Els Do#4 estan compresos entre 280 i 282 Hz.



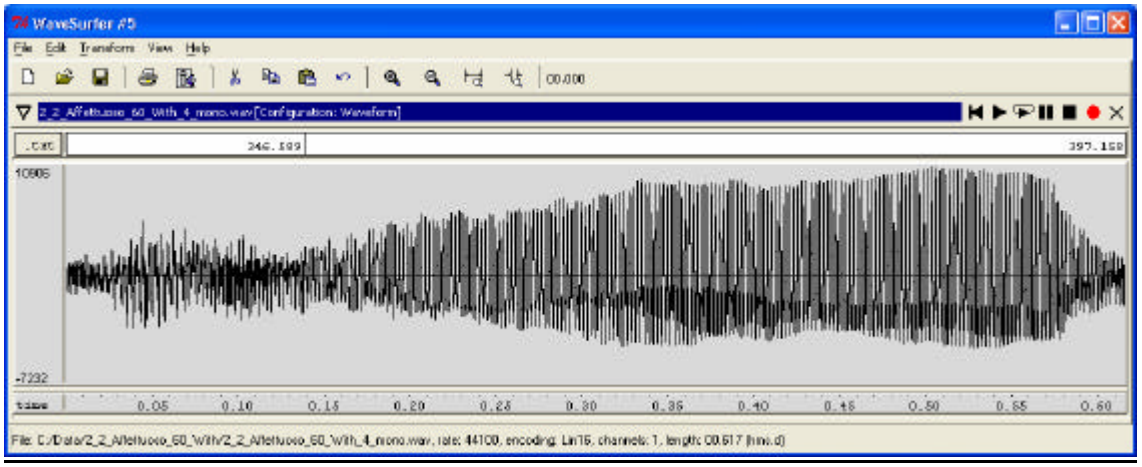
2_2_Affettuoso_60_With_3_mono.wav

Tots els onsets (i offsets) són correctes, accepte els dos inicials (senyalats en groc) que hauria de ser el mateix. Les freqüències estan força aproximades i la relació entre les notes és correcta.



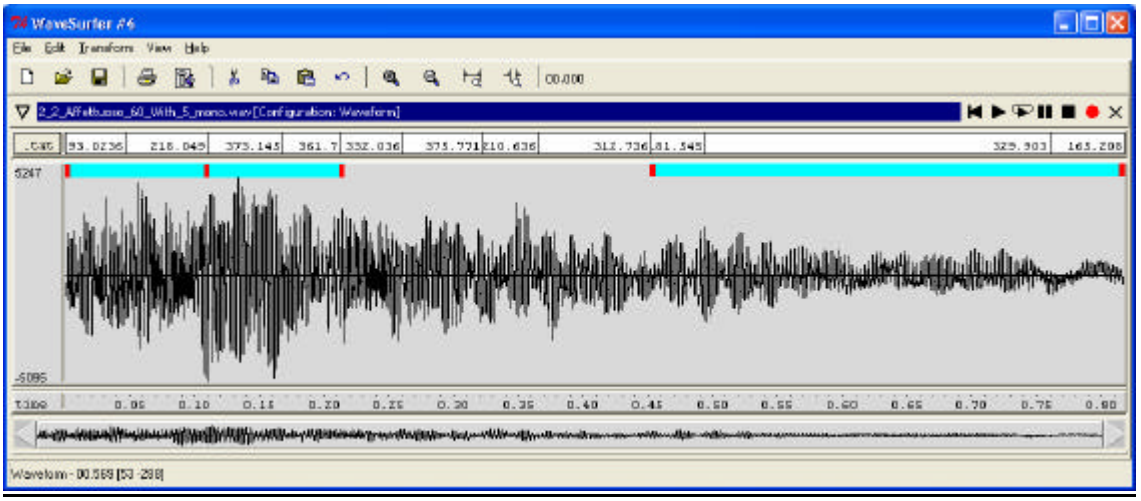
2_2_Affettuoso_60_With_4_mono.wav

El nombre de notes detectades són les correctes, però la primera freqüència és força diferenta i s'ha demodificar.



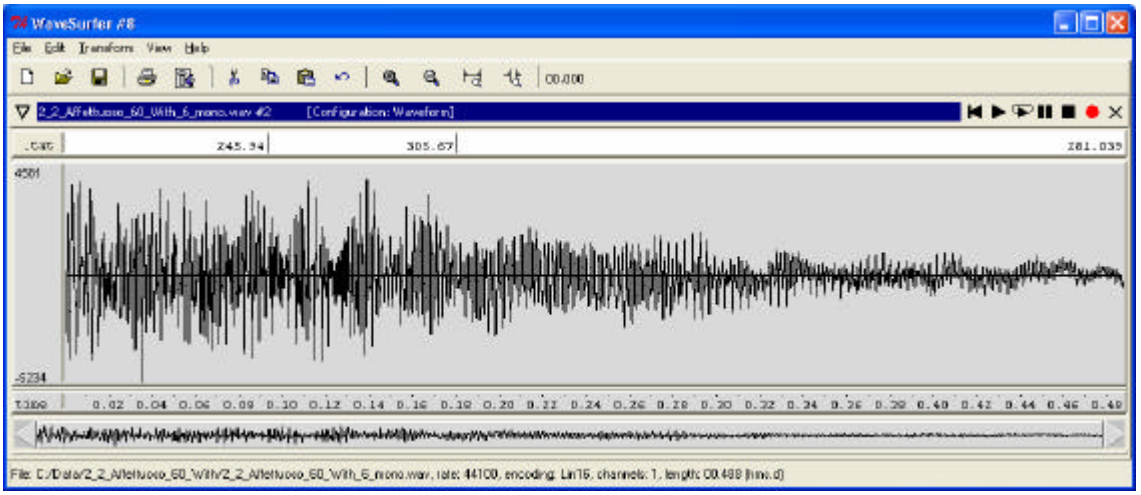
2_2_Affettuoso_60_With_5_mono.wav

Les marques blaves acotades per franges vermelles indiquen que només s'hauria d'haver detectat una nota (en comptes de les dues que es mostren). Les freqüències no són gaire correctes, són molt millorables.



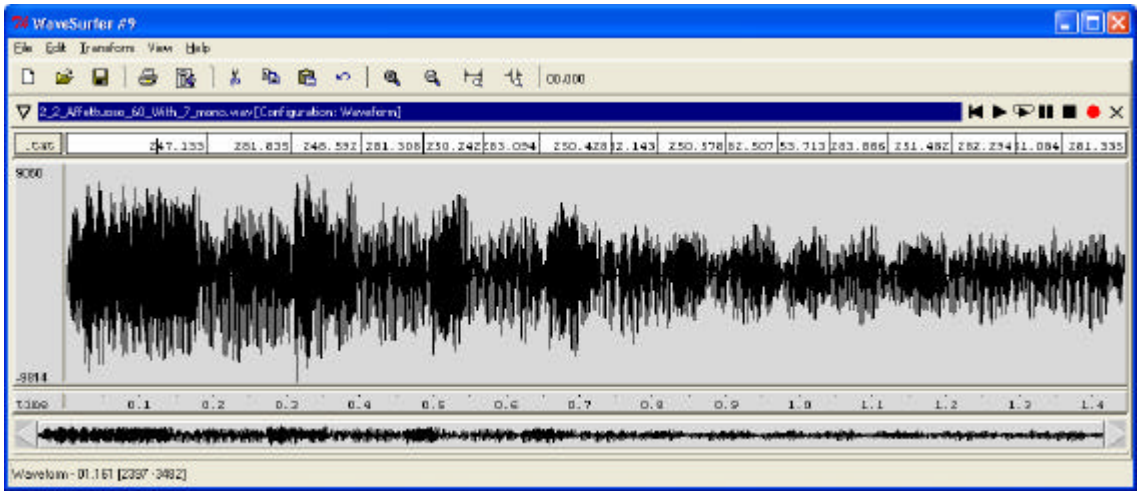
2_2_Affettuoso_60_With_6_mono.wav

Les notes estan ben detectades, però s'han de modificar les freqüències dels dos primers onsets.



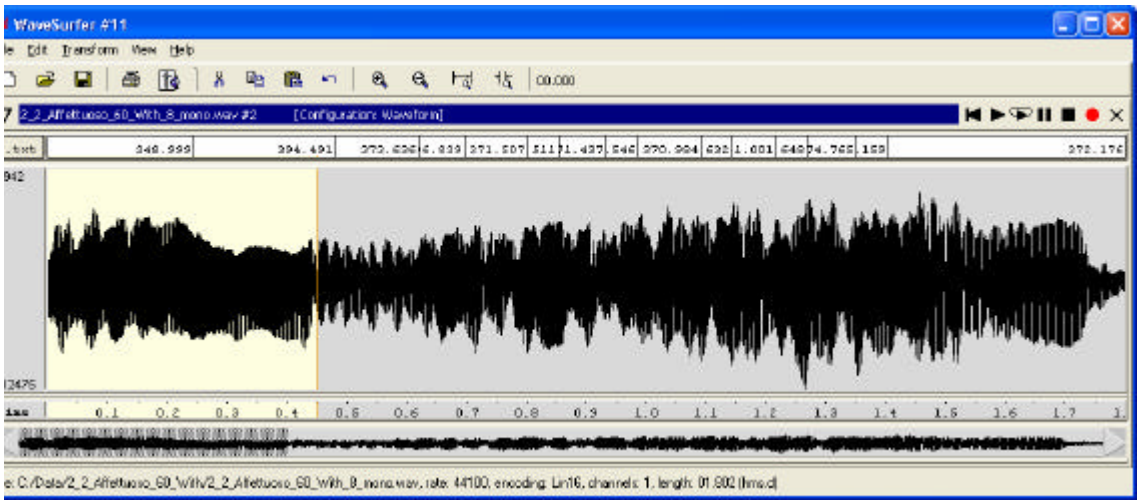
2_2_Affettuoso_60_With_7_mono.wav

Tots els onsets estan ben detectats. Les freqüències estan força ben detectades en relació entre si. Els Si3 estan entre 247 i 253 Hz i els Do#4 entre 281 i 283 Hz.



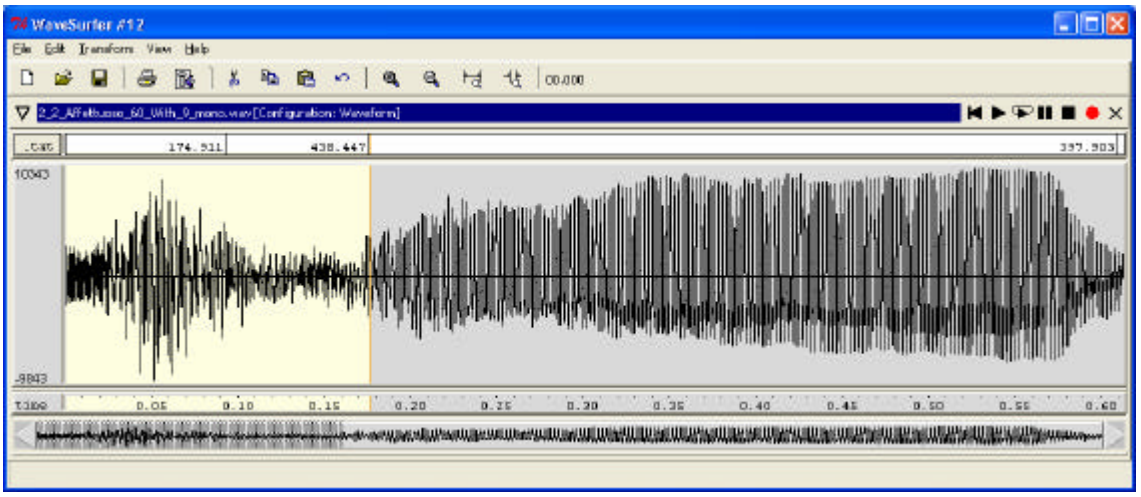
2_2_Affettuoso_60_With_8_mono.wav

Totes les notes estan ben detectades però els dos primers onsets haurien de ser el mateix i el offset hauria d'acabar abans (tal i com està senyalat amb groc). Les freqüències estan ben relacionades i força ben detectades: els Fa#4 van des de 371 a 374 Hz i els Sol4 de 394 a 397 Hz.



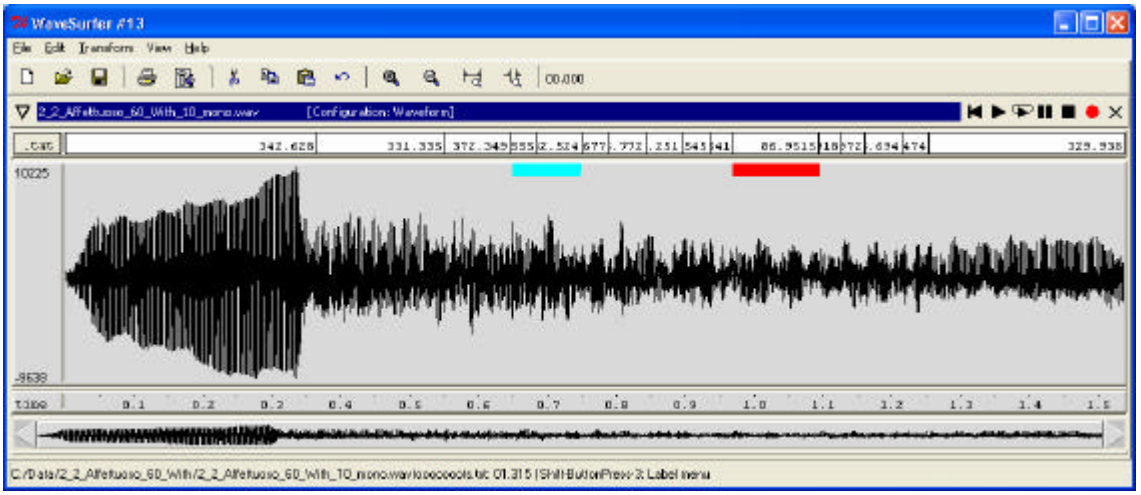
2_2_Affettuoso_60_With_9_mono.wav

El sector marcat en groc hauria de ser el mateix onset. (Aquest es podria considerar més una apoiatutra que no pas un trino). Les freqüències estan relacionades i mantenen una distància considerablement bona. El La4 està a 438 Hz(si tenim en compte el segon onset detectat) i el Sol4 està a 397 Hz.



2_2_Affettuoso_60_With_10_mono.wav

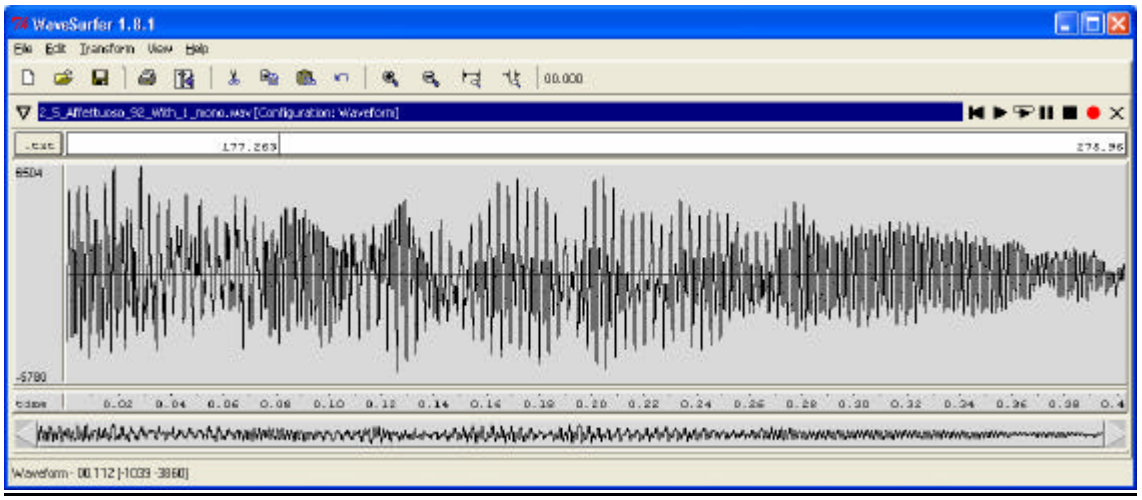
La majoria dels onsets estan ben detectats tot i que el fragment senyalat en blau, aquests dos onsets haurien de ser un de sol, i en el fragment senyalat en vermell se n'haurien d'haver detectat dos. Les freqüències trobades són bastant correctes. Els dos últims onsets haurien d'estar units i n'hi ha un parell que ha agafat massa soroll de les claus del fagot i la freqüència ha sortit molt desproporcionada.



11.1.2 Tempo Affetuoso 92

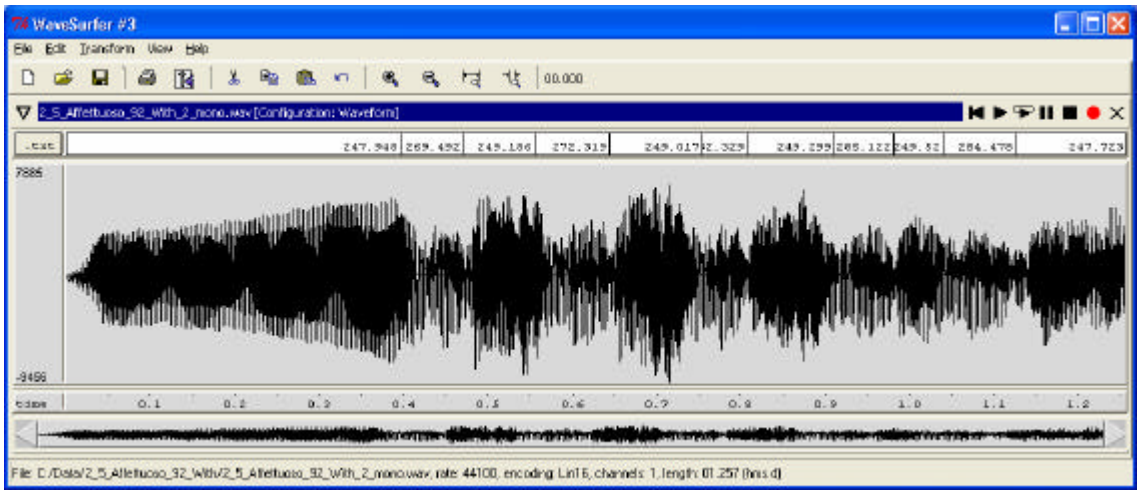
2_5_Affettuoso_92_With_1_mono.wav

Els onsets estan correctament detectats. La freqüència detectada del Re4 no és correcta però la del Do#4 és molt aproximada, només varia de dos Hz.



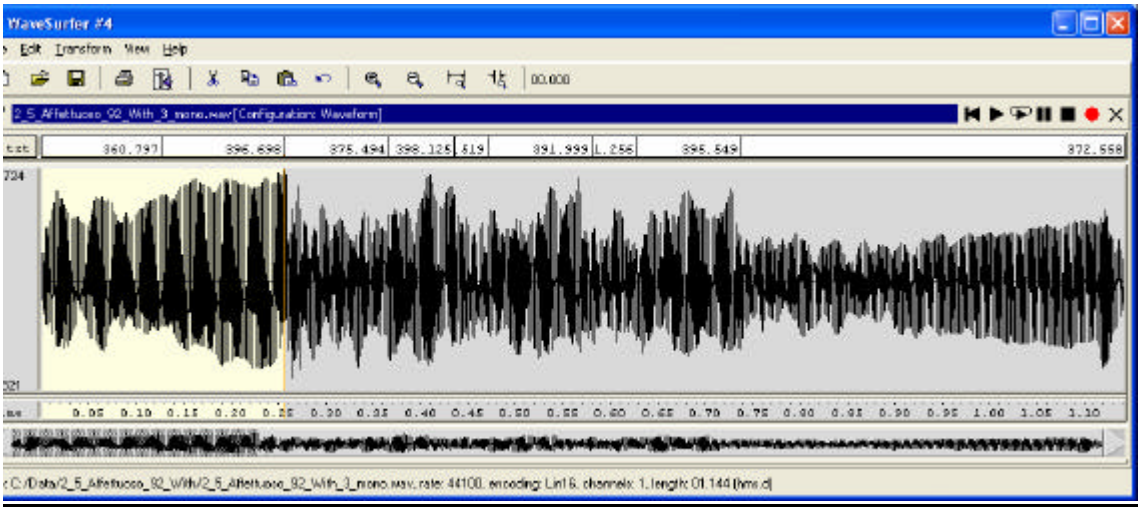
2_5_Affettuoso_92_With_2_mono.wav

Els onsets estan ben detectats i les freqüències són equivalents ja que el Si3 està entre 247 i 249 Hz i el Do#4 entre 272 i 284 Hz (tot i que no és ben bé un do).



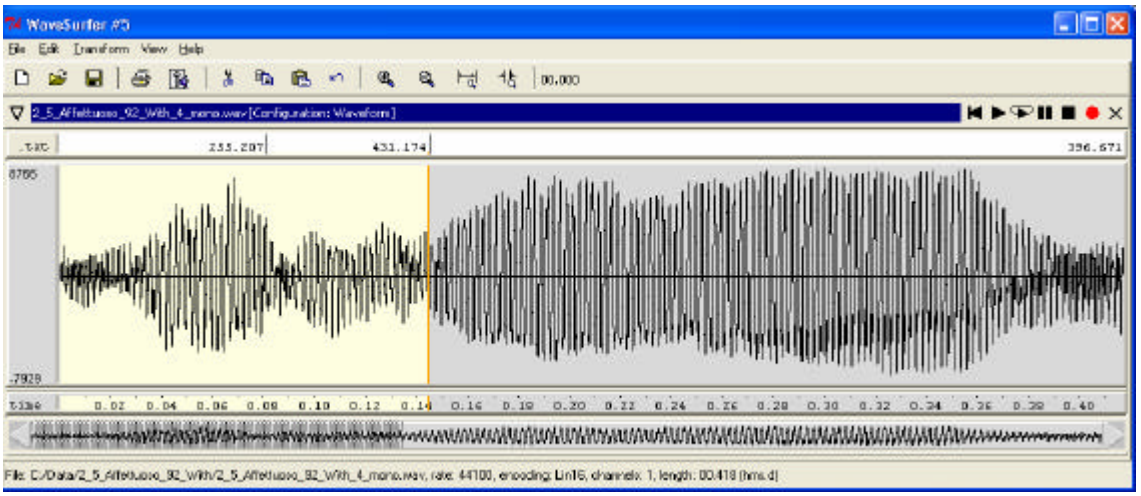
2_5_Affettuoso_92_With_3_mono.wav

Simplement s'ha de corregir els dos primers onsets perquè hauria de ser un de sol, la resta estan ben detectats i les freqüències estan força aproximades.



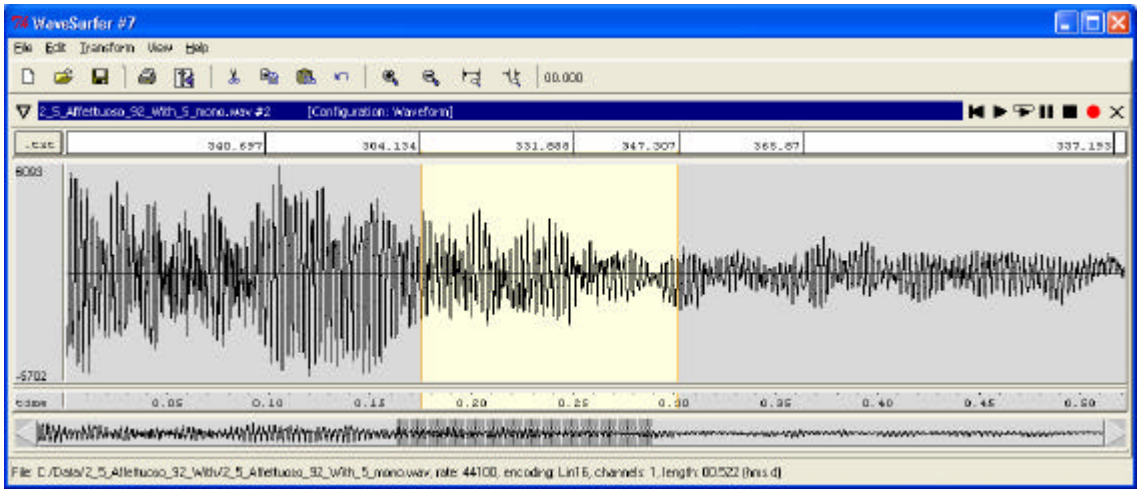
2_5_Affettuoso_92_With_4_mono.wav

El fragment assenyalat hauria de ser un sol onset, però el segon offset és correcta. La freqüència del La4 s'ha de modificar però l'altre és correcte.



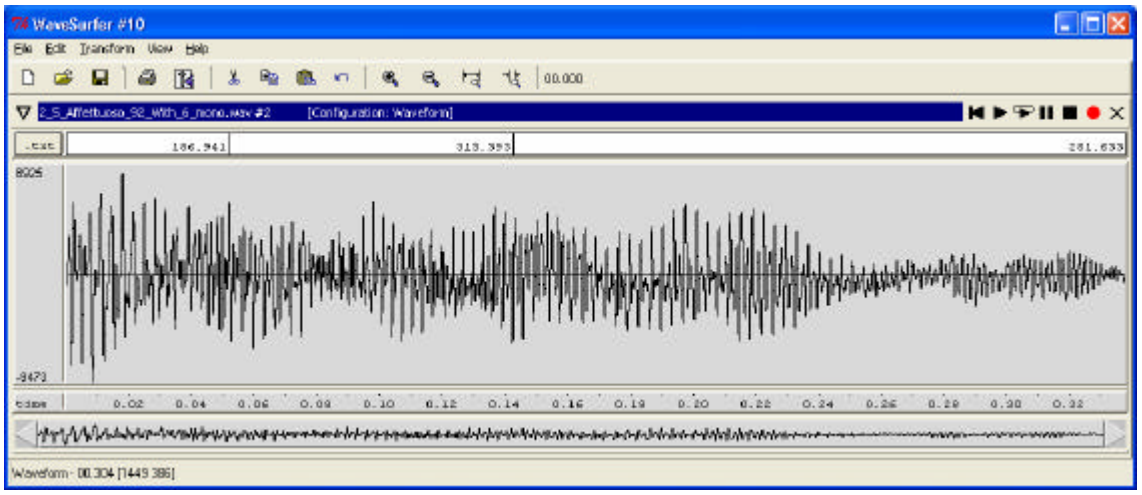
2_5_Affettuoso_92_With_5_mono.wav

El fragment senyalat amb groc hauria de ser un sol onset i el primer hauria d'haver-hi dos. Les freqüències no estan ben detectades, les dues inicials és com si estiguessin detectades al revés.



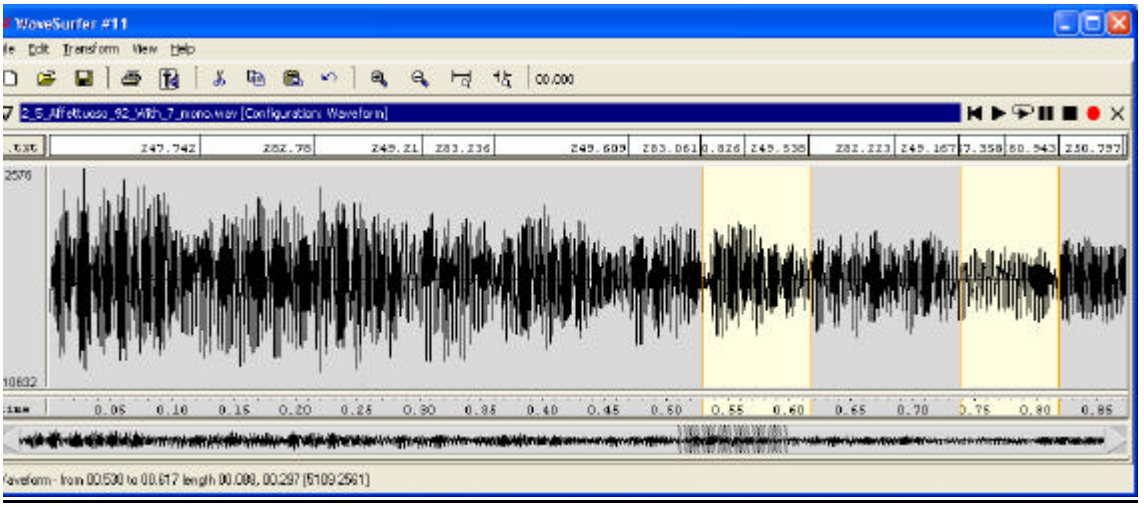
2_5_Affettuoso_92_With_6_mono.wav

Les notes estan detectades correctament però les freqüències no corresponen excepte la última, que és força aproximada.



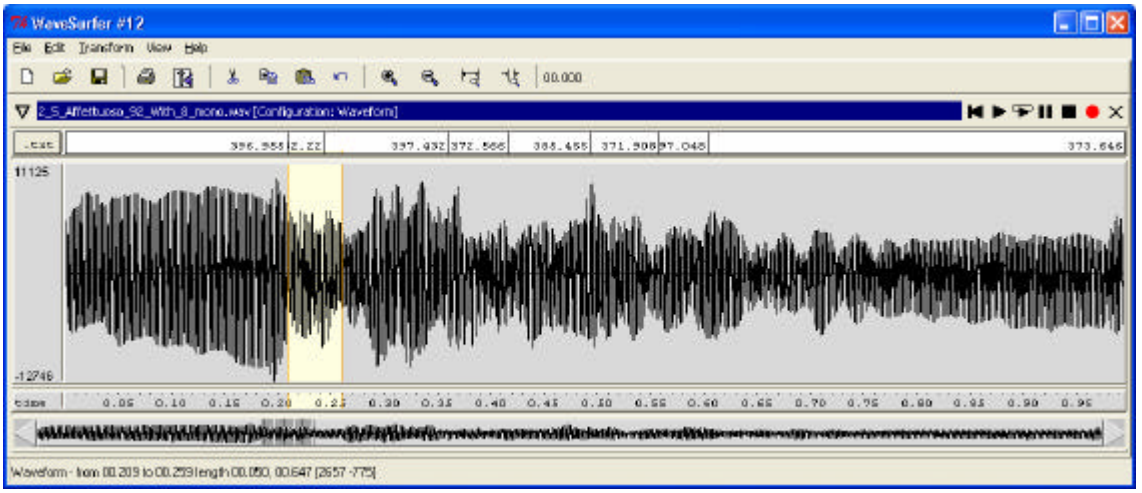
2_5_Affettuoso_92_With_7_mono.wav

Els onsets estan ben detectats però els que estan assenyalats en groc haurien d'anar junts. Les freqüències s'aproximen molt a les reals.



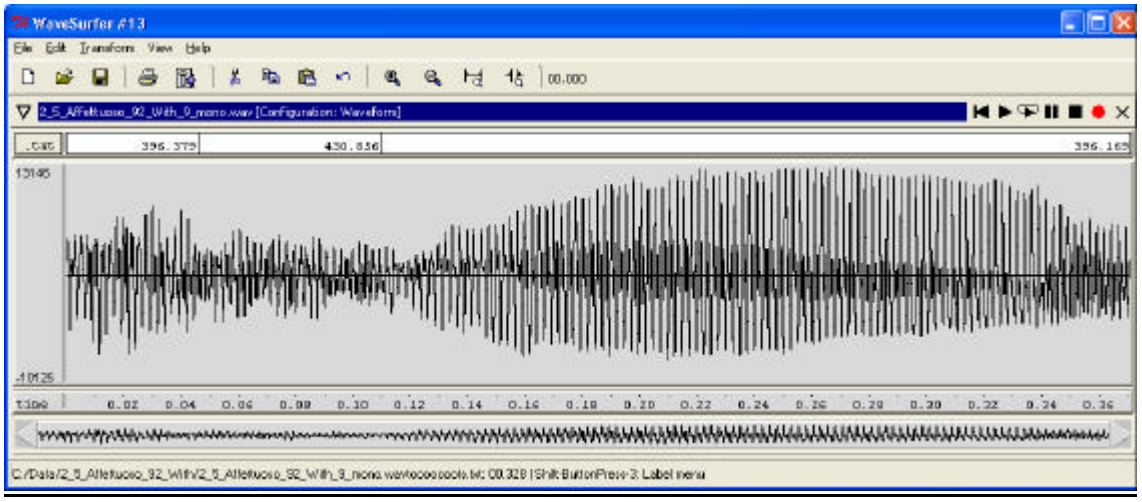
2_5_Affettuoso_92_With_8_mono.wav

Tots els onsets estan ben detectats però el onset del fragment en groc hauria de tenir el offset detectat 0.02 dècimes més tard (hauria d'acabar en el mateix punt on acaba la secció senyalitzada). Les freqüències s'aproximen força al Sol4 (392 Hz) i Fa#4 (370 Hz) desitjats, ja que es troben entre un 396 i 373 Hz respectivament.



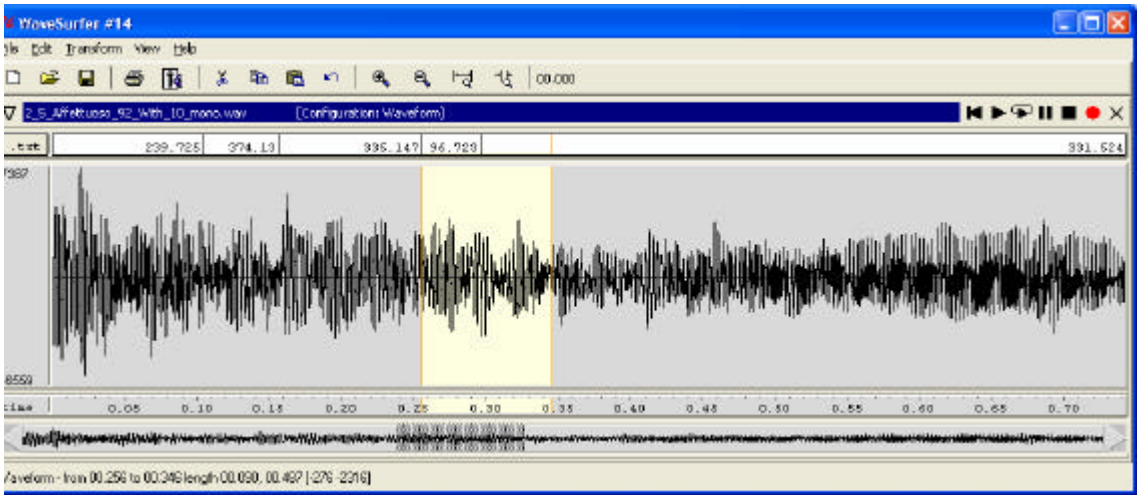
2_5_Affettuoso_92_With_9_mono.wav

Les notes estan ben detectades. Les freqüències són molt aproximades.



2_5_Affettuoso_92_With_10_mono.wav

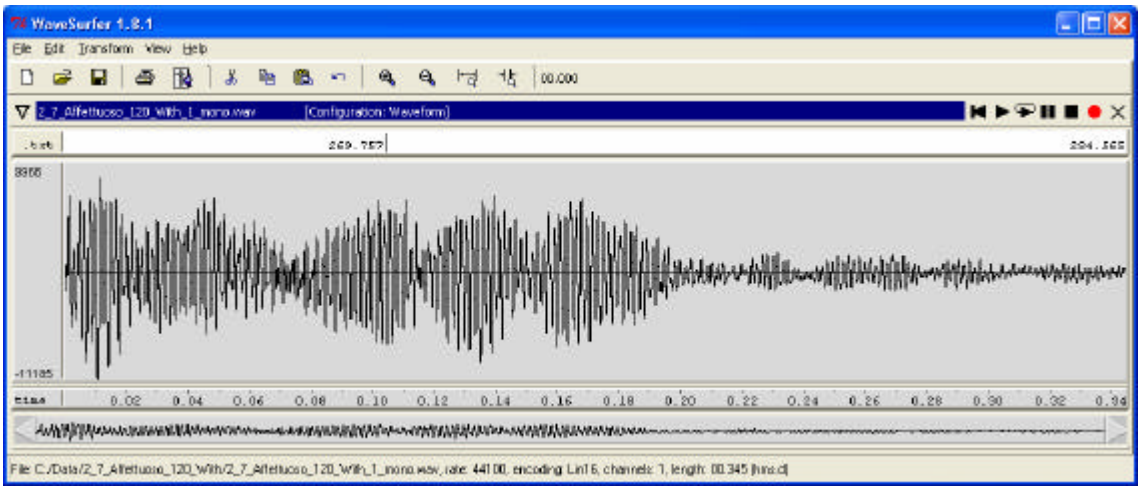
El fragment assenyalat en groc indica on comença i acaba el onset detectat, per tant aquest hauria de ser més llarg però la resta són correctes. A més a més, la nota detectada d'aquest onset, es veu que és clarament incorrecte perquè no està dins de la mateixa escala, si no que és molt inferior, però les altres són molt aproximades.



11.1.3 Tempo Affetuoso 120

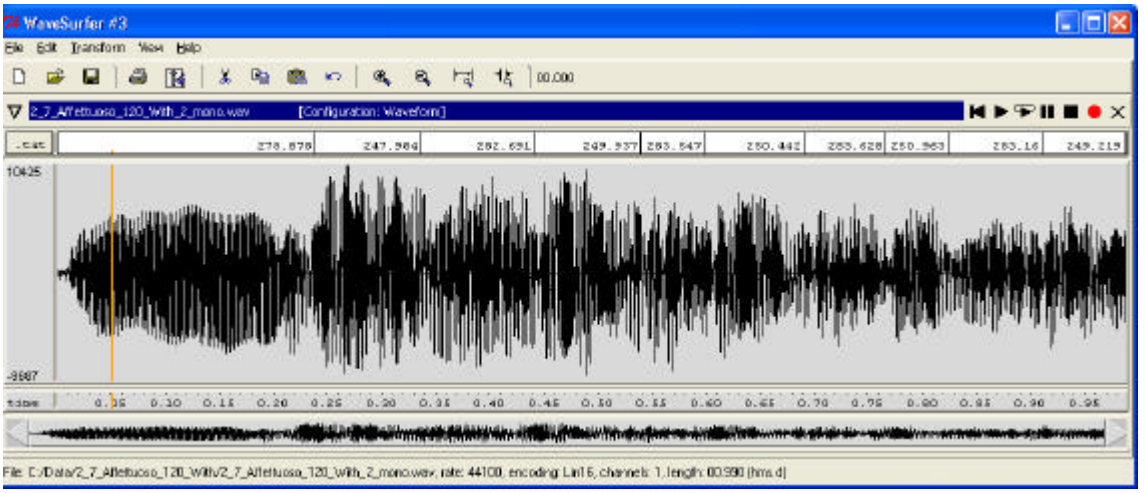
2_7_Affettuoso_120_With_1_mono.wav

Els onsets estan ben detectats. Les freqüències detectades s'aproximen força tot i que no són gaire exactes. El Re4 està a 269.757 Hz i el Do#4 a 284.565 Hz, quan haurien d'estar a 294 i 277 Hz respectivament.



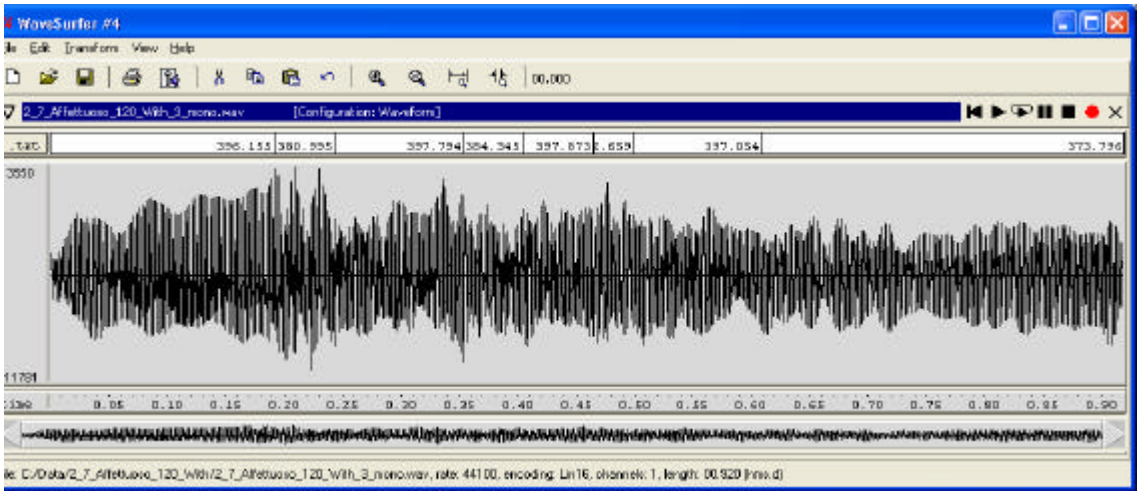
2_7_Affettuoso_120_With_2_mono.wav

Els onsets estan ben detectats. Les freqüències són força aproximades: Els Do#4 es troben entre 278 i 283 Hz mentre que els Si3 estan entre 247 i 250 Hz.



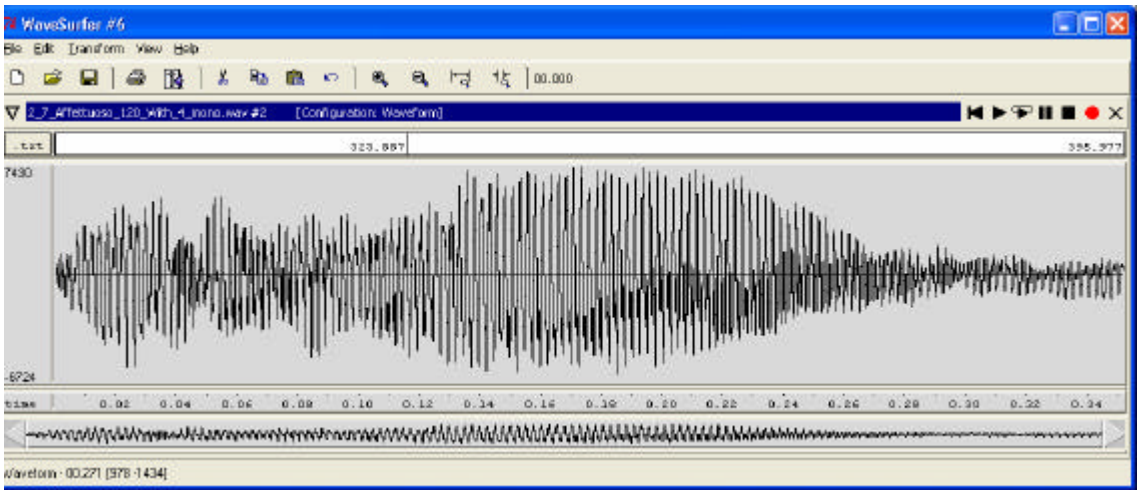
2_7_Affettuoso_120_With_3_mono.wav

Els onsets són correctes. Les freqüències trobades estan una mica allunyades de les reals. Els Sol4 estan detectats entre 296 i 297 Hz mentre que els Fa#4 entre 372 i 380 Hz. Com es pot veure hi ha una diferència notable, no tan sols amb les freqüències originals si no també entre les freqüències detectades del Fa#4.



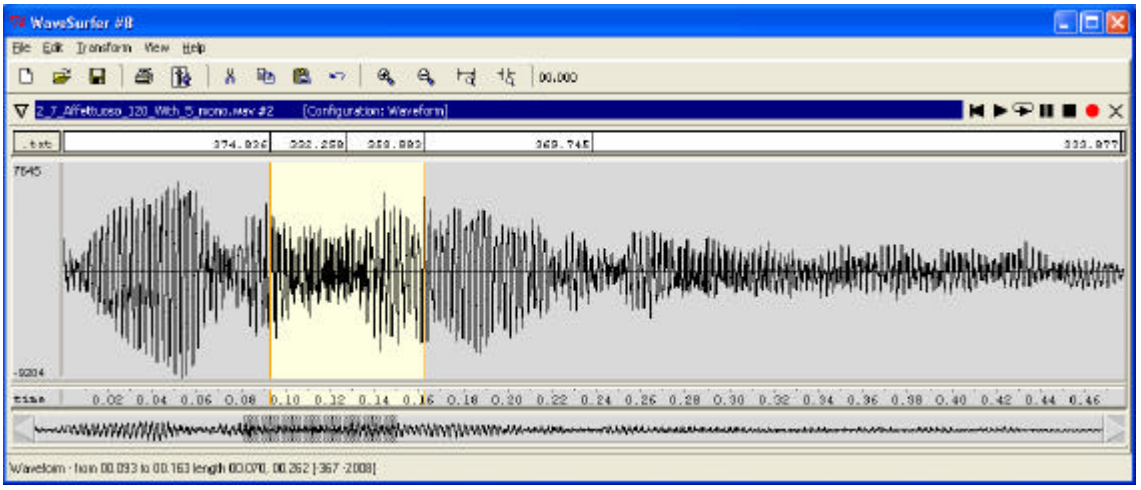
2_7_Affettuoso_120_With_4_mono.wav

Els onsets estan ben detectats. En aquest cas el trino torna a assemblar-se a una apoiatura ja que la figura de la nota es tracta d'una corxera (la qual dificulta l'execució d'un trino). La primera freqüència està mal detectada ja que la nota hauria de ser un La4 (440 Hz) i en canvi troba una freqüència de 323 Hz. En el cas del Sol4 que hauria de tenir una freqüència de 392 Hz s'aproxima força perquè troba una freqüència de 395.977 Hz.



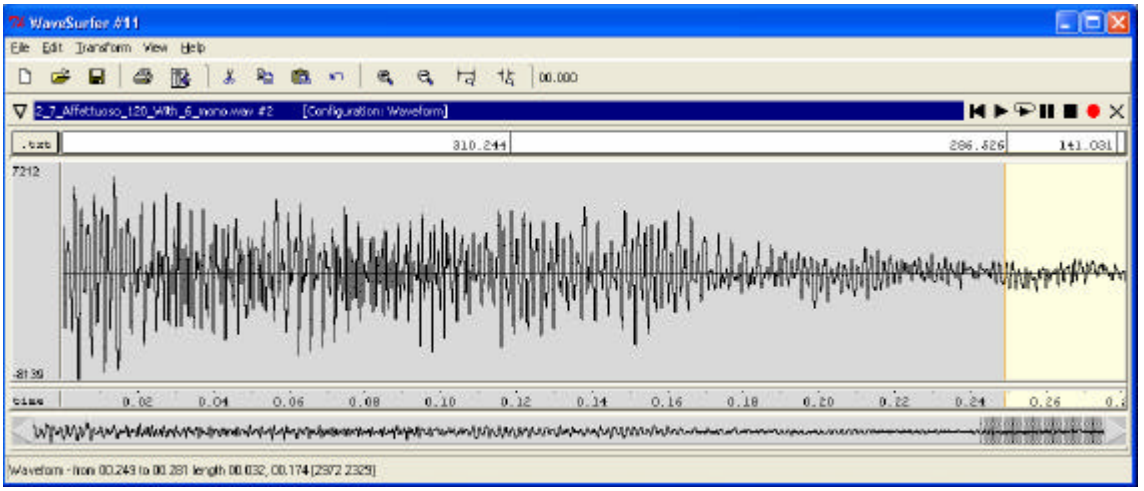
2_7_Affettuoso_120_With_5_mono.wav

El fragment assenyalat hauria de ser un sol onset en comptes dels dos detectats. Sobre la freqüència d'aquest fragment, la del primer onset està força ben detectada, per tant és amb la que ens quedarem. La resta de les freqüències també estan molt aproximades. Els Fa#4 es troben detectats entre 374 i 369 Hz mentre que els Mi4 sobre el 332 i el 333 Hz.



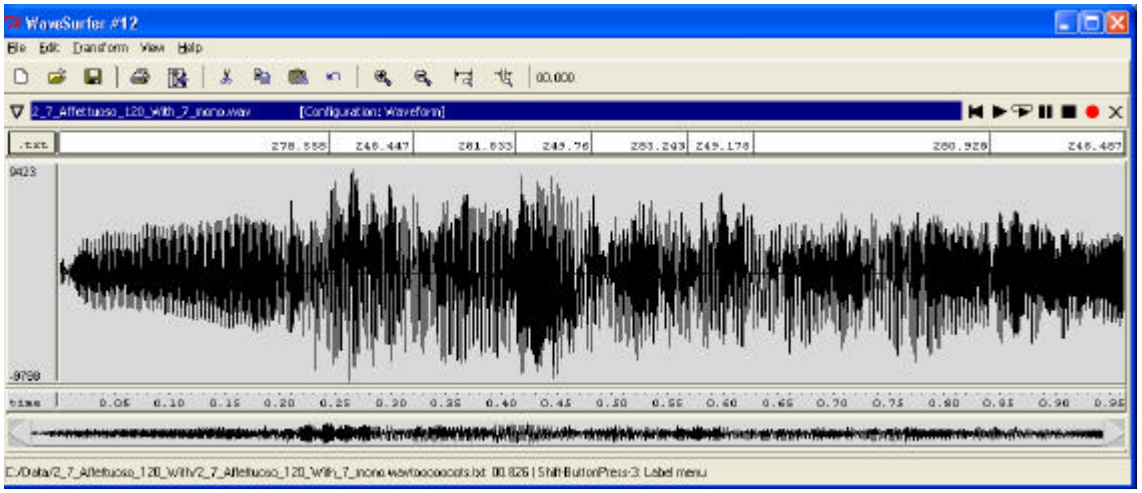
2_7_Affettuoso_120_With_6_mono.wav

En aquest cas hi ha un onset que no hauria de estar detectat (el marcat en groc), però el problema ve en la selecció del trino, que no està ben retallat ja que si s'escolta l'àudio, aquest últim fragment, es pot considerar soroll (que nosaltres no detectem amb facilitat) més que so. Això ens ho podria posar en dubte la freqüència que mostra ja que per ser soroll és força elevada, tot i que això és degut a la rectificació d'escala que fa el programa si troba un valor inferior (com seria aquest cas) o superior a la freqüència mediana. Les freqüències trobades no són gaire correctes, són més agudes de les que haurien de ser. Es troben a 310 i 286 Hz quan haurien d'estar a 294 i 277 Hz respectivament.



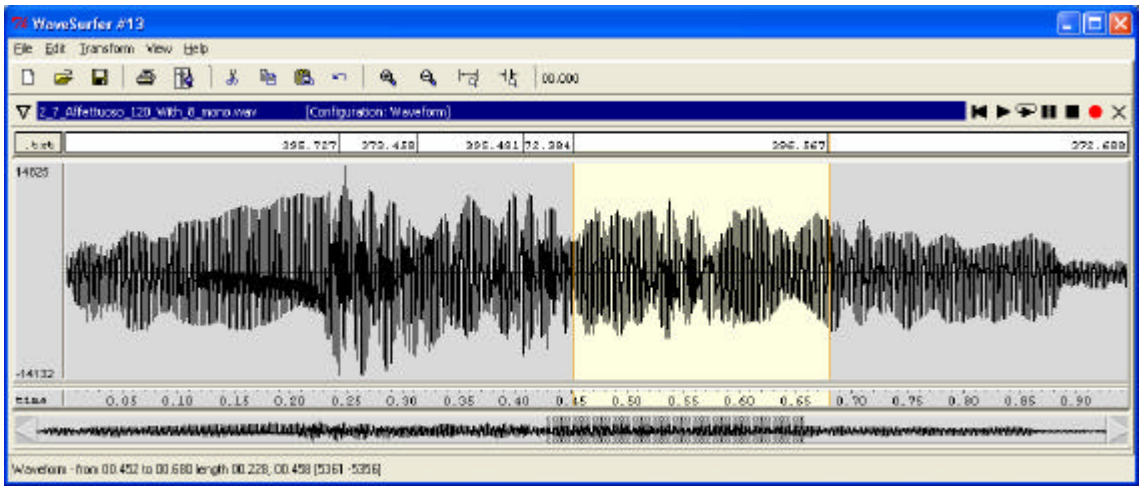
2_7_Affettuoso_120_With_7_mono.wav

Els onsets estan ben detectats. Les freqüències estan força ben detectades ja que els Do#4 es troben entre 278 i 283 Hz i els Si3 entre 248 i 249 Hz.



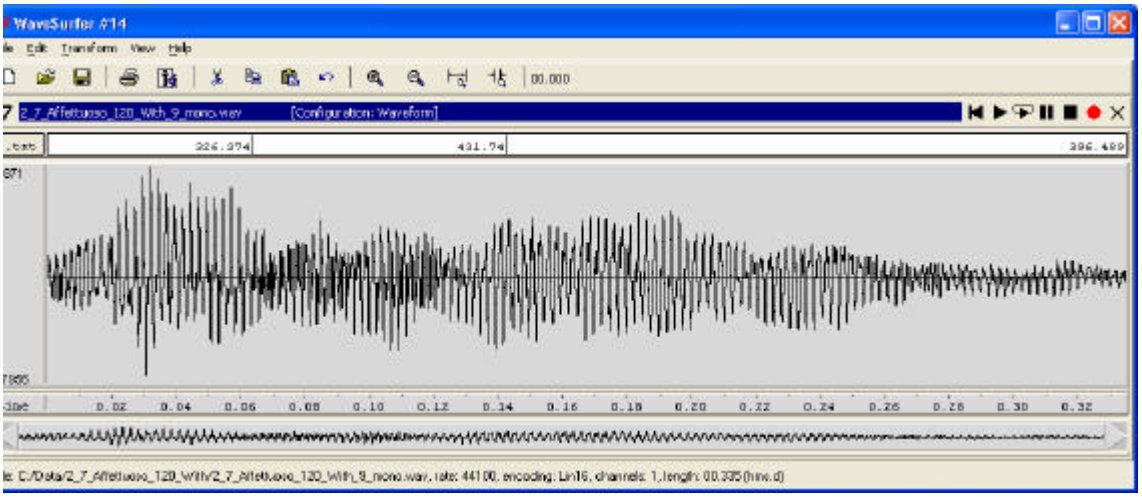
2_7_Affettuoso_120_With_8_mono.wav

En el fragment assenyalat en groc s'haurien d'haver detectat 3 onsets en comptes d'un sol. Les freqüències són molt semblants a les notes buscades. Els Sol4 es troba entre 395 i 396 Hz (quan hauria de ser 392) i el Fa#4 està sobre els 373 Hz (tres Hz per sobre del que hauria d'estar).



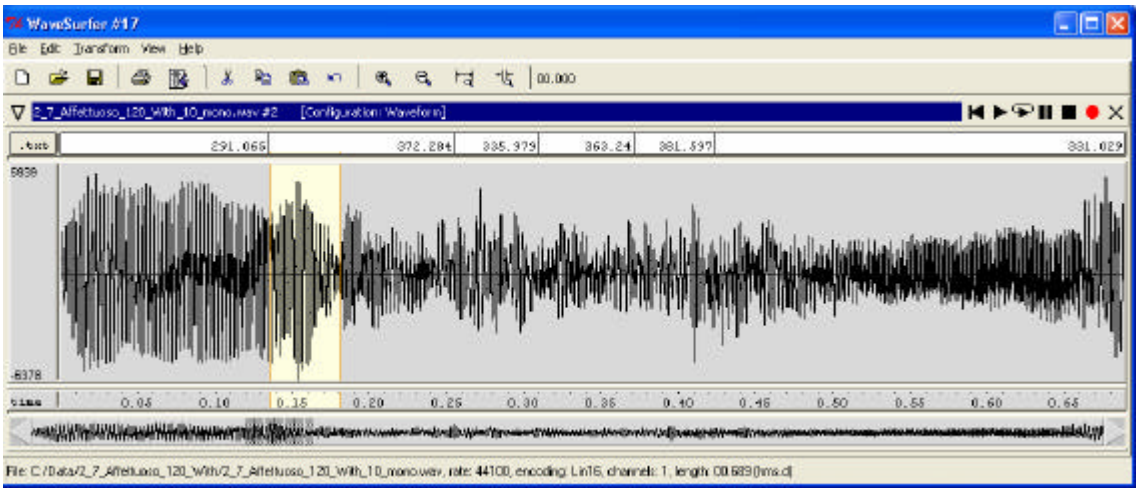
2_7_Affettuoso_120_With_9_mono.wav

Els onsets estan ben detectats. Les freqüències no estan molt ben aconseguides ja que s'allunyen del Sol4 a 392 Hz i del La4 a 440 Hz (s'han trobat a 326 i 396 pel Sol4, la última és més aproximada, i 431 pel La4).



2_7_Affettuoso_120_With_10_mono.wav

El fragment groc indica la part que li falta al primer onset ja que està incomplet (és més llarg del que s'ha detectat). La resta dels onsets són correctes. Les freqüències no estan ben trobades. Per exemple la inicial és de 291 Hz quan hauria de ser de 370. Les úniques que s'hi assemblen (tot i que la primera està força allunyada) són les dues últimes a 381 i 331 Hz, aproximant-se als 370 i 330 Hz que haurien de donar.



11.2 Allegro Moderato

Les figures que tenen trinos aquest moviment són les negres:

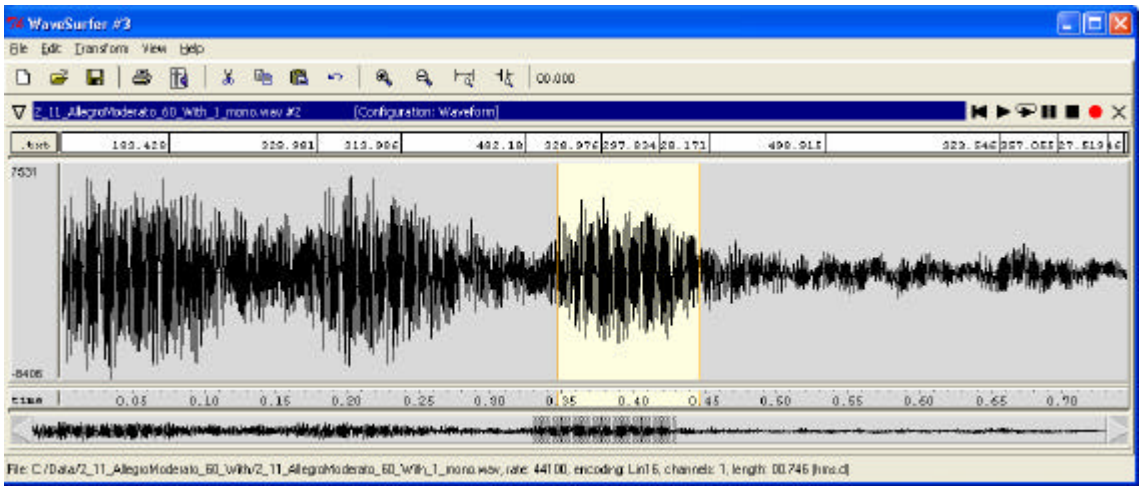
Negres: Els trinos 1, 2, 3, 4.

Trino 1, 3:	Re4 (294 Hz) – Mi4 (330 Hz)
Trino 2, 4:	Fa#4(370 Hz) – Sol4 (392 HZ)

11.2.1 Tempo Allegro Moderato 60

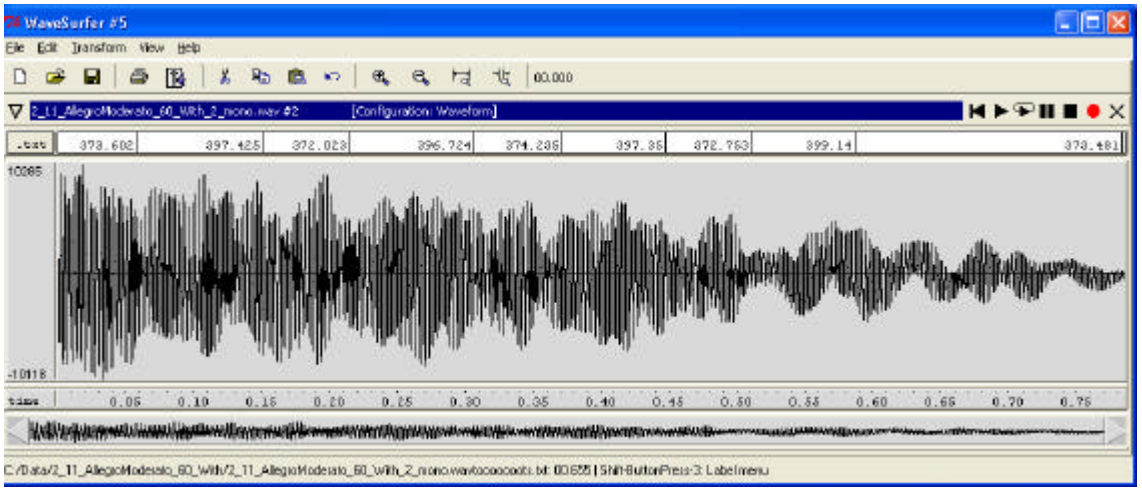
2_11_AllegroModerato_60_With_1_mono.wav

Aquest àudio s'ha de recotar molt ja que els onsets no acaben d'estar ben detectats i les freqüències són molt diverses.



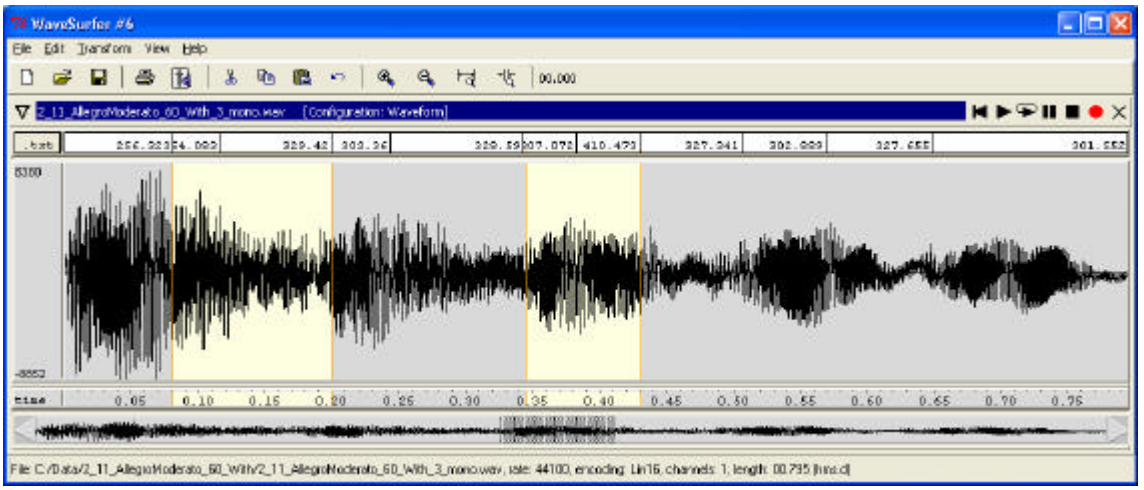
2_11_AllegroModerato_60_With_2_mono.wav

Tots els trinos estan ben detectats i les freqüències són molt aproximades.



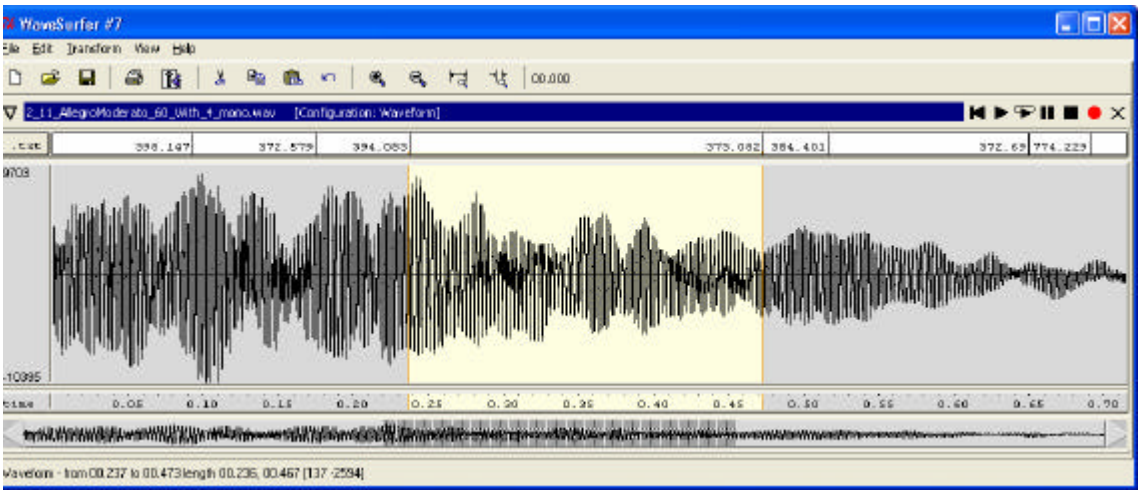
2_11_AllegroModerato_60_With_3_mono.wav

Tots els onsets són correctes excepte els assenyalats amb groc que haurien de tenir un de sol i no dos. Modificant els onsets sobrants les freqüències són una mica aproximades ja que en alguns casos arriben a variar uns 12 Hz pel que fa al Re4, però en canvi al detectar el Mi4 només hi ha una variació de 3 Hz com a molt i aquest es pot considerar un resultat bo..



2_11_AllegroModerato_60_With_4_mono.wav

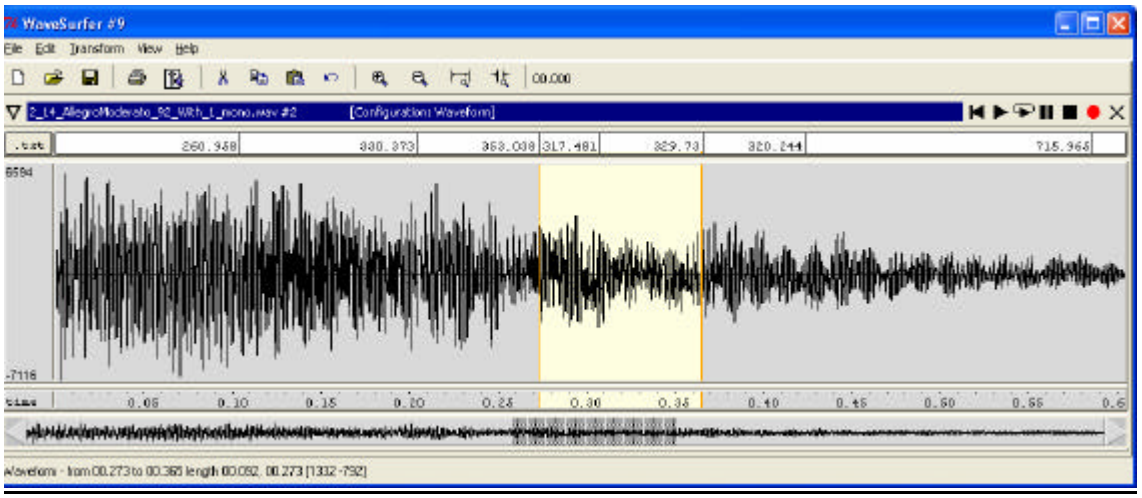
En el fragment assenyalat s'haurien d'haver detectat tres onsets i a més l'últim onset (degut a una mala selecció del trino ja que s'ha agafat soroll al final) hauria de ser eliminat. Les freqüències són força aproximades tot i que la penúltima és la que més s'allunya ja que hauria de tenir un valor de 392 Hz i el té a 384 Hz.



11.2.2 Tempo Allegro Moderato 92

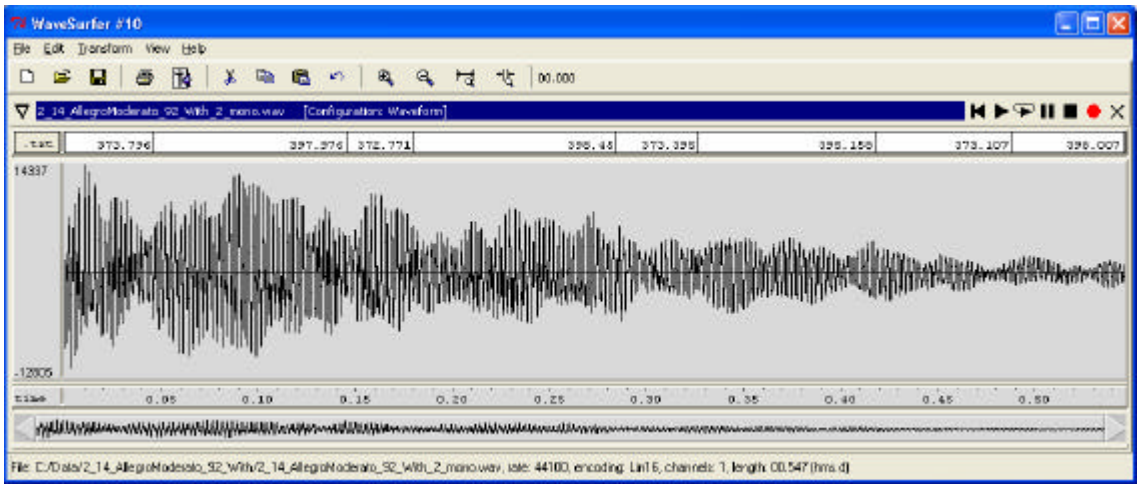
2_14_AllegroModerato_92_With_1_mono.wav

L'únic que s'hauria de retocar respecte els onsets són els que estan assenyalats amb groc, ja que haurien de formar-ne un de sol. A més a més l'últim onset detectat és incorrecte perquè no hi hauria de ser. Les freqüències no estan gaire ben detectades i s'ha de modificar.



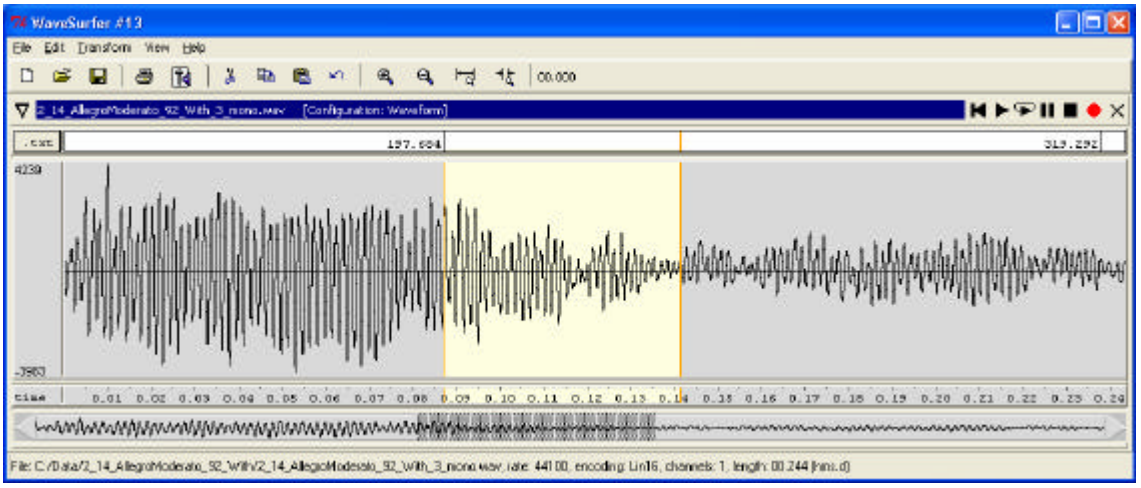
2_14_AllegroModerato_92_With_2_mono.wav

Els onsets estan ben detectats. Les freqüències són força correctes: els Fa#4 estan entre els 372 i 373 Hz mentre que els Sol4 estan entre els 395 i 398 Hz.



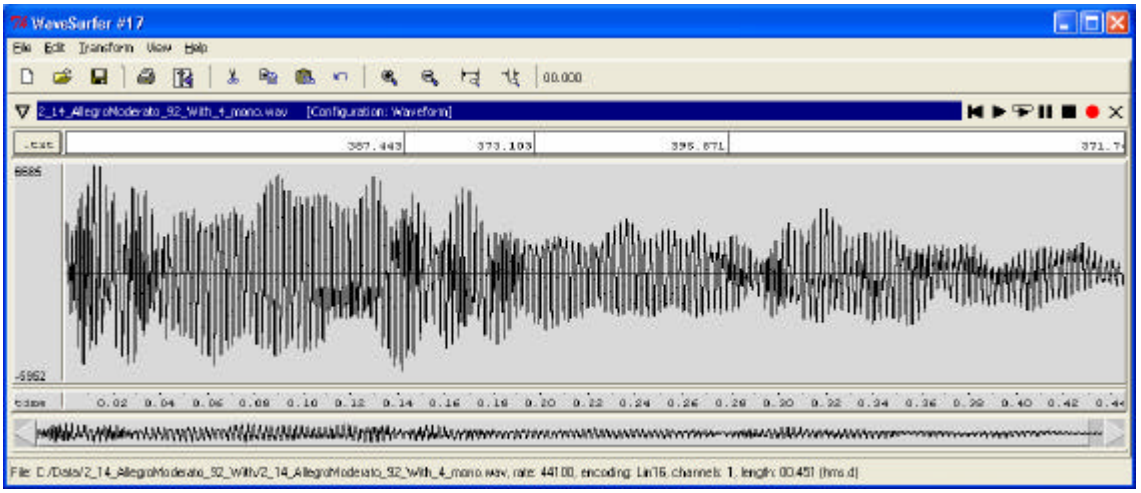
2_14_AllegroModerato_92_With_3_mono.wav

El fragment groc indica que s'hauria d'haver detectat un altre onset. Les freqüències no estan ben detectades i s'han de modificar.



2_14_AllegroModerato_92_With_4_mono.wav

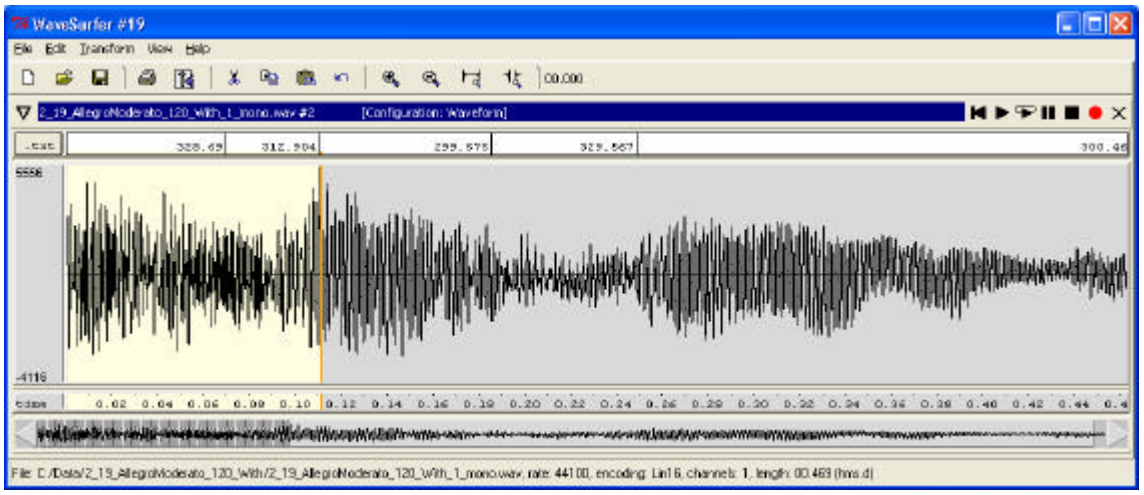
Els onsets estan detectats correctament. Les freqüències detectades són força aproximades: els Sol4 estan entre 387 i 395 Hz (i han d'estar a 392) i els Fa#4 estan entre 371 i 373 Hz (quan els Hz reals són 370).



11.2.3 Tempo Allegro Moderato 120

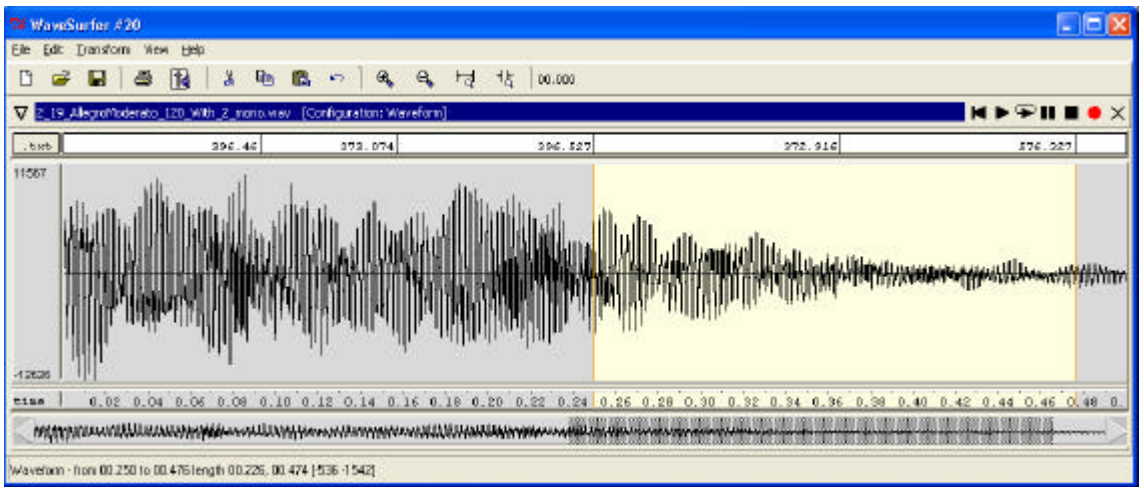
2_19_AllegroModerato_120_With_1_mono.wav

L'únic error en la detecció d'onsets és que el primer hauria de ser el fragment groguenc. La resta estan correctament detectats. A més a més les freqüències són aproximades, la diferència més gran trobada és en el Re4 en 6 Hz.



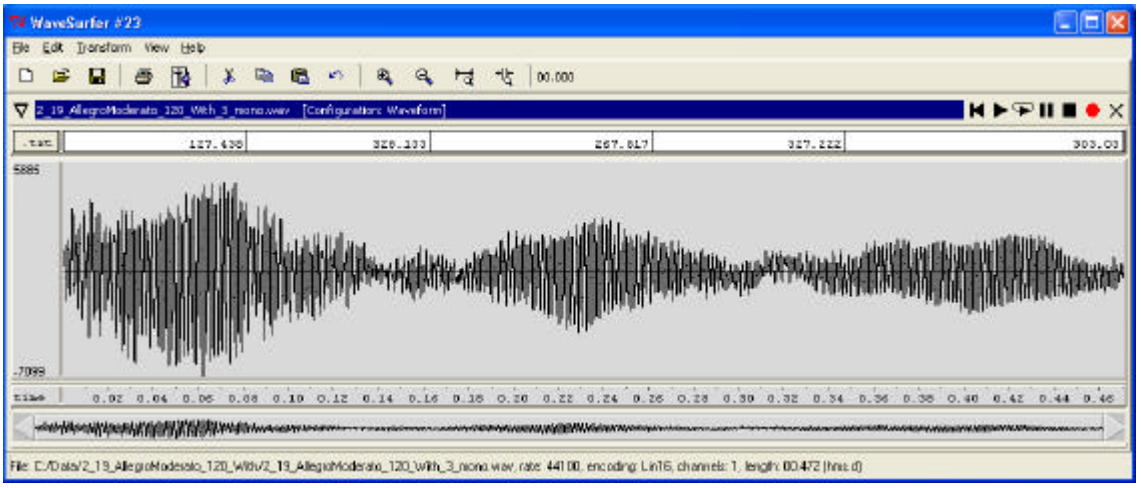
2_19_AllegroModerato_120_With_2_mono.wav

L'onset final sobra, però ha estat detectat degut a l'energia ja que hi ha una expulsió d'aire desmesurada i es sent més aquest que no pas un so. Les freqüències són força aproximades ja que la diferència més gran entre la freqüència detectada i la original és de 4 Hz en el Sol4.



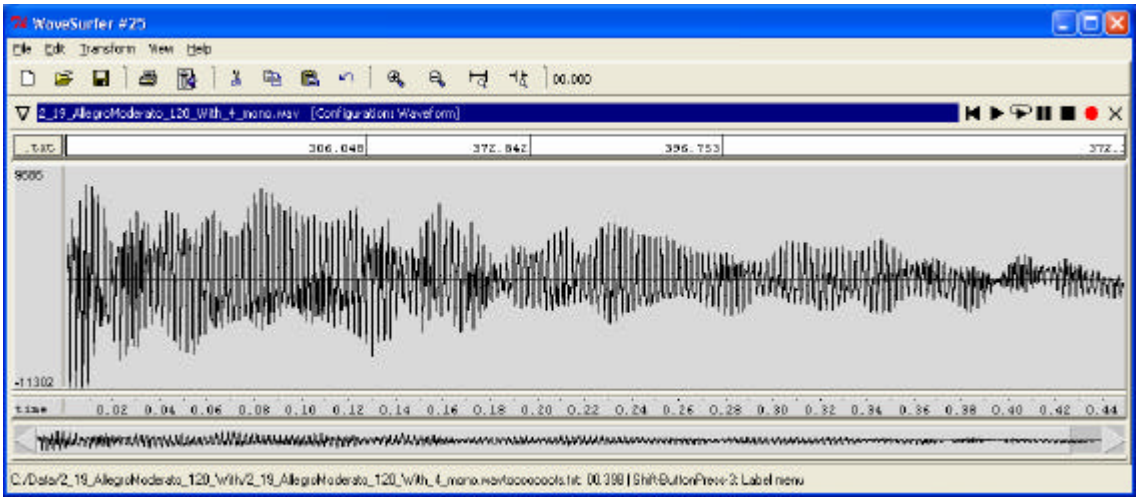
2_19_AllegroModerato_120_With_3_mono.wav

Tots els onsets estan ben detectats tot i que pel que fa a les freqüències la prima està molt equivocada i les altres més o menys són correctes tot i que en una d'elles hi ha una diferència de 9 Hz amb la nota real.



2_19_AllegroModerato_120_With_4_mono.wav

Tots els onsets estan correctament detectats. Excepte la primera nota que està detectada a 306 Hz quan hauria de ser 392 Hz (per tant ha de ser modificada) la resta estan molt aproximades.



11.3 Adagio

Les figures sobre les que es troben els trinos en aquest moviment són:

Blanques: Els trinos 1, 2, 6, 7, 8, 9.

Trino 1: Do4 (262 Hz) – Re4 (294 Hz)

Trino 2: Sib3 (233 Hz) – Do4 (262 Hz)

Trino 6: Si3 (247 Hz) – Do4 (262 Hz)

Trino 7: Re4(294 Hz) – Mib4 (311 Hz) – Do4 (262 Hz)

Trino 8: Sol4 (392 Hz) – Lab4 (415 Hz) – Fa4 (349 Hz)

Trino 9: Do4 (262 Hz) – Re4 (294 Hz) – Sib3 (233 Hz)

Blanca amb punt: Els trinos 4, 5.

Trino 4: Lab3 (208 Hz) – Sib3 (233 Hz)

Trino 5: Re4 (294 Hz) – Mib4 (311 Hz)

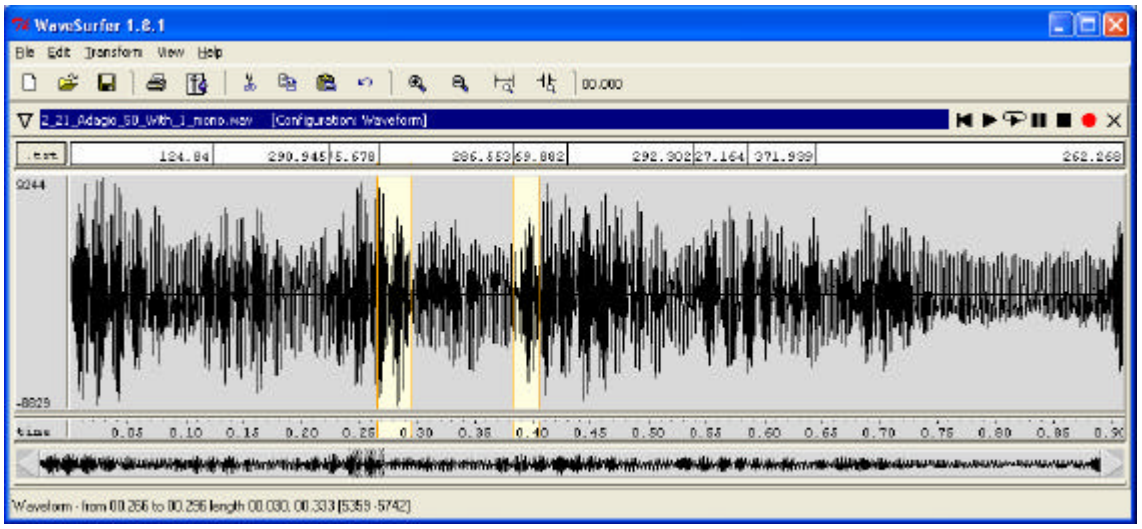
Rodones: El trino 3.

Trino 3: Mi4 (330 Hz) – Fa (349 Hz)

11.3.1 Tempo Adagio 50

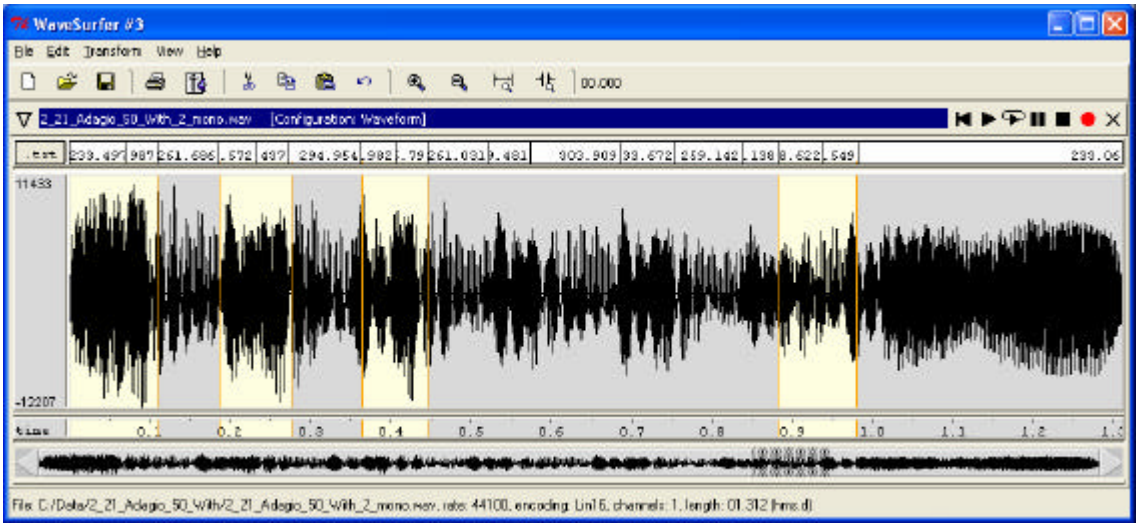
2_21_Adagio_50_With_1_mono.wav

L'únic que es podria corregir en la detecció dels onsets es que els fragments grocs haurien de pertànyer al onset anterior i la resta són correctes. Les freqüències són força aproximades però s'han de corregir algunes.



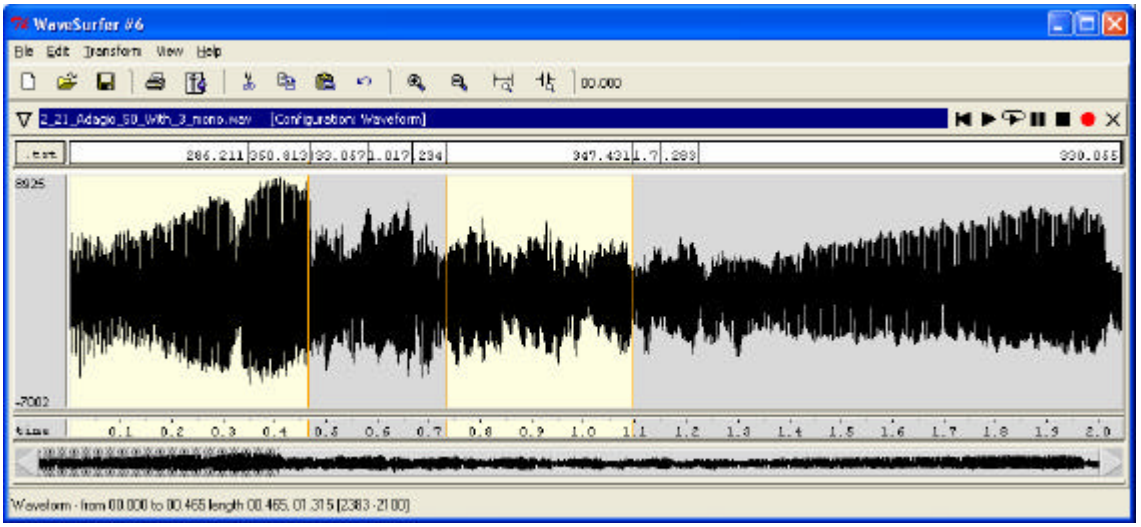
2_21_Adagio_50_With_2_mono.wav

En aquest audio hi han bastants onsets separats (els marcats en groc) que haurien d'estar junts. Les freqüències estan força ben detectades tot i que s'ha de corregir alguna.



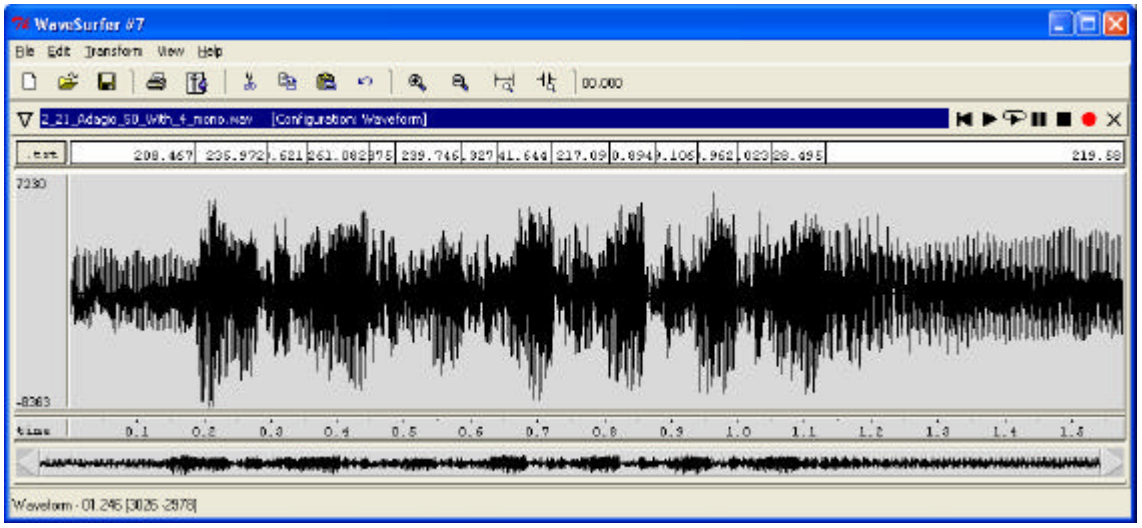
2_21_Adagio_50_With_3_mono.wav

El preimer fragment senyala s'hauria d'haver detectat un sol onset, però en canvi en el segon s'haurien d'haver detectat cinc. Les freqüències detectades estan molt aproximades a les originals, tot i que s'hi hauran d'afegir a les que fan referència als onsets no detectats.



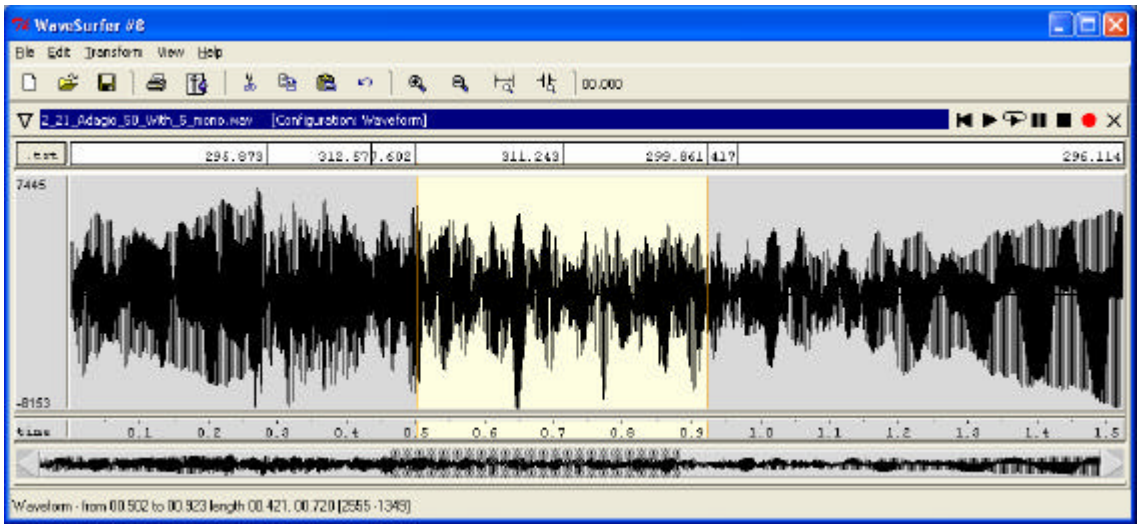
2_21_Adagio_50_With_4_mono.wav

Els onsets estan ben detectats. Les freqüències estan força aconseguides però hi ha un cas que s'ha detectat clarament malament. És el cas del Lab3 que s'ha detectat a 400 i hauria de haver estat a 208. També es corregiran d'altres perquè sigui més aproximat.



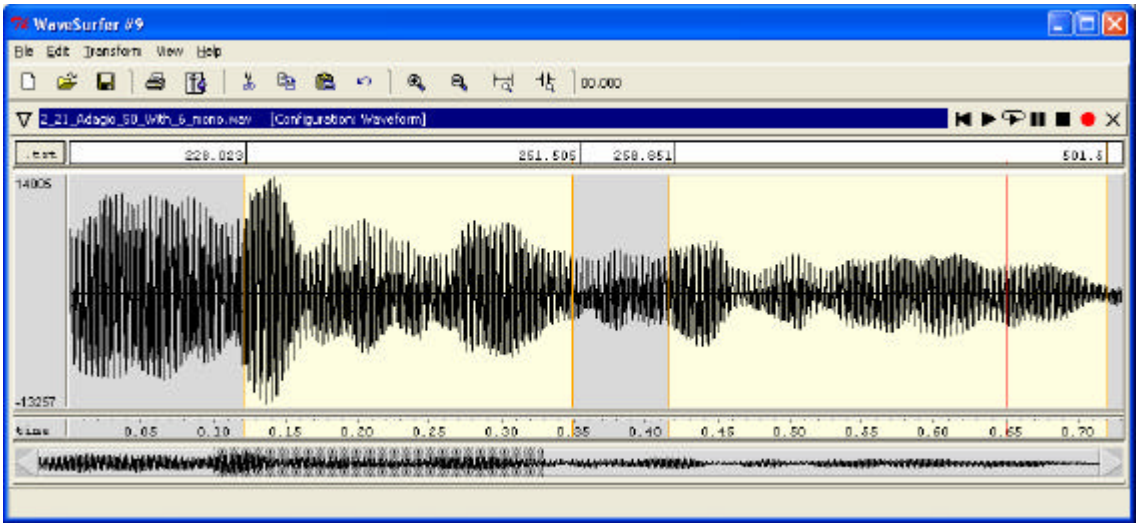
2_21_Adagio_50_With_5_mono.wav

Els dos onsets que es veuen senyalats és degut a que hi ha més notes dins ells, per tant hi haurien d'haver-hi més onsets. Les freqüencies detectades són força correctes però s'han d'introduir totes aquelles on no s'havia detectat cap onset.



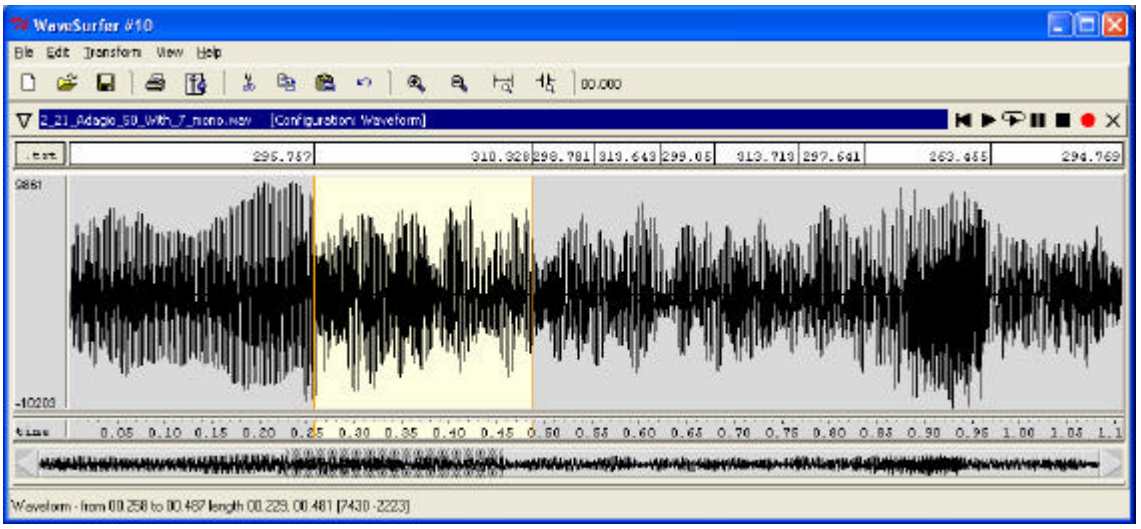
2_21_Adagio_50_With_6_mono.wav

En cadascun dels fragments assenyalats s'haurien d'haver detectat tres onsets. Per tant s'han de modificar algunes freqüències.



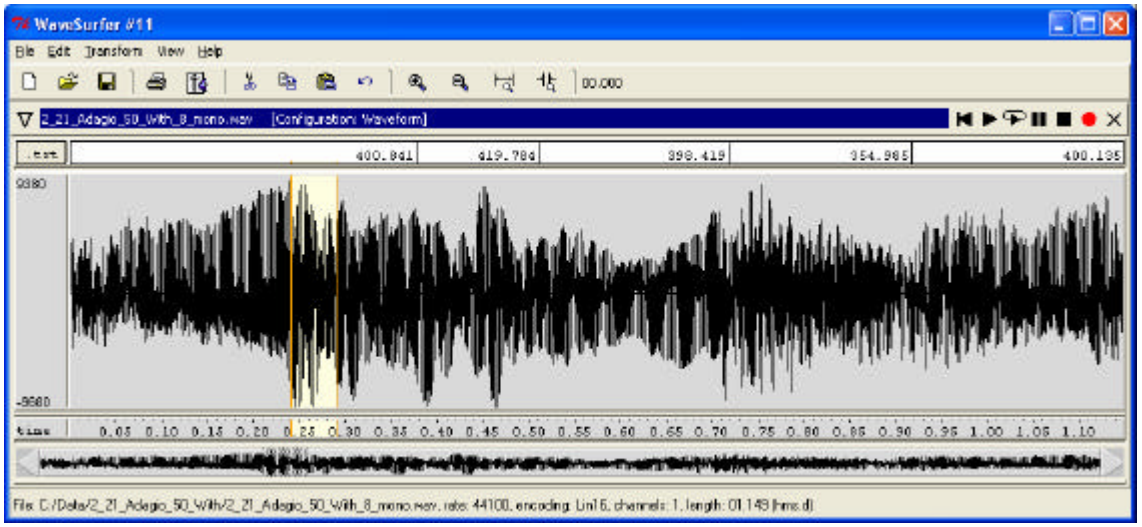
2_21_Adagio_50_With_7_mono.wav

El fragment assenyalat hi hauria d'haver trse onsets, però la resta són correctes. Les totes les freqüències detectades són molt aproximades.



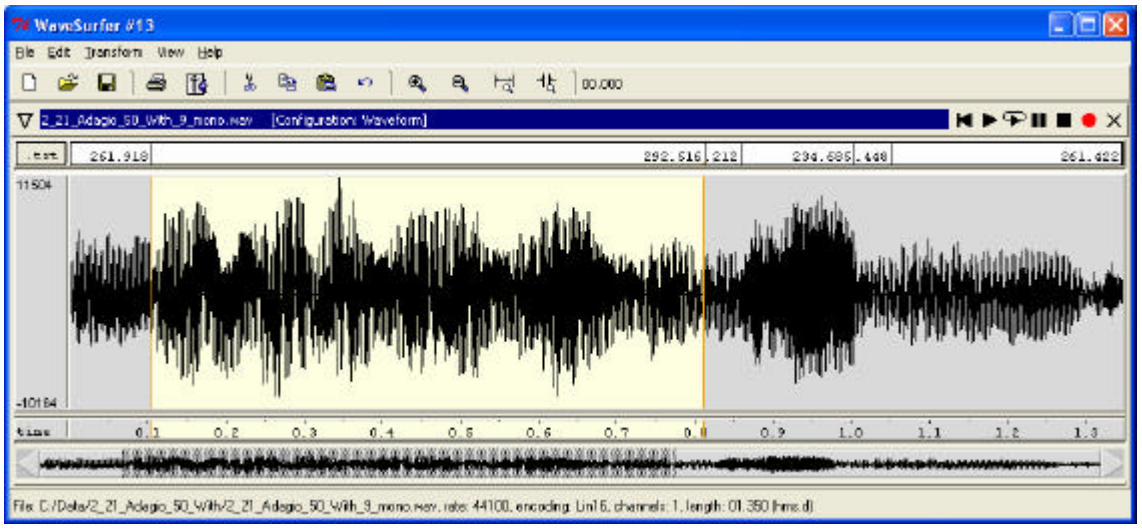
2_21_Adagio_50_With_8_mono.wav

El fragment assenyalat indica la manca d'un onset, tot i que la resta estan detectats correctament. Algunes freqüències s'han de modificar, però la majoria són correctes.



2_21_Adagio_50_With_9_mono.wav

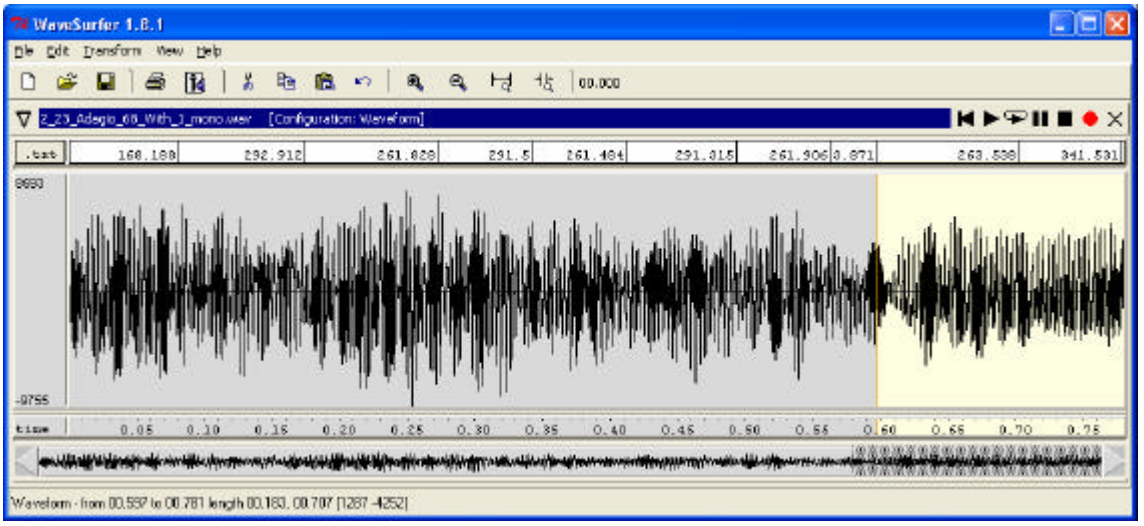
En el fragment marcat falten set onsets. Les freqüències s'han de modificar totes excepte la del Sib3 que és la única que era correcta.



11.3.2 Tempo Adagio 68

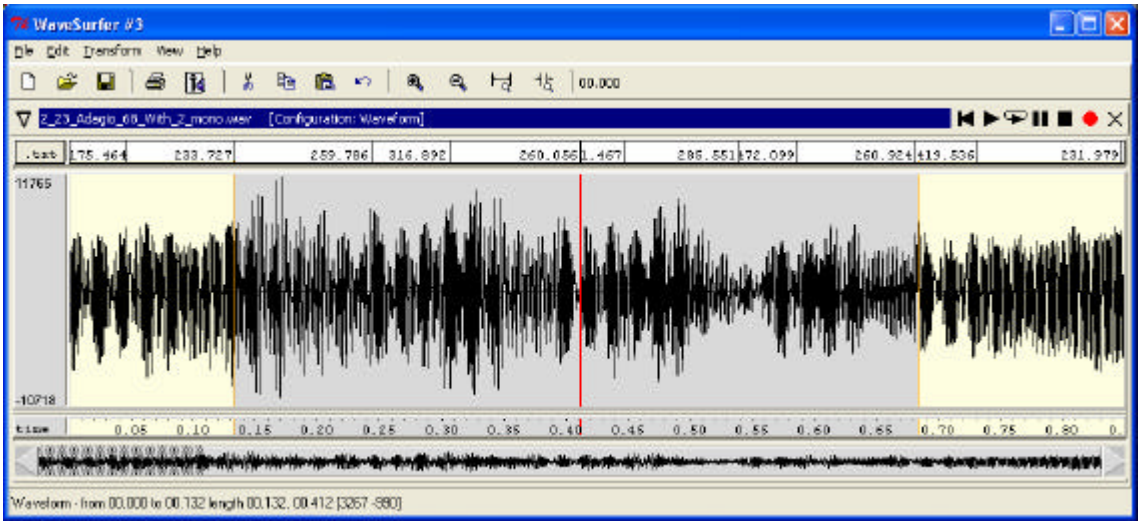
2_23_Adagio_68_With_1_mono.wav

Els dos últims onsets detectats haurien de ser un de sol, tal i com es marca però la resta estan ben acotats. Totes les freqüències són molt aproximades i només varien, com a molt, en tres Hz.



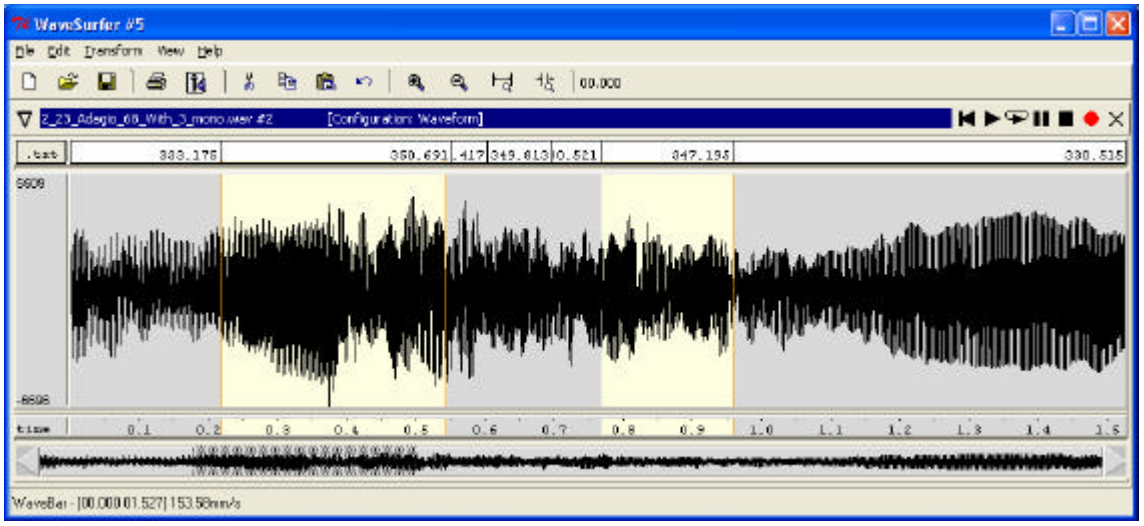
2_23_Adagio_68_With_2_mono.wav

Els dos primers i últims onsets haurien de ser un de sol tal i com està assenyalat. S'han de modificar algunes freqüències, però en general són força correctes.



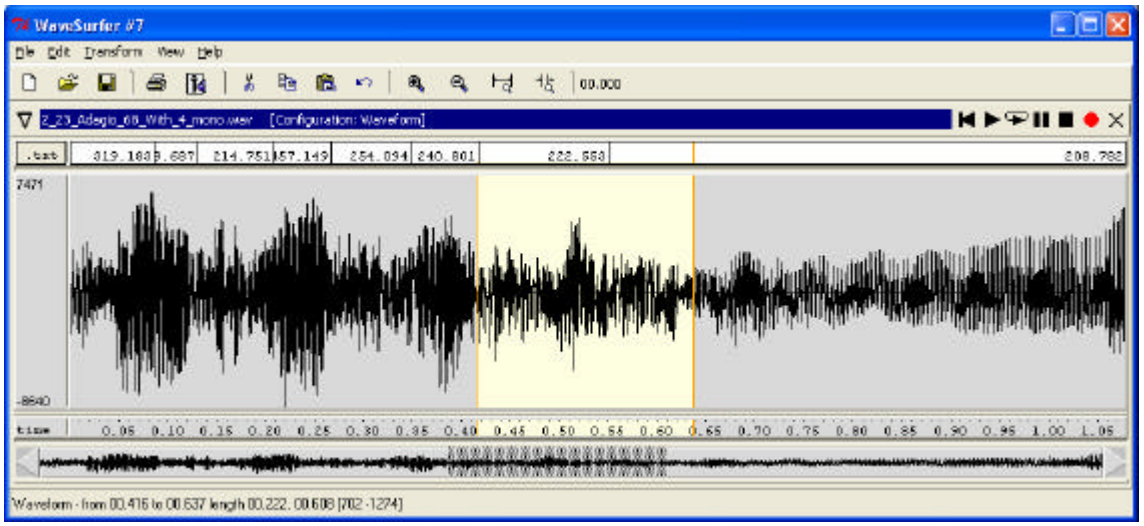
2_23_Adagio_68_With_3_mono.wav

En cadascun dels fragments assenyalats hi ha d'haver-hi dos i tres onsets, respectivament, en comptes d'un. Les freqüències estan ben detectades, tan sols varien de un o dos Hz. S'ha de tenir en compte que s'han d'afegir aquelles que pertanyien als onsets no detectats.



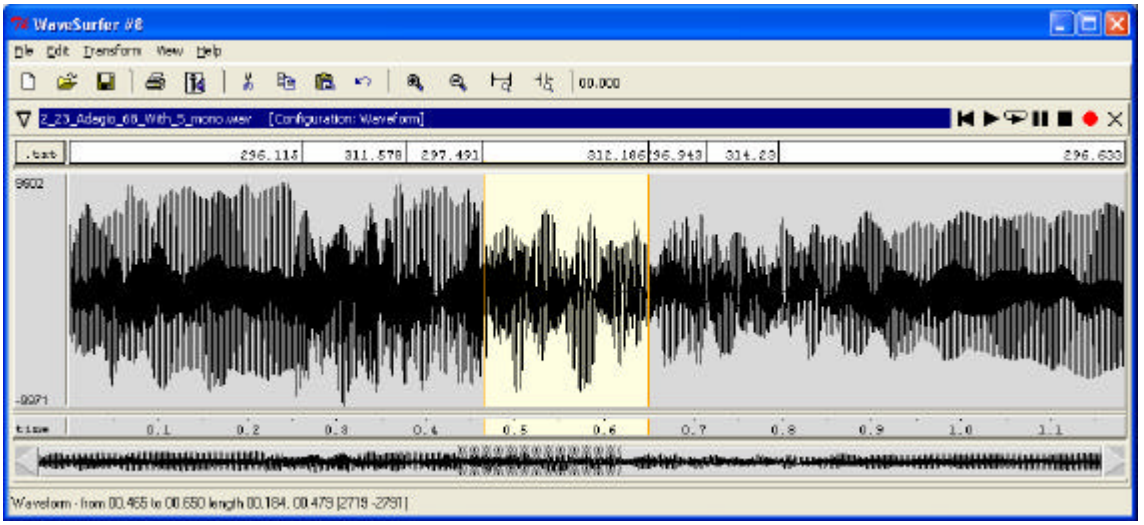
2_23_Adagio_68_With_4_mono.wav

Tots els onsets són correctes excepte en el fragment assenyalat que n'haurien de d'haver-hi tres i el primer onset que n'haurien de ser dos. La majoria de les freqüències s'han de modificar perquè no són correctes.



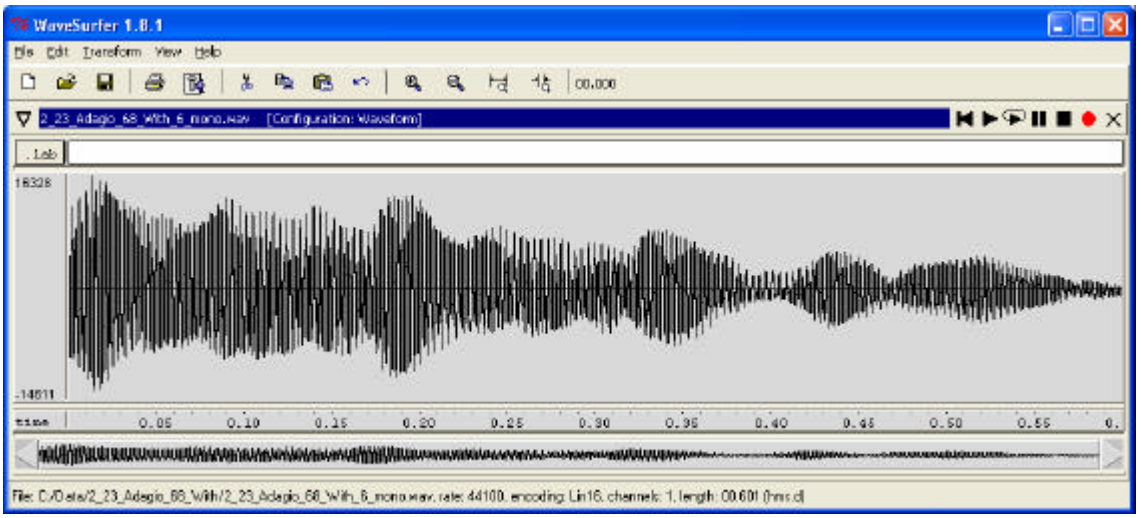
2_23_Adagio_68_With_5_mono.wav

L'únic onset que s'ha de retocar és el que està assenyalat que en són tres en compte d'un. Totes les freqüències estan molt aproximades varien en un parell o tres Hz.



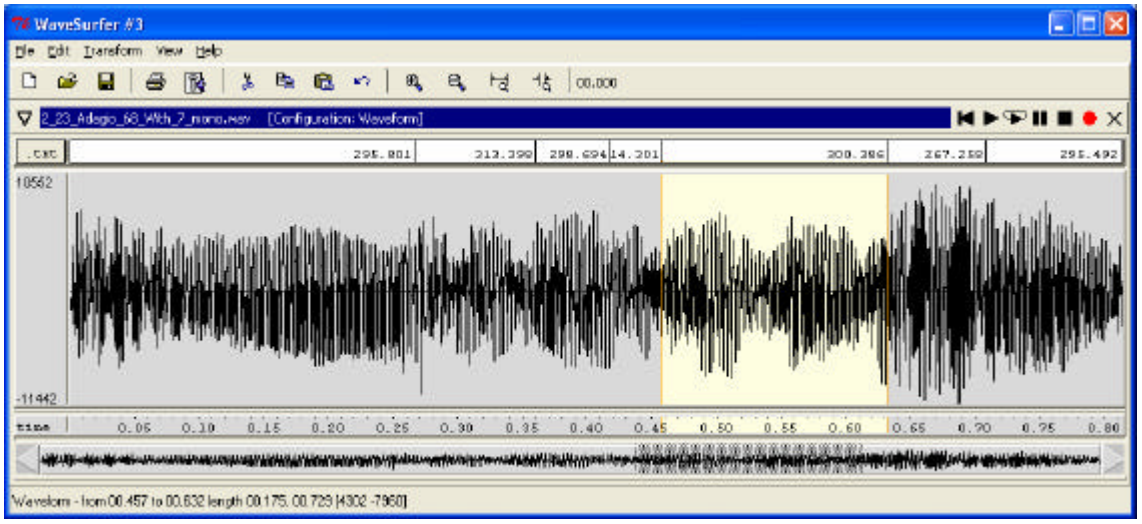
2_23_Adagio_68_With_6_mono.wav

Com es pot veure, en aquest cas no s'ha detectat cap onset, i això és degut a la correcció de notes, és a dir, que els onsets que s'han detectat tenien una diferència de freqüència menor a 50 cents provocant així la unió de tots ells.



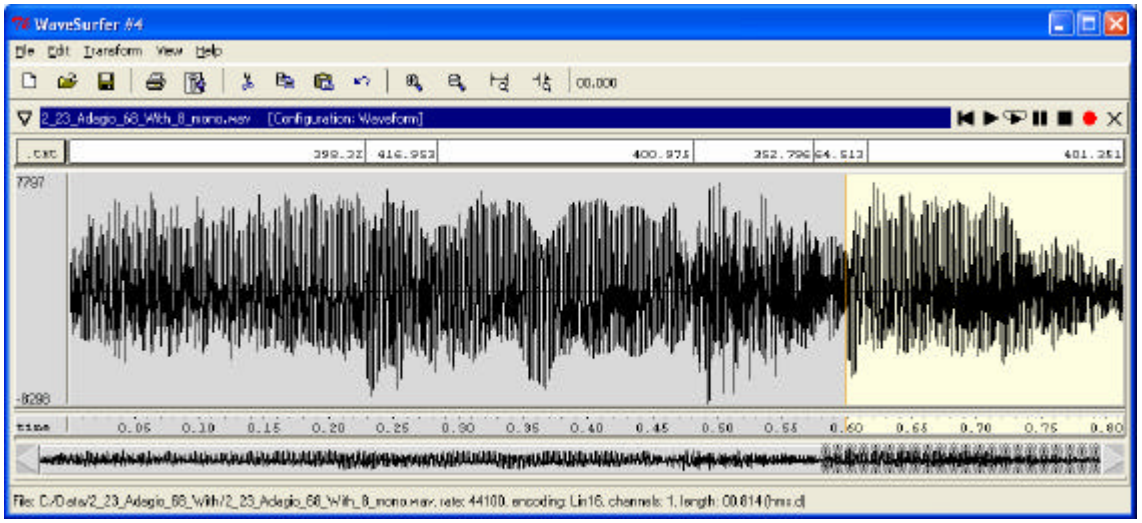
2_23_Adagio_68_With_7_mono.wav

L'únic fragment mal detectat pel que fa als onsets és el fragment assenyalat, on n'hi hauria d'haver-hi tres. Totes les freqüències detectades són molt correctes, la diferència més gran és de 5 Hz.



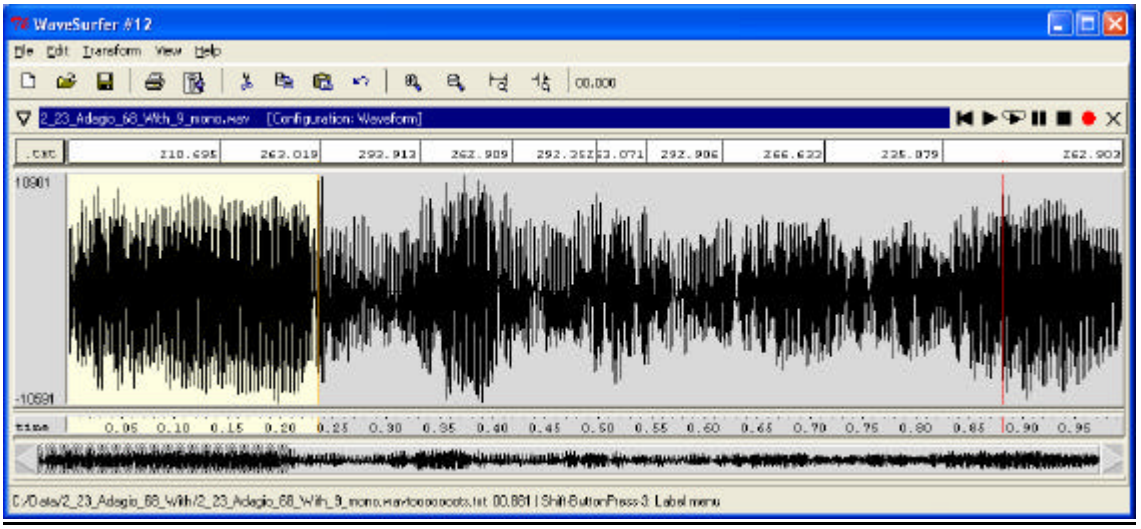
2_23_Adagio_68_With_8_mono.wav

L'últim onset no s'hauria d'haver detectat i a més el penúltim hauria de començar on s'inicia la senyalització groguenca. Hi ha dos Sol4 que la freqüència està força allunyada, hi ha una diferència de 8 i 28 Hz.



2_23_Adagio_68_With_9_mono.wav

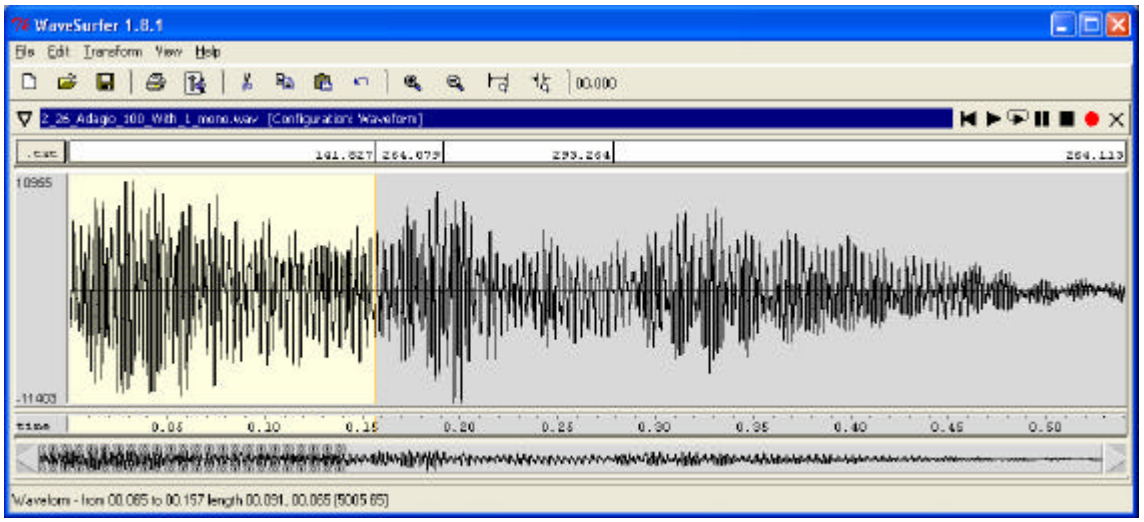
Només s'ha de modificar el primer onset, és a dir, ajuntar el primer i el segon tal i com s'indica en el gràfic (el fragment en groc). Totes les freqüències són correctes, només varien uns dos o tres Hz.



11.3.3 Tempo Adagio 100

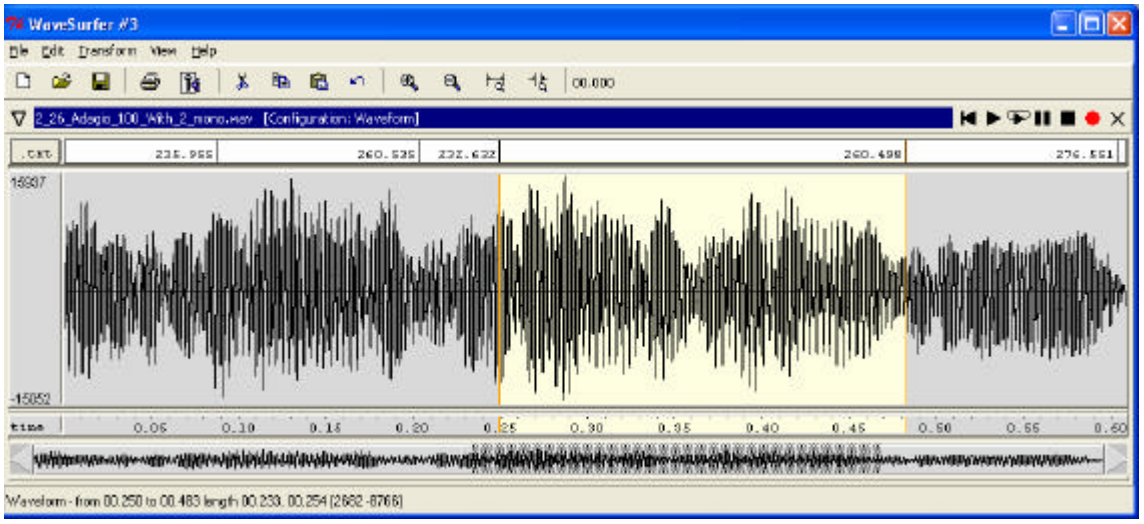
2_26_Adagio_100_With_1_mono.wav

Tot i que la majoria de onsets estan ben detectats, en el fragment assenyalat n'hi hauria d'haver dos. Totes les freqüències detectades són molt correctes, només varien en, com a molt, tres Hz.



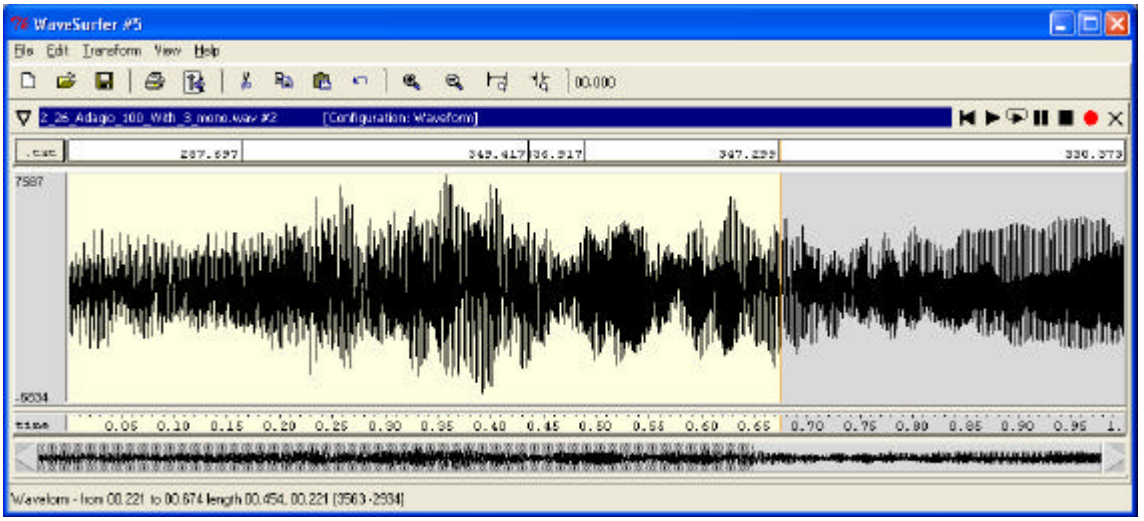
2_26_Adagio_100_With_2_mono.wav

En el fragment groc hi hauria d'haver tres onsets en comptes d'un. Totes les freqüències tenen una variació de uns dos Hz excepte la última on hi ha una variació de 40 Hz aproximadament.



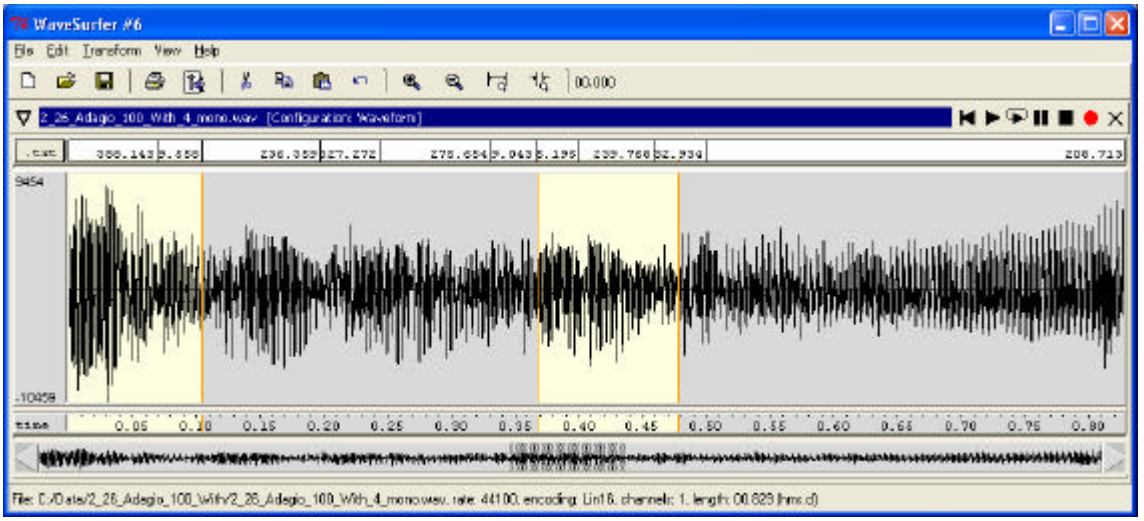
2_26_Adagio_100_With_3_mono.wav

Excepte l'últim onset la resta, els assenyalats en groc, no estan ben detectats. Al no estar els onsets ben detectats s'han d'introduir les freqüències, excepte la del últim onset que està ben detectada.



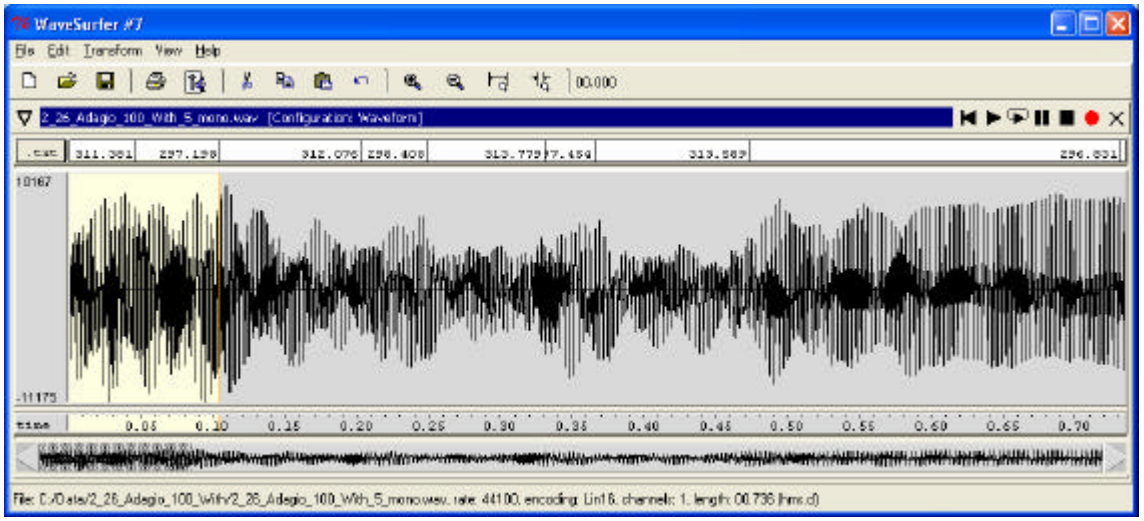
2_26_Adagio_100_With_4_mono.wav

Cadascun dels fragments assenyalats haurien d'estar sota un mateix onset. A més a més, l'últim onset hauria de començar on acaba l'últim fragment groc. Algunes freqüències no són gaire correctes, però la majoria estan ben detectades.



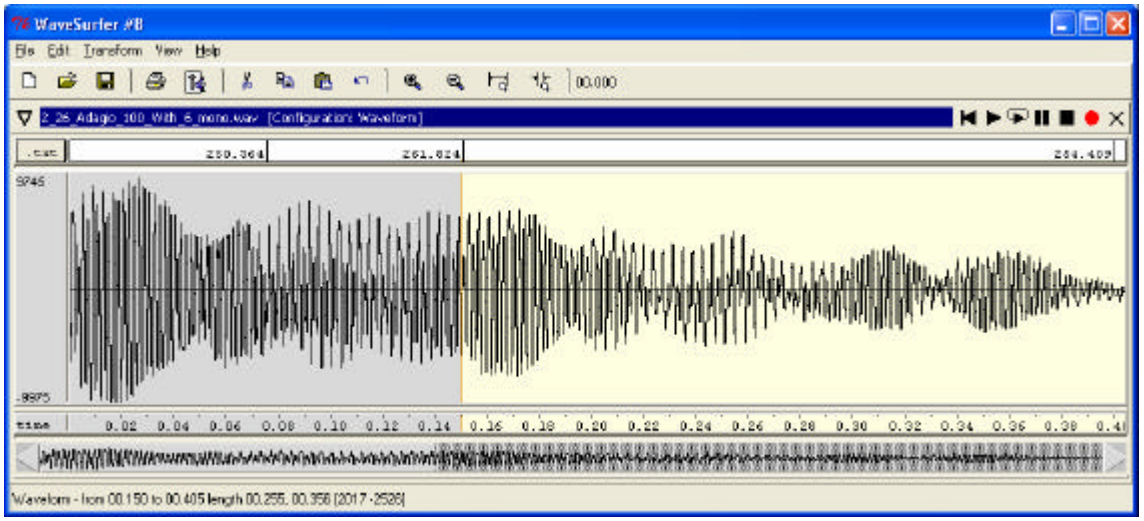
2_26_Adagio_100_With_5_mono.wav

L'únic onset sobrant és el primer que s'ha detectat i deu ser a causa d'un accés d'aire (el qual produeix energia) alhora de realitzar l'atac de la nota. Totes les freqüències detectades són molt aproximades, amb una variació entre un i quatre Hz.



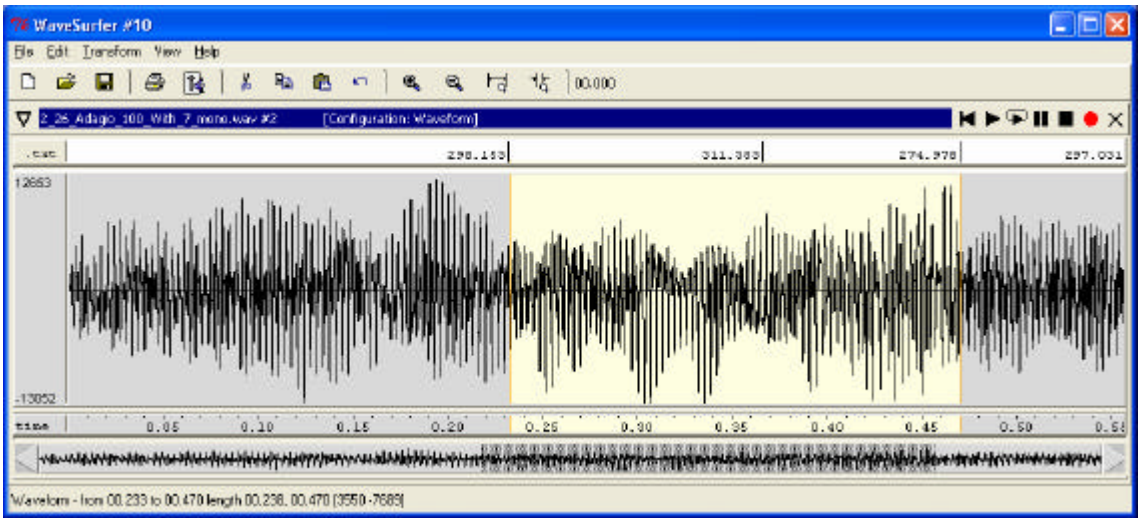
2_26_Adagio_100_With_6_mono.wav

En l'últim onset se n'haurien d'haver detectat tres. Les freqüències dels dos primers onsets estan ben calculades però la del últim varia en uns set Hz.



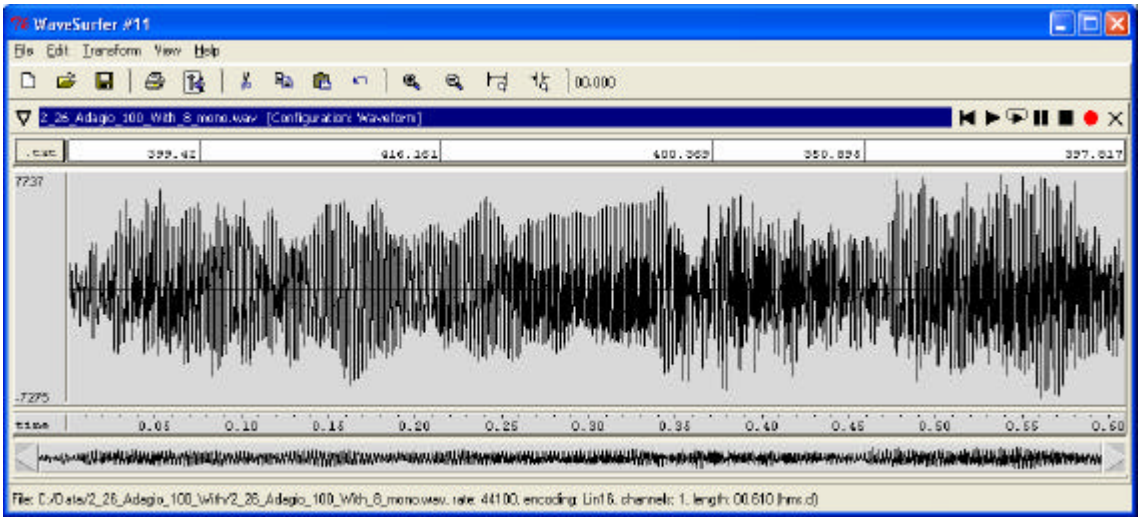
2_26_Adagio_100_With_7_mono.wav

En el primer onset assenyalat en realitat n'hi ha tres i en el segon n'hia ha dos en comptes dels que estan marcats. La freqüència relacionada amb el segon onset marcat s'ha de modificar perquè està a més de deu Hz per sobre del valor que li pertoca. La resta de freqüències, tot i que s'han d'afegir la dels onsets no detectats, són força correctes.



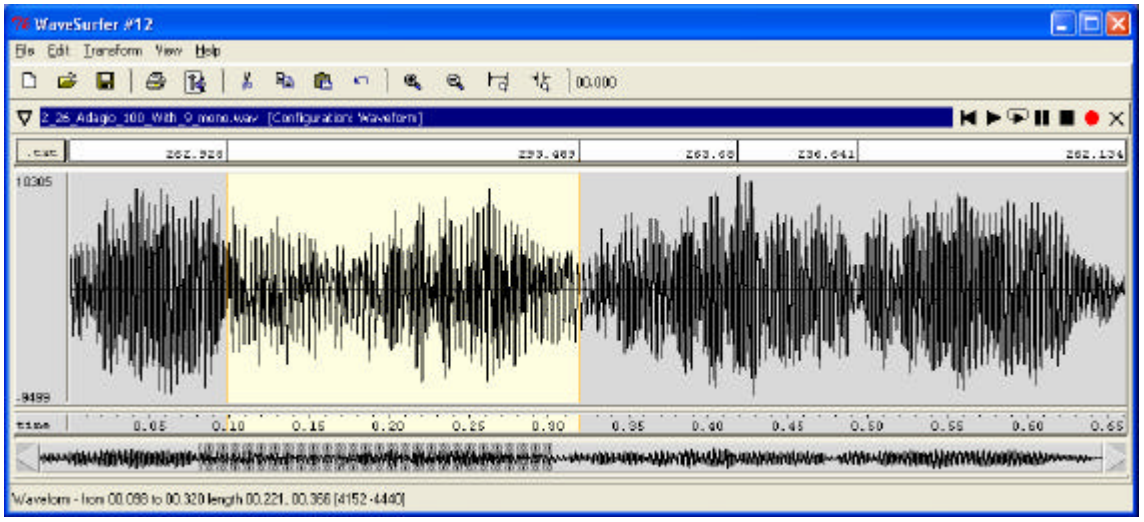
2_26_Adagio_100_With_8_mono.wav

Tots els onsets estan detectats correctament. Només cal modificar la freqüència del tercer onset ja que és la que té una diferència major.



2_26_Adagio_100_With_9_mono.wav

En el fragment assenyalat s'haurien d''haver detectat tres onsets. Totes les freqüències són molt correctes, amb variacions de un i tres Hz.



12. Annex (II): Contingut del CD

Dins el CD hi podem trobar el codi del projecte, un executable amb el qual es poden crear els arxius MIDI amb trinos amb uns exemples d'execució i, a més a més, dos MIDIs on podem escoltar les cançons generades amb els trinos.

Per poder executar el programa com a prova simplement hem d'executar-lo i utilitzar tots els paràmetres que venen per defecte. Però si en realitat es vol generar un nou àudio s'han de introduir els arxius en els directoris adients:

Directori MIDI: Conté els àudios en format wav sense els trinos, és a dir, la cançó original.

Directori XML: Conté els fitxers en format xml que descriuen els trinos de cada cançó. Dins aquest fitxer s'han de posar tots els atributs necessaris per caracteritzar cadascun dels trinos d'una peça.

Directori analysed_trills: Conté tots els resultats de l'anàlisi en format txt, en els quals hi trobem els onsets, offsets i freqüència fonamental. És la nostra base de dades de descriptors dels trinos.

Directori description_trills: En aquest directori trobem un fitxer en format txt amb tots els trinos caracteritzats i definits pels atributs que hem cregut convenients. A partir d'aquests atributs podrem saber quin és el trino millor indicat per reproduir-ne la imitació adequant-la als nous paràmetres.

Finalment els àudios MIDI que podem trobar al mateix nivell que l'executable són els àudios generats que contenen els trinos.