



Universitat de les  
Illes Balears

DISEÑO Y APLICACIÓN DE HERRAMIENTAS  
TECNOLÓGICAS APLICADAS A LA  
IDENTIFICACIÓN DE ELEMENTOS  
DIFERENCIALES DEL ESTILO COMPOSITIVO DE  
AUTORES CLÁSICOS

MEMORIA DE TESIS DOCTORAL

Realizada por Antonio Tudurí Vila

Dirigida por el Dr. Bartomeu Serra Cifre Catedrático del Departamento de  
Matemáticas e Informática de la Universidad de las Islas Baleares.

Departamento de Matemáticas e Informática

Marzo 2013



## Capítulos – Índice resumido

Capítulos – Índice resumido.....	3
Tabla de contenido detallada.....	4
Notas al lector.....	10
Agradecimientos.....	11
Capítulo 1. Introducción.....	12
Capítulo 2. Revisión de investigaciones realizadas.....	26
Capítulo 3. Resumen del desarrollo de las investigaciones.....	74
Capítulo 4. Desarrollo de la aplicación AN_MIDv5.1.....	80
Capítulo 5. Clasificación de estilos musicales clásicos por medio de análisis discriminante.....	97
Capítulo 6. Un nuevo enfoque cuantitativo en la identificación del estilo compositivo de autores clásicos (F.J.Haydn, W.A.Mozart, D. Scarlatti, y L.v.Beethoven).....	109
Capítulo 7. Análisis comparativo de aplicación de métodos de minería de datos versus algoritmos evolutivos a la clasificación automática de piezas musicales de compositores clásicos.....	120
Capítulo 8. Análisis de técnicas de clasificación existentes aplicadas a los indicadores extraídos.....	144
Capítulo 9. Resultados de aplicación de los métodos presentados a obras dudosas de J.S.Bach.....	152
Capítulo 10. Una nueva definición del término “compositor prolífico”.....	160
Capítulo 11. O.R.P.E.T. (Objective Rhythmic Performance Evaluation Tool) un método numérico objetivo de evaluación de la interpretación musical.....	171
Capítulo 12. Identificación automática de la tonalidad de piezas musicales clásicas por medio de algoritmos evolutivos.....	184
Capítulo 13. Identificación de rasgos en el estilo musical de las sonatas para teclado de Domenico Scarlatti por medio de herramientas matemáticas y tecnológicas.....	202
Capítulo 14. Investigaciones sin resultados significativos.....	213
Capítulo 15. Conclusiones.....	220
Bibliografía y referencias consultadas.....	223
Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados.....	228
Anexo 2 – Conceptos TIC y matemáticos utilizados.....	265
Anexo 3 – Conceptos asociados al estándar MIDI.....	300
Anexo 4 – Información de compositores analizados y catalogación.....	313
Anexo 5 – Conceptos estadísticos utilizados.....	348
Anexo 6 – Código fuente de la aplicación AN_MIDv5.1.....	365
Anexo 7 – Manual de usuario de la aplicación AN_MID v5.1.....	401
Anexo 8 - Información de catalogación de las obras utilizadas en las investigaciones.....	417
Anexo 9 – Clasificación de sonatas de D.Scarlatti por estilo clásico o barroco.....	450
Índice de figuras.....	454
Índice de tablas.....	460

## Tabla de contenido detallada.

Capítulos – Índice resumido.....	3
Tabla de contenido detallada.....	4
Notas al lector.....	10
Agradecimientos.....	11
Capítulo 1. Introducción.....	12
Justificación.....	12
Ejemplos de errores históricos cometidos en la atribución de obras musicales.....	13
Identificación del problema.....	15
Antecedentes.....	15
Opiniones de profesionales de la música sobre el problema.....	17
Objetivo de esta tesis doctoral.....	19
Hipótesis.....	20
Desarrollo de la aplicación AN_MID v5.1.....	21
Resultados programados.....	22
Resultados colaterales.....	23
Resumen de los contenidos de este documento.....	24
Capítulo 2. Revisión de investigaciones realizadas.....	26
Introducción.....	26
Frecuencia de uso de acordes - Ferkova, Ždimal, Šidlik.....	26
Automatic music classification - McKay, Fujinaga.....	27
jSymbolic: A feature extractor for MIDI files - McKay, Fujinaga.....	29
Style-independent computer-assisted exploratory analysis of large music collections - McKay Fujinaga.....	29
Pitch histograms in audio and symbolic music information retrieval - Tzanetakis, Ermolinskyi, Cook.....	30
A survey of music conformation retrieval systems - Typke, Wiering, Veltkamp.....	31
Information retrieval meta-evaluation: challenges and opportunities in the music domain - Urbano.....	32
Automatic chord recognition for music classification and retrieval - Heng-Tze - Yi-Hsuan, Yu-Ching, I-Bin.....	34
Statistical description models for melody analysis and characterization. - Ponce, Iñesta.....	35
The Symbolic vs. Numeric Controversy in Automatic Analysis of Music – Mouton, Pachet.....	37
Key determination of acoustic musical signals – Shenoy, Mohapatra, Wang.....	38
Pitch detection in polyphonic music using instrument tone models – Li, Wang.....	39
Genre classification using chords and stochastic language models - Pérez-Sancho, Rizo, Iñesta.....	40
The Nationalist Fingerprint in Nineteenth Century Romantic Chamber Music” - Hofstetter.....	41
Classification of Melodies by Composer with Hidden Márkov Models - Pollastri, Simoncelli.....	42
Style recognition through statistical event models – Pérez-Sancho, Iñesta, Calera-Rubio.....	43
Robust modeling of musical chord sequences using probabilistic n-grams - Scholz, Vincent, Bimbot.....	44
Pattern recognition approach for music style identification using shallow statistical descriptors - Ponce de León, Iñesta.....	45
Figured Bass and Tonality Recognition - Barthélemy, Bonardi.....	47
Automatic Tonal Analysis from Music Summaries for Version Identification - Gómez, Ong y Herrera.....	48
Automatic Tonal Analysis: Toward the Implementation of a Music Theory Workbench – H. Taube.....	49
An Evaluation of Musical Score Characteristics for Automatic Classification of Composers - Dor O. y Reich Y.....	50
Cognitive foundations of musical pitch - Krumhansl, C.L.....	52
An Evaluation System for Metrical Models. Temperley D.....	53
What's Key for Key? The Krumhansl-Schmuckler Key-Finding Algorithm Reconsidered. - Temperley D.....	55

A probabilistic topic model for unsupervised learning of musical key-profiles - Diane j. Hu, Lawrence K. Saul	57
Musical style identification using grammatical inference - Cruz-Alcázar et al	58
Two Grammatical Inference Applications In Music Processing - Cruz-Alcázar y Vidal	59
HarmTrace: Automatic functional harmonic analysis - W. Bas de Haas, J.P. Magalhães, et. al	60
Analizador Tonal en Software Libre - De la Fuente J.C, Rodríguez M.	61
Pitch spelling algorithms - Meredith D.	62
A Bayesian Key-Finding Model – Temperley D.	63
Musical Key Estimation Of Audio Signal Based On Hidden Márkov Modeling Of Chroma Vectors – Peeters G.	64
Key-Finding With Interval Profiles – Madsen S.T., Widmer G.	64
Polyphonic Audio Key Finding Using the Spiral Array CEG Algorithm – Chuan C. and Chew E.	65
Automatic musical key detection - Aljanaki A.	65
A program for key determination - Holtzmann S.R.	66
Fuzzy Analysis in pitch class determination for polyphonic audio key Finding - Chuan C. / Chew E.	66
A Parallel-Processing Key-finding Model – Vos P.G., Geenen E.	67
Are Pitch-Class Profiles Really “Key for Key”? - Quinn I.	67
Key Estimation from Polyphonic Audio - Gómez E.	68
Investigaciones focalizadas en información rítmica extraída del material musical.	68
Rameau: A System For Automatic Harmonic Analysis - Kröger, et al.	72
Conclusiones del estudio de las investigaciones realizadas.	73
Capítulo 3. Resumen del desarrollo de las investigaciones.	74
Capítulo 4. Desarrollo de la aplicación AN_MIDv5.1	80
Consideraciones de diseño.	80
Coste de desarrollo.	80
Algoritmo de cálculo de frecuencias de notas y de octavas.	81
Normalización de la tonalidad.	82
Normalización de la magnitud y orquestación de la obra.	82
Estructuras de datos utilizados.	82
Problemas aparecidos.	83
Algoritmo de cálculo de intervalos.	84
Problemas aparecidos.	85
Algoritmo de cálculo de duraciones de notas.	86
Introducción.	87
Funcionamiento del algoritmo.	90
Problemas aparecidos.	91
Selección de las duraciones tratadas.	95
Normalización de duraciones respecto el compás de la pieza.	95
Resumen del desarrollo de la aplicación AN_MIDv5.1	96
Capítulo 5. Clasificación de estilos musicales clásicos por medio de análisis discriminante.	97
Introducción.	97
Identificación del problema.	97
Objetivo de esta investigación.	99
Metodología.	99
Procedimientos.	99
Compositores y grupos de piezas musicales estudiados.	100
Análisis Discriminante.	102
Resultados.	102
Análisis de falsos negativos.	104
Discusión.	106
Propuestas de investigaciones futuras.	107
Conclusiones.	107

Capítulo 6. Un nuevo enfoque cuantitativo en la identificación del estilo compositivo de autores clásicos (F.J.Haydn, W.A.Mozart, D. Scarlatti, y L.v.Beethoven).....	109
Introducción.....	109
Identificación del problema.....	109
Objetivo de la investigación.....	110
Metodología.....	110
Compositores y grupos de piezas musicales analizados.....	111
Resultados.....	113
Variables aleatorias VA y VA' respecto a una distribución estadística de Gumbel.....	113
Variables aleatorias VN y VN' respecto a la distribución estadística Normal.....	114
Aplicación de análisis discriminante.....	115
Resultados fracasados.....	116
Discusión.....	117
Investigaciones futuras.....	118
Conclusiones.....	118
Capítulo 7. Análisis comparativo de aplicación de métodos de minería de datos versus algoritmos evolutivos a la clasificación automática de piezas musicales de compositores clásicos.....	120
Introducción.....	120
Análisis en profundidad de la investigación de Dor/Reich.....	121
Objetivo de la investigación.....	125
Metodología.....	125
Procedimientos.....	125
Descripción del método MIAMP.....	125
Resultados.....	133
Aplicación del método MIAMP a la muestra de piezas musicales de Dor/Reich.....	133
Compositores y grupos de piezas estudiadas con mayor diversidad de forma.....	135
Resultados obtenidos por el método MIAMP.....	136
Discusión del método MIAMP.....	137
Comparación de los resultados de Dor/Reich con los obtenidos con el método MIAMP.....	138
Resultados obtenidos al aplicar el algoritmo SMO to a los datos utilizados en el método MIAMP.....	140
Resultados obtenidos al aplicar el método MIAMP a la clasificación de estilos musicales.....	141
Investigación futura.....	142
Conclusiones.....	143
Capítulo 8. Análisis de técnicas de clasificación existentes aplicadas a los indicadores extraídos.....	144
Introducción.....	144
Aplicación del algoritmo knn.....	144
Árbol de decisión.....	147
Perceptrón.....	149
Redes neuronales.....	150
Naive Bayes.....	150
Random Forest.....	151
Capítulo 9. Resultados de aplicación de los métodos presentados a obras dudosas de J.S.Bach.....	152
Introducción.....	152
Objetivo de la investigación.....	152
Piezas musicales de J.S.Bach analizadas.....	153
Metodología.....	153
Resultados.....	154
Discusión.....	156
Investigaciones futuras.....	158
Conclusiones.....	158

Capítulo 10. Una nueva definición del término “compositor prolífico”.....	160
Introducción.....	160
Identificación del problema.....	160
Objetivo de la investigación.....	161
Metodología.....	161
Procedimientos.....	161
Compositores y grupos de piezas musicales utilizadas en las muestras.....	161
Terminología.....	163
Resultados.....	163
Discusión.....	168
Futuras investigaciones.....	169
Conclusiones.....	169
Capítulo 11. O.R.P.E.T. (Objective Rhythmic Performance Evaluation Tool) un método numérico objetivo de evaluación de la interpretación musical.....	171
Introducción.....	171
Definición del problema.....	171
Objetivo de la investigación.....	173
Metodología.....	173
Procedimientos.....	173
Datos obtenidos de la aplicación AN_MID v5.1.....	174
Método ORPET propuesto.....	176
Resultados.....	177
Ejemplo simple.....	177
Ejemplo: 2º Movimiento de la famosa Sonata para piano de Mozart (K.545).....	180
Discusión.....	180
Investigaciones futuras.....	181
Conclusiones.....	182
Capítulo 12. Identificación automática de la tonalidad de piezas musicales clásicas por medio de algoritmos evolutivos.....	184
Introducción.....	184
Identificación del problema.....	184
Objetivo de la investigación.....	186
Metodología.....	186
Resultados de la aplicación AN_MID v5.1.....	186
Compositores y grupos de piezas musicales incluidas en la muestra maestra.....	187
Explicación del método propuesto.....	188
Resultados.....	192
Primer experimento: La totalidad de la muestra de piezas musicales.....	193
Segundo experimento: Tres muestras de piezas musicales agrupadas por periodo musical.....	195
Tercer experimento: Probar el método propuesto sobre el conjunto de piezas musicales utilizadas por Temperley y otras investigaciones.....	199
Discusión.....	199
Investigaciones futuras.....	200
Conclusiones.....	200
Capítulo 13. Identificación de rasgos en el estilo musical de las sonatas para teclado de Domenico Scarlatti por medio de herramientas matemáticas y tecnológicas.....	202
Introducción.....	202
Identificación del problema.....	202
Objetivo de la investigación.....	203
Metodología.....	204
Procedimientos.....	204
Grupos de piezas musicales utilizadas en las muestras.....	204
Análisis discriminante.....	205
Resultados.....	205

Discusión.....	210
Investigaciones futuras.....	211
Conclusiones.....	211
Capítulo 14. Investigaciones sin resultados significativos.....	213
Introducción.....	213
Clasificación de estilo compositivo por medio de una función de distancia euclidiana ponderada con los factores de ponderación obtenidos por medio de una única función matemática.....	213
Introducción.....	213
Función de distancia ponderada.....	214
Resultados.....	218
Conclusión.....	218
Clasificación del estilo compositivo utilizando porcentaje de uso de duraciones de notas.....	218
Introducción.....	219
Resultados.....	219
Conclusión.....	219
Capítulo 15. Conclusiones.....	220
Otras aportaciones.....	221
Bibliografía y referencias consultadas.....	223
Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados.....	228
Anexo 2 – Conceptos TIC y matemáticos utilizados.....	265
Anexo 3 – Conceptos asociados al estándar MIDI.....	300
Introducción.....	300
Especificaciones físicas (Hardware).....	300
Cables y conectores.....	303
Especificaciones lógicas.....	305
Codificación de la duración.....	308
Especificaciones del formato de fichero MIDI.....	309
Estructura del Archivo.....	310
Bloque de Cabecera (Header Chunk).....	310
Bloque(s) de datos (Track Chunk).....	311
Anexo 4 – Información de compositores analizados y catalogación.....	313
Anexo 5 – Conceptos estadísticos utilizados.....	348
Anexo 6 – Código fuente de la aplicación AN_MIDv5.1.....	365
Anexo 7 – Manual de usuario de la aplicación AN_MID v5.1.....	401
Formato de llamada del programa.....	401
Parámetros.....	401
Programa lanzadera.....	402
Formato del fichero [fichero_origen].....	405
Formato del fichero [fichero_dest].....	406
Resultados de análisis generales.....	407
Resultados de análisis de notas.....	408
Resultados del análisis de intervalos.....	409
Resultados de análisis de duraciones.....	410
Otras consideraciones y recomendaciones de uso.....	413
Mensajes de error y avisos generados por la aplicación.....	414
Mensajes de error.....	414
Avisos o warnings.....	415
Anexo 8 - Información de catalogación de las obras utilizadas en las investigaciones.....	417
Bach, Johann Michael.....	417
Bach, Johann Sebastian.....	418



Beethoven, Ludwig van.....	420
Brahms, Johannes.....	422
Chopin, Fryderyk Franciszek.....	422
Dvořák, Antonín.....	423
Graupner, Christoph.....	424
Haendel, Georg.Friedrich.....	425
Haydn, Franz Joseph.....	426
Homilius, Gottfried August.....	431
Krebs, Johann Ludwig.....	432
Mozart, Wolfgang Amadeus.....	434
Scarlatti, Domenico.....	439
Schumann, Robert.....	447
Vivaldi, Antonio.....	448
Walther, Johann Gottfried.....	449
Anexo 9 – Clasificación de sonatas de D.Scarlatti por estilo clásico o barroco.....	450
Índice de figuras.....	454
Índice de tablas.....	460

## Notas al lector

Esta tesis doctoral trata conceptos, herramientas y métodos de 2 disciplinas a saber: la Música y las Tecnologías de la Información. Desarrolla métodos de Tecnologías de la Información de aplicación concretamente a la musicología desarrollando métodos que, aplicados a material musical, ayudan a esta a dar respuesta a problemas de identificación de la autoría de una obra en el caso de que no haya una respuesta unánime de los especialistas respecto a la misma. Dicha respuesta estará sujeta a la cuantificación de un valor de probabilidad de dicha respuesta

Por ello, en la redacción del mismo, se entremezclan y referencian conceptos de las dos disciplinas que pueden dificultar la lectura del mismo.

Por ello, y en función de la especialización del perfil del lector, a medida que van apareciendo conceptos de cada una de las dos disciplinas, las primeras veces que aparecen comentados con una nota al pie que dirige al lector a la página del anexo correspondiente donde aparece una explicación detallada de dicho concepto.

Dichos anexos contienen para cada concepto explicaciones seleccionadas por su simplicidad. En este aspecto debe decirse que la *Wikipedia* es a mi criterio y sin lugar a dudas la mejor fuente que incluye en sus definiciones claridad, precisión y simplicidad y es por ello que la mayoría de los conceptos consultados son de dicha fuente (consultados en diferentes fechas) como podrá consultarse en las fuentes.

La Tabla 1 resume los anexos incluidos en este documento. Aquellos anexos que no incluya ningún colectivo como excluido es debido a que posiblemente todos los colectivos de lectores necesiten consultar para conocer el detalle de los contenidos aunque sean próximos a su área de conocimiento.

Anexo	Página inicial	Lectores posiblemente excluidos de su consulta
Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados	228	Músicos / musicólogos
Anexo 2 – Conceptos TIC y matemáticos utilizados.	265	Especialistas TIC
Anexo 3 – Conceptos asociados al estándar MIDI	300	
Anexo 4 – Información de compositores analizados y catalogación.	313	Músicos / musicólogos
Anexo 5 – Conceptos estadísticos utilizados.	348	Especialistas TIC
Anexo 6 – Código fuente de la aplicación AN_MIDv5.1	365	Músicos / musicólogos
Anexo 7 – Manual de usuario de la aplicación AN_MID v5.1	401	
Anexo 8 - Información de catalogación de las obras utilizadas en las investigaciones	417	Músicos / musicólogos

Tabla 1: Listado de anexos de este documento con los colectivos en principio excluidos de su lectura.

En el “Capítulo 2. Revisión de investigaciones realizadas” a partir de la página 26, cada uno de las investigaciones analizadas ha sido resumida y cada una comentada en el apartado “Sinergias” en el cual se enumeran los puntos de relación con dicha investigación y alguna de las realizadas en esta tesis doctoral.

## Agradecimientos

- A mi esposa por su paciencia y por las horas de familia que no les he podido dedicar a ella y a nuestros hijos a lo largo de estos últimos cuatro años con el objetivo de sacar adelante esta tesis doctoral.
- A mis padres porque nunca me hicieron caso cuando en mis años de adolescencia allá por los años 80 les pedía dejar los estudios del Conservatorio. Superada ya hace ya años esta etapa y desde entonces, estoy orgulloso del bagaje de estudios que me dieron que han hecho de mí lo que soy.
- A mi abuela Elisa por las largas horas al piano que dedicó ayudándome a mí y a mis hermanas en mis estudios de música primarios estudiando los contenidos de lo que en aquella época recibía el nombre de “Solfeo” y llamado en los currículos actuales “Lenguaje Musical”.
- A mi director de tesis el Dr. Bartomeu Serra por su constante mensaje de ánimo y optimismo en todas las reuniones de trabajo en las cuales fuera cual fuera mi estado de ánimo al empezar, al salir estaba inundado de energía por continuar luchando frente a dichas adversidades.
- Al Sr. Joan Company, Director de la *Coral de la Universitat de les Illes Balears* por su ayuda y puesta a mi disposición de los recursos tecnológicos musicales a su alcance.
- Al profesor de órgano del Conservatorio Profesional de Mallorca D. Bartomeu Mut por su ayuda y colaboración entusiasta en las investigaciones realizadas y por implicar al Dr. Ronald Börger en su experiencia en la obra de J.S.Bach.
- Al Sr. Albert Díaz Profesor de Piano del Conservatorio Superior de Música de les Illes Balears, por poner a mi disposición en nombre del Conservatorio todos los recursos bibliográficos existentes en el centro.
- A Cristhopher Hail por su colaboración y la aportación de sus conocimientos de la obra para teclado de Domenico Scarlatti.

# Capítulo 1. Introducción

En este capítulo se presenta el problema al cual los métodos presentados en esta tesis doctoral aportan una herramienta tecnológica, los objetivos, la hipótesis de trabajo planteada y un resumen cronológico de los resultados obtenidos en ella.

## Justificación

La Historia de la Música está repleta de hechos en los cuales a lo largo del tiempo, la autoría de una obra musical ha sido atribuida a diferentes compositores en función de, generalmente, descubrimientos documentales que han aportado pruebas que han obligado a cambiar a los especialistas su opinión al respecto.

Estos problemas de autenticación son mayores a medida que se retrocede históricamente en el tiempo por falta de pruebas documentales o por motivos culturales como se enumerará a continuación. Es decir, pocas son las piezas musicales compuestas a partir de la segunda mitad del siglo XIX que existan dudas sobre su autoría. Sin embargo, en el siglo XVIII y XVII especialmente abundan dichas obras dudosas o anónimas.

Es más, se puede decir que sin lugar a dudas, obras de las cuales no existe ninguna duda acerca de su autoría actualmente, en el futuro aparecerán pruebas que plantearan la duda acerca de su autoría reconocida hasta la fecha.

Algunos de los motivos por los cuales a lo largo de la historia han permanecido ocultos estos errores de atribución son debidos a los siguientes factores:<sup>1</sup>

- Descubrimiento de copias firmadas. Una costumbre extendida en el siglo XVIII (y anteriores) era copiar parte de música de otros compositores con la intención de destinarlas a estudio propio. Los últimos descubrimientos de partituras musicales, o fragmentos, con letra de compositores famosos, a veces ha llevado a pensar que la obra era suya. Este factor en concreto ha provocado confusión entre las primeras sinfonías de Wolfgang A. Mozart<sup>2</sup> y las de su padre Leopold<sup>3</sup>, y también las de compositores situados en el círculo de Mozart, como Michael Haydn<sup>4</sup> (hermano de Franz Joseph Haydn<sup>5</sup>).
- Relaciones de coexistencia temporal y de estreno de obras de diferentes compositores. Se sabe que W.A.Mozart, siendo ya un compositor e intérprete maduro, incluiría en ocasiones la obra de otro compositor (con frecuencia joven y luchador) en el programa de uno de sus habituales conciertos sinfónicos. Aunque en el momento se presentaría a la audiencia al verdadero compositor, la débil asociación de la obra con Mozart llevaría en muchos casos a pensar continuamente que él era el autor.
- Falta de rigor en los métodos de catalogación y dificultades en las comunicaciones. Los métodos de publicación y distribución musical eran muy laxos en la Europa del siglo XVIII,

---

1 Contenidos resumidos y adaptados del contenido de la página

“[http://es.wikipedia.org/wiki/Sinfonías\\_espurias\\_o\\_de\\_dudosa\\_autenticidad\\_de\\_Wolfgang\\_Amadeus\\_Mozart](http://es.wikipedia.org/wiki/Sinfonías_espurias_o_de_dudosa_autenticidad_de_Wolfgang_Amadeus_Mozart)”

2 Consultar página 333 (capítulo Anexo 4 – Información de compositores analizados y catalogación.) para unas breves notas biográficas.

3 Consultar página 332 (capítulo Anexo 4 – Información de compositores analizados y catalogación.) para unas breves notas biográficas.

4 Consultar página 327 (capítulo Anexo 4 – Información de compositores analizados y catalogación.) para unas breves notas biográficas.

5 Consultar página 326 (capítulo Anexo 4 – Información de compositores analizados y catalogación.) para unas breves notas biográficas.

con versiones manuscritas de música circulando libremente. Esto podría fácilmente llevar a confusión sobre la autoría de las composiciones, conduciendo con frecuencia a la falsa atribución.

- Razones de calado de una catalogación errónea durante muchos años. Es reconocido el caso de las imprecisiones tempranas a la hora de identificar las obras de Mozart. Las imprecisiones cometidas por el comerciante musical de Hamburgo *Johann Christoph Westphal*, fueron arrastradas por la posterior catalogación formal de *Breitkopf und Härtel* y *Ludwig von Köchel*<sup>6</sup>, y tienen tendencia a persistir.
- Factores de falta de rigor e intereses económicos. Se ha perdido un número desconocido de obras de Mozart. Los “descubrimientos” ocasionales de finales del siglo XVIII, particularmente en lugares que tuvieran relación con Mozart a través de visitas personales o de interpretaciones en concierto, han sido atribuidos a él en ocasiones más bien precipitadamente, siendo descalificados únicamente al hallar pruebas que demostraran lo contrario.

## **Ejemplos de errores históricos cometidos en la atribución de obras musicales**

Son innumerables las obras de autoría dudosa en los siglos XVII y XVIII. Se comentan a modo de ejemplo algunos de los más famosos por la fama de uno de sus posibles autores o por la popularidad de la obra que ha perdurado hasta la actualidad.

La famosa 'Sinfonía de los Juguetes', había sido tradicionalmente atribuida a de Franz Joseph Haydn y después a su hermano Michael, para pasar después atribuida a Leopold Mozart, y por fin acabar siendo atribuida (al parecer definitivamente) a Edmund Angerer<sup>7</sup>. Ciertamente es, que a pesar de ser compuesta adrede con un carácter pedagógico muy elemental, es una obra muy elemental en su estructura, y por tanto los especialistas intuían que no tenía que ser debida a un compositor de la talla de F.J.Haydn.

Entre las razones que contribuyeron a que se le quitara la autoría a Haydn y se le diera a Leopold Mozart, influyó la gran fama como maestro de música de la que gozaba este último, quien, además de haber sido el responsable de la educación musical de su hijo, escribió un importante método de violín, *Tratado para una escuela violinista básica*, que se publicó en varios idiomas y sirvió para que muchísimos niños de esa época y del siglo XIX aprendieran a tocar el violín.

Con el descubrimiento de una nota manuscrita en 1992, sin embargo, parece demostrarse claramente que el compositor de esta obra no fue otro que Edmund Angerer. Aun así, el musicólogo Robert Illing, en una monografía de 1994, objeta que el descubrimiento del manuscrito de la obra con el nombre de Angerer no prueba realmente su autoría de la citada obra.

Existe una lista de sinfonías espurias o de dudosa autenticidad de W.A. Mozart que contiene 39 obras sinfónicas atribuidas en un principio a Mozart, y posteriormente probadas como espurias o sobre cuya autenticidad se tienen continuas dudas. No se conoce con precisión el número real de sinfonías escritas por Mozart; de las cuarenta y uno formalmente numeradas, hay tres (números 2, 3 y 37) de las que se sabe sin ningún tipo de dudas que pertenecen al catálogo de otros compositores.

Por otra parte, los especialistas no están seguros acerca de la autoría de la etiquetada con el número 11. Sin embargo, a parte de la secuencia aceptada de sinfonías números 1-41, existen otras veinte sinfonías auténticas de Mozart y, además de estas, una larga lista de composiciones

6 Consultar página 330 (capítulo Anexo 4 – Información de compositores analizados y catalogación.) para una explicación detallada.

7 Consultar página 313 (capítulo Anexo 4 – Información de compositores analizados y catalogación.) para unas breves notas biográficas.

problemáticas que no han sido autenticadas como obras de Mozart. Algunas de estas composiciones pueden ser auténticas; de hecho, las obras dudosas son tratadas con frecuencia como auténticas por quienes elaboran ediciones recopilatorias. No obstante, algunas han sido aceptadas durante mucho tiempo como obras de otros compositores, los cuales han sido identificados en muchos casos.

Tal como se comenta en la grabación del sello NAXOS de los cuartetos para cuerda Op.3 3-6 de F.J.Haydn por el cuarteto Kodály<sup>8</sup>, la cuestión de la autenticidad de dichos cuartetos ha sido objeto de atención de los estudiosos desde mediados del siglo XIX. Casi todos y cada uno de los más destacados especialistas en dicho compositor (desde C. F. Pohl hasta H. C. Robbins Landon) ha publicado su propia opinión sobre el tema, y el hecho de que aún no exista un acuerdo generalizado resulta indicativo de la naturaleza insoluble del problema. Las obras se omitieron del *Entwurf-Katalog*, el catálogo de sus propias obras que Haydn llevó desde 1765 hasta después de sus estancias londinenses, pero encontró acomodo en el Haydn-Verzeichnis preparado en 1805 por Joseph Elssler bajo la supervisión directa del compositor. Haydn también aceptó las seis obras como genuinas en la edición de sus cuartetos de cuerda completos publicada por Ignaz Pleyel<sup>9</sup>.

Estas pruebas en uno y otro sentido no están exentas de dudas. La inclusión de los cuartetos en el Haydn-Verzeichnis puede haberse debido a su aparición tres años antes en la edición de Pleyel. Éste afirmaba en el catálogo que acompañaba a los cuartetos completos que todas las obras habían sido declaradas como propias por el autor, pero László Somfai piensa que es muy improbable que Haydn viera nunca las palabras *avoués par l'auteur*. La exigua evidencia bibliográfica se ha visto minuciosamente escrutada y las propias obras han sido objeto de todas las técnicas analíticas conocidas por la musicología. La autoría de Haydn sigue resultando dudosa, pero exactamente lo mismo sucede con la de Pater Romanus Hoffstetter<sup>10</sup>, que es la alternativa favorecida con más frecuencia. El jurado sigue deliberando y es probable que siga haciéndolo a menos que se haga un descubrimiento sensacional que cierre el asunto de una vez por todas.

En relación con los dos conciertos para violonchelo compuestos por F.J.Haydn, el catalogado como Hob.VIIb2, compuesto en 1783 para Anton Kraft<sup>11</sup> sí que se atribuye a Haydn desde que poco después de 1950 se descubriese la firma de Joseph Haydn en el manuscrito pero el catalogado como Hob.VIIb4 que se atribuye a Giovanni Battista Costanzi<sup>12</sup> (1704-1778), maestro de Luigi Boccherini tal como muestran las notas a la grabación de Maria Kliegel<sup>13</sup>.

Otros de los muchos casos serían el del oratorio “*La fenice sul rogo, ovvero la morte di San Giuseppe*” de G.B.Pergolesi<sup>14</sup> cuya autoría es considerada dudosa por algunos estudiosos<sup>15</sup>, el motete “*Diligam te e Inclina Domine*” de J.P.Rameau<sup>16</sup> o la ópera “*Berenice*” de N.Piccini<sup>17</sup> con libreto de B.Pasqualigo estrenada en Nápoles en 1764.

---

8 “String Quartets Op.3 3-6 attrib to Romanus Hoffstetter (1742-1815)” Kodály Quartet - NAXOS 8,555704 año 2002 – Notas de Alan Badley

9 Consultar página 337 (capítulo Anexo 4 – Información de compositores analizados y catalogación.) para unas breves notas biográficas.

10 Consultar página 328 (capítulo Anexo 4 – Información de compositores analizados y catalogación.) para unas breves notas biográficas.

11 Consultar página 331 (capítulo Anexo 4 – Información de compositores analizados y catalogación.) para unas breves notas biográficas.

12 Consultar página 320 (capítulo Anexo 4 – Información de compositores analizados y catalogación.) para unas breves notas biográficas.

13 “Joseph Haydn - The Complete Cello Concertos” Maria Kliegel and Cologne Chamber Orchestra conducted by Helmut Müller-Brühl - NAXOS 8,555041 año 2000

14 Consultar página 336 (capítulo Anexo 4 – Información de compositores analizados y catalogación.) para unas breves notas biográficas.

15 Contenido obtenido y resumido de “[http://personales.ya.com/constan/musics/pergolesi\\_1.htm](http://personales.ya.com/constan/musics/pergolesi_1.htm)”.

16 Contenido obtenido y resumido de “[http://es.wikipedia.org/wiki/Jean-Philippe\\_Rameau](http://es.wikipedia.org/wiki/Jean-Philippe_Rameau)”.

17 Consultar página 337 (capítulo Anexo 4 – Información de compositores analizados y catalogación.) para unas breves notas biográficas.

La lista de errores cometidos históricamente en la atribución de obras a compositores sería interminable y escapa al objetivo de este apartado. Sirvan los presentes ejemplos como tales para justificar el desarrollo de los métodos presentados en esta tesis doctoral para resolver dichos errores.

## **Identificación del problema**

La musicología entre otros campos de investigación, es la disciplina musical encargada de dar respuesta a las preguntas y dudas en los casos de autoría dudosa.

Como se ha visto en los ejemplos planteados de autoría errónea, muchas veces no existe una opinión generalizada entre los especialistas al no existir un método aceptado de manera generalizada que permita realizar una atribución exacta o al menos, valorar cuantitativamente la probabilidad de que fuera compuesta por uno u otro compositor.

Debe añadirse además, que el arte de la composición se fundamenta en unas pocas reglas que definen lo que “no se puede hacer”[1] o no está permitido en la relación entre los sonidos (variables a lo largo de los diferentes estilos musicales de cada época) más que en lo que “se puede hacer”. Ello genera un espectro de posibilidades de combinación infinito en cada instante de la partitura que dificulta la identificación de elementos distintivos de cada compositor de un modo generalizado.

Por tanto, y en el caso de no haber pruebas documentales y caligráficas para realizar una atribución de una obra de autoría dudosa, y en el caso de que no haya una atribución generalizada por los especialistas (ya que cada uno atribuye diferentes valoraciones a determinados aspectos armónicos, tímbricos, rítmicos etc. de determinados instantes de la partitura de la obra) es necesario disponer de métodos que permitan de manera objetiva, cuantificada, y aplicada sobre la totalidad de la obra, identificar los elementos que puedan atribuirse a alguno de los compositores candidatos.

Las Tecnologías de la Información al igual que en otras disciplinas, permiten crear métodos para obtener resultados de clasificación objetivos y en base a conjuntos de datos intratables a mano por un estudio musicológico tradicional.

## **Antecedentes**

La musicología ha descubierto a lo largo del tiempo, sea por medio de descubrimientos documentales o por análisis profundos de la partitura, que obras consideradas como compuestas un autor, al final se ha demostrado que no lo son.

Como últimos referentes, el musicólogo italiano Luca Chiantore (profesor en la Escuela Superior de Música de Cataluña) en 2009 y tras años de estudio llegó a la conclusión de que la famosa pieza de L.v.Beethoven “para Elisa”, si bien está basada en bocetos de Beethoven, fue montada y escrita en la forma que se conoce actualmente por Ludwig Nohl en 1865.<sup>18</sup>

Basa sus conclusiones en la existencia de "absurdidades formales" tales como que Beethoven no habría utilizado la estructura formal de la misma ni el Rondó que se incluye.

Otros ejemplo de autoría erróneamente atribuida durante años a J.S.Bach han sido las obras catalogadas con los números BWV 723 y 751 que actualmente se acepta que fueron escritas por su tío abuelo J.M.Bach o la catalogada con el número BWV Anh 172, 179 que se sabe actualmente que no fueron compuestas por J.S.Bach.

---

18 Información obtenida de “<http://www.newyorker.com/online/blogs/alexross/2009/10/who-wrote-fur-elise.html>” y “<http://www.rtve.es/noticias/20100414/musicologo-italiano-luca-chiantore-defiende-beethoven-no-dio-forma-a-para-elisa/327643.shtml>” en fecha 7/01/2013.

Tal es el caso del descubrimiento a principios del año 2012 por parte de la musicóloga austriaca Hildegard Herrmann-Schneider de un Allegro molto en Do Mayor en una vivienda privada en Lechtal compuesto por W.A.Mozart a la edad de 11-13 años.<sup>19</sup>

En la misma fuente el director de Mozarteum, Ulrich Leisinger indicó que *“la pieza se ajusta estilísticamente a lo que se encuentra entre las composiciones del joven Mozart. Probablemente, la compuso antes de su viaje a Italia (1769 – 1772)”*.

Sin embargo no se detallan los motivos por los cuales ha sido atribuida a Mozart teniendo en cuenta que la partitura fue escrita a mano por un copista tirolés.

Como se ha comentado anteriormente, a lo largo de la historia se han descubierto obras inéditas y no catalogadas de compositores barrocos y clásicos importantes. En estos escenarios y frente a posibles fraudes comercialmente intencionados la musicología debe jugar un papel importante en la autenticación de estas obras frente a la posibilidad de que dicha atribución no sea correcta.

Por tanto, y dejando de lado muchas otras referencias históricas de atribuciones erróneas, y dada la trascendencia histórica y económica de este tipo de descubrimientos, la musicología tiene que tener herramientas y métodos objetivos para poder fundamentar este tipo de atribuciones con unos índices de fiabilidad altos y por medio de criterios objetivos.

Cierto es que hasta la fecha ha habido en los últimos 10 años investigaciones relacionadas con la clasificación de piezas musicales en base a su estilo y a su compositor (ver “Capítulo 2. Revisión de investigaciones realizadas” a partir de la página 26). La mayoría de dichas investigaciones han clasificado piezas por estilo musical/compositor por medio de modelos estocásticos y redes neuronales con experimentos poco comprometidos es decir, estas investigaciones han intentado clasificar piezas musicales de estilos tan dispares como la música clásica y el jazz.

Las investigaciones que más próximos han sido los compositores involucrados en sus experimentos, han experimentado sus métodos con formas musicales muy concretas (cuartetos de cuerda, obras corales, etc.) tales como la investigación de Dor y Reich [2] y la de Ferkova y Ferkova, Milan y Šidlik[3] en las cuales clasifican automáticamente obras de compositores bastante dispares históricamente el primero y de compositores próximos en estilo pero en el ámbito muy concreto de los cuartetos de cuerda de 3 compositores. En ambas investigaciones sin embargo, no únicamente presentan los resultados sin plantear la posibilidad de que una herramienta tecnológica pueda ser una herramienta de uso común para los musicólogos.

Se han realizado también aproximaciones a la definición de material musical por medio de gramáticas [4] por Pérez-Sancho, Rizo e Iniesta entre otros, para poder así darles un tratamiento matemático. Dichas aproximaciones se han aplicado principalmente a las corales luteranas de Bach.

Ninguna de ellas sin embargo, ha planteado sus métodos como un método de identificación de la autoría frente a dos compositores candidatos.

En cualquier caso, los métodos presentados en esta tesis doctoral son una herramienta más al servicio de la musicología para arrojar luz respecto al posible autor de una obra musical clásica en el caso de que se dude sobre su autoría y no haya acuerdo entre los especialistas.

Las diferencias principales con los anteriores métodos, son las siguientes:

- Los métodos presentados en esta tesis doctoral son más simples que los utilizados hasta la fecha.
- Son aplicables a un ámbito de actuación mayor.

---

<sup>19</sup> Información obtenida en “[http://cultura.elpais.com/cultura/2012/03/02/actualidad/1330712942\\_835294.html](http://cultura.elpais.com/cultura/2012/03/02/actualidad/1330712942_835294.html)” en 7/1/2013.



- Consiguen unos resultados mejores (medidos en el porcentaje de éxito en la clasificación de las piezas de un compositor).

## Opiniones de profesionales de la música sobre el problema

Con el objetivo de validar y apoyar la idea inherente a los métodos desarrollados en esta tesis doctoral y a las variables utilizadas, se ha consultado a una serie de músicos de prestigio internacional la validez de los hechos identificados.

Si bien, como se ha comentado anteriormente, la musicología basa en términos generales la atribución de una obra dudosa a un determinado compositor en base a un análisis de su armonía, forma, ritmo etc. en elementos concretos de su partitura comparándola con elementos similares hallados en obras reconocidas de dicho autor, lo cierto es que hay una opinión generalizada entre los profesionales de la música al respecto que es la siguiente:

*Hacen falta unos pocos segundos de audición para al menos, tener unos indicios claros y una certeza de su estilo y época musical, tal como se demuestra a continuación.*

A lo largo del tiempo en que se ha desarrollado esta tesis doctoral, el autor ha aprovechado la oportunidad que ofrecía su participación como músico en los conciertos de la OCIM<sup>20</sup> para entrevistar de manera personal e informal a los directores y solistas invitados al *stage*<sup>21</sup> y plantearles las siguientes preguntas:

1. ¿Cuántos segundos necesita Vd. escuchar de una obra musical para identificar el estilo musical?
2. A la respuesta de la pregunta anterior, en el caso de cambiar la instrumentación<sup>22</sup> de la obra para crear confusión, ¿Cuántos segundos más necesitaría escuchar para identificar el estilo musical?
3. ¿Cuántos segundos necesita Vd. escuchar de una obra musical para identificar su autor?
4. ¿Puede confundir la versión<sup>23</sup> de la pieza musical respecto a la identificación del estilo musical y del autor de la misma?

La Tabla 2 resume los nombres y ocupaciones de los profesionales de la música a los cuales se ha formulado de manera informal las preguntas anteriores.

Nombre	Ocupación	Fecha entrevista
Albert Díaz <sup>24</sup>	Profesor de Piano del <i>Conservatori Superior de les Illes Balears</i>	Septiembre 2010
Ramón Andreu	Profesor de violín del <i>Conservatori Professional de les Illes Balears</i>	Mayo 2009

<sup>20</sup> Orquesta de Cambra Illa de Menorca <http://www.joventutsmusicalsdemaio.com/ocim/dades/orquestra.html>

<sup>21</sup> Término del inglés que significa “etapa” se utiliza en el ámbito musical para identificar un periodo de tiempo de unos pocos días en los cuales una orquesta ensaya intensivamente para ofrecer un concierto al final de ese *stage*. Permite a una orquesta ofrecer un funcionamiento más o menos regular sin necesidad de tener una plantilla de músicos remunerada de manera estable.

<sup>22</sup> Entendiendo por “instrumentación” al número de líneas melódicas o pentagramas y al instrumento que toca cada una de estas líneas melódicas.

<sup>23</sup> Entendiendo por “versión” al resultado sonoro generado por diferentes intérpretes u orquestas del mismo nivel profesional.

<sup>24</sup> Consultar “[http://es.wikipedia.org/wiki/Albert\\_Díaz](http://es.wikipedia.org/wiki/Albert_Díaz)” para consultar información relacionada con su currículo.

Nombre	Ocupación	Fecha entrevista
Tomeu Mut	Profesor de órgano del <i>Conservatori Professional de les Illes Balears</i>	Mayo 2011
Gordan Nikolic <sup>25</sup>	Concertino <i>London Symphony Orchestra</i>	Agosto 2011
Cristóbal Soler <sup>26</sup>	Director musical del Teatro de la Zarzuela de Madrid	Diciembre 2010
Celine Flamen	<i>Orchestra Symphonique Pas-de-loup de Paris</i>	Agosto 2011
Gabriel Julià	Historiador y musicólogo	Agosto 2010
Joan Company	Director Coral Universitaria de la UIB	Marzo 2009
Vasko Vassilev <sup>27</sup>	<i>Concertmaster de la Royal Opera House (Londres)</i>	Diciembre 2005
Matthew Trusler <sup>28</sup>	Violinista/Concertista	Diciembre 2008
David Russell <sup>29</sup>	Concertista de guitarra	Agosto 2008
Simone Bernardini <sup>30</sup>	Director y violinista de la <i>Orquesta Filarmónica de Berlín</i>	Agosto 2007
Liana Issakadze <sup>31</sup>	Solista/Concertista de violín (asistente de Oistrakh)	Agosto 2006
Isabel Félix	Profesora de piano <i>Conservatori Superior de les Illes Balears</i>	Mayo 2011
José Manuel Álvarez	Profesor de violín <i>Conservatori Superior de les Illes Balears</i>	Diciembre 2010

Tabla 2: Profesionales del mundo musical entrevistados.

Las respuestas a la primera pregunta fueron unánimes. Entre 2 y 10 segundos. Algunos entrevistados se resistían a contestar una pregunta tan amplia con una formulación tan corta, es decir, añadían objeciones a la pregunta considerando que dependía de otros factores.

En lo que respecta a la segunda pregunta, los entrevistados necesitaban de una precisión en relación a lo que se refería la pregunta por “cambiar la instrumentación”. Se les concretaba un ejemplo como el siguiente: “interpretar un cuarteto de cuerda clásico (2 violines viola y violonchelo) con un fagot dos saxofones y una marimba<sup>32</sup>”.

La respuesta a la segunda pregunta también fue bastante unánime coincidiendo todos ellos en que no serían necesario mucho más tiempo de audición que el necesitado en la primera pregunta para identificar el estilo musical.

Las respuestas a la tercera pregunta fueron más variadas. De hecho nadie de los encuestados se atrevió a ofrecer una estimación del tiempo al considerar la gran cantidad de factores a tener en cuenta.

25 Consultar “[http://en.wikipedia.org/wiki/Gordan\\_Nikolitch](http://en.wikipedia.org/wiki/Gordan_Nikolitch)” para consultar a su currículo actualizado.

26 Consultar “<http://www.cristobalsoler.com/#home>” para consultar su currículo actualizado.

27 Consultar “<http://www.vaskovassilev.com/>” para consultar su currículo actualizado.

28 Consultar “<http://www.matthewtrusler.com/profile.htm>” para consultar su currículo actualizado.

29 Consultar “[http://es.wikipedia.org/wiki/David\\_Russell](http://es.wikipedia.org/wiki/David_Russell)” para consultar su currículo actualizado.

30 Consultar “<http://www.berliner-philharmoniker.de/en/orchester/mitglieder/musiker/simon-bernardini/>” para consultar su currículo actualizado.

31 Consultar “[http://en.wikipedia.org/wiki/Liana\\_Isakadze](http://en.wikipedia.org/wiki/Liana_Isakadze)” para acceder a su currículo.

32 Técnicamente no tiene porqué ser interpretado en la realidad sino que por medio de un sintetizador se pueden asignar timbres de diferentes instrumentos a cada una de las voces de la pieza musical.

Sin embargo, cierto es que si unos pocos segundos (o incluso minutos) no eran suficientes para identificar el autor o al menos para ofrecer un(os) probable(s) compositor(es), más tiempo de audición probablemente no aportaría más información relevante para su identificación.

Respecto a la cuarta pregunta planteada, la respuesta ha sido unánime. La identificación del estilo y posible autor de una pieza será independiente de la versión de la interpretación por diferentes intérpretes u orquestas. Es decir, no influirá en la identificación mental de los rasgos identificativos del estilo musical y el compositor aspectos relacionados con la interpretación (tempo, expresividad, brillo, calidez, etc.)

Esto permite concluir respecto a la tercera pregunta que es en los primeros segundos de audición de la pieza cuando nuestra mente identifica rápidamente los rasgos identificativos establece unas primeras hipótesis de autoría.

De estas entrevistas, se extraen unas conclusiones orientativas que avalan por parte de los profesionales de la música lo siguiente:

- Bastan unos pocos segundos de audición de una pieza musical clásica para identificar su estilo musical por parte de un público experto.
- La variación en la instrumentación y la forma de la pieza musical no afectará en la identificación de esos rasgos que identifican el estilo musical.
- En el proceso de identificación del compositor de una pieza musical a partir de una audición de la misma por un público experto, los rasgos identificados en los primeros segundos de audición son los más significativos para teorizar sobre su autor.
- Los tratados de formas musicales y musicología focalizan su descripción de los estilos musicales de cada época e incluso de cada autor en base a cuestiones generales de la obra si entrar en los detalles del bajo nivel.

## **Objetivo de esta tesis doctoral**

El objetivo de esta tesis doctoral ha sido crear métodos basados en las Tecnologías de la Información que a partir de las partituras de piezas musicales reconocidas de dos compositores clásicos candidatos cada uno de ellos a ser reconocido como el autor de una obra de autoría dudosa, puedan ofrecer a la musicología herramientas complementarias que ofrezcan información cuantificada acerca de la posible autoría de la obra analizando analogías en los patrones imposibles de identificar mediante un simple análisis de la forma y la armonía de la obra.

Las características de dichos métodos deben ser las siguientes:

- **Objetivos:** Debe ofrecer resultados numéricos sin ningún tipo de aportación subjetiva por parte del investigador de la autoría de una obra dudosa, deben obtener resultados a partir de un número de piezas musicales reconocidas considerable para garantizar dicha objetividad.
- **Aplicables a obras de diferente orquestación forma y duración:** Se acepta por parte de los especialistas, que las obras compuestas por un mismo compositor independientemente de su forma musical su orquestación y su duración o magnitud tienen determinados elementos comunes que permiten atribuirlos a su estilo compositivo. Esta característica es muy restrictiva ya que ha de permitir analizar obras escritas para instrumentos solos monofónicos y compararlos con otras obras de los catálogos de los compositores candidatos escritas polifónicamente.
- **Aplicables a diferentes escenarios de atribución:** Muchas veces el número de obras reconocidas de los diferentes compositores candidatos es muy dispar. Ello provoca que

determinados métodos no pueden funcionar si los elementos (piezas musicales) de las muestras reconocidas de cada compositor difieren considerablemente en su número.

El hecho de presentar este método como una herramienta complementaria a la musicología es debido a reclamar su escenario de actuación como aquel en el que no hay una opinión generalizada entre los especialistas referente al compositor de una obra dudosa y dichos especialistas están claramente divididos entre dos posibles compositores candidatos.

Es decir, no se pretende que este método contradiga una opinión aplastante, fundada y probada por parte de los especialistas respecto a la autoría de una obra musical.

Para finalizar estos apartados, tras analizar la bibliografía existente y las diferentes opiniones de los especialistas y antes de plantear la hipótesis de trabajo se concluye lo siguiente:

- Existe la necesidad de diseñar métodos tecnológicos de apoyo a la musicología para dar solución al problema de la autoría de una obra dudosa cuando los especialistas no alcanzan una opinión común sobre la misma.
- Dicho problema existe en la actualidad y la musicología no dispone de herramientas ni métodos tecnológicos complementarios reconocidos para avalar o refutar la autoría de una obra frente a dos o más compositores candidatos.
- Dichas herramientas deben ser objetivas, aplicables a un gran volumen de obras reconocidas y deben analizar aspectos intratables tales como los elementos de bajo nivel existentes en una partitura.

## Hipótesis

Debido a que una partitura musical está expresada por medio de un lenguaje formal que deja (en lo que a la investigación respecta) poco margen en la interpretación y habiendo avalado por profesionales de la música de prestigio internacional las cuestiones presentadas en esta tesis doctoral, la siguiente cuestión planteada es:

- ¿Cuáles son los rasgos cuantificables que identifican el estilo musical de un compositor en unos pocos segundos de audición independientemente de la forma musical<sup>33</sup> de una pieza musical y de su instrumentación?

Expresada de otro modo y con el objetivo de mostrar la utilidad de la aplicación de los métodos desarrollados en la musicología se puede expresar también de la siguiente forma:

- A partir de estos indicadores de bajo nivel que definen el estilo musical de un autor clásico, ¿Se puede diseñar un método numérico que permita clasificar piezas por autor e identificar frente a dos posibles candidatos (en caso de dudas entre la comunidad de expertos), quien fue el compositor de la misma?

La hipótesis basada en los elementos musicales que hay en unos pocos segundos o compases de material musical en formato MIDI es la siguiente:

- *Los rasgos que identifican el estilo musical de una obra musical clásica así como el estilo musical de un autor clásico se encuentran en elementos de bajo nivel tales como la frecuencia de uso de cada nota, de cada intervalo melódico<sup>34</sup> absoluto a la tonalidad y de cada duración de nota<sup>35</sup> relativa al compás de la obra musical. Dichos elementos se*

---

33 Consultar página 244 (capítulo Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados) para una explicación detallada.

34 Consultar página 247 (capítulo Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados) para una explicación detallada.

*encuentran presentes en su catálogo independientemente de la orquestación y la forma musical de cada una de ellas.*

## **Desarrollo de la aplicación AN\_MID v5.1**

Planteada la hipótesis anterior, ha sido necesario disponer de una aplicación informática que, a partir de un fichero musical en formato MIDI, realice un recuento del número de veces que en todas las líneas melódicas cada una de las 12 notas es seguida por cada una de las 12 notas del sistema tonal.

Dicho proceso se debe realizar sobre toda la partitura en cada una de las voces de su orquestación ya que como objetivo de la tesis se ha marcado que los métodos desarrollados han de ser de aplicación a obras de diferente orquestación.

Este proceso no es trivial ya que el formato MIDI, si bien es una traducción de la partitura de una obra a un partitura digital discreta, el modo como están almacenadas los mensajes de activación de cada nota están ligados a las otras líneas melódicas del mismo pentagrama o mismo timbre (ver figuras 16, 17, 18 y 19 en páginas 88-90 para una explicación detallada). Eso implica que la identificación correcta de los intervalos melódicos (a partir de un fichero MIDI) no es un proceso trivial a nivel de programación en especial en partituras para piano en cuyos ficheros MIDI no existe información de la relación de las notas en una misma línea melódica.

Tampoco es trivial la identificación de las duraciones de notas detectadas en las notas en una obra musical en formato MIDI ya que los diferentes tipos de duraciones de notas son limitados en una partitura escrita mientras que en el formato MIDI la duración de una nota, si bien no es una variable continua, lo es prácticamente porque permite almacenar duraciones de notas diferentes con un nivel de sensibilidad de 1/1024 partes de una nota negra. Los detalles de la explicación de los problemas y las soluciones tecnológicas implementadas se encuentra detallado en el “Capítulo 4. Desarrollo de la aplicación AN\_MIDv5.1” a partir de la página 80.

Analizado el software disponible, se constató que no existe una aplicación que extraiga dichos valores de un fichero MIDI tal como se necesitan para demostrar la hipótesis planteada. Ciertamente es que hay gran cantidad de programas que extraen características relacionadas con los intervalos melódicos utilizados, pero ninguna de las aplicaciones existentes analiza sistemáticamente todos los intervalos melódicos ni las duraciones de notas utilizadas.

Por tanto, se ha desarrollado en el lenguaje C++ una aplicación bautizada con el nombre AN\_MID (Analizador MIDI) en su última versión 5.0 que extrae de cada fichero MIDI procesado por ella los indicadores necesarios para, tras aplicar métodos de clasificación, probar la hipótesis planteada.

La aplicación AN\_MID ha sido desarrollada en C/C++<sup>36</sup> por los motivos siguientes:

1. Para permitir una gestión a bajo nivel muy eficiente en tiempo de ejecución (se necesita poder realizar rotaciones a nivel de bit).
2. Para dotarlo del mayor nivel de portabilidad posible.
3. Para conseguir un código ejecutable extremadamente eficiente a nivel de tiempo de ejecución y de gestión de recursos de memoria.
4. No ha sido una prioridad el diseño de una interfaz de usuario ya que es una aplicación más bien de ejecución en proceso *batch*.

---

<sup>35</sup> Consultar página 239 (capítulo Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados) para una explicación detallada.

<sup>36</sup> Consultar página 276 (Anexo 2 – Conceptos TIC y matemáticos utilizados.) para una explicación detallada.

La aplicación resultante contiene 1463 líneas de código C++ y su desarrollo ha conestado de las siguientes etapas:

1. Análisis y comprensión detallada del formato MIDI tanto en su versión de transmisión de señales MIDI como en su versión de almacenamiento de material musical en un fichero en un dispositivo de almacenamiento secundario.
2. Definición de requisitos de la aplicación y análisis de las funcionalidades de la misma.
3. Diseño y programación de la aplicación.
4. Realización exhaustiva de pruebas del correcto funcionamiento de la misma porque habría sido difícil detectar errores en la identificación del porcentaje de uso de intervalos melódicos a partir de los resultados.

El resultado final es la versión 5.0 de la aplicación MIDI la cual, en sus diferentes versiones, ha ido añadiendo funcionalidades a su diseño inicial para dar respuesta a las necesidades de las diferentes investigaciones incluidas en este documento.

El resultado final ha sido muy satisfactorio ya que la aplicación AN\_MIDv5.1 obtiene los 12 porcentajes de uso de cada nota, los 144 porcentajes de uso de cada intervalo melódico y (en promedio) 80 porcentajes de uso de diferentes tipos de duraciones de notas de cada pieza musical en una muestra de 90 piezas musicales clásicas en aproximadamente 2 segundos de ejecución en un ordenador personal con procesador Pentium 2,80Ghz y 1,5 Gb de RAM.

## Resultados programados

Las investigaciones llevadas a cabo para la demostración de la hipótesis planteada han generado los resultados enumerados en la Tabla 3 y se encuentran analizados en detalle a lo largo de este documento.

Capítulo	Página
Capítulo 6. Un nuevo enfoque cuantitativo en la identificación del estilo compositivo de autores clásicos (F.J.Haydn, W.A.Mozart, D. Scarlatti, y L.v.Beethoven)	109
Capítulo 5. Clasificación de estilos musicales clásicos por medio de análisis discriminante	97
Capítulo 7. Análisis comparativo de aplicación de métodos de minería de datos versus algoritmos evolutivos a la clasificación automática de piezas musicales de compositores clásicos.	120
Capítulo 9. Resultados de aplicación de los métodos presentados a obras dudosas de J.S.Bach	152

*Tabla 3: Resultados principales presentados en esta tesis doctoral.*

La Figura 1 presenta gráficamente una cronología del orden en el cual se han obtenido los resultados de las tablas 3 y 4 a lo largo del desarrollo de esta tesis. Dicho orden no coincide con el orden de presentación de los capítulos de resultados en este documento ya que en él, aparecen por orden de relevancia de los mismos.

La Figura 1 muestra en la parte izquierda los resultados identificados como principales y en la parte derecha los identificados como resultados colaterales. No hay una relación proporcional entre la ubicación exacta de cada resultado en el eje temporal (eje vertical) y el instante en el tiempo en

que se ha alcanzado cada resultado, es decir, la Figura 1 identifica la secuencia temporal de en la que se han ido produciendo cada uno de los resultados.

## Resultados colaterales

En la investigación realizada para dar respuesta a la hipótesis planteada, aparte de lo que llamaríamos investigaciones principales que han dado resultados programados, se han desarrollado una serie de resultados y métodos numéricos llamados “colaterales” por no ser los marcados inicialmente por el objetivo de demostrar la hipótesis planteada.

Dichos resultados están detallados en la Tabla 4 y ordenados por orden de aparición en este documento.

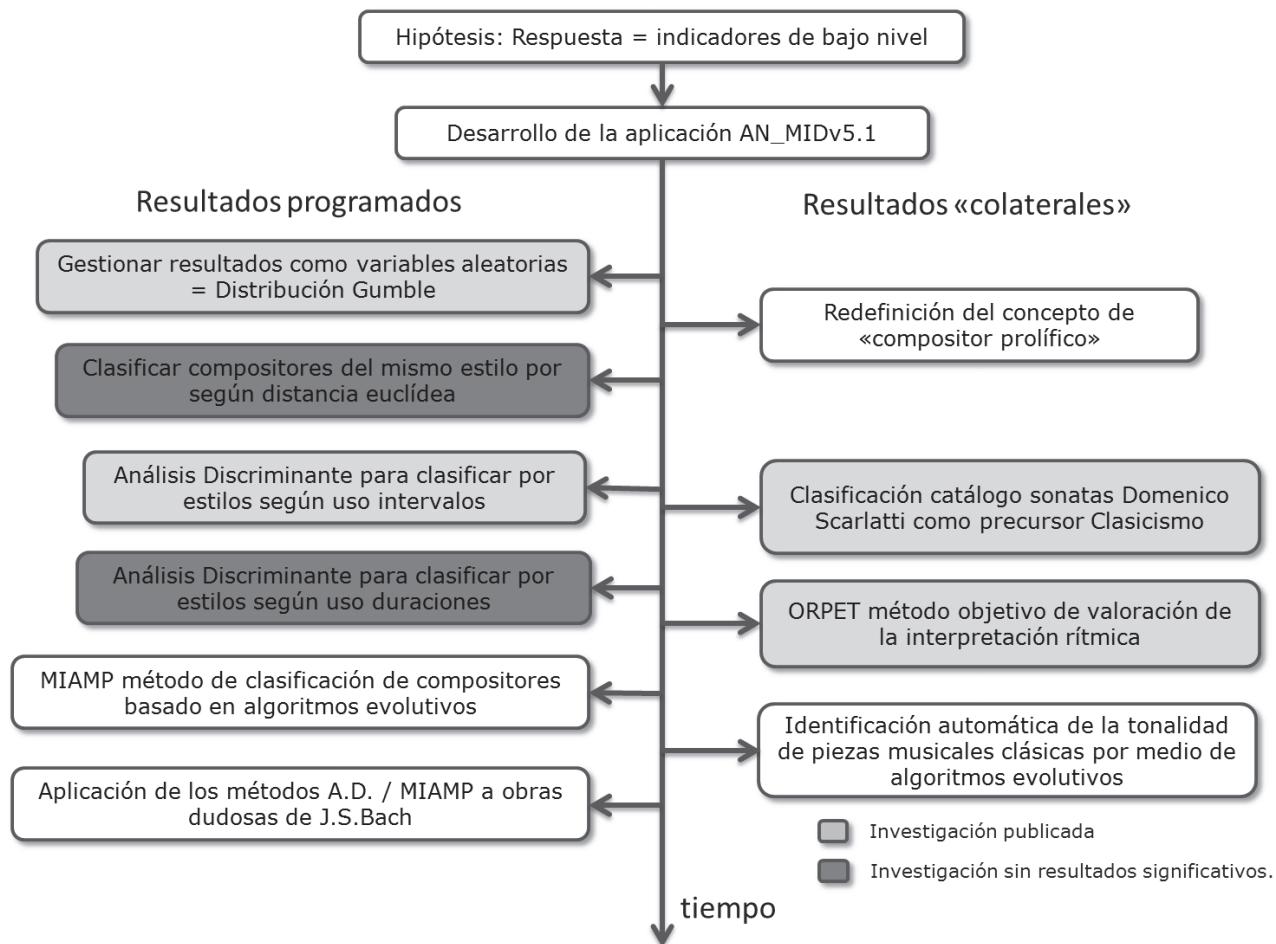


Figura 1: Cronología de las investigaciones realizadas. (Los textos de las investigaciones de la parte izquierda no coinciden en nombre con los nombres de los capítulos por tamaño y por dar en esta figura una idea resumida del resultado principal de cada una de los “Resultados Programados”).

Id	Capítulo	Página
1	Capítulo 10. Una nueva definición del término “compositor prolífico”	160
2	Capítulo 11. O.R.P.E.T. (Objective Rhythmic Performance Evaluation Tool) un método numérico objetivo de evaluación de la interpretación musical	171
3	Capítulo 12. Identificación automática de la tonalidad de piezas musicales clásicas por medio de algoritmos evolutivos	184

Id	Capítulo	Página
4	Capítulo 13. Identificación de rasgos en el estilo musical de las sonatas para teclado de Domenico Scarlatti por medio de herramientas matemáticas y tecnológicas.	202

Tabla 4: Resultados colaterales presentados en esta tesis doctoral.

Estos resultados de la Tabla 4 han si alcanzados por dos caminos no excluyentes a saber:

- Al utilizar los resultados de la aplicación AN\_MIDv5.1 a problemas no contemplados en un principio como es el caso de las investigaciones colaterales con Id igual a 1 y 2.
- Al aplicar métodos estadísticos ya conocidos o desarrollados en esta tesis doctoral para otros objetivos como es el caso de las investigaciones colaterales con Id igual a 3 y 4.

Más adelante en el “Capítulo 3. Resumen del desarrollo de las investigaciones” (página 74) se explicará de un modo más detallado las fases de esta investigación y los resultados parciales que se han ido alcanzando y de qué modo dichos resultados parciales han condicionado el desarrollo de las otras partes de la investigación.

## Resumen de los contenidos de este documento

En el capítulo 2 el lector encontrará el estado del arte de investigaciones realizadas en las TIC aplicadas a la música que de una manera u otra guardan relación con el presente trabajo.

En el capítulo 3 se encuentra un breve resumen de los resultados obtenidos en esta tesis doctoral ordenados cronológicamente para relacionar y componer la línea de investigación realizada a lo largo del tiempo.

En el capítulo 4 se detallan técnicamente las cuestiones del desarrollo de la aplicación informática AN\_MIDv5.1 encargada de obtener los indicadores numéricos de cada pieza analizada para ser procesadas posteriormente por los diferentes métodos aplicados. Dicho capítulo tiene un componente tecnológico importante.

En el capítulo 5 se detallan los resultados obtenidos al aplicar la técnica de análisis discriminante a los indicadores obtenidos por la aplicación AN\_MID y nombrados en la hipótesis del trabajo.

En el capítulo 6 básicamente se descubre al similitud de las variables aleatorias creadas con una distribución de *Gumble* y se muestran los resultados de aplicación a obras de Haydn, Mozart, Scarlatti y Beethoven.

En el capítulo 7 y tras las limitaciones de los métodos utilizados en los capítulos anteriores el lector encontrará la descripción y aplicación de un método basado en una distancia euclidiana ponderada optimizada por un algoritmo evolutivo comparando sus resultados por Iso obtenidos por otras investigaciones anteriores.

En el capítulo 8, se resumen los resultados de experimentar con la aplicación de otros métodos tecnológicos a los datos utilizados en el capítulo 7 para reafirmar que los resultados obtenidos con los métodos descritos en dicho capítulo 7 son mejores que los obtenidos con otros métodos.

En el capítulo 9 se aplican los métodos utilizados en el capítulo 5, 6, y 7 a obras dudosas del catálogo de obras para órgano de J.S.Bach para emitir un resultado de autoría o no de ellas por parte de Bach.

En el capítulo 10 se utiliza el recuento de notas de un catálogo musical de un compositor por medio de la aplicación desarrollada en el capítulo 4 para redefinir de un modo más objetivo el concepto de “compositor prolífico”.



En el capítulo 11 se muestra la definición de un método simple y objetivo de cálculo de la precisión rítmica de una interpretación en base a una interpretación modelo por medio de los indicadores de duraciones de notas obtenidos por medio de la aplicación AN\_MIDv5.1 detallada en el capítulo 4.

En el capítulo 12, se crea un método más fiable que los desarrollados hasta la fecha para calcular la tonalidad de una pieza musical. Dicho método es más simple, con un ámbito de aplicación más vasto y con unos mejores resultados de éxito.

En el capítulo 13 se aplica a los indicadores de los métodos diseñados en los capítulos anteriores el análisis discriminante para clasificar a lo largo del tiempo las sonatas para teclado de Domenico Scarlatti mostrando una clara tendencia hacia el clasicismo.

En el capítulo 14 el lector hallará aquellas investigaciones que no han alcanzado resultados significativos como es el caso de la utilización como identificadores de clasificación los porcentajes de uso de cada duración de nota.

Y ya para finalizar, en el capítulo 15 el lector hallará las conclusiones de esta tesis doctoral.

De ahí en adelante aparecen unos anexos referenciados en los capítulos anteriores detallando conceptos musicales, tecnológicos, bibliográficos de los compositores analizados, el código fuente de la aplicación AN\_MIDv5.1 y el manual de usuario del mismo.

## Capítulo 2. Revisión de investigaciones realizadas

### Introducción

El presente capítulo realiza un recorrido por las investigaciones realizadas en áreas relacionadas con el área de estudio en la que se enmarca esta investigación. De este recorrido se desprende que la investigación presentada no es la continuación de ninguna investigación anterior y mucho menos de una investigación con unos objetivos de simplicidad en los métodos diseñados tan grande como la exigida desde un principio en esta investigación, ahora bien, sí que se puede decir que las investigaciones realizadas demuestran que existe un vasto campo abarcable mediante el uso de procesos computarizados para extraer información de piezas musicales.

Las investigaciones anteriores relacionadas con esta tesis doctoral pueden clasificarse en tres tipos:

- **Análisis de señal sonora:** Las investigaciones enmarcadas en este tipo son todas aquellas que obtienen datos de las piezas musicales por medio del análisis de la señal acústica de una grabación en cualquiera de sus formatos posibles (MP3<sup>37</sup>, WAV, flac, etc.).
- **Análisis numérico:** Las investigaciones enmarcadas en este tipo básicamente extraen a partir de un corpus de obras musicales a partir de cualquiera de los formatos digitales de partituras (principalmente formatos MIDI por ser un formato ampliamente extendido) indicadores numéricos diversos incalculables manualmente con los que pueden inferirse conclusiones sobre dichos conjuntos de obras musicales. El presente proyecto de tesis doctoral estaría enmarcado en este tipo de investigación.
- **Análisis simbólico:** Las investigaciones de este tipo también extraen información de corpus de piezas musicales como las de tipo análisis numérico pero con el objetivo de construir estructuras de datos de alto nivel que permitan obtener una clasificación de dichas piezas musicales por medio de la identificación de similitudes en las estructuras de datos extraídas.

Cada artículo o investigación documentada finalizará con un apartado llamado “sinergias” en el cual se analizan aquellos aspectos que han sido considerados de interés comentar de la relación entre la investigación estudiada y la investigación objeto de esta tesis doctoral.

### Frecuencia de uso de acordes - Ferkova, Ždimal, Šidlik

Ferkova, Ždimal y Šidlik[3] proponen el estudio de estilos compositivos de Mozart<sup>38</sup>, Schubert y Brahms a partir del estudio de las frecuencias de uso de los diferentes acordes<sup>39</sup> de 3 y 4 notas [3] desde una perspectiva armónica. Esta investigación se enmarca en el tipo de Análisis Numérico.

Este trabajo pone de manifiesto la dificultad que entraña diseñar un algoritmo de identificación del acorde que está presente en cada momento en la interpretación de una obra musical (algo relativamente simple para un humano experto en música clásica mediante la audición de la misma)

---

37 Consultar página 245 (capítulo Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados) para una explicación detallada.

38 Consultar las páginas 333, 341 y 316 (capítulo Anexo 4 – Información de compositores analizados y catalogación.) para unas breves notas biográficas de los compositores (en el orden en que han sido enumerados)

39 Consultar página 228 (capítulo Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados) para una explicación detallada.

El algoritmo diseñado en esta investigación aplica las reglas de modulación entre tonalidades<sup>40</sup> próximas existentes en la música tonal como método de identificación de la tonalidad presente en cada momento.

Dicha investigación sin embargo presenta como precondition de aplicabilidad del algoritmo diseñado, la existencia simultánea de tres o más notas ejecutándose para poder identificar el acorde presente en cada en cada instante. Es decir, la investigación reconoce la imposibilidad de identificar el acorde en los instantes en que sólo 1 o 2 notas están sonando simultáneamente.

El corpus de piezas musicales analizadas es de 27 movimientos de W.A.Mozart, 33 movimientos de F.Schubert y 32 movimientos de J.Brahms. Dicho corpus no es excesivamente grande dada la producción de estos 3 compositores.

Este estudio se analizan 4 tipos de triadas (Mayor, menor, aumentada y disminuida) y 7 tipos de cuatrías y se demuestra que los porcentajes de aparición de cada una de estas triadas o cuatrías respecto a la tonalidad de la pieza varían dependiendo del compositor.

Sin embargo, únicamente ponen de manifiesto estas diferencias sin analizar la posibilidad de identificar un método automático de clasificación de piezas de cada compositor a partir del porcentaje de uso de dichas triadas y cuatrías.

En la investigación analizada se reconoce que el algoritmo debe ser mejorado para identificar idiosincrasias de otros compositores que no fueran Mozart, Brahms o Schubert.

### Sinergias

Este trabajo, pone de manifiesto que los compositores estudiados registran diferencias importantes en el porcentaje de uso de los acordes analizados, sin embargo no presenta ningún método para diferenciarlos.

Este trabajo coincide en el presente proyecto de tesis en la teoría de que la respuesta al estilo compositivo de un compositor concreto está en los pequeños elementos de su composición. Los autores buscan la respuesta en el uso de acordes y nuestro proyecto de tesis lo busca en el uso de intervalos melódicos.

Por otro lado, también reconoce que dicho método no puede aplicarse a piezas en las cuales no haya una mayoría de acordes triadas en ella, es decir, dicho análisis no puede realizarse sobre partitas para violín<sup>41</sup> o suites para violonchelo<sup>42</sup> de J.S.Bach, piezas que los métodos propuestos en esta tesis doctoral sí que permiten analizar piezas de estas características.

### ***Automatic music classification - McKay, Fujinaga***

En esta investigación [5] se aplica un programa informático llamado *Bodhidharma MIDI classification system* que por medio de conjuntos de redes neuronales<sup>43</sup> identifica taxonomías de piezas musicales para clasificarlas por género musical con buenos resultados.

Dicho algoritmo es del tipo de algoritmo genético cuyo objetivo es buscar una solución aceptable aunque no óptima de lo que define como cromosomas (conjunto de características de una pieza musical). Dichos “cromosomas” serán aceptados como válidos si permiten clasificar con un porcentaje aceptable de éxito las piezas analizadas.

---

40 Consultar página 261 (capítulo Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados) para una explicación detallada.

41 Consultar página 344 (capítulo Anexo 4 – Información de compositores analizados y catalogación.) para una explicación detallada.

42 Consultar página 345 (capítulo Anexo 4 – Información de compositores analizados y catalogación.) para una explicación detallada.

43 Consultar página 290 (capítulo Anexo 2 – Conceptos TIC y matemáticos utilizados.) para una explicación detallada.

Las piezas analizadas corresponden a estilos de música moderna tales como Bebop, Jazz soul, Swing, Rap, Punk, Country, Barroco, Clásico moderno y Romántico y el sistema las clasifica en este nivel de detalle enumerado añadiendo la posibilidad de identificar un segundo nivel de detalle (*full taxonomy*) en subtipos los cuales son añadidos a los tipos generales.

Es decir los tipos Barroco, Clásico moderno y Romántico pueden subdividirse en los siguientes subtipos: Barroco, Clásico, Música temprana (Medieval, Renacentista), Clásico moderno y Romántico.

La aplicación *Bodhidharma* a partir de una versión MIDI de cada pieza musical extrae 111 características clasificables en 6 categorías:

- Instrumentación: Tipos de instrumentos presentes e interacción entre los instrumentos tonales y los no tonales (principalmente del tipo percusión).
- Textura: Características relacionadas con la interacción entre las diferentes voces así como la importancia de cada una de ellas.
- Ritmo: Características relacionadas con los patrones rítmicos utilizados, utilización o no de *rubatos*, variación de los patrones rítmicos en las diferentes voces.
- Elementos dinámicos: Cómo suenan en volumen y ataque las notas en las diferentes voces, y cómo cambian dichas características en las diferentes voces y en a lo largo de la ejecución de la pieza musical.
- Estadísticas de notas utilizadas: Cuáles son los porcentajes de aparición de las diferentes notas y de la diferentes clases tonales (acordes, tonalidades)
- Características melódicas: Tipo de intervalos melódicos presentes, tipo de frases utilizadas y frecuencia de repetición de dichas frases.

En las pruebas realizadas se han conseguido porcentajes de éxito en la clasificación del orden del 97% en la clasificación de tipos generales y del 85% de éxito en la clasificación de piezas musicales en los subtipos (explicados en el párrafo anterior).

Dichos porcentajes de éxito se han obtenido utilizando las 111 características extraídas de cada pieza musical, cayendo los resultados a valores del 97% y 73% en la clasificación de tipos y subtipos respectivamente cuando se reduce el número de características analizadas a 56.

### Sinergias

La investigación estudiada considera como los indicadores de mayor peso los asociados a los porcentajes de tiempo que se utilizan cada uno de los timbres del sistema MIDI<sup>44</sup> (128 en total). Como es lógico será fácil identificar una pieza como “Blues rock” si los instrumentos utilizados mayoritariamente son la batería la guitarra eléctrica distorsionada, el bajo eléctrico y el piano o órgano Hammond así como será fácil identificar una pieza como barroco si está presente en el fichero MIDI el timbre del clavecín o *harpsichord* (timbre MIDI nº 7).

Como se verá más adelante en la exposición del método MIAMP, la presente investigación consigue los mismos índices de éxito utilizando únicamente 34 características homogéneas de cada pieza permitiendo no sólo clasificar piezas por género sino por el compositor de cada pieza.

---

44 Consultar página 307 (capítulo Anexo 3 – Conceptos asociados al estándar MIDI) para una explicación detallada.

## ***jSymbolic: A feature extractor for MIDI files - McKay, Fujinaga***

En esta investigación [6] del año 2006, se presenta una aplicación informática desarrollada en lenguaje Java<sup>45</sup> bautizada con el nombre *jSymbolic*, la cual extrae 160 valores heterogéneos de un conjunto de ficheros MIDI que se le hayan pasado como parámetros.

Esta investigación es una continuación de la resumida anteriormente ([5]) ya que amplía los 111 valores extraídos por la aplicación *Bodhidharma* a 160 características.

A las seis categorías de datos extraídas en la aplicación *Bodhidharma*, *jSymbolic* se le añaden indicadores de las mismas categorías y se añade una nueva categoría:

- Características armónicas: acordes que se encuentran en la pieza, tipo de acordes que representan, movimiento armónico detectado y velocidad de dichos cambios.

El programa es libre y puede descargarse en <http://sourceforge.net/projects/jmir>.<sup>46</sup>

Este estudio únicamente presenta la herramienta *jSymbolic* anunciando que tiene como ámbitos de aplicación la búsqueda de características identificativas de los diferentes estilos musicales y hace un ofrecimiento a la comunidad científica para que otros investigadores enriquezcan la herramienta añadiendo rutinas de extracción de nuevas características.

### Sinergias

Este trabajo se asemeja al presentado en esta tesis doctoral en que obtiene los datos a partir de material MIDI y extrae lo que ellos definen como “indicadores de alto nivel”, entendiendo por alto nivel aquellos extraídos de la partitura<sup>47</sup>. Para los autores los indicadores de bajo nivel serían los que se obtiene a partir de la señal sonora de la ejecución de una pieza.

En este aspecto, esta tesis doctoral define como indicadores de bajo nivel datos elementales como notas utilizadas e intervalos melódicos utilizados y serían los elementos de alto nivel aquellos asociados a motivos, temas, exposiciones y desarrollos musicales.

Es decir, lo que los autores de este trabajo definen como indicadores de alto nivel, bajo nuestro punto de vista serían indicadores de bajo nivel reservando los indicadores de alto nivel a los utilizados directamente por los musicólogos.

## ***Style-independent computer-assisted exploratory analysis of large music collections - McKay Fujinaga.***

En esta investigación [7] los autores presentan una investigación dirigida a musicólogos e investigadores no expertos en Tecnologías de la Información realizando un estado del arte de las técnicas de MIR<sup>48</sup> a disposición de la investigación poniendo especial énfasis en sus investigaciones pasadas ([5] y [6]).

En especial se expone desde un punto generalista, la diferencia entre técnicas de aprendizaje asistido y de aprendizaje no asistido a partir de características definidas como de alto nivel.

Se presenta en el estudio las técnicas de identificación de patrones de clasificación basadas en la confección de histogramas rítmicos con un ejemplo concreto a partir de una canción del grupo *punk* “Los Ramones”.

---

45 Consultar página 278 (capítulo Anexo 2 – Conceptos TIC y matemáticos utilizados.) para una explicación detallada.

46 Enlace disponible en fecha 4/12/2011.

47 Consultar página 256 (capítulo Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados) para una explicación detallada.

48 MIR: *Music Information Retrieval*.

Dichos histogramas han sido obtenidos a partir de versiones MIDI de las piezas musicales analizadas.

Se muestran resultados de experimentos de identificación de piezas musicales de Johannes Ockeghem<sup>49</sup> y Josquin Desprez<sup>50</sup> en un experimento de utilización de un sistema de aprendizaje asistido. Dicho experimento identifica a partir de 6 obras de cada compositor otras 3 obras de cada uno representando cada una de ellas gráficamente las reconocidas de cada uno por proximidad.

En el estudio se hace una proyección gráfica bidimensional para facilitar la comprensión de los resultados y de las predicciones de los mismos.

En ambos casos la tecnología subyacente son los sistemas expertos los cuales deciden qué características son las que permiten clasificar mejor las diferentes obras analizadas. Dichas características son las obtenidas con su aplicación jSymbolic.

El sistema experto utilizado en dicha clasificación es el sistema ACE (*Autonomous classification engine*) diseñado por los autores en 2005.

El estudio finaliza haciendo un recorrido por los diferentes campos de aplicación de las técnicas MIR.

### Sinergias

Este trabajo presenta similitudes con la investigación hecha en esta tesis doctoral ya que obtiene los datos de las mismas fuentes (ficheros MIDI). Y presenta un ejemplo de identificación de autoría de una serie de piezas musical de dos compositores candidatos.

Sin embargo, una de las diferencias más significativas con el presente proyecto de tesis es que nuestro modelo trabaja a partir de datos homogéneos de datos (todos los intervalos melódicos posibles) y que el objetivo final de nuestra investigación es crear un método de identificación de la autoría de una obra dudosa frente a dos compositores candidatos.

Nuestro modelo no tiene en cuenta cualquier otra característica que no sean las relaciones en el tiempo de las notas del sistema tonal, permitiendo crear un modelo extremadamente simple en su concepción.

### ***Pitch histograms in audio and symbolic music information retrieval - Tzanetakis, Ermolinskyi, Cook***

Esta investigación [8] compara diferentes métodos de clasificación de piezas musicales por género donde la que más interesa analizar por su relativa proximidad con los métodos propuestos en esta tesis doctoral es el que realiza una clasificación de piezas musicales por género utilizando las frecuencias de uso de cada una de las 128 notas del sistema MIDI. Los géneros clasificados y el número de piezas analizadas son los expresados en la Tabla 5

---

49 Consultar página 334 (capítulo Anexo 4 – Información de compositores analizados y catalogación.) para consultar unas breves notas biográficas.

50 Consultar página 322 (capítulo Anexo 4 – Información de compositores analizados y catalogación.) para consultar unas breves notas biográficas.

Estilo	Nº de piezas	Nº aciertos	% éxito
Electrónica	59	32	54%
Clásica	89	33	37%
Jazz	129	55	43%
Folk irlandés	134	83	62%
Rock	89	31	35%

Tabla 5: Estilos y número de piezas analizadas.

Dichos histogramas comparados mediante el método k-nn (*K nearest neighbors*)<sup>51</sup> obtiene los porcentajes de clasificación correcta resumidos en la Tabla 5.

El estudio considera los resultados significativamente mejores que los obtenidos a partir de una muestra aleatoria, con lo que demuestra que los histogramas de uso de notas ofrecen considerable información para la identificación del estilo musical.

También realiza histogramas de frecuencias a partir de la señal sonora generada a partir del fichero MIDI como segunda línea de investigación de los histogramas de uso de notas.

También se identifica el porcentaje de éxito en la identificación de un estilo musical mediante un experimento con humanos sometiéndolos a pequeñas audiciones de piezas de cada estilo (en muestras de 250 milisegundos y 3 segundos). En la exposición de 3 segundos el porcentaje de éxito conseguido es del 70%.

De ello concluye la naturaleza *fuzzy*<sup>52</sup> de los límites de los géneros musicales.

### Sinergias.

Este estudio se asemeja a algunas de las investigaciones incluidas en esta tesis doctoral en que utiliza el porcentaje de uso de las notas para clasificar piezas por género. Las investigaciones realizadas en esta tesis añaden al porcentaje de uso de notas el porcentaje de uso de los intervalos melódicos posibles.

Otra gran diferencia es que esta tesis doctoral considera todas las apariciones de cada nota independientemente de la octava<sup>53</sup> a la que pertenezcan como la misma ocurrencia de la nota, es decir, Todas las apariciones de las notas C1, C2, C3, C4 etc., serán consideradas como notas C (Do en la notación musical latina).

### ***A survey of music conformation retrieval systems - Typke, Wiering, Veltkamp.***

En esta investigación realizada en 2005,[9] se realiza un estado del arte de los diferentes sistemas de extracción de información musical (*MIR – Music Information Retrieval*). Clasificándolos en base al público objetivo que puede obtener de ellos un uso. Los colectivos de públicos objetivo definidos son: Industria, Consumidor final y músico profesional (investigador e intérprete).

El artículo enumera las 17 aplicaciones de MIR existentes hasta esa fecha analizando las características musicales que cada una de ellas trata (acústicas, tonales, duración de notas, ritmo, intervalos y contorno).

51 Consultar página 358 (capítulo Anexo 5 – Conceptos estadísticos utilizados.) para una explicación detallada.

52 Consultar página 280 (capítulo Anexo 2 – Conceptos TIC y matemáticos utilizados.) para una explicación detallada.

53 Consultar página 256 (capítulo Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados) para una explicación detallada.

Esta investigación clasifica los métodos MIR en dos grandes tipos: los que obtienen características audibles (generalmente a partir de una señal sonora) y los que obtienen datos simbólicos.

A su vez clasifica los sistemas que obtienen datos simbólicos en métodos basados en cadenas útiles para análisis de melodías monofónicas, en métodos basados en conjuntos útiles para análisis de música polifónica y en métodos basados en coincidencia probabilística. Un ejemplo del primer tipo serían aplicaciones desarrolladas para identificar similitudes entre melodías y detectar con ello posibles plagios.

Los sistemas que obtienen datos a partir de señales sonoras los clasifica en 4 tipos a saber:

- Extracción de características perceptivas relevantes. Sonoridad, Tono, brillo, resultados de filtrado de señales sonoras, resultados de derivación de señales. La sonoridad se refiere a medidas de cantidad de sonido (aproximadas por la raíz cuadrada de la energía de la señal calculada a partir de la transformada de Fourier<sup>54</sup>, en decibelios).
- Identificación de huellas sonoras. Estos sistemas ayudan a identificar una grabación independientemente de la calidad del sistema de grabación y/o reproducción utilizado.
- Métodos basados en conjuntos. Métodos que extraen de las señales sonoras características para ser después almacenadas y tratadas del mismo modo que si fuesen conjuntos de datos simbólicos.
- Métodos basados en mapas de organización. Métodos basados en redes neuronales y técnicas de autoaprendizaje.

Para finalizar, este artículo enumera los campos de utilidad de las herramientas de MIR en trece áreas que pueden agruparse por ámbitos de utilidad del siguiente modo:

- Detección de plagios y gestión de derechos de copyright.
- Clasificación de material musical por estilo, ambiente y características perceptivas.
- Identificación y clasificación de material musical por compositor e intérprete.

### Sinergias.

Esta investigación clasifica el objeto de investigación del presente proyecto de tesis en las herramientas de obtención de datos simbólicos y basadas en conjuntos de piezas para análisis de música polifónica.

Sin embargo, nuestro trabajo tratará el material polifónico de manera individual cada línea melódica con lo que también incluye características de las herramientas de análisis de material monofónico.

En cuanto a los campos de utilidad que nuestro trabajo abarca los ámbitos de clasificación de material musical por género y por compositor.

## **Information retrieval meta-evaluation: challenges and opportunities in the music domain - Urbano**

En este artículo [10], el autor exalta las virtudes de las técnicas de MIR como de gran utilidad en la investigación musicológica, sin embargo, considera que muchas de ellas no han tenido el rigor de una correcta evaluación científica.

---

<sup>54</sup> Consultar página 296 (capítulo Anexo 2 – Conceptos TIC y matemáticos utilizados.) para una explicación detallada.



Se detalla que en 2001 el ISMIR definió la necesidad de diseñar y estandarizar conjuntos de tests así como métricas de evaluación para la investigación MIR.

Durante décadas se ha utilizado como método el modelo de evaluación TREC [11], aunque el autor reconoce que las diferencias en el ámbito original de aplicación de esta herramienta de evaluación difieren de las necesidades específicas del campo MIR.

Finalmente en 2005 aparece la primera edición de MIREX (*Music Information Retrieval Evaluation eXchange*<sup>55</sup>).

Básicamente dicho método exige 7 principios de obligado cumplimiento para considerar la experimentación en MIR como válida desde el punto de vista científico. Dichos principios se resumen a continuación.

#### **1.- Validez de la construcción**

La validez de la construcción evalúa el grado en que las variables de un experimento se corresponden con el significado teórico del concepto que se pretende medir.

#### **2.- Validez del contenido**

La validez de contenido evalúa el grado en que las unidades experimentales reflejan y representan los elementos del dominio en estudio.

#### **3.- Validez de la convergencia**

La validación convergente evalúa el grado en que los resultados de un experimento deben coincidir con otros resultados, teóricos o experimentales, con los cuales debe estar relacionadas.

#### **4.- Validez de los criterios**

Mediante la validez de criterio se evalúa el grado en que los resultados de un experimento se correlacionan con los de otros experimentos de los cuales se sabe que los resultados son válidos.

#### **5.- Validez Interna**

En la validación interna se evalúa el grado en que las conclusiones de un experimento pueden ser rigurosamente elaboradas desde el diseño experimental seguido, y no desde otros factores ajenos a la investigación.

#### **6.- Validez externa**

La validez externa evalúa el grado en que los resultados de un experimento pueden ser generalizados a otras poblaciones y parámetros experimentales.

#### **7.- Validez de la conclusión**

Validez de las conclusiones evalúa el grado en que las conclusiones extraídas de los resultados de un experimento se justifican.

El autor comenta que muchas investigaciones han sido realizadas sin el rigor en los métodos de evaluación requeridos para valorar sus conclusiones. Principalmente la mayoría de ellas han cometido el error de extrapolar conclusiones de resultados obtenidos a partir de experimentos realizados con muestras excesivamente pequeñas para poder extrapolar las conclusiones del experimento al conjunto de la población.

El autor finalmente presenta los momentos clave en una investigación en los cuales se ha de tener en cuenta los principios del método MIREX.

---

55 Consultar "[http://www.music-ir.org/mirex/wiki/2011:MIREX\\_Home](http://www.music-ir.org/mirex/wiki/2011:MIREX_Home)" para una explicación detallada.

## Sinergias

A nuestro criterio, todos los principios que exige el método de evaluación MIREX son cumplidos por todos los resultados presentados en esta tesis doctoral tanto resultados principales como secundarios. Y en caso de que alguno de ellos no se cumpla se documentará ampliamente reduciendo la fiabilidad de los métodos propuestos en cada una de las investigaciones realizadas.

### ***Automatic chord recognition for music classification and retrieval - Heng-Tze - Yi-Hsuan, Yu-Ching, I-Bin***

Este estudio identifica el reconocimiento de acordes existentes en una pieza musical como un método extremadamente válido como método MIR. El estudio presenta un sistema basado en un modelo N-grama<sup>56</sup>. Dicho estudio lo define como un método eficiente en términos de tiempo de ejecución. El estudio pretende crear un método de clasificación de piezas musicales en base a criterios emocionales con aplicación en el entorno de grabación de canciones comerciales.

Este estudio define los métodos basados en indicadores de bajo nivel como insuficientes para realizar ya que no tienen en cuenta características semánticas de la música.

Identifica una fuerte relación entre la progresión armónica de los acordes de una obra musical y su percepción emotiva camino para una correcta clasificación.

Este estudio realiza la extracción de los acordes identificados en una pieza musical a partir de una versión en formato audio de la misma.

El modelo basa su funcionamiento en el método N-grama debido a los siguientes hechos:

- Los acordes consecutivos en el tiempo comparte, varias notas entre ellos.
- Utilizar una ventana de dos acordes (tal como funcionan los métodos basados en HMM) es insuficiente para predecir secuencias de acordes.
- Las escala léxica de 24 acordes (mayores y menores) es menor comparado con el número de permutaciones léxicas en el lenguaje natural. Ello permite gestionar fácilmente un escenario con modelos N-grama.

El método define dos fases definidas a continuación:

#### **Modelado acústico**

A través de un HMM (*Hidden Markov Model*)<sup>57</sup> con 24 estados se modelan 24 triadas mayores/menores. El objetivo es identificar el acorde que mejor se percibe en un fragmento de música.

#### **Modelado del lenguaje**

Secuenciado de acordes etiquetados que puede ser considerados como una secuencia de palabras en lenguaje natural. Muchas de estas progresiones de acordes con frecuencia siguen las reglas de la armonía<sup>58</sup> (por ejemplo Tónica-Subdominante-Dominante-Tónica)<sup>59</sup>.

A partir de estos datos, el estudio genera un histograma de acordes utilizados en cada pieza para a partir de él clasificar las piezas musicales por emociones.

---

56 Consultar página 283 (capítulo Anexo 2 – Conceptos TIC y matemáticos utilizados.) para una explicación detallada.

57 Consultar página 282 (capítulo Anexo 2 – Conceptos TIC y matemáticos utilizados.) para una explicación detallada.

58 Consultar página 230 (capítulo Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados) para una explicación detallada.

59 Consultar página 246 (capítulo Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados) para una explicación detallada.

Para comparar la distancia entre dos secuencias de acordes, la investigación define el valor LCCS<sup>60</sup> que es la secuencia de acordes que se repiten con el mismo orden que las dos secuencias originales. Es decir dadas dos secuencias de acordes (C,F,G,C) y (C,Am,F,Dm,G) define su LCCS como (CFG).

Los resultados experimentales que presenta el estudio se obtienen a partir de dos soportes CD musical del grupo pop *The Beatles* con 28 canciones en total.

Los resultados obtenidos incrementan en promedio un 10% el éxito de otros sistemas de reconocimiento de acordes.

Para la clasificación emocional de piezas se experimenta con un corpus de 195 canciones populares de música occidental china y japonesa.

A parte de los indicadores LCCS, el sistema utiliza el método *k-nearest neighbor* aplicado a los siguientes indicadores (algunos de ellos): *Spectral Flatness Measure* (Medida de horizontalidad espectral) y *Spectral Crest Factor* (Factor de cresta espectral).

### Sinergias.

Este estudio en mi opinión experimenta a partir de un conjunto de piezas excesivamente pequeño, y si bien, es cierto que los acordes pueden identificar una emoción sobre el oyente, dicha emoción es totalmente subjetiva y condicionada por la cultura musical y costumbres de cada oyente.

Dicha investigación propone un método de clasificación de piezas por género pero bajo un camino totalmente diferente al seguido en esta tesis doctoral ya que no coincide en su opinión de que los indicadores de nivel medio como los acordes definen mejor el estilo musical en detrimento de los identificadores de bajo nivel, identificadores que más adelante demostraremos su idoneidad como indicadores del estilo musical incluso de un compositor concreto.

Este estudio adolece de los mismos límites que todos los métodos basados en acordes ya que no pueden ser aplicados a piezas musicales monofónicas como puede ser una partita<sup>61</sup> para violín solo de J.S.Bach.

## ***Statistical description models for melody analysis and characterization.*** **- Ponce, Iñesta**

Esta estudio [12], por medio de la herramienta estadística Análisis de Componentes Principales<sup>62</sup>, realiza una clasificación de melodías en formato MIDI en base a su estilo musical (clásico, *jazz*, *funk* etc.).

Utilizan un corpus de piezas musicales analizadas compuesto por 110 piezas MIDI de las cuales 45 son clásicas y el resto son de música jazz.

Utilizan como indicadores (descriptores) de cada melodía para realizar un análisis estadístico 28 valores algunos de los cuales son los siguientes:

- Descriptores del Número de notas y silencios identificados en la melodía.
- Rango tonal, promedio, desviación estándar: diferencia en semitonos entre el la nota más grave y la más aguda.
- Intervalos utilizados<sup>63</sup>: Medidos a partir de la nota más grave.

---

60 LCCS: *Longest Common Chord Subsequence*.

61 Consultar página 344 (capítulo Anexo 4 – Información de compositores analizados y catalogación.) para consultar unas breves notas biográficas.

62 Consultar página 348 (capítulo Anexo 5 – Conceptos estadísticos utilizados.) para una explicación detallada.

- Número de notas diatónicas y su desviación estándar: Notas utilizadas que no pertenecen a las notas de la clave de la tonalidad.
- Número de notas sincopadas<sup>64</sup>: Es decir aquellas que no empiezan en el principio de un pulso de compás.

El estudio reconoce que la elección de estos indicadores, a pesar de que están basados en conceptos musicales, no está avalada por ningún tratado de musicología<sup>65</sup>.

El estudio analizó si los indicadores utilizados pueden ser considerados como variables aleatorias para, una de demostrado ello, poderles aplicar el método de componentes principales.

El estudio ha probado otras herramientas estadísticas tales como mapas de auto organizados, análisis discriminante lineal y métodos paramétricos y no paramétricos tales como el Bayesiano<sup>66</sup> y el k-nn<sup>67</sup> aunque este estudio sólo muestra los resultados obtenidos con estos dos últimos métodos.

Aplicando componentes principales, el estudio presenta los indicadores de la Tabla 6 como los más influyentes en la clasificación por estilo musical.

1. Número de notas	6. Desviación tonal
2. Promedio tonal	7. Número de silencios significativos
3. Alcance tonal	8. Normalidad en la distribución de intervalos
4. Alcance de intervalos	9. Desviación de intervalos.
5. Notas sincopadas	10. Desviación de las duraciones de las notas.

*Tabla 6: Indicadores más significativos en la clasificación por género musical.*

Con los 2 primeros componentes principales analizados se explica el 94% de la varianza explicada. El tercer componente eleva dicho valor al 97%.

Una vez descubiertos los indicadores que mayor contribuyen en cada uno de las componentes principales, aplica los métodos de clasificación de Bayes y el k-nn con unos índices de éxito del orden del 95,5% y del 96,8% respectivamente.

### Sinergias

Este estudio se diferencia del presente proyecto de tesis en que, como otras investigaciones, el conjunto de indicadores escogido es heterogéneo y basado en la heterogeneidad de las opiniones de los musicólogos sobre cuáles son los rasgos identificativos del estilo compositivo de dos compositores coetáneos e incluso de dos estilos musicales de diferentes épocas.

Por otro lado, los dos estilos musicales escogidos para hacer el estudio (clásico sin especificar qué periodo dentro de la música clásica y el jazz) son fácilmente separables y no ha de haber presentado mayores dificultades de diferenciación.

A parte el tamaño del corpus de piezas puede considerarse bastante limitado y que posiblemente no supere las exigencias el protocolo MIREX[10].

63 Consultar página 247 (capítulo Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados) para una explicación detallada.

64 Consultar página 258 (capítulo Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados) para una explicación detallada.

65 Consultar la página 252 (capítulo “Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados”) para una explicación detallada.

66 Consultar página 351 (capítulo Anexo 5 – Conceptos estadísticos utilizados.) para una explicación detallada.

67 Consultar página 358 (capítulo Anexo 5 – Conceptos estadísticos utilizados.) para una explicación detallada.

Las similitudes con los estudios presentados en esta tesis doctoral es la utilización de técnicas estadísticas en el reconocimiento de características de diferentes estilos musicales y compositores añadiendo mucho mayor riesgo en las conclusiones de los resultados ya que en esta tesis se utilizan para clasificar estilos compositivos todos ellos clásicos y métodos desarrollados *ad-hoc* para clasificar piezas musicales de compositores muy próximos en estilo.

### ***The Symbolic vs. Numeric Controversy in Automatic Analysis of Music – Mouton, Pachet***

Este artículo [13] a pesar de ser una publicación bastante antigua (1995) es más un estado del arte en el que se definen los dos caminos de diseño de herramientas de análisis musical más utilizados.

El artículo define las ventajas y campos de aplicación de ambos tipos de métodos proponiendo finalmente a la comunidad de investigadores en esta materia encontrar caminos de unión de ambos tipos de métodos para fusionar las ventajas de cada uno de ellos.

El artículo define los dos siguientes caminos de aproximación para el desarrollo de herramientas de análisis musical:

#### **Métodos numéricos**

Son los métodos estadísticos creados para con un índice de fiabilidad aceptable, ser aplicados a grandes volúmenes de información musical. Dichos métodos son más recomendados en análisis de música clásica.

#### **Métodos simbólicos**

Basados en la extracción de características de alto nivel, temas, patrones de acordes y similitudes basados muchas veces en sistemas gramaticales más recomendados para el análisis de música con un marcado componente de improvisación como por ejemplo el jazz.

El artículo presenta una serie de inconvenientes en herramientas desarrolladas por los autores de cada uno de los tipos de herramientas clasificadas.

Algunos de estos inconvenientes son los relacionados con las notas ornamentales<sup>68</sup> y notas de paso<sup>69</sup> en la música clásica y la identificación de acordes en la música jazz cuando estos no aparecen en su forma teórica.

El artículo incluye unas notas en el modo en que los autores han propuesto mecanismos de resolución de los problemas planteados en el párrafo anterior.

Finalmente, los autores, al tener experiencia en el desarrollo de herramientas de los dos tipos, proponen como línea de investigación futura la fusión de los intereses y logros de ambas vías de resolución con el objetivo de alcanzar conclusiones que ninguno de los dos métodos puede alcanzar individualmente.

#### **Sinergias.**

Este artículo clasifica los métodos desarrollados en este proyecto dentro del área de los métodos numéricos, aunque no enumera el objetivo de este de tesis como uno de los posibles logros de la investigación en análisis de partituras.

---

68 Consultar página 254 (capítulo Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados) para una explicación detallada.

69 Consultar página 253 (capítulo Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados) para una explicación detallada.

## ***Key determination of acoustic musical signals – Shenoy, Mohapatra, Wang***

Esta investigación [14] presenta un método para identificar la tonalidad de una pieza musical a partir de su señal acústica. El sistema utiliza un análisis de frecuencias basado en la croma musical<sup>70</sup> junto a un conocimiento de la estructura rítmica y de los patrones armónicos utilizados.

En primer descomponen la señal sonora en *frames* con el material musical segmentado en base a la identificación de tiempos fuertes y tiempos débiles<sup>71</sup>.

Una vez han descompuesto la señal audible en *frames*, por medio de filtros, extraen las notas presentes en cada *frame*, y todas ellas las clasifican el cada una de las 12 notas del sistema tonal incluyendo las notas con diferente octava (pero coincidentes en croma) en la misma clase.

Una vez se tienen las notas y acordes presentes en la canción, se comparan dichos elementos con las estructuras de la armonía tonal, es decir, la presencia de un determinado acorde sólo será posible en un subconjunto de las 24 tonalidades posibles (12 mayores y 12 menores).

A partir del subconjunto de tonalidades que comparten los acordes que aparecen en una canción, y a partir de las frecuencias de aparición de cada uno de los acordes deducen la tonalidad de la pieza musical.

Recogen en su artículo que la gran mayoría de los errores cometidos por el método son debidos a la gran cantidad de acordes que comparten cada una de tonalidades con su relativo menor<sup>72</sup>. Mediante un sistema de ponderación de tonalidades próximas, el sistema prioriza las tonalidades mayores frente a su tonalidad relativa menor.

También recogen en sus conclusiones que utilizar sólo los acordes mayores y menores limita la utilización de otros conjuntos de acordes limitando así la efectividad del método.

### Sinergias

Como se verá más adelante, uno de los resultados de la investigación recogida en esta tesis doctoral es un método de identificación de la tonalidad a partir del material MIDI de una pieza musical. Este método en mi opinión presenta unos resultados con un corpus de 20 piezas musicales insuficiente para un resultado fiable.

Otra limitación que presenta este estudio es que sólo puede ser aplicado a piezas musicales en las cuales no se produce ningún tipo de modulación, es decir, que toda la obra está construida sobre la misma tonalidad.

Otra limitación que presenta este estudio es el hecho que basa el análisis en acordes, imposibilitando la aplicación de este método a temas individuales o a piezas musicales compuestas para instrumentos monofónicos en modo “solo”.

Ese método sería inaplicable a piezas musicales clásicas debido a la cantidad de tonalidades que recorre el discurso musical de cada pieza.

En cualquier caso, el análisis de esta investigación y de todas las investigaciones hechas hasta la fecha en materia de identificación de la tonalidad de una pieza han permitido constatar que la identificación de la tonalidad de una pieza musical por medios automáticos (aparentemente simple

---

70 Consultar página 237 (capítulo Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados) para una explicación detallada.

71 Consultar página 260 (capítulo Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados) para una explicación detallada

72 Consultar página 262 (capítulo Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados) para una explicación detallada.

para una persona con conocimientos musicales) no es un problema trivial y que las investigaciones realizadas adolecen de un sustrato de problemas comunes.

### ***Pitch detection in polyphonic music using instrument tone models – Li, Wang***

Esta investigación [15] propone un método para a partir de una grabación monofónica de material musical por un instrumento y a partir de muestras sonoras del mismo instrumento generadas a partir de un sintetizador MIDI, identificar la nota (o tono) que se está ejecutando en cada instante.

Dicho sistema puede ser un primer paso para crear como objetivo final un sistema para transcribir automáticamente material sonoro separando cada uno de las líneas melódicas y deducir en cada instante la nota que está ejecutando cada uno de los instrumentos.

El sistema tiene como precondition que la tonalidad de la pieza es conocida.

El sistema trabaja con muestras de 40 ms. cada una y con cada una de ellas comparar el histograma de frecuencias presentes comparándolo con el histograma de frecuencias de cada una de las notas del instrumento analizado e identificando la prominencia de la estructura armónica. Dichos histogramas incluyen todos los armónicos presentes en cada nota.

Como muestras de notas de referencia serán utilizadas las generadas por un sintetizador MIDI por ser la señal sonora resultante mucho más estable que la que se pueda obtener de una grabación de un instrumento real.

El sistema incluye un módulo musicológico que define las probabilidades de transición entre las diferentes notas de la tonalidad de la pieza.

Para evaluar el método, el estudio presenta un corpus compuesto por 3 piezas de J.S.Bach (Invención nº1, Sinfonía nº1 y Corales armonizados. Dichas piezas están compuestas para entre 2 y 4 voces.

Se ha utilizado para cada uno de instrumentos analizados muestras generadas por diferentes sintetizadores y en el proceso de extracción de armónicos se ha utilizado un valor de armónicos extraídos igual a 10.

Los instrumentos analizados en el experimento presentado incluyen material musical interpretado por clarinete, violín, flauta y trompeta.

#### **Sinergias**

Este sistema comparte con otros un sistema basado en un modelo oculto de Márkov<sup>73</sup>. Presta mucha atención al análisis de los armónicos como mecanismo de detección de la nota que se está ejecutando en cada momento.

Este futuro proyecto de desarrollo de un sistema para transcribir a formato MIDI una grabación sonora sería un gran logro por conseguir el camino inverso a la interpretación musical, es decir, a partir de la señal sonora poder construir la partitura de la pieza musical interpretada, tendría una gran utilidad para ser utilizado en combinación con el sistema MIAMP (presentado más adelante como uno de los resultados de investigación alcanzados por esta tesis doctoral).

Uno de los problemas encontrados en el desarrollo de esta tesis doctoral ha sido la dificultad para encontrar material musical en formato MIDI de compositores no excesivamente famosos. Por tanto, ha sido difícil reunir un corpus suficiente de material musical MIDI de compositores poco presentes

---

73 Consultar página 282 (capítulo Anexo 2 – Conceptos TIC y matemáticos utilizados.) para una explicación detallada.

en la actualidad para poderlo utilizar para avalar o refutar la autoría o no de una determinada pieza musical.

Si existiera un método/sistema para poder extraer dicho material MIDI a partir de grabaciones sonoras de dicho material, ello permitiría aplicar los métodos presentados en esta tesis doctoral a muchos casos concretos de autoría dudosa para dar una valoración objetiva sobre la autoría o no de la pieza por uno u otro compositor candidato.

### ***Genre classification using chords and stochastic language models - Pérez-Sancho, Rizo, Iñesta.***

Es estudio realizado en 2008 [4], utiliza técnicas ya utilizadas tales como el método de Bayes<sup>74</sup> para clasificar piezas musicales por estilo.

Los estilos analizados son Académico, Popular y Jazz. El estudio establece un segundo nivel de detalle por subtipos. Cada uno de estos tres estilos lo subdivide en los estilos de la Tabla 7.

Académico		Jazz		Popular	
Estilo	Nº de piezas	Estilo	Nº de piezas	Estilo	Nº de piezas
Barroco	61	Pre-bop	195	Country	64
Clásico	49	Bop	105	Rock	85
Romántico	159	Bossanova	43		

*Tabla 7: Subestilos analizados y número de piezas musicales incluidas en cada subestilo.*

Los indicadores o variables que extraen de cada una de las piezas musicales y que utilizan en el estudio para aplicarles los métodos numéricos son los grados de los acordes identificados a lo largo de las piezas.

De cada uno de los acordes procesados se contemplan las siguientes variantes: Mayor, menor, disminuido, aumentado y 4ª suspendido

Por primera vez, en este capítulo, este estudio trabaja con piezas musicales en formato de la aplicación Band-in-a-box (formato MMA<sup>75</sup>) y no en material en formato MIDI como es lo más habitual.

Para poder comparar las piezas musicales, estas han sido transportadas<sup>76</sup> a las tonalidades Do Mayor y La menor para las piezas musicales compuestas en modo Mayor y menor respectivamente.

Los dos métodos de clasificación utilizados son los utilizados en otras investigaciones referenciadas en este capítulo anteriormente: el método de Bayes y el método n-grama<sup>77</sup>.

El método Bayes ha sido aplicado en las tres variantes: Modelo multinomial<sup>78</sup>, Selección de características y modelo de Bernoulli multivariado<sup>79</sup>.

74 Consultar página 351 (capítulo Anexo 5 – Conceptos estadísticos utilizados.) para una explicación detallada.

75 Consultar página 245 (capítulo Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados) para una explicación detallada.

76 Consultar página 263 (capítulo Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados) para una explicación detallada.

77 Consultar página 283 (capítulo Anexo 2 – Conceptos TIC y matemáticos utilizados.) para una explicación detallada.

78 Consultar página 361 (capítulo Anexo 5 – Conceptos estadísticos utilizados.) para una explicación detallada.

79 Consultar página 361 (capítulo Anexo 5 – Conceptos estadísticos utilizados.) para una explicación detallada.



En la aplicación de los métodos Bayesianos, los porcentajes de éxito dependen del conjunto de características seleccionadas: acordes completos de grado, nombres de acordes completos, triadas de grado y nombres de triadas.

Los dos primeros tipos de indicadores de los cuatro definidos en el párrafo anterior consiguen unos porcentajes de éxito del 85% mientras que con los dos últimos conjuntos de indicadores no se sobrepasa el 70% de éxito.

Utilizando n-gramáticas, los porcentajes de éxito fluctúan entre el 75 y 85% dependiendo del valor de n (2-grama, 3-grama y 4-grama).

En lo que respecta a los porcentajes de éxito cuando la clasificación se hace diferenciando los diferentes subestilos, no se reportan valores concretos sino que se reporta un gráfico en el que el nivel de gris está en función del porcentaje de éxito.

### Sinergias

Este estudio resuelve el mismo problema que otras investigaciones analizadas en este capítulo y que uno de los resultados de investigación de esta tesis doctoral, la clasificación de piezas musicales por género musical con unos resultados similares a los anteriores.

Sin embargo, en mi opinión adolece de los mismos problemas que los anteriores a saber:

- Los géneros musicales en los que se clasifica son tan dispares histórica y formalmente que no ha de ser difícil identificar los patrones de acordes que diferencian una sinfonía de Mozart de un *rock & roll*, es decir, las conclusiones a alcanzar *a priori* en forma de hipótesis no han de ser difíciles de conseguir.
- Al igual que todos los sistemas de MIR basados en el análisis de acorde, no pueden clasificar piezas compuestas para instrumentos monofónicos en solo.

### ***The Nationalist Fingerprint in Nineteenth Century Romantic Chamber Music” - Hofstetter***

En 1979, Fred. T. Hofstetter [16] realizó una investigación para identificar rasgos diferenciales en melodías de cuartetos de cuerda de las escuelas checa (Dvorak<sup>80</sup> y Smetana), francesa (D'Indy y Saint-Saëns) rusa (Borodin y Tchaikovsky) y alemana (Mendelssohn y Schumann) del siglo XIX a partir del análisis por medio de la comparación de las funciones de distribución de las frecuencias de intervalos melódicos utilizados comparado con la función de distribución de la función ji-cuadrado (distribución de Pearson<sup>81</sup>). El estudio analiza los intervalos en sentido relativo (2ª Mayor, 3ª menor, 3ª Mayor, y todos los más distantes a una 6ª disminuída los agrupa en un sólo tipo) y también estudia intervalos de segundo orden (entendidos como una pareja de intervalos de 1er orden) así como la dirección (ascendente o descendente de los mismos).

Consigue unos resultados muy interesantes de éxito a pesar de que hay ciertos colectivos de comparación cuyos porcentajes de éxito están bastante dispersos respecto a la media de éxito.

### Sinergias

Esta investigación es una de las pocas que tiene en cuenta de una manera sistemática los intervalos melódicos utilizados como una fuente de datos para poder clasificar piezas musicales por estilo aunque lo hace de una manera muy diferente a la propuesta en esta tesis doctoral.

---

80 Consultar página 323, 343, 321, 338 315, 346, 332 y 342 (capítulo Anexo 4 – Información de compositores analizados y catalogación.) para unas breves notas biográficas de cada autor (en el orden en que están enumerados).

81 Consultar página 353 (capítulo Anexo 5 – Conceptos estadísticos utilizados.) para una explicación detallada.

En enfoque de esta investigación se diferencia del presentado en esta tesis doctoral en que Hofstetter sólo analiza los intervalos aparecidos en las melodías mientras que el método propuesto aquí lo hace a partir de la totalidad de la obra.

Otra diferencia importante es que Hofstetter clasifica los intervalos melódicos desde un punto de vista relativo sin tener en cuenta la tonalidad de la obra y que papel ocupa dicho intervalo dentro de la tonalidad.

Otra diferencia importante con el método de Hofstetter es que el método presentado en esta tesis doctoral no considera la dirección de los intervalos, y que considera todos los intervalos melódicos posibles en un sentido absoluto respecto a la tonalidad.

Otra aportación añadida del método presentado en esta tesis doctoral es que el ámbito de aplicación es más general y amplio ya que procesa las piezas musicales completas (no únicamente las melodías), de cualquier forma musical<sup>82</sup> y orquestación, siendo el ámbito de aplicación de la investigación de Hofstetter sólo de cuartetos de cuerda.

### ***Classification of Melodies by Composer with Hidden Márkov Models - Pollastri, Simoncelli.***

Esta investigación [17] presenta un método con el cual clasifica melodías de 5 autores clásicos (Mozart<sup>83</sup>, Beethoven, Dvorak, Stravinsky y Beatles) utilizando un modelo oculto de Márkov<sup>84</sup> y cadenas de Márkov<sup>85</sup> para cada compositor, las cuales han sido entrenados a partir del análisis de 605 temas musicales de los autores estudiados.

El sistema tiene unos porcentajes de éxito del 42%, y dicho resultado se compara con una encuesta hecha por un conjunto de expertos en música con los que el porcentaje de éxito es del 48% y con otra hecha a aficionados a la música con unos resultados de éxito en la clasificación del 24%.

Comparando los porcentajes de éxito de las encuestas a expertos en música, el estudio concluye que el sistema diseñado iguala los resultados de la encuesta a músicos expertos.

El estudio utiliza como material de entrada de cada pieza musical las melodías de cada obra ya que considera en base a estudios del ámbito de la psicología que la utiliza para recordar el material musical la información de la melodía.

El estudio realiza también pruebas con contornos rítmicos extraídos a partir del histograma de uso de las diferentes duraciones de notas.

La representación del material musical adecuado es siempre un equilibrio entre la reducción del tamaño del alfabeto y de su potencia expresivo o descriptiva.

La investigación extrae los indicadores del estudio a partir de las ocurrencias de intervalos relativos respecto a la nota inicial, es decir, un intervalo de segunda mayor ascendente es un intervalo de tipo +2 (dos semitonos entre la nota inicial y final del intervalo) sean cuales sean su nota inicial y su nota final; y un intervalo de 3ª Mayor descendente será del tipo -4.

El estudio obtiene sus resultados trabajando con un intervalo máximo en rango de [-15,+15].

El estudio compara el sistema de clasificación utilizado con sistemas de clasificación de proteínas en familias.

---

82 Consultar página 244 (capítulo Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados) para una explicación detallada.

83 Consultar página 333, 315 323 y 345 (capítulo Anexo 4 – Información de compositores analizados y catalogación.) para unas breves notas biográficas de cada autor (en el orden en que están enumerados).

84 Consultar página 282 (capítulo Anexo 2 – Conceptos TIC y matemáticos utilizados.) para una explicación detallada.

85 Consultar página 270 (capítulo Anexo 2 – Conceptos TIC y matemáticos utilizados.) para una explicación detallada.

En una cadena de Márkov, la probabilidad de transición entre un estado y el siguiente depende del estado actual y del anterior al actual.

El artículo reconoce que el principal problema en la utilización de un modelo de Márkov es que la probabilidad de transición a un estado no depende de la posición que ocupa dicho estado en la secuencia.

### Sinergias

Este estudio coincide con muchos otros en la utilización de modelos ocultos de Márkov para tener un mecanismo que proporcione en cualquier punto del material musical, tener una probabilidad de cuál será el siguiente estado, en este caso la nota que aparecerá después de otra.

Este estudio coincide con esta tesis doctoral en fijar la atención en los intervalos detectados en las piezas musicales. Sin embargo, los investigadores sólo prestan atención a la distancia entre las notas in importarle cuales son la nota inicial y final de cada intervalo, cosa que esta tesis doctoral considera vital porque tanto este estudio como el presente proyecto de tesis investiga en la música tonal en la cual la tonalidad en la que se ubica un intervalo es vital.

Este estudio selecciona como corpus de compositores 5 compositores muy diferentes en estilo y ámbito histórico, cosa que esta tesis doctoral se marca como objetivo la definición de métodos de clasificación de estilos musicales de compositores próximos en estilo los cuales incluso expertos en música les cueste diferenciarlos.

### ***Style recognition through statistical event models – Pérez-Sancho, Iñesta, Calera-Rubio***

Esta investigación[18] analiza la aplicación de modelos estadísticos utilizados para clasificar textos en base a su estilo, en el campo de la MIR para clasificar material musical (melodías) en base a dichos modelos.

Los indicadores utilizados son los intervalos utilizados y los porcentajes de uso de las diferentes duraciones de notas.<sup>86</sup>

El estudio introduce la posibilidad de utilización de estas técnicas independientemente del formato en el cual esté almacenado el material musical (MP3, MIDI, etc.)

Para poder facilitar la utilización de técnicas de clasificación de textos, se busca un mecanismo para traducir el material musical en “palabras”. Dicho mecanismo consiste en definir una ventana de extracción de valor “n” (“n” notas), y codificar la posición de cada nota en base a la distancia interválica respecto la primera nota de la melodía.

De este modo una melodía de N notas contiene N-n+1 palabras de orden “n” (*n-words*). En el estudio se han utilizado palabras de 2, 3 y 4 símbolos.

La técnica estadística de clasificación ha sido un clasificador bayesiano<sup>87</sup> ingenuo, una distribución de Bernoulli<sup>88</sup>, y un modelo multinomial<sup>89</sup>.

Estos métodos en esencia identifican cuales son las palabras que describen mejor las diferencias entre los estilos de texto/música.

---

86 Consultar página 239 (capítulo Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados) para una explicación detallada.

87 Consultar página 351 (capítulo Anexo 5 – Conceptos estadísticos utilizados.) para una explicación detallada.

88 Consultar página 361 (capítulo Anexo 5 – Conceptos estadísticos utilizados.) para una explicación detallada.

89 Consultar página 361 (capítulo Anexo 5 – Conceptos estadísticos utilizados.) para una explicación detallada.

Los resultados obtenidos varían en función del número de palabras de muestra utilizadas (para comparar si la palabra está incluida o no en este vocabulario) así como el tamaño de las palabras utilizadas.

Los estilos diferenciados son el clásico y el jazz con un corpus de palabras de aproximadamente 500 para palabras de 2 “letras” (2 intervalos melódicos), aproximadamente 4800 para palabras de 3 “letras” y 6500 para palabras de 4 “letras”.

La Tabla 8 resume los mejores porcentajes de éxito conseguidos en función del tamaño de la palabra. También incluye el tamaño de la muestra del vocabulario de palabras de referencia que maximiza dichos resultados.

n	Mejor % de clasif.	Tamaño vocabulario
2	93,25	300
3	86,78	50
4	90,62	20

Tabla 8: Porcentajes de éxito conseguidos en la investigación y tamaño del vocabulario.

### Sinergias

Esta investigación basa también su investigación en los intervalos melódicos aunque esta sólo se basa en los intervalos de la melodía, al contrario que esta tesis doctoral que basa el estudio en la totalidad de la partitura.

Otra diferencia con esta tesis doctoral, es que no se tiene en cuenta la posición absoluta del intervalo ya que no tienen en cuenta la tonalidad de la pieza musical.

Por otro lado, esta tesis doctoral es más ambiciosa en el sentido que intenta identificar diferencias estilo entre compositores muy próximos en estilo, mientras que esta investigación clasifica piezas de estilo clásico y jazz muy diferentes en estilo.

El documento tampoco aclara de qué estilo son las obras consideradas clásicas ya que existen grandes diferencias de estilo dentro de un estilo genérico llamado “Clásico”.

### ***Robust modeling of musical chord sequences using probabilistic n-grams - Scholz, Vincent, Bimbot.***

Esta investigación [19] también aplica técnicas utilizadas para clasificar fragmentos de texto escrito (concretamente N-gramas<sup>90</sup>) para clasificar material musical. La diferencia con la investigación anterior, es que esta aplica dichas técnicas sobre los acordes detectados en la partitura.

El estudio presenta las N-gramas como herramientas más fiables que las cadenas de Márkov.

La información extraída de los acordes de la partitura en para ser posteriormente descritos por medio de un N-grama son la nota raíz (o grado), el tipo (mayor, menor, etc.) y las inversiones del mismo.

El estudio analiza dos enfoques de traducción de la información de los acordes para ser procesados por una gramática: dependientes e independientes de la tonalidad.

En el sistema dependiente de la tonalidad, los acordes diferentes de los acordes mayores y menores son traducidos a acordes mayores y menores para simplificar el proceso.

---

<sup>90</sup> Consultar página 283 (capítulo Anexo 2 – Conceptos TIC y matemáticos utilizados.) para una explicación detallada.

El estudio también utiliza modelos de tipos de abreviatura (*Shorthand types*) y el modelo de Harte con equivalencias enarmónicas.

El estudio utiliza diferentes tipos de N-gramas para describir las canciones de 13 discos del grupo “*The Beatles*” con un total de 180 canciones y 14194 apariciones de acordes.

Los sistemas dependientes de la tonalidad y sus variantes independientes, trabajan con seis secuencias de etiquetas de acordes para cada canción.

Siendo la perplejidad una medida de la adaptación del N-grama a los datos estudiados, el estudio únicamente concluye que los N-gramas con  $N=5$  son los que consiguen unos menores valores de perplejidad en el caso de los modelos de etiquetado de acordes Mayores/menores. Con valores  $N=2$  son los mejores para modelos aditivos suavizados.

### Sinergias

Este tipo de investigaciones están más orientadas a buscar sinergias y similitudes entre los métodos de análisis de textos con partituras musicales.

El campo de aplicación sin embargo, únicamente se ha probado para piezas musicales compuestas en un único tono (sin modulaciones), lo cual complica su aplicación a partituras clásicas repletas de modulaciones en el desarrollo del discurso musical.

Al tratarse de canciones de los *Beatles*, no ha de ser difícil extraer los acordes que están sonando en cada momento por ser la música moderna muy vertical en su concepción. Dicho problema de extracción de acordes se complica en el caso de obras clásicas y mucho más si se intenta aplicar a piezas musicales de cámara donde frecuentemente no todas las notas del acorde están presentes.

A pesar de haber pocas sinergias con las herramientas y con el objetivo final de esta tesis doctoral, lo cierto es que, haber tenido un conocimiento amplio de los intentos de aplicar técnicas utilizadas en otros campos como el análisis de textos ha sido enriquecedor.

### ***Pattern recognition approach for music style identification using shallow statistical descriptors - Ponce de León, Iñesta***

El objetivo de esta investigación [20] es desarrollar un marco para la experimentación de métodos de reconocimiento de estilo musical de melodías (almacenadas en formato de partitura digital) mediante el uso de características estructurales de poca profundidad, como descriptores melódicos, armónicos estadísticos y rítmicos.

Esta investigación se auto-define como un punto de partida para profundizar en un futuro ya que la hipótesis de la investigación es la búsqueda de indicadores que permitan diferenciar melodías clásicas de melodías de jazz.

Algunos de los indicadores propuestos para clasificar estos dos tipos de melodías (clásicas y de jazz) son los siguientes indicadores:

- Generales: Tales como el número de notas en la pieza, número de silencios significativos y no significativos. Los silencios de duración superior a una semicorchea son considerados significativos y los de duración menor son considerados como no significativos.
- Tonales: rango máximo (distancia tonal entre la nota más aguda y la más grave), valor tonal promedio e indicadores de la distribución de las notas en relación a la nota promedio.
- Duraciones de notas: distribución de las duraciones de notas en relación con la duración promedio de las notas.

- Silencios significativos: rango máximo (máxima y mínima duración de los silencios considerados como significativos), e indicadores de la distribución de los valores alrededor de la media.
- Distancia temporal entre notas: indicadores relacionadas con el intervalo de tiempo (medido en *MIDI ticks*) entre dos notas consecutivas.
- Interválicos: indicadores de la diferencia en valor absoluto entre los tonos de las dos notas consecutivas.
- Armónicos: Número de notas que no pertenecen a la tonalidad de la pieza musical utilizadas.
- Rítmicos: Número de notas sincopadas.
- Normalidad: Utilizando el estadístico de d'Agostino se evalúa la normalidad de la distribución de los valores notas, duraciones, silencios etc.

El corpus de melodías utilizadas en el experimento de la investigación incluye melodías de *Mozart, Bach, Schubert, Chopin, Grieg, Vivaldi, Schumann, Brahms, Beethoven, Dvorak, Haendel, Paganini, y Mendelssohn*<sup>91</sup> en el tipo de música clásica y melodías de *Charlie Parker, Duke Ellington, Bill Evans, y Miles Davis* entre otros en el tipo de música *Jazz*.

El número total de piezas utilizadas es de 45 clásicas y 65 de jazz.

Se han utilizado tres algoritmos de clasificación para el reconocimiento de estilo: clasificador Bayesiano<sup>92</sup>, clasificador k-nn<sup>93</sup> y aprendizaje no supervisado de redes neuronales<sup>94</sup>.

Los principales indicadores o descriptores en orden de significación hallados por esta investigación son los siguientes: Número de notas, tono promedio, alcance tonal, Sincopación, Desviación estándar tonal, número de silencios significativos.

El estudio demuestra que el mejor método de clasificación es el Bayesiano por utilizar un menor número de descriptores en su mejor resultado (12 descriptores/indicadores con un 96% de éxito).

Para medir la idoneidad de cada uno de los métodos utiliza el procedimiento de Bonferroni<sup>95</sup> con un test ANOVA<sup>96</sup>.

El artículo concluye anunciando la investigación futura en esta línea: inclusión de nuevos descriptores y una ampliación del estudio a otros estilos musicales.

## Sinergias

Este estudio define los descriptores utilizados como “de poca profundidad” queriendo decir que toma unos pocos valores generalistas, esta tesis doctoral utiliza un único descriptor (los intervalos melódicos) pero al utilizar todos los intervalos melódicos posibles respecto a la tonalidad, asignamos el adjetivo de “descriptores de bajo nivel”.

Este estudio toma como campo experimental la identificación de dos estilos muy distantes en su esencia con lo que se puede decir que es un experimento con un riesgo de fracaso relativamente bajo.

91 Consultar página 333,313,341,319,324,346,342,316,315, 323, 325, 336, y 332 (capítulo Anexo 4 – Información de compositores analizados y catalogación.) para unas breves notas biográficas de cada autor (en el orden en que aparecen en la lista.

92 Consultar página 351 (capítulo Anexo 5 – Conceptos estadísticos utilizados.) para una explicación detallada.

93 Consultar página 358 (capítulo Anexo 5 – Conceptos estadísticos utilizados.) para una explicación detallada.

94 Consultar página 290 (capítulo Anexo 2 – Conceptos TIC y matemáticos utilizados.) para una explicación detallada.

95 Consultar página 351 (capítulo Anexo 5 – Conceptos estadísticos utilizados.) para una explicación detallada.

96 Consultar página 350 (capítulo Anexo 5 – Conceptos estadísticos utilizados.) para una explicación detallada.

Los clasificadores utilizados son los mismos que han sido utilizados en otras investigaciones similares analizadas y resumidas con anterioridad.

Otra gran diferencia entre este estudio y esta tesis doctoral es el hecho de que este estudio sólo extrae información de los temas o melodías de las piezas musicales. Este proyecto de tesis por el contrario extrae la información del número de intervalos melódicos utilizados en todas las líneas melódicas o instrumentos de cada obra.

### ***Figured Bass and Tonality Recognition - Barthélemy, Bonardi***

Esta investigación [1] presenta un algoritmo para identificar la tonalidad<sup>97</sup> de una pieza musical en base una línea melódica de bajo cifrado<sup>98</sup>.

Dicho algoritmo es una pieza de una investigación más amplia (proyecto *WedelMusic*) en la que se desarrollan métodos para, a partir de la partitura de una obra musical, extraer de manera automática información tales como motivos melódicos, información de la armonía<sup>99</sup> y de la tonalidad de la pieza.

El artículo realiza un recorrido por los problemas inherentes a la armonía tonal que complican el desarrollo de un modelo de identificación de la armonía de una pieza musical.

Algunos de esos problemas son los siguientes:

- **Notas ornamentales:** las cuales puede enmascarar los acordes reales que se están interpretando en cada momento.
- **Ambigüedades:** En el caso de aparición de acordes incompletos, puede cometerse el error de identificar un acorde cuando es otro. Esto ocurre cuando dos acordes comparten muchas notas en común. Dichas ambigüedades deben resolverse en un contexto más amplio.
- **Conjunto de acordes utilizados:** En cada estilo musical se utilizan conjuntos de acordes diferentes.
- **Inexistencia de reglas:** Las reglas de la armonía tonal no están específicamente definidas, son convenciones aceptadas a lo largo de siglos de experiencia en la composición musical, más bien las reglas de la armonía tonal son reglas que definen lo que no se puede hacer más que lo que se puede hacer.

El estudio presenta ejemplos de cómo resuelve cada uno de estos problemas pero no garantiza que dichos métodos de resolución funcione en todas las situaciones posibles.

De este análisis el método extrae una línea melódica de bajo cifrado la cual será utilizada para la detección de la tonalidad de la pieza.

Sin embargo, el artículo reconoce que realiza una eliminación de notas que no pertenezcan a la tonalidad de la pieza para simplificar el proceso.

El sistema se basa en el hecho que cada acorde pertenece aun un subconjunto limitado de tonalidades, por tanto, con un alto grado de fiabilidad, los acordes existentes en una serie de compases, sólo una tonalidad será la que incluirá dichos acordes.

---

97 Consultar página 261 (capítulo Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados) para una explicación detallada.

98 Consultar página 232 (capítulo Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados) para una explicación detallada.

99 Consultar página 230 (capítulo Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados) para una explicación detallada.

El estudio compara los resultados obtenidos de la aplicación del algoritmo a diferentes piezas (gavotte<sup>100</sup> de la suite francesa n°5 de J.S.Bach, serenata “Eine Kleine Nachtmusik” de W.A.Mozart y quinteto para clarinete de Mozart, K581 entre otras) con los resultados obtenidos sobre las mismas piezas por el algoritmo de Temperley[21].

De dicha comparación concluyen que su método iguala al menos la calidad de los resultados que otros métodos desarrollados hasta la fecha.

### Sinergias

Este estudio implementa un algoritmo que emula el análisis que haría un músico sobre la partitura para luego aplicar los criterios que seguiría una persona experta para concluir cual es la tonalidad de la pieza.

En cualquier caso, más que identificar la tonalidad de la pieza, este método identifica en cada instante de la partitura el acorde que se está interpretando en esos instante y de ello deduce la tonalidad de la pieza.

Por nuestra parte, esta tesis doctoral propone un método mucho más sencillo en esencia y que es de aplicación con independencia de las tonalidades que recorra el discurso musical.

Por otro lado, este, y todos los algoritmos basados análisis de la armonía o de los acordes utilizados fracasará cuando la pieza a analizar esté compuesta para un sólo instrumento de cuerda frotada como sería un violín o un violonchelo.

### ***Automatic Tonal Analysis from Music Summaries for Version Identification - Gómez, Ong y Herrera***

Esta investigación[22] identifica con un 66% de éxito versiones de una misma canción a partir de una señal sonora de la misma. Dicho proceso realiza un análisis de la estructura tonal de cada canción extrayendo los patrones de acordes que componen la estructura de la canción identificando las repeticiones de dichas estructuras.

La similitud que el sistema es capaz de detectar en una canción como una versión de la original es la identificación de la secuencia de acordes que la investigación define como clases.

El sistema identifica patrones de repetición de acordes lo cual permite realizar la comparación de la pieza original y la versión con fragmentos de material sonoro de entre 15 segundos y toda la canción.

Las pruebas experimentales han sido realizadas sobre 30 canciones del grupo británico *The Beatles* y de cada canción se han procesado una media de 3 versiones diferentes es decir un total de 90 piezas.

Los porcentajes promedio de éxito se reducen cuanto mayor es el intervalo de tiempo analizado.

El proceso identifica en primer lugar la tonalidad de la canción así como la secuencia de acordes identificados en el tiempo.

En segundo lugar identifica repeticiones de dichas secuencias de acordes definiendo clases de secuencias de acordes donde cada una de estas clases está identificada por una secuencia sumario que es la que identifica la clase.

Las estructuras de acordes detectadas son normalizadas a una tonalidad base para poder comparar las versiones cuando una de ellas se interpreta en otra tonalidad.

---

100 Consultar página 246 (capítulo Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados) para una explicación detallada.



Para realizar dicha normalización se utiliza el algoritmo *Dynamic Time Warping*<sup>101</sup> (DTW) implementado en la aplicación MatLab<sup>102</sup>.

A continuación se realiza un análisis estructural de los segmentos de material musical identificados para clasificarlos como versos, estribillos<sup>103</sup> (*chorus*) y puentes<sup>104</sup> (*bridges*).

La investigación reconoce que los porcentajes de éxito del sistema deben ser mejorados identificando otros indicadores o características que permitan mejorar las medidas de proximidad.

### Sinergias

Este trabajo está enmarcado en el tipo de investigaciones que extraen información a partir de la señal sonora y coincide en los principios de esta tesis doctoral en que la respuesta a los indicadores que diferencian los diferentes estilos musicales está en los elementos básicos de la composición. Concretamente, este trabajo identifica versiones musicales únicamente a partir de su estructura de acordes.

Como en la mayoría de investigaciones que tratan señal musical sonora, la transformada de Fourier<sup>105</sup> juega un papel fundamental para la identificación de las clases tonales o acordes identificados.

Este método sin embargo debería ser modificado para ser de aplicación en piezas musicales en las que hubiera gran cantidad de modulaciones como sería la mayoría de obras de música clásica.

### ***Automatic Tonal Analysis: Toward the Implementation of a Music Theory Workbench – H. Taube***

Esta investigación [23] desarrolló en lenguaje *Common LISP*<sup>106</sup> un programa para ser ejecutado en red para analizar e identificar la estructura armónica de una pieza musical en formato MIDI.

El objetivo de esta aplicación ha sido su uso como herramienta de soporte a la actividad docente musical en el ámbito de la armonía y el contrapunto<sup>107</sup>. La aplicación también puede ser utilizada como herramienta de auto-aprendizaje con la cual un estudiante puede comprobar los errores cometidos en la composición en base a las reglas implementadas en la aplicación.

Esta aplicación fue construida sobre un formato de traducción de los elementos musicales (notas, acordes cadencias etc.) a un formato numérico diseñado anteriormente por el mismo autor.

Las fases del proceso de análisis son las siguientes:

- Identificación de la estructura armónica. Esta fase consiste en identificar en cada instante de la ejecución de la pieza el acorde que se interpreta. Dicho acorde se clasifica en base a alguna entrada de las triadas<sup>108</sup> posibles. Para poder realizar esta comparación, Las notas repetidas deben ser eliminadas de cada acorde

---

101 Consultar página 354 (capítulo Anexo 5 – Conceptos estadísticos utilizados.) para una explicación detallada.

102 Consultar página 281 (capítulo Anexo 2 – Conceptos TIC y matemáticos utilizados.) para una explicación detallada.

103 Consultar página 240 (capítulo Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados) para una explicación detallada.

104 Consultar página 257 (capítulo Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados) para una explicación detallada.

105 Consultar página 296 (capítulo Anexo 2 – Conceptos TIC y matemáticos utilizados.) para una explicación detallada.

106 Consultar página 279 (capítulo Anexo 2 – Conceptos TIC y matemáticos utilizados.) para una explicación detallada.

107 Consultar página 236 (capítulo Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados) para una explicación detallada.

108 Consultar página 228 (capítulo Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados) para una explicación detallada.

- Identificación de elementos no armónicos. Todos aquellos elementos que no han sido identificados y clasificados por la fase de “Identificación de la estructura armónica”. Algunos ejemplos de estos elementos serían las suspensiones de notas y los acordes que incluyen el grado 7º del acorde (o séptimas).
- Identificación del centro tonal. Identificar en base a diferentes criterios la nota central o base del acorde. Este proceso desenmascara aquellos acordes que presentan una forma invertida.
- Detección y gestión de excepciones. Del material que quede todavía sin clasificar se identifican excepciones o “errores armónicos” tales como intervalos de octavas y quintas consecutivas<sup>109</sup>, resoluciones erróneas de la nota sensible, notas fuera de rango, desaparición de la nota 3ª en el acorde, etc.

Los resultados alcanzados por la aplicación son presentados por medio de colores sobre la partitura de la pieza analizada con una interfaz orientada a los estándares del lenguaje musical.

La aplicación ha sido probada con éxito sobre un corpus de obras compuesto por corales luteranas de Bach<sup>110</sup>.

### Sinergias

Esta aplicación básicamente programa todas las reglas estudiadas en la disciplina de la armonía y contrapunto musical y comprueba su correcto funcionamiento sobre corales luteranas de Bach.

Esta investigación no tiene unas sinergias tangibles con los propósitos de esta tesis doctoral, pero llevan a la práctica y demuestran la relación entre la música y la matemática, que ha permitido desde su fecha de publicación (1996) el desarrollo de gran cantidad de investigaciones posteriores de diferentes autores referenciados en esta memoria de tesis doctoral.

Debe decirse en cualquier caso, que la implementación y programación de las excepciones está muy ligado a un entorno educativo y a un entorno compositivo concreto ya que todas las reglas establecidas en la armonía tradicional pueden ser omitidas en las composiciones a partir de principios del siglo XX.

### ***An Evaluation of Musical Score Characteristics for Automatic Classification of Composers - Dor O. y Reich Y.***

Esta investigación[2] propone un método de clasificación de piezas de diferentes compositores por medio de técnicas de minería de datos y de algoritmos de aprendizaje con unos índices de éxito considerablemente elevados.

Los compositores utilizados para probar los diferentes métodos de minería de datos son J.S.Bach<sup>111</sup>, L.v.Beethoven, F.Chopin, A.Corelli, F.J.Haydn, S.Joplin, W.A.Mozart, D.Scarlatti y A.Vivaldi. El total de piezas musicales analizadas es de 669 piezas musicales de las cuales 360 fueron compuestas para instrumentos de cuerda frotada y 309 para teclado.

Los indicadores extraídos de cada una de las piezas son los siguientes:

- Porcentajes de notas
- Porcentaje de aparición de notas en cada una de las 10 octavas posibles.

109 Consultar <http://intercentres.cult.gva.es/conservatoriex/profesorado/u1.pdf> Págs 7-8 (consultado en fecha 10/01/2012).

110 Consultar página 320 (capítulo Anexo 4 – Información de compositores analizados y catalogación.) para una explicación detallada.

111 Consultar páginas 313, 315, 319, 321, 326, 329, 333, 339 (capítulo Anexo 4 – Información de compositores analizados y catalogación.) para unas notas bibliográficas de cada autor (en el mismo orden).

- Número de notas y rango máximo de notas usadas en términos absolutos.
- Trigramas de notas. Concretamente las 3 notas que más veces aparecen repetidas en la secuencia de cada una de las voces del material musical.

El material musical procesado está originalmente en formato kern<sup>112</sup>.

Dichos trigramas son obtenidos tras un proceso en que básicamente eliminan de la partitura todas las notas de un acorde dejando únicamente la primera que aparece en el fichero.

Las piezas musicales han sido procesadas en parejas de compositores, por estilos musicales y por estilo/instrumentación.

La aplicación utilizada para el proceso de clasificación es la herramienta de distribución libre desarrollada en Java Weka 3.6<sup>113</sup> desarrollado en la Universidad de Waikato en Australia.[24]

Para la comparación han sido utilizados los siguientes clasificadores: C4.5<sup>114</sup>, (clasificador de árboles de decisión), *Ibk* (k vecino más próximo), *Jrip* (poda incremental repetida para producir la reducción de errores), *Bayes* nativo, *Random Forest* (clasificador aleatorio de poblaciones), SMO (optimización secuencial mínima) y *Simple Logistic* (modelos de regresión logística lineal). Este último método es el que consigue unos mayores porcentajes de éxito.

La Tabla 9 muestra los mejores resultados así como el clasificador que consigue dicho resultado máximo.

Conjuntos de datos	Máximo porcentaje de éxito	Clasificador óptimo <sup>115</sup>
Compositores clásicos	69,23%	Simple Logistic
Compositores barrocos	84,26%	Simple Logistic
Piezas de cuerda	84,91%	Simple Logistic
Piezas para teclado	83,52%	Simple Logistic
Piezas para teclado clásicas	81,40%	Simple Logistic
Piezas para teclado barrocas	95,63%	Random Forest
Piezas de grandes compositores (Bach, Beethoven y Mozart)	91,30%	Random Forest
Por compositores	79,06	Simple Logistic

Tabla 9: Mejores clasificadores y porcentaje de clasificación por conjuntos de datos utilizados.

Los porcentajes de la Tabla 9 tienen unos márgenes de error que fluctúan ente el 0,67% y el 6,79%.

La investigación incluye también los resultados de la aplicación del clasificador SMO por parejas de compositores y por parejas de compositores en piezas para teclado con unos resultados de éxito máximos de 99,33% diferenciando a Joplin de Corelli, y a Joplin de Mozart y unos peores resultados del 75,16% diferenciando Mozart de Haydn, y del 80% para Beethoven y Chopin.

112 Consultar página 273 (capítulo Anexo 2 – Conceptos TIC y matemáticos utilizados.) para una explicación detallada.

113 Consultar página 298 (capítulo Anexo 2 – Conceptos TIC y matemáticos utilizados.) para una explicación detallada.

114 Consultar las páginas 269, 358, 275, 284, 288, 293 y 291 (capítulo Anexo 2 – Conceptos TIC y matemáticos utilizados.) para una explicación detallada de los diferentes algoritmos (según el orden en que están enumerados).

115 Aquel que alcanza el mayor porcentaje de éxito.

Dichos resultados se reducen si en los conjuntos de piezas analizadas se mezclan piezas para teclado y para cuerda. Por ejemplo el 75,16% diferenciando piezas para teclado de Mozart y Haydn se reduce a un 62,8% si se diferencia Mozart y Haydn con los conjuntos de piezas incluyendo obras para teclado y para cuerda.

Los resultados obtenidos diferenciando parejas de compositores utilizando sus piezas para teclado son similares a los obtenidos procesando sus piezas para cuerda.

### Sinergias

Esta investigación coincide con mi opinión de que las características que identifican el estilo compositivo de un autor se encuentran en datos de bajo nivel y no en los indicadores que afectan a la totalidad de una partitura tal como queda patente en mi memoria de Master[25].

Otra diferencia es que este estudio sacrifica gran parte de las notas de cada pieza musical para obtener el único indicador que utiliza relacionado con intervalos melódicos que son los trigramas más utilizados.

La principal diferencia entre esta investigación y la que se ha hecho en esta tesis doctoral es el conjunto de indicadores que se utilizan para hacer la clasificación. En mi investigación se utiliza un conjunto homogéneo de indicadores principalmente los porcentajes de uso de cada intervalo melódico.

Esta es sin duda la investigación que presenta mayores similitudes con el trabajo de investigación presentado en esta tesis doctoral e iniciado en el máster TIC en Julio de 2009

### ***Cognitive foundations of musical pitch - Krumhansl, C.L.***

La investigación publicada en este libro[26] relacionada con esta tesis doctoral propone un método para estimar la tonalidad<sup>116</sup> de fragmentos de material musical de diferente duración.

El método diseñado calcula para un determinado fragmento de material musical la duración total de pulsos de compás<sup>117</sup> que aparece en la partitura algún elemento de cada una de las 12 clases de notas<sup>118</sup> (*pitch classes*) del sistema tonal. Es decir un valor 3,5 en la clase “Mi” en un compás de 4/4 indica que las diferentes notas “Mi” han estado sonando una duración total de 3,5 pulsos de compás (3 negras + 1 corchea).

De este modo se obtiene un vector de doce valores (uno por cada clase de nota del sistema tonal)

Paralelamente, se tienen dos vectores de patrones de referencia uno para cada modo Mayor o menor.

El método calcula el valor de correlación de *Pearson*<sup>119</sup> entre las distribuciones de referencia y los valores obtenidos del fragmento musical del cual se desea inferir la tonalidad.

Los vectores de referencia o patrones fueron obtenidos por medio de resultados experimentales obtenidos en otro estudio[27].

Los vectores patrones de cada tonalidad no son más que el vector de valores asociado a la tonalidad de Do Mayor pero desplazado (*shifted vector*) el número de intervalos que dista la nota tónica de cada tonalidad y la tonalidad de Do Mayor, es decir, el vector patrón de la tonalidad de Mi

---

116 Consultar página 261 (capítulo Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados) para una explicación detallada.

117 Consultar página 235 (capítulo Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados) para una explicación detallada.

118 Todas las notas La2, La3, La4 etc. de las diferentes octavas del espectro de frecuencias son consideradas como ocurrencias de la misma clase “La”.

119 Consultar página 352 (capítulo Anexo 5 – Conceptos estadísticos utilizados.) para una explicación detallada.

bemol Mayor será el vector de la tonalidad de Do Mayor pero desplazado hacia la derecha 3 posiciones.

La tonalidad cuyo vector patrón mayor correlación consigue al compararlo con el vector de valores de la pieza analizada será la tonalidad inferida por el método como la tonalidad más probable.

Los porcentajes de éxito obtenidos al aplicar el método de esta investigación se encuentran resumidos en la Tabla 10.

Compositor	Nº de fragmentos	Longitud fragmento	% de éxito
J.S.Bach (preludios del Clave Bien Temperado) <sup>120</sup>	48	4 primeras notas	91,70%
D.Shostakovich <sup>121</sup> (preludios)	24	4 primeras notas	70,80%
F.Chopin (preludios) <sup>122</sup>	24	4 primeras notas	45,80%

Tabla 10: Resultados piezas utilizadas en el experimento y resultados de éxito.

### Sinergias

Este estudio método así como sus posteriores mejoras y revisiones realizadas por otros autores y resumidas más adelante, se basan también en un histograma de uso de notas pero este estudio lo basa en la duración total de todas las notas de la clase mientras que el método propuesto más adelante en esta tesis doctoral basa su método en el histograma del número de veces que se han identificado notas de cada clase.

La principal diferencia es que el método presentado en esta tesis doctoral obtiene sus resultados a partir de la totalidad de las piezas musicales analizadas y las de referencia, y al obtener resultados porcentuales, el método permite comparar piezas musicales de diferente forma musical, orquestación, duración y estilo musical.

*A priori*, utilizar sólo las cuatro primeras notas o acordes de cada pieza para inferir la tonalidad parece insuficiente para incluir toda la complejidad del proceso competitivo, así lo opinan los autores que, con posterioridad han, revisado y mejorado dicho método.

### ***An Evaluation System for Metrical Models. Temperley D.***

Esta investigación[28] analiza los sistemas automáticos de inferencia de la estructura métrica de una pieza musical hasta la fecha.

El artículo reconoce que los sistemas que infieren estructura métrica a partir de material sonoro consiguen mejores resultados que los que lo infieren a partir de información simbólica de la partitura de la pieza.

Este hecho es debido a que basan su análisis en base a los picos de intensidad de las notas y su estructura de repetición periódica en el tiempo. Como es comprensible, los mejores resultados de estos sistemas se consiguen en piezas pop modernas con un fuerte componente rítmico basado en una batería.

120 Consultar página 314 (capítulo Anexo 4 – Información de compositores analizados y catalogación.) para una explicación detallada.

121 Consultar página 342 (capítulo Anexo 4 – Información de compositores analizados y catalogación.) para una explicación detallada.

122 Consultar página 319 (capítulo Anexo 4 – Información de compositores analizados y catalogación.) para una explicación detallada.

El artículo asevera 4 requerimientos que debe cumplir un sistema de análisis métrico de piezas musicales:

- La existencia de una forma reconocida de representación del tipo de información recuperada.
- La existencia de un corpus suficientemente grande y representativo de datos.
- La existencia de un análisis correcto del corpus (que representa la información a ser recuperada).
- Una forma acordada de comparación de los análisis de un modelo del corpus con los análisis correctos y puntuación del modelo de su éxito en el que emparejan los análisis correctos.

El autor clasifica los métodos de análisis métricos entre los que aceptan material musical cuantificado<sup>123</sup> y material originado en una interpretación a tiempo real y establece diferentes maneras de evaluar cada uno de estos tipos.

La información simbólica a partir de la cual aplica el método es un listado de eventos similares a los eventos MIDI en los cuales en cada uno de ellos aparece la información de cada nota de la partitura del siguiente modo:

- **Instante de inicio de nota:** medido en milisegundos contados a partir del principio de la pieza en el cual la nota empieza a sonar.
- **Instante de final de nota:** medido en milisegundos contados a partir del principio de la pieza en el cual la nota deja a reproducirse.
- **Código de nota:** Cifra entera (0-127 igual que el sistema MIDI) que identifica la nota.
- **Codificación de posición en la estructura métrica analizada:** Un sistema numérico que permite identificar el momento en el cual se enmarca dicha nota en base al patrón métrico que se está analizando.

El autor propone a partir de información simbólica del material musical obtener 4 niveles de información de menos significativo a más significativo. En los ejemplos publicados en el nivel 2 identifica generalmente la duración de corchea que él define como *main beat* que es la unidad de duración mínima (en el corpus analizado en esta publicación coincide generalmente con la corchea).

Al alcanzar el nivel 3 identifica los tiempos del compás<sup>124</sup> (en el ejemplo de la Figura 102) y en el nivel 4 identifica los primeros tiempos (coincidiendo con el pulso más fuerte del compás).

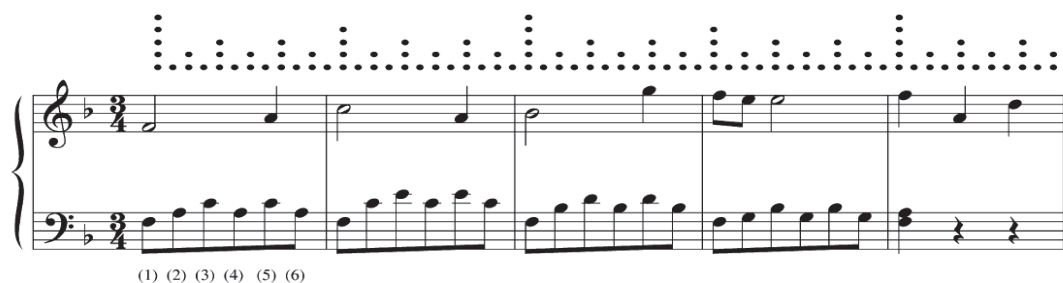


Figura 1: Puntuación de los puntos métricos identificados en cada nivel (1-4). (Fuente [28] Pág 33)

123 Consultar página 238 (capítulo Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados) para una explicación detallada.

124 Consultar página 235 (capítulo Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados) para una explicación detallada.

Con este sistema de representación simbólica de la información musical, se compara la información obtenida de la pieza musical con patrones métricos y mediante una función de distancia entre el patrón métrico correcto y cada uno de los candidatos, establece una puntuación de lo próximo que está cada uno de los sistema métrico candidatos con la información simbólica obtenida de la pieza musical.

Dicho método lo aplica a un corpus de piezas de Kostka-Payne[29] y otro de dos canciones de los Beatles (*Yesterday* y *Michelle*) con unos porcentajes de éxito de entre el 87% y el 98%.

### Sinergias

Este estudio ha sido utilizado como referencia bibliográfica para el desarrollo del sistema ORPET (ver “Capítulo 11. O.R.P.E.T. (Objective Rhythmic Performance Evaluation Tool) un método numérico objetivo de evaluación de la interpretación musical” a partir de la página 171), uno de los desarrollos de esta tesis doctoral que consiste como se verá en la página referenciada en un mecanismo de valoración de la exactitud rítmica de la ejecución de una pieza musical en base a una interpretación considerada de referencia.

### ***What's Key for Key? The Krumhansl-Schmuckler Key-Finding Algorithm Reconsidered. - Temperley D.***

Esta investigación[30], analiza el método propuesto en el artículo resumido anteriormente ([26]), identifica los puntos débiles del mismo, propone unas mejoras del mismo y enumera nuevamente los puntos débiles de este nuevo método.

La primera modificación que propone es, cambiar ligeramente los patrones de referencia utilizados para calcular la correlación. Dicha modificación cambia ligeramente los valores del vector de 12 valores numéricos de los patrones de tonalidades mayores y menores.

Para cada pieza a estimar su tonalidad, su método calcula la cantidad de tiempo que “suena” en total (por decirlo de una manera poco formal pero muy clara) cada una de las 12 notas. Por cada pulso de compás que suene una nota Do, su método incrementa en 0,5 el valor de la clase Do.

Es decir si en una melodía o pieza musical la nota Do “suena” una duración de 2 compases y medio en toda la pieza (siendo el compás de la pieza  $\frac{3}{4}$ )<sup>125</sup>, dicha nota “suena” (no simultáneamente ni cronológicamente) 7,5 pulsos de compás (3 por cada compás) siendo 3,75 el valor de la clase Do para esta pieza o melodía.

Calculado el vector de clases de la pieza o melodía y calculando la correlación (ver Figura 2) que tiene con un vector de valores predefinido *a priori* (llamada anteriormente patrones de referencia) y según detalla en su artículo obtenido mediante pruebas experimentales.

$$r = \frac{\sum (x - \bar{x}) * (y - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x - \bar{x})^2 * \sum (y - \bar{y})^2}}$$

Figura 2: Expresión de la correlación entre dos variables.

Dicho método lo aplica a las 4 primeras notas de las piezas enumeradas en la Tabla 11 en la cual se muestran también el número de piezas de cada colección estudiada y el porcentaje de éxito alcanzado.

---

125 Consultar página 235 (capítulo Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados) para una explicación detallada.

Colección de piezas / Compositor	Nº de piezas	Porcentaje de éxito
Preludios del “Clave bien Temperado” / J.S.Bach	48	91,70%
24 Preludios Op28 / F.Chopin	24	70,80%
24 Preludios / D.Shostakovic	24	45,80%

Tabla 11: Porcentajes de éxito alcanzados por Temperley en la identificación de la tonalidad a partir de las 4 primeras notas de cada pieza.

Mostrados estos resultados, Temperley realiza un proceso de mejora de los valores de los patrones de referencia experimentando diferentes valores de dicho vector sobre la *Courante*<sup>126</sup> de la Suite n°3 para violonchelo de J.S.Bach.

Analizando los algoritmos de identificación de tonalidad anteriores Temperley llega a la conclusión que una gran solución sería combinar los algoritmos propuestos por Krumhansl-Schmuck[26] y por Longuet-Higgins/Steedm[31].

Temperley continúa su artículo analizando el problema de las modulaciones<sup>127</sup> en el discurso musical, ya que los métodos propuestos con anterioridad sólo infieren una tonalidad para una pieza o pasaje.

La solución que propone Temperley consiste en dividir una pieza o fragmento musical en fragmentos aislados.

El método calcula la tonalidad de cada uno de estos fragmentos (o el acorde que mejor describe las notas que contiene) entendiendo que el discurso musical se resiste en principio a cambiar de tonalidad, y el método no considerará que haya existido un cambio de tonalidad a no ser que haya fuertes evidencias de ello. En caso de que haya cambio de acorde/tonalidad el método penalizará numéricamente dicho cambio.

Cuanto mayor sea la penalización aplicada, el método se verá forzado a considerar secciones más largas con la misma tonalidad y viceversa.

Incluso reconoce que puede darse el caso que la tonalidad o acorde de cada uno de los fragmentos aislados no sea la/el mismo en un contexto más amplio conectando los fragmentos aislados.

La puntuación para el análisis es simplemente la suma de las puntuaciones del perfil de tonalidad y de las penalizaciones de cambio para cada segmento. Cabe señalar que el número de análisis posibles aumenta exponencialmente con el número de segmentos, sin embargo, el programa utiliza programación dinámica para encontrar el análisis de mayor puntuación posible sin tener que generar todos ellos

Cuando experimenta su método (con los sujetos de las 48 fugas de “El clave bien Temperado” de J.S.Bach y con material de Kostka-Payne[29]) con corpus de piezas polifónicas elimina los trinos y las ornamentaciones.

Temperley justifica la utilización del material musical de “El clave bien Temperado” de J.S.Bach por ser utilizado por otros métodos y de este modo poder comparar los resultados con otros métodos.

Su método consigue identificar correctamente 42 de los 48 sujetos de Bach. (87,5% de éxito).

126 Consultar página 237 (capítulo Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados) para una explicación detallada.

127 Consultar página 251 (capítulo Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados) para una explicación detallada.



Temperley utiliza un corpus de piezas de Kostka-Payne y detecta correctamente la totalidad de las 40 modulaciones identificadas por los autores en las obras. Los porcentajes de éxito están entre el 91,4% en los primeros capítulos y del 75,6 en los últimos.

En opinión de Temperley, nunca se había aplicado una experimentación a partir de material musical tan general a ningún sistema existente de identificación de la tonalidad de pieza/fragmento.

### Sinergias

Si bien el objetivo de este estudio es identificar en todo momento de la interpretación musical el acorde y grado musical en el cual se encuentra una pieza musical, cierto es que busca la respuesta en indicadores de bajo nivel, es decir, en el nivel de uso de cada una de las notas del sistema tonal. El mismo lugar donde una de las investigaciones incluidas en esta tesis doctoral busca definir un sistema para identificar la tonalidad de una pieza musical.

Una gran diferencia entre esta investigación de Temperley y el método de cálculo de la tonalidad presentado en esta tesis doctoral es que nuestro objetivo motor es conseguir métodos numéricos simples y generales sin utilizar para nada la complejidad y diversidad de posibilidades y recomendaciones en los procesos de composición de obras musicales tonales.

Otra gran diferencia es que el método de Temperley elimina las ornamentaciones por distorsionar el proceso de identificación de la tonalidad. En el método presentado en esta tesis (como se verá en el “Capítulo 12. Identificación automática de la tonalidad de piezas musicales clásicas por medio de algoritmos evolutivos” en la página 184), no se descarta ningún material musical por considerarlo todo en el mismo nivel de importancia.

## **A probabilistic topic model for unsupervised learning of musical key-profiles - Diane j. Hu, Lawrence K. Saul**

En esta investigación[32] se propone un método para inferir la tonalidad de una pieza musical basado en *Latent Dirichlet Allocation (LDA)*<sup>128</sup>, un modelo probabilístico para descubrir tópicos semánticos ocultos en grandes colecciones de documentos de texto. El porcentaje de éxito del método (aplicados a un corpus de 235 piezas musicales de los compositores Bach, Vivaldi, Mozart, Beethoven, Chopin, y Rachmaninoff.<sup>129</sup>) es del 86%

LDA aplicado para colecciones de textos se basa en la premisa de que los documentos acerca de temas similares contienen palabras similares.

Este método toma como punto de partida la investigación de Krumhansl and Schmuckler[26], cambiando el modo de cálculo de los perfiles de tonalidad (*key-profiles*).

El método de Krumhansl calcula en cada fragmento en el que se infiere su tonalidad el tiempo que “suena” cada nota y calcula su correlación (ver Figura 2 en página 55) con los perfiles de cada tonalidad e infiere que la de mayor correlación es la tonalidad de la pieza o fragmento.

Hu y Saul cambian los perfiles de tonalidad en base a la frecuencia de uso de cada nota en la pieza/segmento.

La variante del método LDA de Hu y Saul para el aprendizaje no supervisado de perfiles de tonalidad se basa en la premisa de que las piezas musicales con tonalidad idéntica utilizan conjuntos similares de notas.

---

128 Consultar página 360 (capítulo Anexo 5 – Conceptos estadísticos utilizados.) para una explicación detallada.

129 Consultar las páginas 313, 346, 333, 315, 319 y 338 (capítulo Anexo 4 – Información de compositores analizados y catalogación.) para unas notas biográficas (en el orden de enumeración de los compositores).

Si bien Krumhansl divide su método en el cálculo a priori de los perfiles de tonalidad y posteriormente correlacionarlos con los vectores de las piezas las cuales se desea inferir su tonalidad, en este método dichos dos pasos están integrados de manera natural.

### Sinergias

Este método es muy similar al diseñado en esta tesis doctoral, pero presenta las siguientes diferencias:

- Se utiliza para medir una función de distancia ponderada en vez de una correlación entre variables.
- Añade una fase de optimización de los pesos de la función de distancia por medio de un algoritmo evolutivo.
- No utiliza 24 perfiles de tonalidad (12 para tonalidades Mayores y 12 para las menores<sup>130</sup>) sino que utiliza 12 perfiles de tonalidad para inferir la nota tónica de la pieza y una segunda fase para inferir el modo de la tonalidad.
- Consigue mejores porcentajes de éxito.
- Se ha aplicado a un corpus de piezas mayor (1619 piezas en total).

Estas diferencias serán analizadas en profundidad más adelante en el “Capítulo 12. Identificación automática de la tonalidad de piezas musicales clásicas por medio de algoritmos evolutivos” (página 184).

Haciendo honor a la verdad, debe decirse que el desarrollo del método de identificación de la tonalidad propuesto en esta tesis ha sido un resultado colateral obtenido rápidamente en la búsqueda de un método para clasificar piezas por compositor y diseñado desde cero. Una vez diseñado, y al preparar un artículo científico fue cuando se descubrió la investigación de Hu y Saul así como sus similitudes, pudiendo dar la impresión de que mi método es una continuación del trabajo de Hu y Saul cuando no ha sido así.

## **Musical style identification using grammatical inference - Cruz-Alcázar et al.**

Los autores presentan en esta investigación[33] un mecanismo para identificar el estilo musical de una pieza musical a partir de inferencia gramatical. Los experimentos realizados por ellos clasifican piezas de tres estilos musicales en base a información extraída de la melodía con un 3% de error mínimo.

En primer lugar codifican la información de la melodía por medio de una secuencia de parejas de valores (tono, duración). Dichas secuencias las plantean como una codificación absoluta del tono de la nota o una codificación relativa respecto la nota anterior.

Otras informaciones codificadas en la gramática son el contorno melódico así como la distancia relativa al centro tonal.

Las duraciones es las codifican de manera discreta (negra, corchea, blanca etc.) y también pueden codificarse de manera absoluta o relativa al compás.

---

130 Consultar página 261 (capítulo Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados) para una explicación detallada.

Las 100 melodías analizadas en sus experimentos tienen una duración de entre 10 y 40 segundos y pertenecen a los siguientes tres estilos musicales: Música Gregoriana<sup>131</sup>, Música sacra<sup>132</sup> de J.S.Bach y ragtimes<sup>133</sup> de Scott Joplin<sup>134</sup>.

Las técnicas utilizadas son ECGI (*Error-Correcting Grammatical Inference*<sup>135</sup>), k-TSI<sup>136</sup> (un algoritmo basado en el algoritmo k-LSSN -*Testable Languages in the Strict Sense*) y n-Gramas<sup>137</sup>.

A continuación analiza la aplicación de cada uno de los tres algoritmos comentados en el párrafo anterior con cada uno de los métodos de codificación propuestos (absoluto, relativo, respecto al contorno y respecto al centro tonal).

En la tabla 1 de su publicación resumen en qué situaciones obtiene un mayor éxito de clasificación cada uno de los tres algoritmos estudiados.

### Sinergias

Esta investigación persigue los mismos objetivos que una parte de esta tesis doctoral, sin embargo, es poco exigente en la elección de los estilos de música a clasificar ya que son considerablemente dispares incluso para un oyente ausente.

Otro aspecto de esta investigación con respecto a los métodos propuestos en esta tesis doctoral es que basan su análisis únicamente en la melodía de la pieza musical y no en la totalidad del material musical tal como se propone en este documento. Este hecho provoca evitar el problema que comporta analizar el impacto de las modulaciones, la armonía, la orquestación y otros aspectos de índole musical en la definición del estilo musical.

### **Two Grammatical Inference Applications In Music Processing - Cruz-Alcázar y Vidal.**

Básicamente este artículo[34] es una ampliación del artículo resumido anterior<sup>138</sup>. En ella los autores incluyen otro corpus de datos consistente en piezas musicales de estilo celta, sonatas<sup>139</sup> de Doménico Scarlatti<sup>140</sup>, y el mismo corpus de música gregoriana.

A su vez las piezas de estilo se subdividen en dos estilos: música celta y danzas celtas. De este modo el nivel de dificultad de los métodos utilizados es superior debido a la proximidad de estilo de los dos subestilos de música celta.

Los porcentajes de éxito son similares e incluso mejores que la investigación anterior (tasa de error mínima del 0,5%).

---

131 Consultar página 318 (capítulo Anexo 4 – Información de compositores analizados y catalogación.) para una explicación detallada.

132 Consultar página 334 (capítulo Anexo 4 – Información de compositores analizados y catalogación.) para unas notas biográficas.

133 Consultar página 258 (capítulo Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados) para una explicación detallada.

134 Consultar página 329 (capítulo Anexo 4 – Información de compositores analizados y catalogación.) para unas notas biográficas.

135 Consultar página 265 (capítulo Anexo 2 – Conceptos TIC y matemáticos utilizados.) para una explicación detallada.

136 Consultar página 267 (capítulo Anexo 2 – Conceptos TIC y matemáticos utilizados.) para una explicación detallada.

137 Consultar página 283 (capítulo Anexo 2 – Conceptos TIC y matemáticos utilizados.) para una explicación detallada.

138 *Musical style identification using grammatical inference* - Cruz-Alcázar et al

139 Consultar página 340 (capítulo Anexo 4 – Información de compositores analizados y catalogación.) para una explicación detallada.

140 Consultar página 339 (capítulo Anexo 4 – Información de compositores analizados y catalogación.) para unas notas bibliográficas.

El artículo propone utilizar los mismos mecanismos utilizados para clasificar piezas musicales por estilo (Inferencia Gramatical) como un método de composición automática de piezas musicales en base a las reglas identificadas de un estilo concreto.

La investigación propone para poder valorar los resultados de las melodías generadas los siguientes cuatro criterios de evaluación:

- Las melodías generadas han de tener sentido musical en su conjunto, es decir no pueden parecer una secuencia aleatoria de sonidos.
- Las melodías han de ser consideradas pertenecientes al estilo para el cual han sido sintetizadas.
- Las melodías generadas deben ser correctas en su construcción y estructura (principio, desarrollo y final).
- Deben ser diferentes a cualquier melodía utilizada en el conjunto de entrenamiento.

A continuación analiza cuál de los métodos utilizados (ECGI y k-TSI) es mejor y en base a qué valores obtenidos del conjunto de entrenamiento (valores absolutos, relativos y centro tonal) para generar melodías aleatorias.

Los resultados de valoración de las melodías generadas se hace en base a 3 valores: mala, buena y muy buena.

### Sinergias

Debido a que parte de la publicación está ya comentada en la anterior investigación, centraré los comentarios en la utilización de dichas técnicas para generación automática de melodías.

Para mejorar la credibilidad del método los autores incrementan el número de piezas analizadas y experimentan con dos estilos próximos en estilo.

Otro aspecto de esta investigación con respecto a los métodos propuestos en esta tesis doctoral es que basan su análisis únicamente en la melodía de la pieza musical y no en la totalidad del material musical tal como se propone en este documento. Este hecho provoca evitar el problema que comporta analizar el impacto de las modulaciones, la armonía, la orquestación y otros aspectos de índole musical en la definición del estilo musical. Este hecho ya ha sido comentado en la anterior investigación analizada.

A pesar de que los criterios de evaluación de la calidad de una melodía son a mi juicio adecuados, si están formulados de esta manera tan subjetiva sólo podrán ser aplicados por un humano y especializado en el conocimiento de cada uno de los estilos imitados.

### ***HarmTrace: Automatic functional harmonic analysis - W. Bas de Haas, J.P. Magalhães, et. al.***

Esta investigación[35] plantea un lenguaje y un mecanismo para describir por medio de una estructura de datos en forma de árbol la estructura armónica de una pieza musical compuesta en base a la armonía tonal.

El artículo presenta este método como el primero que realmente permite describir de forma matemática todas las estructuras poco formales de la armonía tonal.

El método *HarmTrace* permite definir todos los acordes posibles del sistema tonal y los identifica en base a la tonalidad de la pieza musical.

El sistema *HarmTrace* está programado en el lenguaje *Haskell*<sup>141</sup> el cual permite implementar complejas técnicas de programación fácilmente.

El material de entrada al sistema es una secuencia en formato de texto con los acordes ordenados en la secuencia de aparición en la pieza musical. El formato de la descripción textual de los acordes es la realizada por Harte en el año 2005.

El sistema incluye una fase de corrección de errores que asumen que provoca un incremento el tiempo de proceso total.

El sistema fue probado en una base de datos con 5028 acordes (no especifica cuantas piezas musicales contiene dicho corpus de datos). Sin especificar cuantas piezas hay de cada tipo en el corpus, los autores comentan que se han procesado piezas de jazz, música latina, pop y unas pocas piezas clásicas.

El artículo compara los resultados de tiempo de proceso con el sistema de De Haas[36] basado en gramáticas comentando que sus sistema no abandona nunca mientras que el de De Haas abandona el proceso de muchas piezas.

Se puede deducir que dichas piezas clásicas incluyen corales<sup>142</sup> de J.S.Bach ya que presentan el árbol de estructura armónica de la coral BWV349<sup>143</sup> en Fa Mayor generado por el sistema *HarmTrace*.

### Sinergias

Comparando esta investigación (así como muchas otras) con las realizadas en esta tesis doctoral, extrae información a partir de la estructura armónica mientras que nuestra teoría es que en elementos más elementales también hay respuesta a las características del estilo musical de un compositor.

Hay que añadir además, que el sistema funciona siempre y cuando la pieza musical no haya sido compuesta para un instrumento de cuerda frotada (como las partitas<sup>144</sup> para violín y *suites*<sup>145</sup> para violonchelo de J.S.Bach) en las cuales la identificación de la estructura armónica no puede basarse en una ventana de análisis de un acorde ya que para deducir el acorde en el que está inmerso una nota habrá que analizar las notas vecinas.

En cualquier caso, el traducir la estructura armónica de una fuente de datos secuencial (una obra musical) a una estructura de árbol es una idea muy interesante y con seguridad será la base para análisis futuros a partir de estas estructuras de datos en el campo MIR (*Music Information Retrieval*).

## **Analizador Tonal en Software Libre - De la Fuente J.C, Rodríguez M.**

Esta investigación[37] es un proyecto fin de carrera de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Informática de la UNED en el cual se propone el estudio y la realización de una aplicación informática, integrable en una plataforma de aprendizaje musical, que realice la función de

---

141 Consultar página 278 (capítulo Anexo 2 – Conceptos TIC y matemáticos utilizados.) para una explicación detallada.

142 Consultar página 320 (capítulo Anexo 4 – Información de compositores analizados y catalogación.) para una explicación detallada.

143 Consultar página 317 (capítulo Anexo 4 – Información de compositores analizados y catalogación.) para una explicación detallada del sistema de catalogación BWV de J.S.Bach.

144 Consultar página 256 (capítulo Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados) para una explicación detallada.

145 Consultar página 260 (capítulo Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados) para una explicación detallada.

reconocer y analizar los acordes introducidos por el alumno, y corregirlos en función de las reglas de la armonía tonal clásica, mostrando indicaciones sobre los errores cometidos.

Este problema basa su factibilidad y justifica el uso de un programa de ordenador en base a las siguientes consideraciones:

- Dificultad intrínseca de los ejercicios de armonía, y la consiguiente conveniencia de herramientas de corrección automatizada.
- Viabilidad de expresar formalmente las reglas de la armonía.
- Necesidad de seleccionar y adaptar las reglas aplicadas para adaptarse al nivel del alumno y también para manejar la subjetividad de muchas reglas.
- Escasa disponibilidad de tutores humanos cualificados.

El sistema incluye también un mecanismo de generación automática de ejercicios y ha sido desarrollado de la mano de la aplicación informática LenMus.

*LenMus* es una aplicación de software libre para aprendizaje musical que permite crear libros interactivos en los que la teoría musical se intercala con ejercicios. Estos ejercicios presentan aspectos muy destacables, relacionados con su dinamismo: son configurables y aleatorios, por lo que el profesor los puede adaptar y el alumno puede disponer de una infinita variedad. Además, es destacable el seguimiento y evaluación de los resultados del alumno.

### Sinergias

Técnicamente las áreas de estudio y los objetivos de esta investigación no presentan ninguna intersección con los objetivos de esta tesis doctoral, sin embargo la documentación de este proyecto, sus objetivos y la claridad de exposición de los aspectos tecnológicos / musicales es de una gran cualidad y ha permitido establecer sinergias contextuales y constatar los mismos límites y aspectos a tener en cuenta la desarrollar una aplicación que procesa información simbólica.

Valorar por última la gran cualidad del trabajo y su aportación de contenidos relacionados con la informática musical y sus aplicaciones a la enseñanza de las técnicas básicas de composición.

### **Pitch spelling algorithms - Meredith D.**

En esta investigación[38] presenta algunos de los resultados de su tesis doctoral[39]. Dichos resultados son el desarrollo de un algoritmo llamado *ps13* que identifica el nombre exacto de cada nota del material obtenido en formato MIDI. Con este algoritmo consigue predecir correctamente el nombre de cada nota en un 99,81% de los casos.

Básicamente el algoritmo deduce con un 99,81% de probabilidad de éxito el nombre de cada una de las notas identificadas en un fichero MIDI solucionando cuál de las diferentes notas enarmónicas<sup>146</sup> es la que, dependiendo del contexto musical y tonal se encuentra, es la que realmente debía estar escrita en la partitura original.

Este problema es debido a que el formato MIDI identifica el tono de cada nota en los mensajes NOTE ON con un número entero entre 0 y 127 (ver Tabla 104 en página 306) sin especificar la grafía que tenía dicha nota en la partitura. El sistema de notación musical tonal permite representar el mismo sonido con diferentes grafías cada una de ellas afectada por alteraciones.

Para justificar las mejoras, el autor experimenta los resultados del algoritmo *ps13* sobre el mismo corpus de piezas musicales utilizadas por, Cambouropoulos[40] (93,74% de éxito), Longuet-

---

<sup>146</sup> Consultar página 253 (capítulo Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados) para una explicación detallada.

Higgins[41] (99,36 % de éxito) y Temperley[42] (99,7% de éxito): El Clave bien Temperado bwv 846-869<sup>147</sup> con 41.544 notas.

Tras analizar estos algoritmos, detalla el funcionamiento del algoritmo *ps13* deduciendo el nombre de cada nota en base a las ocurrencias de las notas que aparecen en una ventana temporal alrededor de la nota.

En un segundo proceso, el algoritmo corrige los nombres de las notas de paso<sup>148</sup> que han tomado su nombre de las notas vecinas.

Este algoritmo elude la utilización de reglas tal como hace el algoritmo de Temperley el cual prioriza los nombres de las notas que están próximas en el ciclo de quintas.

Este tipo de algoritmos tiene un gran interés para los editores de partituras musicales tales como *Finale*<sup>149</sup> y *Sibelius*<sup>150</sup> que permiten importar material en formato MIDI, y muchas veces dichos procesos de importación cometen errores asignando grafías erróneas a determinadas notas simplemente por el hecho de que dicha información no se almacena en el formato MIDI.

### Sinergias

La experimentación del algoritmo de inferencia de la tonalidad de una pieza musical presentado en esta tesis doctoral también ha sido realizada (consultar “Capítulo 12. Identificación automática de la tonalidad de piezas musicales clásicas por medio de algoritmos evolutivos” en página 184) sobre el mismo corpus que las investigaciones comparadas en esta investigación para poder comparar con fundamento sus índices de éxito.

Si bien las investigaciones presentadas en esta tesis doctoral no son el diseño de un algoritmo de identificación de nombres de notas (*pitch spelling*), el estudio en profundidad de estas investigaciones ha permitido constatar que es posible la búsqueda de algoritmos muy simples que permitan inferir la tonalidad de una pieza musical tonal clásica con una alta fiabilidad.

Esta investigación presenta resultados a partir del corpus de piezas analizadas en otras investigaciones con el mismo objetivo (Cambouropoulos, Longuet-Higgins y Temperley) sin embargo no presenta ningún resultado de nivel de fiabilidad si el corpus de piezas musicales tengan un alto carácter vocal (tal como las corales luteranas de J.S.Bach<sup>151</sup>) en las cuales en muy pocos acordes y notas, la tonalidad cambia dos o tres veces. En este tipo de obras la utilización de ventanas de más de la mitad de un compás provocaría errores en la identificación de las notas.

### **A Bayesian Key-Finding Model – Temperley D.**

Esta investigación[43] (basada en el trabajo de Krumhansl and Schmuckler[26]) determina un modelo para identificarla tonalidad de una pieza musical (representado como un archivo MIDI) utilizando perfiles, en combinación con los principios bayesianos<sup>152</sup>. El modelo divide la pieza en segmentos cortos, que luego se busca la tonalidad más probable. La probabilidad de una tonalidad es una función del número de modulaciones en la estructura, y el ajuste de la clave de cada segmento de paso a los de las clases en el segmento. La tonalidad de la pieza se define entonces por

---

147 Consultar página 317 (capítulo Anexo 4 – Información de compositores analizados y catalogación.) para una explicación detallada del sistema de catalogación BWV de J.S.Bach.

148 Consultar página 253 (capítulo Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados) para una explicación detallada.

149 Consultar página 273 (capítulo “Anexo 2 – Conceptos TIC y matemáticos utilizados.”) para una breve descripción y el enlace “<http://www.finalemusic.com/default.aspx>” para una información detallada del editor *Finale* de *Coda Music*.

150 Consultar página 292 (capítulo “Anexo 2 – Conceptos TIC y matemáticos utilizados.”) para una breve descripción y el enlace “[http://www.sibelius.com/home/index\\_flash.html](http://www.sibelius.com/home/index_flash.html)” para una información detallada del editor *Sibelius*.

151 Consultar página 320 (capítulo Anexo 4 – Información de compositores analizados y catalogación.) para una explicación detallada.

152 Consultar página 351 (capítulo Anexo 5 – Conceptos estadísticos utilizados.) para una explicación detallada.

la tonalidad del primer segmento de esta estructura de clases con una probabilidad de éxito del 90,01% en un corpus de 1252 piezas musicales.

### Sinergias

A pesar de ser David Temperley una autoridad muy respetada por su trabajo en el desarrollo de algoritmos de identificación de la tonalidad de una pieza, la utilización de la técnica de clasificación bayesiana no ha sido utilizada en esta tesis doctoral porque los resultados de la misma en lo referente a identificación de tonalidad han sido unos resultados colaterales obtenidos tras el desarrollo de la herramienta AN\_MID v5.1 con fines de clasificación de estilos compositivos de compositores próximos en estilo y periodo histórico. Sin embargo, ya ha habido otras investigaciones que han utilizado dicha técnica como se ha visto en otras publicaciones analizadas anteriormente. Por dicho motivo este artículo no se ha presentado un resumen pormenorizado de sus conclusiones y metodologías utilizadas.

En mi opinión, todas estas investigaciones adolecen en perder mucho esfuerzo analizando los diferentes casos posibles en fragmentos minúsculos comparados con la totalidad de la obra.

### **Musical Key Estimation Of Audio Signal Based On Hidden Márkov Modeling Of Chroma Vectors – Peeters G.**

En este trabajo[44], se propone un sistema para calcular automáticamente la tonalidad de una pieza musical en formato de audio digitalizado utilizando modelos ocultos de Márkov<sup>153</sup>. La estimación de la tonalidad se hace como una sucesión de vectores de croma en el tiempo. Las características de los modos mayor y menor se aprenden mediante el entrenamiento de dos modelos ocultos de Márkov a partir una base de datos etiquetada. 24 modelos ocultos de Márkov que corresponden a las distintas tonalidades, se deriva entonces de los dos modelos de aprendizaje. La estimación de la tonalidad de una pista de música se obtiene entonces mediante el cálculo de la probabilidad de su secuencia de croma dado cada cadena oculta de Márkov.

El sistema se ha evaluado positivamente usando una base de datos del barroco europeo, música clásica y romántica. Se comparan los resultados con los obtenidos utilizando un enfoque basado en el conocimiento. También se comparan los perfiles de tonalidad de croma<sup>154</sup> extraídos de la base de datos basada en conocimiento.

### Sinergias

Ha sido analizada dicha característica para su posible incorporación en los algoritmos desarrollados, sin embargo, dichas características son inherentes a una señal acústica, y teniendo en cuenta que la aplicación desarrollada AN\_MID v5.1 trabaja a partir de material musical en formato simbólico MIDI. Este proyecto de tesis no ha desarrollado ninguna investigación en el área del material musical en formato sonoro digitalizado.

### **Key-Finding With Interval Profiles – Madsen S.T., Widmer G.**

Teniendo en cuenta que la comparación de las distribuciones de clases de notas con perfiles de tonalidad predefinidos ha convertido en el método más utilizado para la creación de métodos de identificación de la tonalidad de una pieza musical tonal, desde que fue propuesto por primera vez por Krumhansl y Schmuckler[26] en 1990, esta investigación [45] añade más clases de información ya que la información sobre el orden temporal de las notas no se tiene en cuenta, aunque ello podría aportar información adicional útil para la identificación de la tonalidad.

---

153 Consultar página 282 (capítulo Anexo 2 – Conceptos TIC y matemáticos utilizados.) para una explicación detallada.

154 Consultar página 237 (capítulo Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados) para una explicación detallada.



Una extensión obvia de los perfiles de paso de la clase es mirar a la distribución de los intervalos y el cálculo de escala perfiles de transición de grado. Esta investigación realiza un experimento basado en los datos en los perfiles de la clase de cada nota y los perfiles de intervalos para estimar la tonalidad de una pieza musical.

El resultado obtenido sobre 2 corpus de piezas musicales (canciones folclóricas finlandesas y piezas de J.S.Bach) son unos porcentajes de éxito del orden del 86%, similar a los métodos basados sólo en clases de notas.

### Sinergias

Esta investigación ha llamado la atención porque utiliza los mismos indicadores que el método propuesto en esta tesis doctoral para identificar el estilo musical de compositores próximos (intervalos utilizados) pero los utiliza para la identificación de la tonalidad. En cualquier caso no utiliza el recuento de todos los intervalos posibles (12x12 notas) sino que sólo los más frecuentes. En cualquier caso, dicha investigación ha sido analizada en el momento de redactar el método propuesto en esta tesis doctoral para identificar la tonalidad de una pieza musical.

### **Polyphonic Audio Key Finding Using the Spiral Array CEG Algorithm – Chuan C. and Chew E.**

En este trabajo[46], Chuan y Chew presenta un algoritmo en tiempo real para determinar la tonalidad partir de una señal de audio polifónica digitalizada. Ellos usaron la transformada de rápida de Fourier estándar con un sistema de detección local máximo que extrae tonos (*pitch classes*) del sonido polifónico. Después de ello, utilizan el algoritmo *Chew's Spiral Array Center of Effect Generator*<sup>155</sup> (CEG)<sup>156</sup> para determinar la tonalidad a partir de la información de intensidad de los tonos (*pitch classes*) utilizados. El corpus de piezas musicales analizadas fueron sinfonías de Mozart. Los datos de prueba se genera a partir de señales de audio generadas a partir de generadores MIDI y el algoritmo logra una exactitud máxima de reconocimiento de la tonalidad del 96%.

### Sinergias

Ha sido interesante el estudio de este algoritmo (CEG) con el objetivo de incrementar el conocimiento del estado del arte en el campo de trabajo de esta tesis doctoral. Sin embargo, los sistemas presentados en este documento tienen como principio máximo la simplicidad de sus planteamientos. Este trabajo ha sido investigado cuando ha sido realizado el estado del arte en el campo de los sistemas desarrollados de identificación de la tonalidad de una pieza musical presentado más adelante en este documento.

### **Automatic musical key detection - Aljanaki A.**

Esta investigación[47] es la tesis doctoral de la autora y propone un método para deducir la tonalidad de piezas musicales (aplicado a un corpus de 206 piezas de diferentes orígenes étnicos) similar a los que utilizan correlación de variables y perfiles de clase. Si bien Temperley [30] utiliza como indicadores la presencia de cada nota en la pieza musical, esta investigación utiliza como datos extraídos de las piezas musicales información sobre los intervalos utilizados. En el caso de información musical en formato MIDI,

El porcentaje de éxito en la identificación de la tonalidad es del 74,5%. El estudio analiza también algunos aspectos de la etnomusicología que influyen en la percepción de la tonalidad y concluye que hay un mecanismo común para identificar la tonalidad de una pieza musical independientemente de su origen étnico.

---

155 Consultar página 294 (capítulo Anexo 2 – Conceptos TIC y matemáticos utilizados.) para una explicación detallada.

156 En la referencia [46] de la bibliografía se detalla el funcionamiento de dicho algoritmo CEG aplicado a esta área.

## Sinergias

Esta investigación ha sido muy útil ya que (a pesar de que fue identificada al final del estado del arte en relación con sistemas automáticos de identificación de tonalidad) al ser muy reciente me ha permitido constatar el estado del arte de este campo bastante tratado como es la identificación automática de tonalidades de piezas y fragmentos a partir de material sonoro o material simbólico como puede ser una partitura. Los resultados conseguidos en esta tesis no son mejores que los alcanzados con los métodos anteriores, posiblemente debido al corpus de piezas musicales utilizadas las cuales pertenecen a diferentes culturas musicales asociadas a diferentes etnias.

### **A program for key determination - Holtzmann S.R.**

En este trabajo[48] posterior al de Longuet-Higgins[41] en 6 años, diseñó un mecanismo para identificar la tonalidad de un pieza musical en base a las notas que utiliza y comparándolas con las notas de la escala de cada una de las 24 posibles tonalidades. Dicho método fue probado sobre un corpus de piezas clásicas y se analiza una por una detallando los problemas que aparecieron en el proceso de identificación de la tonalidad. El principal problema identificado es que en muchos casos la identificación de la tonalidad está basada en la armonía. El artículo reconoce que la complejidad del tema musical complica enormemente la identificación de su tonalidad.

## Sinergias

El artículo incluye como texto anexo el código fuente del programa y al tratarse de un lenguaje de programación muy antiguo no ha sido posible saber (utilizando búsquedas en Internet de sus instrucciones) cual es. Tal como se ha comentado en el párrafo anterior, el artículo reconoce que en la mayoría de casos la tonalidad depende de la armonía. En cualquier caso, el desarrollo del método de identificación de la tonalidad de una pieza musical presentado en este artículo ha sido un resultado colateral que apareció buscando un método de identificación del estilo. Rápidamente y antes de realizar el análisis del estado del arte, ya sabíamos que era un problema complejo que depende de infinidad de casos y condiciones. El estado del arte de este campo demuestra la suposición inicial del método presentado de que el problema es de resolución compleja de manera automática (a pesar de que para un músico es algo extremadamente simple visualizando la partitura).

### **Fuzzy Analysis in pitch class determination for polyphonic audio key Finding - Chuan C. / Chew E.**

Chuan y Chew[49] desarrollaron esta investigación que presenta una técnica de análisis difuso para la determinación de la tonalidad que mejora la exactitud de los hallazgos a partir de material musical en formato audio. La mayoría de los errores en la identificación de la tonalidad de una pieza son típicamente la confusión entre tonalidades próximas. El método comparó el sistema propuesto otros dos, uno anterior que utiliza únicamente la detección de picos a partir de los resultados de la FFT (*Fast Fourier Transform*)<sup>157</sup>, y otra que identifica la tonalidad de la tonalidad a partir de material en formato MIDI<sup>158</sup>. Los tres métodos utilizan el mismo algoritmo para encontrar la tonalidad (algoritmo CEG<sup>159</sup>) y las mismas 410 piezas musicales clásicas (cubriendo el espectro de estilos desde el barroco hasta la música contemporánea). Teniendo en cuenta sólo los primeros 15 segundos de la música en cada pieza, la técnica de análisis difuso (*fuzzy*<sup>160</sup>) propuesta superó el

157 Consultar página 296 (capítulo Anexo 2 – Conceptos TIC y matemáticos utilizados.) para una explicación detallada.

158 Consultar Anexo 3 – Conceptos asociados al estándar MIDI en página 300 para una explicación detallada.

159 Consultar página 294 (capítulo Anexo 2 – Conceptos TIC y matemáticos utilizados.) para una explicación detallada.

160 Consultar página 280 (capítulo Anexo 2 – Conceptos TIC y matemáticos utilizados.) para una explicación detallada.

método de detección de picos por 12,18% en promedio, corresponde el desempeño de identificación de tonalidad a partir de MIDI 41,73% del tiempo, y ha logrado una tasa global de máxima corrección del 75,25%.

### Sinergias

Chuan y Chew publicaron gran cantidad de aplicaciones de su algoritmo CEG incluso para comparar otros en base a su primer algoritmo. El método presentado en este artículo adolece del hecho que sólo considera los primeros 15 segundos de cada pieza musical para identificar la tonalidad sin explicar los motivos por los cuales no procesa toda la pieza. Dicho hecho le permite dar un rodeo al problema de las modulaciones ya que los 15 primeros segundos de una pieza corresponden a la exposición de sus temas y generalmente suelen estar compuestos en la misma tonalidad si haber todavía tenido tiempo suficiente para modular (especialmente en el clasicismo ya que J.S.Bach modula con gran celeridad sus piezas<sup>161</sup>).

### **A Parallel-Processing Key-finding Model – Vos P.G., Geenen E.**

Esta investigación[50] desarrolla un método para identificar la tonalidad de una pieza musical. Su modelo está basado en un sistema de cálculo en paralelo recorriendo los dominios espaciales de los acordes identificados y de las notas identificados.

Como en la mayoría de métodos desarrollados de identificación de la tonalidad comentados anteriormente el corpus de piezas sobre el cual se ha probado el método es el de los sujetos o temas de las fugas de “El clave bien temperado” de J.S.Bach.

El método es más eficiente en tiempo que el método de Krumhansl y Schmuckler[26] resaltando las mejoras debidas al algoritmo paralelo.

El método fue entrenado con un corpus de 20 temas de fugas y posteriormente probado sobre un corpus con las restantes fugas. Para justificar los errores cometidos, el autor comenta que dichos errores también fueron cometidos por un humano experto.

### Sinergias

El método presentado adolece (como en todos los que deducen la tonalidad a partir de la melodía) en que no tiene en cuenta la totalidad de la obra. Básicamente este trabajo se centra en la mejora de rendimiento del algoritmo utilizado comparado con el algoritmo de Krumhansl y Schmuckler. En esencia el sistema es similar al sistema desarrollado por otros autores y no queda muy claro cuáles son los porcentajes de éxito reales.

El corpus de piezas utilizado es muy pequeño y con obras de un único autor, por tanto, estadísticamente sería discutible la fiabilidad del método.

### **Are Pitch-Class Profiles Really “Key for Key”? - Quinn I.**

En esta investigación[51] bastante reciente (publicada en 2010), con un ingenioso título a modo de juego de palabras a partir de la famosa publicación de Temperley[30], ha desarrollado un método para identificar la tonalidad de un corpus de corales de J.S.Bach<sup>162</sup> basado en el uso de las triadas<sup>163</sup> o acordes de 3 notas. El método se basa en un algoritmo iterativo que comienza con una probabilidad inicial de 8,33% a cada tonalidad posible. Usando una progresión definida utilizada por Bach (pares

---

161 Esta afirmación abre un debate y un análisis profundo del catálogo musical de cada compositor estudiado analizando el tiempo (medido en segundos) que tarda en modular la tonalidad de la pieza desde el principio de su reproducción. Dicho estudio y análisis de casos escapa considerablemente a los objetivos de este proyecto de tesis.

162 Consultar página 237 (capítulo Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados) para una explicación detallada.

163 Consultar página 228 (capítulo Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados) para una explicación detallada.

de acordes). El algoritmo incrementa la probabilidad de cada tonalidad hasta que una de esas tonalidades ha alcanzado un 100% de probabilidad. El método utiliza el 90% de las corales de Bach como conjunto de entrenamiento y el 10% restante, como conjunto de prueba. El algoritmo identifica correctamente las 35 corales de Bach incluidas en el conjunto de pruebas.

### Sinergias

A pesar de que consigue un 100% de éxito sobre el conjunto de de test, éste sólo incluye 35 corales lo cual es un corpus bastante pequeño. Además, los corales de Bach tienen una estructura muy concreta y poco flexible (aunque con un resultado sonoro único según mi opinión) con lo que es un corpus de piezas musicales muy homogéneas. El sistema presentado en esta tesis doctoral (como se verá en el “Capítulo 12. Identificación automática de la tonalidad de piezas musicales clásicas por medio de algoritmos evolutivos” en la página 184) tiene unas condiciones de aplicación mucho menos restrictivas permitiendo ampliar el ámbito de actuación del método a piezas musicales de diferente forma musical e instrumentación.

## **Key Estimation from Polyphonic Audio - Gómez E.**

Esta investigación[52] define un método para la estimación de la tonalidad basado en la extracción de un vector de características, el perfil de clase de tono armónico, y la adaptación de un modelo tonal de estas características. El primer algoritmo extrae un vector de características de bajo nivel de la señal de audio, que están relacionadas con su distribución por clase de tono. Estas características son promediadas sobre un segmento dado y comparadas con un modelo tonal con el fin de encontrar la tonalidad de la pieza. El algoritmo utiliza perfiles de tonos propuestos por Temperley[30] adaptando los perfiles para ser utilizados con audio polifónico. El algoritmo fue probado sobre un corpus de 1.252 archivos de audio sintetizados a partir de bases de datos MIDI obteniendo una tasa de éxito del 86%.

### Sinergias

Esta investigación no ha aportado mucho a los métodos presentado en esta tesis doctoral ya que trabaja a partir de señal sonora, sin embargo es una de las pocas que se enfrenta al problema de la polifonía. De hecho es una adaptación del método de Temperley para ser utilizado sobre material sonoro polifónico. Coincide con nuestra hipótesis de que en los elementos de bajo nivel puede encontrarse respuestas a preguntas que intentadas ser contestadas con elementos de la teoría de la música jamás sería una tarea simple.

El hecho de utilizar material de audio digitalizado generado a partir de ficheros MIDI facilita la tarea ya que si se hiciera a partir de grabaciones reales sería mucho más complicado debido a lo irregulares y ricas en matices que son las ondas sonoras generadas por instrumentos reales.

Tal es la complejidad que a fecha de hoy y en base a las experiencias personales del autor, no se ha conseguido ningún timbre de violín sintetizado que tenga una calidad mínimamente comparable a la calidad tímbrica de un violín real (sin necesidad de ser un instrumento de mucha calidad).

## **Investigaciones focalizadas en información rítmica extraída del material musical.**

En esta sección se incluyen breves reseñas a las investigaciones realizadas en el área de identificación de características rítmicas a partir de material musical sea en formato de audio o en formato simbólico (como puede ser el formato MIDI).

Dichas investigaciones han sido estudiadas como análisis del “estado del arte” en dicho campo para poder presentar más adelante el método ORPET (ver “Capítulo 11. O.R.P.E.T. (Objective Rhythmic Performance Evaluation Tool) un método numérico objetivo de evaluación de la

interpretación musical” a partir de la página 171) que ha sido un resultado diría colateral de la investigación desarrollada en este proyecto, ya que ha sido una aplicación que se descubrió del uso de la aplicación desarrollada AN\_MIDv5.1.

Es decir, la aplicación AN\_MIDv5.1 ha sido desarrollada para extraer datos de bajo nivel de un conjunto de piezas musicales en formato MIDI (ver anexo “Anexo 7 – Manual de usuario de la aplicación AN\_MID v5.1” en página 401 y “Capítulo 4. Desarrollo de la aplicación AN\_MIDv5.1” en la página 80) para descubrir cuáles de ellos son los elementos identificativos del estilo musical de cada compositor.

Como era de esperar, los métodos presentados más adelante (ver “Capítulo 7. Análisis comparativo de aplicación de métodos de minería de datos versus algoritmos evolutivos a la clasificación automática de piezas musicales de compositores clásicos.” y “Capítulo 5. Clasificación de estilos musicales clásicos por medio de análisis discriminante” en las páginas 120 y 97 respectivamente) no han utilizado del mismo modo todos los identificadores que la aplicación obtiene<sup>164</sup>, sin embargo algunos de estos indicadores han sido utilizados en otros métodos diseñados los cuales no eran en un principio el objetivo de la investigación tales como el método ORPET.

Debido a motivos de administración de la extensión del presente capítulo y a que dichas investigaciones son el estado del arte de una investigación no prioritaria en esta tesis doctoral, la extensión que dedicamos a ellas es mucho menor que la dedicada a las investigaciones estudiadas hasta ahora.

No por ello sin embargo, deben (aunque sea brevemente) no ser referenciadas en esta memoria de tesis doctoral.

Se recomienda en caso de necesidad de profundización de los conceptos musicales relacionados con la estructura rítmica consultar la sección “Estructura rítmica” (páginas 240-244) en el “Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados”

Cada uno de los trabajos referenciados en este artículo puede ser clasificado en uno de los siguientes tipos:

### **1. Identificación de estructura rítmica**

Son aquellas investigaciones que infieren el compás<sup>165</sup> de la pieza musical o al menos la fase de su periodicidad rítmica así como otras características rítmicas. Los métodos propuestos pueden hacerlo a partir de material simbólico (como puede ser el formato MIDI) o pueden hacerlo a partir de una señal sonora digital fruto de la grabación de una interpretación real de la pieza.

### **2. Desarrollo de herramientas de ayuda a la educación de la interpretación musical**

Este tipo de investigaciones agrupa a todas aquellas herramientas tecnológicas y sistemas que permiten dar soporte por medio de métodos tecnológicos a la actividad de la formación instrumental, orientadas cada una de ellas a un instrumento o tipo de instrumento concreto (violín, instrumentos de viento, piano etc.).

Las investigaciones de tipo 1 centran sus esfuerzos en el análisis de señales acústicas proponiendo y adaptando diferentes métodos de análisis de señales para identificar los patrones de *tatum* (mínima unidad de medida identificada en la pieza inferida a partir de las notas más cortas identificadas), *tactus* (unidad de pulso de compás (*beat*) identificada en la pieza analizada) y compás.

---

164 Por ejemplo, los porcentajes de uso de cada duración de nota no han sido utilizados para identificar el estilo compositivo.

165 Consultar página 235 (capítulo Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados) para una explicación detallada.

En todas ellas coinciden en que la mayor dificultad consiste en identificar los pulsos débiles del compás.

En el contexto de investigaciones que analizan los diferentes sistemas desarrollados, se encuentran los trabajos de Gouyon y Dixon[53], Hockman J.[54] Dixon S.[55].

Gouyon y Dixon[53], realizan en el año 2005 un estudio de los diferentes indicadores utilizados en los diferentes sistemas analizados (notas, acordes, amplitud relativa, etc.), analizando cómo consiguen cada uno de ellos extraer todos los indicadores rítmicos así como los problemas y aspectos a evaluar en los sistemas de identificación de elementos rítmicos en piezas musicales (tanto en formato audio como MIDI). Dichos elementos son la estructura métrica, el tiempo, *timing* (desviaciones puntuales en el tiempo), *onset time* (inicio del tiempo), *pulse induction* (inducción del pulso) y fase o periodicidad.

Algunas de las investigaciones y algoritmos desarrollados en este tipo de investigaciones son los de Paulus y Klapuri[56], Uhle C. y Herre J.[57] Sepp, Eronen y Hiipakka[58], Dixon S.[59][60], Seppänen[61], Seppänen J.[62] entre otros.

Brown J.[63] propuso un mecanismo de identificación de compás a partir de una línea melódica extraída de la partitura en formato MIDI en la cual calcula la correlación<sup>166</sup> de una función ponderada en el tiempo. Los pesos asignados a dicha función están en función de la duración de cada una de las notas de la línea melódica.

Otra investigación interesante para la discusión de este artículo es la realizada por Henkjan Honing[64] en la cual analiza los diferentes sistemas de representación del concepto de tiempo en música. Define las diferencias entre los conceptos de *tempo* y *timing*. Define también y mejora los sistemas existentes de representación del tiempo mediante funciones representadas gráficamente especialmente en las funciones de *timing*. Sin embargo considera que el trabajo por identificar todas las funciones de *timing* no está resuelto.

Dixon[65] describió un sistema en tiempo diferido de *beat tracking* (identificación de pulso) que detecta los inicios de los eventos rítmicos y su importancia y luego determina el tempo y ritmo tanto en material musical simbólico (MIDI) como en material sonoro (digital audio).

Dixon reconoce que en el material musical simbólico en el cual hay material en el canal de percusión (MIDI channel 10) las tareas de identificación de elementos rítmicos es mucho más sencilla.

Considera que el sistema está diseñado para identificar elementos rítmicos en cualquier pieza musical siempre que esté sometida al concepto de pulso rítmico más o menos regular.

Driesse A.[66] diseñó un sistema para identificar los pulsos de una interpretación a tiempo real (con un instrumentista conectado al sistema por medio de un instrumento MIDI) así como un mecanismo para predecir los siguientes pulsos. Dicho sistema tiene como objetivo ser conectado a un sistema de acompañamiento automático el cual, adapta los instantes en los cuales deben producirse los cambios de acordes en el acompañamiento tras haber detectado ligeros cambios en tiempo real en la velocidad del pulso del instrumentista.

Driesse trabaja con 5 reglas para detectar el ritmo y otras no enumeradas para predecir el tempo en los próximos pulsos.

1. Una nota relativamente larga generalmente empieza en un pulso.
2. Una nota relativamente fuerte generalmente empieza en un pulso.

---

<sup>166</sup> Consultar página 352 (capítulo Anexo 5 – Conceptos estadísticos utilizados.) para una explicación detallada.

3. Es más probable que las notas graves empiecen en un pulso comparado con las notas agudas.
4. Varias notas que empiecen a la vez indica una alta probabilidad de la existencia de un pulso.
5. Un cambio en la relación armónica de los sonidos se realiza generalmente en un cambio de pulso.

Tzanetakis G.[67] presenta en su investigación un algoritmo para extraer la frecuencia del pulso por medio de un histograma de pulsos obtenido por medio de filtrar la señal sonora por bandas de frecuencias por octavas y realizar una autocorrelación para cada periodicidad particular.

Uhle C.[68] desarrollado un método que calcula una representación de la estructura métrica de una pieza musical como una función del grado de periodicidad del acento de una señal en los retardos que se relacionan con el período de impulso más rápido. Esta representación se compara con plantillas métricas predefinidas, correspondientes a diferentes compases (4/4, 2/3, etc.) y estructuras métricas. Una lista de posibles tempos se obtiene de los patrones que mejor encajan, y se elige el tempo con prominencia y probabilidades más próximas a los valores de tempo definidos a priori.

Cemgil A., Kappen B. y otros [69], formularon mecanismo de seguimiento de tiempo en un marco bayesiano<sup>167</sup>, donde se modeló un rastreador de tiempo como un sistema dinámico estocástico. El ritmo fue modelado como una variable de estado oculto del sistema y se estimó a partir de una interpretación MIDI utilizando el filtrado de Kalman<sup>168</sup> y el suavizado. Ellos usaron un representación como un tempograma, una expansión multi-escala como onda de una actuación real sobre la que se aplica el filtro de Kalman.

Ferguson S.[70] diseña un mecanismo que en tiempo real, devuelve por medio de sonidos a un músico interpretando una pieza musical, los errores de afinación y diferencias de tempo con el patrón definido como correcto. En el apartado de sonificación rítmica<sup>169</sup>, cuando el músico se desvía del ritmo predefinido para esa pieza musical, el sistema pasa a emitir un sonido similar al de un metrónomo.

Antti J. y Cumhuri E.[71] han desarrollado un sistema visual de ayuda al aprendizaje de patrones rítmicos de flamenco. Si bien el sistema *iPalmas* no incluye un sistema de evaluación de la interpretación rítmica, presenta un campo en el cual puede ser utilizado el sistema ORPET para evaluar la corrección de interpretación rítmica de un patrón maestro.

Percival G.P.[72] propone en su tesis doctoral un método visual de identificación de errores rítmicos comparando en una gráfica temporal, los instantes teóricos de aparición de las notas y los instantes en los que el humano las interpreta. Dicho método sin embargo no hace una valoración total de la interpretación en sus aspectos rítmicos.

Schoonderwaldt, Askenfelt Kjetil y Hansen[73] desarrollaron la aplicación informática IMUTUS (*Interactive Music Tuition System*) de ayuda al aprendizaje la cual incorpora un algoritmo para evaluar la corrección rítmica de una interpretación tanto en la estabilidad del tempo como en la corrección de la duración de las notas. El sistema funciona mediante unos límites de tolerancia para considerar la duración de cada nota como errónea.

La investigación anterior es una parte de un proyecto europeo más ambicioso llamado VEMUS (*Virtual European Music School*) resumido en el trabajo de Fober, Letz y Orlarey[74].

---

167 Consultar página 351 (capítulo Anexo 5 – Conceptos estadísticos utilizados.) para una explicación detallada.

168 Consultar página 275 (capítulo Anexo 2 – Conceptos TIC y matemáticos utilizados.) para una explicación detallada.

169 Consultar página 260 (capítulo Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados) para una explicación del concepto desde una perspectiva genérica.

Es interesante también la competición organizada en el *International Conference on Music Information Retrieval* (ISMIR 2004) en el que se valoraron 11 algoritmos de inducción de tempo a partir de la misma señal de audio[75]. No se permitía ninguna ejecución de entrenamiento. El algoritmo ganador fue el de Anssi Klapuri.

El artículo concluye que en promedio, los algoritmos de inducción de tiempo consiguen unos porcentajes de éxito del 80%.

### Sinergias

La mayoría de las investigaciones realizadas hasta la fecha en relación con aspectos rítmicos muestran que la identificación (en principio para un humano mínimamente experimentado) de los pulsos de compás así como sus subdivisiones no es una tarea fácil para un sistema automático. En lo que respecta a sistemas desarrollados de ayuda al aprendizaje de la interpretación musical, los sistemas desarrollados se centran en mostrar al intérprete los instantes en la interpretación en los cuales se ha separado del ritmo teórico bien sea de manera sonora (por medio de sonificación) o bien por medio de representaciones gráficas sobre la partitura. No ha sido localizada ninguna investigación que realice una valoración numérica de la perfección de la interpretación rítmica en base a un patrón predefinido como se propone en esta tesis doctoral por medio del sistema ORPET (consultar “Capítulo 11. O.R.P.E.T. (Objective Rhythmic Performance Evaluation Tool) un método numérico objetivo de evaluación de la interpretación musical” en página 171)

## **Rameau: A System For Automatic Harmonic Analysis - Kröger, et al**

Esta investigación[76] presenta una aplicación de código abierto llamada Rameau<sup>170</sup> que realiza un análisis de los elementos armónicos en una pieza musical en formato MIDI por medio de técnicas tales como las redes neuronales<sup>171</sup>, cadenas de Márkov<sup>172</sup>, árboles de decisión, algoritmo de Pardo y Birmingham[77], algoritmo de Temperley y Sleator[78] entre otros.

Básicamente es una aplicación que implementa y mejora algunos algoritmos ya desarrollados para realizar análisis tonal de obras musicales.

El corpus de piezas musicales de las cuales se extrae el conjunto de entrenamiento y el conjunto de prueba son corales de Bach<sup>173</sup> por los siguientes motivos:

- Son fácilmente analizables.
- La densidad de acordes es muy alta ya que hay varios acordes por compás.
- Son ejemplos muy claros de armonía tonal.
- Es un corpus con gran cantidad de obras (del orden de 370 corales).
- Tienen un instrumentación muy similar (4 voces formando triadas y cuatridas).

La investigación presenta los resultados obtenidos sobre la coral nº 54 de J.S.Bach comparando los resultados alcanzados por cada uno de los algoritmos.

El artículo finaliza en una enumeración de los algoritmos publicados hasta la fecha que la aplicación Rameau todavía no incorpora en la versión actual.

---

170 Según el artículo, el código fuente de Rameau está disponible públicamente bajo licencia GNU GPL en el repositorio “git://genos.mus.br/rameau.git” (<http://www.gnu.org/licenses/>)

171 Consultar página 290 (capítulo Anexo 2 – Conceptos TIC y matemáticos utilizados.) para una explicación detallada.

172 Consultar página 270 (capítulo Anexo 2 – Conceptos TIC y matemáticos utilizados.) para una explicación detallada.

173 Consultar página 320 (capítulo Anexo 4 – Información de compositores analizados y catalogación.) para una explicación detallada.



## Sinergias

Esta investigación establece un sustrato de análisis armónico que puede ser utilizado para todo tipo de investigaciones posteriores a partir de la información extraída. Las investigaciones realizadas en esta tesis doctoral toman un punto de partida anterior ya que buscan patrones de comportamiento en elementos mucho más básicos que la estructura armónica.

Se ha constatado que el análisis del corpus de corales de J.S.Bach es un punto de encuentro de cualquier investigación que proponga métodos de análisis armónico automático. Esta investigación define perfectamente los motivos de esta elección en la lista de motivos enumerada anteriormente.

## **Conclusiones del estudio de las investigaciones realizadas**

En el presente capítulo se ha realizado un recorrido por las investigaciones realizadas en áreas relacionadas con el área de estudio en la que se enmarca esta investigación. De este recorrido se ha desprendido que la investigación presentada no es la continuación de ninguna investigación anterior en sus objetivos. Sin embargo, sí que se ha podido constatar que las investigaciones realizadas y analizadas en este capítulo demuestran la existencia un vasto campo abarcable mediante el uso de procesos computarizados para extraer información de piezas musicales.

Las investigaciones anteriores relacionadas con esta tesis doctoral y resumidas anteriormente se clasifican en base al modo de abordar el problema de análisis del siguiente modo:

- Las investigaciones que han realizado análisis de señal sonora son todas aquellas que obtienen datos de las piezas musicales por medio del análisis de la señal acústica de una grabación en cualquiera de sus formatos posibles.
- Las investigaciones que han realizado análisis numérico extrayendo a partir de un corpus de obras musicales, indicadores numéricos incalculables manualmente con los que pueden inferirse conclusiones sobre dichos conjuntos de obras musicales. El presente proyecto de tesis doctoral está enmarcado en este tipo de investigación.
- Las investigaciones basadas en análisis simbólico las cuales también extraen información de un corpus de piezas musicales como las de tipo análisis numérico pero con el objetivo de construir estructuras de datos de alto nivel que permitan obtener una clasificación de dichas piezas musicales por medio de la identificación de similitudes en las estructuras de datos extraídas.

Ninguna de las investigaciones ha analizado las obras musicales a partir de indicadores homogéneos (intervalos utilizados) sino más bien con conjuntos de indicadores heterogéneos. Tampoco ha habido muchas investigaciones que hayan realizado análisis de características de compositores próximos en el tiempo y estilo ni análisis de estilos próximos con corpus de piezas heterogéneas en forma e instrumentación.

De los métodos de clasificación de compositores presentados, ninguno de ellos enfoca dicho método como un posible mecanismo para corroborar o refutar la teoría de autenticidad de una obra ya que únicamente presentan sus resultados de clasificación y su fiabilidad.

De todo ello se puede concluir que existe un vacío en el desarrollo de métodos cuantitativos orientados a ayudar a los musicólogos en su tarea de atribuir una obra dudosa a uno u otro compositor candidato. Dichos métodos son un complemento a otros tipos de métodos de investigación histórica que permita ayudar cuando las opiniones de autoría de una obra dudosa estén muy divididas entre dos posibles compositores, esgrimiendo pruebas igualmente válidas en favor de ambas teorías.

## Capítulo 3. Resumen del desarrollo de las investigaciones

En este capítulo se sintetiza en unas pocas páginas el desarrollo de esta tesis doctoral, sus resultados parciales y el desarrollo temporal de la misma. Cada una de las investigaciones resumidas en este capítulo a la mínima expresión será detallada en capítulos posteriores.

Iniciamos este capítulo recordando tal como se había dicho en el capítulo “Introducción” (página 12) que el desarrollo de esta tesis doctoral ha llegado a una serie de resultados calificados unos como “programados” y otros como “colaterales” (ver tablas 3 y 4 en páginas 22 y 24 respectivamente). Dicha clasificación es debida al siguiente criterio.

- **Resultados programados:** Son aquellos que están en el camino de demostración de la hipótesis planteada y creación de métodos que permitan autenticar la autoría de dos compositores candidatos en caso de duda sobre su autoría.
- **Resultados colaterales:** Que no por estar calificados con este adjetivo dejan de ser menos importantes, son aquellos resultados que, a pesar tener interés científico en otras áreas, son consecuencia de recorrer otros caminos de investigación que no conducen a la consecución de la hipótesis planteada, pero que debido a la aparición de ese camino en el escenario de la investigación, ha sido recorrido brevemente hasta alcanzar estos resultados calificados como “colaterales”.

Planteada la hipótesis en la que (tras analizar que la respuesta a cuales son los indicadores que describen el estilo musical de un compositor se encuentran en fragmentos de a lo sumo 10 segundos de interpretación de la misma), se plantea que el porcentaje de uso de notas e intervalos melódicos absolutos respecto a la tonalidad analizados en su totalidad, identifican el estilo musical de un compositor, se ha desarrollado la aplicación AN\_MID en sus diferentes versiones que han ido añadiendo funcionalidades de extracción de datos de las piezas musicales (la última hasta la fecha la versión 5.1) que extrae de un conjunto de piezas musicales en formato MIDI el porcentaje de uso de cada nota, de cada intervalo melódico absoluto y de cada duración de nota respecto al compás.

Los detalles del desarrollo de esta aplicación desarrollada en lenguaje C++ serán descritos en profundidad en el “Capítulo 4. Desarrollo de la aplicación AN\_MIDv5.1” a partir de la página 80.

A partir de entonces y tras recopilar y adecuar<sup>174</sup> una base de datos de sinfonías, cuartetos de cuerda y sonatas para teclado de Mozart y Haydn (484 movimientos de F.J.Haydn y 216 de W.A.Mozart, ver Tabla 16 en página 101) se ha intentado diseñar una función de distancia ponderada considerando los indicadores más distantes en promedio en la que los pesos de cada indicador fueran una función inversa de la varianza de los valores de dicho indicador en cada compositor.<sup>175</sup>

Dichos intentos (aplicados a las muestras de piezas de Mozart y Haydn) han conseguido obtener una función que en el compositor que peores resultados de éxito se obtenían en la clasificación no superaba el 68%. De este modo se considera que nada ha servido conseguir un porcentaje de éxito del 86% del mejor clasificado si el porcentaje de éxito de clasificación de las obras del otro compositor no superaba el 68%.

---

<sup>174</sup> Ha sido necesario editar con un editor de partituras cada pieza y comprobar que el material estaba correctamente almacenado acorde con su partitura editada.

<sup>175</sup> detallado en profundidad en el apartado “Clasificación de estilo compositivo por medio de una función de distancia euclidiana ponderada con los factores de ponderación obtenidos por medio de una única función matemática” en página 213 del “Capítulo 14. Investigaciones sin resultados significativos”

Quedaba claro que el mecanismo de clasificación debía ser más complejo por lo que se continuó la investigación analizando el uso de la herramienta estadística Análisis Discriminante sobre los mismos datos.

Antes de aplicar el Análisis Discriminante (A.D. de ahora en adelante) para clasificar piezas de compositores, se ha investigado la utilización de dicha herramienta para clasificar piezas musicales por estilo musical (Barroco, Clásico y Romántico<sup>176</sup>). Dicho escenario es, por una parte, menos exigente ya que es más fácil identificar el estilo musical de una pieza que identificar su compositor, pero más exigente por otro lado, en el sentido que se incluirían en el mismo conjunto de datos de cada estilo piezas musicales de diferentes compositores.

Los resultados de dicha investigación están detallados en el “Capítulo 5. Clasificación de estilos musicales clásicos por medio de análisis discriminante” a partir de la página 97 y fueron publicados en la revista “El Artista”. [79].

En esencia, incluyendo las obras de la Tabla 16 se ha obtenido un porcentaje de éxito de clasificación de piezas por estilo musical del 79%, 89% y 71% en el grupo de piezas barrocas, clásicas y románticas respectivamente<sup>177</sup>.

Este hecho demuestra que, independientemente de la forma musical, la tonalidad, la instrumentación y la duración de la obra e incluso del compositor, existen elementos característicos del estilo musical clásico romántico y barroco que pueden identificarse en el uso que se hace de los intervalos melódicos absolutos.

Una vez constatado que las obras de un mismo estilo musical (salvando todas las objeciones que pueda plantear el lector en lo que respecta a la definición de un estilo musical así como a los límites históricos del mismo) pueden clasificarse por estilo con un porcentaje de fiabilidad alto, se ha investigado y clasificado las sonatas para teclado de Domenico Scarlatti como barrocas o clásicas en base a su clasificación por medio de A.D. utilizando una base de datos de piezas reconocidas como clásicas y barrocas utilizando los indicadores utilizados hasta ahora (porcentajes de uso de notas e intervalos melódicos absolutos<sup>178</sup>).

Si bien sería interesante clasificarlas en su conjunto y ver que el método de A.D. las clasifica mayoritariamente como barrocas, los resultados más sorprendentes han aparecido cuando dicha clasificación se ha realizado separando las sonatas por fecha de composición en intervalos de 5 años.

En dicha clasificación se ha observado que el porcentaje de sonatas más próximas según el A.D. al Clasicismo fue incrementando a lo largo de su vida presentando la gráfica una mayor pendiente positiva en el intervalo de fechas de 1730-1735 (año en que se puso al servicio en Madrid de la princesa Bárbara de Braganza) y la única pendiente negativa en los años que volvió a Nápoles desde Portugal. (resultados publicados en la revista “El Artista” [80]).

Este resultado avala la hipótesis de que la obra para teclado de D. Scarlatti, a pesar de que los especialistas identifican su estilo compositivo como muy peculiar e influenciado por la música italiana y por la música popular española, en esencia está, en términos estilísticos, más próxima al Clasicismo que al Barroco a pesar de que histórica y formalmente esté más próximo al Barroco musical.

---

176 Ya que se habían encontrado investigaciones relacionadas con sistemas de clasificación de piezas por estilo *funk*, *jazz*, *rock*, clásico etc.

177 Ver Tabla 17 en la página 103.

178 Explicado en profundidad en el “Capítulo 13. Identificación de rasgos en el estilo musical de las sonatas para teclado de Domenico Scarlatti por medio de herramientas matemáticas y tecnológicas.” a partir de la página 202.

Uno de los principales problemas aparecidos en esta parte de la investigación ha sido que los catálogos tradicionales de las sonatas de D.Scarlatti realizados por Kirkpatrick, Pestelli y Longo no incluyen una datación de dichas sonatas.

Por tanto, para ubicar históricamente la fecha de composición de cada una de las sonatas clasificadas se ha utilizado el estudio realizado por Christopher Hail[81] el cual sitúa cada una de las sonatas en un intervalo probable de composición de 5 años. Tras completar esta parte de la investigación y tras mantener contacto por correo electrónico con C.Hail, ha corroborado la clasificación en términos generales a pesar de que en unas pocas sonatas discrepa de su clasificación.

Tras este estudio y clasificación de las sonatas de Scarlatti, la investigación ha continuado aplicando el A.D. sobre los mismos indicadores estudiados pero con un objetivo diferente: clasificar piezas musicales de los compositores Scarlatti, Haydn, Mozart y Beethoven.

Dicha investigación está explicada en profundidad en el “Capítulo 6. Un nuevo enfoque cuantitativo en la identificación del estilo compositivo de autores clásicos (F.J.Haydn, W.A.Mozart, D. Scarlatti, y L.v.Beethoven)” a partir de la página 109 y ha sido publicada en la revista “Música” del Real Conservatorio Superior de Madrid.[82]

En una primera parte de esta investigación se ha estudiado si las variables aleatorias creadas en ellas a partir de los indicadores de porcentaje de uso de notas e intervalos tenían una función de densidad comparable a una distribución normal. Demostrado este hecho en el capítulo correspondiente, es una prueba más de que pueden aplicarse técnicas de clasificación estadísticas, las cuales exigen generalmente como condición para poder ser aplicadas, que la función de densidad pueda ser considerada como una distribución normal.

En ella se ha descubierto que el A.D. obtiene unos resultados de éxito en la clasificación superiores al 95% (ver Tabla 29 en la página 115) siempre que los conjuntos de piezas musicales comparados contengan únicamente piezas musicales de la misma forma musical. En el caso de que los experimentos de clasificación incluyan en las muestras obras de diferentes formas musicales (cuartetos, sonatas y sinfonías) los porcentajes de éxito en la clasificación caen a un 81% diferenciando Mozart y Haydn (ver Tabla 30 en la página 116).

Si bien los resultados de la Tabla 29 son buenos, la limitación de que las piezas musicales incluidas en las muestras de piezas reconocidas tengan que ser de la misma forma musical que la pieza dudosa limita enormemente su ámbito de aplicación como método de autenticación ya que el número de piezas de los dos compositores candidatos puede no ser muy grande en general, es decir, autenticar por ejemplo un cuarteto de cuerda frente a dos compositores candidatos A y B obligará a incluir en las muestras de piezas musicales reconocidas de los compositores A y B piezas exclusivamente de la forma musical cuarteto de cuerda.

Este hecho no siempre es posible, o en el caso de que A y B tengan obras reconocidas de dicha forma, el hecho de que tengan muy pocas obras compuestas en esa forma limitaría la fiabilidad de la clasificación realizada por este método.

A continuación y con el objetivo de modificar el método propuesto hasta ahora para mejorar su fiabilidad, se ha analizado la posibilidad de incorporar indicadores de porcentajes de uso de notas a los procesos de A.D. pero se comprobó que dichos indicadores no aportaban una mejora en la fiabilidad del método al no incrementarse el porcentaje de obras clasificadas correctamente respecto al total de obras del compositor incluidas en la muestra.<sup>179</sup>

---

179 Explicado en profundidad en el apartado “Clasificación del estilo compositivo utilizando porcentaje de uso de duraciones de notas” a partir de la página 218 en el “Capítulo 14. Investigaciones sin resultados significativos”.

Tras no haber conseguido mejorar los porcentajes de éxito por medio del A.D. y aprovechando el profundo conocimiento del modo en que el estándar MIDI almacena la duración de las notas en un fichero MIDI (especificaciones que no están incluidas en las especificaciones MIDI estándar<sup>180</sup>) se investigó la viabilidad de utilizar el histograma de porcentaje de uso de duraciones de notas que generaba la última versión de la aplicación AN\_MID (la versión 5.1) para diseñar un método para cuantificar la corrección rítmica de una interpretación tocada a tiempo real en un instrumento MIDI comparándola después con una interpretación considerada como correcta.

Dicho método bautizado con las siglas O.R.P.E.T. (*Objective Rhythmic Performance Evaluation Tool*) compara los histogramas de porcentaje de uso de duraciones de notas de la pieza a evaluar con la pieza considerada como correcta y mediante una función de distancia se calcula cuan distantes están. A mayor distancia de los histogramas, menor será la corrección rítmica de la interpretación evaluada. Dicha investigación está analizada en detalle en el “Capítulo 11. O.R.P.E.T. (Objective Rhythmic Performance Evaluation Tool) un método numérico objetivo de evaluación de la interpretación musical” a partir de la página 171 y será publicado por la revista *Journal of Music, Technology & Education* en Noviembre de 2013.[83]

Se propone este método para ser utilizado como herramienta de soporte en los procesos de autoaprendizaje o aprendizaje a distancia de la interpretación musical en conservatorios y escuelas de música.

Tras presentar el resultado colateral anterior, se ha retomado la línea de investigación inicial intentando hallar un método de clasificación que mejorara los porcentajes de éxito en la clasificación realizada por el A.D. para clasificar obras por compositor.

Se ha retomado la idea de una función de distancia ponderada pero esta vez no intentando formular una expresión común a todos los factores de ponderación o pesos de cada indicador implicado, sino que se ha optado por utilizar un algoritmo evolutivo que maximizara el mínimo porcentaje de éxito en la clasificación de las piezas reconocidas de las muestras de cada compositor candidato.

De este modo cada factor de ponderación sería independiente de los demás y a pesar de no tener una relación formulada con los demás, dicho algoritmo evolutivo garantizaría que (con las condiciones de ejecución definidas previamente) la elección de dichos factores de ponderación es la solución que maximiza el peor porcentaje de éxito de clasificación de los dos compositores estudiados.

Dicho método bautizado con el nombre de MIAMP (*Method for identifying authorship of musical pieces*) está detallado su funcionamiento en el “Capítulo 7. Análisis comparativo de aplicación de métodos de minería de datos versus algoritmos evolutivos a la clasificación automática de piezas musicales de compositores clásicos.” a partir de la página 126 (Figura 44).

Los resultados de la aplicación de dicho método están detallados en las tablas 40 y 41 (página 137) y no mejoran los porcentajes de éxito del A.D. aplicado a discriminación de obras de dos compositores próximos en estilo, sin embargo, cuando el número de obras incluidas en la muestra de obras reconocidas de uno de los compositores es pequeño, ofrece mejores resultados el método MIAMP ya que el algoritmo evolutivo utilizado busca la mejor combinación de factores de ponderación para maximizar los porcentajes de éxito.

Otro motivo por el cual, a pesar de que los resultados de éxito del A.D. son mejores que los del método MIAMP en las parejas de compositores analizados, es difícil comparar ambos métodos porque el mecanismo para valorar la fiabilidad del método A.D. ha utilizado la mitad de las piezas de cada compositor como muestra de piezas reconocidas y la otra mitad para analizar su

---

180 Publicadas por la *MIDI Manufacturers Association* (<http://www.midi.org/>)

comportamiento y su capacidad de deducción de su compositor mientras que el método MIAMP utiliza todas las obras reconocidas de cada compositor y por tanto al trabajar con una muestra mayor, los porcentajes de éxito son lógicamente menores.

Cuando se ha concluido el desarrollo y las pruebas de éxito del método MIAMP, se ha redactado un artículo y ha sido enviado en Diciembre de 2012 a la revista *Computer Music Journal*<sup>181</sup> para que valorasen su posible publicación.

La respuesta de los editores fue que no podían publicarlo porque acababan de publicar en su último número un artículo en el cual por medio de técnicas de minería de datos Dor y Reich[2] habían realizado un estudio similar.

A continuación lo que se ha hecho ha sido (debido a que los autores ofrecían vía Internet todos los datos de su investigación) descargar el software libre que habían utilizado (aplicación Weka[24] de la Universidad de Waikato en Australia) analizar su funcionamiento y repetir posteriormente los experimentos que describían en su artículo con los datos que habían utilizado en su investigación.

De dicho estudio se ha descubierto que los resultados presentados por Dor y Reich han sido presentados de manera maquiada e inducen a error en la interpretación de los porcentajes de éxito de su método.

Además omiten que los experimentos que realizaron para clasificar piezas de dos compositores A y B los hicieron únicamente con el número de piezas de cada compositor igual al mínimo número de piezas de ambos. De este modo si se tienen 350 piezas musicales del compositor A y 50 del compositor B, el proceso de clasificación únicamente trabaja con 50 piezas del compositor A (que en sus 10 experimentos seleccionaban aleatoriamente).

Investigando en los manuales de la aplicación Weka se ha descubierto que los métodos de clasificación basados en minería de datos utilizados por Dor y Reich, en el caso de que el número de elementos de cada grupo sea considerablemente diferente tienden a centrar sus esfuerzos en la clasificación del grupo mayoritario. Esta es el motivo por el cual Dor y Reich no han intentado clasificar la totalidad de las muestras de compositores por parejas para evitar este problema.

De este modo y a modo de ejemplo si se experimenta con dos compositores A y B con 350 y 20 piezas musicales respectivamente, y el algoritmo clasifica correctamente 340 y 10 de cada compositor, la aplicación weka da como resultado de éxito el valor un 94,5% de éxito (fruto del cálculo “total piezas clasificadas correctamente”/“total piezas a clasificar” =  $(340+10)/(350+20)$ ), cuando el porcentaje de éxito en la clasificación del compositor B es únicamente del 50% (fruto del cálculo  $10/20$ ).

De este modo se han recalculado los porcentajes de éxito para poder ser comparables con los porcentajes de éxito en base a los criterios de esta investigación y se descubrió que el método MIAMP supera los resultados de éxito al comparar Mozart y Haydn.

Por tanto se ha concluido que los dos métodos presentados, (A.D. y MIAMP) superan los porcentajes de éxito del trabajo de Dor y Reich y además son menos restrictivos en las condiciones previas para poder ser aplicados.

A continuación se aplicaron los métodos A.D. y MIAMP a la autenticación de una serie de obras para órgano de Bach. Los resultados de dicha aplicación pueden consultarse en la Tabla 63 (página 155) en el “Capítulo 9. Resultados de aplicación de los métodos presentados a obras dudosas de J.S.Bach” (a partir de la página 152)

---

181 ISSN 0148-9267 y E-ISSN 1531-5169.

Al ser ambos métodos complementarios, se llega a la conclusión que cuando la clasificación de una pieza coincide en los resultados de ambos métodos, se está ante unos resultados mucho más fiables al coincidir en los resultados ambos métodos.

A continuación, se presenta la investigación del “Capítulo 12. Identificación automática de la tonalidad de piezas musicales clásicas por medio de algoritmos evolutivos” (a partir de la página 184) en la cual a partir del porcentaje de aparición de cada nota se presenta un método para deducir la tonalidad de una pieza musical clásica en términos generales con una fiabilidad del 95% optimizando el proceso con el mismo algoritmo evolutivo nombrado anteriormente. Aparentemente esta investigación es similar a las iniciadas por Krumhansl[26], pero es más general ya que concluye que el porcentaje de uso de cada nota o clase de notas respecto a la tonalidad de la pieza es similar independientemente de las tonalidades que por medio de las modulaciones recorre el discurso musical.

Otro logro de esta última investigación es que el sistema ha sido probado con una amplia variedad de piezas musicales con diferente instrumentación y forma y es más general que los métodos que deducen la tonalidad de una obra a partir de los acordes hallados en la misma.

Por último, comentar que en el “Capítulo 10. Una nueva definición del término “compositor prolífico” (página 160) se presenta una propuesta de redefinición del concepto de “compositor prolífico” basada no en el número de obras que compuso sino en el número de notas que compuso.

Es evidente que muchas dudas e inconvenientes aparecen al intentar cuantificar la prolificidad por medio de este concepto al no tenerse en cuenta, por ejemplo, la repetición de un material musical en otras partes de la obra modulado o transformado si debe o no considerarse como material original para incrementar este indicador numérico propuesto como cuantificador de la prolificidad del compositor.

Cierto es que no es una definición perfecta pero es más justa y la primera cuantificada ya que la simple enumeración de las obras de un compositor sin tener en cuenta su magnitud y la instrumentación de cada una de estas obras también dista mucho de valorar el esfuerzo creador del compositor.

Trasladando este concepto al arte de la pintura, sería proponer que la prolificidad de un pintor se midiese en función del número de  $m^2$  que pintó más que en el número de cuadros que pintó o se sabe que pintó.

El desarrollo de esta investigación analiza las sonatas para teclado escritas por cuatro compositores (Scarlatti, Haydn, Mozart y Beethoven) y compara el número de sonatas que compuso cada uno de ellos con el número de notas totales que compusieron en dichas sonatas.

## Capítulo 4. Desarrollo de la aplicación AN\_MIDv5.1

### Consideraciones de diseño

La aplicación AN\_MID ha sido desarrollada en C/C++<sup>182</sup> por tres motivos principales:

- Para permitir una gestión a bajo nivel muy eficiente. La aplicación debe realizar rotaciones de bits, AND's lógicas etc. a nivel de byte.
- Para dotarlo del mayor nivel de portabilidad posible. El lenguaje C tiene un nivel de difusión y portabilidad muy elevado entre las diferentes plataformas existentes en el mercado (*Windows, Linux, etc.*).
- Para conseguir un código ejecutable extremadamente eficiente a nivel de tiempo de ejecución y de gestión de recursos de memoria. A pesar de ser un lenguaje con muchos años de vida, siendo es el lenguaje más utilizado para conseguir estos objetivos.

Otro motivo también sería el hecho que como que el programa no necesita ninguna interacción con el usuario en el proceso de ejecución, y no necesita una interfaz de usuario, entonces lo único que se necesita es un lenguaje potente a bajo nivel.

### Coste de desarrollo

Para tal de justificar el esfuerzo de desarrollo invertido en el análisis y la programación de La aplicación AN\_MID, se ha utilizado la métrica COCOMO<sup>183</sup> (CONstructive COSt MOdel) en una aplicación en sentido inverso.

Normalmente las métricas de valoración de los costes de desarrollo realizan una estimación del esfuerzo de desarrollo de una aplicación a partir de sus requerimientos. En este caso de aplicación, se parte de una aplicación ya desarrollada, y se utiliza la métrica COCOMO para justificar con criterios objetivos, a partir del número de líneas de código de la aplicación, el esfuerzo invertido en su desarrollo.

Se ha utilizado la métrica COCOMO debido a que es la más utilizada que utiliza como variable de entrada el lenguaje de programación utilizado y el número de líneas de código.

Como valor de entrada al sistema de evaluación COCOMO se sabe que la aplicación tiene 1.463 líneas de código C optimizado considerablemente.

El sistema COCOMO clasifica las aplicaciones en 3 tipos (Proyecto Orgánico, Semi-acoplado y Empotrado) en función de la su complejidad, el número de personas implicadas entre otras variables.

Dependiendo de la importancia de los factores, La aplicación AN\_MID se puede considerar como orgánica (por estar desarrollada para una sola persona) o empotrado, por tratarse de algoritmos innovadores con un alto nivel de relación entre ellos.

Teniendo en cuenta lo anterior, en la Tabla 12 se dan las dos valoraciones COCOMO dependiendo del tipos de proyecto en el cual se enmarca la aplicación AN\_MID5.1.

---

182 Consultar página 276 (Anexo 2 – Conceptos TIC y matemáticos utilizados.) para una explicación detallada.

183 La explicación en detalle del funcionamiento de esta métrica excede el objetivo de este documento y se recomienda al lector interesado en profundizar más en esta métrica consultar la siguiente dirección

“<http://pisuerga.inf.ubu.es/lsi/Docencia/TFC/ITIG/icruzadn/Memoria/612.htm>”.

También han sido consultadas las direcciones: “<http://www.sc.ehu.es/jjwdocoj/mmis/cocomo.htm>”

y “<http://es.wikipedia.org/wiki/COCOMO>”



Categorización del programa AN_MID51 como proyecto ...	Valoración (horas).
Orgánico	716
Empotrado	1137

Tabla 12: Valoración del esfuerzo de desarrollo en los dos escenarios previstos.

Posiblemente el tiempo invertido en el desarrollo habrá sido un valor intermedio entre ambos valores.

## Algoritmo de cálculo de frecuencias de notas y de octavas

Para comprender adecuadamente el funcionamiento del algoritmo es necesario tratar brevemente algunos conceptos de acústica (en especial para el lector no experto en conceptos de teoría musical).

La teoría musical tonal se fundamenta en la división de las frecuencias sonoras en grupos cíclicos llamados octavas. Empieza un nuevo ciclo cada vez que la frecuencia sonora se duplica, es decir, todos los sonidos generados a partir de las frecuencias 55, 110, 220, 440, 880, 1760 Hz. recibe el nombre de “La”<sup>184</sup>.

Cada uno de estos ciclos llamados octavas (Por tener 8 nombres de notas Do, Re, Mi, Fa, Sol, La, Si y Do) se subdivide en 11 frecuencias más o menos equidistantes que reciben los nombres de La#, Si, Do, Do#, Re, Re#, Mi, Fa, Fa# Sol y Sol# formando conjuntamente con la nota La las 12 notas que forman una octava. En cualquier caso, tradicionalmente, en la cultura latina se establece como nota inicial de cada octava la nota “Do” y no en la notas “La”. A pesar de que los nombres anglosajones para las notas comienzan con la nota “La” a la que asignan la letra “A” y así sucesivamente hasta la nota Sol a la que se asigna la letra “G”.

En la Figura 3 se muestra la identificación de estas notas en cada una de las teclas de un piano así como los nombres anglosajones de las notas y la división en octavas a partir de la nota Do.

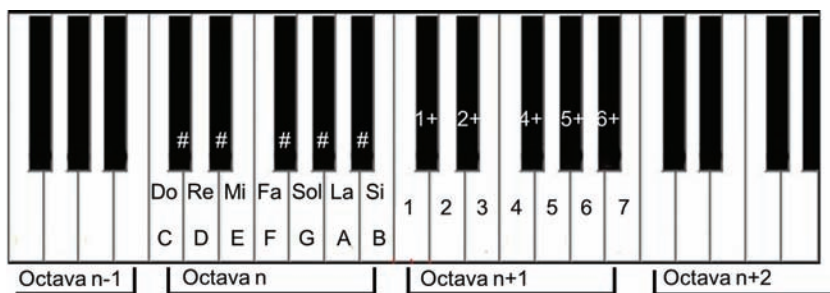


Figura 3: Nomenclatura utilizada para la identificación de clases de notas y octavas.

Los identificadores 1, 1+, 2, 2+, ... son los nombres que asignará el algoritmo AN\_MID51 a cada una de las notas y que etiquetaran las columnas del fichero\_dest<sup>185</sup>.

184 Nota muy conocida (440 Hz.) ya que es la que utilizan las orquestas antes de empezar un concierto para afinar todos los instrumentos a la misma frecuencia.

185 Consultar página 401 (capítulo Anexo 7 – Manual de usuario de la aplicación AN\_MID v5.1) para una explicación detallada.

## Normalización de la tonalidad

La Figura 3 asocia los identificadores de notas a las notas de la figura en el caso que la tonalidad de la pieza sea Do Mayor. Si la tonalidad de la pieza es otra, se asignarán los identificadores a partir de la nota tónica de la tonalidad<sup>186</sup>.

Se presentan en la Tabla 13 ejemplos de asignación de notas a cada identificador en base a la tonalidad.<sup>187</sup>

tonalidad	1	1+	2	2+	3	4	4+	5	5+	6	6+	7
Do Mayor	Do	Do#	Re	Re#	Mi	Fa	Fa#	Sol	Sol#	La	La#	Si
Re Mayor	Re	Re#	Mi	Fa	Fa#	Sol	Sol#	La	La#	Si	Do	Do#
Fa# menor	Fa#	Sol	Sol#	La	La#	Si	Do	Do#	Re	Re#	Mi	Fa
Si b <sup>188</sup> Mayor	La#	Si	Do	Do#	Re	Re#	Mi	Fa	Fa#	Sol	Sol#	La

Tabla 13: Asociación de identificador de clase en base a la tonalidad de la pieza.

## Normalización de la magnitud y orquestación de la obra

Para obtener unos resultados comparables independientemente de la magnitud de la obra (duración de la obra y número total de notas) y de la orquestación de la misma (una sinfonía no tendrá el mismo número total de notas si se consideran todos los instrumentos que una sonata<sup>189</sup> para piano aunque la duración en compases y tiempo de interpretación sean comparables), los valores obtenidos se normalizarán respecto al total de notas identificadas en la obra.

## Estructuras de datos utilizados

El algoritmo utiliza en su proceso las siguientes estructuras de datos:

- Contador de notas. Variable entera inicializada a cero en cada pieza musical que se incrementa en una unidad cada vez que se identifica una nueva nota.
- Notas. Vector de 12 valores enteros inicializados a cero en cada pieza musical el cual se incrementa cada valor en una unidad cada vez que se identifica una nueva nota que corresponde a esa clase (previo proceso de normalización de la nota en base a la tonalidad de la pieza) con la posición en el vector independientemente de la octava a la cual pertenece. Al final del proceso para cada pieza musical, este vector contiene el número de veces que se ha identificado una nota de cada clase.
- Octavas. Vector de 11 valores enteros inicializados a cero para cada pieza musical que se incrementa cada valor en una unidad cada vez que se identifica una nueva nota ubicada en esa octava o clave (previo proceso de normalización de la nota en base a la tonalidad de la

186 Se podría considerar la tonalidad como el punto de referencia a partir del cual consideramos las notas de la escala, geoméricamente hablando. Sería comparable a un cambio de ejes cartesianos o a un cambio de base en un espacio unidimensional (la frecuencia de una señal sonora).

187 Consultar página 262 (capítulo Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados) para una explicación detallada.

188 Si b o Si bemol es la misma nota que el La# o La sostenido.

189 Consultar página 259 (capítulo Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados) para una explicación detallada de la forma musical “Sonata”.

pieza) con la posición adecuada en el vector. Al final del proceso, este vector contiene el número de notas que se ha identificado en cada una de las 11 octavas.

La ejecución del algoritmo de cálculo de frecuencias de notas recorre todo el fichero MIDI identificando todos los eventos NOTE ON (activación de una nota), actualizando las estructuras de datos correspondientes y después de acabar, se ponderará cada valor de "Notas" y de "octavas" respecto el valor que contenga "contador de notes".

### Problemas aparecidos

#### **Gestión de las ornamentaciones**

En una interpretación musical, hay parte del material musical que no está explícitamente escrito en la partitura musical porque son pequeñas ornamentaciones (como los detalles decorativos de la fachada de un edificio histórico) que no afecten a la estructura inherente e importante de la pieza, pero que se deben interpretar porque forman parte de ella. Algunos de estos elementos son los trinos<sup>190</sup>, grupettos<sup>191</sup>, apoyaturas etc. El estilo barroco del siglo XVIII destaca especialmente por la libertad del intérprete para añadir estas ornamentaciones improvisadas.

En la Figura 4 se muestra como aparece un trino con 2 apoyaturas en una partitura musical.<sup>192</sup>

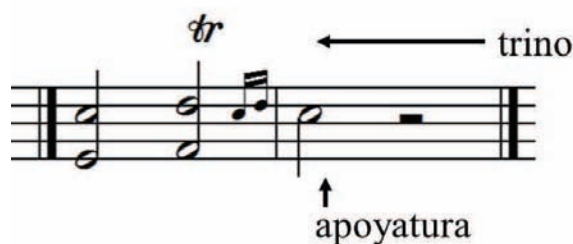


Figura 4: Grafía del trino y la apoyatura en la escritura musical.

La Figura 5 muestra como aparecerá el mismo material musical en un fichero en formato MIDI.

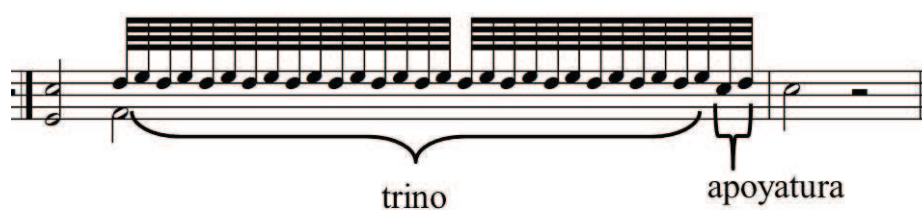


Figura 5: Resultado sonoro al almacenar el material musical de la Figura 4 en formato MIDI.

Como puede verse, el formato MIDI no atribuye a este material un trato especial y se consideran como parte inherente de la pieza como cualquier otra nota.

La cuestión es, si este material musical implícito se considera o no a efectos de ser contabilizado como notas principales. Debido a que no es posible que el programa AN\_MID51 las diferencie y

190 Un trino es la ejecución rápida de una nota y la siguiente alternativamente el tiempo que dure la nota principal. En una partitura se especifica mediante el símbolo "tr" sobre la nota principal del trino.

191 Un grupeto o *grupetto* es un dibujo de notas ejecutadas rápidamente bajo la nota principal tomando duración a la misma. En la grafía de notación musical se representa por medio de los símbolos:  $\text{w}$ ,  $\text{w}$ ,  $\infty$

192 Consultar página 263 y 254 (capítulo Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados) para una explicación detallada de estos elementos.

que también puede aportar rasgos identificadores que permitan identificar características del estilo compositivo del autor serán consideradas del mismo modo que el resto de notas.

## Algoritmo de cálculo de intervalos

### **Funcionamiento del algoritmo**

El algoritmo de identificación de intervalos debe recorrer el fichero MIDI de principio a fin manteniendo actualizadas tres estructuras de datos:

- **Intervalos detectados:** Será una matriz de 12 notas x 12 notas<sup>193</sup> que al finalizar el proceso, cada celda (n,m) almacenará el número de veces que las notas de la clase “n” han sido seguidas en la línea melódica con notas de la clase “m”, por ejemplo, la entrada (0,7) identificará, cuantas veces la nota tónica (0) ha continuado con la nota subdominante (7).
- **Notas abiertas:** Será una matriz de 16 canales MIDI x12 notas<sup>194</sup> en la cual se almacenará en cada instante y para cada pieza y canal MIDI aquellas notas que se ha identificado su evento NOTE ON pero todavía no se ha localizado su evento NOTE OFF (evento MIDI que cerrará la nota (ver Tabla 104 en la página 306 para un mayor detalle).
- **notas pendientes de ser asociadas:** Será una matriz de 16 canales x 32 notas, en la que se almacenarán las notas las cuales se ha encontrado su evento NOTE OFF, ha sido eliminada de la matriz de notas abiertas, y se está pendiente de identificar una nota con la cual asociar en un intervalo.

No se puede almacenar todas las notas pendientes de asociar en la matriz “notas pendientes de asociar” a lo largo de todo el proceso de análisis de la pieza, por ello, para eliminar periódicamente aquellas notas que ya no tiene sentido asociarlas en un intervalo se ha definido el siguiente parámetro:

- **Umbral de asociación:** es un parámetro constante en todo el proceso, que define cuanto tiempo debe permanecer una nota en la estructura “notas pendientes de asociar” para ser considerada como una nota “no asociable” y eliminarla de dicha matriz.

En todas las estructuras de datos, las notas debe ser normalizadas respecto a la tonalidad, es decir, la nota Sol# será la nota 8 en la tonalidad de Do Mayor pero será la nota 3 en la tonalidad de Fa Mayor<sup>195</sup> (consultar “Grados musicales” en página 246 en “Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados“ para una explicación detallada).

Cuando se encuentra un evento NOTE ON en un determinado canal MIDI, esta nota (normalizada) será una nota final de intervalo y se comparará con las notas almacenadas en la matriz “notas pendientes de asociar” de este canal MIDI buscando la nota origen del intervalo. Se seleccionará la nota más próxima en términos tonales como la nota con la cual la nota final forma un intervalo.

Identificado el intervalo, se incrementa su contador en la matriz “Intervalos detectados” y se elimina la nota inicial del intervalo de la estructura “notas pendientes de asociar” y se añade la nota final como una nueva nota pendiente de asociar.

En cada iteración del algoritmo, se debe eliminar de la estructura “notas pendientes de asociar” todas aquellas notas cuyo contador de tiempo desde que ha sido cerrada sea superior a “umbral de asociación”.

---

193 El sistema tonal define 12 sonidos des de la nota Do hasta la nota Si.

194 Se ha considerado que no va a haber más de 12 notas abiertas pendientes de ser cerradas en cada canal MIDI ya que el intérprete que puede ejecutar más notas es un organista: 10 en las manos (una por cada dedo) y 2 con cada pié.

195 El proceso de normalización se ha explicado en detalle en el apartado “Normalización de la tonalidad” anteriormente.

La Figura 6 muestra los primeros compases del segundo movimiento de la sonata<sup>196</sup> para piano n° 12 de W.A.Mozart y están identificados en ella los intervallos detectados<sup>197</sup>.



Figura 6: Intervallos melódicos detectados en los primeros 4 compases del segundo movimiento de la Sonata para piano n° 12 de Mozart (compuesto en Mi b Mayor).

Los valores mn identifiquen la detección de un intervalo desde la nota 'm' hasta la nota 'n' (si la nota está alterada respecto la tonalidad aparece con un signo “+” a la derecha). El número de intervallos m,n detectados en toda la partitura dividido por el número total de intervallos detectados, identificará el porcentaje de aparición de dicho intervalo.

### Problemas aparecidos

#### **Líneas melódicas repartidas en diferentes pentagramas**

Normalmente, los editores de partituras asocian un canal MIDI a cada pentagrama, pero en partituras para piano, una línea melódica (Debido a tener una tesitura<sup>198</sup> extremadamente aguda o grave) puede cambiar de pentagrama. En este caso, no se detectarán dos intervallos, uno por cada instante en que la línea melódica cambia de pentagrama. Será imposible detectarlo a partir del fichero MIDI. La Figura 7 muestra un ejemplo en el que se produce este hecho.

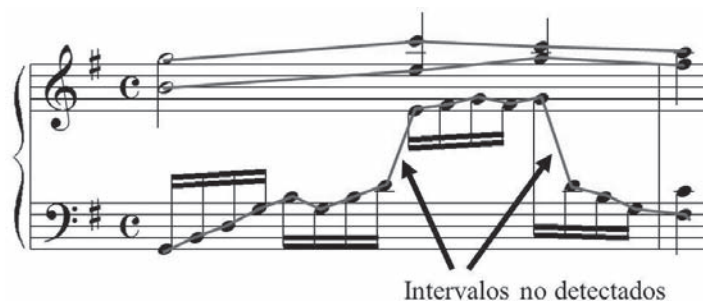


Figura 7: Ejemplo de cambio de pentagrama de una línea melódica.

#### **Agrupación incorrecta del material musical en los diferentes canales**

Si el material musical está agrupado en el mismo canal MIDI, será más difícil identificar intervallos y se producirán un mayor número de errores en la detección cuando las líneas melódicas discurren muy próximas o se cruzan tonalmente. Las figuras 8 y 9 muestran los primeros compases del material musical de la sonata n° 16 para piano de W.A.Mozart almacenado en un solo canal o en dos canales diferentes.

196 Consultar página 259 (capítulo Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados) para una explicación detallada de la forma musical “Sonata”.

197 A efectos de normalización de la tonalidad, esta pieza tiene la tonalidad de Mi bemol Mayor.

198 La tesitura de un instrumento es el intervalo de sonidos que puede interpretar. Es un intervalo cerrado con la nota más grave y la nota más aguda que puede interpretar como límites del intervalo.



Figura 8: Material musical repartido en dos canales.

Figura 9: Material musical repartido en un canal.

### Gran cantidad de espacio vacío entre notas

En instrumentos de teclado, si las líneas melódicas de acompañamiento se componen de acordes muy separados en el tiempo, puede provocar errores por no detectar intervalos por haber superado el umbral de asociación. A modo de ejemplo, la Figura 10 muestra los últimos compases del primer movimiento de la sonata “Patética” de L.v.Beethoven antes del *allegro subito* donde puede verse gran cantidad de notas en la voz de la mano derecha y muy pocas notas en la voz de la mano izquierda.



Figura 10: Últimos compases del primer movimiento de la sonata “Patética” de L.v.Beethoven antes del *allegro súbito*.

### Cruce de líneas melódicas.

El hecho de analizar e identificar intervalos a bajo nivel nota por nota sin tener una visión a más alto nivel con una ventana de análisis mayor (a nivel de compases o grupos de compases), imposibilita totalmente detectar cruces de voces si ambas están en el mismo canal MIDI. La Figura 11 muestra un ejemplo en el cual dos líneas melódicas se cruzan y por tanto el algoritmo cometerá dos errores en los puntos en que las líneas se cruzan (Figura 12).



Figura 11: Líneas melódicas originales.



Figura 12: líneas melódicas detectadas erróneamente.

En cualquier caso, en obras clásicas es poco frecuente que las líneas se crucen en el mismo instrumento (nunca en partituras orquestales).

### Algoritmo de cálculo de duraciones de notas

Para poder entender cómo funciona el algoritmo de cálculo de duraciones, es imprescindible profundizar brevemente en cómo se almacenan en un fichero MIDI las duraciones de las notas y compararlo con el sistema definido en la teoría musical tradicional.<sup>199</sup>

199 Consultar página 235 (capítulo Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados) para una explicación detallada del sistema de medición de tiempo en la teoría musical tradicional.

## Introducción

En el sistema de notación musical clásico, el símbolo de cada nota define implícitamente la nota que debe ejecutarse y la duración de la misma. Es decir, el fragmento de material musical de la Figura 13 define la primera nota como un Sol de la 4ª octava con una duración de un tiempo de compás (negra), la segunda como un Do de la 5ª octava con una duración de 2 tiempos de compás (blanca), y la tercera y cuarta nota como las notas Si y La de la 4ª octava con una duración de 1/2 tiempo de compás.



Figura 13: Ejemplo de notación musical.

Estos símbolos de duración son relativos e insuficientes ya que no proporcionan suficiente información para saber cuántos segundos dura cada tiempo de compás. Para ello, en la partitura, al principio de la misma suele una indicación que definirá cuantos tiempo/pulsos de compás se incluyen en un minuto. El resultado de dividir 60 por este valor indicará el número de segundos que debe durar cada tiempo de compás, es decir, la indicación al principio de la pieza mostrada en la Figura 14 indica que en un minuto deben interpretarse 100 notas negras, por tanto, cada nota negra debe durar  $60/100 = 0,6$  segundos.

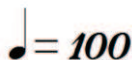


Figura 14: Indicación de tempo.

En el formato MIDI el tiempo se identifica por medio de unidades básicas de tiempo llamadas “*MIDI ticks*”. La relación entre estos dos sistemas es: 1 negra = 1024 *MIDI ticks*.

Al principio del fichero MIDI (en la primera pista) habrá un evento MIDI (*time signature*) que definirá cuantos microsegundos dura cada nota negra. Por tanto, si dividimos este valor entre 1024 se sabrá cuantos microsegundos dura cada *MIDI tick*.

Si este evento no existe se asume que se ejecutan 120 negras cada minuto.

En relación con la ejecución de notes, el formato MIDI utiliza dos eventos:

NOTE ON (0x90<sup>200</sup>): Activa una nota. Este mensaje MIDI tiene dos parámetros más:

- Nota interpretada: en la Figura 13 las notas están codificadas como: 0x43, 0x48, 0x47, 0x45 respectivamente (Sol Do Si y La).
- Intensidad de la nota: un *byte* que define el nivel de fuerza de la nota (valores entre 0 – 127)<sup>201</sup>.

NOTE OFF (0x80): Desactiva la nota silenciando su sonido. Este evento tiene los mismos parámetros que el evento NOTE ON.

200 Este valor está expresado en formato Hexadecimal que en formato binario es “10010000”. La segunda cifra hexadecimal define el canal en el cual se interpreta esta nota, en este caso el canal es el cero.

201 Al ser el formato MIDI diseñado para instrumentos de teclado, dicho concepto de “intensidad” se traduce con la velocidad de pulsación de una tecla (*key velocity*).

Entre ambos eventos MIDI habrá un código numérico (código duración) que define el tiempo que ha de transcurrir entre un evento y el siguiente (expresado en *MIDI ticks*).

La Figura 15 muestra un ejemplo en el cual se representa como se codifica la información musical en formato MIDI<sup>202</sup>.

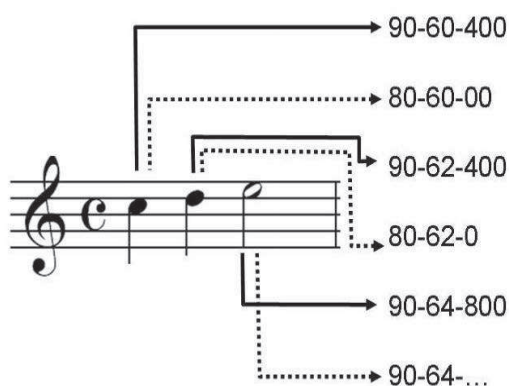


Figura 15: Ejemplo de codificación MIDI de las duraciones. Las líneas continuas identifican mensajes NOTE ON y las punteadas mensajes NOTE OFF.

Se identifica 400 como el código de duración<sup>203</sup> de la nota negra y 800 como el de la nota blanca.

El último evento MIDI (90-64-...) no tiene código de duración porque dependerá de lo que ocurra a continuación en la obra musical.

El código de duración 00 que hay tras de cada evento NOTE OFF implica que la siguiente nota comienza a sonar justo después de desactivar la nota anterior.

Los silencios están definidos en la notación musical por medio de las grafías de la Figura 16.



Figura 16: Representación de pausas musicales en la sintaxis del lenguaje musical.

El concepto de silencio no existe en el formato MIDI. Se codifica por medio de un código de duración del valor de la duración del silencio entre el evento NOTE OFF y el evento NOTE ON de la siguiente nota tal como se muestra en la Figura 17.

202 líneas continuas=activación de notas. líneas discontinuas=Desactivación de notas. Se han eliminado los códigos de velocidad de la nota (*key velocity*) para simplificar el ejemplo. Los valores que indican el código de la nota están en formato hexadecimal.

203 Tal como define el estándar MIDI, la codificación de estos códigos de duración se ha explicado en la página 410 del anexo “Anexo 7 – Manual de usuario de la aplicación AN\_MID v5.1”.



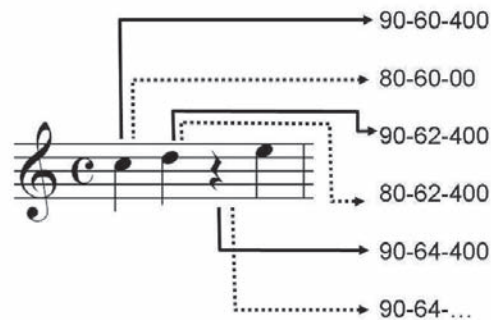


Figura 17: Ejemplo de representación de silencios en formato MIDI.

Puede observarse que la desactivación de la nota Re (4º evento en el ejemplo), tiene un código de duración 400 que indica que la siguiente activación de nota (el Mi o 5º evento) se producirá después del tiempo de duración de negra y como no hay ninguna nota activa en ese momento, la reproducción estará en silencio el tiempo correspondiente a la duración de una nota negra.

Una diferencia importante para diseñar un algoritmo de identificación de duraciones de notes, es la codificación MIDI cuando hay material polifónico<sup>204</sup> en el mismo canal. En este caso, la duración de las notas estará definida por la suma de los códigos de duración que hay entre los eventos MIDI de la activación de una nota y la desactivación de la misma. El ejemplo de la Figura 18 permite identificar visualmente este hecho<sup>205</sup>.

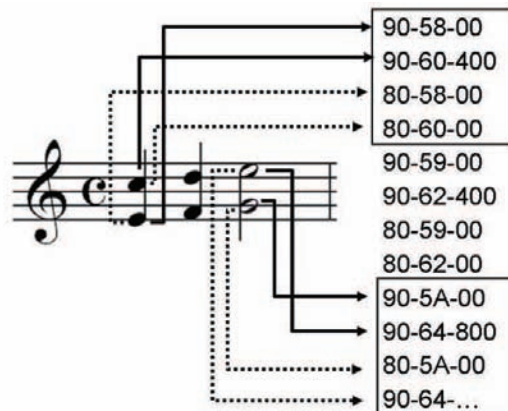


Figura 18: Ejemplo de codificación MIDI de material musical polifónico en un mismo canal.

Observe que el código de duración tras la activación (NOTE ON) de la nota Mi de la 4ª octava (1º evento) del primer acorde es 0 para permitir que justo después de activarla se active también la nota Do de la 5ª octava (2º evento).

Se presenta en la Figura 19 un ejemplo donde en el mismo canal coexisten simultáneamente notas de diferentes duraciones. Se puede constatar el nivel de complejidad que puede implicar identificar la duración de una nota.

204 Polifonía es un término que define que en el material musical suenan diferentes sonidos a la vez.

205 Aparecen diferenciados en recuadros todos los eventos MIDI implicados en cada uno de los 3 acordes del ejemplo.

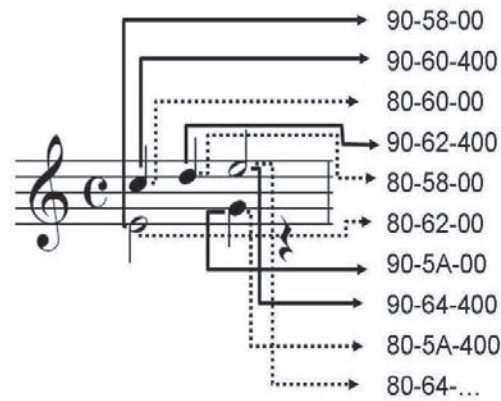


Figura 19: Ejemplo de codificación MIDI de material musical polifónico en un mismo canal con diferentes duraciones en cada línea melódica.

Observe que calcular la duración de la nota Mi de la 4ª octava (1er evento) implicará sumar las duraciones asociadas a los eventos 2 y 4 que son las que están entre los eventos 1 (activación de la nota Mi(4)) y 6 (desactivación de la nota Mi(4)).

En cualquier caso, esta introducción al modo como el formato MIDI codifica las duraciones en un fichero MIDI es una versión simplificada para el lector no especializado en cuestiones de ingeniería informática. En el apartado “Codificación de la duración.” en la página 308 del anexo “Anexo 3 – Conceptos asociados al estándar MIDI” está explicado en detalle el formato de codificación de las duraciones en formato MIDI.

### Funcionamiento del algoritmo.

El algoritmo de identificación de duraciones debe recorrer el fichero MIDI de principio a fin manteniendo tres estructuras de datos:

- **Acumulador de duraciones:** Será un vector de 26 elementos<sup>206</sup> inicializados a cero en los cuales se va acumulando el número de veces que se ha identificado cada tipo de duración discreta en una nota. El último elemento se utiliza para almacenar aquellas duraciones que no han podido identificarse con ninguna de las 25 anteriores.
- **notas abiertas:** Será una matriz de 16 canales MIDI x 12 notas la cual almacenará para cada canal MIDI aquellas notas que se ha encontrado su evento NOTE ON pero todavía no se localizado su evento NOTE OFF y se irán acumulando los códigos de duración que haya entre todos los eventos que haya entre los eventos NOTE ON y NOTE OFF de la nota<sup>207</sup>.
- **contador de duraciones:** variable que acumula los códigos de duración entre los eventos NOTE ON y NOTE OFF para asignar entonces la duración real de la nota.
- **Acumulador de duraciones continuas:** Para el análisis de duraciones continuas (sin intentar asociar la duración de cada nota a una figura de las definidas por la teoría musical), se divide el espectro de frecuencias de duraciones entre 0 y 6300 MIDI ticks en intervalos iguales al valor “umbral de desviación de duraciones”. Dicho vector almacenará en cada elemento el número de notas con duración perteneciente a ese intervalo.

206 26 son el número total de tipos de duraciones discretas procesadas por la aplicación AN\_MID51. El porqué de estos 26 tipos de duraciones se explicará más adelante en este apartado.

207 Se utilizará la misma estructura que se ha utilizado en el algoritmo de cálculo de intervalos añadiéndole un campo en la estructura de contador de duración de la nota abierta.

Debido a que las duraciones de notas presenten inexactitudes (tal como se explicará a continuación en el apartado de problemas aparecidos), se necesitará un parámetro constante en todo el proceso de cálculo.

- **Umbral de desviación de duraciones:** Valor natural que define cuantos *MIDI ticks* se puede desviar la duración de una nota para dejar de ser considerada como la nota de duración teórica. Es decir, la ventana de duraciones posibles de una nota para considerar-la como una nota (expresada en *MIDI ticks*) de duración  $m$  *MIDI ticks* es el intervalo:  $[m - \text{umbral desviación de duraciones}, m + \text{umbral desviación de duraciones}]$

Todas las duraciones se deberán normalizar respecto al compás de la pieza.

### Problemas aparecidos

#### **Inexactitud en las duraciones almacenadas**

La unidad *MIDI tick* es una unidad de tiempo muy pequeña y precisa, por tanto, intentar diferenciar sensorialmente por un humano con una audición de 2 notas con duración “ $m$ ” *MIDI ticks* y “ $m+30$ ” *MIDI ticks* cada una será prácticamente imposible.

Además si se intenta introducir a tiempo real con un teclado MIDI y un ordenador con un secuenciador un material musical de una partitura, la probabilidad de que quede almacenado en el ordenador el material en formato MIDI tal como está en la partitura es prácticamente cero sin un proceso cuantificación.

La Figura 20 muestra un material musical extremadamente sencillo en su interpretación y el resultado MIDI almacenado por el secuenciador en una grabación a tiempo real sin cuantificación.

Partitura musical original.



Resultado de la grabación de la partitura a tiempo real.

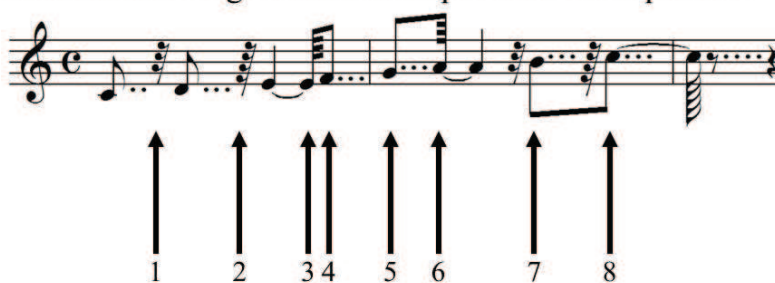


Figura 20: Resultado de grabación a tiempo real de una escala de Do Mayor por medio de un secuenciador sin cuantificación.

Se explican a continuación las anomalías cometidas por el intérprete en la Figura 20 una a una:

1. Nota ligeramente más corta y se deja un instante sin pulsar ninguna tecla.
2. Nota sutilmente más corta y se deja un instante sin pulsar ninguna tecla.
3. Nota sutilmente más larga.
4. Nota sutilmente más corta.
5. Nota sutilmente más corta.
6. Nota ejecutada precipitadamente.

7. Nota ligeramente retrasada.
8. Nota sutilmente retrasada.

Esto es debido a que la ejecución humana no puede evitar diferencias del orden de una milésima de segundo (recuerde que 1 nota negra se compone de 1024 *MIDI ticks*) pero el secuenciador las detecta.

Incluso, partituras escritas con editores de partituras y grabadas en formato MIDI, tienen asignados valores de duración diferentes a notas iguales en función de su posición en el compás. Esto lo provocan los editores imitando el “*swing*” de la interpretación humana inexacta para crear un material que reproducido por un generador MIDI, su resultado sonoro sea similar a la interpretación humana.

La Figura 21 muestra los códigos de duración de un fragmento musical editado con el editor de partituras *Finale* de *Coda Music*.<sup>208</sup> Para cada nota se muestra el código de duración que hay después del evento NOTE OFF de la nota y entre paréntesis, el código en formato decimal y el código de duración teórica que debería haber.

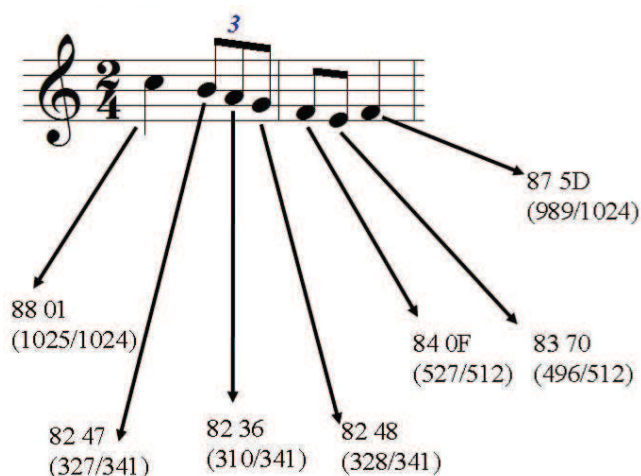


Figura 21: Códigos de duración teóricos y reales de un fragmento musical editado con el editor de partituras *Finale* de *Coda Music*.

Observe que el valor almacenado y el valor teórico difieren en un valor máximo de 31 *MIDI ticks*.

En la Figura 22 se muestra un ejemplo similar con un material musical donde todas las notas tienen una duración de semicorchea<sup>209</sup>. Este ejemplo ha sido desarrollado por el autor en el cual, tras haber grabado el material musical con el editor *Finale* en formato MIDI, dicho archivo ha sido abierto con un editor hexadecimal para identificar los códigos de duración reales almacenados en dicho archivo.

208 Consultar página 273 (capítulo Anexo 2 – Conceptos TIC y matemáticos utilizados.) para una explicación detallada.

209 La duración teórica de una semicorchea se calcula dividiendo la duración de la nota negra por 4 ya que 4 semicorcheas equivalen en duración a una nota negra.

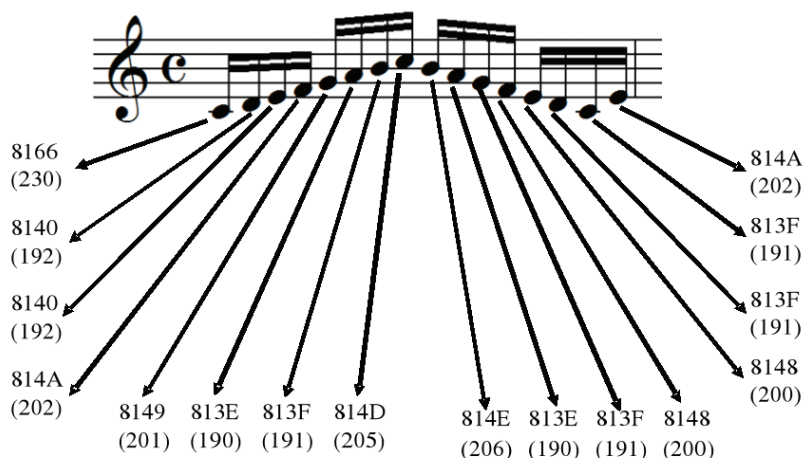


Figura 22: Códigos de duración teóricos y reales de un fragmento musical editado con el editor de partituras Finale de Coda Music.

Identificado este hecho, resulta considerablemente difícil conseguir unos resultados suficientemente fiables de identificación de tipos de duraciones.

Para mitigar considerablemente este hecho en este ejemplo anterior, La aplicación AN\_MID51 trabajaría con un umbral de desviación de duraciones de 65 *MIDI ticks* para poder considerar todos estos valores de duración del fichero MIDI dentro de la ventana de aceptación de una duración de nota como semicorchea  $[191,321] = [256-65, 256+65]$

### Variaciones dinámicas de tempo

El formato MIDI no incluye ningún tipo de evento para indicar un “*ritardando*”, un “*a tempo*” o un “*accelerando*”<sup>210</sup>, únicamente cambia las duraciones de las notas aumentándolas o reduciéndolas para dar el efecto sonoro adecuado.

La Figura 23 muestra un ejemplo de partitura con indicaciones de cambio de tempo en los compases 2, 3 y 4 y en la parte inferior se muestra una gráfica en la que se muestra la expansión del tempo en el compás 2, la compresión del tempo en el compás 4 y la recuperación de la velocidad en los compases 1 y 3.

<sup>210</sup> “*rit*” y “*accel*” son indicaciones en la partitura que indican que la velocidad del tempo se debe reducir o acelerar progresivamente reduciendo o aumentando la duración en segundos de cada pulsos de compás. La indicación “*a tempo*” devuelve la duración de cada pulso de compás a la medida original.

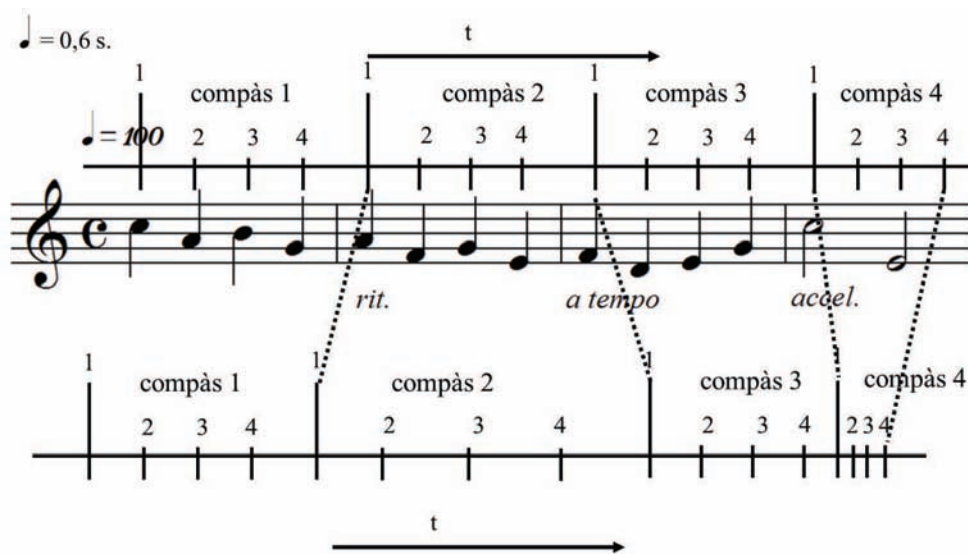


Figura 23: resultado (parte inferior) de la compresión/expansión del tempo con indicaciones de cambio de tempo en los compases 2, 3 y 4.

### Efecto de las articulaciones sobre la duración de las notas.

Hay articulaciones<sup>211</sup> musicales que modifican la duración real de la nota a pesar de tener sobre la partitura la misma grafía. Esto provoca la confusión de cualquier algoritmo de detección de duraciones ya que el formato MIDI tampoco incluye ningún evento ni atributo del evento NOTE ON que indique las articulaciones que se aplicarán a cada nota y por tanto, existe el peligro que se detecte una nota de duración “x” Cuando realmente su duración sobre la partitura sea “x+n” siendo “n” el valor de reducción respecto la duración total “x+n”, siendo su duración real “x+n”.

Las figuras 24 y 25 muestran el resultado explicado: En la Figura 24 se muestra la partitura impresa en la cual se puede observar que cada nota tiene una articulación de puntillo que reduce la duración de la nota a la mitad a pesar de ser de duración negra las notas del pentagrama superior. La Figura 25 muestra lo que se almacenará en el fichero MIDI que almacena el material de la figura Figura 24 donde en el pentagrama superior las notas aparecen como corcheas seguidas de un silencio de corchea para cada nota negra original de la partitura.



Figura 24: Ejemplo de material musical con articulaciones.



Figura 25: Resultado del material musical de la Figura 24 almacenado en formato MIDI.

211 Una articulación es un símbolo que se añade a las notas para indicar el modo como debe interpretarse la misma a nivel de ataque de la nota, reducción de un porcentaje de su duración etc. las articulaciones pueden ser específicas al instrumento que las interpreta porque están ligadas a los elementos físicos inherentes a su construcción. Consultar la página 231 del Anexo Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados para una explicación y enumeración detallada de los tipos de articulaciones.

## Selección de las duraciones tratadas

Técnicamente, el dominio de duraciones posibles definido por la teoría musical es casi infinito, pero la realidad es que se utilizan solamente unos tipos de duraciones concretos (blanca, negra, semicorchea, tresillo de corchea, negra con puntillo etc.).

El hecho de la inexactitud de las duraciones explicado en el apartado anterior provoca que los intervalos a partir del umbral de detección de duraciones, fácilmente se solapan entre ellos si se considera tipos de duraciones a detectar muy próximos y similares imposibilitando discernir a qué duración corresponde esa nota.

Por ello se ha hecho una selección de 25 tipos de duraciones suficientemente distantes en su duración teórica para garantizar que con umbrales de detección de intervalos de entre 50 y 100 MIDI ticks no haya solapamientos entre ellos.

En la Tabla 107 del “Anexo 3 – Conceptos asociados al estándar MIDI” se encuentra el listado de los tipos de duración que la aplicación AN\_MID51 trata en su análisis de duraciones discretas.

En cualquier caso, se constata que el 99% de los tipos de duraciones utilizados en la música clásica están dentro de estos 25 tipos seleccionados.

Además, en la última versión (v.51) del programa AN\_MID se ha añadido el cálculo de frecuencias de uso de duraciones continuas.

## Normalización de duraciones respecto el compás de la pieza

Si se quiere comparar el número de notas negras o corcheas que tienen dos piezas para buscar similitudes de estilo, no podemos comparar los valores en valor absoluto ya que el denominador del compás (2,4,8, ...) define cual es la duración de cada pulsación de compás.

Supongamos los ejemplo de las figuras 26 y 27 donde en la Figura 26 se tienen los primeros compases originales del tercer movimiento de la Sonata nº 6 para piano K.284<sup>212</sup> de Mozart y en la Figura 27 se tiene el mismo material pero habiendo cambiado el compás de 4/4<sup>213</sup> a 4/8<sup>214</sup>



Figura 26: Primeros compases tercer movimiento de la Sonata nº 6 para piano K.284.



Figura 27: Resultado de la Figura 26 realizando un cambio de compás.

El resultado sonoro de las partituras de las figuras 26 y 27 será idéntico pero el número de corcheas de la primera será igual al número de semicorcheas de la segunda y el número de notas negras de la primera será igual al número de corcheas de la segunda. Es decir, los vectores

212 Consultar página 330 (capítulo Anexo 4 – Información de compositores analizados y catalogación.) para una explicación detallada.

213 En la partitura la indicación de compás 4/4 se suele expresar con el símbolo “C” tal como se ve en la Figura 26.

214 La teoría musical define el compás de 4/4 tiene 4 pulsos de compás en los cuales cada uno tiene una duración igual a la nota la cual caben 4 en el compás de 4/4 (es decir la negra) y el compás de 4/8 que tiene 4 pulsos de compás los cuales cada uno de los tiene una duración igual al tipo de duración que caben 8 en el compás de 4/4. Consultar apartado “Compás” en la página 235 en el Anexo “Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados” para una explicación detallada.

“acumulador de duraciones” de ambas piezas se tendrá que desplazar una posición a la derecha o a la izquierda en una de ellas para poder compararlas, o multiplicar la duración real de las notas de la segunda pieza por un factor de conversión (x2 en este caso) para poderse considerar como resultados normalizados.

Este factor de conversión de las duraciones se extrae a partir del evento MIDI que asigna el compás de la pieza en el fichero MIDI y la Tabla 14 muestra la tabla de correspondencia.

Compás	Denominador	Factor de conversión
2/2, 3/2, 4/2, 5/2, ....	2	x 1/2
2/4, 3/4, 4/4, 5/4, ....	4	x 1
2/8, 3/8, 4/8, 5/8, ....	8	x 2
2/16, 3/16, 4/16, 5/16, ...	16	x 4

*Tabla 14: Factores de normalización en función del denominador del compás.*

## **Resumen del desarrollo de la aplicación AN\_MIDv5.1**

La aplicación se compone de tres partes: Análisis de frecuencias de notas y octavas, un análisis de intervalos y un análisis de frecuencias de uso de duraciones.

El análisis de frecuencias de notas y octavas realiza un recuento y un histograma normalizado de las clases de notas y su distribución en las diferentes octavas.

El análisis de intervalos aplica un algoritmo para detectar los intervalos ya que el formato MIDI trata el material musical de una manera diferente al formato de partitura en papel.

El análisis de duraciones aplica un algoritmo de detección y clasificación de las duraciones de las notas en base a las duraciones de la teoría musical y un análisis continuo para realizar un recuento de las duraciones utilizadas en base a un espectro continuo.

Cada uno de los algoritmos presenta una serie de problemas de desarrollo y de aplicación debidos principalmente al hecho que el formato MIDI almacena el material musical de una manera muy diferente a como lo hace la sintaxis de la teoría musical clásica y a que es muy más flexible que dicha sintaxis.



# Capítulo 5. Clasificación de estilos musicales clásicos por medio de análisis discriminante

## Introducción

Los métodos diseñados hasta la fecha para identificar patrones que permitan clasificar piezas musicales tonales en base al género (clásico, funk, jazz, etc.) lo hacen extrayendo unas pocas características heterogéneas de cada pieza (intervalo mayor, uso de cada una de las notas, patrones rítmicos, uso de triadas, etc.) con resultados muy interesantes (tal como se ha visto en el “Capítulo 2. Revisión de investigaciones realizadas” a partir de la página 26).

Sin embargo, ninguna de ellas ha abordado el escenario de comparar estilos musicales próximos en el tiempo y estilo.

Esta investigación da un paso más igualando los resultados de otros sistemas por medio de un nuevo método más simple en su definición para clasificar piezas musicales clásicas según su periodo (Barroco, Clásico, Romántico) a partir del recuento del uso de datos elementales en una composición musical como son los intervalos melódicos utilizados y el porcentaje de uso de cada nota en base a su tonalidad. Dicho método permite clasificar piezas independientemente del compositor, la duración, la tonalidad y la orquestación de dicha pieza. Estos descubrimientos representa un primer más hacia el proceso de identificación de patrones objetivos que permitan diferenciar el estilo compositivo de diversos compositores coetáneos y pertenecientes al mismo periodo musical. El método también en principio sería adecuado para demostrar o refutar la autoría de una obra de autenticidad dudosa, aunque más adelante se demostrará que es insuficiente su fiabilidad para diferenciar compositores.

Se puede decir que los resultados presentados en este capítulo aglutinan la primera prueba de que los indicadores de bajo nivel son adecuados para obtener patrones de diferenciación de estilos compositivos.

Esta investigación ha sido publicada por la revista “El Artista” en su número de Noviembre de 2011 bajo el título “Un nuevo método de clasificación de piezas musicales clásicas utilizando indicadores objetivos de bajo nivel”[79].

### Identificación del problema

La definición de las características de un estilo o época musical no son claras y hasta la fecha se ha hecho por medio de adjetivos subjetivos e interpretables tales como (relacionadas con el Clasicismo musical): alegre, brillante, con equilibrio formal etc.[84] Estas características no pueden ser entendidas de manera objetiva y sin unos conocimientos mínimos de musicología<sup>215</sup>.

Sin embargo, cualquier persona con una suficiente cultura musical puede mediante la simple audición de una pieza musical, identificar el periodo histórico en el cual dicha pieza está compuesta. En general, bastarán unos pocos segundos de audición para identificar su estilo (tal como se ha demostrado en el apartado “Opiniones de profesionales de la música sobre el problema” (página 17). En base a este hecho, la presente investigación demuestra que también hay indicadores que definen el estilo de una pieza musical en los elementos básicos de su composición: sus intervalos melódicos.

---

215 Consultar la página 252 (capítulo “Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados”) para una explicación detallada.

En la teoría musical un intervalo melódico identifica la distancia (medida en tonos y semitonos) que hay entre dos notas<sup>216</sup> por ejemplo, cualquier par de notas que disten en distancia tonal 2 tonos (4 semitonos) será considerado una 3ª Mayor independiente de cuales sean las notas siempre que estas disten en los nombres de las notas 2 peldaños (Do, Re, Mi, Fa, Sol, La Si). En el método propuesto, las notas que intervienen en el intervalo sí que son consideradas. De este modo, las 12 notas existentes generarán 144 intervalos melódicos posibles (calculando 12<sup>2</sup>).

La Tabla 15 establece la relación entre los nombres de las notas en el sistema tonal (en nomenclatura anglosajona) y los identificadores utilizados en el método propuesto.

Nombre Nota	C	C#	D	D#	E	F	F#	G	G#	A	A#	B
Nombre establecido	1	1+	2	2+	3	4	4+	5	5+	6	6+	7

Tabla 15: Nombres de las notas utilizados en este estudio.

A pesar de que ya se ha explicado en la Figura 6 (página 85), únicamente recordar que un intervalo melódico es un par de notas interpretadas consecutivamente en una línea melódica. La Figura 28 muestra los intervalos melódicos del motivo musical de la 5ª Sinfonía de L.v.Beethoven.

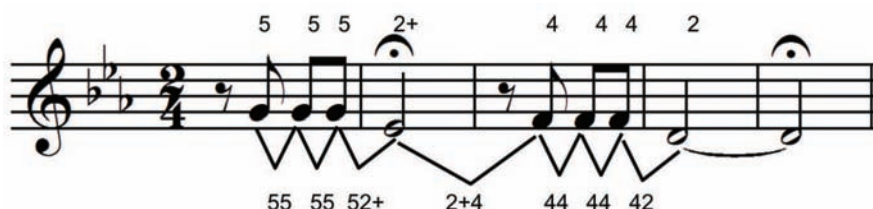


Figura 28: Intervalos melódicos detectados en los primeros compases de la 5ª sinfonía de Beethoven.

En la tonalidad del primer movimiento de la 5ª Sinfonía de Beethoven, (Do menor), la nota Do/C corresponde al identificador “1”, C# al “1+”, D al “2” ... B al “7”. De este modo, en este motivo aparecen dos ocurrencias del intervalo 55, dos del 44 y una ocurrencia de cada intervalo 52+, 2+4 y 42.

El estándar MIDI no permite notas enarmónicas<sup>217</sup>. Por lo tanto un Do# será almacenado del mismo modo que un Re b.

El desarrollo de métodos matemáticos para clasificar piezas musicales en base a diferentes criterios ha sido un campo el cual las soluciones desarrolladas han llegado hasta la fecha a clasificar piezas musicales en base a su estilo tal como se ha constatado en el “Capítulo 2. Revisión de investigaciones realizadas” (página 26). Sin embargo dichas soluciones han clasificado piezas en base a su género musical de manera muy generalista (clásica, *funk*, rock, etc.). Otras han clasificado piezas entre diferentes compositores concretos distantes en estilo y época analizando el uso de acordes, aunque se reconoce que dicho algoritmo de identificación de acordes no funciona si no se identifican 3 notas simultáneamente.

Tomando como punto de partida las investigaciones realizadas hasta la fecha, esta investigación propone un nuevo método basado en el análisis del porcentaje de uso de cada nota y cada intervalo utilizado con respecto al total de notas e intervalos identificados en cada pieza musical en todas sus voces, para clasificar piezas musicales clásicas (en términos generales) en formato MIDI en base a

216 Consultar página 247 (capítulo Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados) para una explicación detallada.

217 Consultar página 253 (capítulo Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados) para una explicación detallada.

su época musical (Barroco, Clásico y Romanticismo) independientemente del compositor, la orquestación, la forma musical y la tonalidad de la misma. De este modo se pueden extraer indicadores objetivos asociados a cada estilo.

Es necesario decir que los límites entre los estilos compositivos analizados no son claros y que hay compositores cuya producción musical se puede decir que está entre dos estilos musicales (por ejemplo, Beethoven es considerado un compositor de transición entre el Clasicismo y el Romanticismo).[85]

El método propuesto en esta investigación podría ser utilizado también para cuantificar numéricamente en qué medida un compositor incorpora en sus obras influencias de otros compositores clasificando sus obras en base a una muestra de obras musicales de los compositores que aportan su influencia en el primero.

### Objetivo de esta investigación

El objetivo del trabajo presentado en este capítulo ha sido diseñar un método que permita clasificar piezas musicales clásicas (entendidas como clásicas las compuestas entre el siglo XVII y XIX) a partir de elementos elementales tales como el número de intervalos utilizados de cada uno de los 144 existentes y el número de notas utilizadas de cada una de las 12 posibles.

Dichos valores serán considerados en su cantidad porcentual respecto al total de intervalos y notas identificadas en cada pieza musical. De este modo se puede considerar en las muestras de piezas analizadas piezas de diferente duración, orquestación y magnitud.

En la muestra sólo han sido considerados movimientos de piezas cuyo modo de su tonalidad es en modo mayor. De este modo garantizamos la comparabilidad de los intervalos generados a partir de las notas 3 y 4 por una parte y las notas 8 y 9 por otra, ya que las escalas mayores y menores difieren en esas notas<sup>218</sup>.

Se han incluido también en las variables analizadas (notas e intervalos) variables que definen la distribución de las notas de las piezas musicales analizadas en las diferentes 11 octavas que permite el estándar MIDI.

Una vez se haya demostrado el nivel de fiabilidad del método, podrá ser utilizado también para analizar y cuantificar la influencia que sobre un compositor han ejercido otros compositores que lo han precedido en la historia.

Una vez más, se enfatiza en que este método será una primera aproximación a la viabilidad de diseñar un método matemático que permita identificar de manera objetiva los rasgos diferenciales entre el estilo compositivo de dos compositores coetáneos y muy similares en estilo.

## **Metodología**

Esta sección del estudio enumera las herramientas utilizadas así como los conjuntos de compositores y obras utilizados en el estudio.

### Procedimientos

La principal aportación tecnológica para este estudio ha sido la implementación de la aplicación informática AN\_MID v5.1<sup>219</sup>; programa informático que extrae de cada pieza analizada (en formato MIDI) las frecuencias de aparición de cada nota y de cada intervalo melódico posible.

---

218 Consultar página 262 (capítulo Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados) para una explicación detallada.

219 Consultar página 401 (Anexo 7 – Manual de usuario de la aplicación AN\_MID v5.1) y página 80 (Capítulo 4. Desarrollo de la aplicación AN\_MIDv5.1) para una explicación detallada.

## Resultados de la aplicación AN\_MID v5.1

Para cada una de las  $n$  piezas procesadas por el programa, se obtiene el resultado de la Figura 29.

$$MP_i = (NP_{i,1} \dots NP_{i,12}, OP_{i,1} \dots OP_{i,11}, IP_{i,1,1} \dots IP_{i,7,7}) / 1 \leq i \leq n$$

Figura 29: Valores obtenidos de la aplicación AN\_MID 5.1

Siendo:

- $NP_{i,j}$  : (*Note Percentage*) El porcentaje de aparición en la pieza musical de la nota  $j$  respecto al total de notas identificadas en la pieza musical. Las notas son C, C#, D, D#, E, F, F#, G, G#, A, A#, B, teniendo en cuenta que las notas han sido transportadas a Do Mayor, es decir,  $NP_{i,1}$  contiene el número de veces que aparece la nota tónica en la pieza “ $j$ ”. Dicha tonalidad se extrae del fichero MIDI en su correspondiente evento MIDI.
- $OP_{i,j}$  : (*Octave Percentage*) El porcentaje de notas en la partitura detectadas en la octava “ $j$ ” en la pieza “ $i$ ”. Se ha de tener en cuenta que el estándar MIDI permite hasta 11 octavas, de las cuales un piano no las utiliza todas.
- $IP_{i,j,k}$  : (*Interval Percentage*) El porcentaje de veces que se ha detectado que la nota “ $j$ ” es seguida por la nota “ $k$ ” (siendo  $j,k \in \{1, 1+, 2, 2+, 3, 4, 4+, 5, 5+, 6, 6+, 7\}$ ) en la pieza “ $i$ ”, respecto al total de intervalos detectados.

Estas variables extraídas del fichero MIDI o partitura permiten comparar piezas musicales de diferente duración, orquestación y construcción formal.

Dichas variables cumplirán las propiedades de la Figura 30.

$$NP_{i,j} = \sum_{k=1}^{12} IP_{i,j,k} = \sum_{k=1}^{12} IP_{i,k,j} \quad \forall i, j \mid 1 \leq j \leq 12, 1 \leq i \leq n$$

$$\sum_{k=1}^{12} NP_{i,k} = 1 \quad \sum_{k=1}^{11} OP_{i,k} = 1 \quad \sum_{k=1}^{12} \sum_{m=1}^{12} IP_{i,k,m} \approx 1$$

Figura 30: Propiedades cumplidas por los indicadores obtenidos por medio de la aplicación AN\_MID 5.1

Ya que excepto la primera y la última nota almacenada en cada canal que no serán nota final ni nota inicial respectivamente de ningún intervalo melódico, todas las notas son nota final y nota inicial del intervalo que forman con la nota anterior y posterior respectivamente.

### Compositores y grupos de piezas musicales estudiados

Para probar la hipótesis, se han seleccionado los colectivos de la Tabla 16. Estos archivos MIDI han sido descargados de *Classical Archives* [86].

Periodo compositivo/ Compositor/ número de intervalos analizados	Forma musical <sup>220</sup>	Nº. de movimientos analizados.
Periodo Barroco (483.522 intervalos analizados)		212 piezas
Antonio Vivaldi (1678-1741)	Diversos conciertos	47
J.S.Bach (1685-1750)	Diversas piezas (suites, conciertos, piezas para clave etc.).	131
G.F.Händel (1685-1759)	Diversas piezas (suites, conciertos, piezas para clave etc.).	34
Periodo Clásico (1.934.714 intervalos analizados)		700 piezas
F.J. Haydn (1732-1809)	Todas las sonatas <sup>221</sup> para clave (Hob XVI). <sup>222</sup>	139
	Sinfonías (Hob I/60 - 104) <sup>223</sup>	153
	Cuartetos (Hob III Op.1, 2, 3, 20, 33, 42, 50, 52, 54, 64, 74, 76 y 77)	192
W.A.Mozart (1756-1791)	Todas las sonatas para piano(forte)	48
	Sinfonías (k.128 <sup>224</sup> / n°16 - k.551/n°41) <sup>225</sup>	93
	Todos los cuartetos (23)	75
Periodo Romántico (629.891 intervalos analizados)		99 piezas
Johannes Brhams (1833-1897)	Diversas piezas	24
Robert Schumann (1810-1856)	Diversas piezas	28
Antonín Dvořák (1841-1904) <sup>226</sup>	Diversas piezas	47

Tabla 16: Lista de conjuntos de piezas analizados y número total de intervalos detectados en cada uno.

La columna “Nº. de movimientos analizados” de la Tabla 16 contiene el número total de movimientos analizados (una sinfonía clásica tiene entre 3 y 5 movimientos). Todas las piezas analizadas están compuestas en modo Mayor<sup>227</sup>.

El conjunto de piezas seleccionadas de cada compositor romántico incluye principalmente sinfonías, sonatas para piano, sonatas para violín viola y violonchelo, cuartetos y quintetos de cuerda y piezas para piano de diferente forma (serenatas, baladas, etc.).

- Cada una de las 1011 piezas analizadas ha sido editada individualmente con un editor musical *Finale* para garantizar que el material musical estaba almacenado correctamente; realizando en el caso de que fuera necesario las siguientes operaciones:

220 Consultar página 244 (capítulo Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados) para una explicación detallada.

221 Consultar página 259 (capítulo Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados) para una explicación detallada de la forma musical “Sonata”.

222 Consultar página 327 (capítulo Anexo 4 – Información de compositores analizados y catalogación.) para una explicación detallada.

223 No se incluye en la muestra las sinfonías n° 74,75,77-81 porque no ha sido localizada ninguna fuente MIDI.

224 Consultar página 330 (capítulo Anexo 4 – Información de compositores analizados y catalogación.) para una explicación detallada del catálogo Köchel.

225 No ha sido considerada la sinfonía 37 porque en la actualidad es atribuida a *Michael Haydn*.

226 Consultar páginas 346, 313, 325, 326, 333, 316, 342 y 323 (anexo “Anexo 4 – Información de compositores analizados y catalogación.”) para leer unas breves notas biográficas de los autores de la Tabla 16 (en el orden de enumeración en la tabla).

227 Consultar página 261 (Anexo “Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados”) para una explicación detallada.

- Eliminación del material musical asociado a la repetición de la exposición. El formato MIDI no permite especificar repeticiones musicales, por tanto, en caso de haberlas, los compases de material musical que se repite, aparece 2 veces en el fichero MIDI. Por tanto se ha eliminado las repeticiones de material musical donde apareciera<sup>228</sup>.
- En caso de detección de errores en el material musical en formato MIDI, compararlo y corregirlo con la partitura original de la pieza (obtenida en [87]).
- Eliminación del material musical relacionado con instrumentos de percusión (timbales principalmente) porque los redobles de timbal tienen en formato MIDI muchas notas pero no aportan valor compositivo.

### Análisis Discriminante

La herramienta estadística utilizada para clasificar las piezas ha sido el análisis discriminante con función lineal.<sup>229</sup>

El análisis discriminante se utiliza para clasificar las observaciones en dos o más grupos a partir de una muestra en la cual se conocen los grupos a los que pertenece cada elemento de la muestra. El análisis discriminante también puede utilizarse también para investigar cómo contribuyen las variables a la separación de los grupos.

Como función lineal se utiliza la distancia de *Mahalanobis*<sup>230</sup> la cual mejora la distancia euclidiana<sup>231</sup> en que tiene en cuenta la correlación entre las variables aleatorias.

La principal condición que deben cumplir las variables aleatorias (frecuencias de uso de cada nota y frecuencias de uso de cada intervalo melódico) extraídas de los individuos (en este caso piezas musicales) es que deben poderse aproximar a una distribución normal. Ello ha sido comprobado por medio del test de *Anderson-Darling*. [88]

El análisis discriminante está implementado en la mayoría de paquetes estadísticos como el SPSS, Minitab, R, etc. Los cálculos resumidos en esta investigación han sido realizados con la aplicación “Minitab 15.1.20”<sup>232</sup>.

## **Resultados**

Se han dividido aleatoriamente las piezas de cada compositor en dos grupos. El primer grupo forma la muestra de la cual se conoce su grupo de clasificación y el segundo incluye las piezas de las cuales se quiere predecir su pertenencia a cada uno de los tres grupos (Barroco, Clasicismo o Romanticismo).

De este modo la muestra de piezas se compone de 505 piezas (105 piezas barrocas, 350 clásicas y 50 piezas románticas) y la población que se desea clasificar consta de otras 505 piezas las cuales el análisis discriminante realizará una predicción de su pertenencia a un grupo en base a la muestra.

El experimento se ha repetido 5 veces y la Tabla 17 muestra los promedios de clasificación de cada uno de los grupos a clasificar en cada uno de los grupos de la muestra.

En todos los experimentos la variable eliminada por no aportar valor discriminante es el porcentaje de uso de la nota sensible (nota etiquetada como “B”) y el porcentaje de notas incluidas

228 Consultar página 259 (capítulo Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados) para una explicación detallada.

229 Consultar página 349 (capítulo Anexo 5 – Conceptos estadísticos utilizados.) para una breve explicación de la técnica de Análisis Discriminante.

230 Consultar página 360 (capítulo Anexo 5 – Conceptos estadísticos utilizados.) para una explicación detallada.

231 Consultar página 353 (capítulo Anexo 5 – Conceptos estadísticos utilizados.) para una explicación detallada.

232 Consultar página 281 (capítulo Anexo 2 – Conceptos TIC y matemáticos utilizados.) para una explicación detallada.

en las octavas 1, 8, 9, 10 y 11 (variables O1, O2, O8, O9, O10 y O11) por ser de tesituras muy bajas o muy altas (con tesituras no utilizadas en los instrumentos orquestales clásicos).

		Grupo predicho		
		Barroco	Clásico	Romanticismo
Grupo real	Barroco	79%	20%	1%
	Clásico	7%	89%	3%
	Romanticismo	9%	20%	71%

Tabla 17: Porcentaje de éxito en la clasificación de cada grupo de piezas.

La aplicación de análisis estadístico ha emitido 47 avisos o *warnings* informando de las variables cuya correlación es alta con respecto a otras variables. Las variables con correlación alta están enumeradas en la Tabla 18.

Tipo de variable	Variables	Comentarios
Frecuencia de notas	C, Cs, D, E, F, Fs, G, Gs, A, As	Todas las variables del tipo
Frecuencia de intervalos	11,12,15,17,1+1,1+1+,1+2,21,22,22+,23,25,2+2,2+2+,2+3,2+4,32,33,34,35,42,42+,43,44,45,4+3,4+4+,4+5,51,53,54,54+,55,56	“11” es la etiqueta de la variable que almacena el porcentaje de veces que la nota “1” es seguida por una nota “1”
Frecuencia de octavas	O4, O5, O6	

Tabla 18: Variables altamente correlacionadas con otros predictores.

La Tabla 19 muestra las distancias cuadráticas promedio de todos los experimentos entre los centroides de los grupos de la muestra (la mitad de las piezas utilizadas para clasificar la otra mitad de piezas).

Barroco	0,00		
Clasicismo	18,06	0,00	
Romanticismo	61,72	48,12	0,00
	Barroco	Clasicismo	Romanticismo

Tabla 19: Distancia entre los centroides de los grupos analizados.

La distancia cuadrática entre un grupo y sí mismo es lógicamente 0,00 y se puede observar que el estilo barroco y el romántico son los que tienen una mayor distancia cuadrática entre ellos y a la vez, que la distancia entre estilo barroco y clásico es mayor que la distancia entre el estilo clásico y romántico.

Las 10 variables que según el análisis discriminante más peso tienen en la función discriminante lineal en todos los experimentos realizados están identificadas en la Tabla 20 y las 10 variables que tienen un menor peso están enumeradas en la Tabla 21.

Variable	2+6+	26+	56+	66+	36+	16+	76+	52+	46+	5+6+
Explicación respecto a la tonalidad de Do Mayor	D#-A#	D-A#	G-A#	A-A#	E-A#	C-A#	B-A#	G+D#	F-A#	G#-A#

Tabla 20: 10 variables con más relevancia en la función discriminante lineal.

Variable	1+7	5+7	4+7	2+7	6+7	D	As	Ds	G	37
Explicación respecto a la tonalidad de Do Mayor	C#-B	G#-B	F#-B	D#-B	A#-B	D	A#	D#	G	E-

Tabla 21: 10 variables con menos relevancia en la función discriminante lineal.

### Análisis de falsos negativos

El análisis de los “falsos negativos” realiza una valoración de los posibles motivos que ha provocado que una pieza de un estilo concreto (por ejemplo clásico) sea considerada por el método como no perteneciente a este estilo (considerándola de estilo barroco o romántico).

Los datos calculados para realizar el análisis de falsos negativos se han centrado en analizar por separado las formas musicales, los compositores y la magnitud de las obras.

La Tabla 22 resume el porcentaje de piezas de las muestras de cada estilo musical clasificadas incorrectamente cuyo número de notas es inferior a 1000. Se ha seleccionado el valor de 1000 notas porque todas las piezas de una magnitud pequeña (piezas de juventud) tienen un número de notas inferior a dicho valor. Los valores mostrados son el promedio de todos los experimentos realizados.

Estilo musical	Porcentaje promedio de piezas con menos de 1000 notas.	Varianza
Barroco	33,50%	1,942
Clasicismo	20,00%	0,246
Romanticismo	15,80%	1,298

Tabla 22: Porcentaje promedio de piezas clasificadas incorrectamente con menos de 1000 notas respecto al total de piezas clasificadas incorrectamente en las muestras de cada estilo musical..

La Tabla 23 resume los porcentajes de piezas clasificadas incorrectamente de cada compositor respecto al total de piezas en la muestra de predicción de cada compositor. Los valores mostrados son el promedio de los valores obtenidos en todos los experimentos realizados. También se muestra la varianza de los valores obtenidos en todos los experimentos.



Clasicismo			Barroco			Romanticismo		
	%	Var.		%	Var.		%	Var.
Haydn	6,5%	0,12	Bach	5,7%	0,01	Schumann	22,1%	0,38
Mozart	6,7%	0,04	Händel	12,9%	0,18	Brahms	11,5%	0,29
			Vivaldi	18,0%	0,04	Dvořák	13,0%	0,98

*Tabla 23: Porcentaje promedio de piezas clasificadas incorrectamente respecto el total de piezas clasificadas incorrectamente de cada compositor.*

La Tabla 24 resume los porcentajes de piezas clasificadas incorrectamente por cada forma musical de las analizadas en el periodo Clásico respecto el total de piezas de dicha forma en la muestra de predicción del periodo Clásico. Para cada forma musical (sonata, cuarteto y sinfonía) se analizan por separado sus movimientos.

Forma musical	Movimiento	% clasificado incorrectamente	Variación
Cuartetos de cuerda	1°	4,76%	0,457
	2°	9,81%	0,338
	3°	10,55%	0,573
	4°	6,57%	0,211
Sonatas para piano	1°	5,34%	0,014
	2°	5,23%	0,133
	3°	2,90%	0,015
Sinfonías	1°	1,40%	0,020
	2°	4,76%	0,070
	3°	13,12%	0,381
	4°	7,26%	0,108

*Tabla 24: Porcentaje promedio de piezas clasificadas incorrectamente de cada movimiento de cada forma musical respecto el número total de piezas de dicha forma musical.*

En la Tabla 25 se resumen en base a la instrumentación, los porcentajes de falsos negativos respecto el total de piezas de dicha instrumentación en los subconjuntos de piezas barrocas y románticas. Los valores mostrados son los valores promedio de todos los experimentos realizados. También se muestra la varianza de los promedios en los diferentes experimentos.

Instrumentación	Barroco		Romanticismo	
	Porcentaje promedio de falsos negativos	Varianza	Porcentaje promedio de falsos negativos	Varianza
Piezas para piano solo	8,5%	0,11	15,6%	0,001
Piezas para otros instrumentos solos	12,8%	0,45	-	-
Piezas orquestales	13,9%	0,17	16,2%	0,03
Piezas de cámara	-	-	8,9%	0,65

*Tabla 25: Porcentajes promedio de piezas clasificadas incorrectamente respecto el total de piezas procesadas de cada instrumentación.*

## Discusión

Queda demostrado que en el experimento, que las frecuencias de uso de notas no son variables suficientemente discriminantes para realizar una clasificación por género aceptable.

Se puede comprobar que los porcentajes de éxito son mayores cuanto mayor es la muestra de datos de cada estilo.

A pesar de haber considerado el porcentaje de uso de cada nota, los resultados demuestran que dichas variables no son consideradas como discriminantes del estilo musical (la mayoría de ellas están dentro de las 10 variables con menos peso en la función lineal).

En cualquier caso, los compositores elegidos en la muestra de compositores románticos es muy heterogénea (debido al periodo temporal compositivo que abarcan sus los compositores analizados) por lo que era lógico esperar en ella los resultados peores de porcentaje de éxito.

De todos los periodos objeto de estudio, el periodo romántico es el más difícil de acotar por tener un mayor alcance temporal y contar dentro del periodo con diferentes subestilos.

También era lógico esperar en este grupo una menor tasa de éxito ya que los caminos y normas de composición empezaron a ser más libres y las limitaciones en el arte de la composición se redujeron en el periodo Romántico.

En el cálculo del número de veces que aparece un intervalo 1+7 (C#-B normalizando la tonalidad a Do Mayor), se ha considerado como eje de coordenadas la tonalidad de la pieza, no la tonalidad en la que se encuentra el intervalo en ese momento (ya que probablemente habrá modulado a otra tonalidad). De este modo y de manera implícita, quedan consideradas las tonalidades a las que la pieza modula<sup>233</sup>.

Cabe destacar en cualquier caso, que queda demostrada la evolución compositiva ya que el porcentaje de piezas clasificadas como barrocas siendo románticas tienen los valores más pequeños.

La heterogeneidad de las muestras en cuanto a la forma musical y a la orquestación de sus elementos avanza un paso más para identificar factores objetivos y cuantificables que expliquen de una manera más concreta cuales son los factores identificativos de los estilos musicales Barroco, Clásico y Romántico.

Analizando en profundidad los resultados del análisis de “falsos negativos”, se deduce que para garantizar y mejorar los porcentajes de éxito se debe evitar incluir en las muestras piezas de un tamaño inferior a 1000 notas.

<sup>233</sup> Consultar página 251 (capítulo Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados) para una explicación detallada.

En las piezas analizadas en el periodo clásico, se puede observar que los terceros movimientos de sinfonías y cuartetos son los que presentan una mayor tasa de “falsos negativos” debido a que formalmente, en el periodo clásico dichos terceros movimientos son la unión de dos movimientos (un *minuet* o *scherzso* y un *trio*)<sup>234</sup> ambos con tonalidades diferentes (generalmente el “trio” está compuesto en la tonalidad relativa menor o en la tonalidad de la nota dominante respecto la tonalidad del minué o *scherzso*)<sup>235</sup>.

Por otra parte, A.Vivaldi es el compositor barroco más difícil de caracterizar como barroco (comparado con Bach y Händel) posiblemente debido a pertenecer a los estándares compositivos de la escuela italiana de principios del siglo XVIII. R.Schumann es a su vez el compositor de más difícil caracterización como Romántico (comparado con Brahms y Dvořák).

El número de variables excesivamente correlacionadas es consecuencia deducible de las propiedades resumidas en la Figura 30.

## Propuestas de investigaciones futuras

Los resultados de este estudio permitirán aplicar este método al caso de obras de autoría dudosa entre dos posibles compositores, estableciendo indicadores numéricos que puedan probar o refutar quien es el compositor de dicha pieza musical. Más adelante se demostrará que la técnica del análisis discriminante es insuficiente para este problema.

Otro trabajo futuro, sería incorporar otras formas musicales (obras corales, óperas, oratorios etc.) y otros compositores y estilos musicales (Escuela Impresionista, Renacentista etc.) al estudio.

Otro trabajo futuro sería desarrollar el estudio utilizando piezas compuestas en modo menor.

Una aplicación futura del método sería adaptarla y definir las condiciones de aplicación del método propuesto en esta investigación para cuantificar numéricamente en qué medida un compositor incorpora en sus obras influencias de otros compositores clasificando sus obras en base a una muestra de obras musicales de los compositores A y B que aportan su influencia en el compositor estudiado. El mayor porcentaje de obras que sean más próximas al compositor A frente al compositor B indicará una mayor influencia del compositor A sobre el compositor estudiado.

Otra futura investigación mejorará los porcentajes de éxito analizando y homogeneizando las muestras para identificar las formas musicales con las cuales se consigan mejores resultados.

## Conclusiones

El método presentado en esta capítulo permite clasificar piezas musicales clásicas en base a los porcentajes de uso de cada uno de los intervalos melódicos posibles, considerando los intervalos melódicos en su forma absoluta (nota inicial y nota final en términos absolutos en base a la tonalidad de la pieza).

La heterogeneidad de las muestras en cuanto a la forma de los elementos da un primer paso para identificar factores objetivos y cuantificables (ver Tabla 6) para explicar de una manera más concreta cuales son los factores identificativos de los estilos musicales Barroco, Clásico y Romántico.

El método presentado en este capítulo es capaz de pronosticar con unos índices promedio de éxito del 80% la pertenencia de una pieza musical a su estilo (Barroco, Clásico o Romántico) utilizando como valores indicadores el porcentaje de uso cada uno de los 144 intervalos melódicos posibles (intervalos melódicos entendidos en términos absolutos).

234 Consultar página 250 (capítulo Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados) para una explicación detallada.

235 Por ejemplo, la tonalidad relativa menor de la tonalidad Do Mayor es La menor y la tonalidad de la dominante de Do Mayor es Sol Mayor.

El método presentado en este capítulo cuantifica la distancia entre los grupos dando como resultado la distancia mayor entre los grupos de música barroca y música Romántica como es lógico por estar más distantes en el tiempo, sin embargo aporta una valoración numérica que demuestra que el estilo romántico es más distante al clasicismo que este segundo al estilo barroco.

El presente método permite que la selección de las piezas musicales de la muestra de referencia sea independiente de la tonalidad de la pieza, su compositor, su duración, su forma y estructura musical así como su orquestación, pero dependiente del modo de su tonalidad (Mayor o menor).

Sin embargo se ha demostrado que los movimientos de forma minuet/trio del período clásico presentan un mayor porcentaje de falsos negativos por ser piezas con dos partes cada una de ellas con una tonalidad diferente.

También se ha demostrado por medio del análisis de los falsos negativos que si bien la duración de la pieza no es un factor que impida la inclusión de las piezas en las muestras, sí que las piezas con una dimensión inferior a 1000 notas tienen una tasa de fracaso mayor.

Los compositores que presentan unos peores porcentajes de éxito comparado con los elegidos en la identificación de estilo son A.Vivaldi perteneciente al estilo barroco y R.Schumann perteneciente al Romanticismo.

Los probabilidades de éxito del método son mayores discriminando estilos con una mayor rigidez formal y compositiva como son el periodo Barroco y el periodo clásico.

Otra conclusión del estudio y en consonancia con los principios de la estadística es que cuanto mayor sea el número de piezas incluidas en la muestra de piezas discriminante mayor será la tasa de éxito del método.

El método presentado en este capítulo iguala los resultados obtenidos con otros métodos pero lo hace de una manera más homogénea ya que utiliza todos los porcentajes de uso de todos los intervalos melódicos posibles y basa el resultado en un único concepto, el recuento total de sus intervalos melódicos.

## **Capítulo 6. Un nuevo enfoque cuantitativo en la identificación del estilo compositivo de autores clásicos (F.J.Haydn, W.A.Mozart, D. Scarlatti, y L.v.Beethoven)**

Consultar:

Tudurí A., Serra B., Company J., "Un nuevo enfoque cuantitativo en la identificación del estilo compositivo de autores clásicos (F. J. Haydn, W. A. Mozart, D. Scarlatti Y L. V. Beethoven)", *Música Revista del Real Conservatorio Superior de Madrid*, 2011-2012, nº 18 y 19, ISSN 0541-4040

# Capítulo 7. Análisis comparativo de aplicación de métodos de minería de datos versus algoritmos evolutivos a la clasificación automática de piezas musicales de compositores clásicos.

## Introducción

De las diferentes investigaciones en clasificación automática de piezas musicales según su compositor realizadas hasta la fecha, este capítulo investiga en profundidad la realizada por Dor/Reich[2] basada en algoritmos de minería de datos y compara sus resultados con los obtenidos con el método MIAMP<sup>246</sup> basado en algoritmos evolutivos propuesto en esta investigación. Debido a que la definición del valor de éxito de ambos métodos no es comparable, se han repetido experimentos realizados por Dor/Reich para ser comparables con los resultados obtenidos con el método MIAMP. Dicha comparación da como resultado que el método MIAMP mejora la tasa de éxito cuando se comparan dos compositores muy próximos en estilo musical. Este hecho permite proponer el método MIAMP como un método válido para avalar o refutar la autoría de una obra de autenticidad dudosa cuantificando en cada caso la fiabilidad del mismo a partir de una base de datos de obras reconocidas de dos compositores candidatos a ser compositores de una obra dudosa.

Esta investigación (el diseño del método) fue enviada en forma de artículo a la revista *Computer Music Journal* en Diciembre de 2011. Dicha petición fue contestada por el equipo editorial que no podían publicarla ya que habían publicado la investigación de Dor/Reich un mes antes y que no podían publicar otro artículo de una temática similar en tan poco tiempo.

Este hecho reorientó la defensa del método presentado en esta investigación hacia un estudio comparativo del método presentado en esta tesis doctoral y el desarrollado por Dor/Reich. La sorpresa fue mayúscula cuando al repetir y analizar en detalle los experimentos realizados por Dor y Reich se descubrió las omisiones de información mostradas en este capítulo. Finalmente, se podría decir que el método MIAMP es superior al presentado por Dor y Reich en determinados escenarios muy comunes en la identificación de obras dudosas cuando uno de los dos compositores candidatos a la autoría no es excesivamente prolífico.

En la presente investigación, se ha diseñado un método para, a partir de los mismos datos (porcentajes de uso notas y de los intervalos melódicos) buscar un mecanismo matemático para diferenciar objetivamente el estilo musical de un compositor y utilizarlo como herramienta complementaria para avalar o refutar las teorías sobre quien es el compositor realmente de una obra cuando hay división de opiniones entre los especialistas en musicología. Dicho método pretende superar los porcentajes de éxito alcanzados con la investigación del “Capítulo 6. Un nuevo enfoque cuantitativo en la identificación del estilo compositivo de autores clásicos (F.J.Haydn, W.A.Mozart, D. Scarlatti, y L.v.Beethoven)” (página 109).

El método MIAMP ha sido utilizado para clasificar obras de diferentes compositores clásicos. Los resultados de la clasificación de los compositores en común utilizados en el método MIAMP y el trabajo de Dor/Reich se comparan en esta investigación analizando los escenarios en los cuales cada uno obtiene un mayor éxito.

---

246 MIAMP: *Method for identifying authorship of musical pieces.*

## Análisis en profundidad de la investigación de Dor/Reich

Debido a que los algoritmos de clasificación utilizados por Dor/Reich están implementados en la aplicación informática Weka 3.6[24] desarrollada en la Universidad de Waikato y que los valores de los indicadores es de los compositores y piezas analizadas en sus experimentos están accesibles por Internet, se han repetido algunos de los experimentos realizados con pequeñas modificaciones para analizar el resultado de dichas modificaciones en los porcentajes de éxito de los algoritmos de clasificación.

Los indicadores numéricos utilizados por Dor y Reich son los siguientes:

- Porcentajes de uso de notas (tónica, subdominante etc.)
- Porcentaje de aparición de notas en cada una de las 10 octavas posibles.
- Número de notas y rango máximo de notas usadas en términos absolutos.
- Trigramas de notas. Concretamente las 3 notas que más veces aparecen repetidas en la secuencia de cada una de las voces del material musical.

Se presenta en la Tabla 33 los resultados obtenidos por Dor/Reich tras la aplicación del método de minería de datos de clasificación SMO<sup>247</sup> comparando parejas de compositores.

Chopin	84,43								
Corelli	97,1	99,25							
Haydn	92,79	95,63	96,67						
Joplin	97,33	89,33	99,11	99,22					
Mozart	89,27	94,39	96,71	62,8	99,78				
Scarlatti	94,75	93,88	93,28	97,67	98,89	95,6			
Vivaldi	97,41	95,37	85,19	91,85	97,59	95,74	94,63		
Bach	96,35	96,95	97,29	98,54	95,89	97,07	96,12	94,07	
	Beethoven	Chopin	Corelli	Haydn	Joplin	Mozart	Scarlatti	Vivaldi	

Tabla 33: Porcentajes de éxito del método Dor/Reich clasificando por parejas de compositores (obras para teclado y grupos de cuerda).

Los porcentajes de éxito de cada pareja de compositores son el promedio de éxito de 10 experimentos en los cuales el número de piezas 'n' incluidas de cada compositor es el mínimo entre el número de piezas totales utilizadas de cada compositor. La Figura 42 muestra la expresión utilizada para calcular el porcentaje de éxito de cada experimento. Los 10 experimentos han incluido en la muestra aleatoriamente 'n' piezas del compositor con mayor número de piezas totales.

$$\text{Porcentaje de éxito}_{A,B} = \frac{N^{\circ} \text{ piezas correctamente clasificadas}_A + N^{\circ} \text{ piezas correctamente clasificadas}_B}{\text{Número total de piezas}_A + \text{Número total de piezas}_B}$$

Figura 42: Expresión del porcentaje de éxito.

247 Consultar la página 293 (capítulo “Anexo 2 – Conceptos TIC y matemáticos utilizados.”) para una explicación detallada.

De este modo se garantiza que el número de elementos de cada grupo de cada compositor es idéntico.

Dor/Reich no dan ninguna información de las formas musicales (sonata, sinfonía, etc.) y las instrumentaciones de cuerda (cuartetos, tríos, serenatas, sinfonías etc.) incluidas en las muestras de piezas.

Debido a que Dor/Reich no incluyen ninguna información relacionada con la forma musical de las piezas musicales incluidas en la muestra utilizada en sus experimentos, se contactó con ellos para solicitar dicha información y pedirles si podían dar los ficheros MIDI utilizados en sus experimentos.

Dor/Reich dieron los ficheros con los indicadores utilizados de manera extremadamente rápida y colaborativa y en lo que respecta a los ficheros MIDI dieron las direcciones de las cuales se podían conseguir dichos archivos facilitando el camino para recopilar la muestra de piezas musicales utilizadas en formato MIDI.

Las formas utilizadas por Dor/Reich en su muestra de experimentación están detalladas en la Tabla 34

Compositor	Nº. de piezas incluidas	Formas musicales incluidas (mayoritariamente)
J.S.Bach	246	Corales luteranas, Preludios (El Clave Bien Temperado) y conciertos de Brandeburgo
A.Corelli	245	Trío Sonatas (Op. 1,3-6)
F.J.Haydn	212	Cuartetos de cuerda
L.v.Beethoven	181	Cuartetos de cuerda y Sonatas para piano
F.Chopin	87	Mazurcas, Valses y Preludios
W.A.Mozart	82	Cuartetos de cuerda
D.Scarlatti	57	Sonatas para clave
S.Joplin	45	<i>Ragtimes</i>
A.Vivaldi	27	Conciertos

*Tabla 34: Formas musicales incluidas en la muestra de piezas musicales de Dor/Reich analizadas de cada compositor (orden: número de piezas).*

Los resultados presentados en la Tabla 33 son los correspondientes a los experimentos realizados que incluyen conjuntamente obras para teclado y para cuerda.

Los autores Dor y Reich reconocen que los compositores más difíciles de comparar serán aquellos muy próximos en estilo musical y época histórica, concretamente Mozart y Haydn, resultado también deducido en nuestro estudio y por otro lado, totalmente previsible.

Se debe tener en cuenta que los porcentajes de éxito presentados en la Tabla 33 consideran el total de obras correctamente clasificadas respecto el total de obras de la muestra de los dos compositores (ver Figura 42) y no documentan cual es el porcentaje mínimo de piezas clasificado respecto el nº de piezas sólo de un compositor concreto en alguno de los 10 experimentos. Ello permite obtener una valoración del error máximo (o del mínimo éxito) del método por compositor.

Utilizando los mismos datos que Dor/Reich se han repetido los mismos experimentos calculando el máximo porcentaje de piezas clasificadas incorrectamente (o mínimo número de piezas



clasificadas correctamente) de uno de los dos compositores respecto el número total de piezas analizadas de dicho compositor. La Figura 43 muestra la expresión de cálculo de mínimo éxito por compositor.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Peor porcentajes de éxito} \\ \text{por compositor} \end{array} \right\} = \text{mínimo} \left[ \frac{N^{\circ} \text{ piezas correct. clasif.}_A}{\text{Número total de piezas}_A}, \frac{N^{\circ} \text{ piezas correct. clasif.}_B}{\text{Número total de piezas}_B} \right]$$

Figura 43: Peores resultados en el cálculo del porcentaje de éxito por compositor.

La Tabla 35 muestra los peores resultados de dicha valoración en alguno de los 10 experimentos en las parejas de compositores analizados.

Haydn	88,95%	93,87%			
Mozart	81,71%		56,10%		
Scarlatti	87,93%		93,10%	93,10%	
Vivaldi			74,07%		
Bach	91,71%		97,17%	91,46%	84,48%
	Beethoven	Corelli	Haydn	Mozart	Scarlatti

Tabla 35: Peores resultados de éxito del método Dor/Reich en alguno de los 10 experimentos comparado con el total de obras de uno de los dos compositores utilizando sus datos.

Como puede observarse, los resultados de la Tabla 35 son peores que los de la Tabla 33 incluida en el artículo de Dor/Reich. Por ejemplo comparando Haydn y Vivaldi se obtenía un promedio de 91,85% de éxito, sin embargo el mínimo porcentaje éxito en alguno de los 10 experimentos al comparar sólo por compositores baja a 74,07%.

En los 10 experimentos realizados por Dor/Reich comparando Mozart y Haydn, a pesar de disponer de 212 piezas de Haydn, sólo incluyen 82 en cada experimento ya que estas son las que disponen de Mozart y los algoritmos de clasificación utilizadas Dor/Reich fallan si el número de piezas de cada compositor no es igual.

Para demostrar ello, a partir de los archivos Weka (ficheros en formato arff) se han fusionado los datos de cada pareja de compositores y se han eliminado los datos duplicados. De este modo, comparando Mozart y Haydn se ha procesado un archivo arff con 294 piezas musicales (82 de Mozart y 212 de Haydn).

En la Tabla 36 pueden observarse los resultados de éxito por compositor en cada pareja de compositores analizados partiendo de la muestra de datos de Dor/Reich pero incluyendo en la muestra de cada pareja de compositores todas las piezas musicales de dichos compositores.

Debe recordarse que en la investigación de Dor/Reich se incluye en la muestra de piezas 'n' piezas de cada compositor siendo 'n' el número mínimo de piezas de cada uno de los dos compositores comparados en el experimento.

Chopin (87)	32,18 / 97,23							
Corelli (245)	86,5 / 89,5	100 / 71,26						
Haydn (212)	94,5/ 88,4	100 / 59,79	98,11 / 99,13					
Joplin (45)	53,33 / 99,44	77,77 / 93,10	95,5 / 100	66,66 / 100				
Mozart (82)	81,78 / 92,8	95,12 / 88,50	85,36 / 100	10,98 / 94,23	98,78 / 88,88			
Scarlatti (58)	58,62 / 100	91,95/ 71,68	72,42 / 96,97	51,72 / 99,52	98,27 / 97,7	79,31 / 95,12		
Vivaldi (27)	62,96 / 100	51,85 / 100	48,15 / 98,91	37,03/ 100	100 / 100	40,74 / 100	62,96 / 100	
Bach (246)	95,52 / 91,09	98,37 / 81,6	93,49 / 98,36	95,08 / 98,58	97,2 / 95,56	97,47 / 97,57	98,25 / 100	99,59 / 29,63
	Beethoven (181)	Chopin	Corelli	Haydn	Joplin	Mozart	Scarlatti	Vivaldi

*Tabla 36: Porcentajes de éxito por compositor en cada pareja de compositores al procesar en cada muestra todas las piezas de cada compositor por medio del algoritmo SMO. Los valores de cada celda (F/C) están expresados en porcentaje el primer valor (F) es el porcentaje de éxito en la clasificación de las piezas del compositor de la fila y el segundo (C) es el porcentaje de éxito en la clasificación de las piezas del compositor de la columna.*

Es decir, tal como se muestra en la Tabla 36 (en celda sombreada), si se procesan todas las piezas utilizadas en el trabajo de Dor/Reich de Mozart y Haydn (82+212) fusionando los datos de los 10 experimentos que hicieron, en los cuales hay igual número de piezas de cada compositor (82+82), se obtiene que el 89,02% de las 82 piezas de Mozart se clasifican incorrectamente.

Algo similar ocurre al comparar Corelli (168 piezas) y Vivaldi (27 piezas). Al confeccionar un experimento con los datos de todas las piezas de cada compositor, al utilizar el mismo algoritmo SMO, se obtiene que un 51,85% de las piezas de Vivaldi se clasifican incorrectamente (en celda sombreada).

Sin embargo, debe decirse que hay parejas de compositores a las cuales se les ha aplicado este experimento (incluir todas las piezas de cada compositor en el experimento) y los resultados han sido incluso mejores que los presentados en el artículo de Dor/Reich. Por ejemplo comparando Bach y Scarlatti se ha conseguido un porcentaje de éxito del 98,6% mostrado en la Tabla 36 (Dor y Reich publicaron un resultado de éxito del 96% - Tabla 33).

Observe que comparando Beethoven y Haydn (al tener un número similar de piezas de cada uno), los porcentajes de fracaso por compositor (11,6%=100%-88,4% y 5,5%=100%-94,5%) son razonablemente bajos y muy próximos al porcentaje de error global (8,17%= 100%-91,83%).

Esto demuestra en general, ya que hay excepciones, la debilidad de este método para comparar compositores de los cuales no se tiene un número similar de piezas ya que los métodos de clasificación utilizados tienden a centrarse en maximizar el porcentaje de éxito del grupo mayoritario.

### **Conclusiones del estudio de la investigación de Dor/Reich**

Las conclusiones obtenidas de este estudio detallado son las siguientes:

Se ha demostrado que procesar todas las piezas de cada compositor genera pobres resultados de éxito en compositores con pocas piezas musicales.

El método de Dor/Reich evalúa el porcentaje de éxito total. Si se analizan los porcentajes de éxito por compositor, en muchos casos el peor resultado está lejos del valor de la media ponderada.

El método Dor/Reich obtiene bajos porcentajes de éxito de cada compositor por separado si el número de piezas de cada compositor difiere considerablemente ya que los algoritmos de minería de datos favorecen la clasificación del grupo mayoritario.

En otras palabras, el método de Dor/Reich funciona adecuadamente cuando el número de piezas de cada compositor analizado es similar.

La diversidad de las formas musicales incluidas en la muestra no es excesiva.

El método MIAMP presentado más adelante no tiene estas restricciones de aplicación.

### Objetivo de la investigación

El objetivo del trabajo presentado en esta investigación es, tomando como punto de partida la investigación de Dor/Reich, diseñar un método que permita clasificar con un mayor nivel de éxito que Dor/Reich obras musicales clásicas (entendidas como clásicas las compuestas entre el siglo XVII y XIX) de entre dos posibles compositores próximos en estilo a partir de elementos elementales tales como el número de intervalos utilizados de cada uno de los 144 existentes y el número de notas utilizadas de cada una de las 12 posibles.

El método numérico propuesto (MIAMP) obtiene la probabilidad de éxito a partir de un conjunto de obras reconocidas de cada compositor en formato MIDI con las que se crea una función de distancia euclidiana ponderada con la que se puede medir la distancia de la pieza dudosa a cada uno de los estilos compositivos de los dos compositores.

Dichos valores serán considerados en su cantidad porcentual respecto al total de intervalos y notas identificadas en cada pieza musical. De este modo se puede considerar en las muestras de piezas analizadas piezas de diferente duración, orquestación y magnitud.

## **Metodología**

Esta sección del capítulo define las herramientas utilizadas en el desarrollo de la investigación así como una explicación detallada de los conjuntos de piezas musicales utilizadas en las muestras.

### Procedimientos

El origen de los datos procesados por el método MIAMP como en las investigaciones anteriores es la aplicación informática AN\_MID v5.1; programa informático que extrae de cada pieza analizada (en formato MIDI) las frecuencias de aparición de cada nota y de cada intervalo melódico posible.

#### **Resultados de la aplicación AN\_MID v5.1**

En esta investigación los indicadores utilizados son los generados por la aplicación AN\_MIDv5.1 que ya fueron explicados en un capítulo anterior (consultar página 100).

### Descripción del método MIAMP

El método MIAMP se compone de 8 pasos a realizar (algunos opcionales), 4 condiciones a evaluar y 3 estados de finalización del método. La Figura 44 muestra el esquema de funcionamiento del método MIAMP y a continuación se detallarán todos los elementos del mismo.

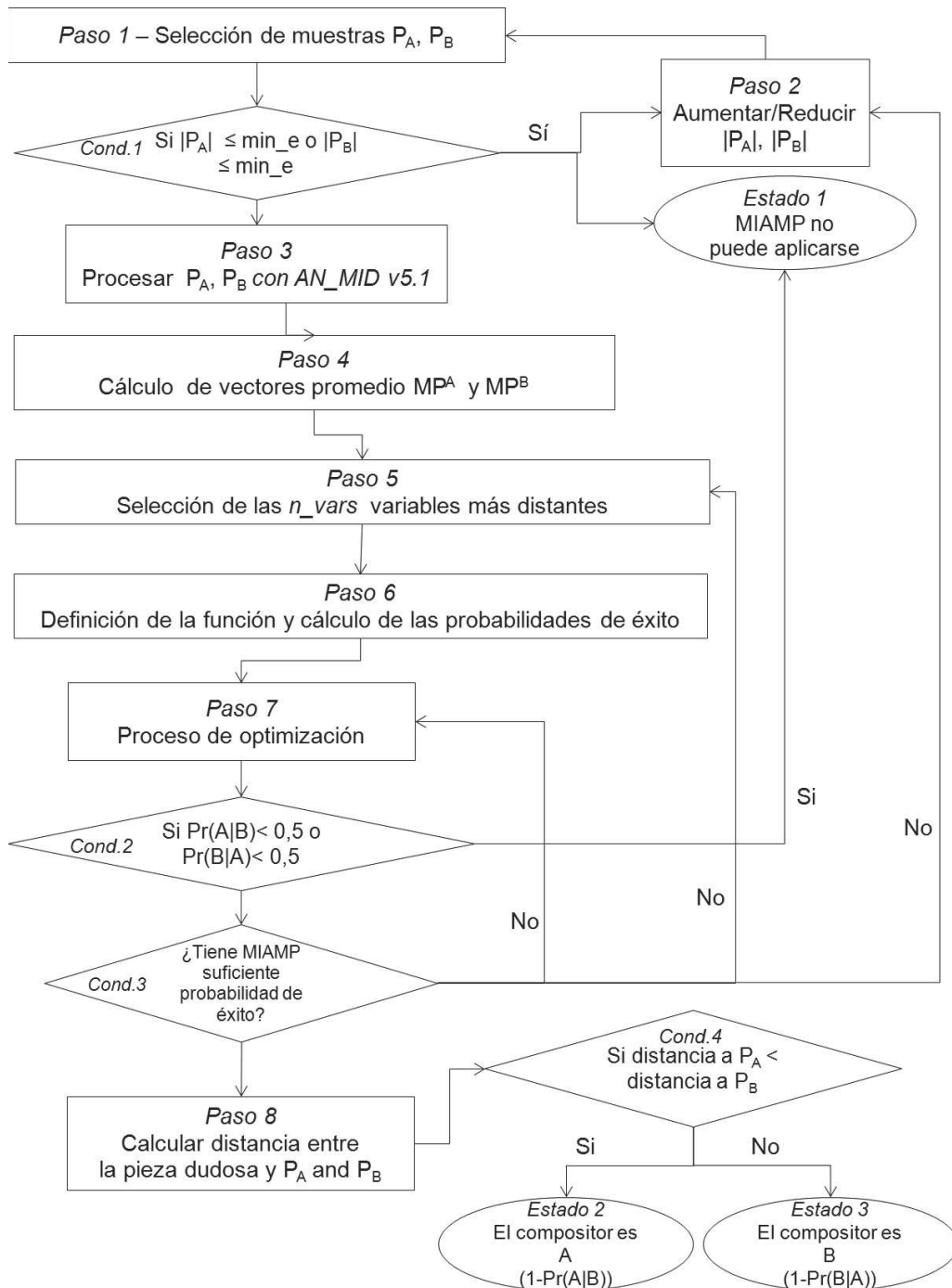


Figura 44: Esquema de funcionamiento del algoritmo del método propuesto MIAMP.

### Paso 1 – Selección de muestras $P_A$ , $P_B$

El objetivo final del método MIAMP es generar un valor de probabilidad de que la pieza dudosa “X” (que las opiniones de los especialistas en la materia están divididos entre dos posibles compositores A y B) sea del compositor A o B.

En primer lugar se debe disponer de dos colectivos de piezas de cada compositor A y B en formato MIDI. Las obras deben estar separadas en sus movimientos y pueden ser de diferente forma

musical, orquestación, tonalidad y duración, aunque en el caso de que se disponga de suficientes obras reconocidas de cada compositor de la misma forma musical que la que se desea evaluar es preferible utilizar como muestra para realizar una primera prueba las de la misma forma musical tal como se explicará en el apartado “Resultados” más adelante en la página 133.

Si se dispone de suficientes obras/movimientos (más de 50) de cada compositor A y B, será preferible descartar en un primer intento todas aquellas que contengan en su material musical menos de 1000 notas para garantizar unos porcentajes de éxito elevados.

Cuanto mayor sea el número de piezas incluidas en las poblaciones  $P_A$  y  $P_B$  mayor será la fiabilidad del método MIAMP.

Las piezas musicales incluidas en las muestras deben haber sido editadas con un editor de partituras para que cumplan las condiciones detalladas en la página 101.

**Condición 1 - Si  $|P_A| \leq \min\_e$  o  $|P_B| \leq \min\_e$ <sup>248</sup>**

Definimos “min\_e” cómo el mínimo número de piezas/movimientos que ha de tener cada una de las muestras de piezas reconocidas de cada compositor A y B.

En los resultados presentados más adelante se ha utilizado el valor  $\min\_e = 50$ .

Los criterios para decidir el valor “min\_e” estarán sujetos a los establecidos por la estadística y influirán inversamente en la fiabilidad del método MIAMP.

En el caso de que existan más piezas de los compositores A o B en formato MIDI se continuará con el Paso 2 y en caso de que no existan se pasará al estado 1.

**Paso 2 – Aumentar/Reducir  $|P_A|$ ,  $|P_B|$**

Se accede a este paso desde la condición *Cond.1* cuando se decide incrementar el número de piezas de la muestra para aumentar su fiabilidad o bien desde la *Cond.3* cuando se decide reducir el número de piezas de la muestra reduciéndolas a las que cumplen la condición de ser de la misma forma musical o orquestación debido a que una muestra mayor obtiene malos índices de éxito en la *Cond.3*.

En este paso se añaden o eliminan piezas musicales a las muestras de piezas reconocidas de los compositores A y B, con ello se incrementará o reducirá el cardinal de las muestras  $P_A$  y  $P_B$ .

**Paso 3 – Procesar  $P_A$ ,  $P_B$  con la aplicación AN\_MID v5.1**

Se ejecuta el programa AN\_MID v5.1 a la pieza musical evaluada “X” y a todas las piezas de las muestras  $P_A$  y  $P_B$  y se obtiene de cada una de ellas el porcentaje de uso de cada una de las 12 notas del sistema tonal y el porcentaje de uso de cada uno de los 144 intervalos melódicos combinando las 12 notas del sistema tonal por parejas.

La Figura 45 muestra los resultados obtenidos expresados matemáticamente.

---

248  $|P_A|$  es el número de piezas musicales incluidas en la muestra  $P_A$  (cardinal de  $P_A$ ).

$$MP_i^A = (NP_{i,1}^A \dots NP_{i,12}^A, IP_{i,1,1}^A \dots IP_{i,12,12}^A) \quad \forall i / 1 \leq i \leq n_A$$

$$MP_i^B = (NP_{i,1}^B \dots NP_{i,12}^B, IP_{i,1,1}^B \dots IP_{i,12,12}^B) \quad \forall i / 1 \leq i \leq n_B$$

$$MP_i^X = (NP_{i,1}^X \dots NP_{i,12}^X, IP_{i,1,1}^X \dots IP_{i,12,12}^X) \quad X \text{ evaluated piece.}$$

Figura 45: Datos obtenidos tras la ejecución de la aplicación AN\_MID v5.1 de cada pieza musical de los compositores A y B y también de la pieza evaluada "X".

En el Paso 4, cada uno de estos valores obtenido de las piezas de cada muestra de cada compositor será considerado como una variable aleatoria.

#### Paso 4 Cálculo de vectores promedio $\overline{MP}^A$ y $\overline{MP}^B$

Se calcula para cada compositor A y B los 166 promedios de las variables aleatorias obtenidas en el Paso 3 tal como muestra la Figura 46.

$$\begin{aligned} \overline{MP}^A &= (\overline{NP}_1^A, \dots, \overline{NP}_{12}^A, \overline{IP}_{1,1}^A, \dots, \overline{IP}_{12,12}^A) & / & \quad \overline{NP}_i^A = \frac{\sum_{j=1}^{n_A} NP_{j,i}^A}{n_A} & \quad \overline{IP}_{i,j}^A = \frac{\sum_{k=1}^{n_A} IP_{k,j,i}^A}{n_A} \\ \overline{MP}^B &= (\overline{NP}_1^B, \dots, \overline{NP}_{12}^B, \overline{IP}_{1,1}^B, \dots, \overline{IP}_{12,12}^B) & / & \quad \overline{NP}_i^B = \frac{\sum_{j=1}^{n_B} NP_{j,i}^B}{n_B} & \quad \overline{IP}_{i,j}^B = \frac{\sum_{k=1}^{n_B} IP_{k,j,i}^B}{n_B} \end{aligned}$$

Figura 46: Cálculo del vector MP a partir de los datos del Paso 3.

Con el objetivo de simplificar la terminología utilizada, de ahora en adelante sustuiremos los nombres de las variables "NP" e "IP" por la terminología "V" tal como se expresa en la Figura 47.

$$MP_i^A = (NP_{i,1}^A \dots NP_{i,12}^A, IP_{i,1,1}^A \dots IP_{i,12,12}^A) = (V_{i,1}^A \dots V_{i,166}^A) \quad \forall i / 1 \leq i \leq n_A$$

$$MP_i^B = (NP_{i,1}^B \dots NP_{i,12}^B, IP_{i,1,1}^B \dots IP_{i,12,12}^B) = (V_{i,1}^B \dots V_{i,166}^B) \quad \forall i / 1 \leq i \leq n_B$$

$$MP_i^X = (NP_{i,1}^X \dots NP_{i,12}^X, IP_{i,1,1}^X \dots IP_{i,12,12}^X) = (V_{i,1}^X \dots V_{i,166}^X) \quad X \text{ pieza evaluada}$$

$$\overline{MP}^A = (\overline{NP}_1^A, \dots, \overline{NP}_{12}^A, \overline{IP}_{1,1}^A, \dots, \overline{IP}_{12,12}^A) = (\overline{V}_1^A \dots \overline{V}_{166}^A)$$

$$\overline{MP}^B = (\overline{NP}_1^B, \dots, \overline{NP}_{12}^B, \overline{IP}_{1,1}^B, \dots, \overline{IP}_{12,12}^B) = (\overline{V}_1^B \dots \overline{V}_{166}^B)$$

Figura 47: Conversión de las variables aleatorias por nombres "V" de ahora en adelante.

#### Paso 5 - Selección de las "n\_vars" variables más distantes

En este paso, se debe decidir el número de variables n\_vars de tipo "V" que se van a utilizar para confeccionar la función de distancia euclidiana ponderada.

Cuanto más próximos sean los compositores en estilo mayor será el número de variables “V” a incluir en la función de distancia. Sin embargo, los resultados experimentales indican que más allá de utilizar 35 variables los resultados en la tasa de éxito no cambian considerablemente.

En los resultados presentados en el apartado “Resultados” (página 133) se han utilizado 34 variables como se explicará con más detalle más adelante.

Se calcula el vector de valores  $Vdif_{A,B}$  que se utilizará para saber las variables más distantes en promedio tal como se muestra en la Figura 48. En ella se expresan los valores  $\overline{vdif}_{i,A,B}$  que es la distancia entre los promedios de las variables aleatorias  $V_i^A$  y  $V_i^B$ .

$$Vdif_{A,B} = (\overline{V}_1^A - \overline{V}_1^B, \dots, \overline{V}_{166}^A - \overline{V}_{166}^B) = (\overline{vdif}_{1,A,B}, \dots, \overline{vdif}_{166,A,B})$$

Figura 48: Definición del vector  $Vdif_{A,B}$

El proceso de decisión de qué variables se utilizan se basa en la ordenación de las variables en función de la distancia entre los promedios de las variables aleatorias de los dos compositores A y B tal como está expresado en la Figura 49.

$$\text{Indexes of Random Variables Selected} = IRVS = \{a_1, \dots, a_{n\_vars}\} \quad /$$

$$\overline{vdif}_{a_i, A, B} > \overline{vdif}_{a_{i+1}, A, B} \quad \forall i \mid 1 \leq i \leq n\_vars - 1$$

Figura 49: Definición de IRVS que define las variables aleatorias que serán utilizadas en la función de distancia.

### Paso 6 - Definición de la función y cálculo de la probabilidad de éxito

Una vez identificadas las variables aleatorias más distantes, se construye la función de distancia de la pieza musical dudosa a evaluar “X” con respecto a los compositores A y B con los valores promedio de las variables aleatorias seleccionadas tal como muestra la Figura 50.

$$D_{x, A, AB} = \sum_{i=1}^{n\_vars} C_i \cdot [V_{a_i,1}^x - \overline{V}_{a_i}^A]^{\exp_i}$$

$$D_{x, B, AB} = \sum_{i=1}^{n\_vars} C_i \cdot [V_{a_i,1}^x - \overline{V}_{a_i}^B]^{\exp_i}$$

Figura 50: Definición de la expresión de distancia entre una pieza “x” y los compositores A y B propuesta en el método MIAMP.

Los valores  $C_i$  y  $\exp_i$  son valores que aplicarán peso a cada uno de los sumandos de la expresión de la Figura 50 y serán calculados en el Paso 7.

En un primer paso se utilizarán todos los valores inicializados a 1 tal como muestra la Figura 51 ya que el Paso 7 los optimizará.

$$C_j = 1 \quad / \quad \exp_j = 1 \quad \forall j \mid 1 \leq j \leq n\_vars$$

Figura 51: Conjunto de valores iniciales para evaluar el método MIAMP.

A continuación se calcula para cada pieza musical  $p_{i,A}$  y  $p_{i,B}$  de cada muestra de piezas de cada compositor A y B su distancia a la población de piezas ( $P_A$  y  $P_B$ ) utilizando la definición de distancia de la Figura 50. Con ello calcularemos dos probabilidades de falsos positivos es decir, calcularemos la probabilidad de que una pieza del compositor A esté más próxima en base a esta definición de distancia al compositor B y la probabilidad de que una pieza del compositor B esté más próxima al compositor A tal como muestra la Figura 52.

$$\text{Subconjunto de éxito}_{P_A} = \{ p_{i,A} \mid D_{p_{i,A}, A, AB} < D_{p_{i,A}, B, AB} \} \quad \forall p_{i,A} \in P_A$$

$$\text{Subconjunto de éxito}_{P_B} = \{ p_{i,B} \mid D_{p_{i,B}, B, AB} < D_{p_{i,B}, A, AB} \} \quad \forall p_{i,B} \in P_B$$

$$Pr(B|A) = 1 - \frac{|\text{Subconjunto de éxito}_{P_A}|}{n_A}, \quad Pr(A|A) = 1 - Pr(B|A)$$

$$Pr(A|B) = 1 - \frac{|\text{Subconjunto de éxito}_{P_B}|}{n_B}, \quad Pr(B|B) = 1 - Pr(A|B)$$

Figura 52: Expresiones de la probabilidad condicionada de que una pieza compuesta por el compositor A sea identificada por el método como compuesta por B y viceversa.

En la Figura 52 está expresado el Subconjunto de éxito de una muestra  $P_A$  de piezas reconocidas del compositor A como el subconjunto de piezas de dicha muestra  $P_A$  que utilizando la función de distancia definida en la Figura 50, están más próximas al compositor A. También están definidas las expresiones de la probabilidad condicionada<sup>249</sup> de que una pieza sea identificada del compositor B cuando está compuesta por el compositor A como  $Pr(B|A)$  y viceversa. La probabilidad condicionada  $Pr(A|A)$  de que una pieza sea identificada como compuesta por A siendo así, será el cociente entre el número de piezas incluidas en el Subconjunto de éxito del compositor dividido por el número de piezas incluidas en la muestra  $P_A$  ( $n_A$ ).

### Paso 7 – Proceso de Optimización

Una vez han sido calculados en el Paso 6 los valores  $Pr(A|B)$  y  $Pr(B|A)$  (ver Figura 52), se inicia el proceso de optimización en el cual se busca por medio de un algoritmo evolutivo<sup>250</sup> los valores  $C_i$  y  $exp_i$  que maximizan o minimicen (dependiendo de la función utilizada) dichos valores de probabilidad.

La función a optimizar es una de las cuatro expresadas en la Figura 53 en cada una de sus dos equivalencias. La opción 1 y 3 son equivalentes entre sí y la Opción 2 y 4 también son equivalentes entre sí.

Debido a que dichas funciones no son derivables<sup>251</sup>, el algoritmo de optimización propuesto es un algoritmo evolutivo inspirado en el proceso de evolución natural de la vida. Las soluciones halladas por dicho algoritmo serán consideradas válidas si satisfacen una serie de restricciones sin embargo no se garantiza que dichas soluciones sean las óptimas ya que el número de soluciones posibles es del orden de  $700^{35} * 20^{35}$  cantidad de soluciones incalculable en un tiempo de cálculo razonable.

249 Consultar la página 362 (capítulo “Anexo 5 – Conceptos estadísticos utilizados.”) para una explicación detallada.

250 Consultar la página 265 (capítulo “Anexo 2 – Conceptos TIC y matemáticos utilizados.”) para una explicación detallada.

251 Consultar la página 356 (capítulo “Anexo 5 – Conceptos estadísticos utilizados.”) para una explicación detallada.



Opción 1 : Función a minimizar  $_{min}(A, B) = \text{MIN}(Pr(B|A), Pr(A|B))$

Opción 2 : Función a minimizar  $_{promedio}(A, B) = \frac{Pr(A|B) + Pr(B|A)}{2}$

Opción 3 : Función a maximizar  $_{max}(A, B) = \text{MAX}(Pr(A|A), Pr(B|B))$

Opción 4 : Función a maximizar  $_{promedio}(A, B) = \frac{Pr(A|A) + Pr(B|B)}{2}$

Figura 53: Definición de las funciones que deben optimizarse. Las opciones 1 y 3 son equivalentes y la 2 y 4 también.

La decisión de qué opción (1 o 2) es la mejor no se puede definir *a priori*. Se deberá experimentar con el método para cada caso. El problema de las opciones 2 y 4 es que el promedio de éxito puede ser elevado (por ejemplo del 80%) pero ambos valores ( $Pr(A|B)$  y  $Pr(B|A)$ ) ser muy dispares (por ejemplo 99% y 61%) en cuyo caso no podríamos que la solución hallada sea muy fiable en la probabilidad de predicción correcta en uno de los compositores analizados.

Utilizando la función de las opciones 1 o 3 se garantiza que la función a minimizar permite identificar los valores  $C_i$  y  $exp_i$  que nos dan la mínima probabilidad de que una pieza del compositor A sea identificada como compuesta por el compositor B a partir de las muestras  $P_A$  y  $P_B$  de obras reconocidas de los compositores A y B respectivamente.

**Condición 2 - Si  $Pr(A|B) < 0,5$  o  $Pr(B|A) < 0,5$**

Una vez realizado el Paso 7 se debe comprobar si los valores  $Pr(A|B)$  y  $Pr(B|A)$  son mayores de 0,5.

Se considerará que el proceso de optimización ha sido un éxito si se cumplen las condiciones de la Figura 54.

$$Pr(B|A) \approx 0 \text{ y } Pr(A|B) \approx 0$$

$$\text{O}$$

$$Pr(A|A) \approx 1 \text{ y } Pr(B|B) \approx 1$$

Figura 54: Resultados ideales tras el proceso de optimización (Paso 7).

Pero en el caso de que alguno de ellos sea inferior a 0,5 (50%) implicará que el método MIAMP no es fiable ya que es más probable ( $Pr(B|A) < 0,5$ ) que una pieza del compositor A sea identificada por el método MIAMP como compuesta por el compositor B.

En dicho caso el método MIAMP no se puede aplicar y el algoritmo de la Figura 44 finaliza en el Estado 3.

Cuanto mayor sean los valores de probabilidad condicionada obtenidos por el proceso de optimización mayor será la fiabilidad del método MIAMP.

**Condición 3 – ¿Tiene el método MIAMP suficiente probabilidad de éxito?**

Siendo realistas será difícil conseguir que el proceso de optimización obtenga los resultados de la Figura 54.

Pero en cualquier caso, si los valores de probabilidad condicionada ((Pr(A|B) y Pr(B|A)) no son lo suficientemente pequeños (o los valores (Pr(A|A) y Pr(B|B) no son lo suficientemente grandes) podemos realizar las siguientes acciones:

- Repetir el Paso 7: Ejecutar de nuevo el proceso de optimización cambiando las restricciones, condiciones y/o los valores posibles del dominio de valores para intentar conseguir una solución mejor.
- Repetir el Paso 5: Cambiar el número de variables implicadas en la función de distancia de la Figura 50 o lo que es lo mismo aumentar o reducir el valor de “n\_vars”. Quizás algunas variables crean un efecto de distorsión en la función de distancia y eliminarlas de la misma puede mejorar los resultados obtenidos.
- Volver al Paso 2: Intentar cambiar la muestra de piezas incrementando o reduciendo su número. *A priori* no se puede saber cómo afectarán los cambios en las poblaciones  $P_A$  y  $P_B$

La decisión de qué alternativa escoger deberá ser tomada por el investigador en base principalmente al contexto compositivo de cada autor, las características de su catálogo musical y a las piezas incluidas en cada muestra  $P_A$  y  $P_B$ .

Tal como se verá en el apartado “Resultados“ (página 133) y siempre que sea posible, una recomendación sería incluir en las muestras de obras  $P_A$  y  $P_B$  sólo obras de la misma forma musical o de la misma orquestación.

#### **Paso 8 - Calcular la distancia entre la pieza dudosa X y $P_A$ y $P_B$**

Una vez los valores  $C_i$  y  $exp_i$  de la Figura 50 y el valor “n\_var” han sido aceptados por generar unos valores suficientemente bajos de probabilidad condicionada (Pr(A|B) y Pr(B|A)) a partir de las piezas musicales incluidas definitivamente en las muestras  $P_A$  y  $P_B$ , calcularemos la distancia de la pieza X a los compositores A y B mediante la expresión de la Figura 50.

#### **Condición 4 - Si la distancia de X a $P_A$ < la distancia de X a $P_B$**

Si el valor de distancia de la pieza X al compositor A (calculada en el Paso 8) es menor que la distancia de la pieza X al compositor B, concluiremos que aplicando el método MIAMP, la pieza X fue compuesta por el compositor A con una probabilidad igual a  $1-Pr(A|B)$  y viceversa tal como aparece expresado en la Figura 55 en un lenguaje estructurado similar al utilizado en un lenguaje de programación.

Si ( $D_{x,A,AB} < D_{x,B,AB}$ ) Entonces

La pieza musica X fue compuesta por A con una probabilidad igual a  $1-Pr(A|B)$ .

Sino

Si ( $D_{x,A,AB} > D_{x,B,AB}$ ) Entonces

La pieza musica X fue compuesta por B con una probabilidad igual a  $1-Pr(B|A)$ .

Sino

El método no obtiene información debido a que la distancia a A es igual a la distancia a B.

FinSi

FinSi

Figura 55: Esquema de decisión tras el cálculo de distancias de la pieza dudosa “x” a los compositores A y B.

La probabilidad de que los dos valores de distancia  $D_{x,A,AB}$  y  $D_{x,B,AB}$  sean iguales en alguna pieza musical es prácticamente cero porque la aplicación AN\_MIDv5.1 devuelve valores numéricos con 7

cifras decimales. De hecho en ninguna de las piezas analizadas en las muestras de ningún compositor de los procesados en el apartado “Resultados” (página 133) se ha producido este caso.

### **Estado 2 – El compositor de “x” es A con una probabilidad igual a $(1-Pr(A|B))$**

El método MIAMP alcanzará este estado cuando  $D_{x,A,AB} < D_{x,B,AB}$  y por tanto se concluye que la pieza “X” la ha compuesto el compositor A con una probabilidad igual a  $1-Pr(A|B)$ .

### **Estado 3 - El compositor de “x” es B con una probabilidad igual a $(1-Pr(B|A))$**

El método MIAMP alcanzará este estado cuando  $D_{x,A,AB} > D_{x,B,AB}$  y por tanto se concluye que la pieza “X” la ha compuesto el compositor B con una probabilidad igual a  $1-Pr(B|A)$ .

Se ha omitido en el algoritmo de la Figura 44 incluir un estado para el caso en que  $D_{x,A,AB} = D_{x,B,AB}$  par simplificarlo ya que como se ha comentado, no se ha detectado ninguna obra de las muestras  $P_A$  y  $P_B$  en la cual que haya obtenido un mismo valor para ambos compositores A y B.

## **Resultados**

### Aplicación del método MIAMP a la muestra de piezas musicales de Dor/Reich

Para poder comparar objetivamente el método MIAMP con el método de Dor/Reich (y así lo propusieron los revisores de la revista *Musica Scientiae* en Octubre de 2012) se ha aplicado el método MIAMP a las mismas piezas musicales utilizados por Dor/Reich pero a partir de su formato MIDI (obteniendo los indicadores de porcentaje de uso de notas y de intervalos melódicos posibles) y después se ha aplicado el método MIAMP (desde su paso 4) a los mismos datos utilizados por Dor/Reich (utilizando sus mismos indicadores definidos en la página 121).

### **Resultados de aplicación del método MIAMP a las piezas musicales utilizadas en la investigación de Dor/Reich**

Se contactó con los Sres. Dor y Reich para pedirles los ficheros MIDI utilizados en su investigación a lo que contestaron que ellos no habían utilizado los ficheros MIDI sino que ya unos ficheros de indicadores previos. Sin embargo, ayudaron en todo lo que se les pidió para poder descargar y clasificar las piezas musicales utilizadas en us estudio pero en formato MIDI.

Dichas piezas fueron todas descargadas de la página de la Universidad de Standford en la dirección <http://kern.ccarh.org/>.

La Tabla 37 muestra los porcentajes de éxito por compositor de la aplicación del método MIAMP a las piezas musicales utilizadas en la investigación de Dor/Reich

Las celdas sombreadas (Tabla 37) muestran las parejas de compositores en las cuales el método MIAMP obtiene unos porcentajes de éxito por cada compositor más homogéneos que los alcanzados por Dor/Reich (Tabla 36 en la página 124).

El método MIAMP ha sido considerado mejor si al comparar dos conjuntos de piezas de dos compositores, el mínimo porcentaje de éxito de uno de los dos compositores es mayor que el mínimo conseguido utilizado el método de Dor/Reich sobre el mismo conjunto de piezas de los dos compositores.

Chopin (87)	81,71 / 80,87							
Corelli (245)	94,65 / 91,80	91,77 / 91,46						
Haydn (212)	70,33 / 69,95	82,30 / 82,93	95,06 / 95,06					
Joplin (45)	90,70 / 90,71	95,35 / 96,34	100 / 98,77	97,67 / 97,61				
Mozart (82)	76,54 / 77,05	87,65 / 87,80	93,83 / 90,95	72,84 / 72,73	100 / 100			
Scarlatti (58)	93,10 / 92,90	91,38 / 91,46	91,38 / 90,95	93,10 / 92,82	100 / 100	87,93 / 87,65		
Vivaldi (27)	90,00 / 84,70	90,32 / 84,15	93,55 / 93,42	83,87 / 84,21	93,55 / 95,35	87,10 / 85,19	87,1 / 87,93	
Bach (246)	87,92 / 88,52	92,92 / 93,10	90,00 / 91,36	88,62 / 88,52	97,92 / 97,67	91,67 / 91,36	86,21 / 86,25	93,33 / 93,55
	Beethoven (181)	Chopin	Corelli	Haydn	Joplin	Mozart	Scarlatti	Vivaldi

*Tabla 37: Porcentajes de éxito por compositor en cada pareja de compositores al procesar en cada muestra todas las piezas utilizadas por Dor/Reich de cada compositor por medio del algoritmo MIAMP. Los valores de cada celda (F/C) están expresados en porcentaje el primer valor (F) es el porcentaje de éxito en la clasificación de las piezas del compositor de la fila y el segundo (C) es el porcentaje de éxito en la clasificación de las piezas del compositor de la columna.*

### **Resultados de aplicación del método MIAMP a los indicadores numéricos de la mismas piezas musicales utilizadas en la investigación de Dor/Reich**

En este apartado se ha aplicado el método MIAMP desde su Paso 4 a los indicadores numéricos (ver página 121) de las mismas piezas de la muestra utilizada por Dor/Reich

La Tabla 38 resume los resultados del experimento explicado anteriormente. Las celdas sombreadas indican las parejas de compositores en las cuales el porcentaje de éxito total es mejor que el conseguido por Dor/Reich en dichos compositores.

En cada celda de la Tabla 38 aparece únicamente un valor para poder comparar los resultados de dicha tabla con la Tabla 33. En este caso, el porcentaje de éxito total de cada par de compositores es la media ponderada de los porcentajes de éxito de cada compositor (tal como calculan Dor/Reich dicho porcentaje de éxito total).

Chopin	86,39%							
Corelli	98,59%	96,38						
Haydn	94,49%	93,30%	96,49%					
Joplin	91,30%	91,68%	100,00%	100,00%				
Mozart	91,67%	94,71%	96,93%	72,45%	100,00%			
Scarlatti	98,34%	95,17%	95,03%	97,78%	96,12%	99,29%		
Vivaldi	97,86%	98,25%	89,30%	93,31%	100,00%	96,32%	96,47%	
Bach	96,43%	93,99%	95,71%	95,16%	97,26%	94,82%	96,38%	94,14%
	Beethoven	Chopin	Corelli	Haydn	Joplin	Mozart	Scarlatti	Vivaldi

Tabla 38: Porcentajes de éxito del método MIAMP clasificando parejas de compositores utilizando los indicadores usados por Dor/Reich.

### Compositores y grupos de piezas estudiadas con mayor diversidad de forma

Para probar la hipótesis, se han seleccionado los colectivos de la Tabla 39. Estos archivos MIDI han sido descargados de *Classical Archives* [86]. Dichos colectivos presentan un mayor nivel de diversidad en las formas musicales de las piezas incluidas en la muestra.

Cada una de las 1410 piezas analizadas ha sido editada individualmente con un editor musical *Finale* para garantizar que el material musical estaba almacenado correctamente; realizando en el caso de que fuera necesario las mismas operaciones enumeradas en la página 101 (“Capítulo 5. Clasificación de estilos musicales clásicos por medio de análisis discriminante”).

Periodo compositivo/ Compositor/ número de intervalos analizados	Forma musical	Nº. de movimientos analizados.
Periodo Barroco (797.348 intervalos analizados)		574 piezas
D. Scarlatti (1685-1757)	Sonatas para clave	409
J.S.Bach (1685-1750)	Diversas piezas (suites, conciertos, piezas para clave etc.).	131
G.F.Händel (1685-1759)	Diversas piezas (suites, conciertos, piezas para clave etc.).	34
Periodo Clásico (1.934.714 intervalos analizados)		700 piezas
F.J. Haydn (1732-1809)	Todas las sonatas para clave (Hob XVI).	139
	Sinfonías (Hob I/60 - 104) <sup>252</sup>	153
	Cuartetos (Hob III Op.1, 2, 3, 20, 33, 42, 50, 52, 54, 64, 74, 76 y 77)	192
W.A.Mozart (1756-1791)	Todas las sonatas para piano(forte)	48
	Sinfonías (k.128/ n°16 - k.551/n°41) <sup>253</sup>	93
	Todos los cuartetos (23)	75
Periodo Romántico(729.938 intervalos analizados))		136 piezas
L.v.Beethoven (1770-1827)	32 Sonatas para piano	100
	9 Sinfonías	36

Tabla 39: Listado de piezas y compositores utilizados en esta investigación.

## Resultados obtenidos por el método MIAMP

### **Aplicando el método MIAMP propuesto en esta investigación**

En la Tabla 40 se presentan los resultados de aplicación del método MIAMP a los compositores de la Tabla 39.

Es importante destacar que en las muestras de los compositores analizados hay incluidas obras de diferente forma musical, orquestación y duración.

Se han realizado 14 configuraciones del método MIAMP para cada pareja de compositores obteniendo de cada una de esas parejas de compositores las probabilidades condicionadas de la Tabla 40.

Para la búsqueda de los coeficientes que minimizan el porcentaje de error condicionado, (Paso 7), y al tratarse de una función no derivable, se ha aplicado el algoritmo evolutivo de la aplicación *Microsoft Excel 2010*.

El proceso de optimización ha finalizado tras un tiempo máximo de análisis de posibles soluciones sin hallar una solución mejor de 15.000 s (4 horas y 9 minutos aproximadamente) establecido antes de iniciar el proceso de optimización. Ello no asegura que la solución hallada sea la mejor solución, pero es una solución que da al método MIAMP una fiabilidad suficiente.

En el caso de la pareja de compositores Haydn/Mozart se ha realizado un proceso de optimización con un tiempo máximo sin hallar una solución mejor de 40.000 s (11 horas y 7 minutos aproximadamente) para mejorar los porcentajes de éxito consiguiendo mejorar la solución

252 No se incluye en la muestra las sinfonías n° 74,75,77-81 porque no ha sido localizada ninguna fuente MIDI.

253 No ha sido considerada la sinfonía 37 porque en la actualidad es atribuida a *Michael Haydn*.

en un 1%. Ello demuestra que utilizando el algoritmo evolutivo se reduce drásticamente las probabilidades de mejora de la solución hallada en función del tiempo de cálculo.

Para entender correctamente la Tabla 40, los valores de la celda sombreada en gris identifica que aplicando el método MIAMP para clasificar piezas entre G.F.Händel y J.S.Bach, la probabilidad de que una pieza de Händel sea clasificada correctamente es del 85,37% y de que una pieza de Bach sea clasificada correctamente es del 85,61%, o lo que es lo mismo, decir que la probabilidad de que una pieza de Händel sea clasificada incorrectamente es del 14,39% y de que una pieza de Bach sea clasificada incorrectamente es del 14,63%.

G.F.Händel	85,37% 85,61%				
D.Scarlatti	93,40% 93,18%	83,37% 82,93%			
F.J.Haydn	97,05% 93,18%	89,54% 90,24%	88,74% 95,05%		
W.A.Mozart	92,57% 92,42%	89,14% 87,80%	81,14% 80,44%	69,14% 69,17%	
L.v.Beethoven	85,59% 96,21%	100% 100%	87,5% 86,55%	77,21% 76,92%	81,62% 81,14%
	J.s.Bach	G.F.Händel	D.Scarlatti	F.J.Haydn	W.A.Mozart

Tabla 40: Porcentajes de éxito aplicando el método MIAMP propuesto por parejas de compositores.

En todos los experimentos se ha utilizado un número de variables (las más distantes en promedio) igual 34.

En cualquier caso, donde se mejoran las probabilidades condicionadas de comparación de la obra de Haydn y Mozart es cuando se parametriza el método MIAMP para comparar las obras de estos dos compositores separadas según su forma es decir, separando cuartetos de cuerda, sonatas para teclado y sinfonías. La Tabla 41 muestra los porcentajes de éxito del método MIAMP clasificando obras de Haydn y Mozart en cada una de sus formas musicales.

	F.J.Haydn	W.A.Mozart
Sinfonías	86,09%	86,96%
Cuartetos de Cuerda	84,62%	85,45%
Sonatas para Piano / clave	88,65%	88,00%

Tabla 41: Porcentajes de éxito obtenidos aplicando el método MIAMP a las piezas musicales analizadas de Haydn y Mozart separadas por forma musical.

## Discusión del método MIAMP

Se explicará en primer lugar la decisión de qué valor se asigna a  $n\_vars$ , es decir, ¿cuántas variables aleatorias se deben incluir en la función de distancia propuesta en el método MIAMP?

La decisión ha sido tomada en base a los tres criterios siguientes:

- Cuanto mayor sea el valor de  $n\_vars$ , mayor fiabilidad tendrá el método MIAMP por considerar más elementos aleatorios (porcentaje de notas o porcentaje de uso de intervalos melódicos).
- En los resultados experimentales obtenidos, se ha podido observar que en valores de  $n\_vars$  cercanos a 30 las probabilidades condicionadas  $Pr(B|A)$  y  $Pr(A|B)$  ya no disminuían más (incluso en determinados casos aumentaban).
- El tiempo de cálculo del proceso de optimización se incrementa considerablemente en función de  $n\_vars$  y del número de piezas incluidas en  $P_A$  y  $P_B$ .

Por todo ello, se debe hallar un compromiso entre estos 3 factores para conseguir unos índices de éxito aceptables en un tiempo de cálculo razonable.

El método MIAMP no tiene en cuenta en los intervalos analizados si son ascendentes o descendentes<sup>254</sup> por los dos motivos siguientes:

- Para mantener la simplicidad al máximo del método MIAMP y trabajar con el mínimo número de variables aleatorias.
- Debido a que en el proceso de reconocimiento natural por parte de un oyente de una melodía conocida poco influye si alguno de los intervalos está invertido<sup>255</sup> en su dirección (por ejemplo el intervalo C3-F3 tiene dos inversiones C4-F3 o C3-F2) siempre que las notas y la secuencia de las mismas sea la misma que la melodía original.

Tras haber observado con detenimiento las variables que han sido utilizadas en cada pareja de compositores, se puede concluir que sí que se observan ciertos patrones de variables relevantes entre parejas de compositores de los mismos estilos musicales comparados, pero el análisis en profundidad de dichas relaciones escapa a los objetivos de esta investigación y se llevarán a cabo en investigaciones futuras.

Por ejemplo, el intervalo melódico 55 (Dominante – Dominante) es una de las variables más distante entre los promedios de dos compositores cuando se trata de comparar una pareja compositores clásico y barroco.

### Comparación de los resultados de Dor/Reich con los obtenidos con el método MIAMP

Al aplicar el algoritmo SMO (Tabla 36) utilizado por Dor/Reich a todas las piezas de cada uno de los dos compositores analizados en cada experimento, se ha demostrado que su método obtiene pobres porcentajes de éxito en el compositor con menor número de piezas en la muestra.

Posiblemente Dor y Reich fueron conscientes de este problema por lo que presentaron como tasa de éxito un promedio de 10 experimentos realizados sobre muestras de los dos compositores de igual tamaño con un subconjunto de las piezas del compositor con mayor número de piezas elegidas aleatoriamente. De este modo al realizar 10 experimentos se elimina el factor azar cuando el problema era inherente al tamaño de las muestras de cada compositor utilizadas en los experimentos.

Tras comparar los resultados de la Tabla 36 con los obtenidos en las tablas 37 y 38 queda identificado que el método MIAMP presentado en este capítulo es superior al método Dor/Reich tanto en su conjunto como en su algoritmo (SMO).

<sup>254</sup> Consultar la página 247 (capítulo “Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados”) para una explicación detallada.

<sup>255</sup> Consultar la página 249 (capítulo “Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados”) para una explicación detallada.



Una vez demostrado lo anterior y para poder cuantificar experimentalmente la pérdida de eficacia del método MIAMP al aplicarlo a una muestra de piezas de mayor diversidad formal se han realizado los experimentos de aplicación del método MIAMP a otra muestra de piezas (ver Tabla 39) con un nivel de diversidad formal mayor

Debido a que los compositores analizados por ambas investigaciones (Dor/Reich vs MIAMP) son diferentes, los aspectos tratados en este apartado estarán referidos a las parejas de compositores comunes a ambos estudios.

Debe añadirse a los resultados anteriores que los experimentos realizados con el método MIAMP han sido realizados con un número mayor de piezas (ver Tabla 39). La Tabla 42 compara las piezas totales analizadas en cada pareja de compositores en el método Dor/Reich<sup>256</sup>, en el método Dor/Reich aplicado a la totalidad de piezas de los dos compositores de su muestra (mostrados los resultados de éxito en la Tabla 36) y el método MIAMP.

	Haydn Mozart	Haydn Beethoven	Haydn Scarlatti	Haydn Bach	Mozart Beethoven
Dor/Reich	164	362	116	424	164
Tabla 36	294	393	269	458	263
MIAMP	700	620	893	615	352
	Mozart Scarlatti	Mozart Bach	Beethoven Scarlatti	Beethoven Bach	Scarlatti Bach
Dor/Reich	116	164	116	362	116
Tabla 36	139	328	238	427	303
MIAMP	625	347	545	267	545

Tabla 42: Número de piezas utilizadas en los experimentos en cada método.

Como puede observarse en la Tabla 42, en las parejas de compositores analizados de Dor/Reich en los que uno de los dos tiene muy pocas piezas (ver Tabla 34) incluso en los experimentos realizados en esta tesis doctoral incluyendo todas las piezas de Dor/Reich (ver Tabla 36), el número de piezas incluidas en la Tabla 39 en ella es mucho mayor. El único caso en el que el número de piezas de la muestra de Dor/Reich supera el número de las piezas de la muestra de la Tabla 39 es el caso de la pareja de compositores Bach/Beethoven.

En el apartado de experimentación con muestras de piezas musicales de la misma instrumentación la Tabla 43 muestra los resultados obtenidos por ambos métodos comparando los compositores Haydn y Mozart.

	Piezas para teclado	Sinfonías	Piezas para cuerda
Dor/Reich	75,16%	86,50%	73,75% <sup>257</sup>
MIAMP	88,30%	- <sup>258</sup>	85,03%

Tabla 43: Porcentajes de éxito de ambos métodos aplicados a muestras de piezas musicales de Haydn y Mozart por instrumentación.

256 En los experimentos en los que se han incluido en las muestras piezas de diferentes formas musicales.

257 En el trabajo de Dor/Reich no se especifica qué formas musicales exactamente se incluyen en la categoría de “Piezas para cuerda”. Por ello, no se puede saber si las serenatas y piezas para orquesta de cuerda de Mozart se incluyen en dicha muestra.

258 Dor/Reich no dan ningún resultado para esta forma musical.

La Tabla 44 muestra el promedio y la desviación estándar del número de notas de las piezas musicales de cada compositor en la muestra de piezas de Dor/Reich comparado con la de la Tabla 39.

Compositor	Promedio de notas (Dor/Reich)	Promedio de notas (MIAMP)	Desviación estándar (Dor/Reich)	Desviación estándar (MIAMP)
J.S.Bach	756,29	1941,89	1709,83	2417,5
D.Scarlatti	1048,03	1107,38	360,58	326,43
F.J.Haydn	1584,69	2776,67	890,03	2186,16
A.Corelli	594,93	-	433,3	-
W.A.Mozart	1851,56	3394,61	1131,12	2568,2
L.v.Beethoven	2779,79	5473,22	1675,95	6776,91

Tabla 44: Promedio y desviación estándar de notas de las piezas utilizadas por compositor en los trabajos Dor/Reich y MIAMP.

Como puede observarse en la Tabla 44, al ser mayores<sup>259</sup> casi todos los promedios y desviaciones estándar del número de notas de las piezas musicales de las muestras de cada compositor del método MIAMP, se puede inferir que la complejidad formal y orquestal así como la diversidad en las piezas utilizadas en las muestras de los compositores utilizadas en el método MIAMP es mayor que la de las utilizadas por Dor/Reich en todos los compositores comparados.

### Resultados obtenidos al aplicar el algoritmo SMO to a los datos utilizados en el método MIAMP

En este apartado en la Tabla 45 se presentan los resultados de aplicar a los indicadores utilizados en el método MIAMP (porcentaje de uso de cada nota y porcentaje de uso de los 144 intervalos melódicos posibles) el mismo algoritmo de clasificación (SMO) utilizado por Dor y Reich con las mismas opciones de parametrización (*Cross-validation* con 10 *folds*).

Han sido aplicados los siguientes algoritmos a estos indicadores (que son básicamente los mismos con los que han experimentado Dor/Reich):

- *NaiveBayes*, *NaiveBayes Simple*, *Logistic*, *SimpleLogistic*, *SMO*, *Ib1*, *Ibk*, *Jrip*, *PART*, *OneR*, *J48*, *RandomForest*, *RandomTree* y *NBTree*.<sup>260</sup>

Al igual que Dor/Reich, el algoritmo de la aplicación Weka que mejores porcentajes de éxito alcanza en la clasificación es el algoritmo SMO.

Al igual que Dor y Reich, ha sido aplicada la recomendación de los manuales Weka consultados de que el número de piezas de cada compositor en cada experimento han de ser iguales o no ser muy diferentes ya que en dicho caso, los porcentajes de éxito de toda la muestra son elevados, sin embargo, el número de piezas clasificadas incorrectamente es elevado en el compositor minoritario es decir, los algoritmos de *Data Mining* clasifican mejor las piezas del compositor mayoritario consiguiendo en el compositor minoritario unos peores porcentajes de éxito.

<sup>259</sup> La desviación estándar de Scarlatti es menor en la muestra del método MIAMP ya que el número de piezas incluidas en la muestra utilizada por el método MIAMP es mucho mayor que el número de piezas incluidas en la de Dor/Reich (ver Tabla 39).

<sup>260</sup> Consultar las páginas 284, 291, 293, 358, 275, 287, 285, 275, y 288 (capítulo Anexo 2 – Conceptos TIC y matemáticos utilizados.) para una explicación detallada de los diferentes algoritmos (según el orden en que están enumerados).

	Porcentajes de éxito			
	Haydn / Mozart	Haydn / Beethoven	Mozart / Beethoven	Mozart / Bach
Dor/Reich	62,80%	92,79%	89,27%	97,07%
Aplicando el algoritmo SMO a los indicadores utilizados por MIAMP	67,94%	81,72%	81,77%	92,34%
	Número de piezas musicales involucradas			
Dor/Reich	164	362	164	164
Aplicando el algoritmo SMO a los indicadores utilizados por MIAMP	216	136	136	262

Tabla 45: Resultados de aplicación del algoritmo SMO a porcentajes de uso de intervalos melódicos de muestras de parejas de compositores.

Como puede observarse en la Tabla 45, en general, los indicadores MIAMP no obtienen buenos resultados como identificadores de las diferencias de estilo clasificados por el algoritmo SMO. Sin embargo, dichos indicadores, sí que son significativamente mejores para clasificar por medio del algoritmo SMO el estilo musical de la pareja de compositores Haydn / Mozart.

Por tanto, los indicadores de porcentaje de uso de los 144 intervalos melódicos posibles son mejores para clasificar piezas de compositores muy próximos en estilo tanto aplicándoles el método MIAMP como aplicándoles el algoritmo de *Data-mining SMO*.

### Resultados obtenidos al aplicar el método MIAMP a la clasificación de estilos musicales

Se ha comentado en capítulos anteriores que el análisis discriminante no ofrece unos buenos resultados cuando se intenta clasificar compositores de estilos próximos aunque sí que son aceptables al clasificar piezas musicales por estilo.

En la línea de realizar experimentos cruzados entre conjuntos de obras musicales de otras investigaciones y los resultados al clasificarlos mediante el método MIAMP, se ha realizado la aplicación del método MIAMP al conjunto de obras de la Tabla 16 (página 101) para estudiar los resultados obtenidos clasificando las obras musicales de dicha tabla por estilo musical.

De este modo, si bien el A.D. ofrece peores resultados clasificando piezas musicales por compositor, se comprueba la efectividad del método MIAMP clasificando piezas por estilo musical.

Este será el primer experimento de aplicación del método MIAMP a conjuntos de clasificación de tres elementos (en este caso 3 estilos musicales: Barroco, Clasicismo y Romántico).

Para ello la Tabla 46 muestra los resultados de clasificación de las piezas musicales de la Tabla 16 con el método MIAMP.

		Grupo predicho		
		Barroco	Clásico	Romanticismo
Grupo real	Barroco	79,53%	18,10%	2,30%
	Clásico	10,20%	79,72%	10,10%
	Romanticismo	3,80%	15,40%	80,77%

Tabla 46: Resultados de clasificación de piezas por estilo musical utilizando el método MIAMP.

Comparando estos resultados con los mostrados en la Tabla 17 (página 103) se puede observar que son similares aunque más equilibrados es decir, los porcentajes de éxito de clasificación de cada uno de los tres estilos son similares y próximos mientras que en los resultados de la Tabla 17 tienen una diferencia máxima del 18% mientras que en los de la Tabla 46 la diferencia máxima es del 1,24%

Se ha aplicado también el método MIAMP a los tres estilos pero por parejas de dos estilos obteniendo los resultados de la Tabla 47.

	Bp	Cp		Bp	Rp		Cp	Rp
Br	93,02	6,98	Br	97,21	2,79	Cr	91,91	8,09
Cr	4,82	95,18	Rr	1,92	98,08	Rr	8,17	91,83

Tabla 47: Porcentajes de éxito en la clasificación mediante MIAMP por parejas de estilos compositivos.  
 Leyenda: Br: Barroco real / Cp: Clásico predicho / Rr: Romántico real.

Observando los resultados de las tablas 46 y 47, se puede comprobar que en este experimento, el método MIAMP reduce significativamente sus porcentajes de éxito si clasificamos 3 estilos. Lo cual denota que el método MIAMP, a pesar de que debería analizarse más en profundidad en un futuro, es efectivo comparando dos conjuntos de piezas (de diferentes estilos o compositores).

También se observa en la Tabla 47 que el método MIAMP clasifica mejor cuando se comparan los estilos Barroco y Romántico por estar más distantes en características de estilo.

## Investigación futura

A partir de ahora se abre un vasto campo de investigación en el que se puede aplicar el método MIAMP a todas aquellas obras de los siglos XVII y XVIII que por diversas razones, a pesar de haber sido consideradas durante años compuestas por un compositor "A", recientes investigaciones dudan sobre la autoría de ese compositor "A" teorizando sobre la posibilidad de que fuera compuesta por un compositor "B" o incluso un tercero "C".

Otra futura investigación será la ampliación del método MIAMP para permitir su aplicación en el caso de que las opiniones de los especialistas sobre la autoría de una pieza estén divididas entre 3 o más posibles autores (aunque se ha constatado en el experimento de las tablas 46 y 47 que la eficacia se recuce). En estos casos generalmente, el número de especialistas que proponen un autor concreto quizás es menor que los que proponen otros autores, en cuyo caso, se parte de un escenario de probabilidad donde algunos posibles autores son posibles pero no probables autores de la pieza estudiada.

Otra futura investigación será intentar localizar métodos de optimización de funciones no derivables y ejecutarlos en ordenadores de más potencia que los utilizados para conseguir los resultados de esta investigación que permitan mejorar más aún las probabilidades condicionadas mejorando de este modo la fiabilidad del método MIAMP.

## Conclusiones

El método diseñado por Dor/Reich es muy bueno en sus porcentajes de éxito y es de aplicación a gran cantidad de escenarios.

El método MIAMP presentado en esta investigación propone un mecanismo numérico para, a partir de los porcentajes de uso de notas y de intervalos melódicos, clasificar automáticamente piezas musicales según su compositor con un elevado nivel de éxito.

El método MIAMP mejora los resultados de clasificación del método Dor/Reich en un **76%** de los casos.

Tal como muestra la Tabla 35, cuando se calculan los porcentajes de éxito por compositor de los experimentos de Dor/Reich, la fiabilidad de su método es mucho peor que el porcentaje de éxito total (alcanzando diferencias entre ambos en el porcentaje de éxito de hasta el 12%).

El método MIAMP permite que la selección de las piezas musicales de la muestra de referencia sea independiente de la tonalidad de la pieza, su compositor, su duración, su forma y estructura musical así como de su orquestación consiguiendo un mayor grado de libertad que el trabajo de Dor/Reich (ver Tabla 44).

La Tabla 36 demuestra que el algoritmo de clasificación SMO utilizado en el trabajo de Dor/Reich obtiene unos malos niveles de éxito en cada compositor cuando el número de piezas musicales de cada compositor difiere considerablemente provocando altos porcentajes de éxito en el compositor con mayor número de piezas en la muestra y pobres resultados en el compositor minoritario.

El número de piezas analizadas en los compositores comunes a ambos estudios<sup>261</sup> (Bach, Scarlatti, Beethoven, Mozart y Haydn) es mucho mayor y más heterogénea la utilizada en este estudio que la utilizada en el trabajo de Dor/Reich (ver Tabla 44).

El trabajo de Dor/Reich y el método MIAMP mejoran ambos sus porcentajes de éxito cuando en las muestras de piezas musicales de los compositores estudiados contienen obras de una misma forma musical.

Los probabilidades de éxito del método MIAMP al igual que en el trabajo de Dor/Reich son mayores discriminando compositores con una mayor rigidez formal y compositiva como son el periodo Barroco y el periodo clásico.

Otra conclusión del estudio y en consonancia con los principios de la estadística es que cuanto mayor sea el número de piezas incluidas en la muestra de piezas discriminante mayor será la tasa de éxito del método MIAMP, sin embargo el trabajo de Dor/Reich está limitado a tener un número igual de piezas de los dos compositores comparados (ver Tabla 36), limitación que el método MIAMP no tiene.

Se ha aplicado también el método MIAMP a la clasificación por estilo de piezas barrocas, clásicas y románticas (las mismas utilizadas en el “Capítulo 5. Clasificación de estilos musicales clásicos por medio de análisis discriminante” detalladas en la Tabla 16) obteniendo unos porcentajes de éxito en la clasificación similares a los obtenidos por medio de la técnica de análisis discriminante aunque dichos porcentajes de éxito tienen una dispersión menor respecto a la media.

---

261 Dor/Reich: Tabla 34 / MIAMP: Tabla 39.

## Capítulo 8. Análisis de técnicas de clasificación existentes aplicadas a los indicadores extraídos

### Introducción

Con el objetivo de explorar y comparar las técnicas utilizadas como clasificadores de piezas de compositores en base a indicadores de bajo nivel aplicándolas a los indicadores utilizados en esta tesis doctoral en este capítulo (porcentajes de uso de notas y porcentaje de uso de intervalos melódicos), se muestran dichos resultados comparándolos con los resultados obtenidos de la aplicación de los métodos desarrollados en esta investigación.

Dicha investigación ha sido realizada para comprobar dos hechos principales:

- Que los métodos diseñados en esta tesis doctoral (en especial el método MIAMP descrito en el capítulo anterior) obtienen unos resultados de éxito en la clasificación mejores que los analizados en este capítulo.
- Que dichos resultados numéricamente mejores en los porcentajes de éxito han sido conseguidos con métodos más simples en esencia que los analizados en este capítulo.

Teniendo en cuenta que los resultados de este capítulo han sido obtenidos con el objetivo de explorar otros algoritmos y otras vías de investigación similares y a la vez diferentes a la propuesta en esta tesis doctoral, dichas exploraciones no se han realizado con extremada profundidad una vez se ha comprobado que dichos algoritmos ofrecían unos resultados peores que los presentados en capítulos anteriores.

Otros algoritmos como el C.45 ya han sido implementados para clasificar obras de Haydn y Mozart en el momento en que han sido comparados los resultados del método MIAMP con los resultados de la investigación de Dor/Reich en el “Capítulo 7. Análisis comparativo de aplicación de métodos de minería de datos versus algoritmos evolutivos a la clasificación automática de piezas musicales de compositores clásicos.” en la página 120.

Los resultados han sido obtenidos por medio de las aplicaciones de minería y análisis de datos Weka <sup>7262</sup> y RapidMiner v5.2.008<sup>263</sup> ubicado en los 3 primeros puestos de software de análisis de datos más utilizados en los años 2010-2012.

### Aplicación del algoritmo knn

Aplicando el algoritmo knn<sup>264</sup> a todas las piezas: 582 de Haydn y 219 de Mozart (descritas en la Tabla 39 en la página 136) se obtienen los resultados de la Tabla 48 para valores de k entre 1 y 5

---

262 Consultar página 298 (capítulo Anexo 2 – Conceptos TIC y matemáticos utilizados.) para una explicación detallada.

263 Consultar página 289 (capítulo Anexo 2 – Conceptos TIC y matemáticos utilizados.) para una explicación detallada.

264 Consultar página 358 (capítulo Anexo 5 – Conceptos estadísticos utilizados.) para una explicación detallada.

	Haydn (real)	Mozart (real)	Precisión de la clase
<b>k=1</b>			
Haydn (pred.)	344	102	77,13%
Mozart (pred)	142	117	45,17%
% respec. Comp.	70,78%	53,42%	Total: 65,37% <sup>265</sup>
<b>k=2</b>			
Haydn (pred.)	431	151	74,05%
Mozart (pred)	55	68	55,28
% respec. Comp.	88,69%	31,05%	Total: 70,78%
<b>k=3</b>			
Haydn (pred.)	367	113	76,46%
Mozart (pred)	119	106	47,11%
% respec. Comp.	75,51%	48,40%	Total: 67,07%
<b>k=4</b>			
Haydn (pred.)	425	154	73,40%
Mozart (pred)	61	65	51,59%
% respec. Comp.	87,45%	29,58%	Total: 69,49%
<b>k=5</b>			
Haydn (pred.)	380	122	75,70%
Mozart (pred)	106	97	47,78%
% respec. Comp.	78,19%	44,29%	Total: 67,64%

Tabla 48: Porcentajes de éxito alcanzados en la aplicación del algoritmo knn sobre las muestras de piezas de Mozart y Haydn.

Se han realizado pruebas con valores k elevados (20, 30, 40 etc.) y a medida que se incrementa el valor “k”, menor es el porcentaje de éxito en el compositor minoritario (Mozart en este caso).

En el caso de comparar muestras de piezas de la misma forma musical (Sonatas para teclado, cuartetos y sinfonías de ambos compositores (ver Tabla 39), la Tabla 49 muestra los resultados para k=1 ya que es el valor de “k” que para todas las piezas ha dado un mayor valor de éxito en el mínimo de ambos valores.

<sup>265</sup>Media ponderada de los porcentajes de de éxito sobre cada compositor respecto el número de piezas de cada compositor. (porc.éx. Haydn \* n° piez Haydn + porc. éx. Mozart \* n° piez Mozart / n° total de piezas

	Haydn (real)	Mozart (real)	Precisión de la clase
<b>Cuartetos de Cuerda</b>			
Haydn (pred.)	128	41	75,74%
Mozart (pred)	64	35	35,35%
% respec. Comp.	66,67%	46,05%	Total: 60,80%
<b>Sinfonías</b>			
Haydn (pred.)	109	38	74,15%
Mozart (pred)	45	56	55,45%
% respec. Comp.	70,78%	59,57%	Total: 66,50%
<b>Sonatas para teclado</b>			
Haydn (pred.)	100	17	85,47%
Mozart (pred)	40	29	42,03%
% respec. Comp.	71,43%	63,04%	Total: 69,36%

Tabla 49: Porcentajes de éxito alcanzados en la aplicación del algoritmo knn sobre las muestras de piezas de Mozart y Haydn separadas por forma musical.

Si bien con los métodos presentados en esta tesis doctoral, los porcentajes de éxito mejoran si limitamos las piezas incluidas en las muestras a ser de la misma forma musical e instrumentación, al utilizar el algoritmo Knn dicha mejora no se produce.

También se ha comprobado que los resultados de éxito en la clasificación de piezas por estilo musical conseguidos en el “Capítulo 5. Clasificación de estilos musicales clásicos por medio de análisis discriminante” (página 97) en la Tabla 17 (página 103) son mejores que los conseguidos aplicando el algoritmo knn a el mismo conjunto de piezas de estilos barroco, clásico y romántico tal como muestra la Tabla 50.

	Clásico (real)	Barroco (real)	Romántico (real)	Precisión
<b>k=1</b>				
Clásico (pred.)	523	125	70	72,84%
Barroco (pred.)	129	72	11	33,96%
Romántico (pred.)	53	18	23	24,47%
% respec. Comp.	74,18%	33,49%	22,12	Total: 60,36% <sup>266</sup>
<b>k=2</b>				
Clásico (pred.)	662	174	79	72,35%
Barroco (pred.)	41	37	9	42,53%
Romántico (pred.)	2	4	16	72,73%
% respec. Comp.	93,90%	17,21%	15,38	Total: 69,84%

Tabla 50: Porcentajes de éxito alcanzados en la aplicación del algoritmo knn sobre las muestras de piezas de estilos musicales Barroco, Clásico y Romántico.

266 Media ponderada de los porcentajes de de éxito sobre cada compositor respecto el número de piezas de cada compositor. (porc.éx. Haydn \* nº piez Haydn + porc. éx. Mozart \* nº piez Mozart)/ nº total de piezas.



## Árbol de decisión

Otro algoritmo analizado y comparado con los desarrollados en esta tesis doctoral es la creación de un árbol de decisión<sup>267</sup>.

El aprendizaje mediante árboles de decisión es un método de aproximación de una función objetivo de valores discretos en el cual la función. Los árboles aprendidos también pueden representarse como un conjunto de reglas *Si-entonces* objetivo las cuales se representan mediante un árbol de decisión.

Para analizar la viabilidad de este algoritmo como clasificador a partir de los indicadores estudiados en esta tesis doctoral se han realizado pruebas de clasificación de piezas por estilo musical (las mismas de la tabla Tabla 17 en la página 103) obteniendo el árbol de la Figura 56.<sup>268</sup>

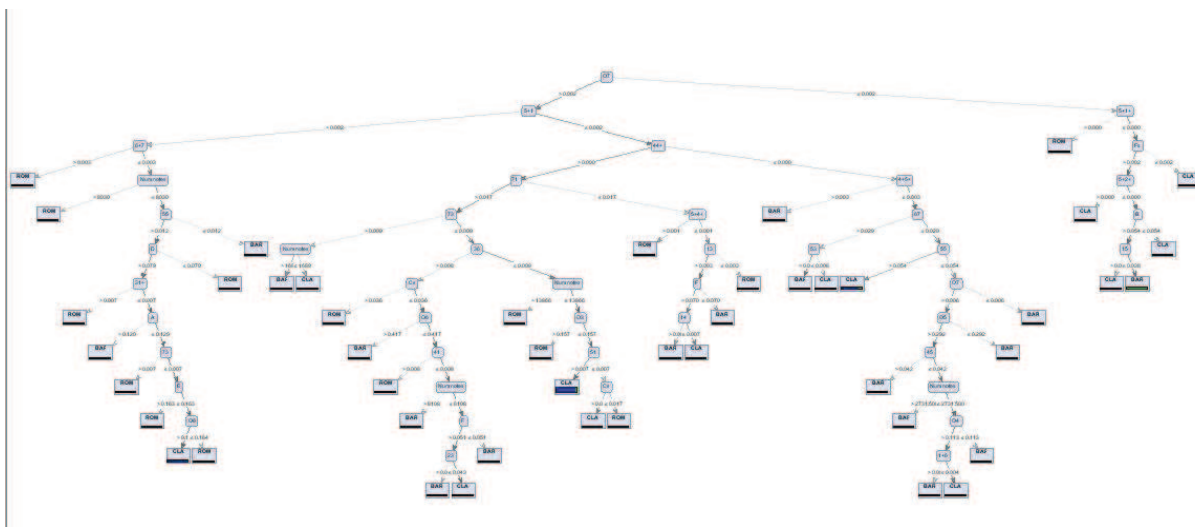


Figura 56: Árbol de decisión generado por la aplicación RaipdMiner para clasificar piezas musicales por estilo.

En la página 268 en el Anexo “Anexo 2 – Conceptos TIC y matemáticos utilizados.” se ha incluido una versión textual por medio de texto sangrado del mismo árbol que el de la Figura 56 pero en un formato fácilmente inteligible ya que en dicho formato, el tamaño del árbol crece verticalmente en vez de horizontalmente tal como hace su versión gráfica.

La Tabla 51 muestra los resultados de éxito en la aplicación de dicho algoritmo a las muestras de piezas clásicas, barrocas y románticas de la Tabla 39.

---

267 Consultar página 267 (capítulo Anexo 2 – Conceptos TIC y matemáticos utilizados.) para una explicación detallada.

268 Dada la cantidad de información de este árbol, en el apartado “Árbol de decisión de clasificación por estilo musical” del Anexo “Anexo 2 – Conceptos TIC y matemáticos utilizados.” en la página 268 se encuentra una descripción textual de este árbol de decisión.

	Clásico (real)	Barroco (real)	Romántico (real)	Precisión
Clásico (pred.)	635	62	44	85,70%
Barroco (pred.)	46	146	9	72,64%
Romántico (pred.)	24	7	51	62,20%
% respec. Comp.	90,07%	67,91%	49,04%	Total: 81,24%

Tabla 51: Porcentajes de éxito alcanzados en la aplicación de un árbol de decisión sobre las muestras de piezas de estilos musicales Barroco, Clásico y Romántico.

Los parámetros utilizados en la creación de árbol de decisión se resumen en la Tabla 52

Criterio	Tamaño mínimo de división	Tamaño mínimo de hoja	Ganancia mínima	Profundidad máxima	Confianza
Relación de ganancia	4	2	0,1	20	0,25

Tabla 52: Parámetros utilizados en la creación del árbol de decisión utilizado para clasificar piezas por estilo musical (Barroco, Clásico y Romántico).

Utilizando como criterio la exactitud, se ha creado un árbol de decisión diferente que ha conseguido los resultados de éxito de la Tabla 53.

	Clásico (real)	Barroco (real)	Romántico (real)	Precisión
Clásico (pred.)	680	154	58	78,23%
Barroco (pred.)	11	56	8	74,67%
Romántico (pred.)	14	5	38	66,67%
% respec. Comp.	96,45%	26,05%	36,54%	Total: 75,59%

Tabla 53: Porcentajes de éxito alcanzados en la aplicación de un árbol de decisión creado con criterio de exactitud sobre las muestras de piezas de estilos musicales Barroco, Clásico y Romántico.

Utilizando como criterio la adquisición de información (*information gain*), se ha creado un árbol de decisión diferente que ha conseguido los resultados de éxito de la Tabla 54. Dichos resultados son más equilibrados por estilo (comparado con la la Tabla 17 en la página 103)

	Clásico (real)	Barroco (real)	Romántico (real)	Precisión
Clásico (pred.)	622	56	32	87,61%
Barroco (pred.)	51	153	6	72,86%
Romántico (pred.)	32	6	66	63,46%
% respec. Comp.	88,23%	71,16%	63,46%	Total: 82,14%

Tabla 54: Porcentajes de éxito alcanzados en la aplicación de un árbol de decisión creado con criterio de maximización de la adquisición de información sobre las muestras de piezas de estilos musicales Barroco, Clásico y Romántico.

Con los mismos parámetros que los experimentos anteriores, se ha aplicado el algoritmo de Árbol de Decisión Simple en la clasificación de obras de Mozart y Haydn separadas por forma musical obteniendo los resultados de la Tabla 55.

	Haydn (real)	Mozart (real)	Precisión de la clase
<b>Cuartetos de Cuerda</b>			
Haydn (pred.)	187	68	73,33%
Mozart (pred)	5	8	61,54%
% respec. Comp.	97,40%	10,53%	Total: 72,47% <sup>269</sup>
<b>Sinfonías</b>			
Haydn (pred.)	142	78	64,55%
Mozart (pred)	12	16	57,14%
% respec. Comp.	92,21%	17,02%	Total: 70,78%
<b>Sonatas para teclado</b>			
Haydn (pred.)	121	22	84,62%
Mozart (pred)	19	24	55,81%
% respec. Comp.	86,43%	52,17%	Total: 67,07%

Tabla 55: Porcentajes de éxito alcanzados en la aplicación de un árbol de decisión simple sobre las muestras de piezas de Mozart y Haydn.

## Perceptrón

Otro algoritmo analizado y comparado con los desarrollados en esta tesis doctoral es la creación de un perceptrón<sup>270</sup>.

El Perceptrón (Perceptron en inglés) fue el primer modelo de Red Neuronal Artificial supervisada. Es la más simple de las Redes neuronales. Su éxito inicial se debió a que era capaz de aprender y reconocer patrones sencillos.

El perceptrón es un algoritmo aplicable a la clasificación de piezas musicales entre dos compositores ya que cumple su principal limitación que sirve únicamente para problemas linealmente separables y que sean de dos clases, es decir, sólo puede utilizarse cuando el problema sea distinguir entre una de dos posibles clases y, que trazando una línea, plano o hiperplano en un plano o hiperplano, se puedan separar perfectamente estas dos clases.

La Tabla 56 resume los resultados de éxito utilizando un perceptrón a la clasificación de todas las piezas analizadas de Haydn y Mozart.

	Haydn (real)	Mozart (real)	Precisión de la clase
Haydn (pred.)	1	0	100,00%
Mozart (pred)	485	219	31,11%
% respec. Comp.	0,21%	100,00%	Total: 31,20%

Tabla 56: Porcentajes de éxito alcanzados en la aplicación de un perceptrón simple sobre las muestras de piezas de Mozart y Haydn.

Como se puede observar en la Tabla 56 el sistema perceptrón fracasa totalmente en la clasificación utilizando los indicadores propuestos en esta tesis doctoral ya que curiosamente, y a

<sup>269</sup>Media ponderada de los porcentajes de de éxito sobre cada compositor respecto el número de piezas de cada compositor. (porc.éx. Haydn \* n° piez Haydn + porc. éx. Mozart \* n° piez Mozart / n° total de piezas

<sup>270</sup> Consultar página 287 (capítulo Anexo 2 – Conceptos TIC y matemáticos utilizados.) para una explicación detallada.

diferencia de la mayoría de métodos, clasifica estrepitosamente al compositor con más piezas incluidas en la muestra.

## Redes neuronales

Se ha experimentado con una red neuronal<sup>271</sup> construida a partir de los datos ya utilizados anteriormente en la clasificación de estilos musicales con los resultados de éxito de la Tabla 57

	Clásico (real)	Barroco (real)	Romántico (real)	Precisión
Clásico (pred.)	685	49	15	91,22%
Barroco (pred.)	30	162	5	82,23%
Romántico (pred.)	10	4	84	85,71%
% respec. Comp.	94,33%	75,35%	80,77%	Total: 88,97%

Tabla 57: Porcentajes de éxito alcanzados en la aplicación de una red neuronal sobre las muestras de piezas de estilos musicales Barroco, Clásico y Romántico.

Como puede observarse al igual que las otras técnicas, los porcentajes de éxito no son mejores que con otras técnicas y siempre menores que los obtenidos por medio del método MIAMP.

Se ha aplicado también los sistemas de red neuronal en la clasificación exclusivamente de las obras Mozart y Haydn obteniendo los resultados de la Tabla 58.

	Haydn (real)	Mozart (real)	Precisión de la clase
Haydn (pred.)	404	145	73,58%
Mozart (pred)	82	74	47,43%
% respec. Comp.	83,12%	33,78%	Total: 67,8%

Tabla 58: Porcentajes de éxito alcanzados en la aplicación de una red neuronal simple sobre las muestras de piezas de Mozart y Haydn.

Los cuales, al igual que otras técnicas, presentan el problema de una tendencia a maximizar la clasificación del compositor mayoritario en número de piezas.

## Naive Bayes

Se ha experimentado también con la clasificación de piezas por estilo musical y la clasificación de piezas de Mozart y Haydn de las mismas muestras que han sido utilizadas en los experimentos anteriores con el método Naive Bayes<sup>272</sup>.

Dichos experimentos han generado los resultados de clasificación de las tablas 59 y 60.

271 Consultar página 290 (capítulo Anexo 2 – Conceptos TIC y matemáticos utilizados.) para una explicación detallada.

272 Consultar página 284 (capítulo Anexo 2 – Conceptos TIC y matemáticos utilizados.) para una explicación detallada.

	Haydn (real)	Mozart (real)	Precisión de la clase
Haydn (pred.)	178	48	78,76%
Mozart (pred.)	308	171	35,70%
% respec. Comp.	36,63%	78,08%	Total: 49,5%

Tabla 59: Porcentajes de éxito alcanzados en la aplicación del método Bayesiano sobre las muestras de piezas de Mozart y Haydn.

	Clásico (real)	Barroco (real)	Romántico (real)	Precisión
Clásico (pred.)	555	31	17	92,04%
Barroco (pred.)	101	176	6	62,19%
Romántico (pred.)	49	8	81	58,70%
% respec. Comp.	78,72%	81,86%	77,88%	Total: 73,3%

Tabla 60: Porcentajes de éxito alcanzados en la aplicación de una red neuronal a las muestras de piezas de estilos musicales Barroco, Clásico y Romántico.

## ***Random Forest***

Otro algoritmo analizado para comparar el éxito de sus resultados clasificando obras por estilo y la efectividad de su clasificación de las piezas de Mozart y Haydn es el algoritmo de minería de datos *Random Forest*<sup>273</sup>. Los resultados obtenidos clasificando piezas por estilo musical han sido muy poco satisfactorios ya que ha clasificado la mayoría de piezas como clásicas (colectivo mayoritario en la muestra). Lo cual demuestra, al igual que otros algoritmos de minería de datos, que en el caso de haber en la muestra subconjuntos mayoritarios de un estilo concreto, el algoritmo tiene una tendencia a clasificar con altas tasas de éxito dicho subconjunto mayoritario en detrimento de los minoritarios (subconjuntos de piezas barrocas y románticas respectivamente).

Al aplicar el algoritmo *Random Forest* a las muestra de piezas de Haydn y Mozart de la Tabla 39 (página 136) los resultados tampoco superan los porcentajes de éxito del método MIAMP.

---

<sup>273</sup> Consultar página 288 (capítulo Anexo 2 – Conceptos TIC y matemáticos utilizados.) para una explicación detallada.

# Capítulo 9. Resultados de aplicación de los métodos presentados a obras dudosas de J.S.Bach

## Introducción

En este capítulo se presentan los resultados de aplicar los métodos desarrollados (y/o utilizados) en esta tesis doctoral (análisis discriminante y método MIAMP) para obtener de dicha aplicación una probabilidad de que fuera compuesta o no por J.S.Bach una serie de obras para órgano de dudosa autoría.

Tras haber sido probados los métodos propuestos en capítulos anteriores y avalados por publicaciones en revistas científicas, en este capítulo, a falta de nueva documentación que avalen o refuten la autoría de las obras estudiadas en este capítulo, se ofrece unos resultados de autoría o no de Bach con un porcentaje de probabilidad del resultado obtenido en base a los porcentajes de éxito conseguidos en los conjuntos de piezas reconocidas de cada autor e incluidas en las muestras de análisis.

Como la mayoría de métodos numéricos basados en la Estadística, los resultados presentados en este capítulo no pueden asegurarse con certeza, únicamente pueden y deben ser utilizados como métodos complementarios a las técnicas desarrolladas por la musicología cuando ésta no tiene respuestas concluyentes a la autoría de la obra y las opiniones de los especialistas están muy divididas.

Las piezas analizadas en este capítulo compuestas presuntamente por Johann Michael Bach (suegro de J.S.Bach) se sabe en la actualidad que no fueron compuestas por J.S.Bach sino por su suegro. Han sido incluidas en este capítulo como un nivel de validación más del método MIAMP ya que cuando, a través del profesor de órgano del Conservatorio Profesional de Palma de Mallorca D. Bartomeu Mut Llabrés, se contactó con el profesor Roland Börger<sup>274</sup>, Director de la Cátedra de Dirección Coral de la *Hochschule für Musik und Theater Leipzig* de Leipzig para presentarle la herramienta MIAMP, propuso como prueba adicional de validación del método, probarlo con obras que tradicionalmente se habían atribuido a J.S.Bach pero que en la actualidad y debido a evidencias documentales, se sabe que fueron compuestas por otro compositor.

### Objetivo de la investigación

El objetivo de la investigación resumida en este capítulo ha sido, a partir de obras para órgano de autoría dudosas de J.S.Bach de diferentes autores coetáneos, aplicar a cada una de ellas los métodos desarrollados en esta tesis doctoral (análisis discriminante<sup>275</sup> y el método MIAMP<sup>276</sup>) y obtener, en base a dichos métodos la probabilidad de que fuera compuesta por J.S.Bach o por otro compositor candidato.

Ambos métodos dan respuestas al mismo problema, el análisis discriminante<sup>277</sup> en base a dicha técnica estadística y el método MIAMP en base a la aplicación de algoritmos evolutivos a la maximización de una función.

---

274 Consultar "<http://www.clr.cl/Spanish-Idx-P-BoergerRonald.asp?strng=Organistas+en+Chile>" y "<http://www.ram.ac.uk/find-people?pid=545>" para unas breves notas bibliográficas.

275 Detallado en el "Capítulo 5. Clasificación de estilos musicales clásicos por medio de análisis discriminante" (página 97).

276 Detallado en el "Capítulo 7. Análisis comparativo de aplicación de métodos de minería de datos versus algoritmos evolutivos a la clasificación automática de piezas musicales de compositores clásicos." (página 120).

277 Consultar la página 349 (capítulo "Anexo 5 – Conceptos estadísticos utilizados.") para una explicación detallada.

En el caso de caso de que ambos métodos concluyan que el compositor es el mismo, se concluirá el resultado de ambos métodos y en el caso de que haya diferencias en los resultados, se analizará cada caso en particular para intentar ofrecer un resultado.

## Piezas musicales de J.S.Bach analizadas

Se resume en la Tabla 61 las obras del catálogo de Bach analizadas en este capítulo por existir serias dudas en la actualidad sobre su autoría.

Número de catálogo	Autor candidato	Nº. de piezas	Observaciones
BWV 723 y 751	Bach, Johann Michael <sup>278</sup>	2	
BWV 945	Graupner, Christoph <sup>279</sup>	1	
BWV 838	Graupner, Christoph	2	Allemande y Courante para teclado en La M
BWV 744	Krebs, Johann Ludwig	1	<i>Auf meinen lieben Gott</i>
BWV 553-560	Krebs, Johann Ludwig <sup>280</sup>	8	8 Preludios y Fugas
BWV 581	Homilius, Gottfried August <sup>281</sup>	1	Fuga para órgano en Sol M
BWV 759	Homilius, Gottfried August	1	Preludio Coral para órgano “ <i>Schmücke Dich o Liebe Seele</i> ”
BWV 692	Walther, Johann Gottfried <sup>282</sup>	1	“ <i>Ach_Gott_und_Herr</i> ”
BWV 693	Walther, Johann Gottfried	1	“ <i>Ach_Gott_und_Herr</i> ”
BWV 748	Walther, Johann Gottfried	1	“ <i>Gott der Vater wohn' uns bei</i> ”
BWV Anh 60	Walther, Johann Gottfried	1	Preludio para órgano “ <i>Nun lob, mein Seel, den Herren</i> ”

Tabla 61: Obras dudosas de J.S.Bach sometidas al método MIAMP para analizar su autoría.

## Metodología

La aplicación de ambos métodos requiere de la utilización de una base de datos de piezas musicales de los dos compositores candidatos para cada pieza. Dichos conjuntos de datos están expresados en la Tabla 62. Como puede comprobarse en las tablas asociadas, en aquellos compositores con suficientes obras para órgano reconocidas e identificadas por Internet, únicamente esas obras han sido incluidas en la muestra para homogeneizar al máxima la orquestación. Por el contrario, en aquellos casos en los que el número de fuentes MIDI localizadas por Internet (y de una calidad y exactitud suficiente) es muy bajo, se han incluido en la muestra de piezas de dicho compositor obras de diferentes formas e instrumentaciones.

278 Consultar la página 313 (capítulo “Anexo 4 – Información de compositores analizados y catalogación.”) para consultar unas breves notas bibliográficas del compositor.

279 Consultar la página 324 (capítulo “Anexo 4 – Información de compositores analizados y catalogación.”) para consultar unas breves notas bibliográficas del compositor.

280 Consultar la página 331 (capítulo “Anexo 4 – Información de compositores analizados y catalogación.”) para consultar unas breves notas bibliográficas del compositor.

281 Consultar la página 328 (capítulo “Anexo 4 – Información de compositores analizados y catalogación.”) para consultar unas breves notas bibliográficas del compositor.

282 Consultar la página 347 (capítulo “Anexo 4 – Información de compositores analizados y catalogación.”) para consultar unas breves notas bibliográficas del compositor.

Compositor	Tabla	Página de este documento	Nº de piezas de la muestra
Johann Sebastian Bach	Tabla 123	419	165
Johann Michael Bach	Tabla 121	418	43
Christoph Graupner	Tabla 130	424	62
Johann Ludwig Krebs	Tabla 136	434	73
Gottfried August Homilius	Tabla 135	432	8
Johann Gottfried Walther	Tabla 143	449	13

Tabla 62: Detalles de las muestras de piezas reconocidas de cada compositor utilizadas en esta investigación.

Como puede observarse, Walther y Homilius son los compositores que menos fuentes MIDI se han localizado en Internet. Ello incidirá negativamente en la fiabilidad de los resultados.

Se ha aplicado los métodos de análisis discriminante y MIAMP para cada pareja formada por los compositores J.S.Bach y cada uno de los 5 compositores de la Tabla 61.

Se han utilizado ambos métodos porque el Análisis Discriminante es una herramienta estadística de indiscutible difusión y aceptación en la comunidad científica, sin embargo, comparando los porcentajes de éxito de ambos métodos en los experimentos realizados en los "Capítulo 5. Clasificación de estilos musicales clásicos por medio de análisis discriminante" (Página 97) y "Capítulo 7. Análisis comparativo de aplicación de métodos de minería de datos versus algoritmos evolutivos a la clasificación automática de piezas musicales de compositores clásicos." (Página 120) se desprende que dichos porcentajes son mayores en el caso de que las muestras de piezas musicales utilizadas sean heterogéneas en instrumentación y forma musical.

Una vez se han calculado los parámetros de las funciones de distancia en cada uno de los dos métodos, dichas funciones se han aplicado a cada una de las 20 piezas de la Tabla 61 obteniendo los resultados resumidos a continuación.

## Resultados

La Tabla 63 muestra los resultados de la aplicación del método de Análisis Discriminante (A.D.) y método MIAMP a las obras para órgano dudosas de J.S.Bach enumeradas en la Tabla 61.

Las celdas sombreadas en gris son aquellas piezas que ambos métodos coinciden en su resultado aunque éste no siempre atribuya la autoría al compositor alternativo a J.S.Bach.

Nº de catálogo BWV	Compositor candidato	Compositor según A.D. <sup>283</sup>	Compositor según método MIAMP	Probabilidad condicionada de error (MIAMP)	Límite de error muestral (MIAMP)
723	Bach J.M.	Bach J.S.	Bach J.M.	23,26%	11,63%
751	Bach J.M.	Bach J.M.	Bach J.M.		
945	Graupner	Graupner	Graupner	10,71%	6,96%
838	Graupner	Graupner	Graupner		
744	Krebs	Krebs	Bach J.S.	4,88%	4,47%
553	Krebs	Bach J.S.	Krebs		

283 A.D.: Análisis Discriminante.



Nº de catálogo BWV	Compositor candidato	Compositor según A.D.	Compositor según método MIAMP	Probabilidad condicionada de error (MIAMP)	Límite de error muestral (MIAMP)
554	Krebs	Bach J.S.	Krebs		
555	Krebs	Krebs	Krebs		
556	Krebs	Krebs	Bach J.S.		
557	Krebs	Bach J.S.	Krebs		
558	Krebs	Krebs	Krebs		
559	Krebs	Bach J.S.	Bach J.S.		
560	Krebs	Bach J.S.	Bach J.S.		
581	Homilius	Bach J.S.	Homilius	11,11%	15,97%
759	Homilius	Bach J.S.	Bach J.S.		
692	Walther	Bach J.S.	Walther	7,14%	12,00%
693	Walther	Walther	Walther		
748	Walther	Walther	Walther		
Anh 60	Walther	Walther	Walther		

Tabla 63: Resultados de aplicación de A.D. y método MIAMP a piezas para órgano de autoría dudosa de J.S.Bach

Se detalla a continuación una explicación de cada una de las columnas de la Tabla 63.

- **Número de catálogo BWV:** Es el número de catálogo de la obra dudosa según el catálogo BWV.
- **Compositor candidato:** Nombre del compositor al cual actualmente existen opiniones especializadas que le atribuyen la autoría de la pieza. Sin embargo, no existen evidencias documentales que lo demuestren con certeza. En estos experimentos, el otro compositor candidato es J.S.Bach al cual se le ha atribuido históricamente la autoría de la pieza.
- **Compositor según A.D.:** Tras aplicar el método de clasificación de Análisis Discriminante, este es el autor de la pieza al estar más próximo al centroide del grupo de ese compositor.
- **Compositor según método MIAMP:** Este es, de los dos autores candidatos, el autor al cual el método MIAMP atribuye su autoría.
- **Probabilidad condicionada de error (MIAMP):** Es la probabilidad (en base a los resultados de clasificación conseguidos sobre la muestra de piezas de autoría reconocida con la función optimizada) de que el compositor de la pieza sea del compositor B cuando el método MIAMP la ha clasificado como compuesta por el compositor A (el de la columna anterior).
- **Límite de error muestral (MIAMP):** Error muestral<sup>284</sup> de la probabilidad condicionada de error (MIAMP) debido al tamaño de la muestra menor del experimento con un nivel de confianza del 95% y conociendo a priori el número total de piezas del catálogo de los compositores.

El error total máximo posible será al suma de las dos últimas columnas de la Tabla 63, es decir, en el caso del compositor Krebs será de 9,35% (4,88%+4,47%).

<sup>284</sup> Consultar la página 355 (capítulo “Anexo 5 – Conceptos estadísticos utilizados.”) para una explicación detallada.

Los resultados de la Tabla 63 se dividen en dos categorías.

- Los resultados de las piezas BWV723 y BWV751 las cuales en la actualidad se sabe que fueron compuestas por el suegro de Bach, el método MIAMP diseñado en esta tesis doctoral las clasifican como compuestas por dicho compositor con lo cual reafirma la superioridad del método MIAMP respecto el método A.D.
- El resto de obras no existe actualmente una evidencia documental y musicológica que asegure que fueran compuestas por uno u otro compositor, por tanto, esta investigación concluye los siguientes resultados:
  - Aquellas que tanto el método A.D. como el método MIAMP las clasifica como compuestas por el mismo compositor, atribuye su composición a dicho compositor.
  - Aquellas cuyos resultados de clasificación son diferentes se concluye que no hay suficiente información para clasificarlas aunque se atribuye mayor fiabilidad al método MIAMP ya que es más fiable en el caso de piezas musicales heterogéneas en instrumentación y forma musical.

Los conjuntos de variables (considerando  $n\_vars=34^{285}$ ) utilizadas en el método MIAMP para discriminar cada pareja de compositores analizados son las enumeradas en la Tabla 64.

Compositores analizados (J.S.Bach vs. ....)	Variables utilizadas en el método MIAMP <sup>286</sup>
Bach J.M.	C, G, F+, 11, E, Cs, Ds, 5+5, 44, 2+2, A, 45, 6+5+, 56, 2+1, 67, A+, 54, 4+5, 22+, 17, 16+, 23, 51, 52+, 5+5+, 65, 36, 34+, 1+1, 22, B, 55, 61
Graupner	G, 55, F, D, G+, 54, Cs, 45, 22, 34, 43, 51, 25, 16+, 5+5, 11, 21, 15, 55+, E, 75, A+, 27, 23, 52, 31, 42+, 6+1, 44, 6+5+, 52+, 65, C, 17
Krebs	G, F, 55, G+, D, B, C, A+, E, 11, 54, 45, Cs, F+, 22, 34, 16+, 51, A, 6+1, 23, 43, 5+5, 4+5, 71, 15, 17, 54+, 6+5+, 25, 5+6+, 55+, 12, 27
Homilius	E, Ds, A+, B, A, G+, 32, 17, F, 5+5, 13, 51, 2+2, 55+, 16+, 42+, C, 76, 22+, 35, 71, 6+1, 2+4, Cs, 6+5+, G, 43, 31, 12, 2+2+, 22, 75, 57, 53
Walther	A+, Ds, E, G+, B, G, F, C, 55, 17, A, D, 71, 32, Cs, 5+5, 16+, 65, 2+2, 22+, 11, 42+, 55+, 6+1, 45, 23, 66, 21, 76, 6+6, 2+4, 25, 6+5+, 33,

Tabla 64: Variables más significativas en la aplicación del método MIAMP a los compositores analizados en la investigación.

Los parámetros del proceso de optimización por medio del algoritmo evolutivo han sido los mismo utilizados en los experimentos desarrollados en el "Capítulo 7. Análisis comparativo de aplicación de métodos de minería de datos versus algoritmos evolutivos a la clasificación automática de piezas musicales de compositores clásicos." con un tiempo máximo sin mejora del resultado de 1.000 segundos.

## Discusión

En el apartado "Resultados" anterior se ha comprobado que el método MIAMP ha superado satisfactoriamente el experimento propuesto por Roland Börger de validar dicho método en un experimento con un mayor nivel de dificultad. No sólo probar el método con conjuntos de piezas musicales reconocidas de cada pareja de compositores sino aplicarlo a piezas las cuales

285 Consultar Figura 49 en la página 129.

286 Consultar Tabla 117 (página 409) y Figura 208 (página 410) para consultar la nomenclatura de los nombres de las variables de salida de la aplicación AN\_MIDv5.1.

históricamente eran consideradas de J.S.Bach y en los últimos años han aparecido evidencias documentales que refutan su autoría.

Respecto a los 8 preludios BWV553-560 no se ha obtenido una absoluta clasificación de estos preludios por ninguno de los dos compositores candidatos (J.S.Bach y J.L.Krebs). De hecho se ha consultado la referencia de Williams[94] en la que identifica cada uno de los 8 preludios tal como resume la Tabla 65 donde se apunta la posibilidad de que sea una colección de preludios de diferentes compositores.

<b>Pieza</b>	<b>Aspectos considerados por Peter Williams</b>
BWV553	Influencia italiana, reminiscencias de Fischer <sup>287</sup> y Pachelbel <sup>288</sup> .
BWV554	Única en los corales de Bach. Irrespetuosa con la armonía y melodía.
BWV555	Compositores del Sur de Alemania.
BWV556	Esencias de música de la generación del padre Soler <sup>289</sup> .
BWV557	Esencias de Fischer.
BWV558	Utiliza esquemas atípicos en J.S.Bach excepto el penúltimo compás.
BWV559	Esencias de música del Sur de Alemania, Buxtehude <sup>290</sup> y Fischer
BWV560	Compuesta por un conocedor de los Concerti Grossi de Händel.

*Tabla 65: Consideraciones de P.Williams en relación a los auténticos compositores de los 8 preludios BWV553-560.*

Sin embargo, según el criterio de Roland Börger, se descartarían los compositores candidatos propuestos por Williams decantándose por el experimento creado en esta investigación es decir J.S.Bach y J.L. Krebs.

En el caso de las piezas catalogadas como BWV692, 693,748 y Anh 60 presuntamente compuestas por Johann Gottfried Walther, un 75% de las piezas son consideradas por ambos métodos como compuestas por él y el 100% por el método MIAMP.

En lo que respecta a las piezas atribuidas por algunos especialistas a Homilius y a Walther, cierto es que sólo se han localizado en Internet 8 y 13 piezas respectivamente en formato MIDI, por tanto, a pesar de que se ha medido el margen de error, la validez de los resultados es limitada.

En cualquier caso, una situación como las obras atribuidas a Homilius y Walther debido a que uno de los compositores tiene muy pocas obras en formato MIDI, el método de Dor/Reich[2] fracasaría debido a que los algoritmos de minería de datos utilizados por ellos se centran en la maximización del porcentaje de éxito de todas las obras del experimento (la suma de las obras de los dos compositores), por tanto, tal como se ha demostrado en el "Capítulo 7. Análisis comparativo de aplicación de métodos de minería de datos versus algoritmos evolutivos a la clasificación automática de piezas musicales de compositores clásicos." cuando uno de los dos compositores tratados en el proceso tiene muchas menos obras que el otro en la muestra, los porcentajes de éxito

287 Consultar la página 323 (capítulo "Anexo 4 – Información de compositores analizados y catalogación.") para consultar unas breves notas bibliográficas del compositor.

288 Consultar la página 335 (capítulo "Anexo 4 – Información de compositores analizados y catalogación.") para consultar unas breves notas bibliográficas del compositor.

289 Consultar la página 343 (capítulo "Anexo 4 – Información de compositores analizados y catalogación.") para consultar unas breves notas bibliográficas del compositor.

290 Consultar la página 316 (capítulo "Anexo 4 – Información de compositores analizados y catalogación.") para consultar unas breves notas bibliográficas del compositor.

del compositor con menos piezas (porcentaje de piezas del compositor A clasificadas correctamente respecto al número total de piezas del compositor A) es muy bajo.

Debe recordarse que el objetivo de los métodos utilizados es dar una opinión más a los musicólogos para avalar la autoría de una obra desde un punto de vista numérico y sobretodo objetivo ya que deja de lado cualquier valoración personal del especialista que puede fijarse en aspectos locales a un fragmento de la obra sin tener una visión total del conjunto de la misma.

## **Investigaciones futuras**

La primera investigación futura sería identificar los últimos hallazgos verificados documentalmente en materia de autoría de obras dudosas en los últimos años, para repetir el experimento realizado en esta investigación entre J.S.Bach y J.M.Bach en el cual se ha corroborado los resultados del método MIAMP con el conocimiento actual respecto a la autoría de las obras catalogadas con los números BWV723 y BWV751.

Otra investigación futura sería realizar un trabajo de digitalización en formato MIDI del catálogo de obras de Homilius y Walther para incrementar el tamaño de la muestra de obras de estos compositores y comprobar si los resultados obtenidos en esta investigación continúan siendo los mismos y sobre todo, reduciendo el margen de error provocado por el tamaño de esta muestra.

No se ha investigado si los catálogos de estos dos compositores están almacenados en formato MIDI. Lo cierto es que en la fecha en que se buscaron dichas fuentes por Internet no fueron encontradas.

Identificar y catalogar los posibles casos de autoría dudosa en compositores del clasicismo para poderles aplicar los métodos desarrollados en esta tesis doctoral.

## **Conclusiones**

En el presente capítulo se han aplicado los métodos de Análisis Discriminante (explicado en detalle en el “Capítulo 5. Clasificación de estilos musicales clásicos por medio de análisis discriminante” en la página 97) y un método creado para mejorar los porcentajes de éxito del primer método en la clasificación basado en la maximización de una función de distancia ponderada por medio de un algoritmo evolutivo (MIAMP explicado en detalle en el “Capítulo 7. Análisis comparativo de aplicación de métodos de minería de datos versus algoritmos evolutivos a la clasificación automática de piezas musicales de compositores clásicos.” en la página 120).

Ambos métodos se aplican a dos muestras de piezas en formato MIDI reconocidas de cada compositor de las cuales se extra el porcentaje de utilización de cada nota (respecto la tonalidad de la misma) y el porcentaje de utilización de cada intervalo melódico.

Dichos métodos fueron analizados y probados en detalle en capítulos anteriores para demostrar su fiabilidad y con ello, en la presente investigación aplicarlos a un conjunto de obras del catálogo de órgano de J.S.Bach que son consideradas de autoría dudosa en la actualidad.

En el apartado “Resultados” en la Tabla 63 (página 155) se resumen los resultados de clasificación de cada uno de los dos métodos utilizados sobre cada una de las obras.

Aquellas que ambos métodos clasifican como compuestas por el mismo autor son aquellas que con mayor certeza podemos concluir que fueron compuestas por el compositor predicho por ambos métodos.

Aquellas piezas que los dos métodos utilizados generan diferentes resultados de clasificación, se considera que es más fiable el resultado del método MIAMP aunque la fiabilidad de los resultados es menor que en las comentadas en el párrafo anterior.

Los métodos utilizados en esta investigación son de aplicación en muestras de piezas musicales de diferente orquestación y forma musical (aunque sus resultados son de mayor fiabilidad si se procesan grupos de piezas homogéneas en forma e instrumentación) y en cada uno de los experimentos, en base a las piezas en formato MIDI de cada compositor se obtiene un porcentaje de fiabilidad en base al éxito que se obtiene clasificando las piezas reconocidas de cada compositor.

Los métodos utilizados en esta investigación y presentados en capítulos anteriores son una primera solución numérica a un problema complejo y basado en valoraciones subjetivas que ofrece objetividad al proceso de análisis de la autoría de una obra dudosa entre dos compositores.

En el caso de que el número de piezas incluidas en la muestra de piezas de cada compositor candidato sea muy diferente, el método MIAMP utilizado en este capítulo es más fiable que el método desarrollado por Dor/Reich ya que maximiza el porcentaje mínimo de éxito de cada uno de los compositores por medio de un algoritmo evolutivo.

# Capítulo 10. Una nueva definición del término “compositor prolífico”

## Introducción

G. F. Telemann ostenta en el *Guinness World Records* el título de compositor más prolífico (con más de 8.000 obras reconocidas)[95]. El desarrollo de una aplicación informática que cuenta el número de notas que componen un conjunto de obras musicales permite proponer la redefinición del concepto de “compositor prolífico”.

El concepto de “compositor prolífico” está rodeada de gran ambigüedad en lo que se refiere a la definición exacta de qué compositor es más prolífico comparado con otros. Tradicionalmente un compositor prolífico es aquel con gran cantidad de obras catalogadas y/o atribuidas. Sin embargo, dicha definición no considera la duración ni la complejidad de sus composiciones. En esta investigación se propone una re-definición del concepto “prolífico” basada en el número de notas compuestas por dicho compositor.

Esta investigación propone también incluir la variable tiempo en la definición de compositor prolífico con el fin de poder comparar la prolificidad de varios compositores con grandes diferencias en su longevidad.

### Identificación del problema.

El Diccionario de la Lengua Española Espasa Calpe definen el adjetivo “prolífico” como “Creador que tiene una amplia producción”[96] y el *American Heritage Dictionary of the English Language, Fourth Edition* lo define como “(artist) Producing abundant works or results.”[97].

Esta definición aplicada a un compositor musical está asociada al número de obras que contenga su catálogo musical. Dicho catálogo musical suele ser confeccionado por el propio autor o por especialistas en la materia que tras grandes esfuerzos de investigación posterior a la muerte del compositor, definen un listado ordenado temporalmente de las obras compuestas del autor. Como ejemplo, uno de los más famosos catálogos es el de W.A.Mozart realizado por Ludwig von Köchel<sup>291</sup> en 1862 y actualizado por última vez en 1983 por Franz Giegling, Gerd Sievers, Alexander Weinmann[98].

Dicho adjetivo “prolífico” aplicado a un compositor, realmente no ofrece una visión muy exacta de la cantidad de material musical que escribió dicho compositor a lo largo de su vida ya que por ejemplo, el tiempo de composición de un *lied*<sup>292</sup> para soprano y piano en general es muy inferior a la cantidad de tiempo que tendrá que dedicar un compositor para componer una sinfonía clásica o una ópera.

También será diferente el tiempo y esfuerzo dedicado de composición de una sinfonía temprana de W.A.Mozart comparado con una de las últimas sinfonías de L.v.Beethoven.

En cualquier caso, y sin haber una definición clara y objetiva de lo que es una obra musical “compleja”, la duración y la instrumentación de la misma sí que son indicadores del grado de complejidad y ambos estarán relacionados con la existencia de un mayor número de notas en su partitura.

---

291 Consultar página 330 (capítulo Anexo 4 – Información de compositores analizados y catalogación.) para unas breves notas biográficas.

292 Consultar página 250 (capítulo Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados) para una explicación detallada.

En la presente investigación se propone redefinir la definición de prolífico y basarla en el esfuerzo que debe desarrollar el compositor para obtener la composición final.

Para ello se propone que, habiendo una relación directa entre dicho esfuerzo y la cantidad de notas compuestas en cada obra, sea éste último el valor objetivo que cuantificará lo prolífico que es un compositor.

Dicho valor será la suma de todas las notas existentes en todas sus obras musicales catalogadas y se propone definirlo como “prolificidad compositiva” (*CPF Compositional prolificacy*).

El término “prolificidad” no está recogido en la mayoría de diccionarios pero es muy utilizado en ámbitos científicos como por ejemplo agropecuario para definir el número de crías por parto de una especie[99].

Debido a que en la presente investigación se propone una nueva definición del concepto de compositor prolífico basada en un valor cuantificable (en base a su prolificidad compositiva), se propone también la variable “*temporary compositional prolificacy*” (TCPF) que permitirá analizar el concepto de prolificidad compositiva dividida por el tiempo para poder comparar la prolificidad de compositores cuya periodo artístico (medido en años) sea diferente.

Por otro lado, el concepto de “obra extensa” también tiene una definición vaga y no cuantificada hasta la fecha. A veces se considera el tiempo de interpretación, su orquestación o combinaciones de éstos y otros factores. En esta investigación se propone el concepto cuantificable de “*Extensión of a Musical Piece*” (EMP) como el número de notas que componen una obra musical.

Para poder extraer dicha información de cada obra musical será necesario disponer de una versión en formato MIDI[100] de cada pieza del catálogo del compositor.

### Objetivo de la investigación.

El objetivo de la investigación realizada y presentada en esta investigación es, basándonos en los catálogos de sonatas de F.J.Haydn, W.A.Mozart, D.Scarlatti y L.v.Beethoven, comparar la clasificación de dichos compositores en función de los criterios tradicionales con la clasificación en base a su prolificidad compositiva, término propuesto en esta investigación.

También se ha realizado el mismo análisis aplicándolo a parte del catálogo de sinfonías de F.J.Haydn, W.A.Mozart, y L.v.Beethoven.

## **Metodología**

Se define en este apartado las herramientas utilizadas para llevar a cabo el estudio así como los conjuntos de piezas analizadas.

### Procedimientos.

La principal aportación tecnológica para este estudio ha sido la implementación de la aplicación informática AN\_MID v5.1; programa informático que extrae de cada pieza analizada (en formato MIDI) el número de notas de que consta.

### Compositores y grupos de piezas musicales utilizadas en las muestras.

Para realizar el estudio, se han seleccionado los colectivos de la Tabla 66. Estos archivos MIDI han sido descargados en su mayoría de *Classical Archives* [86].

Periodo compositivo	Forma musical	Total de piezas analizadas	Nº. de movimientos
<b>F.J. Haydn (1732-1809)</b>			
1756-1795	Todas las sonatas para piano (Hob XVI).	61	173
1775-1795	Sinfonías (Hob I/60 - 104) <sup>293</sup>	38	75
<b>W.A.Mozart (1756-1791)</b>			
1774-1789	Todas las sonatas para piano(forte)	18	48
1772-1788	Sinfonías (k.128/ n°16 - k.551/n°41) <sup>294</sup>	25	89
<b>Domenico Scarlatti (1685-1757)</b>			
1702-1757	Sonatas para clave (k001- k555) <sup>295</sup>	555	555
<b>L.v.Beethoven (1770-1827)</b>			
1793-1822	Todas las sonatas para piano.	32	74
1799-1824	Todas las sinfonías	9	36

Tabla 66: Lista de conjuntos de piezas musicales analizadas.

La columna periodo define el intervalo temporal en el que fueron compuestas dichas obras. La columna “Total de piezas analizadas” muestra el total de piezas catalogadas analizadas y la columna “Nº de movimientos” muestra el total de movimientos analizados (una sinfonía suele tener entre 3 y 5 movimientos normalmente).

No existe información publicada de las fechas exactas de composición de las sonatas de Domenico Scarlatti, por lo que se propone como periodo total compositivo desde que tenía 12 años hasta su muerte para garantizar unos resultados numéricos razonables.

Cada una de las 1049 piezas analizadas ha sido editada individualmente con un editor musical *Finale* para garantizar que el material musical estaba almacenado correctamente; realizando en el caso de que fuera necesario las siguientes operaciones:

- Eliminación del material musical asociado a la repetición de la exposición. El formato MIDI no permite especificar repeticiones musicales, por tanto, en caso de haberlas, los compases de material musical que se repite, aparece 2 veces en el fichero MIDI. Por tanto se ha eliminado las repeticiones de material musical donde apareciera ya que de no ser eliminadas la aplicación AN\_MID v5.1 consideraría el doble de notas de las realmente existentes en una sonata o sinfonía ya que en el periodo clásico tanto la sección de exposición como la de desarrollo se repetían<sup>296</sup>.
- En caso de detección de errores en el material musical en formato MIDI, compararlo y corregirlo con la partitura original de la pieza (obtenidas en [87]).

293 No se han incluido en la muestra las sinfonías 74, 75, 77, 78, 79, 80 y 81 porque no han sido encontradas versiones en formato MIDI en Internet.

294 No ha sido considerada la sinfonía 37 por ser considerada actualmente obra de Michael Haydn.

295 Ralph Kirkpatrick (1911-1984) clavecinista norteamericano y musicólogo, autor del más famoso catálogo de sonatas de Domenico Scarlatti.

296 Consultar página 259 (capítulo Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados) para una explicación detallada.



- Eliminación del material musical de la sección de percusión (timbales principalmente) por tener los redobles de timbal una gran cantidad de notas en formato MIDI y por tener estos redobles poco mérito compositivo.

No se considera ninguna distinción entre obras compuestas en modo mayor o menor ya que no hay indicios de que el esfuerzo compositivo sea diferente en cada caso<sup>297</sup>.

Los editores de partituras tienen utilidades que cuentan el número de notas pero no aplican un criterio musical sino un criterio editorial. La Figura 57 presenta una nota musical que dura 3 compases, sin embargo los editores de partituras consideran que este fragmento musical consta de 3 notas siendo en realidad musicalmente sólo una nota.



Figura 57: Diferencias en los criterios de recuento del número de notas.

### Terminología.

En esta investigación se propone la terminología de la Figura 58.

$n = n^\circ$  de movimientos musicales analizados (1 sonata tiene generalmente 3 movimientos)

$\bar{P} = \{P_1, \dots, P_n\}$  = Conjunto de movimientos musicales analizados en MIDI

$N_i$  = Número de notas del movimiento musical  $P_i$

$EMP_i = \sum_{j=1}^{\text{número de movimientos}} N_j$  (EMP de una sonata es la suma de todos los  $N_i$  de cada movimiento)

$t$  = Periodo compositivo de  $\bar{P}$  (medido en años)

$TrPF = m$  número de piezas catalogadas analizadas ( $m \leq n$ ) (Traditional Prolificy)

$TTrPF = \frac{m}{t}$  (Temporary Traditional Prolificacy medido en piezas catalogadas compuestas por año)

$CPF = \sum_{i=1}^n N_i$  (Compositional prolificacy de  $\bar{P}$ )

$TCPF = \frac{CPF}{t}$  (Temporary Compositional Prolificacy de  $\bar{P}$  medido en notas por año)

Figura 58: Terminología utilizada en esta investigación.

TCPF es un valor que permite comparar CPF de compositores con diferente longevidad. De este modo, compositores que murieron jóvenes pero con una gran producción pueden ser comparados con compositores que vivieron a lo largo de un periodo de tiempo mayor.

El conjunto de piezas  $\bar{P}$  tanto puede ser el catálogo completo de un autor como las piezas musicales compuestas en un periodo de tiempo concreto o pueden ser todas las composiciones de un autor de una forma concreta (sonata, concierto, sinfonía etc.). En dicho caso, los resultados numéricos obtenidos serán relativos al conjunto de piezas analizadas y/o al periodo analizado.

## Resultados

Calculando los valores definidos anteriormente con la aplicación AN\_MID y aplicándolos a las sonatas para teclado de los 4 compositores estudiados obtenemos los resultados de la Tabla 67.

297 Consultar página 261 (capítulo Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados) para una explicación detallada.

Forma/Compositor	nº	T (años)	CPF (notas totales)	TCPF (notas por año)
Sonatas Haydn	173	39	243.842	6252,1
Sonatas Mozart	54	15	129.177	8611,8
Sonatas Beethoven	100	29	258.403	8910,4
Sonatas Scarlatti	411	55	589.831	10724,2

Tabla 67: Valores de Compositional Prolificacy de las sonatas analizadas.

Si analizamos los índices de prolificidad desde el punto de vista musicológico tradicional, y basándonos en la definición de prolificidad tradicional como el número de piezas compuestas y la prolificidad temporal tradicional obtendremos los valores de la Tabla 68.

Forma/Compositor	TrCP (sonatas totales)	TTrCP (sonatas por año)
Sonatas/Haydn	61	1,56
Sonatas/Mozart	18	1,2
Sonatas/Beethoven	32	1,1
Sonatas/Scarlatti	555	10,09

Tabla 68: Valores de Traditional prolificacy de las sonatas analizadas.

Para poder comparar gráficamente los valores de CPF y TrCPF y por otro lado los valores de TCPF y TTrCPF debido a que están expresados en unidades diferentes normalizamos los valores de TCPF y CPF multiplicándolos por una constante según el cálculo resumido en la Figura 59.

$$CPF\_n = CPF * C_1 \quad / \quad C_1 = \frac{TrCPF_{Scarlatti}}{CPF_{Scarlatti}}$$

$$TCPF\_n = TCPF * C_2 \quad / \quad C_2 = \frac{TTrCPF_{Scarlatti}}{TCPF_{Scarlatti}}$$

Figura 59: Criterios de normalización de los resultados.

Los factores de normalización están basados en la obra de Domenico Scarlatti porque es el compositor con mayores valores de TrCPF y TTrCPF.

De este modo, la Figura 60 y Figura 61 muestran una comparación gráfica entre los resultados de prolificidad tradicional y del término propuesto en esta investigación CPF aplicados a las sonatas de la muestra.

### Comparación de CPF\_n y TrCP aplicada a la forma sonata

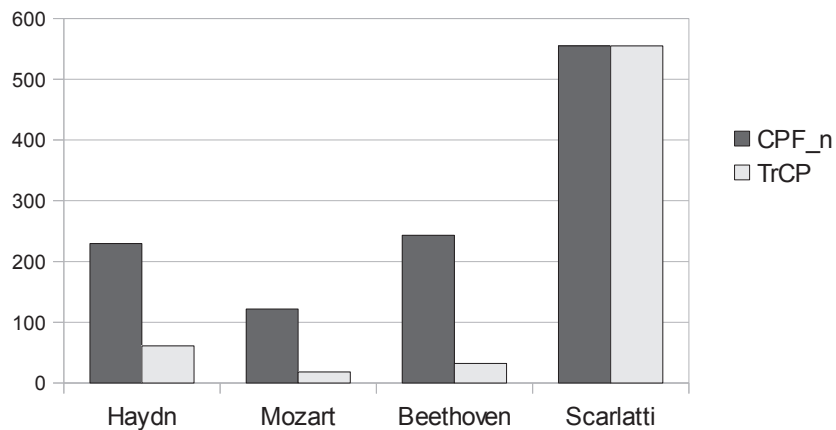


Figura 60: Comparación de los valores absolutos de compositional prolificacy (el tradicional y el nuevo valor propuesto en esta investigación)

En la Figura 60 podemos comprobar como el término propuesto CPF que considera el material musical escrito considera aproximadamente a los compositores Haydn y Beethoven aproximadamente un 45% de prolíficos comparados con Scarlatti; por el contrario la musicología tradicional considera a dichos compositores prolíficos entre un 3% y un 10% prolíficos comparados con Scarlatti si consideramos únicamente sus catálogos de composiciones sin considerar la extensión de sus obras (TrCPF).

Podemos comprobar también, que a pesar de que Beethoven compuso 29 sonatas menos que Haydn, estas totalizan un 6% más de notas compuestas, con lo que podemos considerar en base al indicador CPF a Beethoven más prolífico en términos absolutos componiendo sonatas para teclado que Haydn.

En la Figura 61 en la cual el tiempo que tardaron en componer dichas obras se tiene en cuenta, podemos comprobar que Mozart al tener una vida más corta casi iguala su *temporary compositional prolificacy* con Haydn. También podemos comprobar que el número de notas compuestas por año de Haydn, Mozart y Beethoven es un 83% comparado con Scarlatti (debido a la longevidad de este último).

Calculando los valores definidos anteriormente con la aplicación AN\_MID v5.1 y aplicándolos a las sinfonías de los 3 compositores estudiados obtenemos los resultados de la Tabla 69.

Sinfonías/Compositor	n	T (años)	CPF (notas totales)	TCPF (notes por año)
Haydn	75	17 <sup>298</sup>	733.009	43.118,2
Mozart	89	16	436.033	27.252,1
Beethoven	36	25	485.955	19.438,2

Tabla 69: Nuevos valores de compositional prolificacy de las sinfonías analizadas.

298 Este valor no considera el periodo compositivo de las sinfonías 74, 75, 77, 78, 79, 80 y 81

Si analizamos los índices de prolificidad desde el punto de vista musicológico tradicional, y basándonos en la definición de prolificidad tradicional como el número de piezas compuestas y la prolificidad temoral tradicional obtendremos los valores de la Tabla 70

### Comparación de TCPF\_n y TTrCPF aplicada a la forma sonata

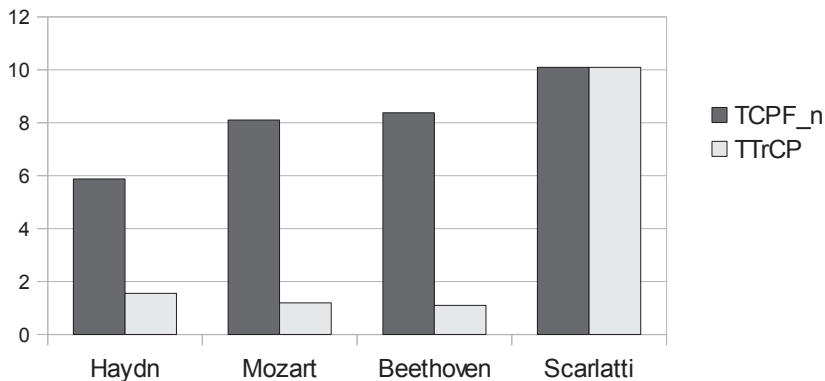


Figura 61: Comparación de los valores de *Temporary Compositional prolificacy* (tradicional y el propuesto en esta investigación).

Sinfonías/Compositor	TrCP (sinfonías totales)	TTrCP (sinfonías por año)
Haydn	38	2,24
Mozart	25	1,56
Beethoven	9	0,36

Tabla 70: Valores de *Traditional prolificacy* de las sinfonías analizadas.

Los factores de normalización utilizados en este caso están basados en la muestra de Haydn porque en esta muestra, es el compositor con mayores valores de TrCPF y TTrCPF.

De este modo la Figura 62 muestra una comparación gráfica entre los resultados de *temporary traditional compositional prolificacy* (TTrCPD) y del valor TCPF normalizado propuesto en esta investigación.

## Comparación de TCPF<sub>n</sub> y TTrCPF

aplicada a la forma sinfonía

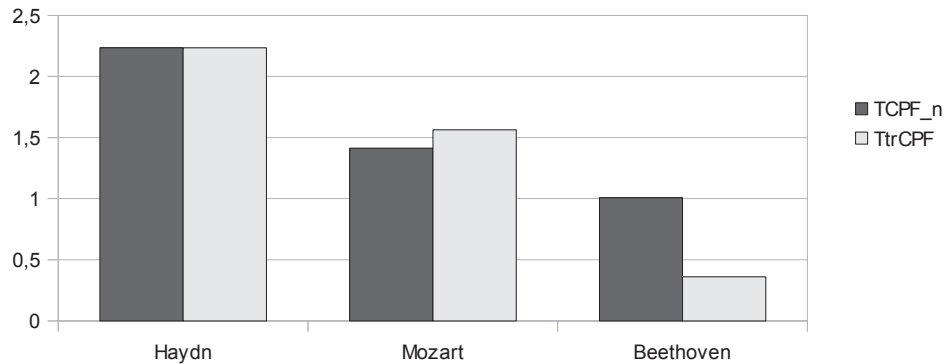


Figura 62: Comparación de los valores temporary compositional prolificacy (tradicional y la nueva propuesta) por compositores.

El principal resultado que se puede ver en la Figura 62 es que, a pesar de la cantidad de notas compuestas en una sinfonía de Beethoven es mucho mayor que el número que se encuentran en una sinfonía de Mozart, la cantidad de notas por año compuestas por Beethoven en sinfonías es muy pequeña (exactamente un 23% respecto a Mozart).

No se puede representar gráficamente los datos de CPF y TrCPF de las sinfonías porque la muestra de sinfonías de Haydn y Mozart no contiene todo el catálogo de sinfonías y los resultados inducirían a una impresión errónea.

Calculando los valores EMP de las últimas 5 sinfonías y ordenándolas en base a este valor, se han obtenido los resultados de la Tabla 71.

Haydn / n° Sinfonía	EMP (Número de notas)
101	26.873
104	26.796
100	26.650
102	22.475
103	22.393

Tabla 71: Número de notas de las sinfonías de Haydn más largas.

La Figura 63 muestra una representación gráfica de los valores EMP de todas las sinfonías analizadas de Mozart, Haydn y Beethoven en este estudio. Dicha figura muestra que la evolución del estilo musical de estos compositores está directamente relacionado a un incremento en los valores EMP de sus sinfonías.

La Figura 63 muestra que el valor EMP de la 9ª Sinfonía de Beethoven (con 107.556 notas) es cuatro veces mayor que el máximo EMP de las sinfonías de Haydn (la número 101 que tiene 26.873 notas). Ello ofrece un valor numérico y objetivo de cuan extensa es la 9ª Sinfonía de Beethoven comparada con la Sinfonía 101 de Haydn.

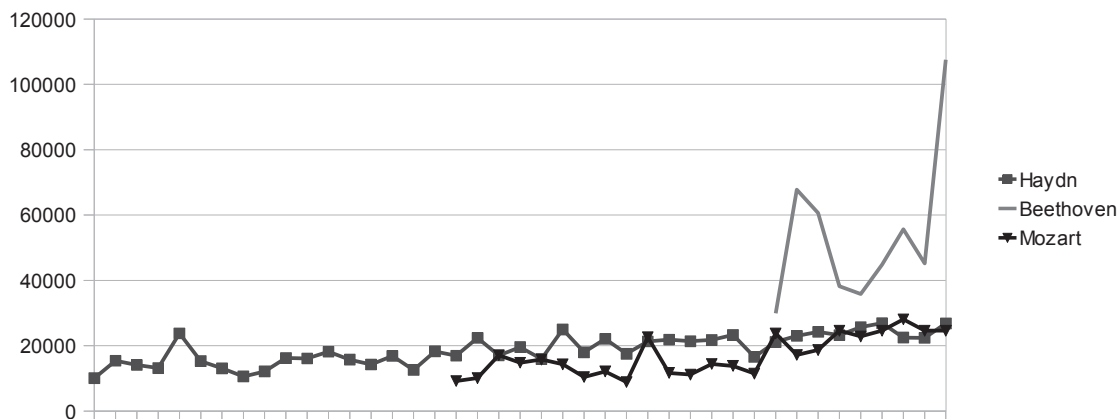


Figura 63: Evolución del valor EMP en las sinfonías analizadas en el estudio.

## Discusión

A pesar de que es válido omitir obras musicales en la muestra analizado siempre y cuando sea eliminado al valor de la variable  $t$  el tiempo que dedicó a la composición de las obras omitidas, sí que será imprescindible considerar las obras completas con todos sus movimientos.

La información publicada en los catálogos de las fechas de composición de las obras realmente es poco fiable porque en la mayoría de los casos dicha fecha corresponde a la fecha de publicación o a la fecha de su estreno. Por tanto, para minimizar los posibles errores derivados de ello se propone que los intervalos de tiempo utilizados en la variable “ $t$ ” sean los mayores posibles.

Otra cuestión muy importante a la hora de definir la muestra  $P$  y seleccionar los elementos que la componen para garantizar unos valores CPF y TCPF fiables, es asegurar la autenticidad de la composición. Como ejemplo, es importante decir que son ampliamente conocidas las dudas de los especialistas sobre la autenticidad de las sinfonías de Mozart números de catálogo K.17, K.A216, K.81, K.84 y K.98.

Por este motivo, no se han considerado en la muestra de sinfonías de Mozart analizadas ninguna anterior a la sinfonía nº16 en Do Mayor K.128 compuesta en 1772.

Definir cuanto material musical original tiene una pieza musical es tarea compleja (entendiendo por “material original” aquel que no es una re-exposición modificada rítmica o tonalmente del mismo) ya que los materiales musicales de la sección de re-exposición de una sinfonía clásica no son originales en ningún caso.

Esta cuestión no afecta a este estudio de la prolificidad compositiva de un compositor siempre que todas las piezas de las muestras  $P$  hayan sido creadas con el mismo criterio, es decir, se puede comparar la prolificidad compositiva de dos autores si en el material musical MIDI de la muestra están incluidas o no las repeticiones escritas en la partitura. La única condición es que los criterios aplicados sean los mismos en todas las muestras  $P$  consideradas.

En el análisis de la prolificidad compositiva de autores clásicos es importante en cualquier caso, eliminar las partes de timbal ya que ha sido considerado que sería el único caso en el que no hay una relación directa entre el esfuerzo compositivo del compositor y el número de notas compuestas.

Para poder comparar la prolificidad compositiva de dos compositores, es necesario que el reconocimiento de su valor creativo sea ampliamente reconocido ya que, en un caso extremo, se

podría componer en 5 minutos una sinfonía con 2500.000 notas (la misma nota siempre), siendo su valor musical igual a cero y a la vez tener más notas que cualquier sinfonía jamás compuesta.

La variable TCPF podría ser usada para analizar la prolificidad del compositor en una forma musical concreta a lo largo de diferentes periodos de su vida.

## **Futuras investigaciones.**

Hay una relación directa entre la duración de la interpretación de una obra y el número de notas en ella. Sin embargo, dicha relación no es proporcional. Estudiar la relación entre la duración y la complejidad de una obra en diferentes compositores será un estudio posterior.

Otro trabajo futuro, sería incorporar otras formas musicales (conciertos, óperas, oratorios etc.), otros compositores y estilos musicales (Romanticismo, Barroco etc.) al estudio.

Esta propuesta de valorar la prolificidad de un compositor en base al número de notas compuestas podría aplicarse también a la literatura y a la pintura y medir la prolificidad de un escritor en base al número de palabras escritas en vez del número de libros editados, así como medir la prolificidad de un pintor en base a los metros cuadrados de lienzo pintados en vez del número de cuadros pintados.

Otra propuesta de trabajo futuro sería analizar los valores TPFC de un compositor en diferentes periodos de tiempo de su vida para analizar de este modo su evolución creativa a la largo de su vida y poder con ello avalar o refutar las teorías musicológicas sobre los periodos de máxima prolificidad compositiva.

## **Conclusiones**

En esta investigación se ha propuesto una nueva definición del concepto de compositor prolífico basado en un valor numérico CPF (compositional prolificacy) que cuenta el número de notas compuestas en vez del número de obras musicales compuestas.

Basándonos en este valor CPF (medido en número de notas) aplicado a la forma sonata para teclado de los compositores Haydn, Mozart y Beethoven, se concluye que L.v.Beethoven con 32 sonatas es más prolífico que F.J.Haydn con 62 sonatas compuestas.

En esta investigación se ha propuesto una variable objetiva llamada EMP (*Extension of a Musical Piece*) que mide el esfuerzo desarrollado por el compositor para crearla. Dicha variable permite ordenar las sinfonías de Haydn por esfuerzo compositivo dedicado.

Se ha demostrado que los compositores de la muestra, a lo largo de su carrera compositiva han ido incrementando el EMP de sus sinfonías, con lo cual se considera que hay una relación directa entre la madurez compositiva de un compositor y el EMP de sus composiciones.

Basado en el concepto de CPF se ha derivado el concepto TCPF (*temporary compositional prolificacy* medida en notas compuestas por año) el cual tiene en cuenta el tiempo total invertido para crear sus composiciones. De este modo esta variable permite comparar la prolificidad de compositores longevos con la de compositores que desgraciadamente murieron jóvenes (como W.A. Mozart J.C.Arriaga etc.) y valorar numéricamente su velocidad de creación con respecto al tiempo.

Se ha demostrado que, a pesar de que las Sonatas de Domenico Scarlatti tienen sólo 1 movimiento y las de F.J:Haydn 2 o 3, Domenico Scarlatti fue 5 veces más prolífico que F.J.Haydn componiendo sonatas.

Esta afirmación está ceñida a la forma sonata porque sin duda alguna, F.J.Haydn trabajaba simultáneamente en diferentes obras de diferentes formas musicales.

En el caso de que se pudiera disponer de la totalidad del catálogo musical de G.F. Telemann en formato MIDI se podría certificar realmente si es el compositor más prolífico de la historia comparado con otros como J.S. Bach o G.F. Händel, F.J. Haydn o quien se quisiera comparar.



## **Capítulo 11. O.R.P.E.T. (*Objective Rhythmic Performance Evaluation Tool*) un método numérico objetivo de evaluación de la interpretación musical**

Consultar:

Tudurí A., Serra B., Mut T., "O.R.P.E.T. (Objective Rhythmic Performance Evaluation Tool) a numerical method to evaluate the accuracy of a musical performance", *Journal of Music, Technology & Education*, 2013, Volume 6 Issue 1, ISSN: 17527066 / Online ISSN: 17527074

# Capítulo 12. Identificación automática de la tonalidad de piezas musicales clásicas por medio de algoritmos evolutivos

## Introducción

La identificación de la tonalidad de una pieza musical clásica tonal a partir de su partitura sin conocer el número de alteraciones en su armadura, es un problema resuelto por medio del análisis musical tradicional mediante reglas que pueden ser implementadas por medio de sistemas expertos y análisis de acordes. Sin embargo, la variación de las reglas de composición y características de cada estilo compositivo en los diferentes periodos históricos pueden modificar dichas reglas.

Las soluciones a este problema hasta la fecha han sido inspiradas en la investigación de Krumhansl-Schmuckler[26] y Temperley[30]. Esta investigación, expone un método que resuelve el problema sin necesidad de tener en cuenta las modulaciones: la distancia ponderada entre el histograma de porcentaje de uso de cada nota de la pieza analizada y el histograma promedio a partir de una base de datos de piezas musicales conocidas (1620 piezas musicales).

El método no utiliza ninguna regla del análisis musical es válido para cualquier forma musical, instrumentación, modo y cualquier duración de la pieza con una fiabilidad del orden del 95%.

Las definiciones matemáticas están expresadas en inglés ya que esta investigación está previsto que sea publicada en una revista internacional y por tanto, para mantener la identificación de los términos matemáticos, se ha optado por no traducir los conceptos. En cualquier caso en la definición de los parámetros del método se presenta su traducción al castellano.

Esta investigación ha sido considerada por la revista Journal of New Musical Research, como carente de interés el resultado ya que, a pesar de reconocer que los resultados son mejores que los algoritmos de Temperley y posteriores, considera que el descubrir la tonalidad de una pieza no es un tema de interés.

Recordar que los algoritmos de Temperley y Krumhansl-Schmuckler presentan algoritmos para deducir la tonalidad (o el acorde) que está sonando en cada instante.

Sin embargo, consideramos que el hecho de que sea cual sea el camino recorrido por las tonalidades en el discurso musical de la obra, se pueda descubrir con un grado de fiabilidad alto la tonalidad de la obra utilizando el porcentaje de utilización de cada nota respecto la tonalidad, avala la hipótesis de que descubrir los factores identificativos del estilo compositivo de un autor clásico con identificadores de bajo nivel sin tener en cuenta las tonalidades por las que modula la pieza en su diferentes secciones es válida.

### Identificación del problema

La identificación de la tonalidad de una pieza musical clásica tonal no es un problema de fácil solución por medio de una aplicación informática ya que depende de un conjunto de reglas aplicables conjunta o separadamente las cuales ninguna de ellas tiene un ámbito de aplicación en todos los casos. Dicha dificultad es mayor si la pieza musical está compuesta para un sólo instrumento monofónico<sup>313</sup> (como pueden ser las partitas para violín solo o las suites para violonchelo sólo de J.S.Bach) ya que la mayoría de reglas están basadas en la armonía y los acordes que aparecen en determinados lugares de la pieza (al principio y al final generalmente en una pieza clásica o barroca).

---

<sup>313</sup> Instrumentos que generalmente tocan una sola nota a la vez.

Sin embargo mediante un análisis visual de la partitura por un músico será fácil identificar la tonalidad de estas piezas para instrumento solo.

A medida que el estilo compositivo evolucionó históricamente hacia al Romanticismo es más difícil identificar fácilmente la tonalidad de una pieza. De hecho, el tiempo que necesita un oyente experto para identificar en un punto de la audición de una pieza musical la tonalidad que se está utilizando en ese instante es mayor en una pieza romántica que de una pieza barroca y en especial de una pieza clásica. El paso final en esta evolución fue el desarrollo de la música atonal

No hay un método determinista que permita identificar la tonalidad de una pieza de manera unívoca.

Las investigaciones para resolver este problema se puede clasificar como métodos numéricos y simbólicos como se explicará más adelante en detalle en el apartado “Capítulo 2. Revisión de investigaciones realizadas”(a partir de la página 62). Los primeros se basan en el proceso masivo de grandes cantidades de datos extraídos de la pieza musical (conocidos como MIR<sup>314</sup>) y los segundos (métodos simbólicos) por medio de técnicas como los sistemas expertos que implementan las reglas de la teoría musical clásica y implementan en un ordenador el proceso deductivo clásico.

Pocas investigaciones sin embargo han abordado la identificación de la tonalidad de grandes volúmenes de piezas musicales clásicas heterogéneas en cuanto a su forma, instrumentación y duración, por contener dichas piezas musicales gran cantidad de modulaciones<sup>315</sup> en su discurso musical.

El formato MIDI incluye en sus especificaciones un mensaje que identifica las alteraciones que lleva la armadura<sup>316</sup> de la pieza musical. Este mensaje permitiría reducir el número de tonalidades posibles de la pieza musical a dos<sup>317</sup> (el modo Mayor y su relativo menor), sin embargo existe en Internet gran cantidad de piezas musicales clásicas en formato MIDI que, debido al modo en el cual han sido secuenciadas no incluyen dicho mensaje MIDI.

De este modo, éste método podría ser utilizado por los grandes portales servidores de ficheros MIDI para aportar en la indexación de cada pieza su tonalidad. En cualquier caso, cada fichero MIDI debe incluir un sólo movimiento de una pieza musical, es decir, una sinfonía compuesta por cuatro movimientos, a pesar de que se la identifique a toda la sinfonía con una tonalidad, realmente dicha tonalidad asociada a la sinfonía suele ser la tonalidad del primer y último movimiento que suelen coincidir en las piezas compuestas en el periodo clásico.

Tras observar que, sea cual sea el recorrido tonal de una obra clásica extensa, existe un patrón similar en el porcentaje de uso de cada nota. Esta investigación propone un único método numérico para identificar la tonalidad de una pieza musical barroca, clásica o romántica independientemente de su forma musical, instrumentación, duración buscando la mínima distancia entre los 12 histogramas posibles a partir de la frecuencia de uso de cada una de las 12 notas del sistema tonal y el histograma promedio de uso de cada uno de los grados de las escalas mayores y menores generado a partir de una muestra maestra de piezas clásicas con tonalidad conocida (ver Figura 76 en la página 190). Este método es parecido al diseñado por Krumhansl-Schmuckler[26] y mejorado por Temperley[30] entre otros pero utiliza como herramienta estadística una medida de distancia euclidiana ponderada en vez de una correlación de variables.

---

314 Music Information Retrieval.

315 Consultar la página 251 (capítulo “Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados”) para una explicación detallada.

316 Consultar la página 229 (capítulo “Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados”) para una explicación detallada.

317 Por ejemplo, una armadura con 3 bemoles implica que la tonalidad de la pieza probablemente será Mi b Mayor o Do menor.

Se ha definido el método como un método de “bajo nivel” porque basa su funcionamiento en algo muy simple como es el número de veces que se utiliza de cada nota sin utilizar ninguna de las reglas heurísticas de la educación en armonía tradicional creadas para ayudar al músico a identificar la tonalidad de una pieza musical tonal. El método de Temperley suma la duración total de todas las notas de cada clase (12 clases según el sistema tonal).

### Objetivo de la investigación

El objetivo de la investigación resumida en este capítulo ha sido crear un método numérico matemático que permita identificar la tonalidad de una pieza musical clásica en formato MIDI utilizando la frecuencia de uso de cada una de las 12 notas del sistema tonal en toda la obra y comparándola con una base de datos de piezas musicales clásicas con tonalidad conocida de las cuales se ha extraído el porcentaje de uso de cada una de las notas.

Dicha muestra maestra de 1620 piezas musicales recoge piezas de diferentes estilos musicales (barroco, clásico y romántico) y compositores diversos para garantizar la suficiente heterogeneidad que permitirá aplicar el método a piezas musicales compuestas entre el siglo XVII y la primera mitad del siglo XIX.

El sistema debe obtener unos porcentajes de éxito aceptables para garantizar la fiabilidad del método sea cual sea la instrumentación, la magnitud de la obra, el estilo musical, la época histórica y la forma musical de la pieza analizada.

El método debe solucionar el problema de los métodos basados en el análisis de los acordes utilizados ya que dichos métodos sólo pueden aplicarse a piezas polifónicas y por tanto, no pueden aplicarse a “suites” ni “partitas” compuestas para instrumentos monofónicos.

El método también debe identificar la tonalidad de la pieza analizada sean cuales sean las diferentes tonalidades por las cuales el discurso musical modula<sup>318</sup> en su partitura.

Para finalizar, se ha probado la efectividad del método sobre el mismo corpus de piezas musicales en los que fueron probados los métodos de Krumhansl-Schmuckler[26] y Temperley[30].

## **Metodología**

Esta sección del estudio enumera las herramientas utilizadas así como los conjuntos de compositores y obras utilizados en el estudio.

### Resultados de la aplicación AN\_MID v5.1

Para cada una de las 'n' piezas procesadas por el programa AN\_MIDv5.1 extrae los datos de la Figura 73.

$$MP_i = (NP_{i,1} \dots NP_{i,12}) / 1 \leq i \leq n$$

*Figura 73: Valores extraídos por AN\_MID v5.1 de cada pieza analizada.*

$NP_{i,j}$  (*Note Percentage*) es el porcentaje de aparición en la pieza musical de la nota j respecto el total de notas identificadas en la pieza musical. Las notas son C, C#, D, D# E, F, F#, G, G#, A, A#, B, teniendo en cuenta que las notas han sido transportadas a Do Mayor, es decir,  $NP_{i,1}$  contiene el

---

318 Las piezas de música clásica tonal incluyen diferentes tonalidades secuenciadas en el tiempo que dura la obra pero sólo una de ellas es la tonalidad de la pieza (generalmente con la que empieza y termina la pieza). El instante en que la pieza pasa de una tonalidad a otra recibe el nombre de “modulación”. Consultar la página 251 (capítulo “Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados”) para una explicación detallada.

número de veces que aparece la nota tónica en la pieza “j”. Dicha tonalidad se extrae del fichero MIDI en su correspondiente evento MIDI.

Estos valores extraídos de cada fichero MIDI permiten:

- Comparar piezas musicales de diferente duración porque el número de apariciones de cada nota se divide por el número total de notas de la pieza musical.
- Comparar piezas de diferente orquestación porque cada acorde tiene un número limitado de notas y en una pieza para orquesta hay notas repetidas en diferentes voces.
- Comparar piezas de diferente forma musical o construcción formal porque el método propuesto en esta investigación no analiza la estructura de los elementos (temas, motivos etc.) de la pieza musical.

Estos valores de la Figura 73 variables cumplirán las propiedades de la Figura 74.

$$\sum_{k=1}^{12} NP_{i,k} = 1 \quad \forall i / 1 \leq i \leq n$$

*Figura 74: Los valores obtenidos cumplen estas propiedades..*

### Compositores y grupos de piezas musicales incluidas en la muestra maestra

Para probar la hipótesis, se han seleccionado los colectivos de la Tabla 75. Estos archivos MIDI han sido descargados de [86] y [101].

La columna “Nº. de movimientos analizados” (una sinfonía clásica tiene entre 3 y 5 movimientos). El conjunto de piezas contiene 1406 piezas compuestas in modo Mayor<sup>319</sup> y 214 compuestas en modo menor. En total, la muestra incluye 1620 piezas musicales con 4.434.638 notas.

El conjunto de piezas seleccionadas de cada compositor romántico incluye principalmente sinfonías, sonatas para piano, sonatas para violín viola y violonchelo, cuartetos y quintetos de cuerda y piezas para piano de diferente forma (serenatas, baladas, etc.).

Cada una de las 10620 piezas analizadas ha sido editada individualmente con un editor musical *Finale* para garantizar que el material musical estaba almacenado correctamente; realizando en el caso de que fuera necesario las siguientes operaciones:

- Eliminación del material musical asociado a la repetición de la exposición. El formato MIDI no permite especificar repeticiones musicales, por tanto, en caso de haberlas, los compases de material musical que se repite, aparece 2 veces en el fichero MIDI. Por tanto se ha eliminado las repeticiones de material musical donde apareciera<sup>320</sup>.
- En caso de detección de errores en el material musical en formato MIDI, compararlo y corregirlo con la partitura original de la pieza (obtenida en [87]).
- Eliminación del material musical relacionado con instrumentos de percusión (timbales principalmente) porque los redobles de timbal tienen en formato MIDI muchas notas pero no aportan valor compositivo.

319 Consultar página 261 (capítulo Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados) para una explicación detallada.

320 Consultar página 259 (capítulo Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados) para una explicación detallada.

Periodo compositivo/ Compositor/ número de intervalos analizados	Forma musical	Nº. de movimientos analizados.
Periodo Barroco		636 piezas
Antonio Vivaldi (1678-1741)	Diversos conciertos	48
J.S.Bach (1685-1750)	Diversas piezas (suites, conciertos, piezas para clave etc.).	138
G.F.Händel (1685-1759)	Diversas piezas (suites, conciertos, piezas para clave etc.).	82
D. Scarlatti (1685-1757)	Sonatas para clave	368
Periodo Clásico		744 piezas
F.J. Haydn (1732-1809)	Todas las sonatas para clave (Hob XVI).	146
	Sinfonías (Hob I/60 - 104) <sup>321</sup>	174
	Cuartetos (Hob III Op.1, 2, 3, 20, 33, 42, 50, 52, 54, 64, 74, 76 y 77)	189
W.A.Mozart (1756-1791)	Todas las sonatas para piano(forte)	58
	Sinfonías (k.128/ nº16 - k.551/nº41) <sup>322</sup>	81
	Todos los cuartetos (23)	96
Periodo Romántico		240 piezas
Johannes Brhams (1833-1897)	Diversas piezas	27
L.v.Beethoven (1770-1827)	32 Piano Sonatas	100
	9 Sinfonías	36
Robert Schumann (1810-1856)	Diversas piezas	29
Antonín Dvořák (1841-1904)	Diversas piezas	48

Tabla 75: Lista de conjuntos de piezas analizadas.

### Explicación del método propuesto

Se presenta a continuación el método propuesto para identificar la tonalidad de cada pieza musical.

Se asume que el colectivo de 'n' piezas utilizadas como maestra para, conociendo sus tonalidades, identificar la tonalidad de otras piezas musicales es lo suficientemente elevado para dar fiabilidad a la aplicación del método.

El método se compone de 3 pasos los cuales los 2 y la 3 se realizarán en el mismo orden para cada pieza musical que se desee conocer su tonalidad.

Paso1. Proceso de la muestra maestra. A partir de las versiones MIDI de las piezas musicales de la muestra maestra de piezas musicales de tonalidad conocida, obtener utilizando la aplicación AN\_MID v5.1 el porcentaje de uso de cada nota en cada una de las piezas de la muestra maestra (Tónica<sup>323</sup>, supertónica, mediantes, etc.).

321 No se incluye en la muestra las sinfonías nº 74,75,77-81 porque no ha sido localizada ninguna fuente MIDI.

322 No ha sido considerada la sinfonía 37 porque en la actualidad es atribuida a *Michael Haydn*.

323 Consultar página 246 (capítulo Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados) para una explicación detallada.

Paso2. Cálculo de la nota tónica. En este paso se calcula cuál es la nota del sistema tonal con mayor probabilidad de que sea la nota tónica de la tonalidad de cada pieza musical evaluada (con probabilidad de éxito del 94,74% en las pruebas realizadas). En el caso de que este paso identifique la nota F (Fa) como la nota tónica, de una pieza musical, se realizará el siguiente paso (paso 3) para identificar si la tonalidad es Fa Mayor (con 1 bemol en la armadura<sup>324</sup>) o Fa menor (con 4 bemoles en la armadura).

Paso3. Cálculo del modo. En este paso se calcula para cada pieza evaluada cual de los dos modos (Mayor, menor) es el más probable que esté asociado a la nota identificada como nota tónica en el paso 2 (con probabilidad de éxito del 97,72 % en las pruebas realizadas).

### Paso 1. Proceso de la muestra maestra

En primer lugar se calcula el vector MP de 12 elementos que contiene los valores promedio de cada variable NP de las piezas de la muestra maestra tal como muestra la Figura 75.

$$\overline{MP} = (\overline{NP}_1, \dots, \overline{NP}_{12}) \quad / \quad \overline{NP}_i = \frac{\sum_{j=1}^n NP_{j,i}}{n}$$

Figura 75: Cálculo del vector MP vector a partir de la muestra de piezas.

Dicho vector para la muestra maestra de 1620 piezas analizadas expuestas en la Tabla 5 calculado por la aplicación AN\_MIDv5.1 contiene los valores expresados en la Tabla 76.

$\overline{MP}$	$\overline{NP}_1$	$\overline{NP}_2$	$\overline{NP}_3$	$\overline{NP}_4$	$\overline{NP}_5$	$\overline{NP}_6$	$\overline{NP}_7$	$\overline{NP}_8$	$\overline{NP}_9$	$\overline{NP}_{10}$	$\overline{NP}_{11}$	$\overline{NP}_{12}$
Nota <sup>325</sup>	C	C#	D	Eb	E	F	F#	G	Ab	A	A#	B
%	17,15	1,33	13,39	3,41	10,96	9,32	3,17	18,22	2,61	8,70	2,85	8,88

Tabla 76: Porcentaje promedio de uso de cada clase de nota en la muestra maestra de piezas musicales.

Es importante recordar que la muestra maestra de 1620 piezas contiene piezas de todas la tonalidades y que el valor de 17,22% (mostrado en Tabla 76) corresponde al promedio de aparición de la nota tónica en cada pieza (la nota Do en las piezas compuestas en Do Mayor y Do menor y la nota Sol en las piezas compuestas en Sol Mayor y Sol menor).

La Figura 76 representa gráficamente los porcentajes promedio de uso de cada nota de la Tabla 76 (transportado a la tonalidad de Do Mayor). Visualmente el gráfico sugiere que el patrón de la estructura geométrica del gráfico solo puede repetirse en ciclos 12 notas por lo que una función de distancia euclidiana ponderada que mide la distancia entre los promedios de uso de notas de la muestra maestra y los de la pieza musical evaluada puede ser una solución para identificar automáticamente la tonalidad de una pieza.

Los valores que aparecen sombreados en la Tabla 76 tienen poca relevancia porque son las notas cuya aparición o no determinan el modo de la pieza. Dichos valores sombreados no serán utilizados en el paso 2 pero sí que serán utilizados en el paso 3.

324 Consultar la página 229 (capítulo “Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados”) para una explicación detallada.

325 En relación con la tonalidad de Do Mayor.

### Porcentaje de uso de cada nota

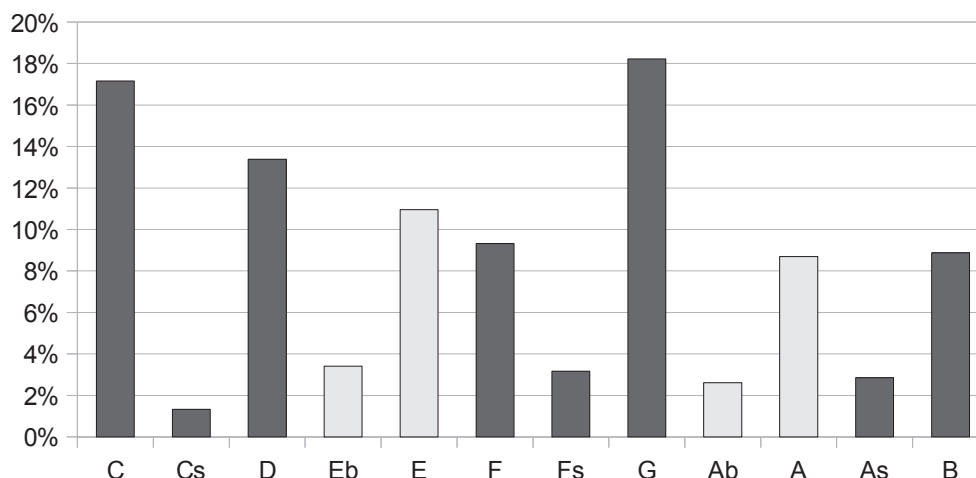


Figura 76: Representación gráfica del porcentaje promedio de uso de cada clase de nota en la muestra maestra de piezas musicales la cual contiene 1620 piezas musicales.

Para poder utilizar en el paso 3 las notas sensibles al modo de la pieza (Eb, E, Ab y A) se calculan los promedios de las piezas compuestas en modo Mayor (definido como  $n_M$ ) y en modo menor (definido como  $n_m$ ) por separado; por medio de los vectores  $\overline{MPM}$  y  $\overline{MPm}$  como se expresa en la Figura 77.

$$\overline{MPM} = (\overline{NPM}_1, \dots, \overline{NPM}_{12}, ) \quad / \quad \overline{NPM}_i = \frac{\sum_{j=1}^{N_M} NP_{j,i}}{n_M} \quad / \quad 'j' \text{ piezas compuestas en modo Mayor}$$

$$\overline{MPm} = (\overline{Npm}_1, \dots, \overline{Npm}_{12}, ) \quad / \quad \overline{Npm}_i = \frac{\sum_{j=1}^{N_m} NP_{j,i}}{n_m} \quad / \quad 'j' \text{ piezas compuestas en modo menor}$$

$$n_M + n_m = n$$

Figura 77: Expresión del promedio de uso de cada clase de nota separando las piezas musicales en función del modo de su tonalidad (Mayor o menor).

La Tabla 77 muestra los valores de  $\overline{NPM}$  y  $\overline{Npm}$  de las notas Eb, E, Ab y A que son los valores de las notas que serán utilizados para el cálculo del modo.

	% Eb (nota 4)	% E (nota 5)	% Ab (nota 9)	% A (nota 10)
$\overline{NPM}$ Mayores	2,04	12,27	1,9	9,45
$\overline{Npm}$ menores	12,38	7,85	5,39	6,07

Tabla 77: Porcentaje promedio de uso de las notas Mi b, Mi, La b y La (transportadas a Do) separándolas por piezas compuestas en modo Mayor o menor.



Por último, el paso 1 incluye un proceso de optimización de la función explicada a continuación en el paso 2, sin embargo, dicho proceso, a pesar de formar parte del paso 1, será explicado en la explicación del paso 2 para facilitar su comprensión después de haber presentado la Figura 78.

### **Paso 2. Cálculo de la nota tónica**

En este paso, el método calcula el vector  $TDH_i$  (*Tone Distance Histogram*) para cada pieza 'i'.

$$TDH_i = (TD_{0,i}, \dots, TD_{11,i}) \quad \forall i / 1 \leq i \leq n$$

$$TD_{k,i} = \sum_{j \in \{1,2,3,6,7,8,11,12\}} C_j * [NP_{i,(j+k) \bmod 12} - \overline{NP}_j]^{\exp_j}$$

Figura 78: Expresión matemática del “Histograma de distancia tonal” (*Tone Distance Histogram*).

Para el cálculo de la tonalidad, de las 12 notas del sistema tonal, se excluyen de la fórmula los que corresponden a las notas Eb, E, Ab y A (índices 4, 5, 9 y 10) ya que la utilización de dichas notas es diferente si el modo de la pieza es Mayor o menor.

El índice “ton” del vector  $TDH_i$  cuyo valor de  $\underline{TD}_{\text{ton},i}$  sea menor y más próximo a 0 será el indicador de cuál es la nota tónica con una probabilidad del 94,74%.

Por ejemplo, un índice ton=5 identificará la nota tónica como la nota Fa y un indicador ton=7 identificará la tónica como la nota Sol.

Los valores  $C_j$  y  $\exp_j$  de la Figura 78 son valores modificables que asignan pesos a las diferentes notas en la definición de la nota tónica y dependen de las piezas musicales que incluye la muestra maestra de piezas conocidas. La elección de dichos valores es recomendable que sea hecha por un proceso de programación matemática que por medio de un proceso iterativo maximice el porcentaje de éxito de la función sobre las propias piezas musicales de la muestra maestra las cuales es fácil estimar su tonalidad y compararla con la tonalidad real obteniendo un índice de fiabilidad del método.

Este proceso de optimización formaría parte del paso 1, pero aparece descrito aquí en la explicación del paso 2 para facilitar la comprensión del uso de los coeficientes  $C_j$  y de los exponentes  $\exp_j$ .

En la sección “Resultados” de esta investigación (página 192), se explica con detalle el proceso de optimización de la función utilizado.

### **Paso 3. Cálculo del modo**

Una vez se ha realizado el paso 2 se ha obtenido con una fiabilidad del 94% una nota como la nota tónica de la tonalidad de la pieza “i” que identificaremos como “ton” (definida en detalle en el paso 2).

El paso 3 consiste en primer lugar en el cálculo del vector  $\overline{MDH}_i$  (*Mode Distance Histogram*) por medio de la expresión de la Figura 79 para cada pieza musical que se desee identificar su tonalidad.

$$MDH_i = (MDM_i, \dots, MDm_i)$$

$$MDM_i = \sum_{j \in \{4,5,9,10\}} [NP_{i, (j+ton) \bmod 12} - \overline{NPM}_{(j+ton) \bmod 12}]$$

$$MDm_i = \sum_{j \in \{4,5,9,10\}} [NP_{i, (j+ton) \bmod 12} - \overline{NPM}_{(j+ton) \bmod 12}]$$

Figura 79: Expresión matemática de la distancia euclidiana de la pieza 'i' al modo Mayor o menor.

Y en segundo lugar comparando los valores  $MDM_i$  y  $MDm_i$  se obtiene con un porcentaje muy alto de éxito (del orden del 97%) el modo de la pieza evaluada tal como se muestra en la Figura 80.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Si } (MDM_i < MDm_i) \text{ pieza musical 'i' está compuesta en modo Mayor} \\ \text{Si } (MDM_i > MDm_i) \text{ pieza musical 'i' está compuesta en modo menor} \\ \text{Si } (MDM_i = MDm_i) \text{ no hay información suficiente para poder evaluar la pieza 'i'} \end{array} \right\}$$

Figura 80: Condiciones a evaluar usando el vector MDH para inferir el modo de la pieza 'i'.

La probabilidad de que se cumpla la 3ª condición es despreciable ya que la aplicación AN\_MIDv5.1 genera los valores porcentuales de uso de cada nota ( $NP_{i,j}$ ) expresados en tantos por 1 con 4 decimales (es decir el valor 0,1745 significa un porcentaje de unos del 17,45%).

## Resultados

Para medir la fiabilidad del método se presenta en esta investigación un primer experimento en el que se han utilizado como piezas a evaluar su tonalidad las mismas de la Tabla 75 (página 188) aplicando los pasos 2 y 3 del método propuesto a cada una de las 1620 piezas también utilizadas para calcular el vector MP de la Figura 75 en el paso 1.

A continuación se presentan los resultados de un segundo experimento en el que se ha aplicado 3 veces el método de identificación propuesto en esta investigación (pasos 1-3) a 3 muestras maestras de piezas musicales conteniendo cada una de ellas las piezas musicales de cada estilo musical de la muestra maestra inicial (Clasicismo, Barroco y Romanticismo).

A continuación, se presentarán los resultados de la aplicación del método presentado en este capítulo al mismo corpus de piezas que han aplicado los diferentes autores desde el trabajo de Temperley[30] para poder analizar su eficiencia: preludios y fugas de “El Clave Bien Temperado” de Bach (BWV 846-869, 870-893)<sup>326</sup> y a los preludios para piano Op.28<sup>327</sup> de F.Chopin.

Así pues se define el porcentaje de éxito del método aplicado a una muestra maestra de “n” piezas con la expresión de la Figura 81.

$$\text{Porcentaje de éxito} = \frac{\text{n}^\circ \text{ de piezas musicales de la muestra maestra cuya tonalidad ha sido identificada correctamente}}{\text{número de piezas en la muestra (n)}} * 100$$

Figura 81: Expresión usada para evaluar el porcentaje de éxito del método.

326 Consultar la página 314 (capítulo “Anexo 4 – Información de compositores analizados y catalogación.”) para una explicación detallada.

327 Consultar la página 319 (capítulo “Anexo 4 – Información de compositores analizados y catalogación.”) para una explicación detallada.

### Primer experimento: La totalidad de la muestra de piezas musicales

Se detalla en este apartado los resultados obtenidos aplicando el método propuesto a la totalidad de la muestra maestra de piezas musicales de la Tabla 75 (página 188).

Utilizando los valores parametrizables de la función de la Figura 78 expresados en la Figura 82, se obtienen los porcentajes de éxito del método expresados en la Tabla 78.

$$C_j=1 \quad / \quad \exp_j=1 \quad \forall j \in \{1,2,3,6,7,8,11,12\}$$

Figura 82: Primer conjunto de valores probados para evaluar el método.

Modo de la tonalidad de pieza	Mayor	menor	promedio
% de éxito del Paso 2 del método con los valores de la Figura 82	95,73%	69,16%	82,45%

Tabla 78: Porcentajes de éxito del método utilizando la distancia euclidiana.

Para optimizar la función se ha aplicado el método evolutivo<sup>328</sup> de la aplicación *Microsoft Excel 2010* para maximizar el promedio de éxito en la identificación automática mediante el método propuesto en este capítulo de las 1406 piezas compuestas en modo mayor y las 214 compuestas en modo menor de la misma muestra maestra de la Tabla 75 (página 188).

Las restricciones aplicadas están expresadas en la Figura 83. Las restricciones indican que el intervalo de valores posibles de  $C_j$  y  $\exp_j$  es  $[-60,60]$  y que dichos valores analizados se incrementan en intervalos de 0,1.

$$\begin{aligned} -60 < C_j, \exp_j \leq +60 \quad \text{y} \quad C_j, \exp_j \neq 0 \\ [C_j * 10] = C_j * 10 \quad \text{y} \quad [\exp_j * 10] = \exp_j * 10 \\ \forall j \in \{1,2,3,6,7,8,11,12\} \end{aligned}$$

Figura 83: Restricciones aplicadas en el proceso de optimización.

El número de soluciones posibles utilizando las restricciones de la Figura 83 es de  $1199^{16} = 1,824 \times 10^{49}$  que es un número de soluciones incalculable en un tiempo razonable con la potencia de cálculo a disposición de esta investigación. Por ello, en el proceso de optimización se ha establecido un tiempo máximo sin mejora en la última mejor solución hallada.

El proceso de optimización ha finalizado tras un tiempo máximo de análisis de posibles soluciones sin hallar una solución mejor de 15.000 s (4 horas y 9 minutos aproximadamente) establecido antes de iniciar el proceso de optimización. Ello no asegura que la solución hallada sea la mejor solución, pero es una solución que da al método una fiabilidad del 95% suficiente en un entorno de análisis estadístico.

Y los resultados obtenidos por dicho proceso de optimización son los expresados en la Tabla 79. Los valores  $C_j$  más elevados identifican los términos más significativos en la función de distancia en especial los valores  $\exp_1$  y  $\exp_3$  correspondientes a las notas Do y Re (en la tonalidad de Do Mayor/menor). Por otra parte los valores  $C_j$  menores identifican los términos menos significativos

328 Consultar la página 265 (capítulo “Anexo 2 – Conceptos TIC y matemáticos utilizados.”) para una explicación detallada.

en la función de distancia en especial los valores  $exp_{11}$  y  $exp_{12}$  correspondientes a las notas La# y Si en la tonalidad de Do Mayor/menor).

Índice	1	2	3	6	7	8	11	12
$C_j$	22,3	7,1	45,1	15,4	7,8	3	2,2	2,7
$exp_j$	2,4	47,3	3,1	2,4	36,2	1,5	33,7	1,9

Tabla 79: Coeficientes obtenidos tras el proceso de optimización.

Con los valores de la Tabla 79 y tras aplicar el paso 2 del método propuesto se han obtenido los porcentajes de éxito expresados en la Tabla 80.

Modo de la tonalidad de la pieza	Mayor	menor	promedio
% de éxito del Paso 2 del método con los valores de la Tabla 79	95,09%	92,99%	94,74%

Tabla 80: Porcentajes de éxito tras el proceso de optimización.

Es decir, tras aplicar el paso 2 y tras el proceso de optimización de los coeficientes (Tabla 79), el porcentaje de piezas las cuales el método ha identificado correctamente la tonalidad (la nota tónica de la tonalidad) ha sido del 94,74%.

Tras la aplicación del paso 3 a las 1620 piezas musicales de la Tabla 5, los porcentajes de éxito de este paso del método son los resumidos en la Tabla 81.

		Modo estimado	
		Mayor	menor
Modo real	Mayor	93,53%	6,47%
	menor	4,21%	95,79%

Tabla 81: Porcentajes de éxito del Paso 3 del método aplicado a la muestra analizada.

Los resultados de la Tabla 81 han sido realizados sobre una tasa de éxito del 100% en el paso 2 y no se han tenido en cuenta probabilidades condicionadas.

La Tabla 82 muestra los porcentajes de éxito en la identificación de la tonalidad por estilo musical y se puede observar que las piezas de estilo clásico son las que tienen una mayor tasa de éxito y las piezas de estilo romántico las que tienen una menor tasa de éxito. Dicho resultado es previsible por dos motivos: En primer lugar la libertad en los recursos de composición en el romanticismo era mucho mayor que en el Clasicismo y en segundo lugar hay que tener en cuenta que la mayoría de piezas de la muestra maestra de la Tabla 75 (página 188) son de estilo clásico y barroco, por tanto es lógico que el método propuesto aplicado a dicha muestra identifique mejor la tonalidad de las piezas clásicas y barrocas.

Periodo musical	Porcentaje de éxito
Barroco	96,38%
Clasicismo	95,97%
Romanticismo	87,08%

Tabla 82: Porcentajes de éxito agrupados por periodo musical.

La Tabla 83 resume los porcentajes de éxito en la identificación de la tonalidad por compositor y se puede observar que las piezas de compositores de estilo clásico (F.J.Haydn y W.A. Mozart) son las que tienen una mayor tasa de éxito y las piezas de compositores de estilo romántico las que tienen una menor tasa de éxito. Dicho resultado es también debido a los mismos dos motivos que los utilizados para justificar los resultados de la Tabla 82.

Compositor	% de éxito
F.J.Haydn	95,87%
W.A.Mozart	96,17%
J.S.Bach	94,20%
G.F.Händel	92,68%
A. Vivaldi	95,83%
D. Scarlatti	98,10%
A. Dvořák	83,33%
L.v.Beethoven	87,50%
R.Schumann	93,10%
J.Brahms	85,15%

Tabla 83: Porcentajes de éxito agrupados por compositor.

### Segundo experimento: Tres muestras de piezas musicales agrupadas por periodo musical

Se presentan en este apartado los resultados de la aplicación del método por separado a cada uno de los subconjuntos de piezas musicales de la muestra maestra de cada periodo musical (Clasicismo, Barroco y Romanticismo).

La Tabla 84 muestra los valores  $exp_j$  y  $C_j$  obtenidos tras los tres procesos de optimización matemática de los porcentajes de éxito de la función en cada una de las muestras maestras de piezas musicales por estilo musical que permiten obtener los porcentajes de éxito de la Tabla 85.

Índice de nota	1	2	3	6	7	8	11	12
Piezas musicales barrocas								
$C_j$	28,6	-0,4	48,2	12,6	12	24,3	19,2	15,3
$exp_j$	6,2	28,8	6,7	6,1	16,4	6,1	35,3	6,9
Piezas musicales clásicas								
$C_j$	11,8	19,9	16,1	25,6	12,5	11,7	11,2	11,5
$exp_j$	10,3	17,4	12,1	10	22,1	9,9	18,9	12,6
Piezas musicales románticas								
$C_j$	1	1,3	2,3	1,8	1,8	1,4	1,4	4,8
$exp_j$	1	1	1,2	9	10	1,1	2,3	1,7

Tabla 84: Coeficientes obtenidos tras los procesos de optimización agrupando las piezas de la muestra por periodo musical.

La Tabla 85 presenta por cada muestra maestra analizada (Clasicismo, Barroco y Romanticismo) los porcentajes de éxito en la aplicación del método en la identificación de la tonalidad de la pieza (paso 2) separando entre piezas compuestas en modo Mayor y menor.

Periodo	Clasicismo		Barroco		Romanticismo	
	Mayor	menor	Mayor	menor	Mayor	menor
Nº. de piezas	667	77	535	101	205	35
Promedio de éxito	95,83%	96,10%	97,57%	96,08%	89,27%	94,29%

Tabla 85: Promedios de éxito del método por periodo musical y modo de las piezas de la muestra.

Puede observarse que los porcentajes de éxito de piezas clásicas y barrocas son los más elevados debido a que es un periodo musical donde las reglas de composición son más rígidas que las utilizadas en el Romanticismo, por tanto la homogeneidad compositiva de las piezas clásicas es mayor. Ello permite extraer con más facilidad la tonalidad.

Lo mismo ocurre en una audición de piezas barrocas, clásicas o románticas. Es ligeramente más difícil identificar por un experto en cada instante de la ejecución de la pieza la tonalidad que el compositor está utilizando en ese preciso instante de la pieza romántica.

La Tabla 86 muestra los porcentajes de éxito del método (paso 2) en la identificación de la tonalidad de las piezas de cada uno de los compositores incluidos en las tres muestras maestras.

Clasicismo		Barroco		Romántico	
Compositor	P.E. <sup>329</sup>	Compositor	P.E.	Compositor	P.E.
F.J.Haydn	95,68%	J.S.Bach	89,86%	A.Dvorak	85,42%
W.A.Mozart	96,17%	G.F.Händel	96,34%	R.Schumann	93,10%
		A.Vivaldi	89,58%	J.Brahms	88,89%
		D.Scarlatti	98,91%	L.v.Beethoven	91,18%

Tabla 86: Promedios de éxito del método por compositor.

329 P.E.: Porcentaje de éxito.

Estos resultados de la Tabla 86 muestran que como era de esperar, las tasas de éxito son mejores en piezas clásicas y barrocas frente a conjuntos de piezas románticas. También se observa que Antonín Dvořák es el compositor con mayor dificultad a la hora de identificar la tonalidad, en parte debido a la riqueza de su obra y en parte debido a que el número de piezas analizadas de él (al igual que el resto de compositores románticos) es bastante pequeño.

La Tabla 87 muestra los porcentajes de éxito del paso 3 en la identificación del modo de la tonalidad de las piezas de cada una de las muestras (agrupadas por estilo musical).

Modo % éxito en ...	Barroco	Clasicismo	Romanticismo
Piezas en modo Mayor	97,38%	98,80%	93,66%
Piezas en modo menor	94,06%	97,40%	97,14%

*Tabla 87: Porcentajes de éxito en el Paso 3 (identificación de modo) agrupando las piezas por estilo musical.*

Es decir, el valor 97,38% de la Tabla 87 significa que el modo identificado por el paso 3 del método del 97,38% de piezas barrocas compuestas en modo Mayor ha sido identificado correctamente.

#### **Análisis de falsos negativos**

Este apartado resume las valoraciones y un análisis en detalle de las características de las piezas cuya determinación de su tonalidad el método ha fallado explicando el porqué de dicho fallo. Los aspectos comentados en esta sección están referidos al primer experimento.

La Tabla 88 muestra los porcentajes de piezas que el método ha identificado una tonalidad errónea en vez de la tonalidad correcta respecto el total de piezas cuya estimación de la tonalidad ha sido incorrecta. Para poder comparar e interpretar correctamente los resultados, se ha transportado todas las piezas a la tonalidad de Do Mayor, por ello los identificadores de notas del encabezamiento de la Tabla 88 han de ser interpretados como medidas relativas a Do Mayor.

Nota tónica estimada	Do#	Re	Mib	Mi	Fa	Fa#	Sol	Lab	La	La#	Si
% de piezas	0,0	0,0	8,3	6,0	34,5	0,0	25,0	3,6	21,4	1,2	0,0

*Tabla 88: Porcentaje de notas confundidas como nota tónica erróneamente respecto el número total de piezas erróneas.*

Es decir, el 34,5% de las piezas las cuales se ha identificado incorrectamente la nota tónica, se ha identificado como nota tónica la que realmente es la nota subdominante (respecto a la nota tónica real).

Por tanto, las notas identificadas como más probables como notas tónicas cuando el método falla son la nota Subdominante en primer lugar y la Dominante y la mediante(b) en segundo lugar.

Dicho resultado tiene su explicación en el hecho que la música clásica de los periodos Clásico y Barroco tomaba como base en el proceso de composición el ciclo de quintas<sup>330</sup>, por tanto es lógico que dichas tonalidades tuvieran mucha presencia en cada una de las obras musicales porque son tonalidades muy próximas a la tonalidad real de la pieza en dicho círculo de quintas y por tanto son muy utilizadas dichas tonalidades en el discurso musical de las piezas de la muestra analizada.

<sup>330</sup> Consultar la página 233 (capítulo “Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados”) para una explicación detallada.

La muestra de piezas incluye piezas clásicas de F.J.Haydn y W.A.Mozart de la forma clásica minuet-trío las cuales cada una de estas dos partes normalmente está compuesta en una tonalidad diferente (generalmente la tonalidad del trío suele ser o bien la tonalidad relativa o bien la tonalidad de la Dominante respecto a la tonalidad del *minuetto*). Este hecho explica que la tonalidad Dominante respecto a la Tónica sea una de las tonalidades que el método más identifica como la tonalidad de la pieza erróneamente.

Otro aspecto a destacar para explicar los motivos por los cuales el método propuesto no identifica la tonalidad del 6% de las piezas de la muestra es la duración de la pieza. Asumiendo como “duración” de la pieza el número total de notas que hay en la partitura, no la duración en la interpretación.

La Tabla 89 muestra los porcentajes de error en la identificación de la tonalidad agrupando las 1620 piezas de la muestra en subgrupos en función del número de notas que contienen sus partituras.

Identificador de clase	Condiciones $N_n^{331}$	A	B	C
1	$N_n < 1.000$	409	27,38%	5,62%
2	$1000 \leq N_n < 2.000$	539	34,52%	5,38%
3	$2.000 \leq N_n < 3.000$	236	13,10%	4,66%
4	$3.000 \leq N_n < 4.000$	136	7,14%	4,41%
5	$N_n \geq 4.000$	300	17,86%	5,00%

*Tabla 89: Análisis del n.º. de piezas inferidas incorrectamente desde el punto de vista de la duración de la pieza.*

Explicación de las columnas de la Tabla 89.

- **Identificador de clase:** Es un identificador para referirse de ahora en adelante a cada clase de piezas musicales.
- **Condiciones  $N_n$ :** Es la condición que satisfacen las piezas musicales incluidas en la clase. Por ejemplo,  $2000 \leq N_n < 3000$  significa que las piezas musicales incluidas en esa clase son aquellas que contienen un número total de entre 2.000 y 3.000 notas (Clase 3).
- **A:** Es el número de piezas de la muestra que cumplen la condición de cada clase.
- **B:** Es el porcentaje de piezas de la clase que el método propuesto de identificación de la tonalidad falla en la deducción de su tonalidad respecto el número total de piezas de la muestra (no la clase) que el método falla en su funcionamiento.
- **C:** Es el porcentaje de piezas musicales de la clase que ha sido inferida su tonalidad incorrectamente por el método respecto el número total de piezas musicales incluidas en la clase.

Puede observarse en las columnas B y C de la Tabla 89 que la mayor tasa de errores en el método se produce en las obras con número de notas inferior a 1.000 notas. Esto permite adelantar una conclusión en la cual el método presenta unas mayores tasas de éxito cuanto mayor sea el número de notas que contenga (y generalmente una mayor duración en tiempo de interpretación).

---

331 “ $N_n$ ”: Número de notas de la pieza musical.



### Tercer experimento: Probar el método propuesto sobre el conjunto de piezas musicales utilizadas por Temperley y otras investigaciones

Una vez realizados los dos experimentos anteriores, se calcula en este experimento la función de distancia ponderada con los valores  $exp_j$  y  $C_j$  obtenidos en los dos experimentos anteriores y se aplica al corpus de piezas musicales utilizados por Temperley: “EL Clave Bien Temperado I/II” de J.S.Bach y los 24 preludios Op.28 de F.Chopin.

La Tabla 90 muestra los porcentajes de éxito de la aplicación de este método comparada con los resultados de Temperley.

Conjunto de piezas musicales	Nº de piezas	Porcentaje de éxito	
		Método de Temperley	Método propuesto
“EL Clave Bien Temperado I/II” de Bach	48/96 <sup>332</sup>	91,70%	90,63%
24 preludios Op.28 de F. Chopin	24	45,80%	75,00%

Tabla 90: Comparación de los porcentajes de éxito de los métodos de Temperley el propuesto en esta investigación.

El método propuesto consigue mejores resultados en corpus de piezas compuestas en modo Mayor. Los porcentajes de éxito de los preludios y fugas de Bach agrupándolas por modo (Mayor/menor) es del 97,92% y 83,33% respectivamente.

Si se analiza la extensión de las obras en las cuales el método falla, se obtiene los resultados de la Tabla 91.

Nº. de notas	“EL Clave Bien Temperado I/II” de Bach			24 preludios Op.28 de F. Chopin		
	Nº. total de piezas	Nº. de piezas clasificadas incorrec.	% de piezas clasificadas incorrec.	Nº. total de piezas	Nº. de piezas clasificadas incorrec.	% de piezas clasificadas incorrec.
0 - 1000	54	7	77,78%	17	5	83,33%
1001 - 2000	37	2	22,22%	6	1	16,67%
2001 - 3000	3	-	-	1	-	-
3000 - 4000	2	-	-	-	-	-

Tabla 91: Número de piezas clasificadas incorrectamente respecto las clases de piezas en función de su magnitud.

## Discusión

Como puede observarse en los resultados, los porcentajes de éxito no cambian significativamente en función del tamaño de la muestra maestra ni de la heterogeneidad de las piezas incluidas en ella. Por ello, será mejor considerar muestras maestras de piezas musicales grandes para calcular los promedios de los porcentajes de uso de cada nota y construir con ello la función numérica.

La decisión de qué compositores se han incluido en la muestra maestra de piezas analizada se ha basado en los siguientes criterios: popularidad y prolificidad de los compositores. Por tanto, la muestra maestra utilizada conseguirá la aceptación necesaria de los especialistas en musicología.

<sup>332</sup> Temperley[30] sólo consideró los temas de las fugas. El corpus de piezas utilizado en este método incluye tanto los preludios como las fugas.

Como era de esperar, los mejores resultados en el experimento 2 construyendo la función discriminante en base a un conjunto de piezas de cada estilo musical, han sido los resultados de los grupos de piezas del Clasicismo y del Barroco.

Para realizar el estudio detallado en este capítulo, no se han tenido en cuenta la tesitura de las notas halladas en los ficheros MIDI, es decir, todas las notas A (A0,A1,A2,A3, ...) son consideradas como iguales y contabilizan de igual modo sobre el porcentaje de aparición de la nota A.

El hecho de haber utilizado en el experimento 2 las mismas piezas de la muestra maestra (las cuales ya se conocía su tonalidad) para comprobar si el método es capaz de identificar su tonalidad ha sido el experimento realizado para obtener una valoración de la fiabilidad del método (ver Figura 81). En una aplicación real las piezas evaluadas no serán las mismas que están incluidas en la muestra maestra.

En el proceso de optimización de los coeficientes  $C_j$  y  $\exp_j$  de la Figura 78 aplicado en todos los experimentos se ha definido un tiempo máximo de cálculo de posibles soluciones sin hallar una solución mejor de 15.000 s (4 horas y 9 minutos aproximadamente) establecido antes de iniciar el proceso de optimización. Ello no asegura que la solución hallada sea la mejor solución, pero es una solución que da al método una fiabilidad del 95% suficiente en un entorno de análisis estadístico.

## **Investigaciones futuras**

A pesar de que la muestra maestra de piezas musicales incluye piezas tonales de los siglos XVIII y XIX, incrementar el número de piezas musicales incluidas en la muestra maestra podría incrementar el intervalo histórico de aplicación del método sacrificando ligeramente el porcentaje de éxito.

Otro método posible de identificación de la tonalidad de una pieza musical sería la aplicación de técnicas de análisis multivariante para, por medio de clasificación identificar la tonalidad por medio de técnicas reconocidas en el ámbito de la estadística. Dichas técnicas han sido utilizadas por Tudurí, Serra y Company[82] como método de clasificación de piezas musicales por estilo con porcentajes de éxito importantes.

Otra investigación futura sería analizar la evolución de los porcentajes de éxito en la identificación de la tonalidad de una pieza utilizando diferentes muestras maestras de referencia en base a su estilo musical, compositor, época histórica etc.

## **Conclusiones**

El método matemático presentado en este capítulo permite identificar en 3 pasos de manera automática y en esencia simple la tonalidad de una pieza musical compuesta en armonía tonal con una probabilidad de éxito del 94,74% a partir de una versión MIDI de la misma mejorando en algunos casos los porcentajes de éxito e incrementando los escenarios de aplicación relajando los condiciones de aplicación al compararlo con otros métodos enumerados en el apartado “Capítulo 2. Revisión de investigaciones realizadas” (a partir de la página 62).

El método presentado en este capítulo identifica de manera automática en las pruebas realizadas el modo de la tonalidad de una pieza musical tonal clásica con una probabilidad de éxito del 94,66%.

El método presentado en esta investigación demuestra el hecho de que sea cual sea el camino recorrido por las tonalidades en el discurso musical de la obra, se pueda descubrir con un grado de fiabilidad alto la tonalidad de la obra utilizando el porcentaje de utilización de cada nota respecto la tonalidad, avalando la hipótesis de que descubrir los factores identificativos del estilo compositivo

de un autor clásico con identificadores de bajo nivel sin tener en cuenta las tonalidades por las que modula la pieza en su diferentes secciones es plausible.

El método utiliza una muestra maestra de piezas musicales en formato MIDI de tonalidad conocida de un tamaño considerable (1.620 piezas musicales) para poder trabajar con intervalos de confianza grandes. Dicha muestra maestra puede incluir piezas de diferentes estilos musicales, diferente duración, orquestación, forma musical y tonalidad. El número de piezas incluidas es el mayor hasta la fecha en un método de identificación de la tonalidad de una pieza.

Las investigaciones realizadas hasta la fecha experimentan sus algoritmos de identificación de tonalidad o bien sobre canciones modernas (compuestas en una única tonalidad sin modulaciones) o bien sobre conjuntos de piezas musicales muy próximos en el tiempo, estilo y orquestación. El método presentado en esta investigación funciona independientemente del estilo musical, la orquestación, así como el discurso de modulaciones seguido en cada pieza.

El método está dividido en 3 pasos en los cuales en el primero se extraen los datos de la muestra maestra de obras de tonalidad conocida que permitirán en el paso 2 identificar la tonalidad de la pieza evaluada y en el paso 3 identificar el modo de la tonalidad de la pieza evaluada.

Algunos de los métodos automáticos desarrollados hasta la fecha están basados en un análisis de la armonía de la obra y concretamente de los acordes utilizados. Sin embargo frente al problema de identificar la tonalidad de una pieza para instrumento de cuerda frotada en los que sólo se toca una nota al mismo tiempo, los mecanismos de identificación de acordes fallan debido a que para identificar un acorde es necesario identificar como mínimo tres notas tocadas al mismo tiempo. El método propuesto en esta investigación debido a que basa su funcionamiento en el porcentaje de uso de cada nota, permite identificar la tonalidad de una obra tonal independientemente de su orquestación.

También se ha demostrado que cuanto mayor sea el número de notas compuestas en la pieza musical, mayor es la tasa de éxito del método.

W.A.Mozart, G.F.Händel y D.Scarlatti son los compositores con una mayor tasa de aciertos en la aplicación del método propuesto, y el Clasicismo y Barroco son los estilos con un mayor porcentaje de éxito por los motivos explicados en el apartado Resultados de este capítulo (ver página 192).

# Capítulo 13. Identificación de rasgos en el estilo musical de las sonatas para teclado de Domenico Scarlatti por medio de herramientas matemáticas y tecnológicas.

## Introducción.

El estilo musical del enorme catálogo musical de sonatas para clave de Domenico Scarlatti<sup>333</sup> (555 sonatas<sup>334</sup> catalogadas por Ralph Kirkpatrick y otros) ha sido identificado por diferentes especialistas como barroco, como precursor del clasicismo, o como creador de un estilo musical propio basado en sus propias experiencias con la música popular española. En cualquier caso es difícil extraer una opinión común y objetiva entre dichos especialistas.

En esta investigación, extrayendo indicadores de bajo nivel (porcentaje de uso de cada nota y porcentajes de uso de los diferentes intervalos melódicos posibles) de 390 sonatas a partir de su formato MIDI y comparándolas por medio de técnicas estadísticas (análisis discriminante<sup>335</sup>) con dos muestras de piezas musicales barrocas y clásicas, se obtiene un resultado cuantificable y objetivo de la distancia a cada estilo, que sitúa el catálogo de sonatas analizado como más próximo al clasicismo respecto al barroco en una proporción del 70%.

Dicho resultado permite también identificar en el tiempo cuando se producen dichas evoluciones estilísticas y es un paso más en el diseño de métodos matemáticos para identificar aspectos relevantes para diferenciar el estilo compositivo de varios compositores próximos en estilo, ubicación temporal y geográfica independientemente de la forma musical y su orquestación.

Esta investigación es una aplicación práctica de la investigación desarrollada en el “Capítulo 5. Clasificación de estilos musicales clásicos por medio de análisis discriminante” (página 97) en el cual se ha creado un método de clasificación de piezas por estilo musical.

Esta investigación ha sido publicada finalmente en la revista “El Artista”[80], sin embargo, al haber sido redactado el artículo inicialmente en inglés para intentar publicarlo en alguna revista científica anglosajona, los conceptos y las expresiones matemáticas que utilizan dichos conceptos están definidos en inglés. Para ello, la primera vez que aparezcan se explica el concepto en castellano.

## Identificación del problema.

Las opiniones de diferentes especialistas respecto a las características e influencias recibidas por Domenico Scarlatti y plasmadas en sus 555 sonatas para clave son dispares. Debido a las particularidades históricas y biográficas de la vida de Domenico Scarlatti, pueden identificarse en sus sonatas influencias barrocas así como nuevas ideas compositivas que anuncian la llegada del clasicismo musical. Incluso se identifican en ellas elementos muy personales extraídos de la música folclórica española. Este apartado de la investigación fundamenta el hecho de la inexistencia de una opinión común sobre las características del estilo compositivo de Scarlatti en base a opiniones de diferentes fuentes y especialistas en la materia.

---

333 Consultar la página 339 (capítulo “Anexo 4 – Información de compositores analizados y catalogación.”) para unas breves notas biográficas del autor.

334 Consultar la página 340 (capítulo “Anexo 4 – Información de compositores analizados y catalogación.”) para unas breves notas relacionadas con el catálogo de sonatas de Domenico Scarlatti.

335 Consultar la página 349 (capítulo “Anexo 5 – Conceptos estadísticos utilizados.”) para una explicación detallada.

A modo de referencia biográfica, es interesante exponer que a Domenico Scarlatti se le ofreció trabajar en la corte portuguesa para impartir música y clavicémbalo a la princesa Bárbara de Braganza. Cuando Bárbara se casó con Fernando VI de España, Domenico se trasladó con ella a España en 1729.

La falta de material para realizar su función pedagógica, además de la pasión que sentía por este instrumento, le motivó a escribir sus sonatas para clavicémbalo (según el catálogo de Ralph Kirkpatrick 555 sonatas). Fueron escritas en un solo movimiento, presentando una estructura bipartita, es decir dos secciones claramente definidas, de las cuales una o ambas se repiten.

Es ampliamente conocido que Scarlatti fue un virtuoso del clavicémbalo, por ese motivo buscó nuevos elementos inimaginables en su época. Sus nuevos conceptos sobre un tipo de digitación mucho más avanzado que la mayoría de sus contemporáneos, son evidentes, ya que de lo contrario muchas de sus sonatas habrían sido intocables. Una serie de características en estas obras las hace diferentes; García Pérez [102] las define “(...) la frescura, la espontaneidad, la luminosidad de estas composiciones, distintas de todas las demás, tanto anteriores como posteriores, por sus especiales características”. Estas grandes diferencias con las demás composiciones hacen aparecer afirmaciones tan dispares como, que sean consideradas dentro de un estilo Barroco, Alier [103] identifica la música de Scarlatti del siguiente modo “La música de Scarlatti nos obliga a situarlo en un término propio: el de música galante (...)” u otros como, “*Scarlatti crea la forma del primer y tercer tiempo de la sonata clásica, se le podría describir como el primer compositor clásico (...)*”.

El hecho de vivir en España, alejado de los movimientos musicales de Italia, Francia y centro de Europa, hizo que su estilo musical evolucionase de una manera muy personal. Matthews [104] opina que “(...) no hay duda de que Scarlatti desarrolló un estilo totalmente nuevo para el teclado, (...)”, además se sintió muy atraído de las melodías y ritmos de la música popular española que aparecen de una manera muy notable en su música.

Tras exponer referencias que sitúan sus sonatas en el estilo barroco, música galante o el primer compositor clásico, pueden encontrarse otras afirmaciones como las de Bülow “(...) encontramos en algunas páginas los signos precursores de Beethoven.” que incluso atribuye un mayor mérito como precursor musical. Otras fuentes definen a Scarlatti como un compositor prerromántico, por su sentido sinfónico en el diálogo de las partes en contraste, por el choque de movimientos vivos con las tonalidades menores, variaciones diversamente coloridas y trazadas.

En cualquier caso, ninguna referencia consultada ofrece una cuantificación objetiva de dichas influencias ni del momento en que se hacen visibles. De hecho, la musicología tradicional rara vez cuantifica las observaciones y hechos constatados.

Aceptando su obra como una transición entre el Barroco y el Clasicismo, esta investigación, utilizando métodos matemáticos y estadísticos aplicados a los porcentajes de uso de los diferentes intervalos musicales posibles de cada sonata (obtenidos a partir de versiones MIDI de sus sonatas por medio de una aplicación informática AN\_MIDv5.1), realiza una cuantificación de cuanto se parece cada sonata a los estilos musicales Barroco y Clásico.

### Objetivo de la investigación

El objetivo esta investigación es aplicar un método estadístico conocido que permita clasificar 390 sonatas de Domenico Scarlatti a partir de elementos musicales básicos tales como el número de intervalos utilizados de cada uno de los 144 existentes y el número de notas utilizadas de cada una de las 12 posibles según el sistema tonal.

Dichos valores serán considerados en su cantidad porcentual respecto al total de intervalos y notas identificadas en cada pieza musical. De este modo se puede considerar en las muestras de piezas analizadas piezas de diferente duración, orquestación y magnitud.

Tanto en las muestras de piezas barrocas y clásicas como en la muestra de sonatas de Scarlatti sólo han sido consideradas piezas compuestas en modo Mayor. De este modo garantizamos la comparabilidad de los intervalos generados a partir de las notas 3 (Mediante) y la nota 6 (Superdominante), ya que las escalas mayores y menores difieren en las notas que las componen en dichos grados<sup>336</sup>.

## Metodología

Esta sección del capítulo define las herramientas utilizadas en el desarrollo de la investigación así como una explicación detallada de los conjuntos de piezas musicales utilizadas en las muestras.

### Procedimientos

La principal aportación tecnológica para este estudio ha sido el desarrollo de la aplicación informática AN\_MID v5.1; programa informático que extrae de cada pieza analizada (en formato MIDI) las frecuencias de aparición de cada nota y de cada intervalo melódico posible.

En esta investigación los indicadores utilizados son los generados por la aplicación AN\_MIDv5.1 que ya fueron explicados en el capítulo anterior (consultar página 100).

### Grupos de piezas musicales utilizadas en las muestras

En el estudio se han utilizado 390 sonatas para teclado de Domenico Scarlatti. Los ficheros MIDI han sido descargados de “Classical Archives”[86]. El estudio ha clasificado cada una de las 390 sonatas analizadas en dos grupos utilizando la distancia de Mahalanobis<sup>337</sup> entre cada sonata y el centroide de cada uno de los grupos de referencia (piezas del Clasicismo y del Barroco). Las sonatas clasificadas como más próximas al Clasicismo son aquellas cuya distancia de Mahalanobis al centroide del grupo de piezas clásicas es menor que la distancia de dicha sonata al grupo de piezas barrocas.

Las características de las 2 muestras de piezas (barrocas y clásicas) utilizadas como base para comparar cada sonata de Scarlatti con dichos grupos y decidir así a qué grupo está más próxima cada una de ellas están resumidas en la Tabla 92.

Estilo	Nº piezas	Compositor	Formas musicales incluidas en la muestra
Clasicismo	347	W.A.Mozart y F.J.Haydn	Sonatas para piano, sinfonías y cuartetos de cuerda.
Barroco	166	J.S.Bach, G.F.Händel y A.Vivaldi	Suites orquestales, piezas para teclado, conciertos, preludios, fugas y otras formas orquestales

*Tabla 92: Características de las dos muestras de piezas clásicas y barrocas utilizadas para clasificar las sonatas de Scarlatti.*

En la muestra de sonatas de Scarlatti no han sido incluidas las catalogadas según Kirkpatrick con números 73, 77, 78, 81, 88-91, 134-139 y 453 porque no ha sido posible encontrar en Internet una versión de calidad aceptable.

En la muestra de estudio tampoco han sido incluidas las compuestas en modo menor (145 sonatas) porque el método propuesto obliga como requerimiento previo que todas las piezas analizadas estén compuestas en modo Mayor.

<sup>336</sup> Consultar la página 261 (capítulo “Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados”) para una explicación detallada.

<sup>337</sup> Consultar la página 360 (capítulo “Anexo 5 – Conceptos estadísticos utilizados.”) para una explicación detallada.

Cada una de las 903 piezas analizadas ha sido editada individualmente con un editor musical Finale para garantizar que el material musical estaba almacenado correctamente; realizando en el caso de que fuera necesario las mismas operaciones enumeradas en la página 101 (“Capítulo 5. Clasificación de estilos musicales clásicos por medio de análisis discriminante”).

### Análisis discriminante

La herramienta estadística utilizada para clasificar las sonatas de Scarlatti ha sido el análisis discriminante con función lineal ya que esta investigación es una aplicación práctica del método presentado en el “Capítulo 5. Clasificación de estilos musicales clásicos por medio de análisis discriminante”(página 97).

Dicha herramienta ha sido ya utilizada por Tudurí, Serra y Company [79] para clasificar piezas en base a su estilo musical (Clásico, Barroco y Romántico) utilizando como variables aleatorias el porcentaje de uso de las 12 notas del sistema tonal y de los 144 intervalos melódicos posibles con unos porcentajes de éxito del orden del 80-90% de éxito utilizando como muestras de piezas de cada estilo sinfonías, cuartetos, suites orquestales, conciertos italianos etc.

En el estudio se han utilizado 390 sonatas para teclado de Domenico Scarlatti. Las sonatas clasificadas como más próximas al Clasicismo son aquellas cuya distancia de Mahalanobis al centroide del grupo de piezas clásicas es menor que la distancia de dicha sonata al grupo de piezas barrocas.

El análisis discriminante se utiliza para clasificar las observaciones en dos o más grupos a partir de una muestra en la cual se conocen los grupos a los que pertenece cada elemento de la muestra. El análisis discriminante también puede utilizarse también para investigar cómo contribuyen las variables a la separación de los grupos.

## **Resultados**

El principal problema a la hora de analizar la evolución estilística a lo largo del tiempo de las sonatas es que hay muy poca información y poco fiable en relación con las verdaderas fechas de composición de cada sonata de la muestra utilizada.

Los catálogos históricamente más utilizados son los realizados por Ralph Kirkpatrick<sup>338</sup>, Alessandro Longo<sup>339</sup> y Giorgio Pestelli<sup>340</sup> los cuales basan su numeración en base a criterios de publicación.

La Figura 84 establece gráficamente la relación entre la catalogación realizada por Pestelli comparada con la realizada por Kirkpatrick. En ella se puede ver que, a pesar de que la tendencia es una recta con pendiente ascendente, dista mucho de coincidir.

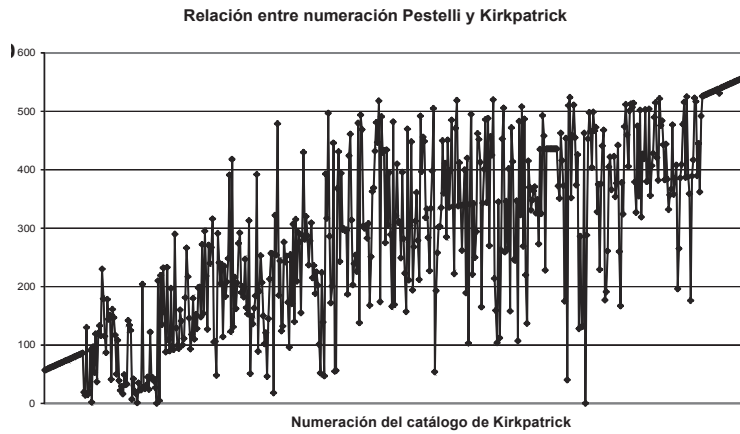
Para realizar este estudio y ordenar cronológicamente las sonatas de la muestra se ha utilizado el estudio de Hail [105] el cual aproxima la fecha composición de cada sonata en un intervalo de 5 años.

---

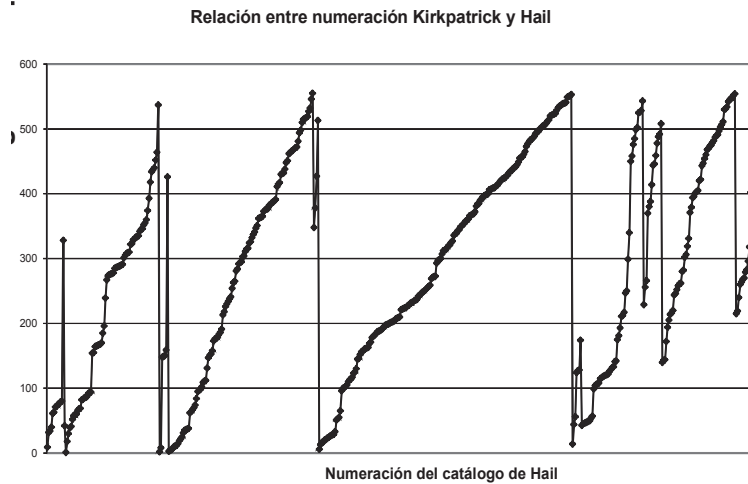
338 Consultar la página 330 (capítulo “Anexo 4 – Información de compositores analizados y catalogación.”) para unas breves notas biográficas de Ralph Kirkpatrick.

339 Consultar la página 332 (capítulo “Anexo 4 – Información de compositores analizados y catalogación.”) para unas breves notas biográficas de Alessandro Longo.

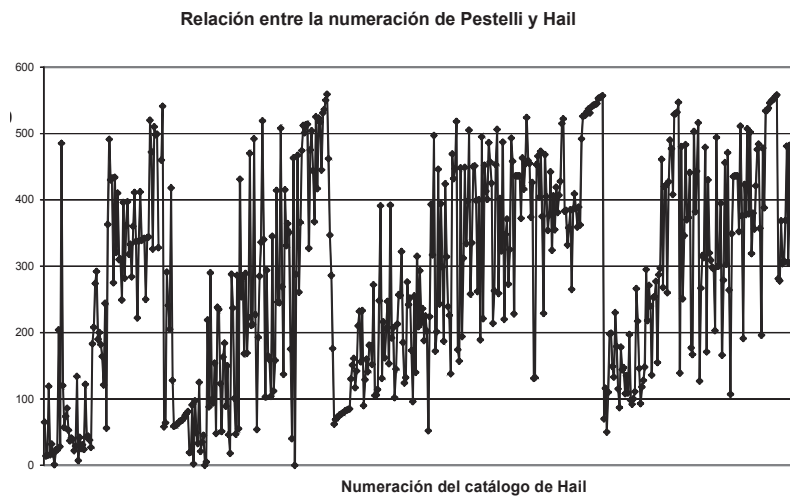
340 Consultar la página 337 (capítulo “Anexo 4 – Información de compositores analizados y catalogación.”) para unas breves notas biográficas de Giorgio Pestelli.



*Figura 84: Relación entre la numeración de los catálogos de Kirkpatrick y Pestelli.*



*Figura 85: Numeración Kirkpatrick ordenados usando el catálogo de Hail.*



*Figura 86: Numeración Pestelli ordenada usando las fechas de composición aproximadas del estudio de Hail.*



Analizando la Figura 85 y Figura 86 se puede comprobar que en base al trabajo de datación de Hail los catálogos de Kirkpatrick y Pestelli en un intervalo de números de sonatas próximos son un compendio de sonatas de toda su vida compositiva entre 1715 hasta su muerte. También se puede comprobar que en un intervalo de tiempo definido por Hail, se encuentran sonatas de diversidad de numeración del catálogo de Kirkpatrick y Pestelli.

Tras comparar las 390 sonatas compuestas en modo Mayor de Domenico Scarlatti por medio de Análisis Discriminante con dos muestras de piezas musicales pertenecientes los estilos Barroco y Clásico, se ha obtenido que el 66,4% han sido clasificadas como clásicas y el 33,6% como barrocas (por ser su distancia de Mahalanobis más próxima a los centroides de los grupos de piezas clásicas y barrocas).

Los valores de porcentajes de sonatas más próximas a cada estilo incrementan sus diferencias al dividir las 390 sonatas en dos grupos en base a su numeración según el catálogo Kirkpatrick. La Tabla 93 muestra dichos valores al dividir la población de sonatas analizadas en dos grupos.

% de sonatas más próximas al ...	... Barroco	...Clasicismo
Mitad inferior (sonatas de modo mayor con número Kirkpatrick inferior al 316)	38,7%	61,1%
Mitad superior (sonatas de modo mayor con número Kirkpatrick superior al 317)	28,5%	71,8%

*Tabla 93: Porcentajes de proximidad a cada estilo dividiendo la muestra de sonatas en dos grupos en base al catálogo Kirkpatrick.*

Los valores de porcentajes de sonatas más próximas a cada estilo también incrementan sus diferencias si dividimos las 390 sonatas en dos grupos en base a su numeración según el catálogo Pestelli. La Tabla 94 muestra dichos resultados.

% de sonatas más próximas al ...	... Barroco	...Clasicismo
Mitad inferior (sonatas de modo mayor con número Pestelli inferior al 286)	36,9%	63,1%
Mitad superior (sonatas de modo mayor con número Pestelli superior al 287)	30,5%	69,5%

*Tabla 94: Porcentajes de proximidad a cada estilo dividiendo la muestra de sonatas en dos grupos en base al catálogo Pestelli.*

Se ha dividido también la población de sonatas analizadas ordenadas según el catálogo Kirkpatrick en 5 grupos de 78 sonatas cada uno. La Figura 87 muestra los porcentajes de sonatas más próximas a cada estilo de cada subconjunto (en base a la muestra de 347 obras clásicas utilizadas) así como el valor acumulado de porcentaje de proximidad.

### Evolución del % de proximidad al Clasicismo dividiendo la muestra en 5 grupos

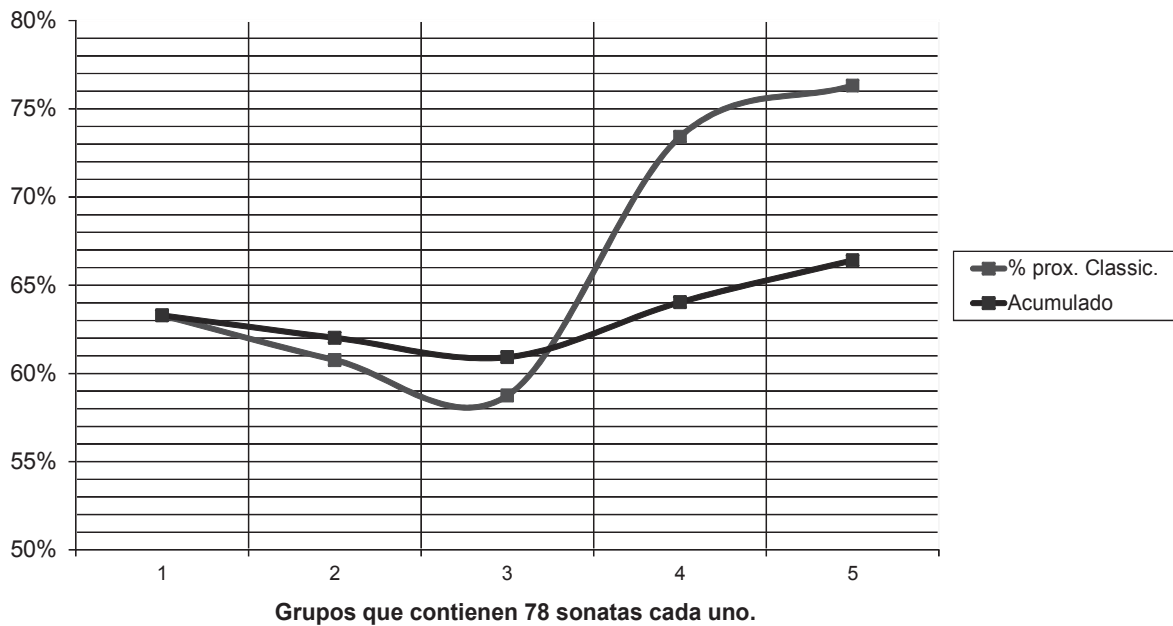


Figura 87: Evolución del porcentaje de proximidad de sonatas analizadas más próximo al clasicismo dividiendo la muestra en 5 grupos de 78 sonatas en base al catálogo Kirkpatrick.

También se ha dividido la muestra en 10 grupos de 39 sonatas cada uno y la Figura 88 muestra los resultados aunque no se ha podido dar una explicación a las fluctuaciones que presenta la gráfica posiblemente una prueba más de los errores de catalogación cronológica implícitos en el catálogo de Kirkpatrick.

También se han analizado las sonatas por subconjuntos en base al catálogo de Pestelli pero sin resultados significativos. Nuevamente se comenta que, al no tratarse de catálogos ordenados cronológicamente no tiene interés profundizar en dichos catálogos.

### % proximidad a Clasicismo (Kirkpatrick)

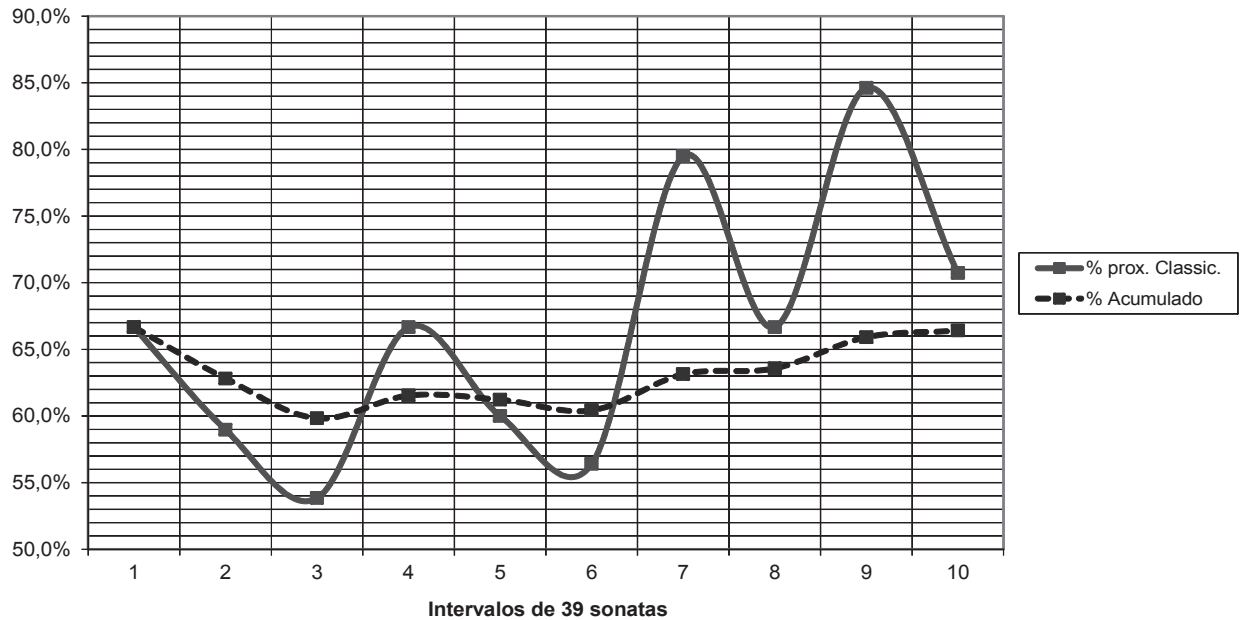


Figura 88: Evolución del porcentaje de proximidad al Clasicismo de sonatas analizadas más próximo al clasicismo dividiendo la muestra en 10 grupos de 39 sonatas en base al catálogo Kirkpatrick.

La Figura 89 muestra los porcentajes de sonatas más próximas a cada estilo (por medio de análisis discriminante de las sonatas de cada subconjunto de sonatas de cada intervalo de tiempo) proporcionados por el estudio de Hail [105] comparados con las muestras de piezas barrocas y clásicas. A pesar de que dicho estudio enmarca cada sonata en un intervalo de 5 años, hay intervalos de 5 años en los cuales apenas hay sonatas catalogadas por lo que para distribuir aproximadamente el número de sonatas por intervalo se han utilizado los intervalos de tiempo especificados en la Tabla 95.

	1715-25	1725-30	1730-35	1735-45	1745-57
Nº de sonatas	66	34	183	47	63

Tabla 95: Periodos de tiempo analizados y el número de sonatas en cada subgrupo.

La Tabla 144 en el “Anexo 9 – Clasificación de sonatas de D.Scarlatti por estilo clásico o barroco” (página 450) detalla qué sonatas (en base al catálogo Kirkpatrick) son clasificadas según esta investigación como más próximas al estilo del clasicismo o al estilo barroco.

### Porcentaje de sonatas más próximas al Clasicismo en cada periodo

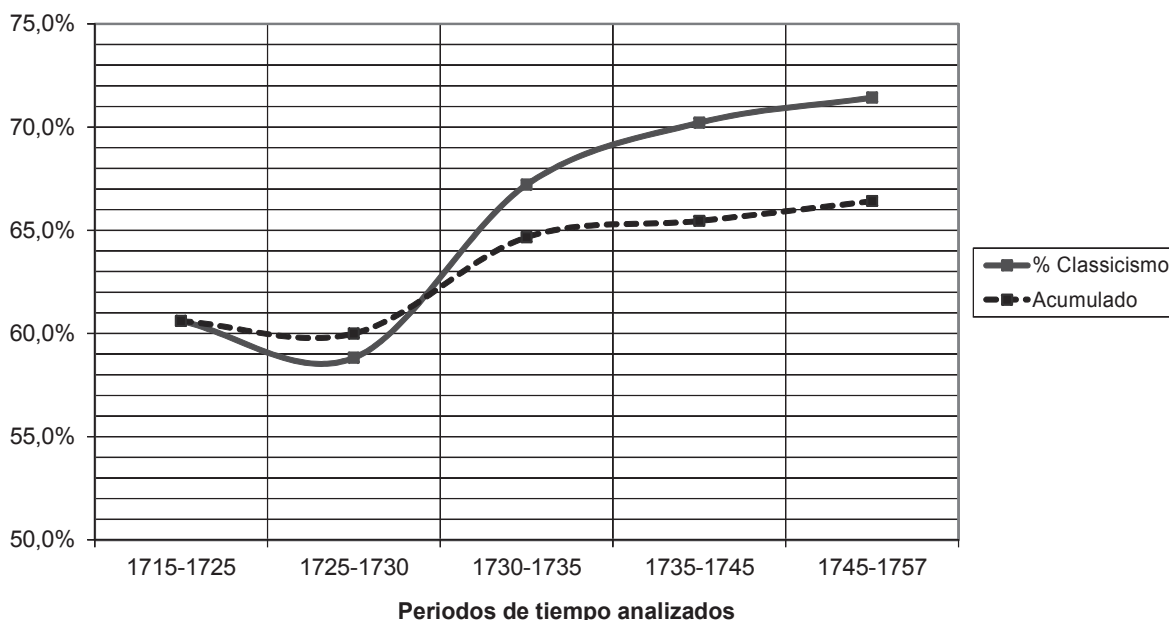


Figura 89: Porcentajes de sonatas más próximas al clasicismo en cada intervalo de tiempo analizado.

Los hechos biográficos con los que el presente estudio relaciona con las fluctuaciones de estos porcentajes son la estancia en Italia entre 1725 y 1729 (año éste último en que se trasladó a Sevilla) y su traslado definitivo a Madrid en 1733.<sup>341</sup>

La vuelta a Italia presentó un leve retorno al estilo barroco y el traslado definitivo de Scarlatti a Sevilla y Madrid marcan el periodo en el cual se relaciona un marcado proceso evolutivo en su estilo compositivo hacia el Clasicismo.

## Discusión

Queda demostrado en el estudio, que las frecuencias de uso de notas no son variables suficientemente discriminantes para realizar una clasificación por género aceptable.

A pesar de haber considerado el porcentaje de uso de cada nota, los resultados demuestran que dichas variables no son consideradas como discriminantes del estilo musical (la mayoría de ellas están dentro de las 10 variables con menos peso en la función lineal).

En el cálculo del número de veces que aparece un intervalo 1+7 (C#-B normalizando la tonalidad a Do Mayor), se ha considerado como eje de coordenadas la tonalidad de la pieza, no la tonalidad en la que se encuentra el intervalo en ese momento (ya que probablemente habrá modulado a otra tonalidad). De este modo y de manera implícita, quedan consideradas las tonalidades a las que la pieza modula<sup>342</sup>.

La heterogeneidad de las muestras en cuanto a la forma musical y a la orquestación de sus elementos avanza un paso más para identificar factores objetivos y cuantificables que expliquen de una manera más concreta cuales son los factores identificativos de los estilos musicales Barroco y Clásico.

341 Consultar la Tabla 109 (página 340, capítulo “Anexo 4 – Información de compositores analizados y catalogación.”) para consultar las fechas importantes en la vida de Domenico Scarlatti.

342 Consultar la página 251 (capítulo “Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados”) para una explicación detallada.

El trabajo de datación de cada sonata realizado por Hail demuestra que los otros catálogos analizados no están ordenados por fecha de composición aproximada, aunque sí en su conjunto pero no en sus subconjuntos (ver Figura 85 y Figura 86).

Los resultados presentados en esta investigación han sido debatidos a través de correspondencia electrónica con Christopher Hail a lo largo de los meses de Enero y Febrero de 2012 y éste, coincide en las conclusiones del estudio añadiendo como dato histórico que en 1746, Maria Barbara de Braganza fue coronada reina y que Domenico Scarlatti dejó de escribir sonatas para la corte y empezó a componer en base a su propio gusto, ello podría justificar en su opinión, una recuperación de elementos estilísticos más personales.

### Investigaciones futuras

Los resultados obtenidos en el presente estudio permitirán ir un paso más allá en la aplicación de este método objetivo a casos de autoría dudosa de piezas entre varios posibles autores, estableciendo indicadores numéricos que permitan dar una prueba más para avalar o refutar la autoría de cada uno de ellos.

En Septiembre de 2012, y teniendo en cuenta que el estudio fue realizado en el segundo semestre de 2011, C. Hail ha comentado mediante correo electrónico, que a lo largo del año 2012 ha revisado su trabajo y que ha re-ubicado temporalmente aproximadamente unas 10 sonatas en otro instante histórico. Por ello un trabajo futuro será repetir el análisis en base a la nueva datación realizada por C. Hail para intentar descubrir la tendencia histórica.

Otra investigación futura sería incorporar a las muestras de estudio piezas musicales compuestas en modo menor.

Una aplicación futura del método sería adaptarla y definir las condiciones de aplicación del método propuesto en esta investigación para cuantificar numéricamente en qué medida un compositor incorpora en sus obras influencias de otros compositores clasificando sus obras en base a una muestra de obras musicales de los compositores A y B que aportan su influencia en el compositor estudiado. El mayor porcentaje de obras que sean más próximas al compositor A frente al compositor B indicará una mayor influencia del compositor A sobre el compositor estudiado.

## **Conclusiones**

El estudio realizado identifica las sonatas de Domenico Scarlatti como más próximas al clasicismo frente al barroco en una proporción promedio del 70%.

Analizando cronológicamente la evolución del número de sonatas más próximas al estilo clásico según el análisis discriminante aplicado con función lineal, se puede concluir que se observa una tendencia positiva en tiempo (ver Figura 89).

Interpretando la Figura 89, los dos momentos destacables en la evolución del estilo compositivo de Domenico Scarlatti son el periodo 1725-29 en que volvió a residir en Italia (acercándose nuevamente al estilo barroco según la interpretación del estudio) y el periodo 1730-35 en el que su estilo compositivo evoluciona con mayor velocidad hacia un estilo clásico (coincidiendo con el traslado definitivo a Madrid).<sup>343</sup>

La validez de esta conclusión anterior, estará siempre vinculada a la validez de la catalogación realizada por Hail, en cualquier caso, el autor de esta tesis mantiene correspondencia electrónica con Christopher Hail y ha comunicado que está realizando actualizaciones en la datación de unas 10 sonatas en base a información que ha recopilado a lo largo del año 2012, y por tanto se debería repetir el estudio partiendo de la nueva catalogación.

---

<sup>343</sup> Consultar la Tabla 109 (página 340, capítulo “Anexo 4 – Información de compositores analizados y catalogación.”) para consultar las fechas importantes en la vida de Domenico Scarlatti.

El método presentado en esta investigación permite clasificar piezas musicales clásicas y barrocas en base a los porcentajes de uso de cada uno de los intervalos melódicos posibles, considerando los intervalos melódicos en su forma absoluta (nota inicial y nota final en términos absolutos en base a la tonalidad de la pieza).

La heterogeneidad de las muestras en cuanto a la forma de los elementos da un primer paso para identificar factores objetivos y cuantificables para explicar de una manera más concreta cuales son los factores identificativos de los estilos musicales Barroco y Clásico.

El presente método permite que la selección de las piezas musicales de la muestra de referencia sea independiente de la tonalidad de la pieza, su compositor, su duración, su forma y estructura musical así como su orquestación, pero dependiente del modo de su tonalidad (Mayor o menor).

# Capítulo 14. Investigaciones sin resultados significativos

## Introducción

En este capítulo se resumen aquellas investigaciones que no han alcanzado los resultados esperados para poder confirmar la hipótesis planteada en el “Capítulo 1. Introducción”.

A pesar de que cronológicamente estas investigaciones son anteriores a las que han confirmado la hipótesis planteada se encuentran ubicados en este documento al final para no restar protagonismo a las que sí han avalado la hipótesis y quizás confundir de algún modo al lector. Por ello, en la redacción de este capítulo se comprobará que son investigaciones realizadas anteriores a las que han generado resultados positivos.

Cronológicamente dichas investigaciones pueden ubicarse en la Figura 1 (página 23) como las etiquetadas como “investigaciones sin resultados significativos”.

Estas dos investigaciones resumidas en este capítulo demuestran que no es posible utilizar una función de distancia ponderada con factores de ponderación creados a partir de una única función matemática y que utilizar como variables indicadoras de bajo nivel los porcentajes de utilización de los diferentes tipos de notas para clasificar obras musicales por compositor no ofrecen unos resultados mejores que los mostrados utilizando porcentajes de utilización de intervalos melódicos tal como se ha demostrado en los “Capítulo 7. Análisis comparativo de aplicación de métodos de minería de datos versus algoritmos evolutivos a la clasificación automática de piezas musicales de compositores clásicos.” y “Capítulo 5. Clasificación de estilos musicales clásicos por medio de análisis discriminante” en las páginas 120 y 97 respectivamente.

Si bien este capítulo ha sido titulado como “Capítulo 14. Investigaciones sin resultados significativos”, debe aclararse que en estas investigaciones se demuestra que los caminos elegidos en ellas no llevan a poder discriminar satisfactoriamente el estilo musical de dos compositores próximos en estilo lo cual en esencia también es un resultado.

## **Clasificación de estilo compositivo por medio de una función de distancia euclidiana ponderada con los factores de ponderación obtenidos por medio de una única función matemática**

Se explica en este apartado el mecanismo diseñado para calcular los factores de ponderación que debe estar inversamente relacionado con la varianza muestral.

### Introducción

Para minimizar el contenido de este apartado, sólo se explicarán las diferencias entre el método MIAMP y este referenciando adecuadamente las figuras y expresiones matemáticas de la explicación del método MIAMP

La diferencia entre el camino seguido en esta investigación y el seguido en la investigación del “Capítulo 7. Análisis comparativo de aplicación de métodos de minería de datos versus algoritmos evolutivos a la clasificación automática de piezas musicales de compositores clásicos.” (página 120) es que en el segundo se ha utilizado un algoritmo evolutivo para obtener los factores de ponderación utilizados en la función de distancia mientras que en esta investigación sin resultados significativos se ha utilizado una única función matemática.

En la investigación que utiliza el algoritmo evolutivo no se cuestiona la relación entre los factores de ponderación obtenidos, únicamente se aceptan por ser los que permiten diferenciar las obras de los compositores A y B con una mayor tasa de éxito.

En esta investigación se ha intentado crear unos factores de ponderación inversamente relacionados con la varianza muestral<sup>344</sup> de los valores de cada indicador de bajo nivel (porcentaje de uso de notas, de octavas, de intervalos melódicos)

De este modo, teniendo en cuenta que en la función de distancia se utilizan los indicadores más separados en su promedio, además estos son ponderados en función de su dispersión respecto a la media.

Es decir, cuanto mayor sea la dispersión de los valores respecto el valor medio (varianza), menor será el peso de esa variable en la función de distancia.

### Función de distancia ponderada

Las figuras 90 y 91 muestran las matrices de datos extraídos por la aplicación AN\_MIDv.51 de cada uno de los compositores A y B.

$$D_A = \begin{bmatrix} N_{A,1,1} & \dots & \dots & N_{A,1,12} & O_{A,1,1} & \dots & \dots & O_{A,1,11} & I_{A,1,1} & \dots & \dots & O_{A,1,144} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ N_{A,m,1} & \dots & \dots & N_{A,m,12} & O_{A,m,1} & \dots & \dots & O_{A,m,11} & I_{A,m,1} & \dots & \dots & O_{A,m,144} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{A,1,1} & \dots & \dots & V_{A,1,167} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ V_{A,m,1} & \dots & \dots & V_{A,m,167} \end{bmatrix}$$

Figura 90: Matriz de datos extraída del compositor A.

$$D_B = \begin{bmatrix} N_{B,1,1} & \dots & \dots & N_{B,1,12} & O_{B,1,1} & \dots & \dots & O_{B,1,11} & I_{B,1,1} & \dots & \dots & O_{B,1,144} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ N_{B,p,1} & \dots & \dots & N_{B,p,12} & O_{B,p,1} & \dots & \dots & O_{B,p,11} & I_{B,p,1} & \dots & \dots & O_{B,p,144} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{B,1,1} & \dots & \dots & V_{B,1,167} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ V_{B,p,1} & \dots & \dots & V_{B,p,167} \end{bmatrix}$$

Figura 91: Matriz de datos extraída del compositor B.

Siendo  $N_{A,i,j}$  la frecuencia de aparición de la nota  $i$  ( $1 \leq j \leq 12$  según la tonalidad de la pieza) en la pieza  $i$  del compositor A respecto el total de notas detectadas en la pieza.

Siendo  $O_{A,i,j}$  la frecuencia de aparición de notas de la octava  $j$  ( $1 \leq j \leq 11$ ) en la pieza  $i$  del compositor A respecto el total de notas detectadas en la pieza.

Siendo  $I_{A,i,j}$  la frecuencia de aparición del intervalo de la nota  $n_1$  a la nota  $n_2$  respecto el total de intervalos detectados en base a los cálculos de la Figura 92.

$$n_1 = (j \text{ DIV } 12) + 1 \quad \text{y} \quad n_2 = (j \text{ MOD } 12) + 1$$

Figura 92: Expresión de los valores  $n_1$  y  $n_2$ .

Los promedios de cada variable se agrupan para cada compositor en los vectores de las figuras 93 y 94.

344 Consultar la página 363 (capítulo “Anexo 5 – Conceptos estadísticos utilizados.”) para una explicación detallada.



$$\bar{V}_A = \left\{ \bar{V}_{A,1}, \dots, \bar{V}_{A,167} \quad / \quad \bar{V}_{A,i} = \frac{\sum_{j=1}^m V_{A,j,i}}{m} \right\}$$

Figura 93: Vectores de promedios de cada variable del compositor A.

$$\bar{V}_B = \left\{ \bar{V}_{B,1}, \dots, \bar{V}_{B,167} \quad / \quad \bar{V}_{B,i} = \frac{\sum_{j=1}^p V_{B,j,i}}{p} \right\}$$

Figura 94: Vectores de promedios de cada variable del compositor B.

Siendo “m” y “p” el número de piezas utilizadas en la muestra del compositor A y B respectivamente.

Las varianzas poblacionales de cada variable se agrupan para cada compositor en los vectores de la Figura 95.

$$S_A^2 = \left\{ S_{A,1}^2, \dots, S_{A,167}^2 \quad / \quad S_{A,i}^2 = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (V_{A,j,i} - \bar{V}_{A,i})^2 \right\}$$

$$S_B^2 = \left\{ S_{B,1}^2, \dots, S_{B,167}^2 \quad / \quad S_{B,i}^2 = \frac{1}{p} \sum_{j=1}^p (V_{B,j,i} - \bar{V}_{B,i})^2 \right\}$$

Figura 95: Varianzas poblacionales de cada variable y compositor.

Dichas variables me dan una medida de la dispersión de los valores de cada variable de las piezas musicales de la muestra del compositor A o B.

Se crean 3 grupos de factores de ponderación (FP) para cada compositor y grupo de variables (notas = N, octavas = O e intervalos = I) tal como muestra la Tabla 96.

Compositor A	Compositor B
$FPN_{A,i} = \left( \frac{\sum_{j=1}^{12} S_{A,j}^2}{2 * S_{A,i}^2} \right)^{aten} \quad (1 \leq i \leq 12)$	$FPN_{B,i} = \left( \frac{\sum_{j=1}^{12} S_{B,j}^2}{2 * S_{B,i}^2} \right)^{aten} \quad (1 \leq i \leq 12)$
$FPO_{A,i} = \left( \frac{\sum_{j=13}^{23} S_{A,j}^2}{2 * S_{A,i}^2} \right)^{aten} \quad (13 \leq i \leq 23)$	$FPO_{B,i} = \left( \frac{\sum_{j=13}^{23} S_{B,j}^2}{2 * S_{B,i}^2} \right)^{aten} \quad (13 \leq i \leq 23)$
$FPI_{A,i} = \left( \frac{\sum_{j=24}^{144} S_{A,j}^2}{2 * S_{A,i}^2} \right)^{aten} \quad (24 \leq i \leq 144)$	$FPI_{B,i} = \left( \frac{\sum_{j=24}^{144} S_{B,j}^2}{2 * S_{B,i}^2} \right)^{aten} \quad (24 \leq i \leq 144)$

Tabla 96: Factores de ponderación por grupo de variables y compositor.

Estando el valor “aten” dentro del intervalo:  $0,5 \leq aten \leq 1$

Dichos factores de ponderación provocan que las variables con una mayor varianza tengan un menor peso en el cálculo de la distancia. El parámetro “aten” atenuará todavía más el peso que provocarán las varianzas mayores.

Una vez calculados y con el objetivo de normalizar la nomenclatura de los factores de ponderación, se define el vector de la Figura 96.

$$FP_A = \{FP_{A,1} \dots FP_{A,167}\} = \{FPN_{A,1} \dots FPN_{A,12} FPO_{A,13} \dots FPO_{A,23} FPI_{A,24} \dots FPI_{A,144}\}$$

Figura 96: Proceso de normalización de la nomenclatura para eliminar los acrónimos de grupos de variables.

Después se seleccionan las variables más distantes en promedio entre los compositores A y B.

Para ello se calcula el vector de distancias de promedios tal como muestra la Figura 97

$$Dif_{A,B} = \{[\bar{V}_{A,1} - \bar{V}_{B,1}] \dots [\bar{V}_{A,163} - \bar{V}_{B,163}]\} = \{Dif_{AB,1} \dots Dif_{AB,163}\}$$

Figura 97: Expresión del vector de distancias de promedios.

A continuación se reordenan las columnas de las matrices  $D_A$  y  $D_B$  en base a los valores de  $Dif_{A,B}$  de mayor distancia a menor distancia y definimos el parámetro “nvs”<sup>345</sup> que define cuantas variables consideraremos para hacer la comparación del estilo compositivo de los compositores A y B (en las pruebas se han seleccionada 30 ya que es suficiente para obtener unos resultados con intervalo de confianza aceptable) tal como muestra la Figura 98.

$$Dif''_{A,B} = \{Dif''_{A,B,1}, \dots, Dif''_{A,B,nvs} / Dif''_{A,B,j} \geq Dif''_{A,B,j+1} \quad 1 \leq j \leq 166\}$$

Figura 98: Vector de de diferencias entre promedios.

Dichas matrices reordenadas se identificarán como  $D''_A$  y  $D''_B$ . así como todos los valores calculados serán identificados añadiendo el carácter ” después de la magnitud en cuestión.

De este modo la función que mide la distancia de una pieza “X” anónima o de cuya autoría se duda, utilizará los valores<sup>346</sup> de la Tabla 97.

Promedios de valores:	$\bar{V}''_A = \{\bar{V}''_{A,1}, \dots, \bar{V}''_{A,nvs}\}$
Varianzas:	$S''^2_A = \{S''^2_{A,1}, \dots, S''^2_{A,nvs}\}$
Factores de ponderación:	$FP''_A = \{FP''_{A,1} \dots FP''_{A,nvs}\}$

Tabla 97: Expresión de los valores utilizados para confeccionar la función de distancia al compositor A.

Se define la distancia de la pieza “X” al compositor A y B con las expresiones de las figuras 99 y 100 respectivamente.

345 Nvs = Número de variables Seleccionadas.

346 Se necesitarán los mismos valores para el compositor B.

$$d_{X,A} = \sum_{i=1}^{nvs} [V''_{X,i} - \bar{V}''_{A,i}] * FP''^2_{A,i}$$

Figura 99: Expresión de distancia al compositor A.

$$d_{X,B} = \sum_{i=1}^{nvs} [V''_{X,i} - \bar{V}''_{B,i}] * FP''^2_{B,i}$$

Figura 100: Expresión de distancia al compositor B.

Si la pieza “X” tiene una  $d_{X,A}$  menor que  $d_{X,B}$ , la pieza X podrá ser considerada como más probable que sea compuesta por el compositor A y viceversa.

Se analiza a continuación el nivel de fiabilidad de esta afirmación anterior.

Las piezas utilizadas en la muestra para identificar los valores identificativos del estilo de un compositor definirán la probabilidad de que una pieza sea considerada (según el método ideado en esta investigación) del compositor A cuando sea del B.

Para ello se define la probabilidad de que una pieza sea considerada del compositor A cuando realmente sea del B y viceversa con las expresiones de la Figura 101.

$$Prob_{A,B} = \frac{\text{N}^\circ \text{ de piezas Y de la muestra de A} / d_{Y,B} \leq d_{Y,A}}{m} \quad 0 \leq Prob_{A,B} \leq 1$$

$$Prob_{B,A} = \frac{\text{N}^\circ \text{ de piezas Y de la muestra de B} / d_{Y,A} \leq d_{Y,B}}{p} \quad 0 \leq Prob_{B,A} \leq 1$$

Figura 101: Expresión de la probabilidad condicionada de que al pieza X sea considerada como compuesta por A cuando realmente fue compuesta por B y viceversa.

Siendo  $m$  y  $p$  la cantidad de piezas de las muestras de obras reconocidas de los compositores A y B respectivamente.

De este modo el esquema algorítmico enmarcado a continuación permite clasificar la pieza X como compuesta por A o B en base a las muestras de piezas reconocidas de cada compositor candidato A y B.

- Si  $d_{X,A} < d_{X,B} \Rightarrow$  La pieza X será del compositor A con un intervalo de confianza igual a  $1 - Prob_{A,B}$ .
- Si  $d_{X,A} > d_{X,B} \Rightarrow$  La pieza X será del compositor B con un intervalo de confianza igual a  $1 - Prob_{B,A}$ .

Como puede observarse, los pasos del método utilizado en esta investigación son la base de los pasos del método MIAMP excepto en la definición de los factores de ponderación que en este primer método eran calculados a priori sin ningún proceso de optimización de los mismos, es decir, se esperaba que dichos factores de ponderación fuesen calculados previamente y que tuviesen una relación inversa con la varianza muestral de las muestras de piezas de cada compositor candidato a ser el compositor de la pieza.

## Resultados

El método expuesto en el apartado anterior se probó con diferentes muestras de piezas musicales de F.J.Haydn y W.A.Mozart (las mismas que las de la Tabla 16 en la página 101) piezas todas ellas compuestas en modo Mayor, consiguiéndose un máximo porcentaje de éxito del compositor con menor porcentaje de éxito en la clasificación tal como se muestra en la Tabla 98.

	F.J.Haydn		W.A.Mozart	
	% de piezas clasificadas incorrectamente	Nº de piezas	% de piezas clasificadas incorrectamente	Nº de piezas
Todas las obras <sup>347</sup>	50,67%	449	32,58%	220
Sólo sonatas para teclado	35,46%	140	38,00%	51

*Tabla 98: Máximo porcentaje de éxito del compositor con menor porcentaje de éxito en la clasificación.*

Como puede observarse en la Tabla 98, se considera el porcentaje de éxito el peor caso que sería el peor porcentaje de error en la clasificación de las obras de los porcentajes de fracaso de cada uno de los compositores.

Al comparar los resultados de la Tabla 98 con los de las tablas 30 (página 116), 31 (página 117), 40 (página 137) y 41 (página 137), puede verse que son mucho mejores los de las tablas referenciadas.

Se han hecho experimentos de aplicación de esta función de distancia para otras parejas de compositores en base a las muestras de piezas de la Tabla 16, pero sin mejores resultados.

Los resultados de la Tabla 98 son el resultado tras un proceso de optimización del exponente de los FP” (que en la definición de las expresiones de la función de distancia es 2 tal como se ve en las figuras 99 y 100 en página 217) por medio del mismo algoritmo evolutivo utilizado en el método MIAMP, es decir, se ha aplicado el algoritmo evolutivo para buscar cual era el exponente que minimizaba los porcentajes de fracaso en la clasificación.

## Conclusión

Expuesto en los apartados anteriores, se concluye que no hay una función matemática única que permita calcular los pesos o factores de ponderación para aplicar una función de distancia ponderada y clasificar compositores con ella.

## **Clasificación del estilo compositivo utilizando porcentaje de uso de duraciones de notas**

Se resume en este apartado el intento de clasificar piezas de dos compositores utilizando como indicadores de bajo nivel el porcentaje de uso de cada una de las duraciones de notas<sup>348</sup> tanto discretas como continuas<sup>349</sup> obtenidas por medio del análisis de duraciones realizado por la aplicación AN\_MIDv5.1.

---

347 Sonatas para teclado, cuartetos de cuerda y sinfonías.

348 Consultar la página 239 (capítulo “Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados”) para una explicación detallada.

349 Consultar el apartado “Resultados de análisis de duraciones” en la página 410 (capítulo “Anexo 7 – Manual de usuario de la aplicación AN\_MID v5.1”) para una explicación detallada.

## Introducción

Se ha aplicado la técnica de Análisis Discriminante y el método MIAMP aplicado a los indicadores de porcentaje de uso de duraciones de notas de las piezas musicales de la Tabla 16 (página 101).

Como se ha demostrado en capítulos anteriores, dichas técnicas han dado buenos resultados de clasificación del estilo compositivo de compositores próximos en estilo utilizando como datos de entrada de cada pieza musical el porcentaje de uso de cada nota y cada intervalo melódicos.

## Resultados

Se han aplicado ambos métodos a los porcentajes de uso de duraciones de manera aislada y también conjuntamente con los indicadores de porcentaje de uso de intervalos melódicos y uso de notas utilizados en los “*Capítulo 5. Clasificación de estilos musicales clásicos por medio de análisis discriminante*” y “*Capítulo 7. Análisis comparativo de aplicación de métodos de minería de datos versus algoritmos evolutivos a la clasificación automática de piezas musicales de compositores clásicos.*”

Ninguno de estos experimentos ha incrementado los porcentajes de éxito de ambos métodos por tanto y teniendo en cuenta que uno de los objetivos de la tesis es identificar los indicadores que diferencian el estilo compositivo de dos compositores próximos en estilo, no se justifica incorporar dichos identificadores de duraciones de notas si no aportan más capacidad de discriminación.

## Conclusión

Los porcentajes de uso de duraciones de notas en una muestra de piezas musicales de un compositor no son ni de manera aislada ni conjunta con otros indicadores descriptivos del estilo compositivo de un compositor y por tanto, no pueden ser utilizados como elementos discriminantes en un método de clasificación de piezas por compositor o lo que es dicho de otro modo, no pueden utilizarse para diseñar un método de identificación de la autoría de una pieza musical de autoría dudosa frente a dos posibles compositores candidatos.

Los valores obtenidos por el análisis de duraciones realizado si bien no han sido utilizados en el proceso de clasificación del estilo compositivo, sí que han sido de utilidad en el “*Capítulo 11. O.R.P.E.T. (Objective Rhythmic Performance Evaluation Tool) un método numérico objetivo de evaluación de la interpretación musical*” (página 171) para desarrollar una herramienta tecnológica de evaluación de la corrección en la interpretación rítmica de una interpretación de una pieza comparada con otra considerada como la interpretación correcta.

## Capítulo 15. Conclusiones

Se presentan esquemáticamente las conclusiones a las que se ha llegado en esta tesis doctoral.

Se ha demostrado la hipótesis del trabajo definida en el “Capítulo 1. Introducción” en la página 12. Dicha hipótesis plantea que sistemáticamente, los elementos diferenciales del estilo compositivo de una época musical y de un compositor clásico no se encuentran en las características formales globales de la obra sino más bien en los recursos armónicos y melódicos utilizados en cada fragmento musical a pequeña escala, es decir, dichas características identificativas se encuentran en los elementos más pequeños o atómicos de la estructura musical.

Dichos elementos más discriminantes son los intervalos melódicos utilizados y las notas utilizadas respecto a la tonalidad en su catálogo musical contabilizados uno a uno en la totalidad de cada una de sus obras.

Tras haber experimentado con otras técnicas existentes de clasificación y haber identificado los puntos débiles de los métodos desarrollados hasta la actualidad, se ha diseñado el método MIAMP (ver “Capítulo 7. Análisis comparativo de aplicación de métodos de minería de datos versus algoritmos evolutivos a la clasificación automática de piezas musicales de compositores clásicos.” a partir de la página 120) que permite clasificar piezas musicales por compositor por medio de una distancia euclidiana ponderada optimizada por medio de un algoritmo evolutivo. Dicho método aporta las siguientes mejoras a los métodos ya existentes:

- Mejora los porcentajes de éxito en la clasificación.
- Lo hace de un modo más simple.
- Es de aplicación a piezas de diferente orquestación, envergadura y estructura formal.
- Consigue unos porcentajes de éxito más balanceados en el caso de que haya una gran diferencia entre el número de obras musicales incluidas en la muestra de cada uno de los dos compositores candidatos.

Este método de clasificación desarrollado en esta tesis doctoral (MIAMP) es una herramienta numérica, sistemática y objetiva, de utilidad en la disciplina de la Musicología que permite ayudar a los investigadores a emitir conclusiones sobre la autoría real de una obra musical en el caso de que no haya una opinión generalizada al respecto. El problema de la falta de métodos sistemáticos para autenticar la autoría de una obra es un problema común en las investigaciones musicológicas.

A partir de una serie de obras de dudosa autenticidad del catálogo para órgano de J.S.Bach, se ha aplicado el método MIAMP a estas obras dudosas emitiendo una clasificación de las mismas comparadas con otros compositores candidatos a ser los autores de dichas obras en base a estudios musicológicos (ver “Capítulo 9. Resultados de aplicación de los métodos presentados a obras dudosas de J.S.Bach” a partir de la página 152).

El uso de los diferentes tipos de duraciones de notas (redonda, negra, corchea etc.) en cada obra aportan una mayor capacidad de clasificación para discriminar estilos compositivos de diferentes compositores que la alcanzada por método MIAMP.

## Otras aportaciones

El desarrollo de esta tesis doctoral, ha investigado en áreas que han ido apareciendo en su realización que si bien, no estaba planificadas en un fase inicial, se han explorado obteniendo los resultados enumerados a continuación:

Se presenta como conclusión el hecho de que para poder tratar estadísticamente los indicadores de bajo nivel descritos, dichos indicadores y las variables aleatorias que con ellos se construyan deben poderse aproximar a distribuciones con función de densidad conocidas.

Para ello, en el “Capítulo 6. Un nuevo enfoque cuantitativo en la identificación del estilo compositivo de autores clásicos (F.J.Haydn, W.A.Mozart, D. Scarlatti, y L.v.Beethoven)” (página 109) se ha demostrado que las variables aleatorias creadas responden a una distribución de Gumble. Este hecho permite tratarlas con métodos estadísticos de reconocida aceptación en la comunidad científica. (información de publicación [82])

En el “Capítulo 5. Clasificación de estilos musicales clásicos por medio de análisis discriminante” (página 97) se ha demostrado que se puede aplicar el método estadístico de Análisis Discriminante a los porcentajes de uso de intervalos melódicos para clasificar piezas musicales por estilo musical (Barroco, Clásico y Romántico) con unos porcentajes de éxito del 80% (información de publicación [79]).

En el “Capítulo 13. Identificación de rasgos en el estilo musical de las sonatas para teclado de Domenico Scarlatti por medio de herramientas matemáticas y tecnológicas.” (página 202) se ha demostrado que se identifica las sonatas de Domenico Scarlatti como más próximas al clasicismo frente al barroco en una proporción promedio del 70% (información de publicación [80]).

Analizando cronológicamente la evolución del número de sonatas más próximas al estilo clásico en base al análisis discriminante aplicado con función lineal, se ha concluido que se observa una tendencia positiva en tiempo (ver Figura 89 - página 210), es decir, que a medida que evoluciona su vida y su estilo musical personal, más porcentaje de sonatas son clasificadas como clásicas en base a la aplicación del método de Análisis Discriminante.

Debe destacarse además que interpretando la Figura 89 (página 210), los dos momentos destacables en la evolución del estilo compositivo de Domenico Scarlatti son el periodo 1725-29 en que volvió a residir en Italia (acercándose nuevamente al estilo barroco según la interpretación del estudio) y el periodo 1730-35 en el que su estilo compositivo evoluciona con mayor velocidad hacia un estilo clásico (coincidiendo con el traslado definitivo a Madrid).<sup>350</sup>

En el “Capítulo 12. Identificación automática de la tonalidad de piezas musicales clásicas por medio de algoritmos evolutivos” (página 184) se ha presentado un método para identificar en 3 pasos y de manera automática la tonalidad de una pieza musical compuesta en armonía tonal con una probabilidad de éxito del 94,74% a partir de una versión MIDI de la misma mejorando en algunos casos los porcentajes de éxito e incrementando los escenarios de aplicación relajando los condiciones de aplicación al compararlo con otros métodos enumerados en el apartado “Capítulo 2. Revisión de investigaciones realizadas” (a partir de la página 62).

Al referirse a la relajación de las condiciones de aplicación se refiere a los siguientes aspectos:

- Independencia de la extensión de la obra analizada, su forma musical y su orquestación.
- Permite descubrir la tonalidad de obras para un sólo instrumentos monofónico.
- Independencia del estilo musical (entre barroco y clásico).

---

<sup>350</sup> Consultar la Tabla 109 (página 340, capítulo “Anexo 4 – Información de compositores analizados y catalogación.”) para consultar las fechas importantes en la vida de Domenico Scarlatti.

- Utilización de la totalidad del material musical de la obra.

Las investigaciones realizadas hasta la fecha en materia de identificación de tonalidad experimentan sus algoritmos de identificación de tonalidad o bien sobre canciones modernas (compuestas en una única tonalidad sin modulaciones) o bien sobre conjuntos de piezas musicales muy próximos en el tiempo, estilo y orquestación. El método de identificación de tonalidad presentado en esta tesis doctoral funciona independientemente del estilo musical, la orquestación, así como el discurso de modulaciones seguido en cada pieza al igual que todos los métodos presentados en esta tesis doctoral.

A partir de la funcionalidad de la aplicación AN\_MIDv5.1 que cuenta el número de notas de cada grado en base a la tonalidad de la pieza, se ha propuesto una nueva definición del concepto de compositor prolífico basado en un valor numérico CPF (*compositional prolificacy*) que cuenta el número de notas compuestas en vez del número de obras musicales compuestas (ver “Capítulo 10. Una nueva definición del término “compositor prolífico”” en la página 160).

Basándose en este valor CPF (medido en número de notas) aplicado a la forma sonata para teclado de los compositores Haydn, Mozart y Beethoven, se concluye que L.v.Beethoven con 32 sonatas es más prolífico que F.J.Haydn con 62 sonatas compuestas.

Se ha demostrado que los compositores de la muestra, a lo largo de su carrera compositiva han ido incrementando el EMP (*Extension of a Musical Piece*) de sus sinfonías, con lo cual se considera que hay una relación directa entre la madurez compositiva de un compositor y el EMP de sus composiciones.

Basado en el concepto de CPF se ha creado el concepto TCPF (*temporary compositional prolificacy* medida en notas compuestas por año) el cual tiene en cuenta el tiempo total invertido para crear sus composiciones. De este modo esta variable permite comparar la prolificidad de compositores longevos con la de compositores que desgraciadamente murieron jóvenes (como W.A. Mozart, J.C.Arriaga etc.) y valorar numéricamente su velocidad de creación con respecto al tiempo.

Se ha demostrado que, a pesar de que las Sonatas de Domenico Scarlatti tienen sólo 1 movimiento y las de F.J:Haydn 2 o 3, Domenico Scarlatti fue 5 veces más prolífico que F.J.Haydn componiendo sonatas.

También se ha desarrollado en esta tesis doctoral un método de evaluación de la corrección rítmica en la interpretación de una obra musical (a partir de su información en formato MIDI) llamado O.R.P.E.T. (*Objective Rhythmic Performance Evaluation Tool*) que permite obtener valores numéricos que permitan valorar cuanto se acercan a una interpretación maestra considerada como correcta una serie de interpretaciones las cuales se desea evaluar (ver “Capítulo 11. O.R.P.E.T. (Objective Rhythmic Performance Evaluation Tool) un método numérico objetivo de evaluación de la interpretación musical” a partir de la página 171). Dicha investigación ha sido aceptada para ser publicada en la revista *Journal of Music, Technology & Education* de la Universidad de Hull (Reino Unido) en noviembre de 2013 [83].

El método O.R.P.E.T. presentado en esta tesis doctoral tiene una aplicación en el campo de la educación musical como método para registrar objetivamente y numéricamente la evolución de la perfección rítmica de las interpretaciones de diferentes piezas por parte de un estudiante de piano.



## Bibliografía y referencias consultadas.

- 1: Barthélemy, J. & Bonardi A., "Figured Bass and Tonality Recognition", Proceedings of ISMIR. 2001, 2001
- 2: Dor O. and Reich Y., "An Evaluation of Musical Score Characteristics for Automatic Classification of Composers", Computer Music Journal, 2011, Vol. 35, No. 3, Pages 86-97, ISSN 0148-9267
- 3: Ferkova E., Milan Ž. y Šidlik P., "Tonal Theory for the Digital Age", ISBN-13: 978-0-936943-17-6
- 4: Carlos Pérez-Sancho, David Rizo and José M. Iñesta, "Genre classification using chords and stochastic language models", Taylor & Francis, 2008, Vol. 00, No. 00, January 2008, 1-13, ISSN: 0954-0091 print/ISSN 1360-0494 online
- 5: McKay C., Fujinaga, "Automatic music classification and the importance of instrument identification", Proceedings of the International Computer Music Conference, 2005
- 6: McKay C., Fujinaga I., "jSymbolic: A feature extractor for MIDI files", Proceedings of the International Computer Music Conference, 2006
- 7: McKay, C., and I. Fujinaga, "Style-independent computer-assisted exploratory analysis of large music collections", Journal of Interdisciplinary Music Studies 1 (1), 2007
- 8: Tzanetakis G. Ermolinskyi A, Cook P., "Pitch histograms in audio and symbolic music information retrieval", Journal of New Music Research, June 2004
- 9: Typke R., Wiering F. Veltkamp R., "A survey of music conformation retrieval systems.", ISMIR Proceedings, 2005
- 10: Urbano, Julián, "Information retrieval meta-evaluation: challenges and opportunities in the music domain", ISMIR 2011, 2011
- 11: Voorhees Ellen M., Harman Donna K., "TREC: Experiment and Evaluation in Information Retrieval", 2005, MIT Press, ISBN 0-262-22073-3
- 12: Ponce de Leon, P. J., y J. M. Iñesta, "Statistical description models for melody analysis and characterization.", Proceedings of the International Computer Music Conference, 2004
- 13: Mouton. R. and F. Pachet, "The Symbolic vs. Numeric Controversy in Automatic Analysis of Music", Proceedings of the Workshop on Artificial Intelligence and Music, International Joint Conference on Artificial Intelligence, August 1995
- 14: A. Shenoy, R. Mohapatra and Y. Wang, "Key determination of acoustic musical signals", Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Multimedia and Expo, ICME 2004, June 2004
- 15: Yipeng Li and DeLiang Wang, "Pitch Detection In Polyphonic Music Using Instrument Tone Models", June 2007, Honolulu, HI, ISBN 1-4244-0727-3 (ISSN: 1520-6149)
- 16: Fred T. Hofstetter, "The Nationalist Fingerprint in Nineteenth Century Romantic Chamber Music". in Computers and the Humanities 13, 1979, North-Holland Publishing Company
- 17: Pollastri, E., Simoncelli, G., "Classification of Melodies by Composer with Hidden Markov Models", Proceedings of the WedelMusic conference, 2001
- 18: Pérez-Sancho C., Iñesta P., and Calera-Rubio J., "Style Recognition through Statistical Event Models", SMC 2004, October 2004
- 19: Scholz, R., Vincent, E., Bimbot, F., "Robust modeling of musical chord sequences using probabilistic N-grams", Acoustics, Speech and Signal Processing, 2009. ICASSP 2009. IEEE International Conference on, 2009
- 20: Ponce de Leon P.P., Iñesta, J., "Pattern recognition approach for music style identification using shallow statistical descriptors", Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, IEEE Transactions on, 2007, Volume: 37 Issue: 2, pp 248 - 257, ISSN: 1094-6977
- 21: Temperley D., "An Algorithm for Harmonic Analysis", Music Perception, 1996, Vol 15, Nº 1, pp 31-68
- 22: Gómez, E., Ong B., & Herrera P., "Automatic Tonal Analysis from Music Summaries for Version Identification", AES 121th Convention, October 2006

- 23: Heinrich Taube, "Automatic Tonal Analysis: Toward the Implementation of a Music Theory Workbench", Massachusetts Institute of Technology, 1999, Vol. 23, No. 4, Pages 18-32, ISSN 0148-9267
- 24: Machine Learning Group at University of Waikato, 2011, "Weka 3: Data Mining Software in Java" , <http://www.cs.waikato.ac.nz/ml/weka/index.html>, Downloaded on January 2012
- 25: Tudurí T. and Serra B., "Analitzador MIDI Eina d'anàlisi estadística de partitures musicals" - Memòria de màster en TIC per la UIB, Julio 2009
- 26: Krumhansl, C.L., "Cognitive foundations of musical pitch" - Oxford Psychology Series, 17, 1990, Oxford University Press, New York, ISBN13: 9780195148367 / ISBN10: 0-19-514836-3
- 27: Krumhansl, C.L., Kessler E.J., "Tracing the dynamic changes in perceived tonal organization in a spatial representation of musical keys", Psychological Review, 1982, vol 89 pp 334-368
- 28: Temperley David, "An Evaluation System for Metrical Models", Computer Music Journal, 2004, Volume 28 Issue 3, Pages 28-44, ISSN: 0148-9267 EISSN: 1531-5169
- 29: Kostka S., Payne D., "Tonal Harmony", 2004, McGraw Hill, ISBN 0-07-285260-7
- 30: Temperley D., "What's Key for Key? The Krumhansl-Schmuckler Key-Finding Algorithm Reconsidered.", Music Perception, 1999, Vol. 17, No. 1, 65-100
- 31: Longuet-Higgins H.C., and Steedman M.J., "On interpreting Bach", Machine Intelligence, 1971, Vol 6, pp 221-241
- 32: Diane j. Hu, Lawrence K. Saul, "A probabilistic topic model for unsupervised learning of musical key-profiles", ISMIR 2009, 2009
- 33: Cruz-Alcázar, P. P., E. Vidal, and J. C. Pérez-Cortes, "Musical style identification using grammatical inference", CIARP 2003, 2003
- 34: P.P. Cruz-Alcázar y E. Vidal, "Two Grammatical Inference Applications In Music Processing", Applied Artificial Intelligence, 2008, 22 pp. 53-76, ISSN: 0883-9514
- 35: Bas de Haas W., Magalhaes J.P., Wiering F., Veltkamp R.C., "HarmTrace: Automatic functional harmonic analysis", 2011
- 36: De Haas, W. B., M. Rohrmeier, R. C. Veltkamp, and F. Wiering, "Modeling harmonicsimilarity using a generative grammar of tonal harmony.", Proceedings of the 10th International Conference on Music Information Retrieval (2009)
- 37: De la Fuente J.C y Rodríguez M., "Analizador Tonal en Software Libre", 2010
- 38: Meredith David, "PITCH SPELLING ALGORITHMS" - Proceedings of the 5th Triennial ESCOM Conference, R. Kopiez, A. C. Lehmann, I. Wolther & C. Wolf, September 2003
- 39: Meredith David, 2007, "Computing Pitch Names in Tonal Music: A Comparative Analysis of Pitch Spelling Algorithms" - Doctoral thesis , [www.titanmusic.com/papers/public/meredith-dphil-final.pdf](http://www.titanmusic.com/papers/public/meredith-dphil-final.pdf), Downloaded on March 2012
- 40: Cambouropoulos E., "Pitch Spelling: A Computational Model", Music Perception, 2003, Summer 2003, Vol. 20, No. 4, ISSN: 0730-7829
- 41: Longuet-Higgins, H. C., "The Perception of Melodies" - "Mental Processes: Studies in Cognitive Science", 1987, MIT Press, London
- 42: Temperley D., "The Cognition of Basic Musical Structures", 2001, MIT Press, Cambridge, ISBN-13:978-0-262-20134-6
- 43: Temperley D., "A Bayesian Approach to Key-Finding David Temperley", Proceedings in Music and Artificial Intelligence (ICMAI 2002), 12-14 September 2002
- 44: Peeters P., "Musical key estimation of audio signal based on hidden markov modeling of chroma vectors", Proc. of the 9th Int. Conference on Digital Audio Effects (DAFx-06), 2006
- 45: Madsen, S. T. and Widmer, G., "Key-Finding with Interval Profiles", Proceedings of the International Computer Music Conference (ICMC'07), 2007
- 46: Chuan C., Chew E. , "Polyphonic Audio Key Finding Using the Spiral Array CEG Algorithm", International Conference on Multimedia and Expo, 2005. ICME 2005, 2005
- 47: Aljanaki A., "Automatic musical key detection", 2011

- 48: Holtzmann S.R., "A program for key determination", *Interface* , 1977, Vol 6, pp 29-56, ISSN 0303-3902
- 49: Chuan C., Chew E. , "Fuzzy Analysis in Pitch-Class Determination for Polyphonic Audio Key Finding", edited by: Joshua D. Reiss, Geraint A. Wiggins, 2005
- 50: Vos P.G., Geenen E., "A Parallel-Processing Key-finding Model", *Music Perception*, 1996, Vol 4 n°.2, pp 185-224
- 51: Quinn I., "Are Pitch-Class Profiles Really Key for Key?", *Zeitschrift der Gesellschaft der Musiktheorie*, 2010, Vol 7, pp 151-163, ISSN 1862-6742
- 52: Gómez E., "Key Estimation from Polyphonic Audio", 1st Annual Music Information Retrieval Evaluation eXchange (MIREX'05), 2005
- 53: Gouyon F. and Dixon S., "A Review of Automatic Rhythm Description Systems", *Computer Music Journal*, 2005, Volum 29 (1) pp. 34-54, ISSN: 0148-9267 EISSN: 1531-5169
- 54: Hockman J., 2008, "An Overview of Beat Tracking Techniques" , [http://www.music.mcgill.ca/~hockman/coursework/MUMT\\_611/final/jhockman\\_611final.pdf](http://www.music.mcgill.ca/~hockman/coursework/MUMT_611/final/jhockman_611final.pdf), Downloaded on April 2012
- 55: Simon Dixon, "An Empirical Comparison of Tempo Trackers", *Proc. 8th Brazilian Symp. Computer Music*, 2001
- 56: Paulus J. and Klapuri A., "Measuring the similarity of Rhythmic Patterns" *ISMIR-2002*, , 2002
- 57: Uhle C. and Herre J., "Estimation of tempo, micro time and Time Signature from percussive music" 6th Int. Conference on Digital Audio Effects (DAFX-03), , 2003
- 58: Sepp J., Eronen A., Hiipakka J., "Joint Beat & Tatum Tracking from Music Signals" - *ISMIR2006 Conference*, , 2006
- 59: Dixon Simon, "Beat induction and rhythm recognition", *Lecture Notes in Computer Science*, 1997, Volume 1342/1997, pp 311-320, DOI: 10.1007/3-540-63797-4\_84
- 60: Simon Dixon, "An Interactive Beat Tracking and Visualisation System", *Proc. Intl. Comput. Music Conf.*, 2001
- 61: Seppänen Jarno, "Computational models of musical meter recognition", 2002
- 62: Seppänen J., "Tatum Grid Analysis of Musical Signals", *IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics Mohonk*, 2001
- 63: Brown, J., "Determination of the Meter of Musical Scores by Autocorrelation.", *Journal of the Acoustical Society of America*, 1993, Vol 94 (4):1953–1957.
- 64: Henkjan Honing, "From Time to Time: The Representation of Timing and Tempo", *Computer Music Journal*, 2001, Vol 25 (3): pp 50-61, ISSN: 01489267
- 65: Simon Dixon, "Automatic Extraction of Tempo and Beat From Expressive Performances", *Journal of New Music Research* , 2001, Vol 30, (1) pages 39-58, PreviewBuy now DOI: 10.1076/jnmr.30.1.39.7119
- 66: Driesse, A., "Real-time tempo tracking using rules to analyze rhythmic qualities", *Proceedings of the 1991 ICMC*, 1991
- 67: Tzanetakis G., "Tempo extraction using beat histograms", *Proceedings of the 1st Music Information Retrieval Evaluation eXchange (MIREX 2005)*, 2005
- 68: Uhle C., "Tempo induction by investigating the metrical structure of music using a periodicity signal that relates to the tatum period", *Proceedings of the 6th International Conference on Music Information Retrieval*, 2005
- 69: Cemgil A., Kappen B., et al., "On tempo tracking: Tempogram Representation and Kalman filtering", *Journal of New Music Research*, 2000, Volume: 29, Issue: 4 pp 259-273, ISSN: 09298215
- 70: Ferguson S., "Learning Musical Instrument Skills Through Interactive Sonification", *Proceedings of the 2006 International Conference on New Interfaces for Musical Expression (NIME06)*, 2006
- 71: Antti J., Cumhur E. , "Auditory feedback in an interactive rhythmic tutoring system", *Proceedings of the 6th Audio Mostly Conference: A Conference on Interaction with Sound*, 2011
- 72: Percival G.P., "Computer-Assisted Musical Instrument Tutoring with Targeted Exercises", 2008

- 73: E. Schoonderwaldt, A. Askenfelt, and K. F. Hansen, "Design and implementation of automatic evaluation of recorder performance in IMUTUS", Proceedings of the International Computer Music Conference, 2005
- 74: D. Fober, S. Letz, Y. Orlarey, "VEMUS - feedback and groupware technologies for music instrument learning", SMC07 - Proceedings SMC'07, 4th Sound and Music Computing Conference, 2007
- 75: Gouyon F., Klapuri A., Dixon S., Alonso M., Tzanetakis G., Uhle C. y Cano P., "An experimental comparison of audio tempo induction algorithms", IEEE Transactions on Speech and Audio Processing, 2006, Volume 14, pp 1832-1844
- 76: Kröger P., Passos A., Sampaio M., de Cidra G., "Rameau: A System For Automatic Harmonic Analysis", In Proceedings of the 2008 International Computer Music Conference (ICMC2008), 2008
- 77: Pardo B. y Birmingham W.P., "Algorithms for chordal analysis", Computer Music Journal, 2002, 26(2): pp 27-49
- 78: Temperley D. and Sleator D., "Modeling meter and harmony: a preference-rule approach", Computer Music Journal, 1999, 23(1) pp 10-27
- 79: Tudurí A., Serra B. and Company J., "Un nuevo método de clasificación de piezas musicales clásicas utilizando indicadores objetivos de bajo nivel", "El artista: revista de investigaciones en música y artes plásticas" - Martha Lucia Barriga Monroy, Diciembre 2011, N°8 pp 135-152, ISSN 1794-8614
- 80: Tudurí A., Serra B. and Díaz A., "Identificación de rasgos en el estilo musical de las sonatas para teclado de Domenico Scarlatti por medio de herramientas matemáticas y tecnológicas.", "El artista: revista de investigaciones en música y artes plásticas" - Martha Lucia Barriga Monroy, Diciembre 2012, N° 9, pp 267-286, ISSN-e: 1794-8614
- 81: Hail Christopher, 2010, "Domenico Scarlatti - Chronology" , <http://mysite.verizon.net/chrishail/scarlatti/chronology.html>, downloaded on September 2010
- 82: Tudurí A., Serra B., Company J., "Un nuevo enfoque cuantitativo en la identificación del estilo compositivo de autores clásicos (F. J. Haydn, W. A. Mozart, D. Scarlatti Y L. V. Beethoven)", Música Revista del Real Conservatorio Superior de Madrid, 2011-2012, n° 18 y 19, ISSN 0541-4040
- 83: Tudurí A., Serra B., Mut T., "O.R.P.E.T. (Objective Rhythmic Performance Evaluation Tool) a numerical method to evaluate the accuracy of a musical performance", Journal of Music, Technology & Education, 2013, Volume 6 Issue 1, ISSN: 17527066 / Online ISSN: 17527074
- 84: Prisa Digital S.L., n.d., "La música del Clasicismo" , [http://www.kalipedia.com/arte/tema/caracteristicas-clasicismo-musical.html?x=20070822klpartmsc\\_109.Kes&ap=0](http://www.kalipedia.com/arte/tema/caracteristicas-clasicismo-musical.html?x=20070822klpartmsc_109.Kes&ap=0)
- 85: Vernon P.E., THE PERSONALITY OF THE COMPOSER , Music and Letters, 1930, doi:10.1093/ml/XI.1.34
- 86: Classical Archives LLC, n.d., "The Ultimate Classical Music Destination" , <http://www.classicalarchives.com>, downloaded from may 2007 – may 2010
- 87: Guo E., 2008, "Proyecto Biblioteca Internacional de Partituras Musicales (IMSLP)" , <http://imslp.org>
- 88: NIST/SEMATECH, 2006, "e-Handbook of Statistical Methods" , <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/eda/section3/eda35e.htm>, downloaded on December 2010
- 89: Franquet Bernis José María, "El caudal mínimo medioambiental del tramo inferior del río Ebro", May 2009, UNED-Tortosa, ISBN: 978-84-930671-7-5
- 90: Pizarro R., Flores J.P., Sangüesa C., Martínez E. , n.d., "Leyes de distribución de procesos hidrológicos" , [http://eias.usalca.cl/Docs/pdf/Publicaciones/manuales/a\\_modulo\\_leyes.pdf](http://eias.usalca.cl/Docs/pdf/Publicaciones/manuales/a_modulo_leyes.pdf)
- 91: Ycard B., 2005, "Test de Kolmogorov-Smirnov" , <http://ljk.imag.fr/membres/Bernard.Ycart/emel/cours/ts/node7.html>, downloaded on february 2011
- 92: Gutiérrez E. , 2004, "Valores críticos del estadístico de Kolmogorov-Smirnov" , <http://personal.us.es/egm/Archivos para descargar/K-S.pdf> , downloaded on february 2011
- 93: Marin J.M., 2010, Análisis Discriminante , <http://halweb.uc3m.es/esp/Personal/personas/jmmarin/esp/AMult/tema6am.pdf>, Downloaded on January 2011
- 94: Williams P., "The Organ Music of J.S.Bach" - Second Edition, 2003, 9780521891158

- 95: New World Encyclopedia, 2008,New World Encyclopedia 2008 ,  
[http://www.newworldencyclopedia.org/entry/Georg\\_Philipp\\_Telemann](http://www.newworldencyclopedia.org/entry/Georg_Philipp_Telemann),
- 96: Espasa-Calpe, Diccionario de la Lengua Española (22ª ed.) (2 vols.), 2001,Editorial Espasa Calpe,Madrid,ISBN: 9788423968145
- 97: , April 2008, , [http://www.newworldencyclopedia.org/entry/Georg\\_Philipp\\_Telemann](http://www.newworldencyclopedia.org/entry/Georg_Philipp_Telemann),
- 98: Wikipedia, n.d., "Köchel Catalogue of Mozart production" ,  
[http://es.wikipedia.org/wiki/Catálogo\\_Köchel](http://es.wikipedia.org/wiki/Catálogo_Köchel),
- 99: Buxadé Carlos, "Reproducción y alimentación" tomo II "Zootecnica bases de producción animal" collection, 1994,ISBN 84-7114-544-8
- 100: Wikipedia , n.d., "MIDI Standard Definition" , <http://es.wikipedia.org/wiki/MIDI>
- 101: Werner Icking, n.d.,The Werner Icking Music Archive , <http://icking-music-archiv.org/>,downloaded on July 2011
- 102: García Pérez J., "Maestros de la música". Notas al disco Scarlatti, sonatas para clavicémbalo., 1989,Planeta- De Agostini S.A,Barcelona
- 103: Dr. Roger Alier, "Conocer y reconocer la música". Domenico scarlatti. , 1985,Ediciones Daimon,Barcelona,ISBN: 84-231-2843-1
- 104: Denis Matthews, La música para teclado. (Título original keyboard music - Penguin books, 1972), 1991,Taurus ediciones, S.A. ,Madrid,ISBN:84-306-5607-3
- 105: Chris Hail, 2010,"Domenico Scarlatti - Chronology" ,  
<http://mysite.verizon.net/chrishail/scarlatti/chronology.html>
- 106: Iftene A., Rusu A. and Leahu A., "Music Identification Using Chroma Features.", CLEF (Notebook Papers/Labs/Workshop) 2011 ,2011
- 107: Politis D., Margounakis D., "In Search for Chroma in Music", Proceedings of the 7th WSEAS International Conference on Systems,2003
- 108: Demany L. and Armand F., "The perceptual reality of tone chroma in early infancy",Journal of the Acoustical Society of America , 2004, Volume 76, Issue 1, pp. 57-66
- 109: Lerdahl F. and Jackendoff J. , capítulo 2 - "Introduction to Rhythmic Structure" (Traducción de Martín García) - Generative Theory of Tonal Music, , 1983,Cambridge, Mass. : MIT Press,ISBN: 0262120941
- 110: Cruz-Alcázar P., Vidal E., "Learning Regular Grammars to Model Musical Style: Comparing Different Coding Schemes", Proceedings 4th International Colloquium ICGI-98,1998
- 111: Anonymous, February 2006, "(.mid) Standard MIDI File Format" ,  
<http://faydoc.tripod.com/formats/mid.htm>,downloaded on September 22, 2009
- 112: Anonymous, n.d., "Standard MIDI File (SMF) Format" ,  
<http://www.blitter.com/~russtopia/MIDI/~jglatt/tech/midifile.htm>,downloaded on September 22, 2009
- 113: Glenn Andreas, Fridley, MN, Dec 2009, "Using QuickTime 2.0 to make some music of your own" ,  
<http://www.mactech.com/articles/mactech/Vol.10/10.10/MIDIMusic/index.html>
- 114: Stuart S., December 1996, "Outline of the Standard MIDI File Structure" ,  
<http://253.ccarh.org/handout/smf/>,downloaded on December 12, 2009
- 115: MIDI Manufacturers Association, n.d., "The Complete MIDI 1.0 Detailed Specification" ,  
<http://www.midi.org/techspecs/midispec.php>,downloaded on September 20, 2009.

## Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados

Nota al lector: Los contenidos de este capítulo han sido obtenidos mayoritariamente de las referencias de las notas a pie de página de cada uno de los términos explicados aunque dicho contenido ha sido simplificado y adaptado al objetivo de este Anexo que es el de servir como compendio de términos musicales de consulta en el caso de que el lector necesite profundizar en dichos conceptos referenciados a lo largo del texto.

En la selección de los contenidos y definiciones de este anexo se ha tenido especial atención en el carácter genérico, divulgativo y sin profundizar excesivamente en los detalles de las definiciones. Se ha hecho así para permitir una guía de referencia amena y sencilla a todos aquellos lectores sin conocimientos muy profundos en el área de la teoría musical.

### Acorde musical.

En música y teoría musical, un acorde consiste en un conjunto de dos o más notas diferentes que suenan simultáneamente o en sucesión y que constituyen una unidad armónica. En determinados contextos, un acorde también puede ser percibido como tal aunque no suenen todas sus notas. Pueden formarse acordes con las notas de un mismo instrumento o con notas de diferentes instrumentos (incluyendo la voz humana) tocados a la vez. Formalmente, un acorde consta de entre tres y siete notas de las doce que componen una octava; las notas pueden pertenecer a la misma o a diferentes octavas. La distancia entre dos notas musicales se conoce como intervalo musical; los intervalos musicales, combinados, determinan los diferentes tipos de acordes. Cada tipo de acorde puede presentar como tono fundamental cualquiera de las doce notas musicales (do, do#, re, mi♭, mi, fa, fa#, sol, lab, la, si♭, si). Este tono fundamental (también conocido como “nota fundamental”, “fundamental”, “nota tónica” o “tónica”) determina la tonalidad del acorde y constituye la referencia para los intervalos del mismo.<sup>351</sup>

Los acordes más frecuentes de 3 y 4 notas simultáneas son los siguientes:

**De 3 notas:** mayor (fundamental, tercera y quinta), menor (m) (fundamental, tercera menor y quinta), con cuarta suspendida (4sus, sus4 o sus) (fundamental, cuarta y quinta), disminuido (dim, Δ o °) (fundamental, tercera menor y quinta disminuida), aumentado (+) (fundamental, tercera y quinta aumentada) y con segunda suspendida (2sus, sus2) (fundamental, segunda y quinta).



Figura 102: Acordes de 3 notas (triadas) más frecuentes en la música tonal asociados a la tonalidad de Do Mayor (fuente wikipedia).

**De 4 notas:** séptima o mayor séptima (7) (fundamental, tercera, quinta y séptima (menor)), menor séptima (m7) (fundamental, tercera menor, quinta y séptima (menor)), séptima mayor (Maj7 o 7M) (fundamental, tercera, quinta y séptima mayor), menor séptima mayor (mMaj7, m7M) (fundamental, tercera menor, quinta, séptima mayor), séptima con cuarta suspendida (7sus4 o 7sus) (fundamental, cuarta, quinta y séptima (menor)), disminuido (propriadamente dicho) o disminuido con séptima (dim7, °7, Δ7 o dim en determinados contextos) (fundamental, tercera menor, quinta

351 Información obtenida de “<http://es.wikipedia.org/wiki/Acorde>” consultada en noviembre de 2011.

disminuida y sexta), séptima con quinta bemol ( $7b5$ ,  $7(b5)$  o  $7-5$ ) (fundamental, tercera, quinta disminuida, séptima (menor)), séptima con quinta aumentada ( $7\#5$ ,  $7(\#5)$  o  $7+5$ ) (fundamental, tercera, quinta aumentada, séptima (menor)), menor séptima con quinta bemol o semidisminuido ( $m7b5$ ,  $m7(b5)$  o  $m7-5$ ) (fundamental, tercera menor, quinta disminuida, séptima (menor)), menor séptima con quinta aumentada ( $m7\#5$ ,  $m7(\#5)$  o  $m7+5$ ) (fundamental, tercera menor, quinta aumentada, séptima (menor)), sexta (6) (fundamental, tercera, quinta y sexta), menor sexta ( $m6$ ) (fundamental, tercera menor, quinta y sexta), sexta con cuarta suspendida ( $6sus4$  o  $6sus$ ) (fundamental, cuarta, quinta y sexta), con novena o con novena añadida ( $add9$ ) (fundamental, tercera mayor, quinta y novena (o segunda en la siguiente octava)), menor con novena o menor con novena añadida ( $madd9$ ) (fundamental, tercera menor, quinta y novena), con undécima, con undécima añadida o con onceava añadida ( $add11$ ) (fundamental, tercera, quinta y undécima (o cuarta en la siguiente octava)).

Cualquier nota de un acorde puede ser cambiada de una octava a otra, en un proceso llamado inversión. A través de este proceso de inversión se logra una variedad de texturas. Cada inversión viene definida por el bajo (nota más grave) de las que forman el acorde. Son irrelevantes para cada inversión, por consiguiente, tanto el orden de las notas, como su aparición o no en el acorde, con excepción de la más grave. La Figura 103 muestra algunos ejemplos de inversiones de la triada de Do Mayor.



Figura 103: Acorde de do mayor en estado fundamental y en primera y segunda inversiones.

## Armadura de clave

La armadura de clave o simplemente armadura en notación musical es el conjunto de alteraciones propias (sostenidos o bemoles) que escritas al principio del pentagrama sitúan una frase musical en una tonalidad específica. Su función es determinar qué notas deben ser interpretadas de manera sistemática un semitono por encima o por debajo de sus notas naturales equivalentes, a menos que tal modificación se realice mediante alteraciones accidentales.<sup>352</sup>

Las armaduras de clave por lo general se representan al principio de una línea de notación musical, inmediatamente después de la clave y antes del signo de compás. Su propósito es reducir al mínimo el número de alteraciones necesarias para anotar la música en la partitura a lo largo de una pieza. Por esa razón, se suelen emplear las armaduras para evitar la complicación de tener que escribir las alteraciones accidentales cada vez que aparecen las notas musicales que deban ser alteradas en una determinada tonalidad tal como muestran las figuras 104 y 105.



Figura 104: Tonalidad de si mayor sin armadura, por tanto requiere alteraciones accidentales.



Figura 105: Tonalidad de si mayor con armadura, no requiere alteraciones accidentales.

352 Información obtenida de “[http://es.wikipedia.org/wiki/Armadura\\_de\\_clave](http://es.wikipedia.org/wiki/Armadura_de_clave)” consultada en fecha 21/06/2012.

Las alteraciones de la armadura, que se denominan alteraciones propias, aparecen siempre siguiendo un orden determinado, que varía dependiendo de que se trate de bemoles o de sostenidos. El orden de bemoles es el inverso al de sostenidos y viceversa. En el sistema latino de notación son:

- Orden de bemoles, avanzando ascendentemente por cuartas: Si - Mi - La - Re - Sol - Do - Fa
- Orden de sostenidos, avanzando ascendentemente por quintas: Fa - Do - Sol - Re - La - Mi - Si

El efecto de la armadura se extiende a lo largo de una pieza o movimiento, exceptuando que este sea expresamente cancelado mediante una nueva armadura o bien mediante un signo de becuadro. Además, si una armadura al principio de una pieza indica por ejemplo que la nota *si* debe ser tocada como *si* bemol, incluso las notas *si* de octavas superiores e inferiores se verán afectadas por esta regla. La única excepción será que la nota *si* vaya precedida por una alteración accidental que anule el efecto de la armadura.

Cuando un intérprete lee una partitura por primera vez, sólo con ver la armadura puede hacerse una idea de la tonalidad en que se encuentra la obra. En principio, cualquier pieza puede ser escrita en cualquier tonalidad con su armadura específica, utilizando luego alteraciones accidentales para corregir individualmente cada nota en la que tal armadura no debería aplicarse.

## Armonía musical

El estudio de la armonía sólo se justifica en relación a la música occidental, ya que la Occidental es la única cultura que posee una música polifónica, es decir, una música en la que se usa ejecutar distintas notas musicales en forma simultánea y coordinada. De modo que, a pesar de que el estudio de la armonía pueda tener alguna base científica, las normas o las descripciones de la armonía tienen un alcance relativo, condicionado culturalmente.<sup>353</sup>

En la música occidental, la armonía es la subdisciplina que estudia el encadenamiento de diversas notas superpuestas; es decir: la organización de los acordes. Se llama “acorde” a la combinación de tres o más notas diferentes que suenan simultáneamente (o que son percibidas como simultáneas, aunque sean sucesivas, como en un arpeggio). Cuando la combinación es solo de dos notas, se llama “bicordio”. Esto también puede ser considerado un acorde.

La armonía se refiere al aspecto “vertical” (simultáneo en el tiempo) de la música, que se distingue del aspecto horizontal (la melodía, que es la sucesión de notas en el tiempo). La idea de vertical y horizontal es una metáfora explicativa, relacionada a la disposición de las notas musicales en una partitura: verticalmente se escriben las notas que se interpretan a la vez, y horizontalmente las que se interpretan en forma sucesiva.

En la escolástica musical, el contrapunto es una disciplina complementaria a la armonía (y que se confunde con ella), pero que se centra más en la elaboración de melodías que sean combinables simultáneamente que en los acordes resultantes de tal combinación. Es decir: se centra más en la percepción de las partes que en la del todo. Como disciplina creativa (y no como disciplina académica), el contrapunto tuvo su auge durante el Barroco, particularmente con la figura de J.S.Bach.

Las definiciones habituales de la armonía suelen describirla como la “ciencia que enseña a constituir los acordes y que sugiere la manera de combinarlos en la manera más equilibrada, consiguiendo así sensaciones de relajación, sosiego (armonía consonante), y de tensa e hiriente (armonía disonante)”.

---

353 Información obtenida de “<http://es.wikipedia.org/wiki/Armonía>” consultada en fecha 21/12/2011.



Esta definición se basa en la idea de que ciertas combinaciones de sonidos (intervalos o acordes) producen al oyente una sensación de tensión (combinaciones que se llaman disonantes) y otras producen una sensación de reposo o calma (combinaciones consonantes).

Esta diferencia entre sonidos consonantes y disonantes tiene una base acústica: cada sonido incluye dentro de sí a varios sonidos que suenan con menor volumen (llamados armónicos); cuando la combinación de sonidos ejecutados incluye a varias notas con sonidos “armónicos” en común, tales combinaciones serán percibidas como consonantes.

## Articulaciones

La articulación en música alude a la forma en que se produce la transición de un sonido a otro o bien sobre la misma nota. Se trata del conjunto de elementos que definen las diferentes posibilidades en las que se pueden conectar entre sí las notas que conforman una melodía o por extensión los acordes que conforman una sucesión de acordes en un pasaje o composición homofónico. Estas posibilidades se diferencian básicamente en función de tres elementos:<sup>354</sup>

- El ataque de cada nota.
- La caída de cada nota.
- El grado de interrupción o de continuidad del sonido existente entre las distintas notas.

En su conjunto la articulación tiene uno de los efectos más importantes sobre la expresión de la música.



Figura 106: Ejemplos de articulaciones, de izquierda a derecha: *staccato*, *staccatissimo*, *marcato*, *acento* y *tenuto*.

Todos los matices y las gradaciones de la articulación se mueven entre dos extremos que responden a las denominaciones de *legato* y *staccato*.

- El *legato*, que significa *ligado* en italiano, expresa no sólo una continuidad absoluta del sonido entre nota y nota, sino también que esta continuidad no se ve turbada ni por un aumento de la intensidad en el ataque de cada nota, ni por una disminución de ésta en la caída.
- Por su parte, el *staccato*, que también suele denominarse picado, sí representa una interrupción total del sonido entre nota y nota, sin que ello suponga una incidencia específica ni sobre el ataque ni sobre la caída.

Los principales tipos de articulación son: *legato*, *staccato* (o picado), *staccatissimo*, *portato* (o picado-ligado), *tenuto*, *acento*, *marcato* y *martellato* (o también según la denominación francesa *martelé*). Cada uno de estos tipos viene representado en notación musical con un símbolo específico que se sitúa inmediatamente por encima o por debajo (según la plica de la nota esté orientada respectivamente hacia abajo o hacia arriba) de cada nota afectada por esta articulación.

### Articulaciones de duración

Hay tres articulaciones que afectan a la duración de una nota musical o acorde. Son el *staccatissimo*, el *staccato* y el *tenuto*.

354 Información obtenida y resumida de “[http://es.wikipedia.org/wiki/Articulación\\_\(música\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Articulación_(música))” consultada en fecha 10/06/2012.

## Articulaciones de intensidad

Hay tres articulaciones que afectan a la intensidad con la que se ataca una nota musical o acorde. Son el *tenuto*, el *acento* y el *marcato*. El signo de *tenuto* puede funcionar como una articulación de duración o bien de intensidad.

## Articulaciones combinadas

En ocasiones, las articulaciones se pueden combinar para crear sonidos exactos estilística o técnicamente. Por ejemplo, cuando los signos de *staccato* se combinan con ligaduras de expresión el resultado se conoce como *portato* o *legato* articulado. Los signos de *tenuto* bajo una ligadura de expresión se llaman "ganchos de arco" para cuerda frotada. Esta denominación también se aplica aunque con menos frecuencia a los signos de *staccato* o *martellato*.

## Apagados

Los *apagados* hacen referencia a las notas que se tocan "apagadas" o "silenciadas", sin sostener. El término se escribe por encima o por debajo de las notas con una línea punteada o discontinua dibujada hasta el final del grupo de notas que debe interpretarse "apagado". Esta técnica es empleada principalmente para instrumentos de cuerda frotada o pulsada. Los compositores modernistas se refieren al apagado como "*palm mute*". En la guitarra el músico amortigua las cuerdas con la palma de la mano y puntea con el pulgar.

## **Bajo cifrado**

El bajo cifrado es un sistema de cifrado musical, originado en el Barroco, y a partir de un género y estilo musical determinado: el bajo continuo. Consiste en un sistema de representación mixto en que bajo una línea convencional de bajo se escriben cifras que representan los acordes que deben realizarse simultáneamente con dicha línea grave. Es decir, es un lenguaje de abreviaturas armónicas. La realización exacta de melodías intermedias proporcionadas por dichos acordes apuntados, se dejaba a la ejecución o inspiración del instrumentista (en muchas ocasiones, el director de la orquesta, al clave; o el maestro de capilla, al órgano).<sup>355</sup>

En el periodo barroco, cuando tiene su florecimiento, y debido al propio estilo del bajo continuo, y su búsqueda de claridad y sencillez, se va logrando un hábil y efectivo esquematismo que elimina datos innecesarios (y aclara el camino para la posterior síntesis de la teoría).

Esta abreviatura acórdica se vio desde el primer momento favorecida por la enorme frecuencia de los acordes perfectos en ese momento histórico, lo que hizo posible presuponerlos cuando no hubiera cifra alguna, y originar así un sistema desarrollado de simplificaciones (estenográfico) de enorme concisión y eficacia, a la hora de esquematizar una armonía.

Una vez superada la época del bajo continuo como textura musical (en época clásica se escriben ya todos los sonidos implicados) el valor del bajo cifrado pasa a ser eminentemente analítico y teórico (sobre todo, en pedagogía) y es entonces cuando los dialectos latino y anglosajón del bajo cifrado comienzan un proceso de separación, ya que el anglosajón continúa manteniendo el vocabulario básico (en sus ejercicios de coral), mientras que el latino (sobre todo, francés) procura incorporar los avances que en materia de teoría armónica se van sucediendo y, en concreto, concede un protagonismo especial a la llamada función tonal de sensible (principios de análisis funcional, no solo gramatical).

## Convenciones del sistema

La esquematización profunda del sistema de escritura del bajo cifrado depende de dar por sentado una serie de convencionalismos:

---

355 Información obtenida en [http://es.wikipedia.org/wiki/Bajo\\_cifrado](http://es.wikipedia.org/wiki/Bajo_cifrado) y consultada en fecha 21/12/2011.

- Si no se escribe ninguna cifra debajo de una nota, se sobrentiende el acorde de 3ª y 5ª.
- Un cifrado de 6 sobrentiende la 3ª del acorde (en caso que fuera un acorde de 6ª y 4ª hay que cifrarlo completo).
- También se cifran completos los casos en que las notas de los acordes de 5ª o de 6ª están alteradas con respecto a la armadura.
- Si cualquier nota tiene una alteración que no corresponde con la armadura, ese intervalo hay que cifrarlo forzosamente, y poner la alteración correspondiente a la izquierda del número.
- Si sólo aparece una alteración sin número, esa alteración se refiere siempre a la tercera partiendo del bajo.
- Si aparece una cruz significa que en ese acorde suena la nota sensible, si no tiene número será la tercera a partir del bajo; si lo tiene, expresará el intervalo en que aparecerá dicha sensible (bajo cifrado semi-funcional).
- Cualquier cifra atravesada por una barra transversal (p.e. “/”) indica que dicho intervalo es disminuido.
- Algunas veces, en el primer acorde, aparecen 3 números, los de 3,5 y 8 en cualquier orden (preferentemente en la parte superior al bajo); no expresa el tipo de acorde, que se da por sabido, sino la disposición de las voces dentro de ese acorde.
- Una barra de continuidad significa el mantenimiento de la armonía.
- una raya anterior a un cifrado significa un retardo en el bajo.
- una raya oblicua tras un cifrado implica la repetición de éste.
- 0: significa ejecutar el bajo "tasto" solo.

## Círculo de quintas

En teoría musical, el círculo de quintas (o círculo de cuartas) representa las relaciones entre los doce tonos de la escala cromática, sus respectivas armaduras de clave y las tonalidades relativas mayores y menores. Concretamente, se trata de una representación geométrica de las relaciones entre los 12 tonos de la escala cromática en el espacio entre tonos. Dado que el término “quinta” define un intervalo o razón matemática que constituye el intervalo diferente de la octava más cercano y consonante, el círculo de quintas es un círculo de tonos o tonalidades estrechamente relacionados entre sí. Los músicos y los compositores usan el círculo de quintas para comprender y describir dichas relaciones. El diseño del círculo resulta útil a la hora de componer y armonizar melodías, construir acordes y desplazarse a diferentes tonalidades dentro de una composición.<sup>356</sup>

La tonalidad de *do* mayor, que no tiene ni sostenidos ni bemoles, se sitúa al inicio del círculo. Siguiendo el círculo de quintas ascendentes a partir de *do* mayor, la siguiente tonalidad, *sol* mayor, tiene un sostenido; a continuación, *re* mayor tiene 2 sostenidos, y así sucesivamente. De la misma manera, si se avanza en sentido contrario a las agujas del reloj desde el principio del círculo mediante quintas descendentes, la tonalidad de *fa* mayor tiene un bemoles, *Sib* mayor tiene 2 bemoles, y así sucesivamente. Al final del círculo, las tonalidades de sostenidos y de bemoles se superponen, con lo que aparecen pares de armaduras de tonalidades enarmónicas.

Empezando desde cualquier altura del ciclo y ascendiendo mediante intervalos de quintas temperadas iguales, se va pasando por todos los doce tonos en el sentido del reloj, para terminar

---

<sup>356</sup> Información obtenida y resumida en “[http://es.wikipedia.org/wiki/Circulo\\_de\\_quintas](http://es.wikipedia.org/wiki/Circulo_de_quintas)” y consultada en fecha 21/12/2011.

regresando al tono inicial (ver Figura 107). Para recorrer los doce tonos en sentido contrario al reloj, es necesario ascender mediante cuartas, en lugar de quintas. La secuencia de cuartas da al oído una sensación de asentamiento o resolución.

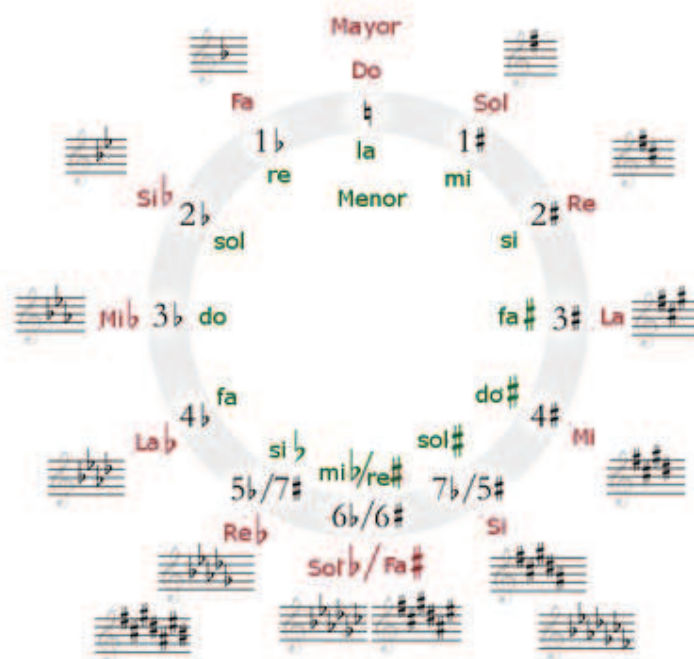


Figura 107: Circulo de Quintas detallado por Nikolai Diletskii en 1679.

Los tonos de la escala cromática no sólo están relacionados mediante el número de semitonos que los separa dentro de la escala, sino que también se relacionan armónicamente dentro del círculo de quintas. Invertiendo la dirección del círculo de quintas, se crea el círculo de cuartas. Por norma general, el “círculo de quintas” se emplea en el análisis de música clásica, mientras que el “círculo de cuartas” se utiliza en el análisis de jazz, aunque esta distinción no es estricta. Dado que las quintas y las cuartas son intervalos que se componen, respectivamente, de 7 y 5 semitonos, la circunferencia de un círculo de quintas es un intervalo de nada menos que 7 octavas (84 semitonos), mientras que la circunferencia de un círculo de cuartas equivale a tan solo 5 octavas (60 semitonos).

El círculo de quintas se usa habitualmente para representar la relación entre escalas diatónicas. En este caso, las letras del círculo representan la escala mayor en la cual la nota en cuestión funciona como tónica. Los números situados en el interior del círculo representan cuántos sostenidos o bemoles tiene la armadura de la escala en cuestión. De esta forma, una escala mayor construida a partir de la tiene 3 sostenidos en su armadura. La escala mayor que se construye a partir de fa tiene 1 bemoles.

Para recorrer las escalas menores, se rotan 3 letras en sentido contrario al reloj, de manera que, por ejemplo, la menor no tiene ni sostenidos ni bemoles y mi menor tiene 1 sostenido.

Con frecuencia, la música tonal modula desplazándose entre escalas adyacentes dentro del círculo de quintas. Esto se debe a que las escalas diatónicas contienen 7 tonos diferentes contiguos en el círculo de quintas. En consecuencia, las escalas diatónicas que están separadas entre sí por una distancia de quinta justa comparten 6 de sus 7 notas. Además, las notas no comunes difieren solamente en un semitono. Por ello, la modulación mediante la quinta justa se puede realizar de

forma extraordinariamente sencilla. Por ejemplo, para pasar de la secuencia fa – do – sol – re – la – mi – si de la escala de do mayor a la secuencia do – sol – re – la – mi – si – fa# de la escala de sol mayor, sólo hay que cambiar el fa de la escala de do mayor a fa#.

En la música tonal occidental, también se encuentran progresiones armónicas entre acordes cuyas notas fundamentales están relacionadas por una quinta justa. Por ejemplo, son habituales las progresiones de fundamentales como re - sol - do. Por este motivo, el círculo de quintas se puede emplear a menudo para representar la “distancia armónica” entre acordes.

## Compás

El compás es la entidad métrica musical, compuesta por varias unidades de tiempo (como la negra o la corchea). Esta división se representa gráficamente por unas líneas verticales, llamadas "líneas divisorias" o "barras de compás" que se colocan perpendicularmente a las líneas del pentagrama. En una obra musical escrita, las notas y los silencios que estén comprendidos entre dos líneas divisorias componen un compás. Un fragmento musical estará compuesto por el conjunto de compases que lo conforman, los cuales tendrán la misma duración hasta que se cambie el tipo de compás.<sup>357</sup>

Los compases, según la cantidad de partes de las que constan, se pueden clasificar en binarios, ternarios o cuaternarios.

El compás se divide en partes llamadas tiempos o pulsos. Se consideran varios tipos de compás, según el número de tiempos:

- "compás binario" (de dos tiempos)
- "compás ternario" (de tres tiempos).
- "compás cuaternario" (de cuatro tiempos), que se puede considerar un tipo de compás binario.
- "compás irregular" (de otra cantidad de tiempos).

Por convención, los compases se indican por medio de dos cifras, que se representan en forma de fracción, y que se colocan al principio del pentagrama, tras la clave y la armadura, y no se vuelven a indicar a no ser que cambie el compás.

En los compases de subdivisión binaria, el numerador (es decir la cifra superior) representa el número de tiempos que tendrá el compás. Los compases más comunes tienen 2, 3 o 4 tiempos.

El denominador (es decir, la cifra inferior) representa la unidad de tiempo, o sea la figura que llenará un tiempo del compás. Por convención 4 = negra; 8 = corchea.

Por ejemplo, un compás de  $2/4$  es en el que cada compás tendrá dos pulsos, y el denominador 4 indica que la unidad será la negra. Esto significa que cada compás tendrá dos negras.

Los tres tipos de compás de subdivisión binaria son:  $2/4$ ,  $3/4$  y  $4/4$ .

En los compases de subdivisión ternaria, el numerador expresa el número de "tercios de parte" que hay, el número de subdivisiones ternarias totales, y el denominador, la figura musical que llena cada tercio de parte. Como ejemplo, el compás de  $6/8$ , indica el numerador que hay seis subdivisiones ternarias, repartidas en dos tiempos, y el 8 que hay una corchea en cada subdivisión.

Los tres tipos de compás de subdivisión ternaria son:  $6/8$ ,  $9/8$  y  $12/8$ .

Las equivalencias entre número y figura musical son las siguientes:

---

<sup>357</sup> Información obtenida en [http://es.wikipedia.org/wiki/Compás\\_\(música\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Compás_(música)) y consultada en fecha 24/1/2012.

- 1 equivale a la redonda.
- 1/2 equivale a la blanca.
- 1/4 equivale a la negra.
- 1/8 equivale a la corchea.
- 1/16 equivale a la semicorchea.
- 1/32 equivale a la fusa.
- 1/64 equivale a la semifusa.
- 1/128 equivale a la garrapatea o cuartifusa (en desuso).
- 1/256 equivale a la semigarrapatea (en desuso).

Como generalidad, son compases de subdivisión ternaria todos aquellos que tengan como numerador los múltiplos de 3 (6, 9 y 12). Cualquier otro numerador indicaría que es un compás de subdivisión binaria.

## Contrapunto

El contrapunto (del latín *punctus contra punctum*, “nota contra nota”) es una técnica musical que evalúa la relación existente entre dos o más voces independientes con la finalidad de obtener cierto equilibrio armónico. Casi la totalidad de la música compuesta en Occidente es resultado de algún proceso contrapuntístico. Surgió en el siglo XV, y es una práctica muy habitual desde el Barroco hasta nuestros días.<sup>358</sup>

El arte contrapuntístico se gestó como forma de dar mayor libertad compositiva mediante la utilización de notas extrañas y disonancias, que otorgan la posibilidad de que la tensión y su disolución sean características musicales presentes en todo el transcurso de una obra musical, que permitiesen cierto margen de maniobra artística sin que ello pudiera perturbar el normal desarrollo de la música.

La escritura musical contrapuntística y la escritura musical armónica tiene un énfasis distinto. La primera es esencialmente horizontal, mientras la segunda es primordialmente vertical. El contrapunto se diferencia de la armonía por su mayor énfasis en el desarrollo lineal u horizontal de la música que se desarrolla en las distintas melodías, mientras que la armonía se ocupa primordialmente de los intervalos, las relaciones verticales entre las notas musicales. Sin embargo, contrapunto y armonía son funcionalmente inseparables ya que ambos, como elementos de un mismo sistema musical, se complementan mutuamente. Las voces melódicas tienen dimensión horizontal, pero al sonar simultáneamente, tienen también dimensión armónica vertical: ambas dimensiones se organizan convenientemente según la consonancia.

Los intervalos consonantes resultan agradables al oído: la consonancia perfecta la proporcionan los intervalos de más elevado grado de fusión, que son el unísono, la cuarta (y su inversión), la quinta y la octava, sin embargo, la cuarta se fue considerando consonancia perfecta conforme avanzó el tiempo. La consonancia imperfecta, que proporciona una agradable amplitud sonora, la proporcionan los intervalos de tercera y de sexta, tanto mayores como menores (y en algunos contextos también los de cuarta justa).

Las disonancias resultan tensionantes, inestables dado que generan fricción al oído por los armónicos del acorde que se construye. Dichos intervalos son la segunda y la séptima así como las variaciones armónicas de aumentación y disminución (ejemplo: quinta disminuida o tritono).

---

<sup>358</sup> Información obtenida en <http://es.wikipedia.org/wiki/Contrapunto> y consultada en fecha 10/01/2012.

## Coral luterano

El coral luterano nace de la necesidad de crear un repertorio para los oficios adecuado para los ritos de la iglesia reformada. Lutero quiso que los cánticos se entonasen por los fieles en lengua vernácula. Para ello era necesario disponer de un repertorio diferente del gregoriano y de la práctica polifónica del final de la edad media. Para este fin compuso corales, melodías sencillas que servían como himnos para la congregación. A parte de melodías originales, recurrió a fragmentos de canto llano, adaptados, y a canciones conocidas de carácter profano. En la adaptación o composición de otras melodías participaron algunos compositores como Johann Walther o Valentin Bapst.<sup>359</sup>

A lo largo del siglo XVII se fueron desarrollando los corales para ser cantados a varias voces, o añadiéndoles un acompañamiento instrumental.

Los corales monódicos se editaron en colecciones a las que los autores de música litúrgica recurrían para buscar las melodías adecuadas para los poemas sacros que se pretendía armonizar. De este modo, Juan Sebastián Bach, el autor paradigmático de corales, tomó estas melodías para sus cantatas, pasiones, etc. Bach no compuso apenas melodías de coral, pero armonizando las del repertorio ya establecido creó unos modelos que hoy se siguen considerando ejemplares y muy útiles para el estudio de la armonía y del contrapunto.

Las mismas melodías de coral se emplean también en otras secciones de las cantatas así como en el preludio coral.

Este último es una pieza instrumental, generalmente para órgano, que sirve para recordar a los asistentes al oficio la línea melódica que se va a cantar a continuación. El coral se usa también en forma instrumental, en forma notable en los llamados preludios corales, o corales para órgano. Aquí podemos encontrarnos con tratamientos muy diversos, entre los que destaca la presentación del coral en notas largas mientras se acompaña contrapuntísticamente, frecuentemente con motivos extraídos del coral. También aquí el grado de respeto de Bach hacia el texto impresiona. Por no hablar de la fantasía e imaginación que demuestra.

## *Courante* – forma musical

La *courante*, también llamada "*corrente*", "*coranto*" o "*corant*" es el nombre dado a una familia de danzas ternarias de finales del Renacimiento y principios del período Barroco.<sup>360</sup>

Actualmente se suelen usar estos distintos nombres para distinguir tipos de *courante* (forma italiana de la palabra que designa a la danza de ese origen), pero en las fuentes originales tales pronunciaciones eran inconsistentes.

Durante su uso más común, en el período barroco, la *courante* tuvo dos variantes: la francesa y la italiana. El estilo francés tenía muchos acentos cruzados y era una danza lenta. La *courante* italiana era más rápida, con desarrollo más libre y rápido, aunque no está claro cuáles eran las diferencias significativas con la *courante* francesa del renacimiento.

En una suite barroca, sea italiana o francesa, la *courante* típicamente se incluye entre la *allemande* y la zarabanda, como segundo o tercer movimiento musical.

## Croma musical

Las escalas de la música occidental se basan, en parte, en el concepto de generalización de la octava (esto es, que los sonidos separados por una octava son, en cierto sentido, musicalmente

---

359 Información obtenida en "[http://es.wikipedia.org/wiki/Coral\\_protestante](http://es.wikipedia.org/wiki/Coral_protestante)" consultada en fecha 15/05/2012.

360 Información obtenida en "<http://es.wikipedia.org/wiki/Courante>" consultada en fecha 22/03/2012.

equivalentes, y por tanto las escalas son únicamente definidas especificando los intervalos dentro de una octava). Esta generalización parece ser universal para las culturas musicales avanzadas.<sup>361</sup>

Hay varias explicaciones posibles para el carácter único de la octava como base de una supuesta circularidad de altura relativa. Hablando de consonancia sensitiva, para intervalos musicales simultáneos formados por sonidos complejos cuyos parciales guardan relación armónica, la octava exacta es única en el sentido de que todos los parciales de los sonidos coincidirán exactamente. Por tanto, el intervalo de octava no será más disonante que el sonido complejo de altura más grave.

Otra explicación es consecuencia de las alturas de los sonidos complejos. Modelos actuales de percepción de alturas de sonidos complejos asumen que la percepción de la altura de sonidos complejos es un proceso de reconocimiento en el cual un "procesador central de altura" intenta hacer coincidir los parciales del sonido complejo con la serie armónica más adecuada. Una consecuencia de esta operación será un cierto grado de ambigüedad de octava en las predicciones de modelo de la altura fundamental.

Las representaciones bidimensionales de la altura implican que las manifestaciones de la equivalencia de octava deberían encontrarse en experimentos para los cuales el entrenamiento musical no es un requisito previo.

Según la investigación de Iftene A.[106] y de Politis D.[107] y otros, un croma (*chroma* en inglés) es un atributo de los tonos Similar a clases de tono (*pitch class*) es el conjunto de todas las notas que comparten el mismo croma. El concepto detrás de croma es que las octavas juegan un papel fundamental en la percepción musical y la composición. Las características del croma han sido utilizados en aplicaciones de MIR.

Los psicólogos definen la calidad de un tono como su "croma". Es un atributo de notas como el matiz lo es al color. Un conjunto de tonos (*pitch class*) son todas las notas que comparten el mismo croma del mismo modo que aquello que comparten todos los objetos blancos.<sup>362</sup>

En la investigación de Demany y Armand[108] A menudo se ha avanzado que el tono es un atributo perceptual de dos dimensiones, sus dos dimensiones que son:

1. altura tono, una calidad perceptual monotónicamente relacionada con la frecuencia,
2. tono de croma, una calidad compartida por tonos que forman un intervalo de octava.

## Cuantización

Debido al error humano en la interpretación, e incluso instrumentistas extremadamente diestros, al interpretar una pieza desplazan ligeramente las notas de su teórica posición perfecta. En muchos casos, estas pequeñas desviaciones no sólo no molestan, sino que enriquecen la música, humanizándola. En otros casos, sin embargo, ya sea porque el error es demasiado notorio, o porque el tipo de música aconseja un tiempo rígido y exacto, es recomendable cuantizar.<sup>363</sup>

Cuantizar supone desplazar las posiciones iniciales y finales de cada nota para que coincidan con una rejilla temporal preestablecida. Generalmente el tamaño de la rejilla está relacionado con el denominador de la indicación de compás<sup>364</sup>.

Los secuenciadores comerciales ofrecen varias opciones a la hora de aplicar esta funcionalidad. Generalmente (y depende de cada secuenciador) las opciones son las siguientes:

---

361 Información obtenida en <http://devotomusic.galeon.com/cvitaee1254962.html> consultada en fecha 12/12/2011.

362 Definición obtenida de [http://en.wikipedia.org/wiki/Pitch\\_class](http://en.wikipedia.org/wiki/Pitch_class) y consultada en fecha 15/05/2012.

363 Información obtenida en <http://www.ccapitalia.net/reso/articulos/audiodigital/13/secuenciador.htm> consultada en fecha 20/03/2011.

364 Consultar página 235 (capítulo Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados) para una explicación detallada.



- **Valor de cuantización:** determina el tamaño de la retícula, y suele indicarse con valores musicales (blanca, negra, corchea, semicorchea, tresillo de corchea, etc.).
- **Ataque y/o duración:** nos permite modificar solo la posición inicial de la nota o también su posición final.
- **Porcentaje de cuantización:** produce, para valores inferiores a 100, cuantizaciones no perfectas, que aunque mejoran el material original, no lo deshumanizan totalmente.

Algunos secuenciadores ofrecen opciones adicionales más avanzadas como pueden ser cuantizar con *swing*, cuantizar con retículas irregulares que el usuario puede definir o cargar a partir de ficheros (*Groove Quantize*), márgenes máximos y mínimos fuera de los cuales la nota no es corregida, etc.

## Duración de notas.

Los valores o figuras musicales son símbolos que representan el tiempo de duración de las notas musicales. Los símbolos de las figuras se usan para representar la duración para ser ejecutado. Las notas se muestran en la figura de abajo, por orden decreciente de duración son: redonda, blanca, negra, corchea, semicorchea, fusa y semifusa.<sup>365</sup>

Antiguamente existía también la breve, como el doble de la duración de la semibreve, la larga, como el doble de la duración de la breve y la máxima, como el doble de la duración de la larga, pero esas notas ya no se usan en la notación actual. Cada nota tiene la mitad de la duración de la anterior. Si pretendiéramos representar una nota de un *tiempo y medio* (por ejemplo, el tiempo de una negra sumado con el de una corchea) se usa un punto, llamado *puntillo*, seguido de la nota.

La duración real (medida en segundos) de una nota depende de la fórmula de compás y del *andamento*<sup>366</sup> o tempo utilizado. Eso significa que la misma nota puede ser ejecutada con duración diferente en piezas diferentes o incluso dentro de la misma música, como en una mudanza de andamento.

La Figura 108 muestra los símbolos musicales básicos con su duración respecto la duración de la nota redonda.



Figura 108: Figuras de las notas redonda, blanca, negra, corchea, semicorchea, fusa y semifusa

Cada una de las duraciones de notas tiene una figura asociada para representar una pausa que representan el *silencio*, esto es, el tiempo en que la voz no produce sonido alguno, siendo llamados valores negativos. Las pausas se subdividen al igual que las notas en términos de duración. Cada pausa dura el mismo tiempo relativo que su nota correspondiente, o sea, la pausa más larga corresponde exactamente a la duración de una redonda. La correspondencia se hace en el orden establecido en la Figura 109.

<sup>365</sup> Información e imágenes obtenidas en [http://es.wikipedia.org/wiki/Notación\\_musical](http://es.wikipedia.org/wiki/Notación_musical) y <http://tallerdetrompeta.blogspot.com/2008/05/ligadura-y-puntillo.html> consultadas en fecha 19/12/2011.

<sup>366</sup> Consultar <http://es.wikipedia.org/wiki/Tempo> para una explicación detallada.

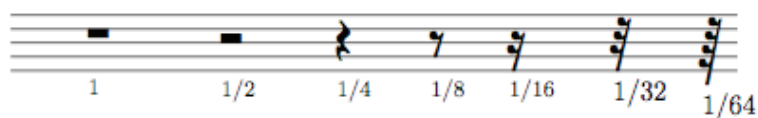


Figura 109: Símbolos que representan los silencios de duración igual a redonda, blanca, negra, corchea, semicorchea, fusa y semifusa.

Cuando varias notas de la misma altura tonal aparecen enlazadas con una ligadura, el valor de la nota resultante es la suma de las duraciones individuales de cada nota. La Figura 110 muestra un ejemplo de notas ligadas y su duración total resultante.



Figura 110: Dos notas negras ligadas tiene una duración de nota blanca.

## Estribillo

El *estribillo* suele contrastar bruscamente con el verso melódica, rítmica y armónicamente, y asume un nivel dinámico más alto, y a menudo con la instrumentación añadida (por ejemplo una sección de viento puede tocar un acompañamiento, o un coro puede cantar una parte de armonía). La forma de estribillo, o la forma de estrofa, es una forma aditiva de sección de estructurar una obra musical basada en la repetición de una sección o bloque formal.<sup>367</sup>

Cuando dos o más secciones de la canción tienen básicamente la misma música y letras, lo más probable es que se trate del estribillo. A veces puede repetirse al principio y al final. El estribillo suele llevar a otra estrofa, un puente o el final de la canción. Si bien hay muchas formas de escribir letras para el estribillo, las canciones pop suelen usar letras simples para hacer el estribillo más pegadizo.

## Estructura rítmica

### Estructura de agrupamientos

El proceso de agrupamiento es común a muchas áreas del conocimiento humano. Al enfrentarse a una serie de elementos o secuencia de eventos, una persona espontáneamente segmenta o "trocea" los elementos o eventos en grupos de alguna índole. La facilidad o dificultad con que realiza esta operación depende de cuán bien coincida la organización intrínseca del objeto con sus principios internos e inconscientes de agrupamiento. Para la música, los objetos son las secuencias de alturas, puntos de ataque, duraciones, dinámicas y timbres en una pieza oída. Cuando el oyente ha construido una estructura de agrupamiento para una pieza, se ha acercado bastante a "encontrarle sentido" a dicha pieza: sabe cuáles son las unidades, y cuáles van juntas y cuáles no. Este conocimiento, a la vez, se convierte en un dato importante para construir sus -más complicadas- otras estructuras musicales. Por tanto, el agrupamiento puede verse como el más básico componente del entendimiento musical.<sup>368</sup>

La característica principal de los grupos musicales es que son oídos de manera jerárquica: un motivo se oye como parte de un tema, un tema se oye como parte de un grupo temático, y éste como parte de una obra. Para reflejar las jerarquías percibidas utilizamos ligaduras colocadas debajo de la

367 Información obtenida en [http://es.wikipedia.org/wiki/Estructura\\_de\\_una\\_canción\\_\(música\\_popular\)#Estribillo](http://es.wikipedia.org/wiki/Estructura_de_una_canción_(música_popular)#Estribillo) consultada en fecha 10/01/2012.

368 Información obtenida y sintetizada de [http://www.eumus.edu.uy/docentes/jure/teoria/lerdahl/estructura\\_ritmica.html](http://www.eumus.edu.uy/docentes/jure/teoria/lerdahl/estructura_ritmica.html) y consultada en fecha 20/03/2011. Dicha información es una traducción de la referencia bibliográfica [109].

notación musical; una ligadura dentro de otra más grande significa que un grupo es oído como parte de otro más grande (ver Figura 111).

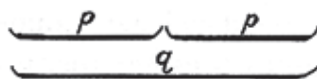


Figura 111: Estructura jerárquica.

Debe examinarse con más precisión el concepto de jerarquía. Una estructura jerárquica, en el sentido utilizado en esta teoría, es una organización compuesta de elementos discretos o regiones relacionadas de tal forma que un elemento o región compone otros elementos o regiones. Una región o elemento contenido, puede decirse que es subordinado del elemento o región que lo contiene; éste, puede decirse que domina a aquél. En principio, esta relación de subordinación o dominación puede continuar indefinidamente. Por tanto, todos los elementos o regiones en una jerarquía, excepto los que están en los extremos, son dominantes en una dirección y subordinados en la otra. Los elementos o regiones que son más o menos igualmente subordinadas dentro de toda la jerarquía, pueden pensarse como existentes en un nivel jerárquico particular. Un nivel particular puede tratarse en pequeña escala o gran escala, dependiendo del tamaño de sus regiones o elementos constitutivos.

En una organización jerárquicamente estricta, una región dominante contiene regiones subordinadas, pero no puede superponerse parcialmente con esas regiones. Es así, que la estructura en la Figura 112-a representa una organización posible, pero los agrupamientos en la Figura 112-b representa una organización imposible: en i dos regiones se superponen tanto en el nivel 1 como el 2, en j dos regiones se superponen entre ellas en el nivel 2, y en k una barrera en el nivel 3 se superpone a una región en el nivel 2.

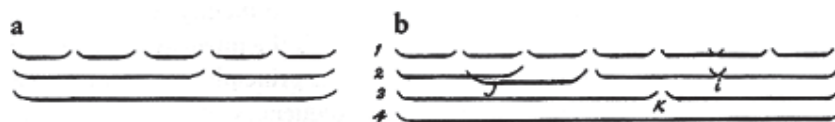


Figura 112: Estructura posible (a) e imposible (b).

Si bien k nunca sucede en música, al menos j es concebible, e i ocurre comúnmente. Por tanto, el agrupamiento musical no es estrictamente jerárquico en el sentido descrito. Sin embargo, las condiciones bajo las cuales las superposiciones y elisiones son percibidas, son altamente forzadas. Estos casos requieren tratamiento especial.

### Estructura métrica

#### Tipos de acentos

Antes de discutir la estructura métrica (el patrón regular y jerárquico de pulsos con los cuales el oyente relaciona los eventos musicales), debe clarificarse el concepto de acento. Ha habido confusiones dado el uso vago que se le da a este término, usualmente en conexión con la métrica. Es esencial distinguir tres tipos de acentos: *fenomenal*, *estructural* y *métrico*. Acento fenomenal significa cualquier evento en la superficie musical que da énfasis a un momento en el fluir musical. Incluidos en esta categoría están los puntos de ataque, acentos locales como *sforzandi*, cambios repentinos en la dinámica o el timbre, etc. Acento estructural, significa un acento causado por los puntos de gravedad melódicos / armónicos en una frase o sección, especialmente por la cadencia, la meta del movimiento tonal. Acento métrico, significa cualquier pulso que es relativamente fuerte en su contexto métrico.

El acento fenomenal funciona como datos perceptivos del acento métrico, esto es, los momentos de énfasis musical en la señal sonora sirven como guías de las cuales el oyente intenta extrapolar un patrón regular de acentos métricos. Si hay poca regularidad en estas guías, el sentido de acento métrico se atenúa o se hace ambiguo. Si, al contrario, las guías son regulares el sentido de acento métrico se hace definitivo y multinivelado. Una vez que ha sido establecido un patrón métrico claro, el oyente renuncia sólo ante evidencia fuertemente contradictoria. La síncopa tiene lugar cuando estas guías son fuertemente contradictorias, pero no lo suficientemente fuertes, o suficientemente regulares, para anular el patrón inferido. En suma, la actividad cognitiva del oyente es hacer coincidir el patrón dado de acentuación fenomenal lo más aproximadamente posible con un patrón permisible de acentuación métrica; donde los dos patrones divergen, el resultado es síncopa, ambigüedad u otro tipo de complejidad rítmica.

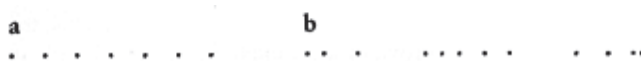
El acento métrico, entonces, es una construcción mental, inferida por -pero no idéntica a- los patrones de acentuación en la superficie musical. Nuestra preocupación ahora es caracterizar esta construcción. Sin embargo, ya que el "accento métrico" no es nada sino un término relativo aplicado a pulsos dentro de una jerarquía métrica regular, podemos, en cambio, describir lo que constituye un patrón métrico. Específicamente, necesitamos investigar las nociones de "pulso", "periodicidad" y "jerarquía métrica". En el curso de esta discusión desarrollaremos una notación analítica para la estructura métrica y demarcaremos el rango de patrones métricos permisibles.

Antes de proceder, debe hacerse notar que los principios de estructura de agrupamientos son más universales que los de la estructura métrica. A pesar de que toda la música se agrupa en unidades de varias índoles, alguna música no carece por completo de estructura métrica, en el sentido específico de que el oyente es incapaz de extrapolar una jerarquía de pulsos desde la señal musical. Ejemplos que vienen inmediatamente a la mente son el Canto Gregoriano, el alap (primera sección) de un raga del norte de la India, y mucha música contemporánea (sin importar si la notación es "espacial" o convencional).

### **La jerarquía métrica**

Los elementos que hacen los patrones métricos son los pulsos. Debe enfatizarse que los pulsos, como tales, no tienen duración. Los ejecutantes responden a un punto hipotéticamente infinitesimal en el marcado del director. Los pulsos son idealizaciones, utilizados por el ejecutante e inferidos por el oyente a partir de la señal musical. Utilizando una analogía espacial: los pulsos corresponden a los puntos geométricos más que a las líneas dibujadas entre ellos. Pero, por supuesto, los pulsos ocurren en el tiempo; por tanto, un intervalo temporal -una duración- tiene lugar entre pulsos sucesivos. Para tales intervalos, utilizamos el término "extensión temporal". En la analogía espacial, las extensiones temporales corresponden a los espacios entre puntos geométricos. Las extensiones temporales tienen duración, los pulsos no.

Dado que los pulsos son análogos a los puntos, es conveniente representarlos con puntos. Las secuencias en la Figura 113 corresponden a secuencias de pulsos.



*Figura 113: Secuencias de pulsos regulares (a) e irregulares (b).*

Ambas secuencias difieren sin embargo en un aspecto crucial: los puntos en la primera secuencia son equidistantes, pero no los de la segunda. A pesar de que una estructura como la de 2.6b es concebible en principio, no la pensaríamos como métrica. El término *metro*, después de todo, implica medida, y es difícil medir sin un intervalo o distancia fijo de medida. O sea que la estructura métrica es inherentemente periódica. Podemos por tanto se puede afirmar, como primera

aproximación, que los pulsos deben estar igualmente espaciados. Esto descalifica al patrón de pulsos de la Figura 113-b para ser llamado métrico.

Curiosamente, tampoco el patrón de la Figura 113-a es métrico en un sentido estricto. Fundamental para la idea de métrica es la noción de la alternancia periódica de pulsos fuertes y débiles; en la Figura 113-a no existe tal distinción. Para que los pulsos sean fuertes o débiles debe existir una jerarquía métrica, esto es, dos o más niveles de pulsos. La relación de "pulso fuerte" con "nivel métrico" es simplemente que si un pulso se siente como fuerte en un nivel particular, también será un pulso en el nivel próximo más grande. En 4/4, por ejemplo, el primer y tercer pulso se sienten más fuertes que el segundo y el cuarto, y serán pulsos en el nivel próximo más grande; y así sucesivamente. Llevado a la notación en puntos, estas relaciones aparecen como la estructura de la Figura 114-a. En el nivel más pequeño de puntos el primero, segundo, tercero y cuarto pulso son todos pulsos. En el nivel intermedio, sólo el 1 y el 3, en el más grande, sólo hay pulso en el 1.

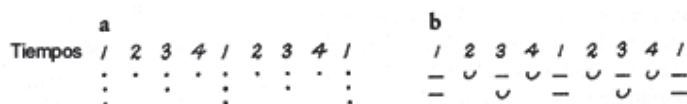


Figura 114: Terminología para representar jerarquía con puntos (a) y con grillas (b)

Observe que los pulsos en la Figura 114-a están igualmente espaciados, no sólo en el nivel más pequeño, sino también en el más grande. Esta, la norma en la música tonal, provee lo que puede llamarse una "grilla métrica" en la cual la periodicidad de los pulsos es reforzada nivel a nivel. Dado el espaciado igual entre los pulsos de cualquier nivel, es conveniente referirse a un nivel dado por el largo de sus espacios temporales, por ejemplo, el nivel de negras y el nivel de blanca con puntillo.

Una limitación importante a las grillas métricas en la música tonal occidental es que los espacios temporales entre los pulsos en un nivel dado deben ser ya sea dos o tres veces más largos que los del nivel próximo menor. Por ejemplo, en 4/4 (Figura 114-a) la longitud de los espacios temporales se multiplican consistentemente por 2 de nivel a nivel. Es interesante ver cómo las tres restricciones en las jerarquías de agrupamiento (no superposición, adyacencia y recursión) se transfieren al muy diferente formalismo de la estructura métrica. El principio de no superposición prohíbe situaciones en las que los espacios temporales de pulso a pulso en un nivel se superponen con los espacios temporales de otros. Un pulso en un nivel mayor debe serlo también en todos los niveles más pequeños; este es el sentido en el cual la métrica es jerárquica.

El principio de adyacencia significa que los pulsos se relacionan sucesivamente en cualquier nivel métrico. El principio de recursión dice que los elementos de la estructura métrica son esencialmente los mismos tanto en el nivel de notas de menor valor o en el nivel de hipercompás. Por tanto, el patrón en la Figura 114-a no sólo expresa una métrica de 4/4, sino que podría aplicarse igualmente a una secuencia de semicorcheas o a una secuencia de primeros tiempos de compases sucesivos. Típicamente hay al menos 5 o 6 niveles métricos en una pieza. La métrica escrita es normalmente una intermedia entre los niveles mayor y menor aplicables a la pieza.

Sin embargo, no todos estos niveles de estructura métrica son oídos como igualmente prominentes. El oyente tiende a centrarse primeramente en un (o dos) nivel(es) intermedio(s) en que los pulsos pasan moderadamente. Este es el nivel en el que el director mueve la batuta y el oyente bate palmas. Adaptando el término renacentista, podemos adoptar el término *tactus* para este nivel.

Las regularidades de la estructura métrica son más rígidas en este nivel. A medida que el oyente va progresando de nivel desde el *tactus* en cualquier dirección, la agudeza de su percepción

gradualmente disminuye; correspondientemente, una mayor libertad en la percepción métrica se hace posible sin interrumpir su sentido del fluir de la música.

Por tanto, en los nivel pequeños los tresillos y dosillos pueden fácilmente alternarse o superponerse, y en niveles muy pequeños -por ejemplo una cascada de fusas- las distinciones métricas son académicas. En niveles grandes los patrones de la acentuación fenomenal tienden a volverse menos distintiva, nublando cualquier patrón métrico extrapolado. En niveles muy grandes la estructura métrica se oye en el contexto de estructuras de agrupamiento, la cual es raramente regular en esos niveles; sin regularidad, el sentido de métrica se debilita. De ahí que la habilidad del oyente para oír distinciones métricas globales se dificulta y finalmente desaparece. A pesar de que los puntos en un análisis métrico podrían en teoría ser llevados al nivel de una pieza en su totalidad, este ejercicio se hace perceptivamente irrelevante excepto en piezas breves. La estructura métrica es un fenómeno relativamente local.

## Forma Musical

En su sentido genérico designa tanto una estructura musical como una tradición de escritura que permite situar la obra musical en la historia de la evolución de la creación musical. Añadidas a un título de una obra, las diferentes formas musicales como sinfonía, concierto, preludio, fantasía, etc. designan entonces, tanto una estructura que se ha construido a lo largo del tiempo, como un género musical particular, una composición musical que ha evolucionado durante siglos: ópera, danza, etc. En ambos casos, el concepto de forma alude a la pertenencia a una categoría de obra que posee uno o varios *critérios* más o menos estrictos propios de una estructura (número de movimientos, arquitectura general, proporciones, etc.) que a lo largo de la historia se han convertido en prototipos, lo que no ha impedido que hayan seguido evolucionando y olvidando a veces los moldes del principio, ya que los compositores trabajan, además de los temas, el ritmo, la melodía y la armonía.<sup>369</sup>

Se habla también de formalismo cuando se hace uso de una cierta técnica de composición (música serial) o de una categoría de obra que respeta un cierto número de usos, teóricos o históricamente inducidos.

Pero si el contenido de la música es inefable, inmanente, su inscripción en la trama temporal de nuestro presente le imprime a la vez una estructura y una forma, que operan en nosotros transformaciones incontrolables por la consciencia. La organización de la música no es de orden intelectual salvo si se la considera como una estructuración consciente que la teoría podría paralizar.

El concepto de forma no puede aprenderse directamente. Solo la escucha de la obra, su desarrollo en el tiempo, permite la percepción. Históricamente, el compositor que titulaba una obra relacionándola con una forma precisa, podía indistintamente hacer referencia a sus aspectos genéricos (es decir, a su destino), o a su estructura musical (es decir, a su arquitectura), o incluso a los dos a la vez, aspectos genéricos y aspectos estructurales, ya que están a menudo imbricados. Es lo que de modo natural ha producido un deslizamiento semántico, y que numerosos términos que designan diferentes formas (motete, fuga, aria, rondó, etc.) se hayan revestido de sentidos distintos, unas veces cercanos al concepto de género musical, otras veces cercanos al de estructura musical.

Un ejemplo notorio es el del término “sonata” que, según el contexto, puede designar el “género sonata”, o bien la “forma sonata” presente en diversos géneros, por ejemplo la sonata clásico-romántica, el cuarteto o la sinfonía, que la emplean en algunos de sus movimientos, y por lo que son conocidos como “géneros sonata-sinfónicos”.

---

369 Contenido obtenido de “[http://es.wikipedia.org/wiki/Forma\\_musical](http://es.wikipedia.org/wiki/Forma_musical)” en fecha 17/06/2012.

## Formato MMA

MMA es el formato nativo de la conocida aplicación de edición MIDI *Band-in-a-box*.

*Band-in-a-Box* es un editor de música MIDI para Windows y Mac OS producido por *PG Music Incorporated*. Apareció por primera vez en 1990 para el Atari ST. Desde entonces, *PG Music* ha sido un receptor de numerosos premios.<sup>370</sup>

Puede crear un fondo para casi cualquier progresión de acordes utilizados en la música popular occidental. A continuación, se puede tocar esa canción de nuevo con la elección del usuario de uno de los miles de estilos de fondo diferente. Además de reproducir las canciones de los usuarios con estilos integrados, adicionales o de repuesto, los usuarios pueden editar estos o crear sus propios estilos desde cero o desde los archivos existentes de MIDI.

Los usuarios pueden reproducir las canciones de nuevo y cambiar la clave y/o la velocidad de la canción de forma independiente o incluso cambiar el número de veces que cualquier sección de la canción se repite. El programa tiene módulos llamados *Melodist* y *Soloist* (Melodista y Solista de ahora en adelante) que permite a los usuarios elegir los instrumentos y especificar casi todos los detalles del resultado sonoro final.

*Band-in-a-Box* creará estos temas basándose en las selecciones de los usuarios. A través del Melodista y Solista se puede editar nota por nota en la ventana de notación corrigiendo manualmente el resultado.

Las *Leadsheets* o *partichellas* se pueden imprimir para cada pista de una banda en vivo para tocar, o para desarrollar aprendizaje de las partes por separado para la práctica.

## Formato MP3

*MPEG-1 Audio Layer III* o *MPEG-2 Audio Layer III*, más comúnmente conocido como MP3, es un formato de compresión de audio digital patentado que usa un algoritmo con pérdida para conseguir un menor tamaño de archivo. Es un formato de audio común usado para música tanto en ordenadores como en reproductores de audio portátil.

MP3 fue desarrollado por el *Moving Picture Experts Group* (MPEG) para formar parte del estándar MPEG-1 y del posterior y más extendido MPEG-2. Un MP3 creado usando una compresión de 128 kbit/s tendrá un tamaño de aproximadamente unas 11 veces menor que su homónimo en CD. Un MP3 también puede comprimirse usando una mayor o menor tasa de bits por segundo, resultando directamente en su mayor o menor calidad de audio final, así como en el tamaño del archivo resultante.

La compresión se basa en la reducción del margen dinámico irrelevante, es decir, en la incapacidad del sistema auditivo para detectar los errores de cuantificación en condiciones de enmascaramiento. Este estándar divide la señal en bandas de frecuencia que se aproximan a las bandas críticas, y luego cuantifica cada sub-banda en función del umbral de detección del ruido dentro de esa banda. El modelo psicoacústico es una modificación del empleado en el esquema II, y utiliza un método denominado predicción polinómica. Analiza la señal de audio y calcula la cantidad de ruido que se puede introducir en función de la frecuencia, es decir, calcula la "cantidad de enmascaramiento" o umbral de enmascaramiento en función de la frecuencia.

Un fichero Mp3 se constituye de diferentes *frames* MP3 que a su vez se componen de una cabecera Mp3 y los datos MP3. Esta secuencia de datos es la denominada "*stream* elemental". Cada uno de los *frames* son independientes, es decir, una persona puede cortar los frames de un fichero MP3 y después reproducirlos en cualquier reproductor MP3 del Mercado. La cabecera consta de una palabra de sincronismo que es utilizada para indicar el principio de un frame válido. A

<sup>370</sup> Contenido traducido de "<http://en.wikipedia.org/wiki/Band-in-a-Box>" en fecha 13/12/2011

continuación siguen una serie de bits que indican que el fichero analizado es un fichero Standard MPEG y si usa o no la capa 3. Después de todo esto, los valores difieren dependiendo del tipo de archivo MP3. Los rangos de valores quedan definidos en la ISO/IEC 11172-3.<sup>371</sup>

## Gavota

La gavota (*gavotte*, *gavot* o *gavote*), originada como una danza popular francesa, es una forma musical que toma su nombre del pueblo de Gavot en el país de Gap, región del Delfinado.<sup>372</sup>

Con un tiempo de 4/4 o 2/2, y velocidad moderada, la distinción básica de la gavota original consiste en que las frases se inician siempre en la mitad del compás, es decir en la tercera nota.

Las gavotas en algunas regiones son acompañadas por canto, con solistas alternando con un grupo u otros solistas. En otros lugares se acompañan con instrumentos, como violín, tambores, gaitas y un tipo de chalimeau.

A diferencia del branle, en donde el movimiento lateral de los danzarines mantiene siempre los pies juntos, la gavota requiere cruzar los pies dos veces en cada patrón rítmico y cada paso es seguido por un salto. Muchos movimientos de pantomima suelen formar parte de la danza de la gavota.

La gavota se hizo popular en la corte de Luis XIV de Francia, donde Jean-Baptiste Lully era el principal compositor. En consecuencia, otros muchos compositores de la época incorporaron la danza con agregado en suites instrumentales. Son bien conocidos los ejemplos en suites y partitas de Johann Sebastian Bach.

## Grados musicales

En la música tonal, se denomina grado de la escala a la posición de cada nota dentro de una escala musical.<sup>373</sup>

Por extensión, en la armonía funcional se habla de **grado armónico** para referirse a los acordes contruidos dentro de una tonalidad a partir de las notas de su escala diatónica (es decir, tomando dichas notas como fundamental del acorde).

Los **grados** se designan mediante números romanos correlativos I, II, III, IV, V, VI y VII.

No existe un acuerdo absoluto en cuanto a la utilización del término *grado*.

Tradicionalmente se ha denominado *grado* a la posición de las notas o alturas (un único sonido) de una escala musical como la de la Figura 115.



Figura 115: Notas de la escala de Do Mayor.

En la actualidad esta acepción tradicional no es compartida por ciertos autores, que prefieren hablar de notas o sonidos de la escala y reservar el uso del término *grado* para los acordes (un conjunto de sonidos) de una tonalidad tal como muestra la Figura 116.

371 Contenido extraído de “<http://es.wikipedia.org/wiki/MP3>” y consultado en fecha 29/11/2011.

372 Contenido extraído de “<http://es.wikipedia.org/wiki/Gavota>” y consultado en fecha 6/6/2012.

373 Extraído de “[http://es.wikipedia.org/wiki/Grado\\_musical](http://es.wikipedia.org/wiki/Grado_musical)” y consultado en fecha 7/12/2011.





Figura 116: Triadas sobre cada una de las notas de la escala de Do Mayor.

Por ejemplo, en la escala de Do Mayor los distintos grados corresponden a las notas (o acordes) de la Tabla 99

Nº del Grado	Nota (asociada a Do Mayor)	Nombre del grado
I	Do (do Mayor)	Tónica
II	Re (re menor)	Supertónica
III	Mi (mi menor)	Mediante
IV	Fa (fa Mayor)	Subdominante
V	Sol (sol Mayor)	Dominante
VI	La (la menor)	Superdominante o submediante
VII	Si (si disminuido)	Sensible (en la escala diatónica mayor) o subtónica (en la diatónica menor)

Tabla 99: Nombres de los grados y su nota correspondiente en la tonalidad de Do Mayor.

Cuando se hace referencia a notas, la distancia entre dos grados se llama intervalo. Así, en una escala diatónica mayor existe una distancia de semitono entre los grados III y IV y entre los grados VII y VIII. Entre el resto de grados la distancia es de un tono.

Cada grado de una escala o acorde recibe tradicionalmente los nombres de la Tabla 99.

## Intervalo musical

Es una magnitud que corresponde con la diferencia de *altura* (frecuencia) entre dos notas musicales, medida cuantitativamente (número) en grados o notas naturales y cualitativamente (especie) en tonos y semitonos. Su expresión aritmética es una proporción simple.<sup>374</sup>

La teoría musical considera tonales los intervalos de primera (unísono), cuarta, quinta y octava y modales los de segunda, tercera, sexta y séptima.

Los intervalos tonales tienen un solo valor justo; los modales tienen un valor mayor y otro menor, propios de la modalidad en la que se encuentran.

Todos los intervalos pueden ser, además, aumentados o disminuidos.

Se consideran simples los intervalos no mayores que una octava y compuestos a los que la exceden. Los intervalos compuestos son análogos a los intervalos simples correspondientes. Así, una novena es una segunda a la octava y puede ser mayor o menor; una duodécima es análoga a una quinta y puede ser justa.

Se denomina armónico al intervalo cuyos sonidos suenan simultáneamente y melódico a aquel cuyos sonidos suenan sucesivamente.

Se llaman complementarios los intervalos que, sumados, conforman una octava: una cuarta y una quinta son complementarias. Observen que la suma de los cuatro grados de la cuarta y los cinco

<sup>374</sup> Extraído de “[http://es.wikipedia.org/wiki/Intervalo\\_\(música\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Intervalo_(música))” y consultado en fecha 8/12/2011.

grados de la quinta se resuelve en ocho grados, no nueve, porque el cuarto grado de la cuarta es a la vez el primer grado de la quinta.

Nombre del intervalo	Grados	Distancia en tonos y semitonos
Unísono / Primera justa	1	0
Primera aumentada / Semitono cromático	1	1 semitono
Segunda disminuida	2	0
Segunda menor	2	1 semitono
Segunda mayor	2	1 tono
Segunda aumentada	2	1 1/2 tono
Tercera disminuida	3	1 tono
Tercera menor	3	1 1/2 tono
Tercera mayor	3	2 tonos
Tercera aumentada	3	2 1/2 tono
Cuarta disminuida	4	2 tonos
Cuarta justa	4	2 1/2 tonos
Cuarta aumentada (llamada <i>tritono</i> )	4	3 tonos
Quinta disminuida (llamada <i>falsa quinta</i> )	5	3 tonos
Quinta justa	5	3 1/2 tonos
Quinta aumentada	5	4 tonos
Sexta disminuida	6	3 1/2 tonos
Sexta menor	6	4 tonos
Sexta mayor	6	4 1/2 tonos
Sexta aumentada	6	5 tonos
Séptima disminuida	7	4 1/2 tonos
Séptima menor	7	5 tonos
Séptima mayor	7	5 1/2 tonos
Séptima aumentada	7	6 tonos
Octava justa	8	6 tonos

Tabla 100: Tabla de intervalos menores o iguales al intervalo de octava con sus nombres.



Figura 117: Ejemplos de intervalos a partir de la nota Do mostrados sobre el pentagrama.

La Figura 117 muestra los intervalos armónicos, mostrados sobre el pentagrama a partir de la nota *Do*. El significado de la nomenclatura utilizada y la distancia de cada intervalo en tonos y semitonos se resume a continuación:

- U = unísono (dos notas iguales)

- m2 = de segunda menor (1<sup>st</sup>)
- M2 = de segunda mayor (1T)
- m3 = de tercera menor (1T 1<sup>st</sup>)
- M3 = de tercera mayor (2T)
- P4 = de cuarta justa o perfecta (2T 1<sup>st</sup>)
- TT = de cuarta aumentada o tritono (2T 2st)
- P5 = de quinta justa o perfecta (3T 1<sup>st</sup>)
- m6 = de sexta menor (3T 2st)
- M6 = de sexta mayor (4T 1<sup>st</sup>)
- m7 = de séptima menor (4T 2st)
- M7 = de séptima mayor (5T 1<sup>st</sup>)
- P8 = de octava justa o perfecta (5T 2st)

Con la segunda nota en la siguiente octava y manteniendo la fundamental se generan los intervalos de novena, que equivale con una octava de diferencia al de segunda, el de onceava, que equivale al de cuarta, el de treceava, que equivale al de sexta, etc.

Un intervalo se puede producir tocando ambas notas al mismo tiempo (intervalo armónico), o una después de otra (intervalo melódico). En este último caso se puede diferenciar la dirección del sonido entre ascendente (cuando la segunda nota es más aguda que la primera) y descendente (cuando la segunda nota es más grave que la primera).

### Consonancia y disonancia

La calificación de intervalos como consonantes o disonantes ha variado enormemente a lo largo de los siglos, así como la definición de lo consonante o disonante en sí.

Por ejemplo, durante la edad media la autoridad adjudicada a Pitágoras llevó a los especuladores a considerar a la cuarta justa como la consonancia perfecta y a utilizarla para la composición de organa. Durante la misma época, especulaciones de carácter teológico llevaron a considerar a la cuarta aumentada, llamada "tritono", como diabólica (*tritonus diabolus in musica est*).

La armonía tradicional desde el siglo XVII considera disonantes los intervalos armónicos de primera aumentada (semitono cromático), segunda mayor o menor, cuarta aumentada, quinta disminuida o aumentada, séptima mayor o menor y octava disminuida o aumentada. Una posible consideración más detallada es la siguiente:

- Consonancias perfectas: los intervalos de 4<sup>a</sup>, 5<sup>a</sup> y 8<sup>a</sup> cuando son justas.
- Consonancias imperfectas: los intervalos de 3<sup>a</sup> y 6<sup>a</sup> cuando son mayores o menores.
- Disonancias absolutas: los intervalos de 2<sup>a</sup> y 7<sup>a</sup> mayores y menores.
- Disonancias condicionales: todos los intervalos aumentados y disminuidos, excepto la 4<sup>a</sup> aumentada y la 5<sup>a</sup> disminuida.
- Semiconsonancias: la 4<sup>a</sup> aumentada y la 5<sup>a</sup> disminuida.

Además, en el contexto de la armonía tradicional, el intervalo melódico de cuarta aumentada es considerado disonante.

### **Inversión de intervalos**

Un intervalo puede ser invertido, al subir la nota inferior una octava o bajando la nota superior una octava, aunque es menos usual hablar de las inversiones de unisonos u octavas. Por ejemplo, la

cuarta entre un Do grave y un Fa más agudo puede ser invertida para hacer una quinta, con un Fa grave y un Do más agudo. He aquí formas de identificar las inversiones de intervalos:<sup>375</sup>

Para intervalos diatónicos hay dos reglas para todos los intervalos simples:

- El número de cualquier intervalo y el número de su inversión siempre suman nueve (cuarta + quinta = nueve, en el ejemplo reciente).
- La inversión de un intervalo mayor es uno menor (y viceversa); la inversión de un intervalo justo es otro justo; la inversión de un intervalo aumentado es un disminuido (y viceversa); y la inversión de un intervalo doble aumentado es uno doble disminuido (y viceversa).

Un ejemplo completo: Mi $\flat$  debajo y Do por encima hacen una *sexta mayor*. Por las dos reglas anteriores, Do natural debajo y Mi Bemol por encima deben hacer una *tercera menor*.

- Para intervalos identificados por ratio, la inversión es determinada revirtiendo el ratio y multiplicando por 2. Por ejemplo, la inversión de un ratio 5:4 es un ratio 8:5.
- Para intervalos identificados por entero pueden simplemente ser restados de 12. Sin embargo no pueden ser invertidos.

## Lied

Canción lírica breve para voz solista y acompañamiento (generalmente de piano) propia de Alemania, Austria y otros países de lengua alemana, cuya letra es un poema al que se ha puesto música: compositores como Beethoven, Mozart, Schubert y Wolf han compuesto lieder basados en genios de la poesía, como Goethe y Heine.<sup>376</sup>

Este tipo de composición, que surgió en la época clásica (1760 - 1820), floreció durante el Romanticismo y evolucionó durante el siglo XX. Es característica la brevedad de la forma, la renuncia al virtuosismo belcantístico, la estrecha relación con el poema y la fuerte influencia de la canción popular alemana (*Volkslied*).

El desarrollo de la forma iba mano a mano con el redescubrimiento de la cultura popular alemana como fuente de producción artística, como han sido las colecciones de cuentos (1812) de los Hermanos Grimm y la colección de poemas Des Knaben Wunderhorn (1805-1808) de Clemens Brentano y Achim von Arnim.

En la historia de la música clásica europea, se aplica el término alemán, porque los inicios y los primeros Lieder, fueron obras de compositores alemanes. En Alemania se aplica el término "*Kunstlied*" (canción arte) para distinguir el género de la canción popular (*Volkslied*).

Se desarrolló con el compositor alemán Franz Schubert en 1814, aunque tuvo sus antecedentes en Mozart y Beethoven.

## Minueto

El minueto, también llamado minué, es una antigua danza tradicional de la música barroca originaria de la región francesa de Poitou, que alcanzó su desarrollo entre 1670 y 1750. Fue introducida con el nombre de *minuet* en la corte francesa por Jean-Baptiste Lully (1673) que la incluyó en sus óperas y, a partir de ese momento, formó parte de óperas y ballets.

Grandes compositores de la música clásica se han servido de ella para sus obras (*Don Juan*, de Wolfgang Amadeus Mozart), adaptándola como una composición instrumental de ritmo ternario y moderado. Suele tener carácter humorístico y forma parte de sonatas y sinfonías. Fue una de las danzas preferidas de Luis XIV y de su corte.

<sup>375</sup> Contenidos extraídos de "[http://es.wikipedia.org/wiki/Intervalo\\_\(música\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Intervalo_(música))" y consultados en fecha 25/06/2012.

<sup>376</sup> Contenidos extraídos de "<http://es.wikipedia.org/wiki/Lied>" y consultados en fecha 5/06/2012.

Al principio, el minueto de compás ternario era bastante rápido, pero en el transcurso del siglo XVII fue moderando su movimiento. El minueto se compone de dos secciones con repetición de cada una de ellas. Es una de las danzas facultativas de la suite: se inserta, generalmente, después de la zarabanda y antes de la giga. En su forma clásica el minueto comporta:

- Exposición: a) tema con repetición; b) vuelta al tema con repetición.
- Trío, después del segundo minueto.
- Reexposición de la primera parte sin repetición y con coda facultativa.

Es la única danza de la suite conservada en la sonata: en las sinfonías de Joseph Haydn y de Carl Stamitz todavía pueden encontrarse algunos minuetos, pero desaparecieron rápidamente sustituidos por el scherzo.

## Modulación musical

La modulación<sup>377</sup>, en música es el proceso de cambio de tonalidad durante el desarrollo de una obra. Consiste en cambiar de tonalidad dentro de la misma obra sin indicarlo con doble barra. Las modulaciones también tienen su propia cadencia para mostrar en que tonalidad están. Las modulaciones más frecuentes se hacen a los tonos vecinos pero también pueden ser por cambio de modo o por terceras (cromáticas y enarmónicas). Las tonalidades vecinas son las que más cerca están de la tonalidad principal y son aquellas para las que son necesarias menos alteraciones para el cambio:

- La tonalidad del relativo (tonos vecinos).
- La tonalidad del homónimo (por cambio de modo).
- La tonalidad de la dominante y su relativo.
- La tonalidad de la subdominante y su relativo.

Existe una terminología que aparece en manuales antiguos de música en la que se denomina:

- **Tonulación:** al proceso de cambio de tono de una obra musical y el cambio en sí.
- **Modulación:** al hecho y el proceso de cambio de modo de una obra musical.

Existen 5 formas de modular:

- Por Acorde pivote: Se utiliza un acorde común entre la tonalidad de origen y la de destino.
- En Dominante: De la tonalidad ReM a SolM un acorde pivote puede ser ReM ó Mim entre otros, ya que son acordes con la misma interválica y color en ambas tonalidades.
- Por instalaciones: Se modula por un cambio brusco, desde una tonalidad a la de origen.
- Traspase: Partiendo de la tonalidad de SolM y pretendiendo ir a LaM, la progresión puede ser SolM - DoM - ReM - "MiM" (acorde por instalación)- LaM (Nueva tónica).
- Traspase pivote: En este caso, la pieza pasa de, por ejemplo, estar de Sol Mayor a Fa Mayor, manteniéndose primero en Do. Por ejemplo, 'Sol Mayor', Mi menor, La menor, Sol mayor o en séptima y 'Do Mayor', y de éste, 'Do Mayor', La menor, Re menor, La menor, Do en séptima, 'Fa'.

Actualmente se consideran tres formas de modular, refiriéndose este término tanto al cambio de tono, como de modo:

---

377 Contenidos extraídos de “[http://es.wikipedia.org/wiki/Modulación\\_\(música\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Modulación_(música))” y consultados en fecha 22/03/2012.

- **Modulación por acordes puentes:** sucede entre tonalidades vecinas, es decir, con pocas alteraciones de diferencia, desde ninguna diferencia (por ejemplo ir al relativo), hasta aquel tono y modo en el que sólo exista un acorde común. Lo normal es emplear la cadencia completa (Subdominante, Dominante y Tónica) de la nueva tonalidad, estas funciones aparecen con acordes que son ambiguos de ambas tonalidades, hasta la dominante donde suele aparecer la sensible.  
Como ejemplo podemos ver que Do mayor, comparte todos sus acordes con el relativo, comparte los acordes sobre los grados I, III, V y VI si modulamos hacia la dominante (una diferencia), igualmente si tratamos de una diferencia en menos, es decir, vamos a Fa M con el si bemol, encontraremos igual número de acordes en común pero ahora sobre los grados: I, II, IV, VI. Si queremos ir a una tonalidad con dos diferencias (por ejemplo a Re M), encontramos acordes comunes sobre los grados: III y V. También sólo dos acordes cuando vamos al campo de los bemoles (Si B Mayor). Por último, no existen **acordes puentes** para tres diferencias. Es por tanto una forma de modulación limitada por la existencia de acordes comunes llamados acordes puentes.
- **Modulación cromática:** es cuando se emplea un mismo acorde, cambiando sólo una nota que se eleva o se baja un semitono. Es por tanto mediante la alteración de esta nota que pasa normalmente a actuar como sensible de la nueva tonalidad como se establece un nuevo centro tonal. Muchas veces es utilizada como simple adorno (enfaticación o tonalización), y en ocasiones juega con las expectativas llegando a no resolver en tónica (normalmente haciendo cadencia rota en la tónica esperada). Al igual que la modulación por acordes puentes, se produce bien entre ciertas tonalidades y no tan bien entre otras, sin embargo no presenta tantas limitaciones como esta o la enarmónica.
- **Modulación enarmónica:** sucede cuando enarmonizamos algún sonido, es decir cuando un mismo sonido cambia en su escritura, esto conlleva implicaciones funcionales, es decir, la nueva escritura corresponde con una forma nueva de ordenar los sonidos de acuerdo a un nuevo centro tonal y jerarquía entre los sonidos (recordemos que en la tonalidad en sentido clásico, existe esta jerarquización teniendo preponderancia la Tónica y la Dominante (S XVII-XVIII) y también la Subdominante (SS. XV-XX). Este tipo de modulación se da entre tonalidades muy alejadas.

## Musicología

La musicología es el estudio científico o académico de todos los fenómenos relacionados con la música, como sus bases físicas, su historia y su relación con el ser humano y la sociedad. Las diferentes orientaciones de investigación musicológica son muy diversas. Las diferentes ramas y escuelas de musicología hacen énfasis en diferentes áreas de trabajo, objetos de estudio y problemas de investigación. La musicología se ha definido y desarrollado de manera muy diferente según las diversas tradiciones nacionales. Por ejemplo, en la academia anglosajona, la teoría de la música no pertenece a la musicología; ambas se enseñan en departamentos universitarios diferentes y poseen asociaciones y revistas específicas.<sup>378</sup>

La nueva musicología es un término que se aplica *grosso modo* para designar al estudio, análisis y crítica de la música desde nuevas perspectivas. Este estudio puede llevarse a cabo desde varios puntos de vista: el feminismo, las matemáticas, el estudio de los géneros musicales, teorías desconocidas, el postcolonialismo y nuevas hipótesis.

Aunque la nueva musicología emergió dentro de la musicología histórica, el énfasis en el estudio cultural dentro de la tradición occidental de la música del arte coloca a la nueva musicología entre

---

<sup>378</sup> Contenidos extraídos de "<http://es.wikipedia.org/wiki/Musicología>" y consultados en fecha 26/06/2012.

la investigación histórica y la etnomusicología. A partir de los años 80 del siglo XX, muchos de los estudios asociados a la nueva musicología han llegado a ser objeto de estudio de la musicología tradicional. Así, muchos musicólogos ya no hacen más distinciones entre musicología y nueva musicología.

## Notas de paso

La creación melódica no se restringe sólo al uso de las notas de los acordes (notas reales) de la estructura armónica subyacente, sino que necesita de la participación de otras que son extrañas a sus acordes. Por dicha razón, se las conoce actualmente con el nombre de notas extrañas a los acordes. Su función generalmente es ornamental, por lo que también reciben el nombre de notas de adorno.

379

Dependiendo de la función ornamental que desempeñen, las notas de adorno se clasifican en varios tipos. Podríamos afirmar que, entre todas ellas, las notas de paso son las más empleadas en la creación melódica. Las notas de paso se caracterizan por crear puentes entre notas reales de distinto nombre (ver Figura 118), creando de esta manera una continuidad en el discurso melódico. Su valor suele ser breve, no excediendo del de las notas reales circundantes. Asimismo, son más comunes las que caen en parte de tiempo o de compás débil, aunque son sobrados los casos en los que aparecen también en las partes fuertes, siendo éstas últimas confundidas habitualmente por apoyaturas.



Figura 118: Ejemplo de nota de paso.

Las notas de paso, al igual que sucede con otras notas de adorno, pueden alterarse cromáticamente, siempre que resuelvan ascendentemente de semitono. La atracción que siente la primera nota de este intervalo en su resolución sobre la segunda es tal que el oído admite con naturalidad que esté alterada. De hecho, la gran mayor parte de las alteraciones accidentales presentes en una partitura y que no estén justificadas por modulación, suelen pertenecer a dominantes secundarias o a notas de adorno alteradas.

## Notas enarmónicas

La enarmonía es el nombre que se aplica a la relación entre dos o más sonidos que, a pesar de poseer distintos nombres, son iguales en entonación. Cada sonido posee dos enarmónicos a excepción de uno.<sup>380</sup>

La causa de la existencia de enarmonías es, principalmente, la existencia de las alteraciones.

Al poder subir o bajar uno o más semitonos gracias a las alteraciones, muchas veces obtenemos como consecuencia el mismo resultado, aunque mediante el empleo de distintas alteraciones. Esto significa que si se subiera un semitono un sonido natural empleando un sostenido, el producto equivaldría a bajar un semitono el siguiente sonido natural mediante un bemol.

De este mismo modo, se forman otras relaciones enarmónicas aplicando el doble bemol y el doble sostenido tal como se muestra en la Tabla 101.

379 Contenidos extraídos de “<http://www.elsaposabio.com/musica/?p=1419>” y “<http://www.luiscarlosmoreno.com/aulamusical2008/datos/pages/notasdeadorno.html>” y consultados en fecha 12/12/2011.

380 Contenidos extraídos de “<http://es.wikipedia.org/wiki/Enarmonía>” y consultados en fecha 27/03/2012.

Nota original	Nota enarmónica 1	Nota enarmónica 2
Do	Si #	Re bb
Do #	Si ##	Re b
Re	Do ##	Mi bb
Re #	Mi b	Fa bb
Mi	Re ##	Sol b
Fa	Mi #	Sol bb
Fa #	Mi ##	Sol b
Sol	Fa ##	La bb
Sol #	La b	
La	Sol ##	Si bb
La #	Si b	Do bb
Si	La ##	Do b

Tabla 101: Equivalencias enarmónicas en el sistema tonal de 12 sonidos.

Es incorrecto afirmar que los sonidos enarmónicos son iguales. La única causa no es porque posean distintas nominaciones, sino que además se debe a que el nombre del sonido varía de acuerdo a la tonalidad en que se encuentren escritos.

Esto significa que si se utiliza una tonalidad de sol mayor (posee fa# en clave), todos los fa deberán ser subidos un semitono. Así, el nombre que recibirán estos sonidos es el de fa# y no el de solb u otro enarmónico.

Cabe aclarar que en la mayoría de las piezas de música se usan alteraciones accidentales para cambiar de forma constante la tonalidad establecida para evitar la monotonía. Esto representa que, aunque la tonalidad de una pieza de música fuera sol mayor y todos los **fa** fueran *sostenidos*, puede emplearse el **solb** u otro enarmónico para referirse a este sonido, pero con esta acción estaríamos cambiando la tonalidad.

Además, se debe añadir que las enarmonías son realidad una convención creada por el sistema tradicional de afinación europeo, que es el sistema temperado, en el que la escala está formada por 12 sonidos a distancia de semitono; sin embargo en la naturaleza encontramos que por ejemplo un re sostenido y un mi bemol no son el mismo sonido, el primero queda un poco por encima del segundo y el segundo un poco por debajo. Esto resulta de gran importancia por el hecho que los buenos ejecutantes de instrumentos de afinación libre (como el violín o la flauta travesera) realizarán estos sonidos ligeramente más altos o más bajos de como convencionalmente se estudian los sonidos en música. Adentrarse más en este tema entraría ya dentro del campo de la acústica.

## Notas ornamentales

Adornos musicales o signos, son recursos que pueden ser utilizados en las composiciones con el objeto de imprimirlas a éstas expresión, ornamento, variedad, gracias o denadas vivaces (palabra italiana).<sup>381</sup>

381 Extraído de “<http://es.wikipedia.org/wiki/Apoyatura>” y “[http://es.wikipedia.org/wiki/Adorno\\_musical](http://es.wikipedia.org/wiki/Adorno_musical)” consultado en fecha 10/12/2011.



Los adornos se indican con pequeñas notas o signos que se colocan antes o después de la nota a la cual afectan. Dichas pequeñas notas no tienen duración por sí mismas, lo toman de la nota que le precede o le sigue.

Al principio, la incorporación de adornos se confiaba al intérprete, que se servía de signos y fórmulas convencionales. El posterior abuso de los ornamentos llegó a tal extremo que los compositores se vieron obligados a precisar qué era lo que querían y como lo querían. Entre 1650 y 1750, en la época barroca, se hicieron tratados y tablas explicativas, en las que cada autor definía sus signos (homologados o no) y su correcta interpretación. Así pues, los adornos pasaron de ser algo arbitrario y a decisión del intérprete, a ser algo normalizado.

Existen diferentes adornos, siendo los principales:

- Apoyatura: breve o doble. (Ver un ejemplo en la Figura 119).



Figura 119: Ejemplo de apoyatura breve y a la derecha su resultado sonoro.

- Acciacatura: (Ver un ejemplo en la Figura 120).



Figura 120: Ejemplo de Acciacatura y su resultado sonoro a la derecha

- Fioritura llamada también “cadenza”, “calderón” o “fermata”.
- Grupeto: grupo de notas alrededor de la nota principal (Ver un ejemplo en la Figura 121).



Figura 121: Ejemplo de grupeto y su resultado sonoro a la derecha.

- Mordente: Apoyado o superior (Ver un ejemplo en la Figura 122).



Figura 122: Ejemplos de mordente superior e inferior y su resultado sonoro a la derecha.

- Trino: Trino apoyado y corto (semitrino) Repetición a gran velocidad de la nota principal y la inmediatamente superior (Ver Figura 123).



Figura 123: Expresión escrita de un trino.

- Bordadura: La bordadura es una o más notas que rodean a la nota principal por grados conjuntos o cromáticamente. Puede ser ascendente (superior) o descendente (inferior) y ocurre en la parte débil del compás o tiempo.

## Octava musical

Una **octava** es el intervalo que separa dos sonidos cuyas frecuencias fundamentales tienen una relación de dos a uno. Ejemplo de octava: el  $la_4$  (A5 en inglés) de 880 Hz está una octava por encima respecto a  $la_3$  (A4) de 440 Hz.<sup>382</sup>

También se denomina **octava** al rango de frecuencias entre dos notas que están separadas por una relación 2:1. La diferencia con la definición anterior es que aquí se habla de octava como una región y no como una distancia. Por ejemplo, decimos que el *re* que está una novena por encima del *do*, está dentro de la “siguiente octava”.

El nombre de octava obedece al hecho de que la escala occidental recorre esta distancia después de siete pasos desiguales de tono y semitono. Como los intervalos se cuantifican por una cifra que expresa el número de notas que comprende, incluidas las dos notas de los extremos, este intervalo se denomina octava (por ejemplo *do-re-mi-fa-sol-la-si-do*).

Debe aclararse que cuando se cuenta en la manera en que se hace en los intervalos, es utilizando numeración ordinal (de orden) comenzando de 1º y siguiendo 2º 3º etc. a diferencia de la numeración cardinal que habitualmente se utiliza en otros ámbitos, en el que se arranca del valor cero.

## Partita

Una partita es el nombre dado a una suite de danzas instrumentales. Durante los siglos XVI y XVII, especialmente en Italia, era una pieza instrumental sencilla; designaba una glosa popular en forma de variaciones para un instrumento de teclado. Más tarde, a mediados del siglo XVIII, especialmente en los países germánicos, designaba una serie de variaciones sobre un tema popular o religioso. Johann Kuhnau, Johann Schop y compositores alemanes posteriores (de manera notable J.S.Bach), la utilizaron como una serie de piezas musicales, como sinónimo de una suite.<sup>383</sup>

A veces era una pieza para órgano, clavecín, clavicordio, etc. Entre los autores más notables de partitas, (además de los citados anteriormente) se encuentran G. M. Trabaci, G. Frescobaldi, J. J. Froberger, J. Pachelbel y G. Böhm.

Bach escribió algunos conjuntos de partitas para diferentes instrumentos:

- Las partitas (BWV 825-830), seis suites para clavecín, publicadas desde 1726 a 1730 como el *Clavier-übung I*.
- Las tres partitas para violín solo (1720), juntamente con tres sonatas (BWV 1001-1006).

## Partitura musical

Una **partitura** es un texto que indica, mediante un lenguaje propio, llamado sistema de notación, cómo debe interpretarse una composición musical. Una partitura contiene por lo general las indicaciones de un único instrumento, y representa la obra completa cuando ésta posee un único instrumento o una parte de ella cuando la obra se completa con otros instrumentos y sus

<sup>382</sup> Extraído de “<http://es.wikipedia.org/wiki/Octava>” y consultado en fecha 4/12/2011.

<sup>383</sup> Extraído y traducido de “<http://ca.wikipedia.org/wiki/Partita>” y consultado en fecha 30/05/2012.

correspondientes partituras. Cuando presenta la obra en su totalidad, e involucra a todos los instrumentos y voces, se denomina parte príncipe.<sup>384</sup>

En obras orquestales, se llama *partitura* al texto que utiliza exclusivamente el director de orquesta y que contiene toda la obra que se ejecutará. *Particella*, en contraste, es el nombre dado a cada una de las partituras que tienen los intérpretes de los diferentes instrumentos. Un ejemplo de partitura de una pieza para piano solo del compositor Erik Satie se muestra en la Figura 124.



Figura 124: Ejemplo de partitura para piano solo de una obra de Erik Satie (fuente: <http://www.visualbeta.es/3926/utilidades/lilypond-crea-tus-partituras-musicales/>)

La partitura consta de un pentagrama, sobre el cual se ubican los símbolos que representan los componentes musicales de la obra escrita en ella. Estos signos musicales suelen indicar las notas musicales, las figuras, es decir la duración de las notas, la armadura de clave, es decir la escala de notas, alteraciones en la escala musical, como bemoles, sostenidos y becuadros, ligaduras entre notas y otras particularidades de la interpretación musical. Adicionalmente, las partituras suelen disponer fuera del pentagrama de información adicional sobre cómo interpretar las diferentes secciones de la obra, como el tempo y la intensidad, entre otros.

## Puente

En una canción, un puente es un interludio que une o conecta dos partes de una canción y que crea una conexión armónica entre aquellas partes. El puente por lo general se diferencia del verso y del estribillo en su estructura armónica (la progresión de acordes) y lírica. Suele diferenciarse de la estrofa y el estribillo tanto en la progresión armónica como en la letra; de hecho, un puente musical no siempre tiene letra. Un puente puede estar ejecutado únicamente por la sección de ritmo o por la sección de ritmo y un instrumento solista.<sup>385</sup>

Generalmente la estrofa se repite al menos dos veces antes del puente. El puente entonces puede sustituir la tercera estrofa o bien precederla o seguirla inmediatamente. En este último caso, retrasa el estribillo esperado. Ya que el oyente, por la secuencia de sonidos y la estructura, espera el estribillo, cuando suena el puente (siempre que tenga una armonía o letra diferente a las del estribillo), el oyente resulta agradablemente sorprendido al no ver cumplidas sus expectativas. El

384 Extraído de <http://es.wikipedia.org/wiki/Partitura> y consultado en fecha 21/12/2011.

385 Información obtenida en [http://es.wikipedia.org/wiki/Estructura\\_de\\_una\\_canción\\_\(música\\_popular\)#Puente](http://es.wikipedia.org/wiki/Estructura_de_una_canción_(música_popular)#Puente) y consultada en fecha 10/01/2012.

estribillo que sigue al puente suele ser el último y a menudo se repite varias veces para acentuar que se trata del final la canción.

Cuando se espera una estrofa o un estribillo y toma su lugar algo que es melódica y líricamente diferente de ambos, muy probablemente se trate del puente.

## Ragtime

Del inglés *ragged-time*, (tiempo rasgado), abreviado en ocasiones como “*rag*”, es un género musical estadounidense que se popularizó a finales del siglo XIX derivado de la marcha, caracterizado por una melodía sincopada y un ritmo acentuado en los tiempos impares (primer y tercero). Entre sus raíces aparecen elementos de marcha en el estilo de John Philip Sousa y de ritmos provenientes de la música africana.<sup>386</sup>

El ragtime es una de las primeras formas musicales verdaderamente estadounidenses y una de las influencias en el desarrollo del jazz. Su principal compositor fue Scott Joplin, quien saltó a la fama tras la publicación en 1899 del *Maple Leaf Rag*, el cual, junto con otros éxitos posteriores, contribuyó a definir la forma conocida como *ragtime clásico*, con una armonía, estructura y métrica particular, en contraste con las formas más primitivas de ragtime caracterizadas por una mayor flexibilidad.

## Síncopa

En música, la síncopa es la estrategia compositiva destinada a romper la regularidad del ritmo, por medio de la acentuación de una nota en un lugar débil o semifuerte de un compás.<sup>387</sup>

Puede estar escrita utilizando figuras que trasciendan sobre la parte fuerte de la frase (ver Figura 125).



Figura 125: Síncopa con figuración.

Puede estar escrita con silencios (en este caso se denomina contratiempo). Si el instrumento que ejecuta el ritmo no produce sonidos prolongados, se oirá lo mismo que escrito con figuras (ver Figura 126).



Figura 126: Síncopa con silencios.

En caso de que el instrumento produzca sonidos prolongados, se obtendría el mismo ritmo ejecutando la síncopa escrita con ligaduras (ver Figura 127).



Figura 127: Síncopa con ligaduras.

Es un sonido iniciado sobre un tiempo débil o sobre la parte débil de un tiempo, y prolongado sobre la parte fuerte de un sonido, articulando sobre la segunda parte de cada tiempo (parte débil) y prolongado sobre la primera parte (parte fuerte). Cuando las dos partes de la síncopa no son de igual duración se llama síncopa Irregular. Cuando las dos partes de la síncopa son de igual duración se llama síncopa Regular.

386 Extraído de “<http://es.wikipedia.org/wiki/Ragtime>” y consultado en fecha 28/05/2012.

387 Extraído de “[http://es.wikipedia.org/wiki/Síncopa\\_\(música\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Síncopa_(música))” y consultado en fecha 8/12/2011.

La síncopa es utilizada en muchos géneros musicales, y una es parte fundamental de la rítmica de estilos como el jazz y otros ritmos afro-americanos, así como de buena parte la música culta moderna y contemporánea. Es también parte de la mayoría de la música popular contemporánea, a menudo interpretada mediante la acentuación del segundo tiempo (y cuarto, si el compás es de cuatro tiempos) en instrumentos de base rítmica o armónica (bajo, batería).

## Sonata (forma musical)

Sonata es el nombre dado a distintas formas musicales, empleadas desde el período barroco hasta las experiencias más rupturísticas de la música contemporánea.

Por sonata se entiende, según el modelo clásico, tanto una pieza musical completa, como un procedimiento compositivo que utiliza dos temas generalmente contrastantes. Este procedimiento es conocido como “forma sonata”.

La sonata clásica, la forma más difundida de esta forma musical, es una obra que consta de tres o cuatro movimientos, constituida para uno o dos instrumentos. Inicialmente predominaron las formas de tres movimientos, especialmente en la época clásica, pero a medida que aumentaban tanto su complejidad como duración se popularizaron las de cuatro movimientos.

En la época barroca, el término *sonata* se utilizó con relativa libertad para describir obras reducidas de carácter instrumental, por oposición a la *cantata*, que incluía voces. Sin embargo, la sonata barroca no está definida por una forma específica de su argumento musical.

### Movimientos o secciones

1. *Allegro* de sonata: el primer movimiento es un *allegro* complejo (en "forma sonata" propiamente dicha), dotado o no de una introducción lenta. Está formado por tres secciones: exposición, desarrollo y recapitulación.
  - 1.1. La exposición consiste de dos temas, el primer tema "A" esta en la tonalidad principal de la sonata y el segundo en una tonalidad vecina (para sonatas en tonos mayores por lo general al quinto grado y en tonos menores al tercer grado o relativa mayor). Entre el tema "A" y el "B" hay un puente sin mucha importancia melódica que modula de una tonalidad a la otra. Tras el tema "B" hay una coda de la exposición en la que se puede volver a la tónica inicial o mantenerse en la tónica secundaria propia del tema "B".
  - 1.2. El desarrollo tiene una estructura libre, pero podemos decir que el compositor toma alguno de los dos temas, ambos o partes de los mismos y los somete a innumerables procedimientos compositivos, jugando con ellos. Es el momento de mayor tensión de la obra en donde se producen más cambios armónicos y hay una cierta inestabilidad tonal.
  - 1.3. La recapitulación o reexposición sucede cuando el compositor vuelve a presentar los temas completos y ambos en la tonalidad principal. Era muy común que para finalizar el movimiento el compositor añadiera una coda, lo que tuvo una gran repercusión en el concierto dando origen a la cadenza.
2. Movimiento lento, *andante*, *adagio* o *largo*, que puede tener diversas formas como suite o lied.
3. Movimiento en forma de danza, *minuet* y desde Beethoven en *scherzo*.
4. Un nuevo *allegro*, menos formalmente estructurado que el inicial *allegro da sonata* o puede tener otras formas como el rondo-sonata que es una combinación de la forma rondó con la forma sonata explicada para el primer movimiento.

La fijación de esta forma, sobre todo a través de las numerosas sonatas de Beethoven, influyó profundamente en la época romántica, cuyos conservatorios codificaron la práctica. La noción de la

estructura formal se tomó como paradigma de otros géneros, llevando a considerar, por ejemplo, la sinfonía como una "sonata para orquesta". Chopin, Mendelssohn, Schumann, Liszt, Brahms y Rachmaninov hicieron extenso uso del principio teórico de la sonata en composiciones famosas.

## Sonificación

Sonificación, una forma de presentación auditiva, es el uso de la no grabación de audio para transmitir información o perceptualizar datos. La percepción auditiva tiene una alta resolución temporal y la presión, lo que abre posibilidades para ello, como alternativa o complemento a las técnicas de visualización.<sup>388</sup>

## Suite

Una *suite* es una obra musical compuesta por varios movimientos breves cuyo origen son distintos tipos de danzas barrocas.<sup>389</sup>

La *suite* está considerada como una de las primeras manifestaciones orquestales de tipo moderno. Para que se mantuviera la unidad interna, todos los pasajes de una *suite* se componían en la misma tonalidad, o en su relativo menor. Otras veces se presentaba un tema musical en diferentes danzas. Por ello se ha considerado este género un antecedente de la forma sonata que se origina en el siglo XVII. Las danzas tenían una forma binaria simple, es decir, dos secciones más o menos iguales.

Una *suite* constaba de unos diez movimientos. Solía comenzar con un preludio. La primera danza podía ser una *allemande*, de ritmo rápido; luego una *courante* y una *zarabanda*; una *bourrée*, de tiempo moderado, y así sucesivamente, para finalizar con una danza viva, como la *Giga* (danza). La *suite* tuvo su apogeo con G.F.Händel y J.S. Bach durante el siglo XVIII.

Al finalizar el barroco, la *suite* fue una forma musical sofisticada que mezclaba distintas tonalidades, contrastaba materiales temáticos presentándolos al inicio de la pieza y reexponiéndolos en su final. Anuncia, en definitiva, el origen de la sonata, que reemplazará a la suite como género instrumental en la segunda mitad del siglo XVIII.

La suite es la unión en una sola obra de varias danzas de distinto carácter y ritmo, con el que consigue dar el sentido dramático de "contraposición", típico del Barroco.

## Tiempos fuertes y débiles.

No todos los tiempos son iguales. Existe un dinamismo entre ellos que hace que no todos suenen con la misma intensidad. Es decir, hay unos tiempos que suenan más fuertes que otros. De hecho, siempre e intuitivamente, al marcar un ritmo se refleja este dinamismo.<sup>390</sup>

Existen tres tipos de acentos:

FUERTE - SEMIFUERTE – DÉBIL

A pesar de que se dividen en fuertes y débiles, no suele estar efusivamente marcado en la interpretación. Esto solo se toma como un punto teórico para la división de tiempos y la importancia de cada uno de ellos.

Tal como se muestra en la Figura 128, en los compases de dos tiempos, el tiempo primero es fuerte; y el segundo débil. En uno de tres tiempos, el primero es fuerte, el segundo débil, igual que

388 Extraído y traducido de "<http://en.wikipedia.org/wiki/Sonification>" y consultado en fecha 18/05/2012.

389 Extraído y traducido de "<http://es.wikipedia.org/wiki/Suite>" y consultado en fecha 18/05/2012.

390 Contenidos extraídos de "<http://www.aprende-gratis.com/teoria-musical/curso.php?lec=tiempos-fuertes>" y "<http://musicalico.blogspot.com/2010/03/tempos-fuertes-y-debiles-y-su.html>" y han sido consultados en fecha 12/12/2011.

el tercero. Cuando el compás es de cuatro tiempos, el primero sigue siendo fuerte, el segundo débil, el tercero semifuerte y el cuarto débil.



Figura 128: Clasificación de los tiempos fuertes en los compases 2/4, 3/4 y 4/4.

En los compases de cuatro tiempos es como si se juntasen dos compases de dos tiempos. Pero la diferencia es que el tercer tiempo no es fuerte, sino que está entre el débil y el fuerte para no restar relevancia al primer tiempo.

Estas cuestiones son de aplicación tanto para los compases simples como a los compuestos. Esto es así porque los compuestos derivan de los simples. En cualquier caso, la diferencia entre los dos tipos de compases está en la forma de dividir los tiempos: de forma binaria para los simples, y de forma ternaria para los compuestos.

Cada tiempo se puede dividir también en fracciones fuertes y débiles a las que llamaremos subdivisiones. De la misma forma que los tiempos; el primero es fuerte y el segundo débil. Y así se puede seguir dividiendo. Esto ayuda en el momento del estudio de la interpretación.

## Tonalidad de una obra musical.

Se refiere a cuál es la "clave", es decir la tónica (junto a su escalas y acordes asociados) en torno al cual se estructuran (o al menos comienza y terminan) en general, las frases y progresiones musicales.<sup>391</sup>

Bajo el concepto de tonalidad, las siete notas o intervalos de una escala diatónica (mayor o menor) tienen cada uno una relación predeterminada entre ellas. Y como se ha mencionado antes, el punto de referencia es la tónica (en inglés *key note*).

Los conceptos de tonalidad (clave) y la escala (diatónica mayor o menor) expresan ambos el mismo conjunto de sonidos. La leve diferencia es que el concepto de escala diatónica se refiere al movimiento conjunto (ascendente o descendente) dentro de estas notas, mientras que en la tonalidad (de una obra) se refiere a las notas en sí que las forman, junto a sus relaciones: no importa el orden de presentación: pueden presentarse por movimiento conjunto o disjunto, lo cual obedece a los designios del compositor.

Los sostenidos y bemoles que forman parte de una tonalidad figuran en la armadura de clave, y se denominan alteraciones propias. Otros sostenidos, bemoles o becuadros que aparecen en el transcurso de la obra se llaman alteraciones accidentales. Los sonidos que se encuentran fuera de la escala básica se denominan "notas extrañas a la tonalidad". La Figura 129 muestra las alteraciones que aparecen en la armadura de cada tonalidad del sistema tonal.

391 Contenidos extraídos de "<http://es.wikipedia.org/wiki/Tonalidad>" y "<http://www.aprende-gratis.com/teoria-musical/curso.php?lec=tonalidad-relativas>" y consultado en fecha 29/11/2011

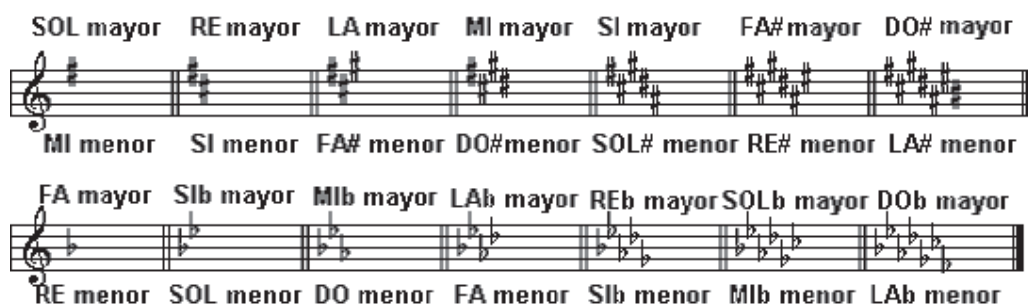


Figura 129: Alteraciones que aparecen en la armadura en función de la tonalidad de la pieza musical.

## Tonalidad relativa.

En música, dentro del sistema tonal, las tonalidades relativas son aquellas tonalidades mayores y menores que comparten la misma armadura de clave, es decir, las mismas alteraciones. La distancia que separa las tónicas de ambas tonalidades, desde la relativa menor a la relativa mayor, es de tercera menor descendente.

Por ejemplo, Sol mayor y Mi menor tienen un solo sostenido en su armadura, por tanto cada una de ellas es la tonalidad relativa de la otra.

Una lista completa de parejas relativas de tonalidades menor/Mayor está recogida en la Tabla 102.

Armadura	Tonalidad Mayor	Tonalidad menor
Sib, Mib, Lab, Reb, Solb, Dob, Fab	Do b Mayor	La b menor
Sib, Mib, Lab, Reb, Solb, Dob	Sol b Mayor	Mi b menor
Sib, Mib, Lab, Reb, Solb	Re b Mayor	Si b menor
Sib, Mib, Lab, Reb	La b Mayor	Fa menor
Sib, Mib, Lab	Mi b Mayor	Do menor
Sib, Mib	Si b Mayor	Sol menor
Sib	Fa Mayor	Re menor
	Do Mayor	La menor
Fa#	Sol Mayor	Mi menor
Fa#, Do#	Re Mayor	Si menor
Fa#, Do#, Sol#	La Mayor	Fa # menor
Fa#, Do#, Sol#, Re#	Mi Mayor	Do # menor
Fa#, Do#, Sol#, Re#, La#	Si Mayor	Sol # menor
Fa#, Do#, Sol#, Re#, La#, Mi#	Fa # Mayor	Re # menor
Fa#, Do#, Sol#, Re#, La#, Mi#, Si#	Do # Mayor	La # menor

Tabla 102: Tonalidades que forman pareja relativa Mayor / menor.



## Transporte musical

Transportar música significa básicamente llevar un trozo musical de una tonalidad (o grupo tonal) a otra. Normalmente esto se hace para acomodar el acompañamiento a un registro de voz dado, facilitando la tarea del cantante.<sup>392</sup>

La tonalidad de un trozo musical, se encuentra definida normalmente por el primer acorde o nota del mismo, el cual en la música tonal, constituye lo que se llama el centro tonal de la melodía, es decir la nota hacia la cual la melodía tiende buscando el reposo. Así por ejemplo la siguiente melodía está en tonalidad La:

La - Mi - La - Re - Mi - La

Técnicamente transportar una melodía o un grupo de acordes, consiste en llevar todas las notas o acordes que la componen, hacia arriba o hacia abajo en la escala musical. Manteniendo, para todas las notas, el mismo intervalo entre nota de origen y nota de destino.

Si deseáramos, por ejemplo, transportar la secuencia anterior a la tonalidad de G, simplemente deberíamos bajar 2 semitonos (la distancia entre Sol y La es; Sol-Sol#-La), a todas y cada una de las notas que la componen. Luego de transportada, la secuencia original entonces quedaría del siguiente modo:

Sol - Re - Sol - Do - Re - Sol

Para visualizar las distancias entre notas más claramente, resulta conveniente tener siempre presente todos los semitonos que componen una escala cromática. A continuación vemos todas las notas que hay en un intervalo de una octava, partiendo de Do.

Do Do# Re Re# Mi Fa Fa# Sol Sol# La La# Si Do

Así es más sencillo ver que el transporte anterior se realiza localizando cada nota a transportar en la escala y contando 2 semitonos hacia la izquierda, para obtener la nota de destino.

## Trino musical

El trino es un adorno musical que consiste en una rápida alternancia entre dos notas adyacentes, por lo general a un semitono o un tono de distancia, que puede ser identificado por el contexto del trino (ver Figura 131).<sup>393</sup>

Este adorno musical se representa en las partituras y *particellas* mediante las letras *tr*, (ver Figura 130) o bien sólo con una *t*, situadas por encima de la nota que se considera principal en este trino. En ocasiones tales letras *tr* han ido seguidas de una línea ondulada e incluso se ha llegado a representar directamente mediante la línea ondulada sin las letras, sobre todo en la música del Barroco y de principios del Clasicismo. La extensión de la línea ondulada normalmente denota la cantidad de tiempo que hay que mantener el trino. No obstante, ambos signos, las letras *tr* y la línea ondulada, son necesarios para aclarar el sentido del trino cuando éste se aplica a más de una nota o bien a notas ligadas. Asimismo, no habrá lugar a dudas si se utilizan ambos signos cuando el trino va asociado a una única cabeza de nota en una parte, que se corresponde con figuras de valores más cortos en otra parte.

---

392 Extraído de “[http://es.wikipedia.org/wiki/Transportar\\_canciones](http://es.wikipedia.org/wiki/Transportar_canciones)” y consultado en fecha 13/12/2011.

393 Extraído de “[http://es.wikipedia.org/wiki/Trino\\_\(música\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Trino_(música))” y consultado en fecha 26/05/2012.

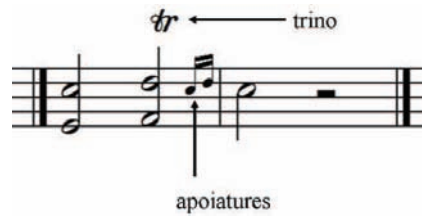


Figura 130: Representación de un trino en una partitura.



Figura 131: Resultado musical de la ejecución del trino de la Figura 130.

## Anexo 2 – Conceptos TIC y matemáticos utilizados.

Esta debe aglutinar el interés de ingenieros en TIC y también de músicos y musicólogos que será para quienes las herramientas desarrolladas en esta tesis doctoral serán de utilidad en sus investigaciones. Este anexo está especialmente concebido al lector no especialista en tecnologías de la información para aclarar y ampliar conceptos únicamente nombrados en los capítulos anteriores.

Este capítulo no necesita una lectura secuencial sino que deberá ser consultado (en caso de ser necesario) por el lector cuando sea referenciado en documento.

Los contenidos de este capítulo han sido obtenidos mayoritariamente de las referencias de las notas a pie de página de cada uno de los términos explicados aunque dicho contenido ha sido simplificado y adaptado al objetivo de este Anexo que es el de servir como compendio de términos TIC de consulta en el caso de que el lector necesite profundizar en dichos conceptos.

### **Algoritmo *Error-Correcting Grammatical Inference***

*Error-Correcting Grammatical Inference* es un algoritmo de gramática inferencial heurística diseñado para identificar regularidades de concatenación en patrones unidimensionales. Está basado en un sistema de corrección de errores para construir una gramática estocástica regular con una única iteración a partir de un conjunto de entrenamiento. El algoritmo parte de un conjunto de cadenas de símbolos y cada vez que procesa una cadena del conjunto de entrenamiento (*training set*) el modelo añade reglas a la gramática. El proceso de cada una de estas cadenas sirve para actualizar las probabilidades de la secuencia de símbolos esperada.<sup>394</sup>

### **Algoritmo evolutivo**

Los algoritmos evolutivos son métodos de optimización y búsqueda de soluciones basados en los postulados de la evolución biológica. En ellos se mantiene un conjunto de entidades que representan posibles soluciones, las cuales se mezclan, y compiten entre sí, de tal manera que las más aptas son capaces de prevalecer a lo largo del tiempo, evolucionando hacia mejores soluciones cada vez.<sup>395</sup>

Los algoritmos evolutivos, y la computación evolutiva, son una rama de la inteligencia artificial. Son utilizados principalmente en problemas con espacios de búsqueda extensos y no lineales, en donde otros métodos no son capaces de encontrar soluciones en un tiempo razonable.

Los algoritmos genéticos son de probada eficacia en caso de querer calcular funciones no derivables (o de derivación muy compleja) aunque su uso es posible con cualquier función.

Deben tenerse en cuenta también las siguientes consideraciones:

Si la función a optimizar tiene muchos máximos/mínimos locales se requerirán más iteraciones del algoritmo para "asegurar" el máximo/mínimo global.

Si la función a optimizar contiene varios puntos muy cercanos en valor al óptimo, solamente podemos "asegurar" que encontraremos uno de ellos (no necesariamente el óptimo).

---

394 Información obtenida y traducida de [110] en fecha 28/5/2012

395 Contenidos extraídos de "[http://es.wikipedia.org/wiki/Algoritmo\\_genético](http://es.wikipedia.org/wiki/Algoritmo_genético)", "[http://es.wikipedia.org/wiki/Algoritmo\\_evolutivo](http://es.wikipedia.org/wiki/Algoritmo_evolutivo)", "[http://es.wikipedia.org/wiki/Estrategia\\_evolutiva](http://es.wikipedia.org/wiki/Estrategia_evolutiva)", "[www.unlu.edu.ar/~ogracia/ia/doc/AG.ppt](http://www.unlu.edu.ar/~ogracia/ia/doc/AG.ppt)", "[http://pisis.unalmed.edu.co/vieja/cursos/analisis\\_decisiones/GA/MOGA%20EAFIT%20B.ppt](http://pisis.unalmed.edu.co/vieja/cursos/analisis_decisiones/GA/MOGA%20EAFIT%20B.ppt)" y "[http://personales.upv.es/ccarrasc/extdoc/Tema-3\\_4\\_algoritmos\\_geneticos.pdf](http://personales.upv.es/ccarrasc/extdoc/Tema-3_4_algoritmos_geneticos.pdf)" resumidos y consultados en diciembre de 2011.

Siguiendo la terminología de la teoría de la evolución, las entidades que representan las soluciones al problema se denominan individuos o cromosomas, y el conjunto de estos, población. Los individuos son modificados por operadores genéticos, principalmente el sobrecruzamiento, que consiste en la mezcla de la información de dos o más individuos; la mutación, que es un cambio aleatorio en los individuos; y la selección, consistente en la elección de los individuos que sobrevivirán y conformarán la siguiente generación. Dado que los individuos que representan las soluciones más adecuadas al problema tienen más posibilidades de sobrevivir, la población va mejorando gradualmente.

Cada individuo de la población es un posible óptimo de la función objetivo; la representación de cada individuo de la población consta de 2 tipos de variables: las variables objeto y las variables estratégicas. Las variables objeto son los posibles valores que hacen que la función objetivo alcance el óptimo global y las variables estratégicas son los parámetros mediante los que se gobierna el proceso evolutivo o, en otras palabras, las variables estratégicas indican de qué manera las variables objeto son afectadas por la mutación.

Haciendo una analogía más precisa, el genotipo en las estrategias evolutivas es el conjunto formado por las variables objeto y las variables estratégicas. Y el fenotipo son las variables objeto, ya que conforme se da la variación de éstas, se percibe un mejor o peor desempeño del individuo.

### Funcionamiento de un algoritmo evolutivo

Los algoritmos entre el conjunto de soluciones de un problema, llamado fenotipo, y el conjunto de individuos de una población natural, codificando la información de cada solución en una cadena, generalmente binaria, llamada cromosoma. Los símbolos que forman la cadena son llamados los genes. Cuando la representación de los cromosomas se hace con cadenas de dígitos binarios se le conoce como genotipo. Los cromosomas evolucionan a través de iteraciones, llamadas generaciones. En cada generación, los cromosomas son evaluados usando alguna medida de aptitud. Las siguientes generaciones (nuevos cromosomas), operadores genéticos, de sobrecruzamiento y de mutación.

Un algoritmo genético puede presentar diversas variaciones, dependiendo de cómo se aplican los operadores genéticos (cruzamiento, mutación), de cómo se realiza la selección y de cómo se decide el reemplazo de los individuos para formar la nueva población. En general, el pseudocódigo consiste de los siguientes pasos:

- **Inicialización:** Se genera aleatoriamente la población inicial, que está constituida por un conjunto de cromosomas los cuales representan las posibles soluciones del problema. En caso de no hacerlo aleatoriamente, es importante garantizar que dentro de la población inicial, se tenga la diversidad estructural de estas soluciones para tener una representación de la mayor parte de la población posible o al menos evitar la convergencia prematura.
- **Evaluación:** A cada uno de los cromosomas de esta población se aplicará la función de aptitud para saber qué tan "buena" es la solución que se está codificando.
- **Condición de término** El AG se deberá detener cuando se alcance la solución óptima, pero ésta generalmente se desconoce, por lo que se deben utilizar otros criterios de detención. Normalmente se usan dos criterios: correr el AG un número máximo de iteraciones (generaciones) o detenerlo cuando no haya cambios en la población. Mientras no se cumpla la condición de término se hace lo siguiente:
  - **Selección** Después de saber la aptitud de cada cromosoma se procede a elegir los cromosomas que serán cruzados en la siguiente generación. Los cromosomas con mejor aptitud tienen mayor probabilidad de ser seleccionados.

- **Recombinación** La recombinación es el principal operador genético, representa la reproducción sexual, opera sobre dos cromosomas a la vez para generar dos descendientes donde se combinan las características de ambos cromosomas padres.
- **Mutación** modifica al azar parte del cromosoma de los individuos, y permite alcanzar zonas del espacio de búsqueda que no estaban cubiertas por los individuos de la población actual.
- **Reemplazo** una vez aplicados los operadores genéticos, se seleccionan los mejores individuos para conformar la población de la generación siguiente

## Algoritmo k-TSI

Este algoritmo pertenece a una familia de técnicas intentan explícitamente descubrir qué símbolos o cadenas tienden a seguir a otras en un determinado lenguaje. Es un método caracterizable que infiere los k-TSSL al límite. Un método k-TSSL estocástico se obtiene por asociar probabilidades a las reglas de la gramática. Se ha demostrado que k-TSSL es un n-grama con  $k=16$ . El algoritmo construye el alfabeto, el conjunto de cadenas iniciales de longitud menor que  $k$ ,  $F$  que es el conjunto final de subcadenas y  $T$  que es el conjunto de cadenas descartadas de longitud  $k$ ; todo ello a partir del conjunto de entrenamiento. Con ello se puede construir un autómeta de estados finitos.<sup>396</sup>

## Árbol de decisión

Un árbol de decisión es un modelo de predicción utilizado en el ámbito de la inteligencia artificial. Dada una base de datos se construyen diagramas de construcciones lógicas, muy similares a los sistemas de predicción basados en reglas, que sirven para representar y categorizar una serie de condiciones que ocurren de forma sucesiva, para la resolución de un problema.<sup>397</sup>

Un árbol de decisión tiene unas entradas las cuales pueden ser un objeto o una situación descrita por medio de un conjunto de atributos y a partir de esto devuelve una respuesta la cual en últimas es una decisión que es tomada a partir de las entradas. Los valores que pueden tomar las entradas y las salidas pueden ser valores discretos o continuos. Se utilizan más los valores discretos por simplicidad, cuando se utilizan valores discretos en las funciones de una aplicación se denomina clasificación y cuando se utilizan los continuos se denomina regresión.

Un árbol de decisión lleva a cabo un test a medida que este se recorre hacia las hojas para alcanzar así una decisión. El árbol de decisión suele contener nodos internos, nodos de probabilidad, nodos hojas y arcos. Un nodo interno contiene un test sobre algún valor de una de las propiedades. Un nodo de probabilidad indica que debe ocurrir un evento aleatorio de acuerdo a la naturaleza del problema, este tipo de nodos es redondo, los demás son cuadrados. Un nodo hoja representa el valor que devolverá el árbol de decisión y finalmente las ramas brindan los posibles caminos que se tienen de acuerdo a la decisión tomada.

En el diseño de aplicaciones informáticas, un árbol de decisión indica las acciones a realizar en función del valor de una o varias variables. Es una representación en forma de árbol cuyas ramas se bifurcan en función de los valores tomados por las variables y que terminan en una acción concreta. Se suele utilizar cuando el número de condiciones no es muy grande (en tal caso, es mejor utilizar una tabla de decisión).

De forma más concreta, refiriéndonos al ámbito empresarial, podemos decir que los árboles de decisión son diagramas de decisiones secuenciales nos muestran sus posibles resultados. Éstos ayudan a las empresas a determinar cuáles son sus opciones al mostrarles las distintas decisiones y

<sup>396</sup> Información obtenida y traducida de [110] en fecha 29/5/2012

<sup>397</sup> Información obtenida de “[http://es.wikipedia.org/wiki/Árbol\\_de\\_decisión](http://es.wikipedia.org/wiki/Árbol_de_decisión)” en fecha 17/10/12.

sus resultados. La opción que evita una pérdida o produce un beneficio extra tiene un valor. La habilidad de crear una opción, por lo tanto, tiene un valor que puede ser comprado o vendido.

Se presenta a continuación un ejemplo de árbol de decisión en formato textual anidado construido para clasificar piezas musicales por estilo musical (Barroco, Clásico y Romántico)

---Árbol de decisión de clasificación por estilo musical-----

```

07 > 0.002
| 5+1 > 0.002
| | 6+7 > 0.003: ROM {CLA=1, BAR=0, ROM=36}
| | | 6+7 ≤ 0.003
| | | | Num notes > 8030: ROM {CLA=0, BAR=0, ROM=7}
| | | | | Num notes ≤ 8030
| | | | | 55 > 0.012
| | | | | | D > 0.079
| | | | | | | 31+ > 0.007: ROM {CLA=0, BAR=0, ROM=3}
| | | | | | | 31+ ≤ 0.007
| | | | | | | | A > 0.120: BAR {CLA=1, BAR=2, ROM=0}
| | | | | | | | A ≤ 0.120
| | | | | | | | | 73 > 0.007: ROM {CLA=0, BAR=0, ROM=3}
| | | | | | | | | 73 ≤ 0.007
| | | | | | | | | | E > 0.163: ROM {CLA=0, BAR=0, ROM=2}
| | | | | | | | | | E ≤ 0.163
| | | | | | | | | | | O6 > 0.164: CLA {CLA=89, BAR=0, ROM=3}
| | | | | | | | | | | O6 ≤ 0.164: ROM {CLA=0, BAR=0, ROM=2}
| | | | | | | | | | | D ≤ 0.079: ROM {CLA=0, BAR=0, ROM=5}
| | | | | | | | | | | 55 ≤ 0.012: BAR {CLA=0, BAR=2, ROM=0}
| 5+1 ≤ 0.002
| | 44+ > 0.000
| | | 71 > 0.017
| | | | 73 > 0.009
| | | | | Num notes > 1689: BAR {CLA=1, BAR=10, ROM=0}
| | | | | Num notes ≤ 1689: CLA {CLA=5, BAR=0, ROM=0}
| | | | 73 ≤ 0.009
| | | | | 36 > 0.008
| | | | | | Cs > 0.036: ROM {CLA=0, BAR=0, ROM=3}
| | | | | | Cs ≤ 0.036
| | | | | | | O6 > 0.417: BAR {CLA=0, BAR=4, ROM=0}
| | | | | | | O6 ≤ 0.417
| | | | | | | | 41 > 0.008: ROM {CLA=1, BAR=0, ROM=2}
| | | | | | | | 41 ≤ 0.008
| | | | | | | | | Num notes > 8108: BAR {CLA=0, BAR=1, ROM=1}
| | | | | | | | | Num notes ≤ 8108
| | | | | | | | | | F > 0.051
| | | | | | | | | | | 23 > 0.043: BAR {CLA=0, BAR=2, ROM=0}
| | | | | | | | | | | 23 ≤ 0.043: CLA {CLA=49, BAR=5, ROM=0}
| | | | | | | | | | | F ≤ 0.051: BAR {CLA=0, BAR=2, ROM=0}
| | | | | | 36 ≤ 0.008
| | | | | | | Num notes > 13866: ROM {CLA=0, BAR=0, ROM=2}
| | | | | | | Num notes ≤ 13866
| | | | | | | | O3 > 0.157: ROM {CLA=1, BAR=0, ROM=2}
| | | | | | | | O3 ≤ 0.157
| | | | | | | | | 51 > 0.007: CLA {CLA=413, BAR=5, ROM=3}
| | | | | | | | | 51 ≤ 0.007
| | | | | | | | | | Cs > 0.017: CLA {CLA=2, BAR=0, ROM=0}
| | | | | | | | | | Cs ≤ 0.017: ROM {CLA=0, BAR=0, ROM=2}
| | | | 71 ≤ 0.017
| | | | | 5+4+ > 0.001: ROM {CLA=0, BAR=0, ROM=19}
| | | | | 5+4+ ≤ 0.001
| | | | | | 13 > 0.003
| | | | | | | F > 0.070
| | | | | | | | 14 > 0.007: BAR {CLA=1, BAR=5, ROM=0}
| | | | | | | | 14 ≤ 0.007: CLA {CLA=15, BAR=0, ROM=0}
| | | | | | | | F ≤ 0.070: BAR {CLA=0, BAR=6, ROM=0}
| | | | | | 13 ≤ 0.003: ROM {CLA=0, BAR=0, ROM=2}
| | 44+ ≤ 0.000

```

```

| | | 4+5+ > 0.003: BAR {CLA=0, BAR=13, ROM=0}
| | | 4+5+ ≤ 0.003
| | | | 67 > 0.029
| | | | | 53 > 0.008: BAR {CLA=0, BAR=18, ROM=0}
| | | | | 53 ≤ 0.008: CLA {CLA=3, BAR=0, ROM=0}
| | | | 67 ≤ 0.029
| | | | | 55 > 0.054: CLA {CLA=73, BAR=9, ROM=1}
| | | | | 55 ≤ 0.054
| | | | | | 07 > 0.006
| | | | | | | 05 > 0.292
| | | | | | | | 45 > 0.042: BAR {CLA=0, BAR=4, ROM=0}
| | | | | | | | 45 ≤ 0.042
| | | | | | | | | Num notes > 2731.500: BAR {CLA=0, BAR=2, ROM=0}
| | | | | | | | | Num notes ≤ 2731.500
| | | | | | | | | | 04 > 0.113
| | | | | | | | | | | 1+6 > 0.004: BAR {CLA=0, BAR=2, ROM=0}
| | | | | | | | | | | 1+6 ≤ 0.004: CLA {CLA=35, BAR=1, ROM=0}
| | | | | | | | | | 04 ≤ 0.113: BAR {CLA=0, BAR=2, ROM=0}
| | | | | | | | | | | 05 ≤ 0.292: BAR {CLA=0, BAR=5, ROM=0}
| | | | | | | | | | | 07 ≤ 0.006: BAR {CLA=0, BAR=7, ROM=0}
07 ≤ 0.002
| 5+1+ > 0.000: ROM {CLA=0, BAR=1, ROM=4}
| 5+1+ ≤ 0.000
| | Fs > 0.002
| | | 5+2+ > 0.000: CLA {CLA=3, BAR=1, ROM=2}
| | | 5+2+ ≤ 0.000
| | | | B > 0.054
| | | | | 15 > 0.038: CLA {CLA=2, BAR=0, ROM=0}
| | | | | 15 ≤ 0.038: BAR {CLA=5, BAR=106, ROM=0}
| | | | | B ≤ 0.054: CLA {CLA=2, BAR=0, ROM=0}
| | | | | | Fs ≤ 0.002: CLA {CLA=3, BAR=0, ROM=0}

```

---

## C4.5 Algoritmo

C4.5 es un algoritmo utilizado para generar un árbol de decisiones elaborado por Ross Quinlan. C4.5 es una extensión del anterior algoritmo ID3 de Quinlan. Los árboles de decisión generados por C4.5 pueden ser utilizados para la clasificación, y por esta razón, C4.5 se refiere a menudo como un clasificador estadístico.<sup>398</sup>

C4.5 construye árboles de decisión de un conjunto de datos de entrenamiento de la misma manera como ID3, usando el concepto de entropía de la información. Los datos de entrenamiento son un conjunto  $S = s_1, s_2, \dots$  de las muestras que ya han sido clasificadas. Cada muestra  $s_i = x_1, x_2, \dots$  es un vector, siendo  $x_1, x_2, \dots$  los atributos o características de la muestra. Los datos de entrenamiento son aumentados con un vector  $C = c_1, c_2, \dots$  donde  $c_1, c_2, \dots$  representan a la clase a la que pertenece cada muestra.

En cada nodo del árbol, C4.5 se selecciona un atributo de los datos que más eficazmente dividen el conjunto de muestras en subconjuntos enriquecidos en una clase u otra. Sus criterios son la ganancia de información normalizada (la diferencia de entropía) que resulta de la elección de un atributo ofrece para dividir los datos. El atributo con la mayor ganancia de información normalizada se elige para tomar la decisión. Después, el algoritmo C4.5 se ejecuta recursivamente en las sublistas más pequeñas.

Este algoritmo tiene unos pocos casos base:

- Todas las muestras de la lista pertenecen a la misma clase. Cuando esto sucede, simplemente se crea un nodo hoja del árbol de decisión que elige esa clase.

<sup>398</sup> Contenidos extraídos de “[http://en.wikipedia.org/wiki/C4.5\\_algorithm](http://en.wikipedia.org/wiki/C4.5_algorithm)” y consultados en fecha 2/02/2012.

- Ninguna de las características proporciona ninguna ganancia de información. En este caso, C4.5 crea un nodo de decisión más arriba del árbol con el valor esperado de la clase.
- En caso de encontrar la clase previamente no vistas. Una vez más, C4.5 crea un nodo de decisión más arriba del árbol con el valor esperado.

En pseudocódigo, el algoritmo general para la construcción de árboles de decisión es el siguiente:

1. Comprobar si hay casos de base
2. Para cada atributo “a”
  - Encontrar la ganancia de información normalizada a partir de la división sobre “a”.
3. Sea “a\_best” el atributo con la mayor ganancia de información normalizada.
4. Crear un “nodo” de decisión que se divide en “a\_best”.
5. Ejecutar recursivamente en las sublistas obtenidas al dividir utilizando “a\_best”, y añadir los nodos como los hijos del “nodo”.

## Cadenas de Márkov

En la teoría de la probabilidad, se conoce como cadena de Márkov a un tipo especial de proceso estocástico discreto en el que la probabilidad de que ocurra un evento depende del evento inmediatamente anterior. En efecto, las cadenas de este tipo tienen memoria. "Recuerdan" el último evento y esto condiciona las posibilidades de los eventos futuros. Esta dependencia del evento anterior distingue a las cadenas de Márkov de las series de eventos independientes, como tirar una moneda al aire o un dado<sup>399</sup>.

Reciben su nombre del matemático ruso Andréi Andréyevich Márkov (1856-1922), que las introdujo en 1907.

Estos modelos muestran una estructura de dependencia simple, pero muy útil en muchas aplicaciones.

En matemáticas, se define como un proceso estocástico discreto que cumple con la propiedad de Márkov, es decir, si se conoce la historia del sistema hasta su instante actual, su estado presente resume toda la información relevante para describir en probabilidad su estado futuro.

Una cadena de Márkov es una secuencia  $X_1, X_2, X_3, \dots$  de variables aleatorias. El rango de estas variables, es llamado espacio estado, el valor de  $X_n$  es el estado del proceso en el tiempo  $n$ . Si la distribución de probabilidad condicional de  $X_{n+1}$  en estados pasados es una función de  $X_n$  por sí sola, entonces se representa mediante la expresión de la Figura 132.

$$P(X_{n+1} = x_{n+1} | X_n = x_n, X_{n-1} = x_{n-1}, \dots, X_2 = x_2, X_1 = x_1) = \\ = P(X_{n+1} = x_{n+1} | X_n = x_n).$$

Figura 132: Expresión matemática de una cadena de Márkov.

Donde  $x_i$  es el estado del proceso en el instante  $i$ . La identidad mostrada es la propiedad de Márkov.

Las aplicaciones de las cadenas de Márkov son múltiples y algunos ejemplos se enumeran a continuación.

<sup>399</sup> Extraído de “[http://es.wikipedia.org/wiki/Cadena\\_de\\_Markov](http://es.wikipedia.org/wiki/Cadena_de_Markov)” y consultado en fecha 14/12/2011.



- Física. Las cadenas de Márkov son usadas en muchos problemas de la termodinámica y la física estadística. Ejemplos importantes se pueden encontrar en la Cadena de Ehrenfest o el modelo de difusión de Laplace.
- Meteorología. Si consideramos el clima de una región a través de distintos días, es claro que el estado actual solo depende del último estado y no de toda la historia en sí, de modo que se pueden usar cadenas de Márkov para formular modelos climatológicos básicos.
- Modelos epidemiológicos. Una importante aplicación de las cadenas de Márkov se encuentra en el proceso Galton-Watson. Éste es un proceso de ramificación que se puede usar, entre otras cosas, para modelar el desarrollo de una epidemia (véase modelaje matemático de epidemias).
- Internet. El *pagerank* de una página web (usado por Google en sus motores de búsqueda) se define a través de una cadena de Márkov, donde la posición que tendrá una página en el buscador será determinada por su peso en la distribución estacionaria de la cadena.
- Simulación. Las cadenas de Márkov son utilizadas para proveer una solución analítica a ciertos problemas de simulación tales como el Modelo M/M/1.
- Juegos de azar. Son muchos los juegos de azar que se pueden modelar a través de una cadena de Márkov. El modelo de la ruina del jugador, que establece la probabilidad de que una persona que apuesta en un juego de azar finalmente termine sin dinero, es una de las aplicaciones de las cadenas de Márkov en este rubro.
- Economía y Finanzas. Las cadenas de Márkov se pueden utilizar en modelos simples de valuación de opciones para determinar cuándo existe oportunidad de arbitraje, así como en el modelo de colapsos de una bolsa de valores o para determinar la volatilidad de precios. En los negocios, las cadenas de Márkov se han utilizado para analizar los patrones de compra de los deudores morosos, para planear las necesidades de personal y para analizar el reemplazo de equipo.
- Música. Diversos algoritmos de composición musical usan cadenas de Márkov, por ejemplo el software *Csound* o *Max*.

## Casilla de verificación

Consta de una casilla que permite dos estados distintos, marcado y desmarcado. La marca implica la aceptación de la afirmación que va enlazado a ella, y por consiguiente, la falta de marca implica la negación de la afirmación.

Normalmente, los *checkbox* son mostrados en la pantalla como una caja cuadrada que puede contener un espacio en blanco (para deseleccionar) o una marca de chequeo o una X (para seleccionar) una opción independientemente de las otras. Junto al *checkbox* normalmente se muestra un texto descriptivo del significado de la opción. Invertir el estado de un *checkbox* se realiza haciendo clic con el ratón sobre la caja o su texto asociado, o usando un atajo de teclado.

## Código ASCII

ASCII (acrónimo inglés de *American Standard Code for Information Interchange*), es un código de caracteres basado en el alfabeto latino, tal como se usa en inglés moderno y en otras lenguas occidentales. Fue creado en 1963 por el Comité Estadounidense de Estándares (ASA, conocido desde 1969 como el Instituto Estadounidense de Estándares Nacionales, o ANSI) como una refundición o evolución de los conjuntos de códigos utilizados entonces en telegrafía. Más tarde, en

1967, se incluyeron las minúsculas, y se redefinieron algunos códigos de control para formar el código conocido como US-ASCII.<sup>400</sup>

El código ASCII utiliza 7 bits para representar los caracteres, aunque inicialmente empleaba un bit adicional (bit de paridad) que se usaba para detectar errores en la transmisión. A menudo se llama incorrectamente ASCII a otros códigos de caracteres de 8 bits, como el estándar ISO-8859-1 que es una extensión que utiliza 8 bits para proporcionar caracteres adicionales usados en idiomas distintos al inglés, como el español.

Las computadoras solamente entienden números. El código ASCII es una representación numérica de un carácter como 'a' o '@'.

Como otros códigos de formato de representación de caracteres, el ASCII es un método para una correspondencia entre cadenas de bits y una serie de símbolos (alfanuméricos y otros), permitiendo de esta forma la comunicación entre dispositivos digitales así como su procesado y almacenamiento. El código de caracteres ASCII se usa casi en todos los ordenadores, especialmente con ordenadores personales y estaciones de trabajo. El nombre más apropiado para este código de caracteres es "US-ASCII".

ASCII es, en sentido estricto, un código de siete bits, lo que significa que usa cadenas de bits representables con siete dígitos binarios (que van de 0 a 127 en base decimal) para representar información de caracteres. En el momento en el que se introdujo el código ASCII muchos ordenadores trabajaban con grupos de ocho bits (bytes u octetos), como la unidad mínima de información; donde el octavo bit se usaba habitualmente como bit de paridad con funciones de control de errores en líneas de comunicación u otras funciones específicas del dispositivo.

El código ASCII define una relación entre caracteres específicos y secuencias de bits; además de reservar unos cuantos códigos de control para el procesador de textos, y no define ningún mecanismo para describir la estructura o la apariencia del texto en un documento; estos asuntos están especificados por otros lenguajes como los lenguajes de etiquetas.

## **Cubase (Secuenciador)**

Cubase es una serie de aplicaciones informáticas para editar audio digital, MIDI y un secuenciador de música, (comúnmente conocidas como DAW - *Digital Audio Workstation*), creadas originalmente por la firma alemana Steinberg en 1989.<sup>401</sup>

Cubase inició su vida a finales de los 80 como un secuenciador y editor MIDI. El programa fue originalmente desarrollado para el Atari ST, más tarde se hizo la versión para *Apple Macintosh* y a mediados de los 90 para Microsoft Windows.

El Cubase original usaba un sistema operativo llamado MROS (*MIDI Real-time Operating System*) que corría bajo el propio sistema operativo nativo. Permitía ejecutar varias aplicaciones MIDI en el ordenador y pasar los datos entre ellas a tiempo real. El MROS no trabajaba bien en Windows 3.0, pues este no fue previsto para aplicaciones en tiempo real.

Sin embargo, los sistemas operativos modernos están diseñados para soportar aplicaciones multimedia, así que las versiones actuales de Cubase no usan MROS.

El lanzamiento de Cubase Audio en 1991 para el Atari Falcon abrió una brecha en la tecnología de programas DSP poniendo al alcance domestico la manipulación de audio en tiempo real. Esto era posible sin la necesidad de costosas tarjetas adicionales, como era el caso con el costoso Pro Tools y otros sistemas similares.

---

400 Extraído de "<http://es.wikipedia.org/wiki/ASCII>" y consultado en fecha 26/05/2012.

401 Extraído de "<http://es.wikipedia.org/wiki/Cubase>" y consultado en fecha 20/06/2012.

Cubase crea proyectos que permiten al operador editar archivos MIDI, pistas de audio crudo, y otras informaciones asociadas como las letras de la canción, y presentarlos en un rango de formatos incluyendo calificación musical, consola de edición, lista de eventos, etc. El operador también puede mezclar varias pistas en formato estéreo wav o mp3 listas para grabarlas en un CD.

Esta DAW trabaja mejor con tarjetas de audio externas así como también con los controladores ASIO Steinberg Cubase 4 es probablemente uno de los más completos secuenciadores de audio y MIDI en el mercado y ya desde la aparición de la actualización 4.1 se pudo decir que estábamos ante un programa maduro y sólido. Recientemente ha recibido una nueva actualización con la versión 4.5.1 por lo que ha llegado el momento para dar un vistazo en profundidad a este popular programa. C.D.A.

## Finale (editor de partituras)

Finale es un programa completo para escribir, ejecutar, imprimir y publicar partituras de música. Fue creado por la empresa MakeMusic. Está diseñado para toda clase de músicos, desde estudiantes y profesores hasta compositores profesionales.<sup>402</sup>

Es el programa más importante de una serie de programas de edición de partituras creados por MakeMusic para Microsoft Windows y Mac OS X. Con Sibelius en segundo lugar, Finale es el programa de notación musical más popular del mercado internacional.

MakeMusic también ofrece algunas versiones menos caras de Finale. Estas incluyen Finale NotePad, Printmusic y Allegro. Otras versiones, el Finale Guitar (Finale para guitarra) y Finale Songwriter (finale para creador de canciones), presentan versiones más sencillas, adaptadas a las necesidades de distintos tipos de músicos. Además distribuyen de forma completamente gratuita el programa "Finale Reader", con el cual se pueden abrir, reproducir e imprimir partituras escritas con cualquiera de las otras aplicaciones de MakeMusic. Otra versión "light", el Finale NotePad Plus, se hizo varios años pero fue descontinuada.

Su última versión a fecha de redacción de este texto es el Finale 2010 (o Finale 15.0), lanzado en 2009.

El programa Finale tiene una empinada curva de aprendizaje y requiere una significativa inversión en tiempo para aprender a utilizarlo. Los músicos que han empezado a usar Finale mientras están tratando de determinar qué programa de notación utilizar, frecuentemente han encontrado que Finale tiene una curva de aprendizaje mucho más empinada y lenta que su principal competidor, Sibelius. Algunos usuarios de Finale no están de acuerdo. Otros sostienen que una curva un poco más lenta de aprendizaje es necesaria para incorporar el alto nivel de ajuste manual de un pentagrama que permite Finale (y por lo que es alabado).

## Formato Kern

El formato kern es un formato de texto para representar material musical del mismo modo que el formato MIDI. Se puede utilizar para representar la información básica para representar la música occidental<sup>403</sup>.

El sistema de kern permite la codificación de tono y duración, así como alteraciones, la articulación, la ornamentación, los ligaduras de valor, ligaduras de expresión, fraseo, *glissando*, barras de compás, dirección de la plica y agrupación de notas.

---

402 Extraído, corregido y resumido de "[http://es.wikipedia.org/wiki/Finale\\_\(programa\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Finale_(programa))" y consultado en fecha 20/06/2012.

403 Contenido extraído de "[http://www.lib.virginia.edu/artsandmedia/dmmc/Music/Humdrum/kern\\_hlp.html#intro](http://www.lib.virginia.edu/artsandmedia/dmmc/Music/Humdrum/kern_hlp.html#intro)" y consultado en fecha 2/02/2012.

El formato kern representa la información subyacente sintáctica incluida en una partitura musical en lugar de la información visual u ortográfica que se encuentra en una partitura impresa. El formato kern está diseñado para facilitar las aplicaciones analíticas, no para ser utilizado como formato de impresión o la generación de sonido.

El formato kern es uno de los esquemas de representación de muchos que se ajustan a la amplia sintaxis HUMDRUM. Hay infinidad de representaciones en el sistema HUMDRUM.

La representación kern no está destinada a solucionar ningún tipo de necesidad analítica en concreto. Es un formato que permite desarrollar aplicaciones computacionales de MIR<sup>404</sup>.

HUMDRUM es una sintaxis o gramática en la que puede ser un número ilimitado de representaciones definidas. Cualquier representación de acuerdo con esta sintaxis puede ser manipulada utilizando el software HUMDRUM *Toolkit*

Debido a que no existe un único formato posible para dar respuesta a todas las necesidades musicales posibles, HUMDRUM evita la definición de una sola representación. La premisa es que el problema de la representación debe ser abordado en una estructura *top-down* fragmentando el problema en fragmentos más manejables, ya que se entiende que las representaciones de propósito especial para una aplicación concreta se definen como necesarias para atender dichas tareas de análisis únicas.

## Interfaz de Línea de Comandos (CLI)

Por su acrónimo en inglés de *Command Line Interface* (CLI), es un método que permite a las personas dar instrucciones a algún programa informático por medio de una línea de texto simple.<sup>405</sup>

Las CLI pueden emplearse interactivamente, escribiendo instrucciones en alguna especie de entrada de texto, o pueden utilizarse de una forma mucho más automatizada (archivo batch), leyendo comandos desde un archivo de *scripts*.

Esta interfaz existe casi desde los comienzos de la computación, superada en antigüedad solo por las tarjetas perforadas y mecanismos similares. Existen, para diversos programas y sistemas operativos, para diversas configuraciones de hardware, y con diferente funcionalidad.

Por ejemplo, las CLI son parte fundamental de los *Shells* o Emuladores de Terminal. Aparecen en todos los desktops (*Gnome*, *KDE*, *Windows*) como un método para ejecutar aplicaciones rápidamente. Aparecen como interfaz de lenguajes interpretados tales como Java, Python, Ruby o Perl.

La contraparte de CLI es la interfaz gráfica de usuario (GUI) que ofrece una estética mejorada y una mayor simplificación, a costa de un mayor consumo de recursos computacionales, y, en general, de una reducción de la funcionalidad alcanzable. Asimismo aparece el problema de una mayor vulnerabilidad por complejidad.

Las CLI son usadas por muchos programadores y administradores de sistemas como herramienta primaria de trabajo, especialmente en sistemas operativos basados en Unix; en entornos científicos y de ingeniería, y un subconjunto más pequeño de usuarios domésticos avanzados.

En dispositivos portables y PDAs (como el iPhone), las CLI no se utilizan, debido a lo complejo que resulta ingresar datos de texto, o por la ausencia total de teclados.

---

404 MIR: *Music Information Retrieval*.

405 Contenido extraído de “[http://es.wikipedia.org/wiki/Línea\\_de\\_comandos](http://es.wikipedia.org/wiki/Línea_de_comandos)” y consultado en fecha 26/05/2012.

## J48 algoritmo

J48 es una implementación de código abierto desarrollada en lenguaje de programación Java del algoritmo C4.5<sup>406</sup> en la herramienta Weka<sup>407</sup> de minería de datos.<sup>408</sup>

### *Jrip algoritmo (Repeated Incremental Pruning)*

Es un algoritmo que genera un listado de reglas obtenidas básicamente a partir de listas de decisión (definidas en la página 275). Funciona de modo similar al como lo hace el algoritmo RIPPER (*Repeated Incremental Pruning to Produce Error Reduction*), el cual fue presentado por William W. Cohen (1995).<sup>409</sup>

Se sabe que cuando se utiliza un método basado en árboles de decisión, algunas veces, el manejo de muchos atributos distintos con diferentes valores puede generar una fragmentación excesiva de datos. Como respuesta a lo anterior es posible discriminar los ejemplos del dominio a base de reglas individuales sencillas y evitar, en la medida de lo posible, la dispersión de los datos.

Por ello, al crear reglas, algunas veces se elige un procedimiento diferente al del manejo de árboles de decisión y este procedimiento consiste en utilizar listas de decisión.

Este es el formalismo para la creación de reglas de JRip. Consiste en hacer una lista ordenada de reglas conjuntivas y evaluarlas en orden para encontrar la primera regla que se cumple sobre el ejemplo a clasificar. Una vez encontrada dicha regla se ha encontrado la regla más eficiente para ese ejemplo y es asignado con una etiqueta de valor de salida.

#### Árboles de decisión.

Los árboles de decisión han sido muy utilizados como herramienta de clasificación en el área de la Inteligencia Artificial y también han sido aplicados en diversos niveles de tratamiento del lenguaje natural.

Los árboles de decisión los cuales extraen reglas de clasificación implícitas en el conjunto de instancias a clasificar y las ordenan en una estructura jerárquica que divide recursivamente el conjunto de ejemplos. La regla de clasificación se da en el camino por las ramas del árbol desde la raíz hasta las hojas.

Cada nodo simboliza una pregunta sobre un determinado atributo y en los arcos subsiguientes se encuentran los valores posibles para dicho atributo. La hoja final del árbol representa la predicción sobre la clase que se ha de asignar a los ejemplos que cumplan con las condiciones o reglas establecidas en el camino desde la raíz hasta la hoja del árbol.

## Kalman (filtro de Kalman)

El **filtro de Kalman** es un algoritmo desarrollado por Rudolf E. Kalman en 1960 que sirve para poder identificar el estado oculto (no medible) de un sistema dinámico lineal, al igual que el observador de Luenberger, pero sirve además cuando el sistema está sometido a ruido blanco aditivo. La diferencia entre ambos es que en el observador de Luenberger, la ganancia K de realimentación del error debe ser elegida "a mano", mientras que el filtro de Kalman es capaz de escogerla de forma óptima cuando se conocen las varianzas de los ruidos que afectan al sistema.<sup>410</sup>

---

406 Consultar la página 269 para una explicación detallada del algoritmo.

407 Consultar la página 298 para una explicación detallada de la aplicación weka.

408 Contenido extraído de "<http://es.wikipedia.org/wiki/C4.5>" y consultado en fecha 26/06/2012.

409 Contenido extraído de "[http://161.116.36.206/~publicacions/research\\_reports/TIM\\_GRIAL\\_REPORT3.pdf](http://161.116.36.206/~publicacions/research_reports/TIM_GRIAL_REPORT3.pdf)" y consultado en fecha 3/02/2012.

410 Contenido extraído de "[http://es.wikipedia.org/wiki/Filtro\\_de\\_Kalman](http://es.wikipedia.org/wiki/Filtro_de_Kalman)" y consultado en fecha 18/05/2012.

### Caso de tiempo discreto:

Se tiene un sistema dado por las expresiones de la Figura 133.

$$\begin{aligned}x_k &= A_{k-1}x_{k-1} + B_{k-1}u_{k-1} + w_{k-1} \\z_k &= C_k x_k + v_k\end{aligned}$$

Figura 133: Expresión del sistema en tiempo discreto.

Siendo:

- $w_k$  es ruido blanco de valor promedio igual a cero y con varianza  $Q_k$  en el instante  $k$ .
- $v_k$  es ruido blanco de valor promedio igual a cero y con varianza  $R_k$  en el instante  $k$ .

El filtro de Kalman permite identificar el estado  $x_k$  a partir de las mediciones anteriores de  $u_k$ ,  $z_k$ ,  $Q_k$ ,  $R_k$  y las identificaciones anteriores de  $x_k$ .

### Caso de tiempo continuo:

Se tiene un sistema dado por la expresión de la Figura 134:

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt}x(t) &= A(t)x(t) + B(t)u(t) + w(t) \\z(t) &= C(t)x(t) + v(t)\end{aligned}$$

Figura 134: Expresión del sistema en tiempo continuo.

siendo:

- $w(t)$  es ruido blanco de valor promedio igual a cero y con varianza  $Q(t)$  en el intervalo de tiempo descrito como  $t$ .
- $v(t)$  es ruido blanco de valor promedio igual a cero y con varianza  $R(t)$  en el intervalo de tiempo descrito como  $t$ .

El filtro de Kalman permite identificar el estado  $x(t + dt)$  a partir de las mediciones anteriores de  $u(t)$ ,  $z(t)$ ,  $Q(t)$ ,  $R(t)$  y las identificaciones anteriores de  $x(t)$ .

## Lenguaje de programación C

C es un lenguaje de programación creado en 1972 por Dennis M. Ritchie en los Laboratorios Bell como evolución del anterior lenguaje B, a su vez basado en BCPL.<sup>411</sup>

Al igual que B, es un lenguaje orientado a la implementación de Sistemas Operativos, concretamente Unix. C es apreciado por la eficiencia del código que produce y es el lenguaje de programación más popular para crear software de sistemas, aunque también se utiliza para crear aplicaciones.

Se trata de un lenguaje débilmente tipificado de medio nivel pero con muchas características de bajo nivel. Dispone de las estructuras típicas de los lenguajes de alto nivel pero, a su vez, dispone de construcciones del lenguaje que permiten un control a muy bajo nivel. Los compiladores suelen

---

411 Contenido extraído y resumido de "[http://es.wikipedia.org/wiki/C\\_\(lenguaje\\_de\\_programación\)](http://es.wikipedia.org/wiki/C_(lenguaje_de_programación))" y consultado en fecha 10/06/2012.

ofrecer extensiones al lenguaje que posibilitan mezclar código en ensamblador con código C o acceder directamente a memoria o dispositivos periféricos.

La primera estandarización del lenguaje C fue en ANSI, con el estándar X3.159-1989. El lenguaje que define este estándar fue conocido vulgarmente como ANSI C. Posteriormente, en 1990, fue ratificado como estándar ISO (ISO/IEC 9899:1990). La adopción de este estándar es muy amplia por lo que, si los programas creados lo siguen, el código es portátil entre plataformas y/o arquitecturas.

Uno de los objetivos de diseño del lenguaje C es que sólo sean necesarias unas pocas instrucciones en lenguaje máquina para traducir cada elemento del lenguaje, sin que haga falta un soporte intenso en tiempo de ejecución. Es muy posible escribir C a bajo nivel de abstracción; de hecho, C se usó como intermediario entre diferentes lenguajes.

En parte a causa de ser de relativamente bajo nivel y de tener un modesto conjunto de características, se pueden desarrollar compiladores de C fácilmente. En consecuencia, el lenguaje C está disponible en un amplio abanico de plataformas (seguramente más que cualquier otro lenguaje). Además, a pesar de su naturaleza de bajo nivel, el lenguaje se desarrolló para incentivar la programación independiente de la máquina. Un programa escrito cumpliendo los estándares e intentando que sea portátil puede compilarse en muchos computadores.

C se desarrolló originalmente (conjuntamente con el sistema operativo Unix, con el que ha estado asociado mucho tiempo) por programadores para programadores. Sin embargo, ha alcanzado una popularidad enorme, y se ha usado en contextos muy alejados de la programación de software de sistema, para la que se diseñó originalmente.

### Propiedades

- Un núcleo del lenguaje simple, con funcionalidades añadidas importantes, como funciones matemáticas y de manejo de archivos, proporcionadas por bibliotecas.
- Es un lenguaje muy flexible que permite programar con múltiples estilos. Uno de los más empleados es el estructurado "no llevado al extremo" (permitiendo ciertas licencias de ruptura).
- Un sistema de tipos que impide operaciones sin sentido.
- Usa un lenguaje de preprocesado, el preprocesador de C, para tareas como definir macros e incluir múltiples archivos de código fuente.
- Acceso a memoria de bajo nivel mediante el uso de punteros.
- Interrupciones al procesador con uniones.
- Un conjunto reducido de palabras clave.
- Por defecto, el paso de parámetros a una función se realiza por valor. El paso por referencia se consigue pasando explícitamente a las funciones las direcciones de memoria de dichos parámetros.
- Punteros a funciones y variables estáticas, que permiten una forma rudimentaria de encapsulado y polimorfismo.
- Tipos de datos agregados (`struct`) que permiten que datos relacionados (como un empleado, que tiene un id, un nombre y un salario) se combinen y se manipulen como un todo (en una única variable "empleado").

## Carencias

- Recolección de basura nativa, sin embargo se encuentran a tal efecto bibliotecas como la "libgc" desarrollada por Sun Microsystems, o el Recolector de basura de Boehm.
- Soporte para programación orientada a objetos, aunque la implementación original de C++ fue un preprocesador que traducía código fuente de C++ a C.
- Funciones anidadas, aunque GCC tiene esta característica como extensión.
- Soporte nativo para programación multihilo.

Aunque la lista de las características útiles de las que carece C es larga, este factor ha sido importante para su aceptación, porque escribir rápidamente nuevos compiladores para nuevas plataformas, mantiene lo que realmente hace el programa bajo el control directo del programador, y permite implementar la solución más natural para cada plataforma. Ésta es la causa de que a menudo C sea más eficiente que otros lenguajes. Típicamente, sólo la programación cuidadosa en lenguaje ensamblador produce un código más rápido, pues da control total sobre la máquina, aunque los avances en los compiladores de C y la complejidad creciente de los microprocesadores modernos han reducido gradualmente esta diferencia.

## **Lenguaje de programación *Haskell***

Haskell es un lenguaje de programación estandarizado multi-propósito puramente funcional con semánticas no estrictas y fuerte tipificación estática. Su nombre se debe al lógico estadounidense Haskell Curry. En Haskell, "una función es un ciudadano de primera clase" del lenguaje de programación. Como lenguaje de programación funcional, el constructor de controles primario es la función. El lenguaje tiene sus orígenes en las observaciones de Haskell Curry y sus descendientes intelectuales.<sup>412</sup>

Las características más interesantes de Haskell incluyen el soporte para tipos de datos y funciones recursivas, listas, tuplas, guardas y calce de patrones. La combinación de las mismas puede resultar en algunas funciones casi triviales cuya versión en lenguajes imperativos pueden llegar a resultar extremadamente tediosas de programar. Haskell es, desde 2002, uno de los lenguajes funcionales sobre los que más se ha investigado. Se han desarrollado muchas variantes:

- Versiones paralelas del MIT y Glasgow, ambas denominadas *Parallel Haskell*.
- Más versiones paralelas y distribuidas de Haskell llamadas *Distributed Haskell* (anteriormente *Goffin*) y Eden
- Una versión con ejecución especulativa: *Eager Haskell*
- Varias versiones orientadas a objetos: *Haskell++*, *O'Haskell* y *Mondrian*.

## **Lenguaje de programación Java**

Es un lenguaje de programación orientado a objetos<sup>413</sup>, desarrollado por *Sun Microsystems* a principios de los años 90. El lenguaje en sí mismo toma mucha de su sintaxis de C y C++, pero tiene un modelo de objetos más simple y elimina herramientas de bajo nivel, que suelen inducir a muchos errores, como la manipulación directa de punteros o memoria. Con respecto a la memoria, su gestión no es un problema ya que ésta es gestionada por el propio lenguaje y no por el programador.

---

412 Contenido extraído de "<http://es.wikipedia.org/wiki/Haskell>" y consultado en fecha 30/05/2012.

413 Extraído de [http://es.wikipedia.org/wiki/Java\\_\(lenguaje\\_de\\_programaci3n\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Java_(lenguaje_de_programaci3n)) consultado en fecha 4/12/2011



El lenguaje Java se creó con cinco objetivos principales:

- Debería usar la metodología de la programación orientada a objetos.
- Debería permitir la ejecución de un mismo programa en múltiples sistemas operativos.
- Debería incluir por defecto soporte para trabajo en red.
- Debería diseñarse para ejecutar código en sistemas remotos de forma segura.
- Debería ser fácil de usar y tomar lo mejor de otros lenguajes orientados a objetos, como C++.

El diseño de Java, su robustez, el respaldo de la industria y su fácil portabilidad han hecho de Java uno de los lenguajes con un mayor crecimiento y amplitud de uso en distintos ámbitos de la industria de la informática, con aplicación en entornos de funcionamiento tales como dispositivos móviles y sistemas empujados, en navegadores web, en sistemas de servidor y en aplicaciones de escritorio.

## Lenguaje de programación LISP

Es una familia de lenguajes de programación de computadora de tipo multiparadigma con una larga historia y una sintaxis completamente entre paréntesis. Especificado originalmente en 1958 por John McCarthy y sus colaboradores en el Instituto Tecnológico de Massachusetts, el Lisp es el segundo más viejo lenguaje de programación de alto nivel de extenso uso hoy en día; solamente el FORTRAN es más viejo. Al igual que el FORTRAN, el Lisp ha cambiado mucho desde sus comienzos, y han existido un número de dialectos en su historia. Hoy, los dialectos Lisp de propósito general más ampliamente conocidos son el Common Lisp y el Scheme.<sup>414</sup>

El Lisp fue creado originalmente como una notación matemática práctica para los programas de computadora, basada en el cálculo lambda de Alonzo Church. Se convirtió rápidamente en el lenguaje de programación favorito en la investigación de la inteligencia artificial (AI). Como uno de los primeros lenguajes de programación, el Lisp fue pionero en muchas ideas en ciencias de la computación, incluyendo las estructuras de datos de árbol, el manejo de almacenamiento automático, tipos dinámicos, y el compilador auto contenido.

El nombre deriva del "LIST Processing" (Proceso de LISTas). Las listas encadenadas son una de las estructuras de datos importantes del Lisp, y el código fuente del Lisp en sí mismo está compuesto de listas. Como resultado, los programas de Lisp pueden manipular el código fuente como una estructura de datos, dando lugar a los macro sistemas que permiten a los programadores crear una nueva sintaxis de lenguajes de programación de dominio específico empujados en el Lisp.

La intercambiabilidad del código y los datos también da a Lisp su instantáneamente reconocible sintaxis. Todo el código del programa es escrito como expresiones S, o listas entre paréntesis. Una llamada de función o una forma sintáctica es escrita como una lista, con la función o el nombre del operador en primer lugar, y los argumentos a continuación; por ejemplo, una función f que toma tres argumentos puede ser llamada usando  $(f \ x \ y \ z)$ .

## Logic Pro (Secuenciador / editor)

Logic Pro (anteriormente, Logic Audio) es un programa de edición de audio en pistas de audio y MIDI que funciona en la plataforma Mac OS X. Creado originalmente por el C-Lab, se convirtió en un producto de Apple cuando la compró en el 2002. Una versión reducida, Logic Express, está también disponible en Apple. En internet se ofrecen guías y libro acerca de cómo manejar ese

---

414 Contenidos obtenidos en <http://es.wikipedia.org/wiki/Lisp> en fecha 10/01/2012.

programa, haciendo así más fácil su experiencia. La última versión disponible de Logic Pro es la 9.<sup>415</sup>

Logic Pro proporciona los instrumentos, los sintetizadores, los efectos audio y los grabadores de voz para la síntesis de la música. Los efectos de audio incluyen las distorsiones, procesadores dinámicos y ecualizadores. El diseño del espacio, por ejemplo, simula la acústica del audio en diversos ambientes, tales como producir ecos. Logic Pro puede trabajar con los teclados MIDI y las superficies de control para la entrada de sonido. También ofrece editar en tiempo real la música, el soporte de la guitarra, abreviaturas del acorde y la notación del tambor.

Logic Pro y Express tienen mucha funcionalidad y virtualmente la misma interfaz. Logic Express se limita al sonido, mientras que Logic Pro maneja varios canales, rodeando el sonido y creándolo envolvente. Ambos pueden manejar hasta 255 pistas de audio, dependiendo del funcionamiento del sistema (tiempo de la CPU, del rendimiento de procesamiento del disco duro y de la búsqueda).

El uso de Logic Pro también ofrece capacidades adicionales, que pueden funcionar a través de una LAN de Internet. Si la red es bastante rápida, se puede trabajar repartiendo el trabajo entre varias CPUs. Esto permite que los usuarios combinen la energía de varias computadoras de Macintosh de procesar los instrumentos y *plug-ins* incorporados del software.

Desde septiembre de 2007 está disponible la versión Logic Studio que integra la última versión de Logic Pro (Logic 8), Soundtrack (software profesional de montaje de audio en vídeo) y Mainstage (programa desarrollado para facilitar al músico interpretaciones en directo).

## Lógica difusa (*fuzzy*)

La lógica difusa o lógica heurística se basa en lo relativo de lo observado como posición diferencial. Este tipo de lógica toma dos valores aleatorios, pero contextualizados y referidos entre sí. Así, por ejemplo, una persona que mida 2 metros es claramente una persona alta, si previamente se ha tomado el valor de persona baja y se ha establecido en 1 metro. Ambos valores están contextualizados a personas y referidos a una medida métrica lineal.<sup>416</sup>

La lógica difusa se adapta mejor al mundo real en el que vivimos, e incluso puede comprender y funcionar con nuestras expresiones, del tipo "hace mucho calor", "no es muy alto", "el ritmo del corazón está un poco acelerado", etc.

Se basa en reglas heurísticas de la forma **SI (antecedente) ENTONCES (consecuente)**, donde el antecedente y el consecuente son también conjuntos difusos, ya sea puros o resultado de operar con ellos. Sirvan como ejemplos de regla heurística para esta lógica (nótese la importancia de las palabras "muchísimo", "drásticamente", "un poco" y "levemente" para la lógica difusa):

- **SI** hace muchísimo calor **ENTONCES** aumentó drásticamente la temperatura.
- **SI** voy a llegar un poco tarde **ENTONCES** aumento levemente la velocidad.

La lógica difusa se utiliza cuando la complejidad del proceso en cuestión es muy alta y no existen modelos matemáticos precisos, para procesos altamente no lineales y cuando se envuelven definiciones y conocimiento no estrictamente definido (impreciso o subjetivo).

Y sin embargo, no es una buena idea usarla cuando algún modelo matemático ya soluciona eficientemente el problema, cuando los problemas son lineales o cuando no tienen solución.

Esta técnica se ha empleado con bastante éxito en la industria, principalmente en Japón, y cada vez se está usando en gran multitud de campos. La primera vez que se usó de forma importante fue

---

415 Contenidos obtenidos en "[http://es.wikipedia.org/wiki/Logic\\_Pro](http://es.wikipedia.org/wiki/Logic_Pro)" en fecha 20/06/2012.

416 Contenidos obtenidos en [http://es.wikipedia.org/wiki/Lógica\\_difusa](http://es.wikipedia.org/wiki/Lógica_difusa) en fecha 27/11/2011.

en el metro japonés, con excelentes resultados. A continuación se citan algunos ejemplos de su aplicación:

- Sistemas de control de acondicionadores de aire
- Sistemas de foco automático en cámaras fotográficas
- Electrodomésticos familiares (frigoríficos, lavadoras...)
- Optimización de sistemas de control industriales
- Sistemas de escritura
- Mejora en la eficiencia del uso de combustible en motores
- Sistemas expertos del conocimiento (simular el comportamiento de un experto humano)
- Tecnología informática

## **MATLAB (Software estadístico)**

MATLAB (abreviatura de *MATrix LABORatory*, "laboratorio de matrices") es un software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M). Está disponible para las plataformas Unix, Windows y Apple Mac OS X.<sup>417</sup>

Entre sus prestaciones básicas se hallan: la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario (GUI) y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware. El paquete MATLAB dispone de dos herramientas adicionales que expanden sus prestaciones, a saber, Simulink (plataforma de simulación multidominio) y GUIDE (editor de interfaces de usuario - GUI). Además, se pueden ampliar las capacidades de MATLAB con las *cajas de herramientas (toolboxes)*; y las de Simulink con los *paquetes de bloques (blocksets)*.

Es un software muy usado en universidades y centros de investigación y desarrollo. En los últimos años ha aumentado el número de prestaciones, como la de programar directamente procesadores digitales de señal o crear código VHDL.

Fue creado por Cleve Moler en 1984, surgiendo la primera versión con la idea de emplear paquetes de subrutinas escritas en Fortran en los cursos de álgebra lineal y análisis numérico, sin necesidad de escribir programas en dicho lenguaje. El lenguaje de programación M fue creado en 1970 para proporcionar un sencillo acceso al software de matrices *LINPACK* y *EISPACK* sin tener que usar Fortran.

## **Minitab (Software estadístico)**

Minitab Inc. es una compañía privada cuya sede principal se encuentra en State College, Pensilvania, y tiene subsidiarias en el Reino Unido, Francia y Australia. Además, Minitab tiene representantes y distribuidores en muchos países alrededor del mundo.<sup>418</sup>

El programa Minitab® Statistical Software fue desarrollado en 1972 por tres profesores de Estadística de Penn State University. Uno de los desarrolladores originales, Barbara Ryan, es la presidenta y directora ejecutiva de Minitab.

En poco tiempo, Minitab llegó a ser, y continúa siendo, el principal software del mundo para la enseñanza de estadística. En todo el mundo, Minitab ha sido el software con el que más estudiantes han aprendido estadística.

Asimismo, Minitab es el software utilizado con mayor frecuencia en Six Sigma, la principal metodología del mundo para el mejoramiento de la calidad.

---

417 Contenidos obtenidos en <http://es.wikipedia.org/wiki/MATLAB> en fecha 10/01/2012.

418 Contenidos obtenidos en <http://www.minitab.com/es-ES/company/company-info/default.aspx> en fecha 11/06/2012.

Más de 450 empresas de la clasificación Fortune 500 utilizan Minitab, y prácticamente todas las organizaciones importantes de consultoría y capacitación para el mejoramiento de la calidad usan y recomiendan el software de la compañía.

En 2007, Minitab recibió el premio Liderazgo en Valor para el Cliente otorgado por Frost & Sullivan, la empresa número 1 del mundo en materia de consultoría para el crecimiento empresarial. También en 2007, The Wall Street Journal incluyó a Minitab entre los finalistas de su clasificación Mejores Sitios para trabajar (Industria Mediana) de Norteamérica.

Minitab Inc. cuenta con la certificación Women's Business Enterprise y es miembro mundial de la organización Business Software Alliance.

## Modelos ocultos de *Márkov*

Un modelo oculto de Márkov o HMM (por sus siglas del inglés, *Hidden Márkov Model*) es un modelo estadístico en el que se asume que el sistema a modelar es un proceso de Márkov de parámetros desconocidos. El objetivo es determinar los parámetros desconocidos (u *ocultos*, de ahí el nombre) de dicha cadena a partir de los parámetros observables. Los parámetros extraídos se pueden emplear para llevar a cabo sucesivos análisis, por ejemplo en aplicaciones de reconocimiento de patrones. Un HMM se puede considerar como la red bayesiana dinámica más simple.<sup>419</sup>

En un modelo de Márkov normal, el estado es visible directamente para el observador, por lo que las probabilidades de transición entre estados son los únicos parámetros. En un modelo *oculto* de Márkov, el estado no es visible directamente, sino que sólo lo son las variables influenciadas por el estado. Cada estado tiene una distribución de probabilidad sobre los posibles símbolos de salida. Consecuentemente, la secuencia de símbolos generada por un HMM proporciona cierta información acerca de la secuencia de estados.

Los modelos ocultos de Márkov son especialmente aplicados a reconocimiento de formas temporales, como reconocimiento del habla, de escritura manual, de gestos, etiquetado gramatical o en bioinformática. En el reconocimiento de voz se emplea para modelar una frase completa, una palabra, un fonema o trifenema en el modelo acústico. Por ejemplo la palabra "gato" puede estar formada por dos HMM (*Hidden Márkov Model*) para los dos trifenemas que la componen /gat/ y /ato/.

Una notación habitual de un MOM es la representación como una tupla  $(Q, V, \pi, A, B)$ :

- El conjunto de estados  $Q = \{1, 2, \dots, N\}$ . El estado inicial se denota como  $q_t$ . En el caso de la etiquetación categorial, cada valor de  $t$  hace referencia a la posición de la palabra en la oración.
- El conjunto  $V$  de posibles valores  $\{v_1, v_2, \dots, v_M\}$  observables en cada estado.  $M$  es el número de palabras posibles y cada  $v_k$  hace referencia a una palabra diferente.
- Las probabilidades iniciales  $\pi = \{\pi_i\}$ , donde  $\pi_i$  es la probabilidad de que el primer estado sea el estado  $Q_i$ .
- El conjunto de probabilidades  $A = \{a_{ij}\}$  de transiciones entre estados.
  - $a_{ij} = P(q_t = j | q_{t-1} = i)$ , es decir,  $a_{ij}$  es la probabilidad de estar en el estado  $j$  en el instante  $t$  si en el instante anterior  $t - 1$  se estaba en el estado  $i$ .
- El conjunto de probabilidades  $B = \{b_j(v_k)\}$  de las observaciones.

---

419 Extraído de "[http://es.wikipedia.org/wiki/Modelo\\_oculto\\_de\\_Márkov](http://es.wikipedia.org/wiki/Modelo_oculto_de_Márkov)" consultado en fecha 7/12/2011

- $b_j(v_k) = P(o_t = v_k | q_t = j)$ , es decir, la probabilidad de observar  $v_k$  cuando se está en el estado  $j$  en el instante  $t$ .

La secuencia de observables se denota como un conjunto.  $O = (o_1, o_2, \dots, o_T)$

Algunas de las aplicaciones de los modelos ocultos de Márkov son: el Criptoanálisis, el Reconocimiento del habla, de gestos y de movimientos corporales, el reconocimiento óptico de caracteres, la Traducción automática, Seguimiento de partituras musicales, en el ámbito de la Bioinformática y Genómica aplicaciones tales como: predicción de regiones que codifican proteínas dentro de genomas, modelado de familias de secuencias de proteína o ADN relacionado y predicción de elementos de estructura secundaria en secuencias primarias de proteína

## N-grama

Un  $n$ -grama es una subsecuencia de  $n$  elementos de una secuencia dada. Los  $n$ -gramas se emplean en varias áreas del procesamiento estadístico del lenguaje natural, así como en algunos métodos de predicción o descubrimiento de genes.<sup>420</sup>

Un  $n$ -grama de tamaño 1 se denomina "unigrama"; de tamaño 2 es un "bigrama" o "digrama"; de tamaño 3, "trigrama"; de tamaño 4 o más se denomina " $n$ -grama" o "modelo de Márkov de orden  $(n - 1)$ ".

Un modelo de  $n$ -grama permite modelar secuencias, como lenguajes naturales, empleando las propiedades estadísticas de los  $n$ -gramas.

Esta idea tiene su origen en un experimento realizado por Claude Shannon sobre teoría de la información. Su idea fue que dada una secuencia de letras (por ejemplo, la secuencia "por ej"), ¿cuál es la siguiente letra más probable? A partir de un conjunto de datos de aprendizaje, uno puede deducir una distribución de probabilidad para la siguiente letra dado un conjunto de datos históricos de tamaño  $n$ :  $a = 0.4$ ,  $b = 0.00001$ ,  $c = 0$ , ....; donde las probabilidades de todas las posibles letras siguientes suman 1.0.

Más precisamente, un modelo de  $n$ -grama predice  $x_i$  basándose en  $x_{i-1}, x_{i-2}, \dots, x_{i-n}$ .

Aplicándose al modelado de lenguajes, debido a limitaciones computacionales y a la naturaleza abierta del lenguaje (donde hay infinitas palabras posibles), se asume una independencia tal que cada palabra solo depende de las últimas ' $n$ ' palabras, convirtiéndose en un buen modelo de Márkov.

Los modelos de  $n$ -gramas se emplean habitualmente en el procesamiento estadístico del lenguaje natural. En el reconocimiento de voz, los fonemas se modelan empleando una distribución de  $n$ -gramas. Al analizarse, las palabras se modelan de modo que cada  $n$ -grama se componga de  $n$  palabras. Dada una secuencia de palabras, (como por ejemplo "la madrastra era una auténtica bruja"), los trigramas serían: "la madrastra era", "madrastra era una", "era una auténtica" y "una auténtica bruja". Para secuencias de caracteres, los trigramas que podrían generarse a partir de "buenos días" serían "bue", "uen", "eno", "nos", "os ", "s d", " di", etc. Algunos sistemas procesan las cadenas de texto eliminando los espacios. Otros no. En casi todos los casos, los signos de puntuación se eliminan durante el preproceso. Los  $n$ -gramas se pueden emplear para secuencias de palabras o, de hecho, para casi cualquier tipo de datos. Se han empleado, por ejemplo, para extraer características comunes de grandes conjuntos de imágenes de la Tierra tomadas desde satélite, y para determinar a qué parte de la Tierra pertenece una imagen dada.

Los  $n$ -gramas se emplean en diversas áreas de la informática, lingüística computacional, y matemática aplicada. Son una técnica comúnmente empleada para diseñar núcleos que permiten a

420 Extraído de "<http://es.wikipedia.org/wiki/N-grama>" consultado en fecha 6/12/2011

algoritmos automáticos de aprendizaje extraer datos a partir de cadenas de texto. Los  $n$ -gramas también pueden emplearse para encontrar candidatos probables para la correcta ortografía de una palabra mal escrita. También en algoritmos de compresión, donde una pequeña zona de datos necesita  $n$ -gramas de longitud mayor para mejorar la compresión. Los  $n$ -gramas se emplean a menudo en sistemas de reconocimiento de patrones para determinar la probabilidad de que una palabra dada aparezca en un texto. Esta capacidad puede ser útil en reconocimiento de voz, OCR (reconocimiento óptico de caracteres), reconocimiento inteligente de caracteres, traducciones automáticas, y aplicaciones similares en las que un sistema debe elegir el siguiente elemento (letra, palabra, fonema, etc.) de entre una lista de posibles candidatos. También se utilizan en recopilación de información cuando es necesario encontrar "documentos" similares dado un documento y una base de datos de documentos de referencia.

En bioinformática, y en particular en la predicción de genes, se analizan  $n$ -gramas extraídos de las largas cadenas de ácidos nucleicos del ADN (secuencias o frases de un alfabeto de cuatro letras, en definitiva), así como de aminoácidos (un alfabeto que consta, usualmente, de veinte letras), con el objetivo de detectar patrones estadísticos que permitan poner de manifiesto la posible existencia de genes.

### ***Naive Bayes* algoritmo clasificador**

Este clasificador estadístico se considera, en general, como uno de los más básicos, pero los autores coinciden en que, aunque sencillo, este clasificador sigue mostrando un buen desempeño en una gran variedad de problemas y por ello se considera vigente. Fue presentado por Duda & Hart (1973) y utiliza como base la regla de Bayes (1763) que se aplica cuando se desea calcular la probabilidad condicional de la ocurrencia de un evento que sucedió primero, dadas las condiciones históricas de los eventos que ocurrieron después<sup>421 422</sup>.

A grandes rasgos, NB<sup>423</sup> se esquematiza como un nodo  $C$  representante de la clase y un nodo dependiente para cada atributo  $X_i$  que representa cada instancia o ejemplo. Las condiciones metodológicas para la utilización de este algoritmo incluyen asumir que los atributos que modela son independientes unos de otros y que sus valores son determinados a partir de la clase  $C$  de acuerdo a las distribuciones individuales de  $P(X_i|C)$ .

NB se entrena cuando estima las distribuciones individuales de  $P(X_i|C)$  y predice la clase cuando elige aquella que tiene la más alta posibilidad de maximización del ejemplo dado tal como muestra la Figura 135

$$\arg \max_k P(k|x_{i,1}, \dots, x_{i,m}) \approx \arg \max_k P(k) \prod_j P(x_{i,j}|k)$$

*Figura 135: Expresión de la expresión a maximizar en el método Naive Bayes.*

donde el conjunto de clases está representado por  $(1...K)$  y el conjunto de valores de los atributos por  $(x_{i,1}, \dots, x_{i,m})$ . Las probabilidades  $P(k)$  y  $P(x_{i,j}|k)$  se estiman a partir del corpus de aprendizaje con base en las frecuencias relativas de los ejemplos presentados.

### **NP-completo (complejidad computacional)**

En teoría de la complejidad computacional, la clase de complejidad NP-completo es el subconjunto de los problemas de decisión en NP tal que todo problema en NP se puede reducir en cada uno de los problemas de NP-completo. Se puede decir que los problemas de NP-completo son

421 Consultar "<http://colposfesz.galeon.com/est501/probabi/teo/cap313/cap313.htm>" para una explicación más detallada.

422 Contenido extraído de "[http://161.116.36.206/~publicacions/research\\_reports/TIM\\_GRIAL\\_REPORT3.pdf](http://161.116.36.206/~publicacions/research_reports/TIM_GRIAL_REPORT3.pdf)" y consultado en fecha 3/02/2012.

423 NB: NaiveBayes.

los problemas más difíciles de NP y muy probablemente no formen parte de la clase de complejidad  $P$ .<sup>424</sup>

La razón es que de tenerse una solución polinómica para un problema NP-completo, todos los problemas de NP tendrían también una solución en tiempo polinómico. Si se demostrase que un problema NP-completo, llamémoslo  $A$ , no se pudiese resolver en tiempo polinómico, el resto de los problemas NP-completos tampoco se podrían resolver en tiempo polinómico. Esto se debe a que si uno de los problemas NP-completos distintos de  $A$ , digamos  $X$ , se pudiese resolver en tiempo polinómico, entonces  $A$  se podría resolver en tiempo polinómico, por definición de NP-completo. Ahora, pueden existir problemas en NP y que no sean NP-completos para los cuales exista solución polinómica aun no existiendo solución para  $A$ .

Como ejemplo de un problema NP-completo encontramos el problema de la suma de subconjuntos que se puede enunciar como sigue: dado un conjunto  $S$  de enteros, ¿existe un subconjunto no vacío de  $S$  cuyos elementos sumen cero? Es fácil verificar si una respuesta es correcta, pero no se conoce mejor solución que explorar todos los  $2^n - 1$  subconjuntos posibles hasta encontrar uno que cumpla con la condición.

Un problema de decisión  $C$  es NP-completo si:

1.  $C$  es un problema NP, y
2. Todo problema de NP se puede transformar polinómicamente en  $C$ .

Se puede demostrar que  $C$  es NP demostrando que un candidato a solución de  $C$  puede ser verificado en tiempo polinómico.

Una transformación polinómica de  $L$  en  $C$  es un algoritmo determinista que transforma instancias de  $l \in L$  en instancias de  $c \in C$ , tales que la respuesta a  $c$  es positiva si y sólo si la respuesta a  $l$  lo es.

Como consecuencia de esta definición, de tenerse un algoritmo en P para  $C$ , se tendría una solución en P para todos los problemas de NP.

Un problema que satisface la segunda condición pertenece a la clase NP-hard independientemente de que satisfaga la primera.

## OneR algoritmo (Reglas de asociación)

En minería de datos y aprendizaje automático, las reglas de asociación se utilizan para descubrir hechos que ocurren en común dentro de un determinado conjunto de datos. Se han investigado ampliamente diversos métodos para aprendizaje de reglas de asociación que han resultado ser muy interesantes para descubrir relaciones entre variables en grandes conjuntos de datos.<sup>425</sup>

Piatetsky-Shapiro describe el análisis y la presentación de reglas 'fuertes' descubiertas en bases de datos utilizando diferentes medidas de interés. Basado en el concepto de regla fuerte, Agrawal y sus colaboradores presentaron un trabajo en el que indicaban las reglas de asociación que descubrían las relaciones entre los datos recopilados a gran escala en los sistemas de terminales de punto de venta de unos supermercados. Por ejemplo, la siguiente regla:  $\{cebollas, vegetales\} \Rightarrow \{carne\}$

Encontrada en los datos de ventas de un supermercado, indicaría que un consumidor que compra cebollas y vegetales a la vez, es probable que compre también carne. Esta información se puede utilizar como base para tomar decisiones sobre marketing como precios promocionales para ciertos productos o donde ubicar éstos dentro del supermercado. Además del ejemplo anterior aplicado al

424 Contenido extraído de “<http://es.wikipedia.org/wiki/NP-completo>” y consultado en fecha 10/01/2012.

425 Contenido extraído de “[http://es.wikipedia.org/wiki/Reglas\\_de\\_asociación](http://es.wikipedia.org/wiki/Reglas_de_asociación)” y consultado en fecha 26/06/2012.

análisis de la cesta de la compra, hoy en día, las reglas de asociación también son de aplicación en otras muchas áreas como el Web mining, la detección de intrusos o la bioinformática.

Según la definición original de Agrawal el problema de minería de reglas de asociación se define como:

- Sea  $I = \{i_1, i_2, \dots, i_n\}$  un conjunto de  $n$  atributos binarios llamados ítems.
- Sea  $D = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$  un conjunto de transacciones almacenadas en una base de datos.

Cada transacción en  $D$  tiene un ID (identificador) único y contiene un subconjunto de ítems de  $I$ . Una regla se define como una implicación de la forma:  $X \Rightarrow Y$

Donde se cumple que  $X, Y \subseteq I$  y  $X \cap Y = \emptyset$

Los conjuntos de ítems  $X$  y  $Y$  se denominan respectivamente "antecedente" (o parte izquierda) y "consecuente" (o parte derecha) de la regla.

### Reglas significativas, 'soporte' y 'confianza'

Debe tenerse en cuenta que el ejemplo anterior es muy pequeño, en la práctica, una regla necesita un soporte de varios cientos de registros (transacciones) antes de que ésta pueda considerarse significativa desde un punto de vista estadístico. A menudo las bases de datos contienen miles o incluso millones de registros.

Para seleccionar reglas interesantes del conjunto de todas las reglas posibles que se pueden derivar de un conjunto de datos se pueden utilizar restricciones sobre diversas medidas de "significancia" e "interés". Las restricciones más conocidas son los umbrales mínimos de "soporte" y "confianza".

El 'soporte' de un conjunto de ítems  $X$  en una base de datos  $D$  se define como la proporción de transacciones en la base de datos que contiene dicho conjunto de ítems con la expresión de la Figura 136.

$$\text{sop}(X) = \frac{|X|}{|D|}$$

Figura 136: Expresión del "Soporte".

La 'confianza' de una regla se define mediante la expresión de la Figura 137.

$$\text{conf}(X \Rightarrow Y) = \frac{\text{sop}(X \cup Y)}{\text{sop}(X)} = \frac{|X \cup Y|}{|X|}$$

Figura 137: Expresión de la "confianza" de una regla.

La confianza puede interpretarse como un estimador de  $P(Y|X)$ , la probabilidad de encontrar la parte derecha de una regla condicionada a que se encuentre también la parte izquierda.

Las reglas de asociación deben satisfacer las especificaciones del usuario en cuanto a umbrales mínimos de soporte y confianza. Para conseguir esto el proceso de generación de reglas de asociación se realiza en dos pasos. Primero se aplica el soporte mínimo para encontrar a los conjuntos de ítems más frecuentes en la base de datos. En segundo lugar se forman las reglas partiendo de estos conjuntos frecuentes de ítems y de la restricción de confianza mínima.



## PART algoritmo

Es un inductor de listas de decisión que genera una lista de sentencias IF-THEN para agrupar y clasificar datos. La categorización de la información siempre está garantizada, ya que la última cláusula es una regla general (DEFAULT ELSE), que coincide con todo tipo de información. Al llegar a la última regla notifica al algoritmo que mejorar la regla es necesario. La simplicidad de clasificación de arriba hacia abajo puede provocar que resultados demasiado precisos de categorización. Y viceversa, el algoritmo PART pueden sufrir sobrecarga de información, por tener demasiadas sentencias IF-THEN con clases similares. El rendimiento de tiempo de ejecución de la clasificación es bastante lineal y por lo tanto, se incrementa en grandes cantidades de entrenamiento y diferentes clases.<sup>426</sup>

## Perceptrón simple

El perceptrón simple es un modelo simple de neurona basado en el modelo neuronal de McCulloch y Pitts y en una regla de aprendizaje basada en la corrección del error. Fue desarrollado por Frank Rosenblatt y una de las características que más interés despertó este modelo fue su capacidad de aprender a reconocer patrones. El perceptrón simple está constituido por un conjunto de sensores que reciben los patrones de entrada a reconocer o clasificar y una neurona de salida que se ocupa de clasificar a los patrones de entrada en dos clases.<sup>427</sup>

El perceptrón simple es una red monocapa con varias neuronas de entrada conectadas a la neurona de salida. Esto equivale a un hiperplano de dimensión n-1 capaz de separar los datos en dos clases, dependiendo de su salida.

- Si la salida del perceptrón es +1, la entrada pertenecerá a una clase (estará situada a un lado del hiperplano).
- Si la salida es -1, la entrada pertenecerá a la clase contraria (estará situada al otro lado del hiperplano)

En la Figura 138 se muestra la ecuación del hiperplano y las dos dimensiones posibles correspondientes a los resultados de dicha ecuación (+1, -1). Además se puede ver la representación de la arquitectura del perceptrón simple.

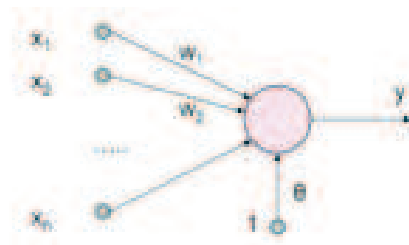


Figura 138: Ecuación del hiperplano de un Perceptrón Simple.

Para el aprendizaje del **perceptrón simple** se dispone de un conjunto de datos (puntos) distribuidos en un espacio multidimensional de los que se sabe su categoría o clase (Ejemplo: A o B). El aprendizaje es un proceso iterativo supervisado en el cual se modifican los parámetros de la red (pesos y umbral), hasta encontrar el hiperplano discriminante que deja a un lado los ejemplos de un tipo y a otro los del otro. Para ello se definen un número finito de iteraciones.

426 Contenido extraído y traducido de "<http://gagne.homedns.org/~tgagne/contrib/machine-learning-in-the-laboratory.html>" y consultado en fecha 26/06/2012.

427 Información obtenida de las referencias "<http://www.redesdeneuronas.com/perceptron-simple.html>" y "<http://es.wikipedia.org/wiki/Perceptrón>" en fecha 17/10/12.

El algoritmo de aprendizaje del perceptrón simple es el siguiente:

1. Inicialización aleatoria de los pesos y el umbral de la red tal como muestra la Figura 139.

$$\{w_i(0)\}_{i=0,\dots,n} \theta(0)$$

Figura 139: Expresión de la inicialización aleatoria de un perceptrón simple.

2. Se toma un patrón entrada-salida como el de la Figura 140.

$$[x=(x_1, x_2, \dots, x_n), d(x)]$$

Figura 140: Patrón de entrada salida de un perceptrón simple.

3. Se calcula la salida de la red mediante la expresión de la Figura 141.

$$y = f(x_1 \cdot w_1 + x_2 \cdot w_2 + \dots + x_n \cdot w_n + u)$$

Figura 141: Expresión de la salida de un perceptrón simple.

4. Si  $y = d(x)$  (clasificación correcta)  
en caso contrario (clasificación incorrecta) se modifican los parámetros de la Figura 142.

$$w_i(t+1) = w_i(t) + d(x) \cdot x_i \quad u(t+1) = u(t) + d(x)$$

Figura 142: Parámetros a modificar en caso de clasificación incorrecta de un perceptrón simple.

Ello genera la regla de aprendizaje de la Figura 143.

$$\text{Si } x \in C^1, d(x) = 1 \Rightarrow w_i(t+1) = w_i(t) + x_i \quad u(t+1) = u(t) + 1$$

$$\text{Si } x \in C^2, d(x) = -1 \Rightarrow w_i(t+1) = w_i(t) - x_i \quad u(t+1) = u(t) - 1$$

Figura 143: Regla de aprendizaje generada por el perceptrón.

5. Se vuelve al paso 2 hasta completar el conjunto de patrones de entrenamiento.
6. Se repiten los pasos 1, 2, 3 y 4 hasta alcanzar el criterio de parada.

## Random Forest algoritmos

*Random Forest* es un algoritmo estadístico que se utiliza para clasificar los puntos de grupo de datos en grupos funcionales. Cuando el conjunto de datos es grande y/o existen muchas variables, se hace difícil agrupar los datos, ya que no todas las variables se pueden tener en cuenta, por lo tanto, el algoritmo puede también dar una cierta posibilidad de que un punto de datos pertenece a un grupo determinado.<sup>428</sup>

428 Contenidos extraídos de “[http://simple.wikipedia.org/wiki/Random\\_forest](http://simple.wikipedia.org/wiki/Random_forest)” y consultado en fecha 2/02/2012.

## Pasos del algoritmo

- La clasificación se realiza del siguiente modo:
- De todo el conjunto de datos se toma un subconjunto (conjunto de entrenamiento).
- El algoritmo clasifica los grupos de datos en grupos y subgrupos. Si se puede trazar líneas entre los puntos de datos en un subgrupo, y las líneas que conectan los subgrupos en grupo, etc. de la estructura sería algo así como un árbol. Esto recibe el nombre de un árbol de decisión. En cada división o nodo en esta variable cluster/árbol/dentrograma son elegidos al azar por el algoritmo para juzgar qué puntos de datos tienen una estrecha relación o no.
- El programa hace varios árboles de un “bosque” conocido. Debido a que para cada división en una variable de árbol son elegidos al azar, cada árbol es diferente.
- A continuación, el resto del conjunto de datos (no en el conjunto de entrenamiento) se utiliza para predecir que árbol de los bosques clasifica mejor los puntos de datos (en el conjunto de datos se conoce la clasificación correcta).
- El árbol con un mayor poder predictivo es el resultado del algoritmo.

En un algoritmo *Random Forest* el número de árboles plantados y el número de variables que se utilizan en cada división puede ser seleccionado.

## **RapidMiner Software**

*RapidMiner* (anteriormente, YALE, *Yet Another Learning Environment*) es un programa informático para el análisis y minería de datos. Permite el desarrollo de procesos de análisis de datos mediante el encadenamiento de operadores a través de un entorno gráfico. Se usa en investigación educación, capacitación, creación rápida de prototipos y en aplicaciones empresariales. En una encuesta realizada por *KDnuggets*, un periódico de minería de datos, RapidMiner ocupó el segundo lugar en herramientas de analítica y de minería de datos utilizadas para proyectos reales en 2009 y fue el primero en 2010.<sup>429</sup>

La versión inicial fue desarrollada por el departamento de inteligencia artificial de la Universidad de Dortmund en 2001. Se distribuye bajo licencia AGPL y está hospedado en SourceForge desde el 2004.

RapidMiner proporciona más de 500 operadores orientados al análisis de datos, incluyendo los necesarios para realizar operaciones de entrada y salida, preprocesamiento de datos y visualización. También permite utilizar los algoritmos incluidos en Weka.

El programa puede descargarse en la siguiente URL: <http://sourceforge.net/projects/rapidminer/>.

Desarrollado en Java, destacan en sus principales características las siguientes:

- Posibilidad de ejecución en diferentes plataformas.
- La representación interna de los procesos de análisis de datos está almacenada en ficheros en formato XML
- Permite el desarrollo de programas a través de un lenguaje de *script*.
- Al igual que la aplicación Weka, puede usarse de los siguientes modos:
  - A través de un GUI.

---

<sup>429</sup>Contenido obtenido y adaptado de las direcciones “<http://rapid-i.com/content/view/181/190/>” y “<http://es.wikipedia.org/wiki/RapidMiner>” en fecha 17/10/12.

- En línea de comandos.
- En *batch* (lotes).
- Desde otros programas a través de llamadas a sus bibliotecas.
- Extensible.
- Incluye gráficos y herramientas de visualización de datos.
- Dispone de un módulo de integración con la aplicación “R” e incorpora los algoritmos implementados por la aplicación Weka.

La versión utilizada ha sido la 5.2.008 y la Figura 144 muestra una captura de pantalla de su interfaz gráfico. En dicha figura aparece diseñado un modelo basado en el sistema Perceptrón.

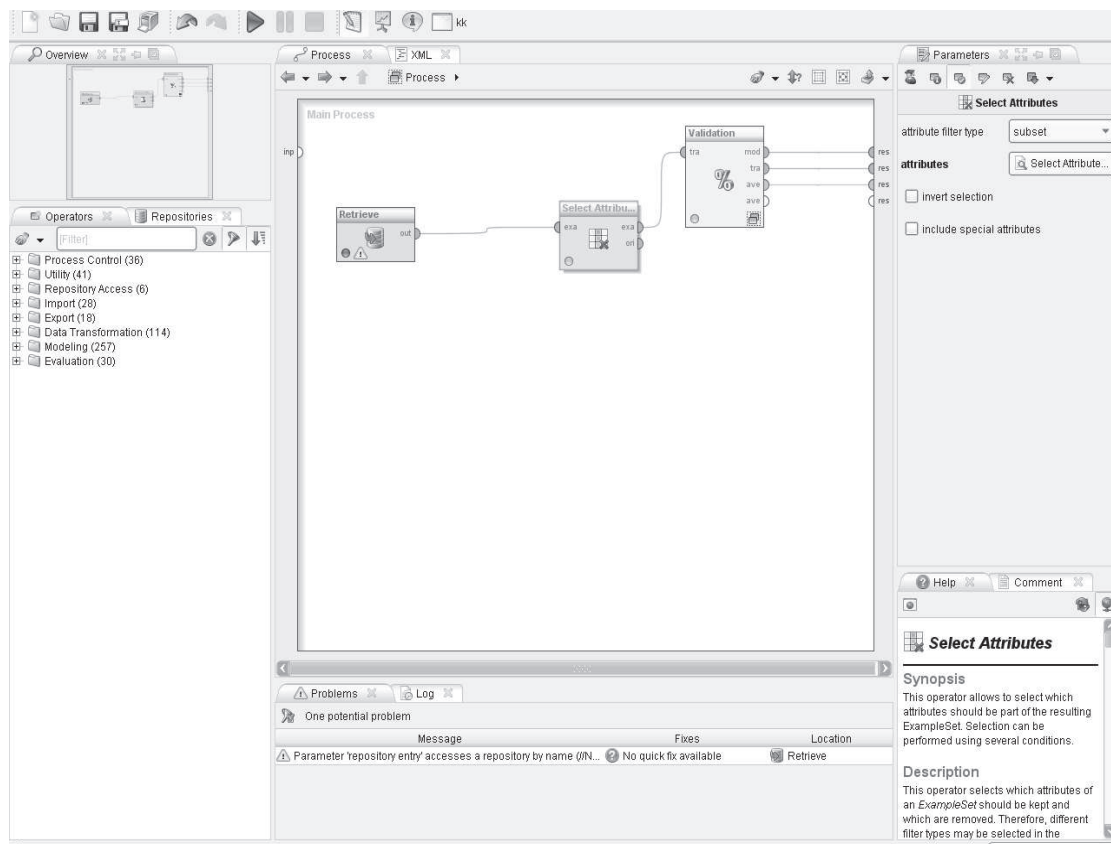


Figura 144: Captura de pantalla de uno de los experimentos realizados por medio de la aplicación RapidMiner.

## Redes neuronales

Las redes neuronales, también llamadas "redes de neuronas artificiales", son modelos bastante simplificados de las redes de neuronas que forman el cerebro. Y, al igual que este, intentan "aprender" a partir de los datos que se le suministran.<sup>430</sup>

Las redes neuronales son un elemento importante de las denominadas tecnologías de Inteligencia Artificial (IA).

430 Contenidos extraídos de “<http://perso.wanadoo.es/alimanya/intro.htm>” y consultado en fecha 30/11/2011.

Características diferenciales con otras tecnologías de la Inteligencia Artificial:

- **Capacidad de aprendizaje.** Normalmente, para la elaboración de un programa informático es necesario un estudio detallado de la tarea a realizar para después codificarla en un lenguaje de programación. Pero, las redes neuronales pueden ser entrenadas para realizar una determinada tarea sin necesidad de estudiar ésta a fondo ni programarla usando un lenguaje de programación. Además; las redes neuronales pueden volver a entrenarse para ajustarse a nuevas necesidades de la tarea que realizan, sin tenerse que reescribir o revisar el código (cosa frecuente en programas tradicionales).
- **Velocidad de respuesta** una vez concluido el entrenamiento. Se comportan también en este caso de manera similar a como lo hace el cerebro: los seres humanos no necesitamos pensar mucho para identificar un objeto, una palabra,... una vez hemos aprendido a hacerlo.
- **Robustez**, en el sentido de que el conocimiento adquirido se encuentra repartido por toda la red, de forma que si se lesiona una parte se continúan generando cierto número de respuestas correctas (en este caso también hay cierta analogía con los cerebros parcialmente dañados).

Las redes neuronales tiene como campos de aplicación algunos como los siguientes:

- Reconocimiento de patrones de clasificación (Reconocimiento de voz, de caracteres manuscritos, análisis y reconocimiento de imágenes, formas, diagnóstico clínico, etc.)
- Análisis de series temporales y predicción (modelos meteorológicos, predicción del comportamiento, predicción de series temporales etc.).

Actualmente, el uso de redes neuronales se ha extendido bastante en el mercado de software doméstico, dejando de estar restringidas a los entornos de investigación y a las grandes empresas. De esta forma, se pueden encontrar modelos de redes neuronales en programas de reconocimiento de voz, en juegos de ordenador, programas de contabilidad, tutores, y muchos otros.

## Regresión logística lineal

En estadística, la regresión logística es un modelo de regresión para variables dependientes o de respuesta binomialmente distribuidas. Es útil para modelar la probabilidad de un evento ocurriendo como función de otros factores. Es un modelo lineal generalizado que usa como función de enlace la función logit.<sup>431</sup>

La regresión logística analiza datos distribuidos binomialmente de la forma expresada en la Figura 145

$$Y_i \sim B(p_i, n_i), \text{ para } i = 1, \dots, m_i$$

Figura 145: Expresión de los datos distribuidos binomialmente.

donde los números de ensayos Bernoulli  $n_i$  son conocidos y las probabilidades de éxito  $p_i$  son desconocidas. Un ejemplo de esta distribución es el porcentaje de semillas ( $p_i$ ) que germinan después de que  $n_i$  son plantadas.

El modelo es entonces obtenido a base de lo que cada ensayo (valor de  $i$ ) y el conjunto de variables explicativas/independientes puedan informar acerca de la probabilidad final. Estas variables explicativas pueden pensarse como un vector  $X_i$   $k$ -dimensional y el modelo toma entonces la forma de la Figura 146.

$$p_i = E \left( \frac{Y_i}{n_i} \middle| X_i \right).$$

Figura 146: Expresión del modelo.

431 Contenidos extraídos de “[http://es.wikipedia.org/wiki/Regresión\\_logística](http://es.wikipedia.org/wiki/Regresión_logística)” y consultados en fecha 3/02/2012.

Los logits de las probabilidades binomiales desconocidas (*i.e.*, los logaritmos de los odds) son modeladas como una función lineal de los  $X_i$  como en la Figura 147.

$$\text{logit}(p_i) = \ln\left(\frac{p_i}{1-p_i}\right) = \beta_0 + \beta_1 x_{1,i} + \dots + \beta_k x_{k,i}.$$

Figura 147: Expresión de la función lineal de los logaritmos de los odds.

La interpretación de los estimados del parámetro  $\beta_j$  es como los efectos aditivos en el log odds ratio para una unidad de cambio en la  $j$ -ésima variable explicativa. En el caso de una variable explicativa dicotómica, por ejemplo género,  $e^{\beta}$  es la estimación del odds ratio de tener el resultado para, por decir algo, hombres comparados con mujeres.

El modelo tiene una formulación equivalente a la de la Figura 148

$$p_i = \frac{1}{1 + e^{-(\beta_0 + \beta_1 x_{1,i} + \dots + \beta_k x_{k,i})}}.$$

Figura 148: Formulación del modelo.

Esta forma funcional es comúnmente identificada como un "perceptrón" de una capa simple o red neuronal artificial de una sola capa. Una red neuronal de una sola capa calcula una salida continua en lugar de una función por pedazos. La derivada de  $p_i$  con respecto a  $X = x_1 \dots x_k$  es calculada de la forma general de la Figura 149.

$$y' = \frac{1}{1 + e^{-f(X)}}$$

Figura 149: Expresión de la derivada de  $p_i$ .

donde  $f(X)$  es una función analítica en  $X$ . Con esta escogencia, la red de capa simple es idéntica al modelo de regresión logística. Esta función tiene una derivada continua, la cual permite ser usada en propagación hacia atrás. Esta función también es preferida pues su derivada es fácilmente calculable tal como muestra la Figura 150:

$$y' = y(1-y) \frac{df}{dX}$$

Figura 150: Expresión de la derivada de la función  $f(X)$ .

## Sibelius (editor de partituras)

Sibelius es un programa (informática) completo para escribir, ejecutar, imprimir y publicar partituras de música. Fue creado por la empresa Sibelius Software, actualmente comprado por Avid Technology. Está diseñado para toda clase de músicos, desde estudiantes y profesores hasta compositores profesionales.<sup>432</sup>

Sibelius permite trabajar con diferentes formatos de introducción de las notas, desde grabación con dispositivos MIDI a selección con el ratón. La versión 6 incorpora un nuevo formato de introducción mediante micrófono y el programa *Neuratron AudioScore*.

La versión 6 también incluye la función Live Tempo(r) con la que se puede controlar y grabar alteraciones de tempo en la partitura con objeto de poder utilizar el sonido en directo.

La colección de *plug-ins* es inmensa y permite hacer funciones avanzadas de edición y composición en muy pocos pasos.

<sup>432</sup> Contenidos extraídos de "[http://es.wikipedia.org/wiki/Sibelius\\_\(programa\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Sibelius_(programa))" y consultado en fecha 20/06/2012.

Cuenta también con el plug-in Scorch que permite publicar partituras en la web de forma que se puedan reproducir, imprimir o bajar.

Importa archivos en formato xml que permiten el intercambio con otros programas de notación musical aunque para exportar a .xml es necesario el plug-in Dolet for Sibelius de Recordare.

Además de crear páginas web, Sibelius puede exportar la partitura en formatos: MIDI, imagen (tiff, png, eps, bmp), audio (.wav).

Junto con el programa Finale, Sibelius es uno de los programas de notación musical más populares.

La última versión es la 7, del 1 de agosto de 2011. Puede correr en los sistemas operativos Microsoft Windows, Mac OS, Mac OS X y RISC OS.

Como otros programas de partituras, Sibelius permite escuchar lo que está escrito, mediante el uso del protocolo MIDI (utilizando la tarjeta de sonido de la computadora), y el uso de samplers VST basados en muestras de sonidos reales. También permite grabar esa ejecución en un CD de audio exportando un archivo wav desde el propio programa.

La presentación es simple, sin tantos menús y cajas de diálogo. Los paneles avanzados son flotantes y pueden moverse u ocultarse a necesidades del usuario. Las funciones básicas se encuentran en el menú Create/Crear que puede abrirse en cualquier lugar de la pantalla haciendo clic derecho y permite trabajar intuitivamente de manera similar a un compositor con lápiz y goma. Para visionar la partitura en pantalla se puede escoger incluso entre diferentes colores y texturas de papel. Las herramientas se muestran en una barra en la parte superior de la pantalla.

## **SMO algoritmos**

Los algoritmos SMO son un caso concreto de los algoritmos SVM. En diversas áreas de la informática teórica y práctica, la tarea de la clasificación emerge como un problema recurrente, ya sea para actividades cotidianas, como filtrado automático de correo basura, o para situaciones más cruciales, como la identificación de tumores en el cuerpo de pacientes, pasando por usos prácticos de biometría (reconocimiento retinal, de huellas digitales o facial), clasificación en textos (clasificación de documentos o reconocimiento de símbolos), entre otros.

En todos estos casos, se trata de identificar a qué clase pertenece un elemento dado a partir de sus características medibles o categorizables.

Existen varios enfoques que abordan este tipo de problemas, siendo uno de ellos las máquinas de aprendizaje con aprendizaje supervisado. La idea principal detrás de estas técnicas es utilizar la información provista por un conjunto de datos (llamado conjunto de entrenamiento) para generar funciones de decisión capaces de clasificar automáticamente cada dato en las distintas categorías que contiene el problema.

Los ejemplos que contiene el conjunto de entrenamiento tienen la particularidad de que han sido previamente etiquetados con la clase a la cual pertenecen, por lo que la máquina de aprendizaje puede evaluar cuántos ejemplos clasificó bien y cuántos clasificó mal y así corregir la función de clasificación para generar una mejor. Este proceso de verificación y corrección en base a ejemplos etiquetados es el que denomina que la máquina sea de aprendizaje supervisado.<sup>433</sup>

La estructura general de un algoritmo SMO abarca los siguientes componentes:

- un criterio de término para determinar eficientemente cuando se ha llegado a una solución óptima o cercana a la óptima (dentro de un margen preestablecido).

---

433 Contenido extraído de “<http://www.alumnos.inf.utfsm.cl/~dcontard/tesis.pdf>” y consultado en fecha 2/12/2011.

- Un paso de optimización (usualmente) analítico para calcular los nuevos valores de dos multiplicadores de Lagrange.
- una estrategia de selección (heurística o no) para elegir a los dos multiplicadores de Lagrange a ser optimizados; un sistema de actualización que eficientemente actualice los valores involucrados en la selección y optimización de los dos multiplicadores de Lagrange.

Todos estos componentes son organizados y utilizados en un algoritmo.

## ***Spiral Array Model***

En la teoría de la musical el modelo de vectores en espiral es un tipo de espacio de tono extendido. Representa la percepción humana del tono, los acordes y la tonalidad en el mismo espacio geométrico como un modelo matemático formado por hélices concéntricas (un vector de espirales). Fue propuesto por Elaine Chew en su tesis doctoral en 2000 "*Toward a Mathematical Model of Tonality*".<sup>434</sup>

El modelo *Spiral Array Model* puede verse como una extensión de tonnez el cual sitúa los tonos en una estructura bidimensional enrejada. Como el tonnez, este modelo sitúa los elementos de mayor complejidad como los acordes y tonalidades así como las estructuras de bajo nivel (tonos) en el mismo espacio. Ello permite al modelo generar interpretaciones geométricas y relaciones entre elementos de bajo y alto nivel. Por ejemplo, se puede medir la distancia entre una nota concreta y una tonalidad concreta (ambos representados como puntos).

### Estructura del modelo

El modelo incluye tonos básicos, acordes mayores, menores, tonalidades mayores y menores comprimidos en cinco hélices concéntricas. Empezando con una definición de la espiral interior de tonos (o notas) están generadas por una combinación convexa de puntos sobre las espirales exteriores. Do, Mi y Sol, son representaciones de puntos por medio de las coordenadas cartesianas  $DO(x,y,z)$ ,  $Mi(x,y,z)$  y  $SOL(x,y,z)$ . La figura formada por los tres puntos es un triángulo y representa el centro del efecto de las tres notas. Esta figura triangular, representa el acorde o triada de Do Mayor (CEG en notación musical inglesa). En el nivel superior, la tonalidad de Do Mayor será el centro del triángulo de las triadas de Do Mayor, Fa Mayor y Sol Mayor (grados I, IV y V) de la tonalidad de Do Mayor.

1. La hélice exterior representa notas, una secuencia de 12 semitonos, o *pitch classes* representando la escala cromática. Cada semitono se sitúa una rotación de  $90^\circ$  de su predecesor. El orden de los semitonos viene determinado por el ciclo de quintas, es decir, el vecino más próximo en la hélice es el situado una quinta ascendente. De este modo los vecinos más próximos a una nota son su quinta justa y su tercera mayor enfrente y encima de él.
2. Tomando cada triada consecutiva a lo largo de la hélice y proyectando sus centros de efecto se genera una segunda hélice dentro de la hélice de tonos la cual representa los acordes mayores.
3. De modo similar se crea la hélice de acordes menores.
4. La hélice de tonalidades mayores se crea por proyecciones de los acordes I, IV y V desde los puntos sobre el acorde mayor.
5. La hélice de tonalidades menores se crea de modo similar a partir de los acordes menores.

### Expresiones matemáticas

La espiral de tonos se representa en forma paramétrica según la Figura 151.

<sup>434</sup> Contenido extraído y traducido de "[http://en.wikipedia.org/wiki/Spiral\\_array\\_model](http://en.wikipedia.org/wiki/Spiral_array_model)" y consultado en fecha 15/12/2012.



$$P(k) = \begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ z_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r \sin(k \cdot \pi/2) \\ r \cos(k \cdot \pi/2) \\ kh \end{bmatrix}$$

Figura 151: Representación de la espiral de tonos.

Siendo  $k$  un valor entero que representa un semitono,  $r$  es el radio de la espiral y  $h$  es la altura de la espiral.

El acorde de Do Mayor ( $C_M$ ) se representa mediante la expresión de la Figura 152.

$$C_M(k) = w_1 \cdot P(k) + w_2 \cdot P(k+1) + w_3 \cdot P(k+4)$$

Figura 152: Representación del acorde de Do Mayor.

Siendo  $w_i$  pesos que indican cuanto de cerca está el centro de efecto de la tercera mayor y quinta justa del acorde. Generalmente en la música occidental, el mayor peso es para el acorde  $w_1$  seguido de la quinta  $w_2$  y de la tercera  $w_3$ . Dichos pesos cumplen las propiedades de la Figura 153.

$$w_1 \geq w_2 \geq w_3 > 0 \quad \sum_{i=1}^3 w_i = 1$$

Figura 153: Propiedades cumplidas por los pesos.

El acorde de Do menor  $C_m$  se representa con la expresión de la Figura 154.

$$C_m(k) = u_1 \cdot P(k) + u_2 \cdot P(k+1) + u_3 \cdot P(k-3)$$

Figura 154: Representación del acorde de Do menor.

Siendo  $u_i$  los pesos con una función similar a los del acorde mayor los cuales cumplen las propiedades de la Figura 155.

$$u_1 \geq u_2 \geq u_3 > 0 \quad \sum_{i=1}^3 u_i = 1$$

Figura 155: Propiedades cumplidas por los pesos.

La tonalidad mayor  $T_M$  se representa con la expresión de la Figura 156.

$$T_M(k) = W_1 \cdot P(k) + W_2 \cdot P(k+1) + W_3 \cdot P(k-1)$$

Figura 156: Expresión de una tonalidad Mayor

Siendo  $W_i$  los pesos similares a las expresiones anteriores para determinar lo cerca que están los acordes a una tonalidad determinada. Dichos pesos cumplen las propiedades de la Figura 157.

$$W_1 \geq W_2 \geq W_3 > 0 \quad \sum_{i=1}^3 W_i = 1$$

Figura 157: Expresión de los pesos.

La tonalidad mayor  $T_m$  se representa con la expresión de la Figura 158.

$$T_m(k) = U_1 \cdot C_M(k) + V_2 \cdot (\alpha \cdot C_M(k+1) + (1-\alpha) \cdot C_m(k+1)) + V_3 \cdot (\beta \cdot C_m(k-1) + (1-\beta) \cdot C_M(k-1))$$

Figura 158: Expresión matemática para identificar las coordenadas de una tonalidad Mayor.

Cumpliendo los valores  $V_i$ , alpha y beta las propiedades de la Figura 159.

$$V_1 \geq V_2 \geq V_3 > 0 \quad V_1 + V_2 + V_3 = 1 \quad 0 \geq \alpha \geq 1 \quad \beta \geq 1$$

Figura 159: Propiedades cumplidas por los pesos.

## Transformada de Fourier.

En matemática<sup>435</sup>, la transformada de Fourier es una aplicación que hace corresponder una función  $f$ , con valores complejos y definida en la recta, con otra función  $g$  definida por la expresión de la Figura 160:

$$g(\xi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) e^{-i\xi x} dx$$

Figura 160: Expresión de la Transformada de Fourier.

Siendo  $f$  igual  $L^1$ , o sea  $f$  tiene que ser una función integrable en el sentido de la integral de Lebesgue. El factor, que acompaña la integral en definición facilita el enunciado de algunos de los teoremas referentes a la transformada de Fourier. Aunque esta forma de normalizar la transformada de Fourier es la más comúnmente adoptada, no es universal. En la práctica las variables  $x$  y  $\xi$  suelen estar asociadas a dimensiones (como el espacio -metros-, frecuencia -segundos<sup>-1</sup>-,...) y entonces es correcto utilizar la expresión de la Figura 161:

$$g(\xi) = \sqrt{\frac{\beta}{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) e^{-i\beta\xi x} dx$$

Figura 161: Expresión alternativa de la Transformada de Fourier.

De este modo la constante beta cancela las dimensiones asociadas a las variables obteniendo un exponente adimensional.

La transformada de Fourier así definida goza de una serie de propiedades de continuidad que garantizan que puede extenderse a espacios de funciones mayores e incluso a espacios de funciones generalizadas.

Además, tiene una multitud de aplicaciones en muchas áreas de la ciencia e ingeniería: la física, la teoría de los números, la combinatoria, el procesamiento de señales (electrónica), la teoría de la probabilidad, la estadística, la óptica, la propagación de ondas y otras áreas. En procesamiento de señales la transformada de Fourier suele considerarse como la descomposición de una señal en componentes de frecuencias diferentes, es decir,  $g$  corresponde al espectro de frecuencias de la señal  $f$ .

La rama de la matemática que estudia la transformada de Fourier y sus generalizaciones es denominada análisis armónico.

La transformada de Fourier es una aplicación lineal, por lo tanto cumple las siguientes propiedades para una función totalmente integrable es decir: cambio de escala, traslación, traslación en la variable transformada, Transformada de la derivada: Si  $f$  y su derivada son integrables, Derivada de la transformada: Si  $f$  y  $t \rightarrow f(t)$  son integrables, la transformada de Fourier  $F(f)$  es diferenciable

Para el ámbito de estudio de esta tesis doctoral es decir la ingeniería informática, la transformada de Fourier se utiliza para pasar al dominio de la frecuencia una señal para así obtener información

435 Contenido extraído de "[http://es.wikipedia.org/wiki/Transformada\\_de\\_Fourier](http://es.wikipedia.org/wiki/Transformada_de_Fourier)" y consultado en fecha 7/12/2011

que no es evidente en el dominio temporal. Por ejemplo, es más fácil saber sobre qué ancho de banda se concentra la energía de una señal analizándola en el dominio de la frecuencia.

También sirve para resolver ecuaciones diferenciales con mayor facilidad y, por consiguiente, se usa para el diseño de controladores clásicos de sistemas realimentados si conocemos la densidad espectral de un sistema y la entrada podemos conocer la densidad espectral de la salida. Esto es muy útil para el diseño de filtros de radiotransistores.

La transformada de Fourier también se utiliza en el ámbito del tratamiento digital de imágenes, como por ejemplo para mejorar o definir más ciertas zonas de una imagen fotográfica o tomada con un ordenador.

Concretamente en ingeniería se utiliza la Transformada de Fourier discreta (DFT)

En matemáticas, la transformada discreta de Fourier o DFT (del inglés, *Discrete Fourier transform*) es un tipo de transformada discreta utilizada en el análisis de Fourier. Transforma una función matemática en otra, obteniendo una representación en el dominio de la frecuencia, siendo la función original una función en el dominio del tiempo. Pero la DFT requiere que la función de entrada sea una secuencia discreta y de duración finita. Dichas secuencias se suelen generar a partir del muestreo de una función continua, como puede ser la voz humana. Al contrario que la transformada de Fourier en tiempo discreto (DTFT), esta transformación únicamente evalúa suficientes componentes frecuenciales para reconstruir el segmento finito que se analiza. Utilizar la DFT implica que el segmento que se analiza es un único período de una señal periódica que se extiende de forma infinita; si esto no se cumple, se debe utilizar una ventana para reducir los espurios del espectro. Por la misma razón, la DFT inversa (IDFT) no puede reproducir el dominio del tiempo completo, a no ser que la entrada sea periódica indefinidamente. Por estas razones, se dice que la DFT es una transformada de Fourier para análisis de señales de tiempo discreto y dominio finito. Las funciones sinusoidales base que surgen de la descomposición tienen las mismas propiedades.

La entrada de la DFT es una secuencia finita de números reales o complejos, de modo que es ideal para procesar información almacenada en soportes digitales. En particular, la DFT se utiliza comúnmente en procesamiento digital de señales y otros campos relacionados dedicados a analizar las frecuencias que contiene una señal muestreada, también para resolver ecuaciones diferenciales parciales, y para llevar a cabo operaciones como convoluciones o multiplicaciones de enteros largos. Un factor muy importante para este tipo de aplicaciones es que la DFT puede ser calculada de forma eficiente en la práctica utilizando el algoritmo de la transformada rápida de Fourier o FFT (*Fast Fourier Transform*).

Los algoritmos FFT se utilizan tan habitualmente para calcular DFTs que el término "FFT" muchas veces se utiliza en lugar de "DFT" en lenguaje coloquial. Formalmente, hay una diferencia clara: "DFT" hace alusión a una transformación o función matemática, independientemente de cómo se calcule, mientras que "FFT" se refiere a una familia específica de algoritmos para calcular DFTs.

La secuencia de  $N$  números complejos  $x_0, \dots, x_{N-1}$  se transforma en la secuencia de  $N$  números complejos  $X_0, \dots, X_{N-1}$  mediante la DFT con la expresión de la Figura 162:

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-\frac{2\pi i}{N} kn} \quad k = 0, \dots, N - 1$$

Figura 162: Expresión de la DFT.

Siendo  $i$  la unidad imaginaria y  $e^{\frac{2\pi i}{N}}$  es la  $N$ -ésima raíz de la unidad. (Esta expresión se puede escribir también en términos de una matriz DFT; cuando se escala de forma apropiada se convierte

en una matriz unitaria y  $X_k$  puede entonces ser interpretado como los coeficientes de  $x$  en una base ortonormal.)

La transformada se denota a veces por el símbolo  $\mathcal{F}$ , igual que en  $\mathbf{X} = \mathcal{F}\{\mathbf{x}\}$  o  $\mathcal{F}(\mathbf{x})$  o  $\mathcal{F}\mathbf{x}$ .

La transformada inversa de Fourier discreta (IDFT) viene dada por

$$x_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{\frac{2\pi i}{N} kn} \quad n = 0, \dots, N-1.$$

Figura 163: Expresión de la transformada inversa de Fourier discreta.

Las propiedades que cumple la DFT son la completitud, ortogonalidad, los teoremas de Plancherel y Parseval, periodicidad, el teorema del desplazamiento, el teorema de la convolución circular y teorema de la correlación cruzada, la dualidad del teorema de la convolución y el Polinomio de interpolación trigonométrica.

## Weka entorno de análisis

Weka (*Waikato Environment for Knowledge Analysis* - Entorno para Análisis del Conocimiento de la Universidad de Waikato) es una plataforma de software para aprendizaje automático y minería de datos escrito en Java y desarrollado en la Universidad de Waikato. Weka es un software libre distribuido bajo licencia GNU-GPL.<sup>436</sup>

El paquete Weka contiene una colección de herramientas de visualización y algoritmos para análisis de datos y modelado predictivo, unidos a una interfaz gráfica de usuario para acceder fácilmente a sus funcionalidades. La versión original de Weka fue un *front-end* en TCL/TK para modelar algoritmos implementados en otros lenguajes de programación, más unas utilidades para preprocesamiento de datos desarrolladas en para hacer experimentos de aprendizaje automático. Esta versión original se diseñó inicialmente como herramienta para analizar datos procedentes del dominio de la agricultura, pero la versión más reciente basada en Java (WEKA 3), que empezó a desarrollarse en 1997, se utiliza en muchas y muy diferentes áreas, en particular con finalidades docentes y de investigación.

Los aspectos que hacen de Weka una gran aplicación son:

- Disponible libremente bajo la licencia pública general de GNU.
- Muy portable porque está completamente implementado en Java y puede correr en casi cualquier plataforma.
- Contiene una extensa colección de técnicas para preprocesamiento de datos y modelado.
- Fácil de utilizar por un principiante gracias a su interfaz gráfica de usuario.

Weka soporta varias tareas estándar de minería de datos, especialmente, preprocesamiento de datos, *clustering*, clasificación, regresión, visualización, y selección. Todas las técnicas de Weka se fundamentan en la asunción de que los datos están disponibles en un fichero plano (*flat file*) o una relación, en la que cada registro de datos está descrito por un número fijo de atributos (normalmente numéricos o nominales, aunque también se soportan otros tipos). Weka también proporciona acceso a bases de datos vía SQL gracias a la conexión JDBC (*Java Database Connectivity*) y puede procesar el resultado devuelto por una consulta hecha a la base de datos. No puede realizar minería

---

<sup>436</sup> Contenido extraído de “[http://es.wikipedia.org/wiki/Weka\\_\(aprendizaje\\_automático\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Weka_(aprendizaje_automático))” y consultado en fecha 5/02/2012.

de datos multi-relacional, pero existen aplicaciones que pueden convertir una colección de tablas relacionadas de una base de datos en una única tabla que ya puede ser procesada con Weka.

Un área importante que actualmente no cubren los algoritmos incluidos en Weka es el modelado de secuencias.

## Anexo 3 – Conceptos asociados al estándar MIDI

En este Anexo se resumirán las principales características del estándar MIDI prestando especial atención a las características lógicas de los mensajes omitiendo incidir en los detalles que han sido inocuos en el desarrollo de la aplicación AN\_MIDv5.1

MIDI son las siglas de *Musical Instrument Digital Interface* (Interfaz Digital de Instrumentos Musicales). Se trata de un protocolo industrial estándar que permita a los ordenadores, sintetizadores, secuenciadores, controladores y otros dispositivos musicales electrónicos comunicarse y compartir información para la generación de sonidos.

Esta información define diversos tipos de datos con nombres que pueden corresponder a notas particulares, nombres de *patches* de sintetizadores o valores de controladores (codificación numérica de los diferentes timbres que puede generar un sintetizador). Gracias a esta simplicidad, los datos pueden ser interpretados de diferentes maneras y utilizados con fines diferentes a la música. El protocolo incluye especificaciones complementarias de *hardware* y *software*.

### Introducción

[111], [112], [113], [114], [115] y [100]

La aparición del sintetizador digital a finales de la década de 1970 trajo consigo el problema de la incompatibilidad de los sistemas que usaba cada compañía fabricante. De este modo se hacía necesario crear un lenguaje común por encima de los parámetros que cada marca iba generando a lo largo del desarrollo de los distintos instrumentos electrónicos puestos a disposición de los profesionales del sector.

El estándar MIDI fue inicialmente propuesto en un documento dirigido a la *Audio Engineering Society* por *Dave Smith*, presidente de la compañía *Sequential Circuits* en 1981. La primera especificación MIDI se publicó en agosto de 1983.

Cabe aclarar que MIDI no transmite señales de audio, sino datos de eventos y mensajes controladores que se pueden interpretar de manera arbitraria, de acuerdo con la programación del dispositivo que los recibe. Es decir, MIDI es una especie de "partitura" que contiene las instrucciones en valores numéricos (0-127) sobre cuándo generar cada nota de sonido y las características que debe tener; el aparato al que se envíe dicha partitura la transformará en música completamente audible.

El estándar MIDI utiliza hasta 16 canales diferentes simultáneamente (también llamados voces, o instrumentos); Cada canal tendrá identificado previamente un timbre (flauta, violín, piano, clavecín, etc.), y todo el material sonoro enviado a él será reproducido con dicho timbre. Generalmente secuenciando obras clásicas, cada instrumento se asigna a un canal diferente.

En el caso de procesar partituras para piano, el material musical estará almacenado en un único canal MIDI o como máximo en 2 canales (material de la mano izquierda y derecha respectivamente). El programa está diseñado para identificar con un alto grado de fiabilidad las líneas melódicas e identificar correctamente los intervalos melódicos detectados.

### Especificaciones físicas (Hardware).

Buena parte de los dispositivos MIDI son capaces de enviar y recibir información, pero desempeñan un papel diferente dependiendo de si están recibiendo o enviando información. El

dispositivo que envía los mensajes de activación se denomina “Maestro” (del inglés *master*) y el que responde a dicha información “Esclavo” (del inglés *slave*).

Los dispositivos MIDI se pueden clasificar en tres categorías:

### Controladores

Generan los mensajes MIDI (activación o desactivación de una nota, variaciones de tono, etc.). El controlador más familiar a los músicos tiene forma de teclado de piano, al ser este instrumento el más utilizado a la hora de componer e interpretar las obras orquestales, sin embargo, hoy en día se han construido todo tipo de instrumentos con capacidad de transmisión vía interfaz MIDI: guitarras, parches de percusión (baterías), clarinetes electrónicos, incluso gaitas MIDI.

En la Tabla 103 se han recopilado fotografías de algunos de estos instrumentos:



Flauta



Clarinete



Controlador de viento<sup>437</sup>



Violín



Pedalier<sup>438</sup>



Guitarra

<sup>437</sup> Un controlador de viento permite enviar códigos MIDI de selección de timbres con lo que se puede conseguir que el controlador de viento suene como cualquier instrumento de viento incluido en la lista de timbres del estándar (flauta, clarinete, fagot, ...).

<sup>438</sup> El *Pedalier* es utilizado por los organistas para añadir el tercer teclado que tienen los órganos clásicos.



Batería



Airpiano<sup>439</sup>

Tabla 103: Imágenes de diferentes controladores MIDI.

### Unidades generadoras de sonido.

También conocidas como módulos de sonido, reciben los mensajes MIDI y los transforman en señales sonoras (recordemos que MIDI no transmite audio, sino paquetes de órdenes en formato numérico).

Los generadores los podemos clasificar en tres tipos dependiendo de las 2 técnicas utilizadas (muestreo o generación electrónica de señal audible).

#### **Samplers.**

Almacenan digitalmente muestras de sonido de todas las notas con sus expresiones que no puedan ser sintetizadas matemáticamente. A grandes rasgos, es un dispositivo de memoria que cuando reciben la orden de generar un sonido a partir de un mensaje MIDI lo busca en su memoria y lo reproduce originalmente en el canal de salida de audio. Suelen ser la solución más cara.

#### **Sintetizadores.**

Tienen programadas funciones matemáticas para cada instrumento MIDI  $y = f(t, \dots)$  que generan electrónicamente todo el abanico de notas y expresiones generables por cada uno de los 127 programas (o timbres) del estándar MIDI (más los que el fabricante haya incluido). Cuando reciben un mensaje de generación de nota con un timbre (o programa en terminología MIDI) lo generan electrónicamente a partir de la función programada en su electrónica.

#### **Samplers/Sintetizadores.**

Son soluciones intermedias que utilizan las ventajas de las dos opciones anteriores.

Hay determinados instrumentos o timbres (tales como el piano el clavecín o el clarinete) que son fácilmente reproducibles electrónicamente porque es fácil obtener su onda sonora a partir de métodos matemáticos. Estos timbres generados por un sintetizador son de una calidad aceptable pero su calidad sonora es inaceptable en instrumentos tales como el violín o la viola si queremos obtener un resultado de una calidad aceptable.

El hecho de no poder reproducir electrónicamente la onda sonora del timbre de un violín o un instrumento de cuerda frotada en general (generalmente debido a su riqueza de armónicos), es el que generó el desarrollo de los *Samplers* que lo único que hacen es almacenar una muestra sonora de cada nota de cada instrumento en sus diferentes modos de ser interpretada.

---

439 El *Airpiano* es un instrumento que no tiene correspondencia con ningún instrumento tradicional. Detecta la proximidad de una fuente de calor como los dedos y genera los mensajes MIDI correspondientes para ser enviados a un generador de sonido el cual convertirá el mensaje MIDI a una nota musical.



La solución *Sampler/Sintetizador* almacena muestras de una parte de las notas de cada timbre o programa MIDI (una nota de cada octava) y genera las demás por modificación de frecuencia mediante electrónica. Por este motivo las consideramos como una solución que integra los dos conceptos de generación de sonido.

### Secuenciadores.

Son aparatos destinados a grabar, reproducir o editar mensajes MIDI. Pueden desarrollarse bien en formato hardware, bien como software de computadora, o bien incorporados en un sintetizador.

Estos son los tres grandes tipos de dispositivos MIDI. Aun así, podemos encontrar en el mercado aparatos que reúnen dos o tres de las funciones descritas. Por ejemplo, los órganos electrónicos disponen de un controlador (el propio teclado) y una unidad generadora de sonido, algunos modelos también incluyen un secuenciador.

## **Cables y conectores**

Un cable MIDI utiliza un conector del tipo DIN de 5 pines o contactos (ver Figura 165). La transmisión de datos sólo utiliza el número 5. Los números 1 y 3 se reservaron para añadir funciones en un futuro. Los restantes (2 y 4) se utilizan-respectivamente-como blindaje y para transmitir una tensión de +5 voltios, para asegurarse de que la electricidad fluya en la dirección deseada.



Figura 164: Conectores MIDI.

La finalidad del cable MIDI es la de permitir la transmisión de los datos entre dos dispositivos o instrumentos electrónicos.

En la actualidad, los fabricantes de equipos económicos, y por ello muy populares, tales como Casio, Korg y Roland han previsto la sustitución de los cables y conectores MIDI estándar, los del tipo USB que son más económicos y permiten una fácil conexión a los ordenadores personales.

### Conexiones

El funcionamiento MIDI es de tipo simplex, es decir, sólo puede transmitir señales en un sentido. La dirección que toman las señales es siempre desde un dispositivo 'maestro' hacia un dispositivo 'esclavo'. El primero genera la información y el segundo la recibe.

Para entender bien el sistema de conexión, debemos saber que en un aparato MIDI puede haber hasta tres conectores (ver Figura 165):

- *MIDI OUT*: Conector del cual salen los mensajes generados por el dispositivo maestro.
- *MIDI IN*: Se utiliza para introducir mensajes en el dispositivo esclavo.
- *MIDI THRU*: También es un conector de salida, pero en este caso se envía una copia exacta de los mensajes que entren por el puerto MIDI IN.

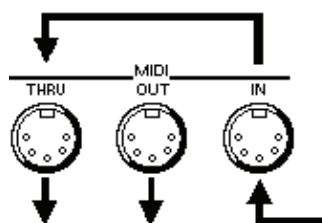


Figura 165: Conexiones físicas del estándar MIDI.

El formato más simple de conexión es el formado por un dispositivo maestro (por ejemplo, un controlador) y un esclavo (como un sintetizador) tal como muestra la Figura 166. En este caso, el maestro dispondrá de un conector MIDI OUT, desde el cual se enviarán los mensajes MIDI generados, el cual deberemos unir al conector MIDI IN en el dispositivo esclavo.



Figura 166: Conexión de un controlador MIDI a un generador de sonido.

MIDI permite la conexión de un único dispositivo maestro a varios dispositivos esclavos en cadena. Para estos casos se utilizará el conector MIDI THRU, uniendo el maestro con una de las unidades del modo descrito anteriormente. En el conector MIDI Thru de esta unidad se obtiene una copia de los mensajes MIDI que se introducen a través de MIDI IN, por lo que este MIDI THRU se conectará con MIDI IN de otra de las unidades tal como muestra la Figura 168.



Figura 167: Esquema de conexión de un controlador a un secuenciador y a dos generadores de sonido..

Si se dispone de un dispositivo secuenciador (capaz de almacenar y reproducir información MIDI recibida), se conectará entre el controlador y la primera unidad generadora de sonido. En este

caso, el secuenciador dispondrá de conectores MIDI OUT y MIDI IN tal como muestra la Figura 167.



Figura 168: Esquema de conexión de un controlador a dos generadores de sonido

A pesar de que existe la posibilidad de la conexión en cadena de varios dispositivos MIDI, debe decirse que existe una limitación. Las características eléctricas de los conectores MIDI hacen la señal proclive a la degradación, por lo que son pocos los aparatos que se pueden conectar en cadena antes de notar pérdidas de datos apreciables.

## Especificaciones lógicas.

### Bytes MIDI

El byte MIDI, a diferencia de los bytes estándar de ocho bits de las computadoras, está compuesto por diez bits. El primero es el bit de inicio (*start bit*, que siempre es 0) y el último el bit de terminación (*stop bit* que siempre es 1). Esto con el fin de que los dispositivos MIDI puedan llevar el cómputo de cuántos bytes se han enviado o recibido. Los ocho bits restantes contienen los mensajes MIDI.

Existen dos tipos de bytes: De estado (*status byte*) y de información (*data byte*). Se diferencian por el primer bit: si es 1, tenemos un byte de estado, y si es un 0, es un byte de datos.

Al generar un mensaje MIDI, por norma general, siempre enviamos un byte de estado, que puede estar seguido de cierta cantidad de bytes de datos. Por ejemplo, podemos enviar un primer mensaje de estado "activar nota", seguido de un byte de datos informado qué nota es la que se activa. En algunas ocasiones y según el dispositivo MIDI que se trate, puede ocurrir que se deprecie el *status byte* si es idéntico al anterior. Por ejemplo, si tocamos la tecla do de un piano se mandaría:

- 1001xxxx (*note on*)
- 00111100 (valor 64 que corresponde a la nota Do)
- 0xxxxxxx (la velocidad con la cual haya sido pulsada la tecla)

Pero al liberarla, puede omitirse el byte status y silenciarla por volumen (otra posibilidad es que se utilizara el 1000xxxx (note off) para desactivarla o silenciarla). Es decir transmitiría sólo los dos siguientes bytes:

- 00111100 (valor 64 que corresponde a la nota Do)
- 00000000 (la velocidad cero, que indica que debe dejar de sonar esta nota)

Omitiendo así el *status byte*. Es más, si nuevamente pulsamos la tecla Do, volvería a omitir el *status byte*.

A su vez, los mensajes de estado se dividen en dos grupos: mensajes de canal y mensajes de sistema.

Los mensajes de canal se envían a un dispositivo específico, mientras que los mensajes de sistema son recibidos por todos los equipos.

En la Tabla 104 se muestran todos los mensajes disponibles.

Byte de estado	Descripción	Byte de estado	Descripción
1000cccc	Desactivación de nota	11110100	<i>Indefinido</i>
1001cccc	Activación de nota	11110101	<i>Indefinido</i>
1010cccc	Postpulsación polifónica	11110110	Requerimiento de entonación
1011cccc	Cambio de control	11110111	Fin de mensaje exclusivo
1100cccc	Cambio de programa	11111000	Reloj de temporización
1101cccc	Postpulsación monofónica de canal	11111001	<i>Indefinido</i>
1110cccc	Pitch	11111010	Inicio
11110000	Mensaje exclusivo del fabricante	11111011	Continuación
11110001	Mensaje de trama temporal	11111100	Parada
11110010	Puntero de posición de canción	11111101	<i>Indefinido</i>
11110011	Selección de canción	11111110	Espera activa
		11111111	Reinicio del sistema

Tabla 104: Codificación binaria de mensajes MIDI.

Los primeros bytes, cuyos últimos cuatro bits están marcados como "CCCC", se refieren a mensajes de canal, el resto de bytes son mensajes de sistema (con resultado a todos los canales).

Antes de explicar más detalladamente las características de algunos de los mensajes, es imprescindible conocer dos importantes características de MIDI: los canales y los instrumentos (*patches*).

### Canales MIDI (*tracks*)

Como se comentó con anterioridad, el estándar MIDI está pensado para comunicar un único controlador con varias unidades generadoras de sonido (cada una de las cuales puede tener uno o varios instrumentos sintetizados que deseemos utilizar), todo por un mismo medio de transmisión. Es decir, todos los aparatos conectados a la cadena MIDI reciben todos los mensajes generados desde el controlador. Esto hace necesario un método para diferenciar cada uno de los instrumentos. Este método es el denominado canal.

MIDI puede direccionar hasta 16 canales (también llamados voces, o instrumentos), por lo que al instalar el sistema MIDI será necesario asignar un número de canal para cada dispositivo.

A pesar de que la definición anterior es técnicamente correcta, se añadiría comentar que no utilizaremos un canal para cada instrumento sino que se utilizan para todos los instrumentos que tienen el mismo timbre, es decir, el violín primero y el violín segundo de una orquesta o cuarteto de cuerda los asignaremos los dos a un mismo canal ya que tienen el mismo timbre.

### Instrumentos MIDI

La Tabla 105 resume los 128 instrumentos de la especificación estándar MIDI, también conocidos como GM o "General Midi"

00 - Piano de cola acústico	64 - Saxofón soprano
01 - Piano acústico brillante	65 - Saxofón alto
02 - Piano de cola eléctrico	66 - Saxofón tenor
03 - Piano de cantina	67 - Saxofón barítono
04 - Piano Rhodes	68 - Oboe
05 - Piano con "chorus"	69 - Corno inglés
06 - Clavicordio / Clave	70 - Fagot
07 - Clavinete	71 - Clarinete
08 - Celesta	72 - Flautín
09 - Carillón	73 - Flauta
10 - Caja de música	74 - Flauta dulce
11 - Vibráfono	75 - Flauta de pan
12 - Marimba	76 - Cuello de botella
13 - Xilófono	77 - Shakuhachi (flauta japonesa)
14 - Campanas tubulares	78 - Silbato
15 - Salterio	79 - Ocarina
16 - Órgano <i>Hammond</i>	80 - Melodía 1 (onda cuadrada)
17 - Órgano percusivo	81 - Melodía 2 (diente de sierra)
18 - Órgano de rock	82 - Melodía 3 (órgano de vapor)
19 - Órgano de iglesia	83 - Melodía 4 (seseo órgano)
20 - Armonio	84 - Melodía 5 (charanga)
21 - Acordeón	85 - Melodía 6 (voz)
22 - Armónica	86 - Melodía 7 (quintas)
23 - Bandoneón	87 - Melodía 8 (bajo y melodías)
24 - Guitarra española	88 - Fondo 1 (nueva era)
25 - Guitarra acústica	89 - Fondo 2 (cálido)
26 - Guitarra eléctrica (jazz)	90 - Fondo 3 (poli-sintetizador)
27 - Guitarra eléctrica (limpia)	91 - Fondo 4 (coro)
28 - Guitarra eléctrica (apagada)	92 - Fondo 5 (de arco)
29 - Guitarra saturada ( <i>overdrive</i> )	93 - Fondo 6 (metálico)
30 - Guitarra distorsionada	94 - Fondo 7 (celestial)
31 - Armónicos de guitarra	95 - Fondo 8 (escobillas)
32 - Bajo acústico	96 - Efecto 1 (lluvia)
33 - Bajo eléctrico presionado	97 - Efecto 2 (banda sonora)
34 - Bajo eléctrico punteado	98 - Efecto 3 (cristales)
35 - Bajo sin trastes	99 - Efecto 4 (atmósfera)
36 - Bajo golpeado 1	100 Efecto 5 (brillo)
37 - Bajo golpeado 2	101 Efecto 6 (hojas)
38 - Bajo sintetizado 1	102 Efecto 7 (ecos)
39 - Bajo sintetizado 2	103 Efecto 8 (ciencia ficción)
40 - Violín	104 Sitar
41 - Viola	105 Banjo
42 - Violonchelo	106 Shamisen
43 - Contrabajo	107 Koto

44 – Trémolo de cuerdas	108 Kalimba
45 – <i>Pizzicato</i> de cuerdas	109 Gaita
46 - Arpa	110 Violín celta
47 - Timbales	111 <i>Shanai</i>
48 - Conjunto de cuerda 1	112 Campanillas
49 - Conjunto de cuerda 2	113 Agogó
50 - Cuerdas sintetizadas 1	114 Cajas metálicas
51 - Cuerdas sintetizadas 2	115 Caja de madera
52 - Coro Aahs	116 Caja Taiko
53 - Voz Oohs	117 Timbal melódico
54 - Voz sintetizada	118 Caja sintetizada
55 - Éxito de orquesta	119 Platillos invertidos
56 - Trompeta	120 Rasgado de guitarra
57 - Trombón	121 Sonido de respiración
58 - Tuba	122 Playa
59 - Trompeta con sordina	123 canto de pájaro
60 - Corno francés (trompa)	124 Timbre de teléfono
61 - Sección de bronce	125 Helicóptero
62 - Bronces sintetizados 1	126 Aplausos
63 - Bronces sintetizados 2	127 Disparo de fusil

Tabla 105: Instrumentos o timbres disponibles según el estándar General MIDI con su codificación.

## Codificación de la duración.

Las especificaciones detalladas en los apartados anteriores del Anexo no eran suficientes para desarrollar la herramienta AN\_MIDv5.1, ya que no existe ningún tipo de información relacionada con la duración de las notas en la documentación oficial del estándar MIDI.

Es decir, las especificaciones MIDI definen el lenguaje en tiempo real, es decir, cómo se codifica la información cuando se envía por un cable MIDI, pero no especifica cómo se almacena y codifica la información de las duraciones de todas las notas en un fichero para ser ejecutadas con posterioridad por un secuenciador<sup>440</sup>.

El estándar *MIDI file format*<sup>441</sup> codifica las duraciones de las notas del siguiente modo.

En un archivo MIDI, entre un mensaje y el siguiente, hay un código de duración que separa ambos mensajes y representa el tiempo que debe transcurrir entre los dos mensajes, es decir, el tiempo que debe transcurrir desde que se ha ejecutado el primero y se ejecutará el segundo.

Se reservan hasta 4 bytes para codificar la duración (como mínimo tiene que haber 1).

De estos bytes que almacenan la duración sólo se utilizan los 7 menos significativos ya que lo más significativo se utiliza para identificar el último byte de duración. De esta manera, el estándar permite identificar en el fichero cuántos bytes componen cada código de duración. Se utiliza como bit más significativo de cada byte del código de duración el valor 1 para los primeros bytes y 0 para el último.

La Figura 169 muestra dos códigos de duración de 2 y 3 bytes respectivamente así como el proceso de extracción de la duración exacta (medida en pulsos o *MIDI ticks*).

440 Un secuenciador es una aplicación que permite tratar material MIDI tanto a bajo nivel como a nivel musical, es decir con un editor de partituras. Los más conocidos son en la actualidad QBase del fabricante Steinberg y Logic.

441 Información extraída de: "<http://253.ccarh.org/handout/smf/>" y "<http://www.midi.org/techspecs/smf.php>"

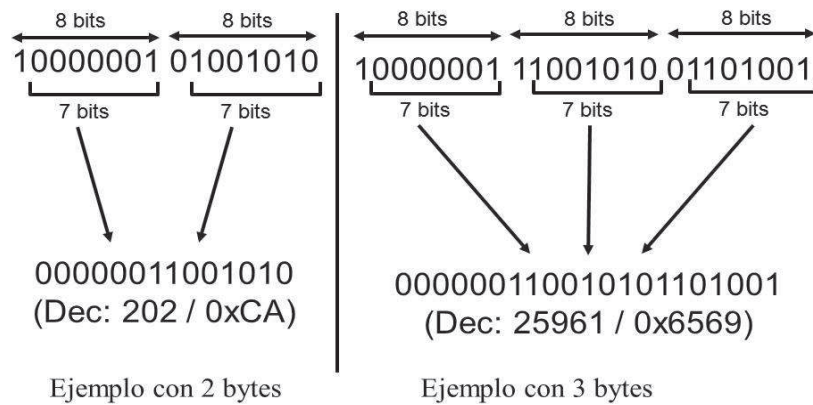


Figura 169: Códigos de duración de 2 y 3 bytes así como el proceso de extracción de la duración exacta (medida en MIDI ticks).

Se define en la Tabla 106 la relación entre los códigos de duración de la notación musical tradicional y el número teórico de MIDI ticks.

Nombre según la notación musical tradicional	Pulsos de notación musical	MIDI ticks teóricos.	Grafía según la notación musical
Cuadrada	8	8192	
Redonda	4	4096	
Blanca	2	2048	
Negra	1	1024	
Corchea	1/2	512	
Semicorchea	1/4	256	
Fusa	1/8	128	

Tabla 106: Relación entre duraciones de la notación musical tradicional y el número teórico de MIDI ticks.

Como se puede comprobar en esta tabla, las duraciones en la notación musical tradicional están más discretizadas que en el formato MIDI ya que el formato MIDI permite construir una nota de duración mínima de 1/64 de semifusa.

Por otra parte, la notación musical tradicional permite construir valores intermedios añadiendo puntillos en las notas, ligaduras, tresillos. Pero nunca tantos como permite el formato MIDI, tengamos en cuenta que media semifusa corresponde a 32 pulsos básicos (o *MIDI ticks*).

## Especificaciones del formato de fichero MIDI.

Toda la información detallada anteriormente en este anexo está relacionada con la codificación de las señales MIDI cuando estas se intercambian entre dispositivos MIDI en tiempo real. Sin

embargo existen otras especificaciones de compresión necesaria para poder procesar ficheros MIDI (en vez de señales MIDI). La información relacionada a la codificación de las duraciones de los eventos MIDI ha sido detallado anteriormente (apartado “Codificación de la duración.” en la página 308). Dicha información ha sido detallada fuera de esta sección por la relevancia de dicho sistema de codificación en el algoritmo de identificación de duraciones de la aplicación AN\_MIDv5.1.

El resto de especificaciones que han sido utilizadas y que van a ser resumidas a continuación son las relacionadas con la estructura de bloques (*chunks*) que incluye el formato de fichero MIDI.

### Estructura del Archivo

Los archivos MIDI se organizan en bloques de datos (similar a los archivos RIFF). Cada bloque es precedido por una cabecera de 8 bytes a saber:<sup>442</sup>

- 4 bytes: cadena identificadora utilizada para identificar el tipo de bloque o *chunk*.
- 4 bytes: que definen la longitud del bloque como el número de bytes del bloque contando a partir de después de esta cabecera.

### Bloque de Cabecera (*Header Chunk*)

El bloque de cabecera contiene información acerca de toda la pieza musical incluyendo el tipo de formato MIDI, número de pistas y la división de tiempo. Sólo hay un bloque de cabecera por cada archivo MIDI estándar y siempre se encuentra al principio. Antes de describir cada elemento de la porción de cabecera, la Tabla 107 muestra la información técnica de dicha cabecera.

Posición	Longitud	Tipo	Descripción	Valor
0x00	4	Carácter (4)	Ident. bloque	“MThd”
0x04	4	<i>Double word</i>	Tamaño bloque	6
0x08	2	<i>Word</i>	Tipo de formato	0-2
0x10	2	<i>word</i>	Número de pistas	1-65,535
0x12	2	<i>word</i>	División de tiempo	Ver

Tabla 107: Campos del bloque de cabecera de un fichero MIDI.

#### **Identificador y Tamaño de bloque**

El identificador de bloque es siempre "MThd" (0x4D546864) y el tamaño siempre es 6, porque el trozo de cabecera siempre contiene los mismos valores.

#### **Tipo de formato**

La primera palabra describe el tipo de formato MIDI. Puede ser un valor de 0, 1 o 2 y describe cómo la información de la siguiente pista será interpretada. El tipo de archivo MIDI 0 tiene una pista que contiene todos los eventos MIDI de toda la pieza musical, incluyendo el título de la canción, el compás, tempo y eventos musicales. El tipo de archivo MIDI 1 debe tener dos o más pistas. La primera, por convención, contiene información de la canción como el título, el compás, tempo, etc. La segunda y siguientes pistas contienen un título, los datos musicales de eventos, específicos para esa pista. Esto se ajusta perfectamente a la organización de modernos secuenciadores MIDI multi-pista. El tipo de archivo MIDI 2 es una combinación de los otros dos tipos. Contiene varias pistas, pero cada pista representa una secuencia diferente, que no necesariamente tiene porque ejecutarse al mismo tiempo. Este tipo está destinado a ser utilizado para guardar patrones rítmicos de batería.

<sup>442</sup> Información extraída y traducida de “<http://www.sonicspot.com/guide/midifiles.html>” en fecha 27/05/2012.



## Número de pistas

La segunda palabra, simplemente define el número de bloques de pista que siguen a este bloque de cabecera. Un tipo de archivo MIDI 0 sólo puede contener un valor de 1, ya que sólo puede contener una pista. Los tipos de archivo MIDI 1 y 2 puede contener hasta 65.536 (0xFFFF) pistas.

## División de Tiempo

La tercera y última palabra en el bloque de cabecera MIDI es más compleja que las dos primeras. Contiene la división en el tiempo utilizado para descifrar los tiempos de los eventos de pista en tiempo "real". Este valor se representa ya sea en frames por unidad de tiempo o unidades de tiempo MIDI (*MIDI ticks*) por pulso de compás.

Si el bit más significativo de la palabra (máscara de bits 0x8000) es 0, los siguientes 15 bits describen la división del tiempo en MIDI ticks por pulso. Por el contrario los siguientes 15 bits (bit de la máscara de 0x7FFF) describen la división en el tiempo en frames por segundo. Los MIDI ticks por tiempo se traducen en el número de ciclos de reloj, en cada pulso de nota de la música. Los valores comunes de rango 48 a 960, aunque los nuevos secuenciadores van mucho más allá de este rango para facilitar el trabajo con MIDI y audio digital en conjunto.

EL sistema de frames por segundo divide las restantes 15 bytes en dos valores. Los primeros 7 bits (máscara de bits 0x7F00) definen un valor para el número de fotogramas SMPTE y puede ser 24, 25, 29 (de 29.97 fps) o 30. El byte restante (bit de máscara 0x00FF) define el número de ciclos de reloj.

En todos los ficheros procesados y debido a que los editores musicales utilizados trabajan en MIDI ticks por pulso, el sistema de frames por segundo no está soportado en la aplicación AN\_MIDv5.1.

Para facilitar la comprensión del párrafo anterior, y fruto del desarrollo de la aplicación AN\_MIDv5.1 se puede decir que la velocidad de la interpretación vendrá definida por el número de segundos que durará cada MIDI tick. En la página 87 en el párrafo anterior a la Figura 14 se muestra un ejemplo del cálculo de la velocidad de ejecución.

En cualquier caso, a efectos de cálculo de los indicadores extraídos por la aplicación AN\_MIDv5.1, dicha información de la velocidad de interpretación de la obra musical no tiene ningún efecto.

## Bloque(s) de datos (Track Chunk)

Los bloques de pista o datos contienen toda la información de una pista individual, incluyendo, nombre de la pista y eventos musicales. La Tabla 108 muestra una descripción de la organización de un bloque de la pista.

Posición	Longitud	Tipo	Descripción	Valor
0x00	4	Carácter (4)	Ident. bloque	"MThd"
0x04	4	<i>Double word</i>	Tamaño bloque	0-65,535
0x08	0-65,535		Eventos MIDI	

Tabla 108: Estructura de un bloque o chunk MIDI.

## Identificador y tamaño de bloque

El identificador de bloque es siempre "MThd" (0x4D546864) y el tamaño identifica el número de bytes que contiene la parte de datos del bloque excluyendo la cabecera.

## **Eventos MIDI**

Los eventos MIDI incluirán todo el material musical MIDI propiamente relacionado con el material musical de la pieza en base los tipos de eventos y formatos formato resumidos en la Tabla 104 en la página 306.

## **Anexo 4 – Información de compositores analizados y catalogación.**

El objetivo de este anexo es dar a los lectores de esta tesis doctoral con un perfil de conocimiento no especializado en cuestiones musicales unos breves notas históricas de los compositores investigados en los métodos presentados en esta memoria de tesis así como de los compositores y obras referenciadas en las investigaciones analizadas de otros autores en el capítulo “Capítulo 2. Revisión de investigaciones realizadas” en la página 26.

Este anexo no tiene ningún valor de investigación ya que todo su contenido ha sido obtenido de referencias de Internet. El trabajo hecho ha sido únicamente un trabajo de síntesis de los elementos referenciados en el documento. Sin lugar a duda dicho proceso de síntesis ha dejado por el camino datos extremadamente relevantes y valiosos desde un punto de vista musicológico e histórico de los compositores tratados. Al tratarse de un anexo generalista pensado para los lectores sin conocimientos profundos de historia de la música, ha primado el criterio de hacer las notas breves únicamente para ubicar el compositor en su época.

### **Angerer Edmund**

(1740-1794) Monje benedictino austriaco y músico de iglesia. Nació en 1740 hijo del maestro de escuela y maestro de coro Esteban Angerer en St. Johann en el Tirol. Recibió su primera formación musical con su padre. En 1758, ingresó en el monasterio benedictino Fiecht y trabajó allí como profesor, director de coro, organista y músico.<sup>443</sup>

Escribió, gran cantidad de obras religiosas, óperas y operetas. Murió como un músico respetado.

Su obra más famosa es el llamado *Berchtold-Gaden Musick*, que se convirtió en un éxito en el siglo XVIII por toda Europa. Cayó en el olvido poco después de su muerte

Por el descubrimiento de una nota manuscrita en 1992, parece que Edmund Angerer es realmente el autor de la “Sinfonía de los Juguetes”.

### **Bach Johann Michael**

(1648-1694) Organista y compositor alemán. Segundo hijo de Heinrich Bach, nació en Arnstadt, de donde fue organista activo en la corte hasta 1673, entonces reemplazó a Johann Effler en Gehren de donde fue también funcionario municipal. Murió en esa ciudad.<sup>444</sup>

Autor de varias obras, de las que se conservan 11 motetes, 3 cantatas, 72 preludios corales para órgano y una atribuida “Aria con 15 variaciones”, conocida gracias a un arreglo para armonio de L. A. Zelineer.

De sus siete hijos, sobresale María Barbara Bach (1684 - 1720), primera esposa de Johann Sebastian Bach.

### **Bach Johann Sebastian**

(1685-1750) Compositor alemán. Considerado por muchos como el más grande compositor de todos los tiempos, Johann Sebastian Bach nació en el seno de una dinastía de músicos e intérpretes que desempeñó un papel determinante en la música alemana durante cerca de dos siglos y cuya primera mención documentada se remonta a 1561. Hijo de Johann Ambrosius, trompetista de la

443 Contenido obtenido y traducido de “[http://de.wikipedia.org/wiki/Edmund\\_Angerer](http://de.wikipedia.org/wiki/Edmund_Angerer)” en fecha 24/09/2012.

444 Contenido obtenido en la dirección “[http://es.wikipedia.org/wiki/Johann\\_Michael\\_Bach](http://es.wikipedia.org/wiki/Johann_Michael_Bach)” en fecha 11/07/2012.

corte de Eisenach y director de la música de dicha ciudad, la música rodeó a Johann Sebastian Bach desde el principio de sus días.<sup>445</sup>

Su formación culminó en el convento de San Miguel de Lüneburg, donde estudió a los grandes maestros del pasado, entre ellos Heinrich Schütz, al tiempo que se familiarizaba con las nuevas formas instrumentales francesas que podía escuchar en la corte.

A partir de estos años, los primeros del siglo XVIII, Bach estaba ya preparado para iniciar su carrera como compositor e intérprete. Una carrera que puede dividirse en varias etapas, según las ciudades en las que el músico ejerció: Arnstadt (1703-1707), Mühlhausen (1707-1708), Weimar (1708-1717), Köthen (1717-1723) y Leipzig (1723-1750).

En 1717 Johann Sebastian Bach abandonó su puesto en Weimar a raíz de haber sido nombrado maestro de capilla de la corte del príncipe Leopold de Anhalt, en Köthen, uno de los períodos más fértiles en la vida del compositor, durante el cual vieron la luz algunas de sus partituras más célebres, sobre todo en el campo de la música orquestal e instrumental: los dos conciertos para violín, los seis *Conciertos de Brandemburgo*, el primer libro de *El clave bien temperado*, las seis sonatas y partitas para violín solo y las seis suites para violoncelo solo.

Durante los últimos veintisiete años de su vida fue *Kantor* de la iglesia de Santo Tomás de Leipzig, cargo éste que comportaba también la dirección de los actos musicales que se celebraban en la ciudad. A esta etapa pertenecen sus obras corales más impresionantes, como sus dos *Pasiones*, la monumental *Misa en si menor* y el *Oratorio de Navidad*. En los últimos años de su existencia su producción musical descendió considerablemente debido a unas cataratas que lo dejaron prácticamente ciego.

Casado en dos ocasiones, con su prima Maria Barbara Bach la primera y con Anna Magdalena Wilcken la segunda, Bach tuvo veinte hijos.

Pese a que tras la muerte del maestro su música, considerada en exceso intelectual, cayó en un relativo olvido, compositores de la talla de Mozart o Beethoven siempre reconocieron su valor. Recuperada por la generación romántica, desde entonces la obra de Johann Sebastian Bach ocupa un puesto de privilegio en el repertorio. La razón es sencilla: al magisterio que convierte sus composiciones en un modelo imperecedero de perfección técnica, se une una expresividad que las hace siempre actuales.

## **Bach Johann Sebastian (El clave bien temperado)**

El Clave bien temperado o el Clavecín bien templado (en alemán: *Das wohltemperierte Klavier*, literalmente ‘el clave con temperamento bueno’, en contraposición a otros tipos de temperamentos), es el nombre de dos ciclos de preludios y fugas compuestos por Johann Sebastian Bach en todas las tonalidades mayores y menores de la gama cromática.<sup>446</sup>

Como mucha de la música de Bach, ninguno de los dos volúmenes fue publicado en vida. Y también como mucha de su música, se conoce la fecha en que fueron compilados, pero no las fechas en que fueron compuestos, por lo que existen diversas especulaciones al respecto. Lo que sí sabemos es que el primer volumen (que comprende los preludios y fugas del BWV 846 al BWV 869) fue terminado y compilado por Bach en 1722, aunque su primera impresión no llegará hasta mucho después de muerto Bach, en 1801. El segundo volumen (que comprende del BWV 870 al BWV 893) fue terminado y compilado en 1744, si bien también es probable, por el estilo, que muchos de los preludios y fugas de este segundo volumen hubieran sido compuestos antes de compilar el primero. Ambos comparten el mismo esquema: cada libro comprende 24 grupos

---

445 Contenido obtenido y sintetizado de la dirección

“[http://www.biografiasyvidas.com/biografia/b/bach\\_sebastian.htm](http://www.biografiasyvidas.com/biografia/b/bach_sebastian.htm)” en fecha 6/06/2012.

446 Contenido obtenido en la dirección “[http://es.wikipedia.org/wiki/El\\_clave\\_bien\\_temperado](http://es.wikipedia.org/wiki/El_clave_bien_temperado)” en fecha 6/06/2012.

constituidos por un preludio y una fuga en la misma tonalidad. Empieza por la tonalidad de do mayor, y después la de do menor, a la que le sigue do sostenido mayor y así sucesivamente, hasta haber completado toda la gama cromática de mayor a menor. Es, por tanto, una colección enorme que comprende 48 preludios y 48 fugas cuyo objetivo es, a la vez, musical, teórico y didáctico.

## **Beethoven Ludwig van**

(1770 - 1827) Compositor alemán. Nacido en el seno de una familia de origen flamenco, su padre, ante las evidentes cualidades para la música que demostraba el pequeño.<sup>447</sup>

La verdadera vocación musical de Beethoven no comenzó en realidad hasta 1779, cuando entró en contacto con el organista Christian Gottlob Neefe, quien se convirtió en su maestro.

Miembro de la orquesta de la corte de Bonn desde 1783, en 1787 Ludwig van Beethoven realizó un primer viaje a Viena con el propósito de recibir clases de Mozart. Sin embargo, la enfermedad y el posterior deceso de su madre le obligaron a regresar a su ciudad natal pocas semanas después de su llegada.

En 1792 Beethoven viajó de nuevo a la capital austriaca para trabajar con Haydn y Antonio Salieri, y se dio a conocer como compositor y pianista en un concierto que tuvo lugar en 1795 con gran éxito. Su carrera como intérprete quedó bruscamente interrumpida a consecuencia de la sordera que comenzó a afectarle a partir de 1796 y que desde 1815 le privó por completo de la facultad auditiva.

Los últimos años de la vida de Beethoven estuvieron marcados también por la soledad y una progresiva introspección, pese a lo cual prosiguió su labor compositiva, e incluso fue la época en que creó sus obras más impresionantes y avanzadas.

La primera época abarca las composiciones escritas hasta 1800, caracterizadas por seguir de cerca el modelo establecido por Mozart y Haydn y el clasicismo en general, sin excesivas innovaciones o rasgos personales. A este período pertenecen obras como el célebre *Septimino* o sus dos primeros conciertos para piano.

Una segunda manera o estilo abarca desde 1801 hasta 1814, período este que puede considerarse de madurez, con obras plenamente originales en las que Ludwig van Beethoven hace gala de un dominio absoluto de la forma y la expresión (la ópera *Fidelio*, sus ocho primeras sinfonías, sus tres últimos conciertos para piano, el *Concierto para violín*).

La tercera etapa comprende hasta la muerte del músico y está dominada por sus obras más innovadoras y personales, incomprendidas en su tiempo por la novedad de su lenguaje armónico y su forma poco convencional; la *Sinfonía n.º 9*, la *Missa solemnis* y los últimos cuartetos de cuerda y sonatas para piano representan la culminación de este período y del estilo de Ludwig van Beethoven.

## **Borodin Aleksandr**

(1833-1887) Compositor y químico ruso. Como la mayoría de sus compañeros del Grupo de los Cinco, Aleksandr Borodin no fue un músico profesional. Químico de reconocido prestigio internacional, autor de importantes tratados sobre esta disciplina, su dedicación al arte de los sonidos se vio siempre supeditada a su labor científica, lo que explica su reducida producción.<sup>448</sup>

Hijo ilegítimo de un príncipe georgiano, había recibido una esmerada educación musical, familiarizándose desde su infancia con las obras de los clásicos vieneses. La relación con el crítico

447 Contenido obtenido en la dirección "<http://www.biografiasyvidas.com/biografia/b/beethoven.htm>" en fecha 6/06/2012.

448 Contenido obtenido en la dirección "<http://www.biografiasyvidas.com/biografia/b/borodin.htm>" en fecha 5/06/2012.

Stassov y el que sería su compañero de grupo Balakirev, atrajo su atención hacia un estilo musical específicamente ruso que buscaba sus raíces en Oriente, pero alejado del exotismo de Rimski-Korsakov.

De su reducido catálogo se destacan tres sinfonías (1867, 1876 y 1886, ésta inacabada), el poema sinfónico En las estepas del Asia Central (1880), el Cuarteto de cuerda n.º 2 (1881), célebre por su nostálgico Nocturno, y, sobre todo, la ópera El príncipe Igor, partitura en la que trabajó desde 1869 hasta su muerte. Inconclusa a su fallecimiento, fue finalizada por Rimski-Korsakov y Glazunov.

Compuso dos cuartetos para cuerdas: n.º1 en La Mayor (1874-79) y n.º2 en Re Mayor (1881).<sup>449</sup>

## **Brahms Johannes**

(1833-1897) Compositor alemán. En una época en que la división entre partidarios y detractores de Richard Wagner llegó a su grado más alto, la figura de Brahms encarnó para muchos de sus contemporáneos el ideal de una música continuadora de la tradición clásica y de la primera generación romántica, opuesta a los excesos y las megalomanías wagnerianos.<sup>450</sup>

Respetado en su tiempo como uno de los más grandes compositores y considerado a la misma altura que Bach y Beethoven, con los que forma las tres míticas "B" de la historia de la música, Brahms nació en el seno de una modesta familia en la que el padre se ganaba la vida tocando en tabernas y cervecerías. Músico precoz, el pequeño Johannes empezó pronto a acompañar a su progenitor al violín interpretando música de baile y las melodías entonces de moda.

Al mismo tiempo estudiaba teoría musical y piano, primero con Otto Cossel y más tarde con Eduard Marxsen, un gran profesor que supo ver en su joven alumno un talento excepcional, mucho antes de que éste escribiera su Opus 1. Marxsen le proporcionó una rigurosa formación técnica basada en los clásicos, inculcándole también la pasión por el trabajo disciplinado, algo que Brahms conservó toda su vida: a diferencia de algunos de sus contemporáneos que explotaron la idea del artista llevado del arrebato de la inspiración, del genio, el creador del Réquiem alemán dio siempre prioridad especial a la disciplina, el orden y la medida.

Siguiendo los pasos de Beethoven, en 1869 Brahms fijó su residencia en Viena, capital musical de Europa desde los tiempos de Mozart y Haydn. Allí se consolidó su personal estilo, que, desde unos iniciales planteamientos influidos por la lectura de los grandes de la literatura romántica alemana, y cercanos a la estética de Schumann, derivó hacia un posicionamiento más clásico que buscaba sus modelos en la tradición de los clásicos vieneses y en la pureza y austeridad de Bach.

Brahms, que al principio de su carrera se había centrado casi exclusivamente en la producción pianística, abordó entonces las grandes formas instrumentales, como sinfonías, cuartetos y quintetos, obras todas ellas reveladoras de un profundo conocimiento de la construcción formal.

## **Buxtehude Dietrich**

(1637-1707) Compositor y organista germano-danés de música académica europea del barroco. Sus obras para órgano forman parte del repertorio habitual para este instrumento y frecuentemente se interpretan en recitales y misas. Fue uno de los organistas más célebres de la escuela alemana de órgano barroco, durante la mayor parte de su vida fue organista en la Iglesia de Santa María (*Marienkirche*) de Lübeck. Como compositor produjo una amplia variedad de piezas vocales e instrumentales, y su estilo influyó enormemente a muchos compositores, incluido Johann Sebastian

---

449 Contenido obtenido en la dirección "<http://www.karadar.com/index.php/en/component/resource/article/2-catalogues/16275-borodin-alexander-porfirievich-complete-catalogue-.html>" en fecha 5/06/2012.

450 Contenido obtenido y resumido en la dirección "<http://www.biografiasyvidas.com/biografia/b/brahms.htm>" en fecha 6/06/2012.

Bach. Hoy en día es considerado el más destacado compositor germano de su tiempo, entre Heinrich Schütz y Bach.<sup>451</sup>

Buxtehude debe su renombre a la obra compuesta para el órgano, la más considerable de Alemania septentrional, que anuncia a la de Johann Sebastian Bach y sobrepasa a toda la de sus contemporáneos. Siguió la línea inaugurada por Sweelinck, siendo el máximo exponente de la llamada “escuela organista del Norte”, caracterizada por su gusto a las grandes arquitecturas musicales, con riqueza y libertad de imaginación que se expresaban perfectamente a través de los recursos sonoros de los grandes instrumentos creados por los artesanos septentrionales.

La obra de Buxtehude se caracteriza por sus preludios y corales, por el aspecto complejo y grandioso de la arquitectura, la invención melódica y rítmica y la riqueza del contrapunto: sus obras no están divididas claramente en una parte dedicada al virtuosismo y otra al desarrollo contrapuntístico, sino que se suceden alternativamente episodios de los dos tipos de secciones.

## BWV catálogo

Las siglas **BWV** (**B**ach-**W**erke-**V**erzeichnis, *Catálogo de las obras de Bach* en alemán) se usan como abreviatura que numera cada una de las obras musicales del catálogo del compositor alemán Johann Sebastian Bach (1685-1750). Fue creado por el musicólogo alemán Wolfgang Schmieder (1901-1989) en 1950. Su título completo es “*Catálogo temático sistemático de las obras de Johann Sebastian Bach*”, y fue publicado en Leipzig en 1950, y en 1990 se publicó una segunda edición corregida y ampliada.<sup>452</sup>

Ese catálogo sustituyó a los de la **BG** (Bach-Gesellschaft, *Sociedad Bach*) y **NGB** (Neue Bach Gesellschaft, *Nueva Sociedad Bach*), de difícil manejo.

Es posible también encontrar una misma obra bajo la denominación de varios números Schmieder. Por ejemplo, *El clave bien temperado* (BWV 846-893).

En algunos casos suele señalarse la obra por su título en alemán, seguida del *número Schmieder* y el número de orden de la sección dentro de la obra. Por ejemplo: BWV 147,10 significa, la décima sección del *número Schmieder* 147.

Puede ocurrir que Bach hubiera compuesto varias versiones de una misma obra, lo que se señala con una letra al final del *número Schmieder*.

La abreviatura *Anh.* se refiere al apéndice (*Anhang*) del catálogo, y se distribuye de la siguiente manera: *Anh.* 1-23 agrupa obras perdidas y fragmentarias, *Anh.* 24-155 obras dudosas y *Anh.* 156-189 las falsas.

La expresión *deest* (del latín *de*, negación, y *est*, estar) o su plural (*desunt*), usada en ciertos catálogos de las obras de Bach (pero no como número BWV) significa simplemente que carece de *número Schmieder*; sea por las dudas de su atribución, por su reciente descubrimiento o por cualquier otra razón argumentada por su editor.

### Estructura del catálogo

La principal virtud del catálogo BWV es que, a diferencia de otros que están ordenados cronológicamente, el de Schmieder está clasificado por tipo de obra. Por esta razón un número BWV menor no indica una obra cronológicamente temprana. Hay que tener en cuenta que Bach no asignaba el tradicional número de opus a sus obras, y apenas imprimió en vida sus composiciones, lo que provocó y sigue provocando problemas de datación y atribución. También hay que tener en cuenta que sus obras cayeron en un relativo olvido, hasta que en el siglo XIX Félix Mendelssohn

451 Contenido obtenido y resumido en la dirección “[http://es.wikipedia.org/wiki/Dietrich\\_Buxtehude](http://es.wikipedia.org/wiki/Dietrich_Buxtehude)” en fecha 11/07/2012.

452 Contenido obtenido en la dirección “<http://es.wikipedia.org/wiki/BWV>” en fecha 11/06/2012.

fomentó su redescubrimiento para el gran público. Tales circunstancias significaron que las obras de Bach tuvieran una clasificación problemática, lo que ha exigido una intensa investigación musicológica.

El catálogo BWV está estructurado de la siguiente forma:

- 1-200: Cantatas religiosas
- 201-215: Cantatas profanas
- 216-224: Otras cantatas
- 225-231: Motetes
- 232-242 Misas
- 243: El Magnificat
- 244-247: Pasiones
- 248-249: Oratorios
- 250-438: Composiciones Corales
- 439-524: Lieder y arias
- 525-771: Obras de órgano
- 772-994: Obras para clavecín
- 995-1000: Obras para laúd y Laud-clave
- 1001-1013: Obras para solos instrumentales
- 1014-1040: Música de cámara
- 1041-1071: Conciertos
- 1072-1080: Obras de contrapunto (es decir cánones y otros)

## Canto Gregoriano

Deben rastrearse sus orígenes en la práctica musical de la sinagoga judía y en el canto de las primeras comunidades cristianas. La denominación canto gregoriano procede de atribuírsele su recopilación al Papa San Gregorio Magno, siendo una evolución del canto romano confrontado al canto galicano. Debe aclararse y entenderse que el canto gregoriano no fue compuesto ni siquiera recopilado por el Papa Gregorio I Magno. Fue a partir del siglo IX que empezó a asociarse su nombre a este compendio musical, sobre todo a partir de la biografía de Juan el Diácono.<sup>453</sup>

Desde su nacimiento, la música cristiana fue una oración cantada, que debía realizarse no de manera puramente material, sino con devoción o, como lo decía San Pablo: "Cantando a Dios en vuestro corazón". El texto era pues la razón de ser del canto gregoriano. En realidad el canto del texto se basa en el principio de que, según San Agustín, "El que canta bien, ora dos veces". El canto gregoriano jamás podrá entenderse sin el texto, el cual tiene prelación sobre la melodía y es el que le da sentido a ésta. Por lo tanto, al interpretarlo, los cantores deben haber entendido muy bien el sentido del texto. En consecuencia, se debe evitar cualquier impostación de voz (sin sobresaltos) de tipo operístico en que se intente el lucimiento del intérprete. Del canto gregoriano es de donde proceden los modos gregorianos, que dan base a la música occidental. De ellos vienen los modos mayores y menores, y otros cinco menos conocidos.

Algunas de las principales características son las siguientes:

- Tiene un ritmo sometido ante todo al texto latino.
- Es una plegaria cantada y la expresión de una religiosidad.
- Es un canto monódico (solo existe una línea melódica) y a *cappella* (carece de acompañamiento), interpretado por voces masculinas.
- Están escritos en latín, exceptuando el *Kyrie Eleison*, que está en griego.

---

<sup>453</sup> Contenido obtenido en la dirección "[http://es.wikipedia.org/wiki/Canto\\_gregoriano](http://es.wikipedia.org/wiki/Canto_gregoriano)" en fecha 29/05/2012.



- Todas las piezas gregorianas son siempre modales, y dentro de los modos gregorianos o modos eclesiásticos existen 8 tipos.
- En el canto gregoriano, la forma musical está definida por el contexto litúrgico en donde se interpretan las piezas.
- En este tipo de canto, la línea melódica no es muy movable, es decir, no hay grandes saltos en la voz. Por lo regular la línea se mueve por segundas, terceras, cuartas o quintas.
- El repertorio gregoriano es anónimo.

## Chopin Frédéric (Biografía)

Hijo de un maestro francés emigrado a Polonia, Chopin fue un niño prodigio que desde los seis años empezó a frecuentar los grandes salones de la aristocracia y la burguesía polacas, donde suscitó el asombro de los asistentes gracias a su sorprendente talento. De esa época datan también sus primeras incursiones en la composición.<sup>454</sup>

El fracaso de la revolución polaca de 1830 contra el poder ruso provocó su exilio en Francia, donde muy pronto se dio a conocer como pianista y compositor, hasta convertirse en el favorito de los grandes salones parisinos. En ellos conoció a algunos de los mejores compositores de su tiempo, como Berlioz, Rossini, Cherubini y Bellini, y también, en 1836, a la que había de ser uno de los grandes amores de su vida, la escritora George Sand.

Excepto los dos juveniles conciertos para piano y alguna otra obra concertante (*Fantasia sobre aires polacos Op. 13*, *Krakowiak Op. 14*) o camerística (*Sonata para violoncelo y piano*), toda la producción de Chopin está dirigida a su instrumento musical, el piano, del que fue un virtuoso incomparable. Sin embargo, su música dista de ser un mero vehículo de lucimiento para este mismo virtuosismo: en sus composiciones hay mucho de la tradición clásica, de Mozart y Beethoven, y también algo de Bach, lo que confiere a sus obras una envergadura técnica y formal que no se encuentra en otros compositores contemporáneos, más afectos a la estética de salón.

A todo ello hay que añadir la propia personalidad del músico, que si bien en una primera etapa cultivó las formas clásicas (*Sonata núm. 1*, los dos conciertos para piano), a partir de mediados de la década de 1830 prefirió otras formas más libres y simples, como los impromptus, preludios, fantasías, scherzi y danzas.

## Chopin F. (Preludios)

Los Preludios para piano solo compuestos por Fryderyk Chopin son un conjunto de veinticuatro preludios que conforman el Op. 28 del compositor polaco. Todos ellos son piezas bastante breves, de entre treinta segundos y cinco minutos de duración; y cada uno está escrito en una tonalidad distinta. Chopin tiene otros dos preludios, de los que uno es póstumo y el otro pertenece al Op. 45.<sup>455</sup>

Chopin compuso los Preludios al igual que J.S.Bach estructuró El clave bien temperado. De la misma forma, Claude Debussy escribió veinticuatro preludios en dos libros y Aleksandr Skriabin compuso los Preludios Op. 11.

Chopin compuso sus preludios entre 1835 y 1839, en parte en la localidad mallorquina de Valldemossa, donde pasó el invierno de 1838-1839, con George Sand y sus hijos, para evitar el clima lluvioso de París. Sin embargo, este método de mejorar de sus enfermedades no funcionó, porque ese invierno fue muy duro en la isla. Además, tardaron mucho en traerle su piano desde Francia y tuvo que conformarse con uno que le dejaron, que se puede ver en la Cartuja de

454 Contenido obtenido en la dirección “<http://www.biografiasyvidas.com/biografia/c/chopin.htm>” en fecha 6/06/2012.

455 Contenido obtenido en la dirección “[http://es.wikipedia.org/wiki/Preludios\\_\(Chopin\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Preludios_(Chopin))” en fecha 24/1/2012.

Valldemossa, donde estaban sus habitaciones. Los Preludios Op. 28 fueron publicados por primera vez en 1839.

Aunque el término prelude se utiliza por lo general para referirse a una pieza introductoria, los Preludios de Chopin son ya piezas completas por sí mismas, hechas todas y cada una de ellas para comunicar una idea o un sentimiento. Los Preludios de Chopin han sido comparados con los preludios de “El clave bien temperado” de J.S.Bach. Sin embargo, todos los preludios del alemán llevan a una fuga en la misma tonalidad y estaban ordenados cromáticamente, mientras que los de Chopin estaban ordenados por quintas.

Debido a su aparente falta de estructura formal y a su brevedad, los Preludios provocaron consternación entre los críticos de la época cuando fueron publicados. Ninguno de los preludios dura más de noventa compases (que son los que tiene el Preludio n.º 17), y el más corto, el n.º 20, sólo ocupa trece compases. Robert Schumann dijo de ellos que “son esbozos, comienzos de estudios o, por así decirlo, ruinas, alas individuales de águila, todo desorden y confusiones salvajes”. Por otro lado, la opinión de su amigo Franz Liszt puede calificarse de positiva: “Los Preludios de Chopin son composiciones de un calibre totalmente distinto”.

## **Costanzi Giovanni Battista**

(1704-1769) Compositor italiano conocido como Giovannino de Roma. Costanzi fue probablemente discípulo de Giovanni Lorenzo Lulier. En 1721 entró al servicio del cardenal Pietro Ottoboni, primero como asistente de sala, y luego, a partir de 1737 sucediendo a Arcangelo Corelli como jefe de instrumentos. En 1727 hizo su debut como compositor de ópera con “L'amor generoso”, pero su primer éxito fue “Carlomagno” estrenada en 1729, el año en que fue nombrado de nuevo gracias a las recomendaciones del cardenal Ottoboni, maestro capilla en las iglesias romanas más importantes: en 1729 en San Luis de Francia, en 1743 en San Marco y Santa Maria in Vallicella, y finalmente en 1755 se convirtió en director de la Cappella Giulia en San Pedro. Al mismo tiempo, tenía una gran reputación como músico, el cual fue elogiado con muchos honores, incluyendo la presidencia de la Congregación de Santa Cecilia en Roma en 1740, 1754 y 1769. Entre sus alumnos se encuentra Luigi Boccherini, que estudió con él en 1757.<sup>456</sup>

Costanzi fue uno de los compositores más prolíficos del siglo XVIII, pero sólo una pequeña parte de sus obras se conserva en la actualidad. Hasta 1740 compuso principalmente música vocal secular, y luego centró su atención en la música sacra. Sin embargo, la composición de su clase históricamente más importante era la música instrumental, y sus obras para violonchelo Estructuralmente sigue el patrón de Sonata de iglesia, pero a veces los movimientos están más cerca del esquema de la sonata da cámara.

## **Corales luteranos de J.S.Bach**

El coral luterano nace de la necesidad de crear un repertorio para los oficios adecuado para los ritos de la iglesia reformada.<sup>457</sup>

Lutero quiso que los cánticos se entonasen por los fieles en lengua vernácula. Para ello era necesario disponer de un repertorio diferente del gregoriano y de la práctica polifónica del final de la edad media. Para este fin compuso corales, melodías sencillas que servían como himnos para la congregación. A parte de melodías originales, recurrió a fragmentos de canto llano, adaptados, y a canciones conocidas de carácter profano. En la adaptación o composición de otras melodías participaron algunos compositores como Johann Walther o Valentin Bapst.

---

456 Contenido obtenido y traducido de la URL “[http://it.wikipedia.org/wiki/Giovanni\\_Battista\\_Costanzi](http://it.wikipedia.org/wiki/Giovanni_Battista_Costanzi)” en fecha 24/09/2012.

457 Contenido obtenido en las direcciones “<http://www.sociedadbach.org/JSBach-vocal.html>” y “[http://es.wikipedia.org/wiki/Coral\\_protestante](http://es.wikipedia.org/wiki/Coral_protestante)” en fecha 30/5/2012.

A lo largo del siglo XVII se fueron desarrollando los corales para ser cantados a varias voces, o añadiéndoles un acompañamiento instrumental. Los corales monódicos se editaron en colecciones a las que los autores de música litúrgica recurrían para buscar las melodías adecuadas para los poemas sacros que se pretendía armonizar. De este modo, Juan Sebastián Bach, el autor paradigmático de corales, tomó estas melodías para sus cantatas, pasiones, etc.

Bach no compuso apenas melodías de coral, pero armonizando las del repertorio ya establecido creó unos modelos que hoy se siguen considerando ejemplares y muy útiles para el estudio de la armonía y del contrapunto. Las mismas melodías de coral se emplean también en otras secciones de las cantatas así como en el preludio coral. Este último es una pieza instrumental, generalmente para órgano, que sirve para recordar a los asistentes al oficio la línea melódica que se va a cantar a continuación.

El coral se usa también en forma instrumental, en forma notable en los llamados preludios corales, o corales para órgano. Aquí podemos encontrarnos con tratamientos muy diversos, entre los que destaca la presentación del coral en notas largas mientras se acompaña contrapuntísticamente, frecuentemente con motivos extraídos del coral. También aquí el grado de respeto de Bach hacia el texto impresiona. Por no hablar de la fantasía e imaginación que demuestra.

La colección más importante de corales luteranos de Bach es la catalogada con los número 250 a 438 del catálogo BWV.

## **Corelli, Arcangelo**

(1653 - 1713) Compositor italiano. Siendo muy joven se trasladó a Bolonia, ciudad en la cual estudió violín con destacados maestros, entre quienes despertó un gran interés debido a sus aptitudes. En 1675 pasó a Roma, e inmediatamente ganó cierta notoriedad, lo que le valió ser recibido por la reina Cristina de Suecia y entrar al servicio del cardenal Pietro Ottoboni.<sup>458</sup>

Se dedicó a la dirección musical y a la composición, creando una obra escasa pero de gran valor e influencia en la historia de la música. Su obra es, en cierto modo, insólita para la época, pues dedicó sus esfuerzos exclusivamente a la música instrumental, con preferencia al violín, obviando la música dramática. Corelli fue el primer compositor que alcanzó la fama musical sin dedicarse a la música cantada.

En 1681 publicó su primera colección de sonatas en forma de trío, destinadas a tocarse en iglesia, al igual que la tercera (1689); la segunda (1685) y la cuarta (1694) fueron compuestas para cámara. Publicó así mismo una colección de sonatas para violín y bajo (1700), y finalmente sus célebres *concerti grossi*, publicados póstumamente en 1714. Su obra alcanza la madurez del estilo barroco italiano, con la culminación del *concerto grosso* y la composición de la forma sonata preclásica, que tan importante iba a ser a lo largo del siglo XVIII.

Al mismo tiempo, su desarrollo técnico del violín convirtió sus composiciones en el fundamento de la escuela violinista clásica, que hoy día mantiene aún su vigencia pedagógica. Corelli murió en la cumbre de la fama, y fue inhumado en el Panteón de Roma.

## **D'Indy, Vincent**

(1851 - 1931) Compositor y pedagogo francés nacido en una familia de grandes raíces musicales. Compone sus primeras obras a los 13 años y consigue su primer gran éxito con una *Simphonie Italienne* (1871), que mereció los elogios de Massenet y Bizet. En 1874 comenzó a estudiar órgano en el Conservatorio con Franck.<sup>459</sup>

---

458 Contenido obtenido en "<http://www.biografiasyvidas.com/biografia/c/corelli.htm>" en fecha 6/6/2012.

459 Contenido obtenido en las direcciones "<http://www.biografiasyvidas.com/biografia/i/indy.htm>" y "[http://es.wikipedia.org/wiki/Vincent\\_d%27Indy#Cat.C3.A1logo\\_de\\_obras](http://es.wikipedia.org/wiki/Vincent_d%27Indy#Cat.C3.A1logo_de_obras)" en fecha 4/06/2012.

Alrededor de 1885 es considerado ya como el más importante compositor de la joven escuela francesa, tras la composición de *Max et Thècla* y su poema sinfónico *Poème des montagnes*, donde exhibió a su más alto nivel su ciencia armónica, su sentido de la escritura y un agudo sentido de la naturaleza.

En 1886 compone su *Simphonie cèvenole*, también capital en su obra. Su actividad se extiende además a la dirección de orquestas, musicología, transcripción, director coral, conferenciante y polemista. Fundó, con Les Bordes y Guilmant, la Schola Cantorum, en 1894, en principio orientada a la enseñanza de la música religiosa, pero que después se convertiría en un Conservatorio de fama internacional, de capital importancia para la enseñanza y difusión de la música (aunque principalmente la francesa).

Compuso tres cuartetos de cuerdas: op.<sup>460</sup>.35, op.45 y op.96 más un cuarto, sin número de opus, ya que no lo pudo terminar.

## des Prés, Josquin

(1450/55–1521) Fue un compositor franco-flamenco del Renacimiento, considerado el más famoso compositor europeo entre Guillaume Dufay y Giovanni Pierluigi da Palestrina, y la figura central de la escuela musical flamenca. También es conocido como Josquin Desprez.<sup>461</sup>

Es comúnmente considerado como la figura central de la escuela franco-flamenca. Josquin es ampliamente considerado por la erudición musical como el primer maestro del estilo de música vocal polifónica del alto Renacimiento, que empezaba a surgir en su época.

Durante el siglo XVI Josquin adquirió paulatinamente fama como el mayor compositor de la época, cuya técnica y expresión magistrales fueron universalmente imitadas y admiradas. Plumas tan dispares como Baldassare Castiglione y Martin Luther escribieron sobre su reputación y fama, teóricos como Heinrich Glarean y Gioseffo Zarlino consideraron su estilo la mejor representación de la perfección. Fue tan admirado que los copistas le atribuyeron multitud de composiciones anónimas, probablemente para aumentar sus ventas. Se le atribuyen al menos 374 obras; ha sido tan sólo tras la llegada de la erudición analítica moderna cuando se han puesto en duda algunas de esas erróneas atribuciones, con la base de pruebas manuscritas y rasgos estilísticos.

Dominó el mundo musical de su tiempo, no tanto por su conocimiento, ciencia y originalidad, sino también por su habilidad singular para reunir las corrientes de la práctica musical de la época. Poseía una vívida concepción del significado y las posibilidades dramáticas de los textos sagrados, así como destreza polifónica y conocimiento melódico. Durante su vida adquirió inmensa popularidad y fama, y fue muy requerido. El Duque Ercole d'Este envió una carta a su secretario con el interesante comentario; "*Puede ser verdad que Josquin sea mejor compositor, pero Isaac es más capaz para tratar con sus colegas*". Su fama permaneció después de su muerte. Zarlino, teórico musical en la década de 1580, todavía usaba ejemplos de Josquin des Prés en sus tratados de composición. Su fama sólo fue eclipsada después del comienzo de la era Barroca, con la declinación del estilo polifónico.

Escribió tanto música sacra como laica, y en todas las formas vocales significativas de la época, incluyendo misas, motetes, *chansons* y *frottole*. Durante el siglo XVI fue alabado por su supremo don melódico así como por su uso de ingeniosos aparatos técnicos. En épocas modernas, los eruditos han intentado averiguar los detalles básicos de su biografía, y han intentado definir las características clave de su estilo para corregir las falsas atribuciones de su obra, una tarea que se ha demostrado difícil. Josquin era amigo de solucionar problemas de composición de formas diferentes en sucesivas composiciones, como hizo Stravinsky más de 400 años después. En ocasiones escribía

---

460 Abreviatura de Opus representa la numeración en base a su catálogo de composición.

461 Contenido obtenido en "[http://es.wikipedia.org/wiki/Josquin\\_des\\_Prés](http://es.wikipedia.org/wiki/Josquin_des_Prés)" en fecha 2/12/2011.

con un estilo austero desprovisto de ornamentos, y en otras escribía música que requería un considerable virtuosismo. Heinrich Glarean escribió en 1547 que Josquin no sólo era un “magnífico virtuoso” sino también capaz de ser un burlón, usando la sátira de un modo efectivo. Mientras que la prioridad de los eruditos en los últimos años ha sido eliminar música del “canon Josquin” (incluyendo algunas de su más famosas obras) y reasignarla a sus contemporáneos, la música restante representa parte de lo más famoso y perdurable del Renacimiento.

Compuso 32 misas, 60 motetes, 66 Chansons entre otras obras.

## **Dvořák, Antonín**

(1841-1904) Aprendió a tocar el violín, el piano y el órgano. De 1857 a 1859 residió en Praga en casa de un tío suyo mientras estudiaba en la Escuela de Órgano de la ciudad. Cuando su tío no pudo mantenerle, trabajó en la orquestina de Karel Komzák como medio de ganarse la vida, adquiriendo cierta reputación como intérprete. En 1886 pasó a la orquesta del Teatro Nacional de Praga que dirigía Bedřich Smetana.<sup>462</sup>

En 1873 saltó a la fama con su composición “Himno Patriótico”, de hondo calado nacionalista. Ese mismo año obtuvo el reconocimiento internacional con su colección de “Danzas eslavas”. En el verano de 1874 consiguió una beca del gobierno austriaco en mérito a las composiciones que presentó. Más tarde, en 1891, recibiría el título de Doctor Honorario de Música por la Universidad de Cambridge. También, en 1889, la Orden de la Cruz de Hierro otorgada por el emperador Francisco José I, en 1891 el doctorado “honoris causa” por la Universidad de Praga, y un sillón en la Academia de Ciencias y Bellas Artes de Checoslovaquia y de Berlín.

Una etapa singular de su vida fue la que pasó en Estados Unidos. Se le ofreció la dirección del centro, lo que le determinó a trasladarse allí en 1892. Bajo la influencia de los “espirituales negros” y de la música popular compuso la "Sinfonía del Nuevo Mundo" y el conocido “Cuarteto americano”. Regresó a su país en 1895 para hacerse cargo de la dirección del Conservatorio de Praga. Aquí murió de una congestión cerebral el 1 de mayo de 1904.

Dvořák compuso 14 cuartetos de cuerda entre los años 1862 y 1895.

## **Fischer, Johann Caspar Ferdinand**

(1656-1746) Compositor y teclista alemán del Barroco. Conocido por ser el máximo representante de lullianismo en Alemania y por haber influenciado con sus obras al compositor Johann Sebastian Bach.<sup>463</sup>

Se sabe muy poco de la vida de Fischer. Aun siendo una figura prominente en el desarrollo musical del periodo barroco, de la composición y de la fuga (tanto que, como compositor, era tenido en alta estima por Johann Sebastian Bach).

Olvidado por la pluma de biógrafos, y rara vez interpretado, ha logrado mantener su nombre en la historia de la música como uno de los más importantes compositores de teclado de la Alemania barroca y gracias a la influencia que tuvo sobre el compositor de *Eisenach*.

La primera noticia concreta de su vida aparece alrededor de 1692, cuando fue nombrado maestro de capilla (*Kapellmeister*) del Margrave Ludwig de Baden en *Schlackenwerth*. Cabe mencionar que dicho puesto era el mejor que un músico podía alcanzar durante el Barroco.

---

462 Contenido obtenido y sintetizado de la dirección “[http://es.wikipedia.org/wiki/Antonín\\_Dvořák](http://es.wikipedia.org/wiki/Antonín_Dvořák)” en fecha 4/06/2012.

463 Contenido obtenido de la dirección “[http://es.wikipedia.org/wiki/Johann\\_Caspar\\_Ferdinand\\_Fischer](http://es.wikipedia.org/wiki/Johann_Caspar_Ferdinand_Fischer)” en fecha 11/07/2012.

En 1695 Fischer publicó su primera obra *Le Journal du Printemps consistant en airs et balets a 5 parties et les trompettes a plaisir* en *Augsburgo*. Al año siguiente publicó *Les Pieces de Clavessin* en *Schlackenwerth* y en 1702 el *Ariadne Musica neo-organoedum* en ese mismo lugar.

Primero desarrolla su labor en *Schlackenwerth* en Bohemia y posteriormente, en 1720, se traslada a Rastatt, donde se presume que permaneció hasta su muerte acaecida el 27 de marzo de 1746.

Además de las obras para teclado y orquesta, Fischer escribió asimismo algunas óperas de estilo veneciano, de las que no se conserva ninguna.

## **Graupner Christoph**

(1683-1760) fue un prolífico compositor alemán, célebre por la excelente caligrafía de sus autógrafos y copias. En sus composiciones destacan su nivel de invención y originalidad, era un hombre vivaz, apasionado, culto y de gran experiencia profesional.<sup>464</sup>

Fue uno de los más estimados compositores de su tiempo, al igual que sus contemporáneos Händel y Telemann. Es también contemporáneo de J.S. Bach, y amigo de otros maestros de gran renombre, como Heinichen y Fasch.

Concluye sus estudios en Leipzig con Johann Kuhnau, predecesor de Bach en la iglesia de Santo Tomás, Graupner dejó la ciudad en 1705 para ocupar el puesto de clavecinista de la orquesta de la Ópera de Hamburgo, dirigida por Reinhard Keiser, Händel era violinista de esa misma orquesta.

Compuso varias óperas que tuvieron un gran éxito de público y participó además en la composición de otras tres en colaboración con Keiser, figura dominante de la ópera alemana.

En 1709 aceptó un puesto en la corte de Hesse-Darmstadt, llegando a ser en 1711 director de orquesta y compositor de la misma. En 1723, renunció al puesto de cantor de la Escuela de Santo Tomás de Leipzig. Su negativa fue lo que permitió a Johann Sebastian Bach acceder a aquel nombramiento de manera oficial el 5 de mayo de 1723. Graupner mencionó a Bach en su renuncia.

Graupner pidió que toda su obra fuera destruida después de su muerte, lo que provocó una batalla jurídica entre sus herederos, finalmente quedó bajo propiedad de la corte de Darmstadt, actualmente son propiedad del estado federado de Hesse.

Fue célebre también por su excelente caligrafía en sus autógrafos y copias: “*Sus partituras manuscritas son tan bellas que parecen grabados*” (Johann Mattheson 1740), se han conservado copias de obras de contemporáneos suyos (Vivaldi, Telemann, Fasch, Stamitz y otros) manuscritas por él. Fue ésta una práctica muy común entonces, cuando apenas circulaban las ediciones impresas. Sabemos que Bach copió música de compositores tanto anteriores como contemporáneos, un procedimiento a través del cual se estudiaban los recursos y técnicas de otros maestros, y a menudo se utilizaban para hacer transcripciones.

## **Grieg Edvard**

(1843 - 1907) Compositor noruego considerado el principal representante de la música nacionalista de su país. La música de Grieg tiene aires de vida campestre y de contacto con la naturaleza, aspecto que tuvo gran peso en la vida del músico. No es una música de grandes contrastes desgarradores, pero posee gran lirismo y fluye de manera ágil y reposada. Grieg es principalmente un melodista: sus obras poseen un gran atractivo melódico y esto propició su rápida difusión. Es también un instrumentador fino que maneja a la perfección las cuerdas y los

---

464 Contenido obtenido y sintetizado de la dirección “[http://es.wikipedia.org/wiki/Christoph\\_Graupner](http://es.wikipedia.org/wiki/Christoph_Graupner)” en fecha 7/07/2012.

instrumentos de viento-madera como el clarinete o el fagot. No emplea en exceso los metales como otros contemporáneos suyos, aunque sí saca partido de las tubas cuando es necesario.<sup>465</sup>

En su etapa de formación, Grieg centró su interés en la música romántica y sobre todo en el compositor alemán Robert Schumann. A partir de 1865, y tras conocer a Nordraak, comenzó a inspirarse en el folclore de su país. Supo tratar la música popular noruega de forma innovadora y es en sus arreglos de melodías folclóricas como las *Norwegische Tänze Op. 35 (Danzas noruegas)* para piano donde aparecen con mayor claridad los principales avances armónicos de su lenguaje. También se encuentran huellas del impresionismo musical en algunas obras suyas como el *Cuarteto en Sol menor Op. 27 (1877-8)*, en el que utiliza la disonancia de forma muy libre, como después haría Claude Debussy en sus propios cuartetos.

El piano fue al instrumento, aparte de la voz, al que más obras dedicó. El estilo pianístico de Grieg posee delicados adornos y debe bastante a la obra del polaco Frédéric Chopin y, por supuesto, a los ritmos y melodías de Noruega. Su *Concierto para piano en La menor*, compuesto en 1868 y revisado en 1907, es una obra de gran exuberancia, con tintes folclóricos y rica en material contrastante.

La producción camerística de Grieg, si bien no es tan abundante como su obra pianística o vocal, posee bellos ejemplos como las tres sonatas para violín, la *Sonata para violonchelo* o los dos cuartetos de cuerda. La obra que le dio más popularidad fue la música incidental para la obra *Peer Gynt* del dramaturgo Ibsen. Grieg trabajó duramente en esta obra, que en la actualidad se interpreta en dos suites (Op. 46 y Op. 55).

## Händel Georg Friedrich

(1685-1759) Compositor alemán naturalizado inglés. Estricto contemporáneo de Johann Sebastian Bach –aunque difícilmente podrían hallarse dos compositores más opuestos en cuanto a estilo y aspiraciones–, Händel representa no sólo una de las cimas de la época barroca, sino también de la música de todos los tiempos. Músico prolífico como pocos, su producción abarca todos los géneros de su época, con especial predilección por la ópera y el oratorio, a los que, con su aportación, contribuyó a llevar a una etapa de gran esplendor.<sup>466</sup>

Oponiéndose a los deseos de su padre, quien pretendía que siguiera los estudios de derecho, la carrera de Händel como músico comenzó en su Halle natal, donde tuvo como profesor al entonces célebre Friedrich Wilhelm Zachau, organista de la Liebfrauenkirche; fue tal su aprovechamiento que en 1702 fue nombrado organista de la catedral de su localidad y, un año más tarde, violinista de la Ópera de la corte de Hamburgo, donde entabló contacto con Reinhard Keiser, un compositor que le introdujo en los secretos de la composición para el teatro.

En Hamburgo, precisamente, estrenó Händel en 1705 su primera ópera, *Almira*, que fue bien acogida por el público. Un año más tarde, el músico emprendió un viaje a Italia que había de tener especial importancia, ya que le dio la oportunidad de familiarizarse con el estilo italiano e introducir algunas de sus características en su propio estilo, forjado en la tradición contrapuntística alemana. Las óperas *Rodrigo y Agrippina* y el oratorio *La Resurrezione* datan de esa época.

En 1710, de regreso en Alemania, fue nombrado maestro de capilla de la corte del Elector de Hannover, puesto que abandonó al final de ese mismo año para trasladarse a Inglaterra, donde pronto se dio a conocer como autor de óperas italianas. El extraordinario triunfo de la segunda de su autoría, *Rinaldo*, le decidió a afincarse en Londres a partir de 1712.

---

465 Contenido obtenido y sintetizado de la dirección “<http://www.biografiasyvidas.com/biografia/g/grieg.htm>” en fecha 6/06/2012.

466 Contenido obtenido en la dirección “<http://www.biografiasyvidas.com/biografia/h/haendel.htm>” en fecha 6/6/2012

## Händel G.F. - Catálogo HWV

HWV es la abreviatura del término alemán Händel-Werke-Verzeichnis (Catálogo de las obras de Händel) que es el catálogo más usado de las obras de Georg Friedrich Händel. Está ordenado por temas y se publicó entre 1978 y 1986 en el Händel-Jahrbuch ("Anuario Händel") bajo el título de *Verzeichnis der Werke Georg Friedrich Händels*. Su autor es el musicólogo Bernd Baselt.<sup>467</sup>

Posteriormente ha experimentado algunas ampliaciones y correcciones, pero la numeración original se mantiene.

El catálogo presenta los tectos iniciales de cada una de las obras y aporta informaciones sustanciales (por ejemplo las fuentes manuscritas, impresiones tempranas etc.)

Existen catálogos anteriores, entre otros de John Mainwaring (Londres 1760), Charles Burney (Londres 1785), W. S. Rockstro (Londres 1883), W. C. Smith ("Anuario Händel" de 1956), A. C. Bell (1972).

## Haydn Franz Joseph

(1732-1809) Compositor austriaco. Con Mozart y Beethoven, Haydn es el tercer gran representante del clasicismo vienés. Aunque no fue apreciado por la generación romántica, que lo consideraba excesivamente ligado a la tradición anterior, lo cierto es que sin su aportación la obra de los dos primeros, y tras ellos la de Schubert o Mendelssohn, nunca habría sido lo que fue. Y es que a Haydn, más que a ningún otro, se debe el definitivo establecimiento de formas como la sonata y de géneros como la sinfonía y el cuarteto de cuerda, que se mantuvieron vigentes sin apenas modificaciones hasta bien entrado el siglo XX.<sup>468</sup>

Nacido en el seno de una humilde familia, el pequeño Joseph Haydn recibió sus primeras lecciones de su padre, quien, después de la jornada laboral, cantaba acompañándose al arpa. Dotado de una hermosa voz, en 1738 Haydn fue enviado a Hainburg, y dos años más tarde a Viena, donde ingresó en el coro de la catedral de San Esteban y tuvo oportunidad de perfeccionar sus conocimientos musicales.

El año 1761 se produciría un giro decisivo en la carrera del joven músico: fue entonces cuando los príncipes de Esterházy –primero Paul Anton y poco después, a la muerte de éste, su hermano Nikolaus– lo tomaron a su servicio. Haydn tenía a su disposición una de las mejores orquestas de Europa, para la que escribió la mayor parte de sus obras orquestales, operísticas y religiosas.

El fallecimiento en 1790 del príncipe Nikolaus y la decisión de su sucesor, Paul Anton, de disolver la orquesta de la corte motivó que Haydn, aun sin abandonar su cargo de maestro de capilla, instalara su residencia en Viena. Ese año, y por mediación del empresario Johann Peter Salomon, el músico realizó su primer viaje a Londres, al que siguió en 1794 un segundo. En la capital británica, además de dar a conocer sus doce últimas sinfonías, tuvo ocasión de escuchar los oratorios de Haendel, cuya impronta es perceptible en su propia aproximación al género con *La Creación* y *Las estaciones*.

Fallecido Paul Anton ese mismo año de 1794, el nuevo príncipe de Esterházy, Nikolaus, lo reclamó de nuevo a su servicio, y para él escribió sus seis últimas misas, entre las cuales destacan las conocidas como *Misa Nelson* y *Misa María Teresa*. Los últimos años de su existencia vivió en Viena, entre el reconocimiento y el respeto de todo el mundo musical.

La aportación de Haydn fue trascendental en un momento en que se asistía a la aparición y consolidación de las grandes formas instrumentales.

467 Contenido obtenido de la dirección "<http://es.wikipedia.org/wiki/HWV>" en fecha 27/06/2012.

468 Contenido obtenido y resumido de la dirección "<http://www.biografiasyvidas.com/biografia/h/haydn.htm>" en fecha 6/6/2012



## Haydn Michael

Nació en Rohrau, y como su hermano, cantaba en el coro de San Esteban en Viena. Poco después de salir del coro-escolanía, lo nombraron maestro de capilla en Grosswardein, y en 1762, en Salzburgo, donde hará amistad con Leopold Mozart y más adelante con el hijo de éste Wolfgang Amadeus Mozart. Era amigo íntimo de Mozart, que tenía en alta opinión su obra, y fue profesor de Carl Maria von Weber y Anton Diabelli.<sup>469</sup>

### Hoboken (Catálogo)

Las obras de F.J.Haydn están clasificadas hoy día según el sistema creado por *Anthony van Hoboken*, y revisado y completado por *Robbins Landon* y su mujer *Christa*, que ha sido adoptado universalmente, aunque actualmente se sabe que no refleja con exactitud la cronología de la composición de las obras, criterio usado por *Hoboken* en el catálogo. Cada obra se identifica con una cifra romana que corresponde con la categoría, que en la mayoría de los casos corresponde con un género. Algunas categorías tienen subdivisiones, cosa que se indica con una letra minúscula. A continuación aparece un número en numeración arábica que corresponde con el orden de la obra concreta dentro de la categoría.<sup>470</sup>

- Categoría I: 104 sinfonías
- Categoría Ia: 16 oberturas
- Categoría II: 24 divertimentos, 8 nocturnos, 6 scherzandos
- Categoría III: 68 cuartetos de cuerda
- Categoría IV: 11 divertimentos a tres voces
- Categoría V: 31 tríos para cuerdas
- Categoría VI: 6 dúos para violín y viola
- Categoría VII: conciertos: 4 para violín, 2 para violonchelo, 1 para contrabajo, 3 para trompa, 1 para trompeta, 1 para flauta travesera, y 5 para "lira organizzata"
- Categoría VIII: 8 marchas
- Categoría IX: diversas danzas, minuets, allemande, etc., tríos
- Categoría X et XII: obras diversas para barítono (octetos, quintetos, dúos)
- Categoría XI: 126 tríos para barítono
- Categoría XIII: 3 conciertos para barítono
- Categoría XIV: 16 concertinos para piano y cuerda
- Categoría XV: 45 tríos para piano
- Categoría XVI: 62 sonatas para piano
- Categoría XVII: diversas piezas para piano
- Categoría XVIII: 11 conciertos para instrumentos de teclado
- Categoría XIX: piezas de reloj musical
- Categoría XX: *Las siete últimas palabras de Cristo en la cruz* (versión original y transcripciones)
- Categoría XXa-c: dúos, tríos y cuartetos vocales
- Categoría XXI: 3 oratorios
- Categoría XXII: 14 misas
- Categoría XXIII: obras religiosas diversas
- Categoría XXIVa: 11 cantatas y coros profanos para orquesta
- Categoría XXIVb: 24 arias profanas con orquesta
- Categoría XXVIa: *lieds* (canciones) con acompañamiento de piano
- Categoría XXVIIb: cantatas y coros con instrumentos
- Categoría XXVII: 10 cánones religiosos y 47 cánones profanos
- Categoría XXVIII: 13 óperas

---

469 Contenido obtenido en la dirección "[http://es.wikipedia.org/wiki/Michael\\_Haydn](http://es.wikipedia.org/wiki/Michael_Haydn)" en fecha 23/09/2012

470 Contenido obtenido en la dirección "<http://es.wikipedia.org/wiki/Hoboken-Verzeichnis>" en fecha 11/6/2012

- Categoría XXIX: óperas para marionetas y *singspiel*
- Categoría XXX: música de escena
- Categoría XXXI: arreglos
- Categoría XXXII: *pasticcios*

De algunas de sus obras se dispone del autógrafo manuscrito, pero en la mayor parte de los casos sólo se conservan copias. Algunas de las obras son de origen dudoso, posiblemente apócrifo. A medida que crecía su fama, los editores y copistas tenían menos miramientos a la hora de difundir bajo su nombre obras de otros autores menos conocidos. Los estudios críticos del siglo XX han permitido restablecer la auténtica paternidad de estas obras.

Varias composiciones que se citan en el catálogo o que son completamente desconocidas, han desaparecido, probablemente destruidas por los incendios que sufrieron el castillo de Eszterházy y la casa del compositor.

## Hoffstetter Roman

(1742 - 1815) fue un compositor clásico y monje benedictino, que admiraba a Haydn al punto de copiarlo. Algunas de sus composiciones (llamadas los seis Cuartetos de Cuerdas Opus 3, conocidas también como la Serenata de Haydn), fueron atribuidas por error a su famoso contemporáneo. Publicó, otros cuartetos de cuerdas (Op. 1 por Diller y Hummel en 1771 y Op. 2 en 1782), bajo su propio nombre. Además de estas obras, existen cerca de 2 o 3 cuartetos conservados de manera manuscrita.<sup>471</sup>

Hoffstetter tomó los hábitos como *Pater Romanus* en el monasterio benedictino de Amorbach en 1763, permaneciendo allí hasta la secularización de este, en 1803. No se conoce nada acerca de sus estudios tempranos o de su vida, aunque se puede suponer que provenía de una familia con conocimientos musicales. Accedió en poco tiempo a la posición de *Regens Chori* (Director de Coro), además de officiar como organista y algunas veces de sacerdote en la región de Odenwald, aunque su cargo principal en el monasterio era el de *Kuchenmeister* (Cocinero Maestro). Además de sus cuartetos de cuerdas (que debieron ser cuidadosamente revisados, ya que poseían notables parecidos estilísticos con Haydn), Hoffstetter compuso cerca de 10 misas (muchas de las cuales fueron preservadas en los archivos de la Arquidiócesis en Würzburg), así como un pequeño número de obras para iglesia, incluyendo un Miserere perdido en el que colaboró con el compositor Suizo-Alemán Joseph Martin Kraus (1756-1792). En adición, existen 3 conciertos para Viola ofrecidos a la venta en el catálogo Breiktopf en 1785. Podría decirse que ellos son los mejores ejemplos y promotores del virtuosismo para Viola escritos en el siglo XVIII, y, de ser genuinos, podrían representar la cúspide de la carrera creativa de Hoffstetter. [Fine, M., "The Viola Concertos of Fr. Roman Hoffstetter, OSB", DMA diss., Memphis St. Univ., 1990]

Siguiendo la secularización de Amorbach, Hoffstetter se retiró, sordo y ciego casi por completo, a Miltenburg am Main con su abad, Benedikt Kuelsheimer. La mayoría de los trabajos escritos para Amorbach fueron perdidos en la disolución de la biblioteca monástica por tropas francesas en 1803.

## Homilius Gottfried August

(1714-1785) Fue un compositor alemán, cantante y organista nacido en Rosenthal, Sajonia, hijo de un pastor luterano. Homilius comenzó su formación como alumno de la *Annenschule* en Dresde. Más tarde estudió música en Leipzig, donde fue discípulo de Johann Sebastian Bach. Desde 1742 fue organista de la *Frauenkirche* en Dresde, y desde 1755 hasta su muerte, fue cantor de la *Kreuzkirche* en Dresde y director musical de las tres principales iglesias de Dresde. Su principal

---

<sup>471</sup> Contenido obtenido de "[http://es.wikipedia.org/wiki/Roman\\_Hoffstetter](http://es.wikipedia.org/wiki/Roman_Hoffstetter)" en fecha 23/09/2012.

lugar de trabajo estaba en la Iglesia de Nuestra Señora, la *Kreuzkirche* que fue destruida en 1760, y no se reconstruyó hasta después de su muerte.<sup>472</sup>

Homilius compuso principalmente música sacra: más de 10 Pasiones (una impreso en 1775), un oratorio de Navidad (1777) y para la Pascua, más de 60 motetes, más de 150 cantatas (seis arias aparecidas en 1786), corales, preludios, y obras corales. Homilius fue profesor de Daniel Gottlob Türk (compositor clásico).

Sus composiciones vocales gozaron de gran popularidad en el siglo XIX, como demuestra el gran número de copias que aún existen.

## Joplin Scott

(1868-1917) Pianista y compositor estadounidense. Llevó a su perfección formal el ragtime clásico, en el cual se aprecia un sentido rítmico próximo al del jazz. Compuso también óperas (*Treemonisha*, 1911).<sup>473</sup>

Scott Joplin fue el segundo de seis hijos. Nació en la parte oriental de Texas, fuera de Texarkana, de Jiles Joplin y Florence Givins. Muestra su habilidad musical a temprana edad y aprende a tocar la guitarra y la corneta; a los ocho años se inicia su afición por el piano. Estudió música por primera vez en Texarkana con un profesor de música alemán (Julius Weiss), impresionado por sus primeras improvisaciones cuando tenía once años. La base de sus clases era el estudio de la armonía de acuerdo con la tradición europea.

Tras morir su madre en 1882, Joplin, ante la presión por parte de su padre para que aprendiese un oficio, abandona el hogar familiar. Se instaló itinerantemente en el valle del Mississippi y trabajó como pianista en bares y prostíbulos, lugares donde empleaban a la mayoría de los músicos de raza negra. Sus experiencias musicales de esos años le sirvieron en el futuro como inspiración rítmica y melódica.

Comenzó a vivir en 1885 en la región de San Luis-Sedalia, donde conoció a otros pioneros del ragtime como Tom Turpin, Arthur Marshall y Louis Chauvin. Joplin estudió en la *Universidad George Smith* para alumnos negros, donde siguió cursos de armonía y composición. En 1893 actuó, con una orquesta propia en la que tocaba el piano y la corneta, en la *World's Columbian Exposition* de Chicago, y un año después se trasladó a Sedalia (Misuri).

En 1895 publicó sus primeras canciones, temas como "A picture of Her Face" y "Please Say You Will". Fue en Sedalia donde publicó, en 1899, *Original Rags* y *Maple Leaf Rag* (su obra más importante y uno de los rags más famosos que se han editado, que llegó a vender cientos de miles de copias de su partitura); también abrió un centro de enseñanza. El éxito como compositor le llevó a componer más de cincuenta obras para piano entre 1895 y 1917.

En 1906 se desplazó a Chicago y en 1907 se trasladó a Nueva York, donde se asentaría definitivamente dos años más tarde. Cuatro años después publicó, con su propio dinero, la ópera *Treemonisha*, obra con la que intentó ir más allá del ragtime, para crear una ópera exclusiva de los afroamericanos. Se estrenó en 1915 en una versión de concierto, sin decorados, pero fracasó de cara al público; este hecho provocó en el compositor una depresión que le llevó a sufrir diversos trastornos mentales y problemas físicos de coordinación.

---

472 Contenido obtenido y traducido de "[http://en.wikipedia.org/wiki/Gottfried\\_August\\_Homilius](http://en.wikipedia.org/wiki/Gottfried_August_Homilius)" en fecha 7/7/2012.

473 Contenido obtenido y resumido de las direcciones "[http://www.biografiasyvidas.com/biografia/j/joplin\\_scott.htm](http://www.biografiasyvidas.com/biografia/j/joplin_scott.htm)" y "[http://es.wikipedia.org/wiki/Scott\\_Joplin](http://es.wikipedia.org/wiki/Scott_Joplin)" en fecha 6/6/2012

## Kirkpatrick Ralph

(1911 - 1984) Clavecinista y musicólogo estadounidense. Estudió en Harvard hasta 1931 piano y notación musical, completando su formación con Nadia Boulanger y Wanda Landowska en París, Arnold Dolmetsch en Haslemere, Heinz Tiessen en Berlín y Günther Ramin en Leipzig.<sup>474</sup>

Tras impartir docencia en el Mozarteum de Salzburgo, pasó a ser en 1940 profesor en la Universidad de Yale, donde editó un nuevo catálogo de las obras de Domenico Scarlatti, que pasó a sustituir al de Alessandro Longo, ya anticuado.

Adquirió notoriedad por sus grabaciones de las sonatas para clave de Johann Sebastian Bach y Domenico Scarlatti.

Las obras de Domenico Scarlatti, habitualmente, se indican con una "K" delante del número, para señalar que se citan según el catálogo de Kirkpatrick.

## Köchel Catálogo

El catálogo Köchel fue creado por Ludwig von Köchel en 1862 y enumera las obras musicales compuestas por Wolfgang Amadeus Mozart (1756-1791). Cada una de las obras de Mozart está designada por un número precedido de la abreviatura *K.* o *KV.* El orden cronológico que Köchel pretendió dar al catálogo es realmente válido para la mayoría de las obras. Sin embargo, en la primera edición del catálogo aparecen algunas obras de otros autores atribuidas erróneamente a Mozart, y omite otras auténticas que aún no habían sido descubiertas.<sup>475</sup>

El catálogo tuvo varias revisiones; en particular la 3ª edición, de 1936, llevada a cabo por Alfred Einstein, reubicó una gran cantidad de obras en el lugar que se estimó correcto, con el expediente de agregar una letra al número original, de manera de no alterar el número propio de Köchel.

En las décadas posteriores a la muerte de Mozart hubo varios intentos para catalogar sus composiciones, pero no se realizaron con éxito hasta que Ludwig von Köchel las listó en su catálogo en 1862. La página 551 del catálogo Köchel fue titulada “Catálogo cronológico y temático completo de la obra musical de Wolfgang Amadé Mozart”. El catálogo incluyó los primeros pentagramas de cada obra a la manera de *incipit*.

Köchel intentó ordenar las obras por orden cronológico, pero las composiciones anteriores a 1784 sólo tienen dataciones estimadas. Desde que Köchel elaboró el listado se han encontrado numerosas piezas que se han atribuido a otros autores o se les ha asignado una fecha diferente, por lo que han sido necesarias tres revisiones posteriores. Estas revisiones, especialmente la tercera llevada a cabo por Alfred Einstein en 1937, y la sexta de Franz Giegling, Gerd Sievers y Alexander Weinmann en 1964, incorporan numerosas correcciones.

Aun así, los números dados por Köchel son una forma rápida de estimar cuándo compuso Mozart una obra en particular. Para un número KV mayor que 100, se puede dividir por 25 y sumar 10, para estimar la edad de Mozart cuando compuso la obra; si se suma 1756 (el año de su nacimiento), se obtiene el año aproximado de la composición. Las letras fueron añadidas como nuevos números para mantener la numeración original del listado de Köchel mientras se reordenaba y revisaba la secuencia cronológica. Otros apéndices y suplementos al catálogo son marcados como *KVA(nhang)*.

---

474 Contenido obtenido de “[http://es.wikipedia.org/wiki/Ralph\\_Kirkpatrick](http://es.wikipedia.org/wiki/Ralph_Kirkpatrick)” en fecha 23/6/2012.

475 Contenido obtenido y resumido de “[http://es.wikipedia.org/wiki/Catálogo\\_Köchel](http://es.wikipedia.org/wiki/Catálogo_Köchel)” en fecha 11/6/2012.

## Kraft Antonín

(1752-1820) Violonchelista y compositor checo. Fué un amigo cercano a F.J.Haydn, W.A.Mozart y L.v.Beethoven.<sup>476</sup>

Kraft nació en el pueblo bohemio *Rokycany*. Recibió educación musical temprana en el violonchelo con su padre antes de ir a la universidad en Viena para estudiar derecho. Pronto obtuvo un puesto en la *Hofkapelle Imperial*. En 1778 fue nombrado violonchelista en la orquesta príncipe Nikolaus Esterházy, donde conoció y estudió composición con Haydn. Después de la muerte del príncipe Esterházy en 1790, se trasladó a Viena y se convirtió en miembro fundador del cuarteto *Schuppanzigh*, donde ayudó a establecer la tradición de tocar la forma cuarteto de cuerda. Él tocó en la corte *Grassalkovich* y desde 1796 trabajó en la orquesta del príncipe *Lobkowitz*. Murió el 28 de agosto de 1820 en Viena.

Kraft fue considerado uno de los más grandes violonchelistas de su tiempo y el concierto para violonchelo nº2 escrito por Haydn en ReM y la parte de violonchelo en el Triple Concierto de Beethoven fueron escritos para él, aunque su hijo Nikolaus Kraft también se postula por haber tocado el estreno de éste último.

Como compositor, escribió sonatas para violonchelo (seis para violonchelo con bajo publicadas como Op. 1 y 2) y un concierto para violonchelo (Op. 4). También escribió varios dúos: para violín y cello (Op. 3), para violonchelo y contrabajo y dos violonchelos (Op. 5 y 6).

## Krebs Johann Ludwig

(1690-1762) Fue el tercer hijo de Johann Tobias Krebs, quien desde el año 1710 era Cantor en la ciudad de Buttstedt; esto no le impidió ir caminando, dos veces por semana, a Weimar para estudiar entre los años 1711 y 1716 con Bach, a quien le enviaría sus tres hijos para aprender su arte.<sup>477</sup>

Entre los años 1726 y 1735 fue alumno en la Escuela de Santo Tomás, en Leipzig, en donde estudió composición y teclado (especialmente órgano) con Johann Sebastian Bach. Pese a que era bastante pequeño, apenas un adolescente, su técnica y conocimiento musical le permitió ser (junto con Wilhelm Friedemann Bach, el hijo mayor de Bach) uno de los tres *Prefectos* del coro. Este cargo le acarreó varios disgustos (especialmente con el rector Ernesti), viéndose obligado a sustituir a Bach cuando éste tenía que dirigir los coros de otras iglesias. Asistió a los disgustos de su maestro cuando el rector impuso distintos *prefectos* mal preparados y siempre le sacó del apuro dirigiendo él mismo, pese a que no tenía ni 20 años.

Al terminar sus estudios, el propio Bach escribió una elogiosa carta de recomendación para su joven y prometedor alumno, ya que era un consumado organista aunque también tocaba otros instrumentos (Bach escribe de él: ... *se distingue musicalmente entre nosotros por su maestría al clave, el violín y el laúd, no menos que en la composición...*

Entre los años 1737 y 1743 ocupó el cargo de organista en la iglesia de Santa María, en la ciudad de Zwickau, de 1744 a 1756 lo fue en Zeitz y desde 1756 en Altenburg, Turingia.

Era un alumno muy aplicado y querido por Bach, no sólo por su relación musical, sino personal: en una ocasión dijo de él: *es el único cangrejo de mi arroyo*, jugando familiarmente con sus apellidos alemanes (Krebs, *cangrejo*, Bach, *arroyo*).

En palabras de Gottsched, uno de sus biógrafos, fue *uno de los más diestros aprendices del Maestro de Capilla Bach*, siendo conocido en la actualidad por su virtuosismo al órgano; dejó

---

<sup>476</sup> Contenidos obtenidos traducidos y resumidos de "[http://en.wikipedia.org/wiki/Antonín\\_Kraft](http://en.wikipedia.org/wiki/Antonín_Kraft)" en fecha 24/9/2012.

<sup>477</sup> Contenido obtenido de "[http://es.wikipedia.org/wiki/Johann\\_Ludwig\\_Krebs](http://es.wikipedia.org/wiki/Johann_Ludwig_Krebs)" en fecha 2/7/2012.

numerosas composiciones para este instrumento, algunas de ellas editadas por el propio Bach a sus expensas. También dejó conciertos, sinfonías, tríos y sonatas para diversos instrumentos.

## **Longo Alessandro**

(1864-1945) Pianista y compositor italiano. Fue alumno de B. Cesi y de P. Serrao y profesor del Conservatorio de Nápoles. Es autor de una abundante producción pianística y de música de cámara. Tocó con el cuarteto Forni y con el cuarteto Napoletano. Fundó numerosas instituciones musicales en Nápoles. Redescubrió y editó las obras de D. Scarlatti, de quien publicó 11 volúmenes de sonatas (1900-1954). Dicho catálogo así como su ordenación cronológica fue revisado en profundidad más tarde por Kirkpatrick.<sup>478</sup>

## **Mendelssohn Felix**

(1809 - 1847) Compositor, pianista y director de orquesta alemán. Su música, de una gran perfección técnica y formal, es una espléndida síntesis de elementos clásicos y románticos. Romántico que cultivaba un estilo clásico o clásico que reflejaba una expresividad romántica, Mendelssohn fue uno de los músicos más influyentes y destacados del romanticismo.<sup>479</sup>

Segundo de cuatro hermanos, nació en el seno de una familia de banqueros de origen judío, que se había convertido al protestantismo. Niño prodigio, pronto dio muestras de un inusitado talento no sólo para la música, sino también para el dibujo, la pintura y la literatura. Sus dotes fueron estimuladas por un ambiente familiar en el que siempre se alentaron las manifestaciones artísticas.

Fue un buen intérprete de violín, viola y piano, facetas a las que más tarde se añadiría la de director de orquesta. En este ámbito, una de sus primeras y más recordadas actuaciones tuvo lugar en 1829, cuando interpretó en Berlín la *Pasión según san Mateo*, de Bach, en un concierto que supuso la recuperación de esta obra después de un siglo de olvido.

Pocos años más tarde, en 1835, le fue confiada la dirección de la orquesta de la Gewandhaus de Leipzig, cargo que ejerció hasta su prematura muerte.

Compuso 7 cuartetos de cuerda en Si b Mayor, Op.12 (1829), en La menor, Op. 13 (1827), en Re Mayor, Mi menor y Mi bemol Mayor, Op. 44 (1837-38), en Fa menor, Op. 80 (1847) y Op. 81 (1827-47).<sup>480</sup>

## **Mozart Leopold**

Johann Georg Leopold Mozart (1719 – 1787) fue un compositor, director, profesor y violinista. Es conocido particularmente por su participación en la educación de su hijo Wolfgang Amadeus Mozart y por la publicación de su libro *Versuch einer gründlichen Violinschule (Tratado completo sobre la técnica del violín)*, publicado en Augsburgo en 1765 y traducido a varias lenguas.<sup>481</sup>

En 1740, comenzó su carrera como músico profesional, haciéndose violinista y criado de uno de los cánones de la Universidad, Johann Baptist, Conde de Thurn-Valsassina y Taxis. Este también fue el año de su primera publicación, Las 6 sonatas a tres, Op 1, tituladas *Sonate sei da chiesa e da camera*, donde el mismo Leopold hizo el trabajo de grabado en cobre. Además, prosiguió componiendo una serie de cantatas de pasión alemanas.

A los 28 años se casó con Anna Maria Pertl. Tuvo siete hijos, cinco de los cuales murieron en la infancia. Afortunadamente, sobrevivieron sus dos niños prodigios: Maria Anna Ignatia y Johannes

478 Contenido obtenido de "[http://www.biografiasyvidas.com/biografia/l/longo\\_alessandro.htm](http://www.biografiasyvidas.com/biografia/l/longo_alessandro.htm)" y "[http://en.wikipedia.org/wiki/Alessandro\\_Longo](http://en.wikipedia.org/wiki/Alessandro_Longo)" en fecha 23/6/2012.

479 Contenido obtenido y resumido de "<http://www.biografiasyvidas.com/biografia/m/mendelssohn.htm>" en fecha 5/6/2012.

480 Contenido obtenido en "[http://es.wikipedia.org/wiki/Anexo:Obras\\_de\\_Felix\\_Mendelssohn](http://es.wikipedia.org/wiki/Anexo:Obras_de_Felix_Mendelssohn)" en fecha 5/6/2012.

481 Contenido obtenido en "[http://es.wikipedia.org/wiki/Leopold\\_Mozart](http://es.wikipedia.org/wiki/Leopold_Mozart)" en fecha 23/09/2012.

Chrysostomus Wolfgangus Theophilus Mozart. Al darse cuenta del talento de sus hijos, disminuyó su actividad creativa y se volcó en su instrucción.

Durante este periodo compuso sonatas, tanto para clavecín como para violín (1763), una sinfonía (1764), un oratorio (1766) y la ópera cómica *La finta semplice* (1768). En 1769 fue nombrado *Konzertmeister* del arzobispado de Salzburgo, y en La Scala de Milán el Papa le hizo caballero de la Orden de la Espuela Dorada. Ese mismo año compuso *Bastien und Bastienne*, su primer *singspiel* (tipo de ópera alemana con partes recitadas). Al año siguiente le encargaron escribir su primera gran ópera, *Mitridates, rey del Ponto* (1770), compuesta en Milán. Con esta obra su reputación como músico se afianzó todavía más. Mozart volvió a Salzburgo en 1771.

## Mozart Wolfgang Amadeus

(1756-1791) Compositor austriaco. Franz Joseph Haydn manifestó en una ocasión al padre de Mozart, Leopold, que su hijo era "el más grande compositor que conozco, en persona o de nombre". El otro gran representante de la trinidad clásica vienesa, Beethoven, también confesaba su veneración por la figura del músico salzburgués, mientras que el escritor y músico E. T. A. Hoffmann consideraba a Mozart, junto a Beethoven, el gran precedente del romanticismo, uno de los pocos que había sabido expresar en sus obras aquello que las palabras son incapaces de insinuar siquiera.<sup>482</sup>

Son elogios elocuentes acerca del reconocimiento de que gozó Mozart ya en su época, y que su misteriosa muerte, envuelta en un halo de leyenda romántica, no ha hecho sino incrementar. Genio absoluto e irrepitible, autor de una música que aún hoy conserva intacta toda su frescura y su capacidad para sorprender y emocionar, Mozart ocupa uno de los lugares más altos del panteón de la música.

Hijo del violinista y compositor Leopold Mozart, Wolfgang Amadeus fue un niño prodigio que a los cuatro años ya era capaz de interpretar al clave melodías sencillas y de componer pequeñas piezas. Junto a su hermana Nannerl, cinco años mayor que él y también intérprete de talento, su padre lo llevó de corte en corte y de ciudad en ciudad para que sorprendiera a los auditorios con sus extraordinarias dotes. Munich, Viena, Frankfurt, París y Londres fueron algunas de las capitales en las que dejó constancia de su talento antes de cumplir los diez años.

No por ello descuidó Leopold la formación de su hijo: ésta proseguía con los mejores maestros de la época, como Johann Christian Bach, el menor de los hijos del gran Johann Sebastian, en Londres, o el padre Martini en Bolonia. Es la época de las primeras sinfonías y óperas de Mozart, escritas en el estilo galante de moda, poco personales, pero que nada tienen que envidiar a las de otros maestros consagrados.

Todos sus viajes acababan siempre en Salzburgo, donde los Mozart servían como maestros de capilla y conciertos de la corte arzobispal. Espoleado por su creciente éxito, sobre todo a partir de la acogida dispensada a su ópera *Idomeneo*, Mozart decidió abandonar en 1781 esa situación de servidumbre para intentar subsistir por sus propios medios, como compositor independiente, sin más armas que su inmenso talento y su música. Fracásó, en el empeño, pero su ejemplo señaló el camino a seguir a músicos posteriores, a la par también de los cambios sociales introducidos por la Revolución Francesa; Beethoven o Schubert, por citar sólo dos ejemplos, ya no entrarían nunca al servicio de un mecenas o un patrón.

Tras afincarse en Viena, la carrera de Mozart entró en su período de madurez. Las distintas corrientes de su tiempo quedan sintetizadas en un todo homogéneo, que si por algo se caracteriza es por su aparente tono ligero y simple, apariencia que oculta un profundo conocimiento del alma humana. Las obras maestras se sucedieron: en el terreno escénico surgieron los *singspieler* *El rapto*

---

482 Contenido obtenido en "<http://www.biografiasyvidas.com/biografia/m/mozart.htm>" en fecha 6/6/2012.

*del serrallo* y *La flauta mágica*, partitura con la que sentó los cimientos de la futura ópera alemana, y las tres óperas bufas con libreto de Lorenzo Da Ponte *Las bodas de Fígaro*, *Don Giovanni* y *Così fan tutte*, en las que superó las convenciones del género.

No hay que olvidar la producción sinfónica de Mozart, en especial sus tres últimas sinfonías, en las que anticipó algunas de las características del estilo de Beethoven, ni sus siete últimos conciertos para piano y orquesta. O sus cuartetos de cuerda, sus sonatas para piano o el inconcluso *Réquiem*. Todas sus obras de madurez son expresión de un mismo milagro. Su temprana muerte constituyó, sin duda, una de las pérdidas más dolorosas de la historia de la música.

## Música Sacra

La música sacra (del latín *sacer*; *sacra*, *sacrum*: "santo, augusto") es la forma de expresión musical nacida en Europa hacia la Alta Edad Media (siglo V) y desarrollada como parte de los ritos cristianos de la época.<sup>483</sup>

Más que un género musical era una forma de evangelización, donde a través de sonidos primeramente monódicos y fuerte presencia vocal, se relataba un pasaje bíblico o se destacaban virtudes y valores cristianos.

El término significa *música sagrada* (*Sacrare* o "consagrar") que a su vez deriva de *sacratus* ("sagrado, consagrado") pero, dada su connotación y origen occidental, es de uso primordial en el cristianismo. Aunque por extensión puede ser aplicable a las diferentes manifestaciones músico-religiosas de otros pueblos, ya sean de origen indio, árabe, judío, u oriental, en el pensamiento occidental se suele reservar su uso para la música cristiana, incluyendo a veces la música cristiana contemporánea, en la cual la música explora temas cristianos para la juventud, aunque por su diseño puede ser tocada en otros lugares con excepción de iglesias.

La música sacra durante un servicio religioso para muchas iglesias es una parte fundamental de su liturgia. Se cantan kyries, himnos, salmos y canciones espirituales entonadas a Dios.

## Ockeghem Johannes

(1410 – 1497) El primer dato fidedigno sobre su actividad musical proviene de la catedral de Nôtre-Dame de Amberes donde fue vicario cantor en 1443. Entre 1446 y 1448 estuvo al servicio de Carlos I, Duque de Borbón, en Moulins (Francia). En torno a 1452 se trasladó a París donde sirvió como maestro de capilla en la corte francesa con Carlos VII y con Luis XI. Llegó a ser el tesorero de la catedral de Saint Martín en Tours y ocupó puestos de responsabilidad en Notre Dame (París) y en Saint Benoît. Se sabe que viajó a España en 1470 como parte de un intento de casar a Isabel la Católica con el duque de Guyenne, hermano de Luis XI. No se sabe mucho sobre la vida de Ockeghem después de la muerte de Luis XI en 1483, salvo que estuvo en Brujas y en Tours donde probablemente murió ya que fue allí donde se encontró su testamento<sup>484</sup>.

Ockeghem pasó la mayor parte de su vida activa en Tours (Francia) y desde allí se desplazaba para realizar los cometidos que le eran propios de su puesto de cantor. Los cantantes de la época de Ockeghem eran contratados obviamente por su voz (la de bajo de Ockeghem era prodigiosa) y por su habilidad para componer alguna música si fuera menester. Ockeghem poseía cierta "habilidad" para estos menesteres aunque a la hora de componer era bastante favorable a su propia voz. La falta de noticias sobre sus últimos años sugieren que se retiró al final de su vida debido a su avanzada edad. A su muerte, poetas como Cretin, Molinet y Erasmo escribieron odas de lamento, y Josquin des Prés y Johannes Lupi pusieron música a los dos primeros de estos poemas. Busnois, alumno del venerable maestro, le había dedicado en vida el motete *In hydraulis*.

---

483 Contenido obtenido en "[http://es.wikipedia.org/wiki/Música\\_sacra](http://es.wikipedia.org/wiki/Música_sacra)" en fecha 29/05/2012.

484 Contenido obtenido en la dirección "[http://es.wikipedia.org/wiki/Johannes\\_Ockeghem](http://es.wikipedia.org/wiki/Johannes_Ockeghem)" en fecha 1/12/2011



El talento de Ockeghem para la música es palpable y le hace ser uno de los más grandes compositores de la historia de la música, es su habilidad para usar los más enrevesados recursos técnicos en sus composiciones sin que estos nublen su belleza. Ockeghem compuso en un estilo muy de su tiempo; las voces se mueven con muchísima independencia y siempre en un sentido horizontal, pero sin un predominio del cantus (la parte más aguda). La presencia de un "cantus firmus" (por ejemplo la melodía de una determinada *chanson*) aparece generalmente en el tenor, y no condiciona el desarrollo de las otras voces, sino que sólo sirve de excusa para marcar un determinado ambiente tonal. La música sacra de Ockeghem ilustra fielmente las concepciones teológicas del momento que le tocó vivir y refleja con un gran apasionamiento los dogmas de fe que representa el texto en cada momento. De las misas compuestas por Ockeghem, una treintena se conservan en el Codex Chigi, un manuscrito flamenco hecho hacia el año 1500.

Ockeghem cuidó la acentuación propia de las palabras en su música. El acento musical estaba dado coincidentemente sobre el acento de la palabra que se cantaba. Pionero de esta cuestión fue Ockeghem.

Ockeghem fue un genio de la matemática. Su dominio de los cánones en diferentes intervalos y su uso de las prolaciones y del "cantus firmus" ha eclipsado durante décadas lo hermoso de su música. Por ejemplo, en su *Missa Prolationum* sólo aparecen escritas dos voces, con instrucciones para que se canten cánones en diferentes intervalos y tiempos (prolaciones) para conseguir la obra a cuatro voces que es en sí esta misa. Ockeghem suele aparecer simplemente como un compositor muy habilidoso, pero no debemos dejar que nuestra obsesión por descubrir tal canon o por intuir aquel "cantus firmus" nos impidan disfrutar de la música. Edward Wickham dijo recientemente que el conocimiento de la habilidad técnica de Ockeghem no hace que descubramos la belleza de su música, sino sólo que la admiremos más.

La producción de Ockeghem es bastante modesta: 14 misas y un Credo suelto (el Credo de village), 10 motetes (de los cuales sólo 4 son suyos sin duda) y 22 *chansons* (aparte de algunas más dudosas).

## **Pachelbel, Johann**

(1653-1706) Destacado compositor, clavicembalista y organista alemán del periodo barroco. Se cuenta entre los más importantes músicos de la generación anterior a Johann Sebastian Bach, de cuyo padre fue amigo. Entre sus numerosas composiciones hay que mencionar su célebre *Canon en Re mayor*, escrito para tres violines y bajo continuo, obra que ha sido objeto de numerosas grabaciones. Además de componer una gran cantidad de obras sacras y seculares, contribuyó al desarrollo del preludio de coral y fuga, lo que le granjeó un lugar entre los compositores más importantes de la era barroca.<sup>485</sup>

La música de Pachelbel gozó de mucha popularidad en su época, gracias a la cual obtuvo muchos alumnos y logró convertirse en un modelo para los compositores del sur y del centro de Alemania.

La música de Pachelbel fue influenciada por compositores de diversos orígenes, tales como Johann Jakob Froberger y Johann Kaspar Kerll del sur de Alemania, los italianos Girolamo Frescobaldi y Alessandro Poglietti, además de compositores franceses y de la llamada tradición de Núremberg.

Pachelbel se decantaba por un estilo lúcido y sin complicaciones, haciendo especial énfasis en la claridad melódica y armónica. Comparándola con la de Dieterich Buxtehude, la música de Pachelbel era menos virtuosa y audaz armónicamente; sin embargo, el compositor experimentó con los mismos ensambles y combinaciones de instrumentos tanto en su música de cámara, como en su

---

485 Contenido obtenido en la dirección "[http://es.wikipedia.org/wiki/Johann\\_Pachelbel](http://es.wikipedia.org/wiki/Johann_Pachelbel)" en fecha 11/07/2012

música vocal. Pachelbel exploró muchas técnicas y formas de variaciones musicales, dejándolas manifiestas en varias de sus obras, que fueron desde conciertos de música sacra hasta suites de clavicordios.

Pachelbel es autor de numerosas obras, entre las cuales destacan *Musikalisches Sterbensgedanken* (1683), *Musikalisches Erzätzung* (1691), ocho preludios para corales (1693), *Hexachordum Apollinis* (para clavicémbalo, 1699), y sus muchas composiciones para órgano (chaconas, fugas y tocatas), sus lieder espirituales, diversas piezas para clavicémbalo, corales variados, cantatas, fantasías, magnificats, algunas misas y motetes. A pesar de que fue un maestro del estilo cantabile (regularidad del desarrollo de las voces, armonía y ritmo), su música, tanto la instrumental como la vocal, fue olvidada poco después de su muerte y no se recuperó hasta la primera mitad del siglo XIX.

## **Paganini Niccolò**

(1782-1840) Violinista, guitarrista y compositor italiano. Rodeado de una aureola mefistofélica por sus propios contemporáneos, asombrados ante su dominio del instrumento y su vida desordenada y aventurera, Paganini fue el violinista por antonomasia del romanticismo. Niño prodigio, antes de cumplir los catorce años dominaba ya todos los secretos del violín, al extremo de que sus profesores reconocían no tener nada más que enseñarle. La gira que emprendió en 1828 por ciudades como Viena, Praga, Varsovia y Berlín lo consagró como el mejor violinista de su tiempo, capaz de extraer al instrumento música sonidos y efectos inconcebibles. Su estilo brillante y, en ocasiones, efectista, desarrolló de manera considerable las posibilidades técnicas del violín, explorando diversos recursos como las triples cuerdas, glissandi, pizzicati y arpeggios, explotados en sus propias composiciones en las que destacan los Veinticuatro caprichos para violín solo Op. 1 (1818), seis conciertos para violín y orquesta, nueve Cuartetos para guitarra y arcos (1806-1816) y piezas como La danza de las brujas (1813) y Tarantella (1830).<sup>486</sup>

## **Pergolesi Giovanni Battista**

(1710 - 1736) compositor, violinista y organista italiano del período Barroco. Su obra influyó profundamente en la escuela napolitana, y sirvió como prototipo por antonomasia de la ópera italiana. Confrontaría el gusto estético derivado de la tradición de la ópera seria francesa y el de los partidarios de la nueva ópera bufa italiana.<sup>487</sup>

Estudió música en Jesi con Francesco Santini, y luego viajó a Nápoles, donde estudió a partir de 1735 con Gaetano Greco y Francesco Feo entre otros. Pasó gran parte de su vida en el entorno de la corte de Nápoles, al servicio de aristócratas como los príncipes de Stigliano y el duque Marzio IV Maddaloni Carafa

Aunque nunca abandonó la península italiana, su fama como compositor de óperas italianas se extendió pronto. En 1746 se estrenó en París sin gran repercusión su obra más famosa, La serva padrona (1733). Sin embargo, el reestreno en París de esta ópera buffa en 1752 originaría la llamada "Querrela de los bufones", que confrontaría el gusto estético derivado de la tradición de la ópera seria francesa, representada por compositores como Jean-Baptiste Lully y Jean-Philippe Rameau, y el de los partidarios de la nueva ópera cómica italiana, generalmente asociados a los sectores ilustrados encabezados por Jean-Jacques Rousseau. Pergolesi fue considerado como modelo del estilo italiano durante esta controversia, que dividió a la comunidad musical de París durante dos años.

Con problemas de salud desde pequeño (se cree que sufría de espina bífida), Pergolesi murió a los 26 años, aparentemente de tuberculosis.

<sup>486</sup> Contenido obtenido en "<http://www.biografiasyvidas.com/biografia/p/paganini.htm>" en fecha 6/06/2012.

<sup>487</sup> Contenido obtenido y resumido en "[http://es.wikipedia.org/wiki/Giovanni\\_Battista\\_Pergolesi](http://es.wikipedia.org/wiki/Giovanni_Battista_Pergolesi)" en fecha 24/09/2012.

## Pestelli Giorgio

(1938-) Musicólogo italiano conocido principalmente por su catálogo de las 555 sonatas de Domenico Scarlatti publicado en 1967. Dicho catálogo soluciona anacronismos y propuso una nueva numeración para tan extenso catálogo musical.<sup>488</sup>

## Piccini Niccolò

(1728 – 1800) Compositor italiano, autor principalmente de obras vocales (sobre todo óperas) y también de varias piezas para clavecín y de música sacra. A pesar de que hoy es un autor poco conocido, fue uno de los compositores de ópera más populares de su época, figura central de la escena italiana y francesa de la segunda mitad del siglo XVIII, que contribuyó de manera determinante al desarrollo de la napolitana Opera buffa. Históricamente, tuvo la desgracia de aparecer entre predecesores de la talla de Pergolesi y algunos grandes que le siguieron, como Domenico Cimarosa y Mozart.<sup>489</sup>

Alumno del conservatorio S. Onofrio de Nápoles, tuvo como profesores a Leonardo Leo y Francesco Durante y como compañero de estudio a Pasquale Anfossi. Compuso su primera ópera, *Donne dispettose*, en 1754 y su primera ópera seria, *Zenobia* (1756), fue estrenada en el Teatro San Carlo. En 1758, escribió una nueva ópera, *Alexandre aux Indes* con libreto de Metastasio. Después, Piccinni consiguió un encargo para Roma y se mudó allí en 1758, donde tuvo un éxito considerable, con obras como *La buona figliuola* (1760). Compuso a continuación más de cincuenta nuevas obras líricas, y rehizo *Alexandre aux Indes* en 1774. Pero fue apreciado sobre todo por sus óperas bufas. En 1773, su reputación en Roma comenzó a palidecer frente a la de Anfossi y, en 1776, aceptó una invitación de la corte de Francia y se convirtió en profesor de canto de la reina Maria Antonieta y director del Théâtre-Italien. Decidió entonces consagrarse principalmente a la escritura de óperas y, en 1778, compuso su primera ópera francesa, *Roland*, que le supuso un importante renombre.

Fue en París donde encontró a otro compositor con el que tuvo una rivalidad bien conocida, Gluck, el reformador de la ópera con el objetivo de introducir en ella más verdad dramática. Su disputa, conocida como la Querrela de gluckistas y piccinnistas aumentó la notoriedad de Piccinni, pero al final salió triunfante Gluck. La ópera *Iphigénie en Tauride* de Piccinni (1781) fue representada dos años después de la obra homónima de su oponente.

En 1783 Piccinni hizo representar *Didon*, considerada como su obra más lograda. El mismo año, la corte de Francia acordó concederle una pensión. Pero a partir de 1784, atravesó un periodo difícil y la competencia de Antonio Sacchini y de Antonio Salieri le pusieron en dificultades y varias de sus óperas fueron fracasos de público, en particular su *Pénélope*, en 1785. Conociendo algunos problemas durante la Revolución francesa, se le retiró la pensión en 1791 y el matrimonio de su hija con un jacobino le valió una estancia en prisión. Volvió a Nápoles y de allí a Venecia, donde compuso *Griselda* (1793). Más tarde, en 1798, regresó a París, donde fue nombrado sexto inspector del Conservatorio de París. Su salud estaba por entonces ya muy deteriorada y no pudo cumplir los deberes de su cargo.

## Pleyel Ignace Joseph

(1757 - 1831) Compositor, editor musical y fabricante de pianos austriaco. Fue alumno de Joseph Haydn y de Johann Baptist Vanhal en Bratislava y en la corte de los príncipes Esterházy en Eisenstadt. Posteriormente, perfeccionó su técnica en Italia.<sup>490</sup>

---

488 Contenido obtenido en la dirección “[http://en.wikipedia.org/wiki/Giorgio\\_Pestelli](http://en.wikipedia.org/wiki/Giorgio_Pestelli)” en fecha 23/06/2012

489 Contenido obtenido de “[http://es.wikipedia.org/wiki/Niccolò\\_Piccinni](http://es.wikipedia.org/wiki/Niccolò_Piccinni)” en fecha 24/09/2012.

490 Contenido obtenido y resumido de “[http://es.wikipedia.org/wiki/Ignace\\_Joseph\\_Pleyel](http://es.wikipedia.org/wiki/Ignace_Joseph_Pleyel)” en fecha 24/09/2012.

En 1789, es nombrado maestro de capilla de la catedral de Estrasburgo. Sucede en dicho puesto a François-Xavier Richter.

Al mismo tiempo que su antiguo profesor y amigo Joseph Haydn, pasó en Londres el año 1791.

A partir de 1795, vive en París y abre su primera tienda de música y una casa de ediciones musicales. En su deseo de adaptar los instrumentos a las cada vez mayores exigencias de compositores e intérpretes, concibe, en 1802, su primer piano provisto de un sistema de escape simple, en el que las cuerdas son percutidas por un martillo y no pinzadas (como en el caso del clavecín). Registra la patente en 1807.

Pleyel funda en 1809 una floreciente fábrica de pianos que lleva su nombre y cuya marca, Pleyel, está todavía activa en nuestros días.

## **Rachmaninoff Sergei**

(1873-1943), de descendencia ruso-americana, fue compositor, pianista y director de orquesta. Uno de los pianistas más brillantes del siglo XX, cuyas composiciones son consideradas como la mayor expresión musical de la era romántica.<sup>491</sup>

Rachmaninoff nació el 1 de Abril de 1873, cerca de Novgorod. En Moscú sus profesores de piano incluyeron al estricto Nikolay Zeverov y Aleksandr Silote, primo de Rachmaninoff quien le recomendó a su propio maestro, el pianista y compositor húngaro Franz Liszt. Además, el autor estudió con tres eminentes compositores rusos: Antón Arensky, Sergey Taneyev y su mentor de música más importante, Peter Ilich Tchaikovsky.

Rachmaninoff es considerado como uno de los pianistas más influyentes del siglo XX. Tuvo legendarias facilidades técnicas y manejo rítmico, y sus largas manos eran capaces de cubrir el intervalo de una 13ª en el teclado (una mano abarcaba aproximadamente 12 pulgadas). El largo de sus manos correspondía aproximadamente con su altura; Rachmaninoff medía 1 metro 98 cm. de alto. Además tenía la habilidad de tocar complejas composiciones con sólo escucharlas una vez. Muchas presentaciones de las composiciones de Rachmaninoff fueron grabadas por The Victor Talking Machina Company, así como también los trabajos del repertorio estándar.

Luego de dejar Rusia en 1917, al año siguiente Rachmaninoff se estableció en los Estados Unidos. Durante el exilio se concentró en su carrera de piano y dirección, haciendo grabaciones en ambos campos. Sus pocas composiciones luego de 1917 incluyen: las Variaciones sobre un tema de Corelli de 1934 para piano; la Rapsodia sobre un tema de Paganini de 1936 para piano y orquesta; la Sinfonía Número 3 en La menor de 1936; y el Concierto para piano No. 4 en Sol menor de 1937. Falleció en Beverly Hills, California, el 28 de Marzo de 1943.

Su música de cámara incluye dos tríos de piano, los cuales fueron llamados Trío Elègiague y Sonata Cello. En éste tipo de música el piano tiende a ser percibido por algo que domina la totalidad. Completó tres óperas, Aleko, The Miserly Knight y Francesca da Rimini. Dejó sin terminar Monna Vanna, la cual fue empezada en 1907, pero no vio su primera presentación sino hasta 1984.

## **Saint-Saëns Camile**

(1835-1921) Compositor francés. Recibió la primera formación musical de su madre y de una tía; se mostró tan precoz en tal aspecto que a los cinco años pudo ya componer para el piano. Fue confiado entonces a la guía del pianista Stamaty, el cual lo presentó como pequeño virtuoso del piano en 1845.<sup>492</sup>

---

491 Contenido obtenido y resumido de "<http://www.pianored.com/rachmaninoff.html>" en fecha 6/06/2012.

492 Contenido obtenido en "[http://www.biografiasyvidas.com/biografia/s/saint\\_saens.htm](http://www.biografiasyvidas.com/biografia/s/saint_saens.htm)" en fecha 4/06/2012.

Estudió órgano con Benoit y composición con Halévy. En 1852 ganó un concurso con una *Ode à Sainte Cécile*; en 1853 fue nombrado organista de St. Merry, y en el año 1857 alcanzó el mismo cargo en la Madeleine; en 1861 obtuvo la cátedra de piano de la escuela Niedermeyer.

Temperamento batallador y enérgico, fundó en 1871 la Société Nationale de Musique, orientada concretamente al fomento de la ejecución y la difusión de la nueva música francesa. La iniciativa, a la cual se adhirieron, entre otros, Lalo, Franck, Bizet y Fauré, tuvo una gran importancia en sus aspectos de propulsión y organización. En 1872 Saint-Saëns pudo ver finalmente satisfechas sus aspiraciones escénicas: siquiera con escaso éxito, fue representada en la Ópera Comique su obra *La princesse jaune*.

A esta misma época pertenecen también algunas de las producciones sinfónicas más importantes del músico en cuestión: los poemas *La rueda de Onfalia* (1871), *Phaéton* (1873), *Danza macabra* (1874) y *La jeunesse d'Hercule* (1877), en el que puede percibirse una intensa influencia de las obras análogas de Liszt; y los *Conciertos* segundo, tercero y cuarto para piano, *en sol menor* (1868), *mi bemol mayor* (1869) y *do menor* (1875), cuyo virtuosismo pianístico alcanza un alto nivel de perfección en cuanto a la forma y a la estructura, y de acuerdo con esquemas imponentes y grandiosos, pero generalmente poco profundos.

Compuso dos cuartetos para cuerdas: Opus 112 en Mi menor (1899) y Opus 153 en Sol Mayor (1918-1920 según fuentes).<sup>493</sup>

## Scarlatti, Domenico

Nació en Nápoles. Probablemente comenzase estudiando con su padre, el compositor y profesor Alessandro Scarlatti; otros compositores que pudieron ser sus profesores fueron Gaetano Greco, Francesco Gasparini y Bernardo Pasquini, influyendo todos ellos en su estilo musical.<sup>494</sup>

Se convirtió en compositor y organista de la capilla real de la Corte Española de Nápoles a los dieciséis años, y en 1704 revisó la ópera *Irene*, de Carlo Francesco Pollarolo, para una representación en Nápoles. Poco después su padre le envió a Venecia, pero no se tiene información de los cuatro años que pasó allí.

En 1709 fue a Roma para ponerse al servicio de la exiliada reina polaca María Casimira. Durante su estancia en Roma conoció a Silivius Leopold Weiss y Thomas Roseingrave, el último de los cuales encabezó la recepción entusiasta de las sonatas del compositor en Londres. Domenico era ya un eminente clavecinista, y hay un relato que cuenta que en una prueba de talento con Georg Friedrich Händel en el palacio del cardenal Ottoboni en Roma, se le declaró superior a Händel en este instrumento, pero inferior en el órgano. Más tarde, cuando ya era mayor, se sabe que se persignaba con veneración cuando hablaba de las aptitudes de Händel.

Además, durante su estancia en Roma, Scarlatti compuso varias óperas para el teatro privado de la reina Casimira. Fue maestro de capilla en la Basílica de San Pedro desde 1715 a 1719, y en el último año se trasladó a Londres a dirigir su ópera *Narciso* en el *King's Theatre*.

En 1720 o 1721 viajó a Lisboa, donde enseñó música a la princesa Bárbara de Braganza. Regresó a Nápoles en 1725 y durante una visita a Roma en 1728 se casó con María Caterina Gentili. En 1729 se trasladó a Sevilla con el séquito de la princesa portuguesa que iba a contraer matrimonio con el heredero al trono de España, el futuro Fernando VI. Allí, en Sevilla, seguramente conocería los aires de la música popular andaluza. En 1733 se instaló definitivamente en Madrid como maestro de música de Bárbara de Braganza y allí vivió hasta su muerte. Después de fallecer

---

493 Información obtenida de "[http://www.sinfoniavirtual.com/discos/014\\_saint\\_saens\\_cuartetos.pdf](http://www.sinfoniavirtual.com/discos/014_saint_saens_cuartetos.pdf)" en fecha 4/6/2012.

494 Contenido obtenido en la dirección "[http://es.wikipedia.org/wiki/Domenico\\_Scarlatti](http://es.wikipedia.org/wiki/Domenico_Scarlatti)" en fecha 29/05/2012.

su primera esposa en 1742 se casó con una española, Anastasia Maxarti Ximenes, con la que tuvo dos hijos.

Durante su estancia en Madrid, Scarlatti compuso alrededor de 555 sonatas bipartitas para teclado. Es por estas obras por las que se le recuerda hoy en día. En ellas se aprecia una música totalmente original y distinta a la del repertorio operístico, instrumental y de cantatas profanas y religiosas que compuso en su juventud. La asimilación de los aires populares españoles y la experimentación constante de las posibilidades del clave, instrumento de cámara en el que ejercitaba su magisterio para la reina, le llevaron a ser el iniciador de la escuela de clave española del siglo XVIII, que tendría seguidores en autores de la talla del Padre Soler. Tan identificado se sintió con la vida española que llegó a firmar con el nombre de Domingo Escarlati, apellido que aún conservan sus descendientes. Es por ello que se puede afirmar que Scarlatti es uno de los más importantes compositores de música en España.

Domenico Scarlatti murió en Madrid, a la edad de 71 años. Su residencia en la calle Leganitos tiene designada una placa histórica.

Para poder referenciar en el capítulo correspondiente las fechas relevantes de su vida, la Tabla 109 resume dichas fechas.

<b>Efeméride</b>	<b>Año (? para años aproximados)</b>
Nacimiento.	1685
Compositor y organista de la capilla real de la Corte Española de Nápoles.	1701
Estancia en Venecia.	1703-1707 ?
Se traslada a Roma para ponerse al servicio de la exiliada reina polaca María Casimira.	1709
Se traslada a Lisboa donde enseñó música a la princesa Bárbara de Braganza.	1720/21
Regreso a Nápoles.	1725
Visita a Roma donde se casa con Maria Caterian Gentili.	1728
Se trasladó a Sevilla con el séquito de la princesa portuguesa que iba a contraer matrimonio con el heredero al trono de España, el futuro Fernando VI	1729
En 1733 se instaló definitivamente en Madrid como maestro de música de Bárbara de Braganza.	1733
Se casó con una española, Anastasia Maxarti Ximenes.	1742
Murió en Madrid, a la edad de 71 años.	1757

*Tabla 109: Efemérides y sus fechas en la vida de Domenico Scarlatti.*

## **Scarlatti, Doménico (Sonatas)**

Las sonatas scarlatianas poseen una estructura idéntica. Su estructura responde a una forma binaria compuesta por dos partes sensiblemente iguales, que está prevista que se repitan. La primera parte finaliza a menudo en la nota dominante y la segunda siempre en la tónica. Las cadencias con que se concluyen cada una de las dos partes son similares. Hay pocas excepciones a este esquema

básico. Scarlatti, gran creador de ideas musicales, no se preocupó en exceso de renovar las formas musicales de su época.<sup>495</sup>

La grandeza de las sonatas de Scarlatti reside en su riqueza de motivos musicales, en todas las figuras de su retórica musical. Destaca en su quehacer la variedad en la invención rítmica y melódica y la habilidad casi diabólica en la utilización de todas las capacidades del clavicémbalo. A primera vista la limpia y ordenada escritura de sus sonatas harían pensar en que la ejecución de estas obras es relativamente sencilla. Nada más lejos de la realidad. La claridad de su pentagrama esconde terribles dificultades para el músico que las interpreta. Algunas contienen cambios de mano, saltos de octavas, complicados arpeggios y escalas rapidísimas.

En cuanto al ritmo, sus obras para teclado están animadas por un carácter vivo y variado, con una notable influencia de la rítmica de los aires populares de la música española. En numerosas ocasiones se escuchan células rítmicas que podríamos calificar de *ostinati* que recorren toda la longitud de la sonata y recuerdan a los del pulso de la guitarra flamenca. Se escuchan en su clave las notas repetidas de los instrumentos de cuerda pulsada o las castañuelas percutidas repetidamente.

Pero quizá el rasgo más sorprendente del arte de Domenico Scarlatti es su extraordinaria habilidad para la modulación, una de las marcas de estilo más sorprendentes del genio del napolitano. Es capaz de recorrer con ella todas las tonalidades dentro de una obra. Unas son en progresión, otras aparecen a intervalos, en ocasiones son abruptas: en estos casos, el oyente es llevado sin transición a otra región tonal, a veces muy alejada (a menudo un tono entero, otras veces una tercera).

## Schubert, Franz

(1797-1828) Compositor austríaco. Nacido en las proximidades de la misma Viena que acogió a Haydn, Mozart y Beethoven, a menudo se le considera el último gran representante del estilo clásico que llevaron a su máximo esplendor esos tres compositores y uno de los primeros en manifestar una subjetividad y un lirismo inconfundiblemente románticos en su música.<sup>496</sup>

El lied<sup>497</sup> para canto y piano, uno de los géneros paradigmáticos del Romanticismo, encontró en él a su primer gran representante, cuyas aportaciones serían tomadas como modelo por todos los músicos posteriores, desde Robert Schumann hasta Hugo Wolf y Gustav Mahler.

Hijo de un modesto maestro de escuela, Schubert aprendió de su padre la práctica del violín y de su hermano mayor, Ignaz, la del piano, con tan buenos resultados que en 1808, a los once años de edad, fue admitido en la capilla imperial de Viena como miembro del coro y alumno del Stadtkonvikt, institución ésta en la que tuvo como maestro al compositor Antonio Salieri. La necesidad de componer se reveló en el joven Schubert durante estos años con inusitada fuerza, y sus primeras piezas fueron interpretadas por la orquesta de discípulos del Stadtkonvikt, de la que él mismo era violinista.

El único campo que podía reportar grandes beneficios a un compositor de la época era el teatro, la ópera, y aunque éste fue un género que Schubert abordó con insistencia a lo largo de toda su vida, bien fuera por la debilidad de los libretos escogidos o por su propia falta de aliento dramático, nunca consiguió destacar en él. Sus óperas, entre las que merecen citarse *Los amigos de Salamanca*, *Alfonso y Estrella*, *La guerra doméstica* y *Fierabrás*, continúan siendo la faceta menos conocida de su producción.

---

495 Contenido obtenido en la dirección “[http://es.wikipedia.org/wiki/Domenico\\_Scarlatti](http://es.wikipedia.org/wiki/Domenico_Scarlatti)” en fecha 29/05/2012.

496 Información obtenida y resumida de “<http://www.biografiasyvidas.com/biografia/s/schubert.htm>” en fecha 6/6/2012.

497 Consultar página 250 (capítulo Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados) para una explicación detallada.

Los ciclos *La bella molinera* y *Viaje de invierno* constituyen quizás la cima de su genio en el campo del lied, a los que hay que sumar títulos como *El caminante*, *La trucha*, *A la música*, *La muerte y la doncella*, o el celeberrimo *Ave Maria*.

Admirado en un círculo muy restringido, la revalorización del compositor se llevó a cabo a partir de su muerte: obras inéditas o que sólo se habían interpretado en el marco familiar, empezaron a ser conocidas y publicadas, y defendidas por músicos como Robert Schumann o Felix Mendelssohn. Es, sobre todo, el caso de su producción instrumental madura, de sus últimas sonatas para piano, sus cuartetos de cuerda y sus dos postreras sinfonías, a cuyo nivel sólo son equiparables las de Beethoven.

## **Schumann, Robert**

(1810-1856) Compositor alemán. Tanto su vida como su obra lo convierten en uno de los paradigmas del Romanticismo musical alemán. Hijo de un librero, la literatura y la música compartieron sus inquietudes artísticas durante su juventud, hasta el punto de que Schumann estuvo dudando entre ambas vocaciones.<sup>498</sup>

Aunque acabó imponiéndose la música, nunca abandonó la escritura de poemas en la más pura tradición romántica, la de sus admirados Goethe, Schiller, Novalis, Byron y Hölderlin. Fue, además, fundador y redactor de la *Neue Zeitschrift für Musik* (1834), publicación que se convirtió en el órgano difusor de las teorías musicales más progresistas de su época, a través de una serie de artículos apasionados y polémicos redactados por él mismo.

A raíz de su matrimonio con Clara Wieck (1819-1896), el compositor alemán, que hasta ese momento había centrado su producción en la música para piano y el lied, empezó a concebir proyectos más ambiciosos, tanto sinfónicos como camerísticos y operísticos, estimulado por su esposa. La primera de sus cuatro sinfonías data de 1841, mientras que su célebre *Concierto para piano en la menor* es sólo cuatro años posterior.

Los últimos años de vida de Schumann estuvieron marcados por el agravamiento de la inestabilidad nerviosa que lo había acompañado desde su juventud, tras un intento de suicidio en 1854, fue internado en una casa de salud en Endenich, donde permaneció recluido hasta su muerte.

Compuso 3 cuartetos para cuerda Op.41 en La menor, Fa Mayor y La Mayor (1842).<sup>499</sup>

## **Shostakovich, Dimitri**

(1906-1975) Compositor soviético. Su producción abarca todos los géneros: la ópera, la comedia musical, la sinfonía a la miniatura para piano, la música concertante, la cantata, el cuarteto de cuerda y la música para el cine. Autor prolífico, escribió un total de 147 números de opus, correspondientes muchos de ellos a obras que hoy se cuentan entre las páginas más interpretadas y grabadas del repertorio.<sup>500</sup>

Sin embargo, a pesar de ser considerado, junto a Prokofiev, el compositor más representativo de la desaparecida Unión Soviética, su carrera no fue fácil: premios y condecoraciones —entre los que se contaban los Premios del Estado y Lenin y la distinción de Artista del Pueblo—, se alternaban con continuas persecuciones y condenas por parte del mismo régimen que lo laureaba, bajo la acusación de realizar una música antipopular y en exceso moderna.

---

498 Información obtenida y resumida de “<http://www.biografiasyvidas.com/biografia/s/schumann.htm>” en fecha 5/6/2012.

499 Contenido obtenido en “[http://es.wikipedia.org/wiki/Robert\\_Schumann](http://es.wikipedia.org/wiki/Robert_Schumann)” en fecha 30/05/2012.

500 Contenido obtenido y resumido de “<http://www.biografiasyvidas.com/biografia/s/shostakovich.htm>” en fecha 6/06/2012.



Nacido en el seno de una familia en la cual la cultura ocupaba un lugar importante, Shostakovich recibió sus primeras lecciones musicales de su madre, pianista profesional, a una edad que se puede considerar relativamente tardía, los nueve años. Ante sus grandes progresos, en 1919 ingresó en el Conservatorio de Leningrado, en donde tuvo como principal maestro a Aleksandr Glazunov.

La carrera ascendente de Shostakovich sufrió un inesperado revés con el estreno en 1934 de su segunda ópera, *Lady Macbeth de Mtsensk*: entusiásticamente recibida por el público, tanto en Leningrado como en su posterior escenificación en Moscú, fue retirada de cartel tras la aparición de una crítica en el diario oficial Pravda, titulada *Caos en lugar de música*, en la que se acusaba al compositor de haber escrito un "concierto de aullidos", ajeno a los presupuestos de la música socialista, que debía ser clara y fácilmente asequible.

Se iniciaba así una larga y contradictoria relación con el régimen estalinista: mientras en Occidente era considerado el compositor oficial soviético, en su propio país Shostakovich hubo de sufrir las injerencias de sus autoridades culturales, a pesar de lo cual, y pese a su aparente aceptación tácita de los preceptos del realismo socialista, consiguió mantener siempre su independencia creativa.

Tras la muerte de Stalin en 1953, la música de Shostakovich se hizo más personal, y se tradujo en una larga serie de partituras presididas por la idea de la muerte. Es el caso de las tres últimas sinfonías y de sus cuartetos de cuerda, un género que el compositor convirtió en el medio idóneo en el que expresar sus preocupaciones y miedos de una manera privada, sin necesidad de recurrir a máscaras o disfraces.

## **Smetana, Bedrich**

(1824-1884) Compositor checo pionero en el desarrollo de un estilo musical que quedó íntimamente ligado a las aspiraciones independentistas de su país. Por ello, se lo reconoce en su país como el padre de la música checa.<sup>501</sup>

Smetana poseía un talento natural para el piano y dio su primer recital a los seis años. Escribió su primera composición nacionalista durante el levantamiento de Praga de 1848, en el que participó por poco tiempo. Ante la imposibilidad de iniciar su carrera en Praga, se dirigió a Suecia, donde se estableció como profesor y director de coro en Gotemburgo y empezó a escribir obras orquestales de gran escala.

A principios de la década de 1860 un clima político más liberal en Bohemia alentó a Smetana a regresar permanentemente a Praga. Se entregó a la vida musical de la ciudad, principalmente como defensor del nuevo género de la ópera checa.

A finales de 1874, a los 50 años de edad, Smetana se volvió completamente sordo, pero, liberado de sus funciones de teatro y la polémica que causaba, comenzó un período de composición constante que se prolongó durante casi todo el resto de su vida.

Compuso 2 cuartetos de cuerda<sup>502</sup>: Cuarteto N° 1 "*De mi vida*" (1876) y Cuarteto N° 2 (1882-83).

## **Soler, Antonio**

Antonio Soler y Ramos (1729–1783) fue un compositor y clavecinista español, representante de la escuela española de música para teclado del siglo XVIII, y seguidor de la corriente musical introducida en España por el italiano Domenico Scarlatti.<sup>503</sup>

---

501 Contenido obtenido y resumido de "[http://es.wikipedia.org/wiki/Bedřich\\_Smetana](http://es.wikipedia.org/wiki/Bedřich_Smetana)" en fecha 4/06/2012.

502 Contenido obtenido en "<http://www.vooxi.com/foros/showthread.php/132206-Smetana-sus-cuartetos-de-cuerda>." en fecha 04/06/2012

503 Contenido obtenido y resumido de "[http://es.wikipedia.org/wiki/Antonio\\_Soler\\_\(compositor\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Antonio_Soler_(compositor))" en fecha 11/07/2012.

Cuando tenía 1 año entró en la Escolanía de Montserrat, donde comenzó sus estudios de música y órgano, al igual que haría Fernando Sor. Ingresó como monje en la orden religiosa de San Jerónimo y se consagró como sacerdote en 1752, por lo que se le conoce como “el padre Soler”. Fue maestro de capilla en la catedral de Lérida y, más tarde, ocupó el cargo de organista y director del coro del monasterio de San Lorenzo de El Escorial, donde pasó a formar parte de su comunidad de jerónimos. Aquí enseñaba y actuaba como primer organista y componía la música para los oficios. Entre sus alumnos destacaba el Infante Gabriel de Borbón, hijo de Carlos III.

Fue en El Escorial donde estudió con José de Nebra y Domenico Scarlatti. Este último era, por aquel entonces, compositor de la corte española e influenció ciertamente la obra de Soler; ya que se encuentran semejanzas significativas en las sonatas de ambos compositores. Ambos usaron saltos amplios, cruces repetidos de las manos y pasos escalares en tercias o en sextas. Aun así, hay diferencias estilísticas, como la predilección de Soler por el "bajo de Alberti", raramente empleado por Scarlatti. A su vez, este último usaba *l'acciaccatura*, técnica que no utilizaba el padre Soler.

Se le considera el maestro español más renombrado de la escuela de clave y su marcada personalidad domina poderosamente en el panorama de la música española del siglo XVIII.

Se le atribuyen algo más de 400 obras, de las que cabe destacar: Más de 200 Sonatas para clave, 6 Quintetos para cuarteto de cuerdas y órgano, 6 conciertos para dos órganos, 6 Conciertos para dos violines, viola y clave, 9 Misas, 25 Himnos religiosos, 5 Requiem, 60 Salmos, 13 Magnificat, 21 Obras para el servicio fúnebre, 5 Motetes, 12 Benedicamus, 132 Villancicos.

Como teórico escribió un tratado sobre la armonía titulado: *Llave de la modulación y antigüedades de la música*. Es popularmente célebre su Fandango, un aire de la rítmica danza española.

## **Sonatas y partitas para violín solo de J.S.Bach**

Las Sonatas y Partitas para violín solo (BWV 1001–1006) forman un conjunto de seis obras compuestas por Johann Sebastian Bach: *tres sonatas da chiesa* en cuatro movimientos y tres partitas consistentes de movimientos basados en danzas. El conjunto completo fue publicado por primera vez en 1802. Hoy en día, las *Sei Solo – a violino senza basso accompagnato*, como Bach las llamó originalmente, son una parte integral del repertorio para violín y nuevas interpretaciones y grabaciones se realizan con frecuencia.<sup>504</sup>

Bach compuso estas obras en 1720, mientras ocupaba el puesto de Maestro de capilla o Kapellmeister en Köthen. El manuscrito no fue destruido por poco, alguien lo salvó de que fuera utilizado como papel de cocina. En Köthen Bach se dedicaba más a la música de cámara que a la sacra; los Conciertos de Brandenburgo, el Concierto para dos Violines y las Suites para violonchelo solo datan también de esta época.

El intérprete original de las seis sonatas y partitas es desconocido. J.G. Pisendel y J.B. Volumier fueron sugeridos, al ser ambos violinistas talentosos de la corte de Dresden. También pudo haber sido Joseph Spiess, líder de la orquesta en Köthen. Sin embargo, ha habido algunos investigadores que sugieren que el mismo Bach fue el primer intérprete de sus propias obras, apuntando a sus talentos como violinista. Su padre Johann Ambrosius Bach, era violinista, y de acuerdo a su hijo Carl Philipp Emanuel Bach, "en su juventud, hasta acercarse a la ancianidad, tocaba el violín limpia y poderosamente".

---

504 Contenido obtenido en “[http://es.wikipedia.org/wiki/Sonatas\\_y\\_partitas\\_para\\_violín\\_solo\\_\(Bach\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Sonatas_y_partitas_para_violín_solo_(Bach))” en fecha 30/05/2012.

## Stravinsky Igor

(1882-1971) Compositor ruso nacionalizado francés y, posteriormente, estadounidense. Una de las fechas clave que señalan el nacimiento de la llamada música contemporánea es el 29 de mayo de 1913, día en que se estrenó el ballet de Stravinsky *La consagración de la primavera*. Su armonía politonal, sus ritmos abruptos y dislocados y su agresiva orquestación provocaron en el público uno de los mayores escándalos de la historia del arte de los sonidos.<sup>505</sup>

Autor de otros dos ballets que habían causado sensación, *El pájaro de fuego* (la obra que lo dio a conocer internacionalmente en 1910) y *Petrushka*, el citado día de 1913 Stravinsky se confirmó como el jefe de filas de la nueva escuela musical. Sin embargo, él nunca se consideró un revolucionario; de manera similar a Picasso en el campo de las artes plásticas, el compositor se caracterizó siempre por transitar de un estilo a otro con absoluta facilidad, sin perder por ello su propia personalidad. El ruso, el neoclásico y el dodecafónico son, a grandes rasgos, los tres periodos en los que puede dividirse la carrera compositiva de este maestro, uno de los referentes incuestionables de la música del siglo XX.

Comenzó una etapa neoclásica, caracterizada por la revisión de los lenguajes del pasado, con homenajes a sus compositores más admirados, como Bach (*Concierto en re*), Tchaikovsky (*El beso del hada*), Haendel (*Oedipus rex*), Haydn (*Sinfonía en do*) o Mozart (*La carrera del libertino*) y obras tan importantes como el *Octeto para instrumentos de viento*, la *Sinfonía de los salmos* o el ballet *Apollon Musagète*.

En ellas Stravinsky abandonó las armonías disonantes y la brillante orquestación de sus anteriores composiciones para adoptar un estilo más severo y objetivo (el neoclasicismo, de hecho, nació como una oposición al arrebatado subjetivismo del Romanticismo y el expresionismo germánicos), estilo, sin embargo, que no excluía cierto sentido del humor en su aproximación al pasado.

Con la *Sinfonía en tres movimientos* y la ópera *La carrera del libertino* concluye esta etapa, tras la cual Stravinsky volvió a sorprender al adoptar el método dodecafónico sistematizado por su colega y rival Arnold Schönberg, aunque eso sí, a la muerte de éste. De nuevo un ballet, *Agon*, señaló la apertura de este nuevo período, en el que sobresalen títulos como *Canticum sacrum*, *Threni*, *Monumentum pro Gesualdo* y *Requiem Canticles*, ninguno de los cuales ha obtenido el nivel de aceptación de las obras de las dos épocas precedentes.

### Suites para violonchelo de J.S.Bach

Las *Seis Suites a Violoncello Solo senza Basso* BWV 1007-1012, compuestas por Johann Sebastian Bach, son unánimemente consideradas como una de las mayores obras para violonchelo jamás escritas. Prácticamente relegadas a una mera función didáctica hasta su "redescubrimiento" por parte de Pau Casals, a finales del siglo XIX, se han convertido con el paso de las décadas en parte habitual del repertorio y auténtica piedra de toque para los chelistas.<sup>506</sup>

Aunque resulta difícil establecer con exactitud cuándo fueron compuestas, se sabe que las suites vieron la luz durante el llamado "período de Cöthen", cuando Bach ejercía como maestro de capilla en la corte del príncipe Leopold. A diferencia de la otra gran colección bachiana para instrumento de cuerda solo, las seis *Sonatas y partitas para violín*, no se conserva el manuscrito del propio compositor, sino una copia redactada por su segunda esposa, Ana Magdalena, y que debe fecharse en torno a 1720 o 1721.

Cada una de las suites se divide en seis movimientos, siguiendo una estructura fija: un preludeo inicial (que en la mayoría de casos supone la sección más importante de la suite) seguido por los

505 Contenido obtenido en "<http://www.biografiasyvidas.com/biografia/s/stravinski.htm>" en fecha 6/06/2012.

506 Contenido obtenido en "[http://es.wikipedia.org/wiki/Suites\\_para\\_violonchelo\\_solo](http://es.wikipedia.org/wiki/Suites_para_violonchelo_solo)" en fecha 30/05/2012.

cinco movimientos de danza: alemanda, courante, zarabanda, una danza galante (un minueto en el caso de la primera y segunda suites, una bourrée en la tercera y la cuarta, y una gavota, en la quinta y la sexta) y finalmente una giga.

## **Tchaikovsky Piotr Ilitch**

(1840 - 1893) Compositor ruso. A pesar de ser contemporáneo estricto del Grupo de los Cinco, el estilo de Tchaikovsky no puede encasillarse dentro de los márgenes del nacionalismo imperante entonces en su Rusia natal. Su música, de carácter cosmopolita en lo que respecta a las influencias – entre ellas y en un lugar preponderante la del sinfonismo alemán–, aunque no carente de elementos rusos, es ante todo profundamente expresiva y personal, reveladora la personalidad del autor, compleja y atormentada.<sup>507</sup>

Alumno de composición de Anton Rubinstein en San Petersburgo, los primeros pasos de Tchaikovsky en el mundo de la música no revelaron un especial talento ni para la interpretación ni para la creación. Sus primeras obras, como el poema sinfónico *Fatum* o la Sinfonía núm. 1 "Sueños de invierno", mostraban una personalidad poco definida.

Sólo tras la composición, ya en la década de 1870, de partituras como la Sinfonía núm. 2 "Pequeña Rusia" y, sobre todo, del célebre *Concierto para piano y orquesta núm. 1*, la música de Tchaikovsky empezó a adquirir un tono propio y característico, en ocasiones efectista y cada vez más dado a la melancolía.

Gracias al sostén económico de una rica viuda, Nadejda von Meck –a la que paradójicamente nunca llegaría a conocer–, Tchaikovsky pudo dedicar, desde finales de esa década, todo su tiempo a la composición. Fruto de esa dedicación exclusiva fueron algunas de sus obras más hermosas y originales, entre las que sobresalen sus ballets *El lago de los cisnes*, *La cenicienta*, *La bella durmiente* y *Cascanueces*, sus óperas *Evgeny Onegin* y *La dama de picas*, y las tres últimas de sus seis sinfonías.

La postrera de ellas, titulada "Patética", es especialmente reveladora de la compleja personalidad del músico y del drama íntimo que rodeó su existencia, atormentada por una homosexualidad reprimida y un constante y mórbido estado depresivo. El mismo año de su estreno, 1893, se declaró una epidemia de cólera; contagiado el compositor, la enfermedad puso fin a su existencia.

Compuso 3 cuartetos de cuerda: nº 1 en Re Mayor Op.11 (1871), nº 2 en Fa Mayor Op.22 (1874) y nº 3 en Mi b Mayor Op.30 (1876).<sup>508</sup>

## **Vivaldi Antonio**

(1678-1741) Compositor y violinista italiano. Autor prolífico, la producción de Vivaldi abarca no sólo el género concertante, sino también abundante música de cámara, vocal y operística. Célebre sobre todo por sus cuatro conciertos para violín y orquesta reunidos bajo el título *Las cuatro estaciones*, cuya fama ha eclipsado otras de sus obras igualmente valiosas, si no más, Vivaldi es por derecho propio uno de los más grandes compositores del período barroco, impulsor de la llamada Escuela veneciana.<sup>509</sup>

Fue ordenado sacerdote en 1703, aunque sólo un año más tarde se vio obligado a renunciar a celebrar misa a consecuencia de una enfermedad bronquial, posiblemente asma. También en 1703 ingresó como profesor de violín en el *Pio Ospedale della Pietà*, una institución destinada a formar

507 Contenido obtenido en "<http://www.biografiasyvidas.com/biografia/c/chaikovski.htm>" en fecha 5/06/2012.

508 Información obtenida en "<http://www.quebec.ca/musique/catal/tchaikovsky/tchpi340.html>" en fecha 5/06/2012.

509 Información obtenida y resumida de "<http://www.biografiasyvidas.com/biografia/v/vivaldi.htm>" en fecha 5/06/2012.

muchachas huérfanas. Ligado durante largos años a ella, muchas de sus composiciones fueron interpretadas por primera vez por su orquesta femenina.

Conocido y solicitado, la ópera, el único género que garantizaba grandes beneficios a los compositores de la época, atrajo también la atención de Vivaldi, a pesar de que su condición de eclesiástico en principio le impedía abordar un espectáculo considerado en exceso mundano y poco edificante. De hecho, sus superiores siempre recriminaron a Vivaldi su escasa dedicación al culto y sus costumbres laxas.

La fama del músico alcanzó la cúspide en el meridiano de su vida con la publicación de sus más importantes colecciones instrumentales, *Il cimento dell'armonia e dell'inventione Op. 8*, en la que se incluyen *Las cuatro estaciones*, y *La cetra Op. 9*. Pero a fines de la década de 1730 el público veneciano empezó a mostrar menor interés por su música, por lo que Vivaldi decidió probar fortuna en Viena, donde murió en la más absoluta pobreza un mes después de su llegada. Tras un largo periodo de olvido, la obra de Vivaldi contribuyó a sentar las bases de lo que sería la música de los maestros del clasicismo, sobre todo en Francia, y a consolidar la estructura del concierto solista.

## **Walther, Johann Gottfried**

(1684-1748) Organista, compositor y musicólogo alemán. Walther era primo por el lado materno de J.S.Bach.<sup>510</sup>

En 1702 fue nombrado organista de la iglesia de Santo Tomás en Erfurt. En 1708, a los 23 años de edad, fue nombrado organista de Weimar, siendo el maestro de música del joven duque Johann Ernst von Sachsen-Weimar, al que le escribió un tratado musical titulado *Praecepta der musicalischen Composition* (Preceptos de la composición musical).

Walther es más conocido por ser el escritor del *Musicalisches Lexicon* publicado en Leipzig en 1732, que es considerada la primera enciclopedia de música. El libro es un enorme diccionario de términos musicales y biografías cortas de compositores e intérpretes, que abarca hasta el comienzo del siglo XVIII. En total el *Musicalisches Lexicon* define más de 3.000 términos musicales. Walther utilizó más de 250 fuentes para escribir su libro, siendo la fuente más citada la obra de Johann Mattheson.

Como compositor, Walther ganó fama por sus transcripciones al órgano de obras contemporáneas de compositores italianos y alemanes, como Albinoni, Torelli, Vivaldi y Telemann. Las transcripciones de Walther fueron el modelo que J.S. Bach utilizó para sus propias transcripciones de Vivaldi. Como organista de la ciudad de Weimar compuso 132 preludios para órgano basados en corales luteranos.

---

510 Información obtenida y resumida de "[http://es.wikipedia.org/wiki/Johann\\_Gottfried\\_Walther](http://es.wikipedia.org/wiki/Johann_Gottfried_Walther)" en fecha 11/07/2012.

## Anexo 5 – Conceptos estadísticos utilizados.

### Análisis de componentes principales

En estadística, el análisis de componentes principales (en español **ACP**, en inglés, **PCA**) es una técnica utilizada para reducir la dimensionalidad de un conjunto de datos. Intuitivamente la técnica sirve para hallar las causas de la variabilidad de un conjunto de datos y ordenarlas por importancia.<sup>511</sup>

Técnicamente, el ACP busca la proyección según la cual los datos queden mejor representados en términos de mínimos cuadrados. El ACP se emplea sobre todo en análisis exploratorio de datos y para construir modelos predictivos. El ACP comporta el cálculo de la descomposición en autovalores de la matriz de covarianza, normalmente tras centrar los datos en la media de cada atributo.

El ACP construye una transformación lineal que escoge un nuevo sistema de coordenadas para el conjunto original de datos en el cual la varianza de mayor tamaño del conjunto de datos es capturada en el primer eje (llamado el Primer Componente Principal), la segunda varianza más grande es el segundo eje, y así sucesivamente. Para construir esta transformación lineal debe construirse primero la matriz de covarianza o matriz de coeficientes de correlación. Debido a la simetría de esta matriz existe una base completa de vectores propios de la misma. La transformación que lleva de las antiguas coordenadas a las coordenadas de la nueva base es precisamente la transformación lineal necesaria para reducir la dimensionalidad de datos. Además las coordenadas en la nueva base dan la composición en factores subyacentes de los datos iniciales.

Una de las ventajas del ACP para reducir la dimensionalidad de un grupo de datos, es que retiene aquellas características del conjunto de datos que contribuyen más a su varianza, manteniendo un orden de bajo nivel de los componentes principales e ignorando los de alto nivel. El objetivo es que esos componentes de bajo orden a veces contienen el aspecto "más importante" de esa información.

Existen dos formas básicas de aplicar el ACP:

- Método basado en la matriz de correlación, cuando los datos no son dimensionalmente homogéneos o el orden de magnitud de las variables aleatorias medidas no es el mismo.
- Método basado en la matriz de covarianzas, que se usa cuando los datos son dimensionalmente homogéneos y presentan valores medios similares.

La aplicación del ACP está limitada por varios supuestos resumidos a continuación:

- Asunción de linealidad: Se asume que los datos observados son combinación lineal de una cierta base.
- Importancia estadística de la media y la covarianza: el ACP utiliza los vectores propios de la matriz de covarianzas y sólo encuentra las direcciones de ejes en el espacio de variables considerando que los datos se distribuyen de manera gaussiana.

---

511 Contenido obtenido en "[http://es.wikipedia.org/wiki/Análisis\\_de\\_componentes\\_principales](http://es.wikipedia.org/wiki/Análisis_de_componentes_principales)" en fecha 8/12/2011 donde podrá encontrar los detalles matemáticos de los conceptos de matriz de correlación y de matriz de covarianzas así como los detalles de la formulación matemática del métodos

## Análisis discriminante

La explicación completa y en detalle de esta técnica estadística excede el ámbito de este anexo. Por ello se ha seleccionado esta fuente por ofrecer una breve descripción del método pensada para su comprensión por parte del lector no experto en técnicas estadísticas.

El Análisis Discriminante es una técnica estadística multivariante cuya finalidad es analizar si existen diferencias significativas entre grupos de objetos respecto a un conjunto de variables medidas sobre los mismos para, en el caso de que existan, explicar en qué sentido se dan y proporcionar procedimientos de clasificación sistemática de nuevas observaciones de origen desconocido en uno de los grupos analizados.

Supongamos que un conjunto de objetos está ya clasificado en una serie de grupos, es decir, se sabe previamente a qué grupos pertenecen. El Análisis Discriminante se puede considerar como un análisis de regresión donde la variable dependiente es categórica y tiene como categorías la etiqueta de cada uno de los grupos, y las variables independientes son continuas y determinan a qué grupos pertenecen los objetos. Se encuentran relaciones lineales entre las variables continuas que mejor discriminen en los grupos dados a los objetos.<sup>512</sup>

Un segundo objetivo es construir una regla de decisión que asigne un objeto nuevo, que no sabemos clasificar previamente, a uno de los grupos prefijados con un cierto grado de riesgo.

Es necesario considerar una serie de restricciones o supuestos:

1. Se tiene una variable categórica y el resto de variables son de intervalo o de razón y son independientes respecto de ella.
2. Es necesario que existan al menos dos grupos, y para cada grupo se necesitan dos o más
3. casos.
4. El número de variables discriminantes debe ser menor que el número de objetos menos 2:  $x_1, \dots, x_p$ , donde  $p < (n - 2)$  y  $n$  es el número de objetos.
5. Ninguna variable discriminante puede ser combinación lineal de otras variables discriminantes.
6. El número máximo de funciones discriminantes es igual al mínimo entre el número de variables y el número de grupos menos 1 (con  $q$  grupos,  $(q - 1)$  funciones discriminantes).
7. Las matrices de covarianzas dentro de cada grupo deben ser aproximadamente iguales.
8. Las variables continuas deben seguir una distribución normal multivariante.

## Anderson-Darling (Test)

La prueba de Anderson-Darling es una prueba no paramétrica sobre si los datos de una muestra provienen de una distribución específica. La fórmula para el estadístico  $A$  (Figura 170) determina si los datos  $\{Y_1 < \dots < Y_N\}$  (los datos deben estar ordenados) vienen de una distribución con función acumulativa  $F$ .<sup>513</sup>

$$A^2 = -N - S$$

Figura 170: Expresión del estadístico  $A$ .

512 Contenidos extraídos y resumidos de "<http://ciberconta.unizar.es/leccion/discr/>" y "<http://halweb.uc3m.es/esp/Personal/personas/jmmarin/esp/AMult/tema6am.pdf>" en fecha 11/06/2012.

513 Contenidos extraídos y resumidos de "[http://es.wikipedia.org/wiki/Prueba\\_de\\_Anderson-Darling](http://es.wikipedia.org/wiki/Prueba_de_Anderson-Darling)" en fecha 12/12/2012.

siendo S la expresión de la Figura 171.

$$S = \sum_{k=1}^N \frac{2k-1}{N} [\ln F(Y_k) + \ln (1 - F(Y_{N+1-k}))]$$

Figura 171: Expresión de S del test de Anderson-Darling.

El estadístico de la prueba se puede comparar contra las distribuciones del estadístico de prueba (dependiendo que  $\hat{F}$  se utiliza) para determinar el P-valor.

## ANOVA, método

Del mismo modo que la t de Student, la prueba ANOVA es una prueba paramétrica y como tal requiere una serie de supuestos para poder ser aplicada correctamente. Denominada ANOVA o análisis de la varianza, en realidad nos va a servir no solo para estudiar las dispersiones o varianzas de los grupos, sino para estudiar sus medias y la posibilidad de crear subconjuntos de grupos con medias iguales. Se puede decir que la prueba ANOVA es la generalización de la t de Student, ya que si realizamos una prueba ANOVA en la comparación de solo dos grupos, obtenemos los mismos resultados.<sup>514</sup>

Al igual que la t de Student, se requiere que cada uno de los grupos a comparar tenga distribuciones normales, o lo que es más exacto, que lo sean sus residuales. Los residuales son las diferencias entre cada valor y la media de su grupo. Además debemos estudiar la dispersión o varianzas de los grupos, es decir estudiar su homogeneidad. Cuando mayor sean los tamaños de los grupos, menos importante es asegurar estos dos supuestos, ya que el ANOVA suele ser una técnica bastante “robusta” comportándose bien respecto a transgresiones de la normalidad. No obstante, si tenemos grupos de tamaño inferior a 30, es importante estudiar la normalidad de los residuos para ver la conveniencia o no de utilizar el análisis de la varianza. Si no fuera posible utilizar directamente el ANOVA, podemos recurrir al uso de pruebas no paramétricas, como la de *Kruskal-Wallis*.

Como ya hemos dicho, el ANOVA es la generalización de la t de Student, y sus hipótesis nula y alternativa se pueden formular del siguiente modo:

$$\text{Hipótesis nula (H}_0\text{): } \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$$

Las medias de los k grupos son iguales y por tanto las diferencias encontradas pueden explicarse por el azar. Dicho de otro modo, los grupos proceden de poblaciones con medias iguales.

Hipótesis alternativa (H<sub>1</sub>): al menos uno de los grupos tiene una media distinta del resto de grupos.

En la prueba ANOVA las comparaciones son siempre bilaterales (a dos colas) ya que estudiamos globalmente si los grupos tienen medias distintas, y no si un grupo tiene una media menor o mayor que otro por separado. Si se rechaza la hipótesis nula, no sabremos entre qué grupos están las diferencias.

---

514 Contenidos extraídos de “<http://epidemiologiamolecular.com/03/01/2010/prueba-anova-comparacin-de-las-medias-de-tres-o-ms-grupos/>” en fecha 20/12/2011.



## Bonferroni, procedimiento

En estadística, la corrección de Bonferroni es un método usado para contrarrestar el problema de las comparaciones múltiples. Ha sido desarrollado y presentado por el matemático italiano Carlo Emilio Bonferroni.<sup>515</sup>

La corrección se basa en la idea de que si un experimentador prueba la hipótesis n-dependencia o independiente en un conjunto de datos, una forma de mantener la tasa de error en valores aceptables es probar cada hipótesis individual en un nivel de significación estadística de  $1/n$  veces o lo que sería si sólo una de las hipótesis fueron probadas.

Por lo tanto, si se desea que el nivel de significación para toda la familia de las pruebas debe ser (como máximo)  $\alpha$ , entonces la corrección de Bonferroni sería poner a prueba cada una de las pruebas individuales en un nivel de significación de  $\alpha/n$ .

Estadísticamente significativa que un resultado determinado es poco probable que haya ocurrido por casualidad asumiendo que la hipótesis nula es actualmente correcta (es decir, no hay diferencia entre los grupos, no efecto del tratamiento, sin relación entre las variables).

La corrección de Bonferroni se deriva de la observación de la desigualdad de Boole. Si se llevan a cabo  $n$  pruebas, cada una de ellas significativa con probabilidad  $\beta$  (donde  $\beta$  es desconocido), entonces la probabilidad de que al menos uno de ellas sea significativa es (por la desigualdad de Boole)  $\leq n\beta$ .

El objetivo es que esta probabilidad igual a  $\alpha$ , el nivel de significación para toda la serie de pruebas. Al resolver obtenemos  $\beta = \alpha/n$ . Este resultado no requiere que las pruebas sean independientes.

## Clasificación Bayesiana.

La inferencia bayesiana es un tipo de inferencia estadística en la que las evidencias u observaciones se emplean para actualizar o inferir la probabilidad de que una hipótesis pueda ser cierta. El nombre "bayesiana" proviene de uso frecuente que se hace del teorema de Bayes durante el proceso de inferencia.<sup>516</sup>

La incertidumbre y la imprecisión son connaturales en el proceso de razonamiento. La lógica establece unas reglas de inferencia a partir de las cuales se construye el sistema de razonamiento deductivo, en el que una proposición determinada es considerada como cierta o falsa, sin que se admitan grados entre estos dos extremos. Los métodos de razonamiento aproximado, entre los que se encuentran los métodos bayesianos, aportan modelos teóricos que simulan la capacidad de razonamiento en condiciones de incertidumbre, cuando no se conoce con absoluta certeza la verdad o falsedad de un enunciado o hipótesis, e imprecisión, enunciados en los que se admite un rango de variación.

Los métodos bayesianos, están basados en el conocido teorema de Bayes.

Todos ellos tienen en común la asignación de una probabilidad como medida de credibilidad de las hipótesis. En este contexto, la inferencia se entiende como un proceso de actualización de las medidas de credibilidad al conocerse nuevas evidencias. Matemáticamente se trata de obtener las probabilidades de las hipótesis condicionadas a las evidencias que se conocen. La actualización de las probabilidades condicionadas hipótesis a las evidencias se fundamenta en la aplicación del Teorema de Bayes. La diferencia entre los distintos métodos bayesianos, modelos causales y redes bayesianas, estriba en las hipótesis de independencia condicional entre hipótesis y evidencias. Dichas relaciones se expresan comúnmente mediante un grafo dirigido acíclico.

<sup>515</sup> Contenido extraído de "[http://en.wikipedia.org/wiki/Bonferroni\\_correction](http://en.wikipedia.org/wiki/Bonferroni_correction)" y consultado en fecha 20/12/2011.

<sup>516</sup> Contenido obtenido en "[http://es.wikipedia.org/wiki/Inferencia\\_bayesiana](http://es.wikipedia.org/wiki/Inferencia_bayesiana)" en fecha 8/11/2011.

La inferencia bayesiana es una inferencia estadística en la que se utiliza la evidencia o las observaciones para actualizar o inferir nuevamente que una hipótesis puede ser verdadera

El teorema de Bayes ajusta las probabilidades, dada una nueva evidencia, de la siguiente manera:

$$P(H_0|E) = \frac{P(E|H_0) P(H_0)}{P(E)}$$

Figura 172: Expresión del Teorema de Bayes.

Siendo

- $H_0$  representa una hipótesis, llamada hipótesis nula, que ha sido inferida antes de que la nueva evidencia,  $E$ , resultara disponible.
- $P(H_0)$  se llama la probabilidad a priori de  $H_0$ .
- $P(E|H_0)$  se llama la probabilidad condicional de que se cumpla la evidencia  $E$  dado que la hipótesis  $H_0$  es verdadera. Se llama también la función de verosimilitud cuando se expresa como una función de  $E$  dado  $H_0$ .
- $P(E)$  se llama la probabilidad marginal de  $E$ : la probabilidad de observar la nueva evidencia  $E$  bajo todas las hipótesis mutuamente excluyentes. Se la puede calcular como la suma del producto de todas las hipótesis mutuamente excluyentes por las correspondientes probabilidades condicionales:  $\sum P(E|H_i)P(H_i)$ .
- $P(H_0|E)$  se llama la probabilidad *a posteriori* de  $H_0$  dado  $E$ .

## Coeficiente de correlación de Pearson

En estadística, el **coeficiente de correlación de Pearson** es un índice que mide la relación directa entre dos variables aleatorias cuantitativas. A diferencia de la covarianza, la correlación de Pearson es independiente de la escala de medida de las variables.<sup>517</sup>

De manera menos formal, se puede definir el coeficiente de correlación de Pearson como un índice que puede utilizarse para medir el grado de relación de dos variables siempre y cuando ambas sean cuantitativas.

El coeficiente sobre un estadístico muestral, denotado como  $r_{xy}$  se calcula por medio de la expresión de la Figura 173.

$$r_{xy} = \frac{\sum x_i y_i - n \bar{x} \bar{y}}{n s_x s_y} = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \sqrt{n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}}$$

Figura 173: Expresión matemática el coeficiente de correlación de Pearson.

El valor del índice de correlación varía en el intervalo  $[-1,1]$  interpretándose del siguiente modo:

- Si  $r = 1$ , existe una correlación positiva perfecta. El índice indica una dependencia total entre las dos variables denominada relación directa: cuando una de ellas aumenta, la otra también lo hace en proporción constante.
- Si  $0 < r < 1$ , existe una correlación positiva.

517 Contenido obtenido en "[http://es.wikipedia.org/wiki/Coeficiente\\_de\\_correlacion\\_de\\_Pearson](http://es.wikipedia.org/wiki/Coeficiente_de_correlacion_de_Pearson)" en fecha 24/01/2012.

- Si  $r = 0$ , no existe relación lineal. Pero esto no necesariamente implica que las variables son independientes: pueden existir todavía relaciones no lineales entre las dos variables.
- Si  $-1 < r < 0$ , existe una correlación negativa.
- Si  $r = -1$ , existe una correlación negativa perfecta. El índice indica una dependencia total entre las dos variables llamada relación inversa: cuando una de ellas aumenta, la otra disminuye en proporción constante.

## Distancia euclídea o euclidiana

En matemáticas, la distancia euclídea o euclidiana es la distancia "ordinaria" (que se mediría con una regla de acero) entre dos puntos de un espacio euclídeo, la cual se deduce a partir del teorema de Pitágoras.<sup>518</sup>

Por ejemplo, en un espacio bidimensional, la distancia euclidiana entre dos puntos  $P_1$  y  $P_2$ , de coordenadas  $(x_1, y_1)$  y  $(x_2, y_2)$  respectivamente, se calcula por medio de la expresión de la Figura 174.

$$d_E(P_1, P_2) = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$$

Figura 174: Expresión de la distancia euclídea.

En general, la distancia euclidiana entre los puntos  $P = (p_1, p_2, \dots, p_n)$  y  $Q = (q_1, q_2, \dots, q_n)$ , del espacio euclídeo  $n$ -dimensional, se define con la expresión de la Figura 175.

$$d_E(P, Q) = \sqrt{(p_1 - q_1)^2 + (p_2 - q_2)^2 + \dots + (p_n - q_n)^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (p_i - q_i)^2}.$$

Figura 175: Expresión de la distancia euclídea en un espacio  $n$ -dimensional.

## Distribución $\chi^2$ (Pearson)

En estadística, la distribución  $\chi^2$  (de Pearson), llamada Chi cuadrado o Ji cuadrado, es una distribución de probabilidad continua con un parámetro  $k$  que representa los grados de libertad de la variable aleatoria representada en la Figura 176.<sup>519</sup>

$$X = Z_1^2 + \dots + Z_k^2$$

Figura 176: Variable aleatoria de la distribución de Pearson.

Donde  $Z_i$  son variables aleatorias normales independientes de media cero y varianza uno. El que la variable aleatoria  $X$  tenga esta distribución se representa habitualmente así:  $X \sim \chi_k^2$ .

La función de densidad de la distribución de Pearson es la expresada en la Figura 177 donde  $\Gamma$  es la función gamma

518 Contenido obtenido en "[http://es.wikipedia.org/wiki/Distancia\\_euclidiana](http://es.wikipedia.org/wiki/Distancia_euclidiana)" en fecha 11/06/2012.

519 Contenido obtenido en "[http://es.wikipedia.org/wiki/Distribución\\_χ2](http://es.wikipedia.org/wiki/Distribución_χ2)" en fecha 4/06/2012.

$$f(x; k) = \begin{cases} \frac{1}{2^{k/2}\Gamma(k/2)} x^{(k/2)-1} e^{-x/2} & \text{para } x \geq 0, \\ 0 & \text{para } x < 0 \end{cases}$$

Figura 177: Función de densidad de la distribución de Pearson.

La distribución  $\chi^2$  tiene muchas aplicaciones en inferencia estadística. La más conocida es la de la denominada prueba  $\chi^2$  utilizada como prueba de independencia y como prueba de bondad de ajuste y en la estimación de varianzas. Pero también está involucrada en el problema de estimar la media de una población normalmente distribuida y en el problema de estimar la pendiente de una recta de regresión lineal, a través de su papel en la distribución t de Student.

Aparece también en todos los problemas de análisis de varianza por su relación con la distribución F de Snedecor, que es la distribución del cociente de dos variables aleatorias independientes con distribución  $\chi^2$ .

### ***Dynamic time warping***

*Dynamic time warping* (Distorsión dinámica de tiempo o DTW) es un algoritmo para medir la similitud entre dos secuencias que pueden variar en tiempo o velocidad. Por ejemplo, las similitudes en los patrones de caminar serían detectadas, aunque en un vídeo la persona que estaba caminando poco a poco y si en otro que él o ella se camina más rápidamente, o incluso si hubiera aceleraciones y desaceleraciones en el transcurso de una observación. DTW se ha aplicado en el ámbito de la edición de video, audio y gráficos; de hecho, cualquier dato que se puede convertir en una representación lineal se puede analizar con DTW. Una aplicación ampliamente utilizada, ha sido el reconocimiento automático del habla, para resolver la identificación de grabaciones de voz con velocidades de habla diferente.<sup>520</sup>

En general, DTW es un método que permite a una computadora encontrar una coincidencia óptima entre dos secuencias (por ejemplo, series de tiempo) sometida a ciertas restricciones. Las secuencias son "deformadas" de forma no lineal en la dimensión del tiempo para determinar una medida de su similitud independientemente de ciertas variaciones no-lineales en la dimensión temporal. Este método de alineación de secuencias a menudo se utiliza en el contexto de modelos ocultos de Márkov<sup>521</sup>.

Un ejemplo de las restricciones impuestas a la adecuación de las secuencias está en la monotonía de la asignación en la dimensión temporal. La continuidad es menos importante en DTW que en los algoritmos de identificación de patrones; DTW es un algoritmo especialmente adecuado para identificación de secuencias en las cuales hay pérdida de información, ya que habrá oportunidades suficientes para identificar coincidencias en otros segmentos.

La extensión del problema a espacios bidimensionales como las imágenes (*planar warping*) es un problema de índole NP-complejo<sup>522</sup>, siendo los de señales de una dimensión (como las series de tiempo) pueden ser problemas resueltos en un tiempo polinómico.

Un ejemplo de algoritmo DTW se resume en el siguiente fragmento de código:

```
int DTWDistance(char s[1..n], char t[1..m]) {
    declare int DTW[0..n, 0..m], i, j, cost
```

520 Contenido obtenido en "[http://en.wikipedia.org/wiki/Dynamic\\_time\\_warping](http://en.wikipedia.org/wiki/Dynamic_time_warping)" en fecha 10/01/2012.

521 Consultar página 282 (capítulo Anexo 2 – Conceptos TIC y matemáticos utilizados.) para una explicación detallada.

522 Consultar página 284 (capítulo Anexo 2 – Conceptos TIC y matemáticos utilizados.) para una explicación detallada.

```

for i := 1 to m
  DTW[0, i] := infinity
for i := 1 to n
  DTW[i, 0] := infinity
DTW[0, 0] := 0

for i := 1 to n
  for j := 1 to m
    cost:= d(s[i], t[j])
    DTW[i, j] := cost + minimum(DTW[i-1, j ], // insertion
                                DTW[i , j-1], // deletion
                                DTW[i-1, j-1]) // match

return DTW[n, m]
}

```

## Error muestral, cálculo

Dicho indicador se obtiene a partir de la expresión para estimar el tamaño de una muestra en base al tamaño de la población.<sup>523</sup>

Para calcular el tamaño de muestra para la estimación de proporciones poblacionales hemos de tener en cuenta los mismos factores que en el caso de la media. La fórmula que nos permitirá determinar el tamaño muestral está representada en la Figura 178.

$$n = \frac{N * Z_{\alpha/2}^2 * P * (1 - P)}{(N - 1) * e^2 + Z_{\alpha/2}^2 * P * (1 - P)}$$

Figura 178: Expresión del tamaño de la muestra.

donde  $Z_{\alpha/2}$  : “Z” corresponde al nivel de confianza elegido, P es la proporción de una categoría de la variable, “e” es el error máximo, y “N” es el tamaño de la población.

Aislando el valor de “e” que es el que interesa en los cálculos en que se utiliza obtenemos la expresión de la Figura 179.

$$e = \frac{\sqrt{\frac{N * Z_{\alpha/2}^2 * P * (1 - P)}{n} - Z_{\alpha/2}^2 * p * (1 - P)}}{N - 1}$$

Figura 179: Expresión del error muestral conociendo el tamaño de la muestra y el de la población.

## Función de densidad de probabilidad

Una función de densidad de probabilidad (FDP) es una función matemática que caracteriza el comportamiento probable de una población. Es una función f(x) que especifica la posibilidad relativa de que una variable aleatoria continua X tome un valor cercano a x, y se define como la probabilidad de que X tome un valor entre x y x+dx, dividido por dx, donde dx es un número infinitesimalmente pequeño. La mayoría de las funciones de densidad de probabilidad requieren uno o más parámetros para especificarlas totalmente.<sup>524</sup>

523 Contenido obtenido en “[http://www.psico.uniovi.es/Dpto\\_Psicologia/metodos/tutor.7/p3.html](http://www.psico.uniovi.es/Dpto_Psicologia/metodos/tutor.7/p3.html)” en fecha 13/10/2011.

524 Contenido obtenido y resumido de “[http://es.wikipedia.org/wiki/Función\\_de\\_densidad\\_de\\_probabilidad](http://es.wikipedia.org/wiki/Función_de_densidad_de_probabilidad)” en fecha 17/12/2011.

La probabilidad de que una variable aleatoria continua  $X$  esté ubicada entre los valores  $a$  y  $b$  está dada por el intervalo de la FDP,  $f(x)$ , comprendido en el rango entre  $a$  y  $b$ .  $\Pr(a \leq X \leq b) = \int_a^b f(x) dx$ . La FDP es la derivada (cuando existe) de la función de distribución:  $f(x) = \frac{dF(x)}{dx}$ . En situaciones prácticas, la FDP utilizada se elige entre un número relativamente pequeño de FDP comunes, y la labor estadística principal consiste en estimar sus parámetros. Por lo tanto, a los efectos de los inventarios, es necesario saber qué FDP se ha utilizado e indicarlo en la documentación de evaluación de la incertidumbre.

La definición formal de la función de densidad requiere de conceptos de la teoría de la medida. Si una variable aleatoria  $X$  sigue una función de probabilidad  $X_*P$  su densidad con respecto a una medida de referencia  $\mu$  es la derivada de Radon–Nikodym tal como muestra la Figura 180.

$$f = \frac{dX_*P}{d\mu}.$$

Figura 180: Expresión de la densidad de una función de densidad.

Es decir,  $f$  es una función con la propiedad de la Figura 181 para cada conjunto medible  $A$ .

$$P[X \in A] = \int_{X^{-1}A} dP = \int_A f d\mu$$

Figura 181: Propiedad de la función de densidad.

La función de densidad debe cumplir las siguientes propiedades:

1. Los valores de la función de probabilidad son mayores a 0 para toda  $x$  tal como muestra la Figura 182.
2. El área total encerrada bajo la curva es igual a 1 tal como muestra la expresión de la Figura 183.
3. La probabilidad de que  $X$  tome un valor en el intervalo  $a, b$  es el área bajo la curva de la función de densidad en ese intervalo o lo que es lo mismo, la integral definida en dicho intervalo tal como muestra la Figura 184.

$$f(x) \geq 0$$

Figura 182: Propiedad 1 de la función de densidad.

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = 1$$

Figura 183: Propiedad 2 de la función de densidad.

$$\Pr(a \leq X \leq b) = \int_a^b f(x) dx = F(b) - F(a)$$

Figura 184: Propiedad 3 de la función de densidad.

La gráfica  $f(x)$  se conoce a veces como *curva de densidad*.

## Función derivable o diferenciable

El concepto de función diferenciable es una generalización para el cálculo en varias variables del concepto más simple de función derivable. En esencia una función diferenciable admite derivadas en cualquier dirección y puede aproximarse al menos hasta primer orden por una aplicación afín.<sup>525</sup>

La formulación rigurosa de esta idea intuitiva sin embargo es algo más complicada y requiere de conocimientos de álgebra lineal. Debe notarse que aunque una función de varias variables admita

<sup>525</sup> Contenido obtenido y resumido de “[http://es.wikipedia.org/wiki/Función\\_diferenciable](http://es.wikipedia.org/wiki/Función_diferenciable)” en fecha 25/06/2012.

derivadas parciales según cada una de sus variables no necesariamente eso implica que sea una función diferenciable.

Una función de varias variables se dirá diferenciable en  $x_0 \in \mathbb{R}^n$  si  $f : \Omega \subset \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ , siendo  $\Omega$  un conjunto abierto en  $\mathbb{R}^n$ , si existe una transformación lineal  $T$  que cumpla la expresión de la Figura 185

$$f(x_0 + h) = f(x_0) + T(h) + \theta(h)$$

Figura 185: Expresión de una función derivable.

Donde  $\theta(h)$  cumple la condición expresada en la Figura 186.

$$\lim_{h \rightarrow 0} \frac{\|\theta(h)\|}{\|h\|} = 0$$

Figura 186: Propiedades de la función.

o sea  $\theta(h)$  tiende a cero "más rápido" que función lineal, cuando  $h$  tiende a 0. Necesariamente la transformación lineal  $T$  es la única cosa que se ve más claramente si adoptamos como definición de función derivable aquella para la cual se cumple que exista una aplicación lineal tal que cumpla la expresión de la Figura 187.

$$\lim_{h \rightarrow 0} \frac{\|f(x_0 + h) - f(x_0) - T(h)\|}{\|h\|} = 0$$

Figura 187: Aplicación lineal que debe cumplir.

Para fijar ideas, usando una función  $f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$  cuyo gráfico sería una "sábana". La función es diferenciable si la "sábana" no está "quebrada" en los puntos donde es diferenciable, o sea la función es "suave" en todos los puntos de su dominio, existiendo la matriz jacobiana o derivada en esos puntos.

## Gumbel (Distribución)

En teoría de probabilidad y estadística la distribución de Gumbel (llamada así en honor de *Emil Julius Gumbel* (1891-1966) es utilizada para modelar la distribución del máximo (o el mínimo), por lo que se usa para calcular valores extremos. Por ejemplo, sería muy útil para representar la distribución del máximo nivel de un río a partir de los datos de niveles máximos durante 10 años. Es por esto que resulta muy útil para predecir terremotos, inundaciones o cualquier otro desastre natural que pueda ocurrir.<sup>526</sup>

La aplicabilidad potencial de la distribución de Gumbel para representar los máximos se debe a la teoría de valores extremos que indica que es probable que sea útil si la muestra de datos tiene una distribución normal o exponencial.

La función de distribución acumulada de Gumbel está expresada en la Figura 188, la mediana en la Figura 189, la media en la Figura 190 y la desviación estándar en la Figura 191 siendo  $\gamma =$  Constante de Euler-Mascheroni  $\approx 0.5772156649015328606$ .

$$F(x; \mu, \beta) = e^{-e^{-(x-\mu)/\beta}}$$

Figura 188: Expresión de la distribución de Gumbel.

526 Contenido obtenido y resumido de "[http://es.wikipedia.org/wiki/Distribución\\_de\\_Gumbel](http://es.wikipedia.org/wiki/Distribución_de_Gumbel)" en fecha 13/12/2011.

$$\mu - \beta \ln \left( -\ln \left( \frac{1}{2} \right) \right)$$

Figura 189: Expresión de la mediana de la distribución de Gumble.

$$\mu + \gamma\beta$$

Figura 190: Expresión de la media.

$$\beta\pi / \sqrt{6}.$$

Figura 191: Expresión de la desviación estándar.

La Figura 192<sup>527</sup> muestra la distribución de probabilidad de la Distribución de Gumble con diferentes valores del parámetro lambda.

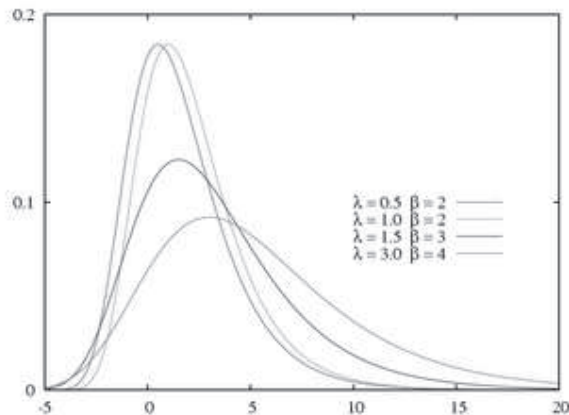


Figura 192: Función de densidad de probabilidad de la Distribución de Gumble.

## Knn

En el método  $k$ -nn (K nearest neighbors Fix y Hodges, 1951) es un método de clasificación supervisada (Aprendizaje, estimación basada en un conjunto de entrenamiento y prototipos) que sirve para estimar la función de densidad  $F(x / C_j)$  de las predictoras  $x$  por cada clase  $C_j$ .<sup>528</sup>

Este es un método de clasificación no paramétrico, que estima el valor de la función de densidad de probabilidad o directamente la probabilidad *a posteriori* de que un elemento  $x$  pertenezca a la clase  $C_j$  a partir de la información proporcionada por el conjunto de prototipos. En el proceso de aprendizaje no se hace ninguna suposición acerca de la distribución de las variables predictoras.

En el reconocimiento de patrones, el algoritmo  $k$ -nn es usado como método de clasificación de objetos (elementos) basado en un entrenamiento mediante ejemplos cercanos en el espacio de los elementos.  $k$ -nn es un tipo de "Lazy Learning" (en), donde la función se aproxima solo localmente y todo el cómputo es diferido a la clasificación.

Los ejemplos de entrenamiento son vectores en un espacio característico multidimensional, cada ejemplo está descrito en términos de  $p$  atributos considerando  $q$  clases para la clasificación. Los valores de los atributos del  $i$ -ésimo ejemplo (siendo  $1 \leq i \leq n$ ) se representan por el vector  $p$ -dimensional de la Figura 193

$$\mathbf{x}_i = (x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{pi}) \in X$$

Figura 193: vector  $p$ -dimensional.

<sup>527</sup> Imagen obtenida en "[http://es.encydia.com/pt/Distribución\\_de\\_Gumble](http://es.encydia.com/pt/Distribución_de_Gumble)" en fecha 13/12/2012.

<sup>528</sup> Contenido obtenido en "<http://es.wikipedia.org/wiki/Knn>" en fecha 6/12/2011.



El espacio es particionado en regiones por localizaciones y etiquetas de los ejemplos de entrenamiento. Un punto en el espacio es asignado a la clase  $C$  si esta es la clase más frecuente entre los  $k$  ejemplos de entrenamiento más cercano. Generalmente se usa la distancia euclidea (representada en la Figura 194).

$$d(x_i, x_j) = \sqrt{\sum_{r=1}^p (x_{ir} - x_{jr})^2}$$

Figura 194: Expresión de la distancia euclidiana.

El paso de entrenamiento del algoritmo consiste en almacenar los vectores característicos y las etiquetas de las clases de los ejemplos de entrenamiento. En la fase de clasificación, la evaluación del ejemplo (del que no se conoce su clase) es representada por un vector en el espacio característico. Se calcula la distancia entre los vectores almacenados y el nuevo vector, y se seleccionan los  $k$  ejemplos más cercanos. El nuevo ejemplo es clasificado con la clase que más se repite en los vectores seleccionados.

Este método supone que los vecinos más cercanos nos dan la mejor clasificación y esto se hace utilizando todos los atributos; el problema de dicha suposición es que es posible que se tengan muchos atributos irrelevantes que dominen sobre la clasificación: dos atributos relevantes perderían peso entre otros veinte irrelevantes.

Para corregir el posible sesgo se puede asignar un peso a las distancias de cada atributo, dándole así mayor importancia a los atributos más relevantes. Otra posibilidad consiste en tratar de determinar o ajustar los pesos con ejemplos conocidos de entrenamiento. Finalmente, antes de asignar pesos es recomendable identificar y eliminar los atributos que se consideran irrelevantes.

El sistema puede ser modificado por medio de una ponderación de la contribución de cada vecino de acuerdo a la distancia entre él y el ejemplar a ser clasificado  $x_q$ , dando mayor peso a los vecinos más cercanos. Por ejemplo podemos ponderar el voto de cada vecino de acuerdo al cuadrado inverso de sus distancias.

## Kolmogórov-Smirnov (test)

La prueba de Kolmogórov-Smirnov (también prueba **K-S**) es una prueba no paramétrica que se utiliza para determinar la bondad de ajuste de dos distribuciones de probabilidad entre sí.<sup>529</sup>

En el caso de que queramos verificar la normalidad de una distribución, la prueba de Lilliefors conlleva algunas mejoras con respecto a la de Kolmogórov-Smirnov; y, en general, el test de Shapiro–Wilk o la prueba de Anderson-Darling son alternativas más potentes.

Conviene tener en cuenta que la prueba Kolmogórov-Smirnov es más sensible a los valores cercanos a la mediana que a los extremos de la distribución. La prueba de Anderson-Darling proporciona igual sensibilidad con valores extremos.

La distribución de los datos  $F_n$  para  $n$  observaciones  $y_i$  se define en la Figura 195.

$$F_n(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \begin{cases} 1 & \text{si } y_i \leq x, \\ 0 & \text{alternativa.} \end{cases}$$

Figura 195: Función de distribución de la prueba de Kolmogórov-Smirnoff.

529 Contenido obtenido en “[http://es.wikipedia.org/wiki/Prueba\\_de\\_Kolmogórov-Smirnov](http://es.wikipedia.org/wiki/Prueba_de_Kolmogórov-Smirnov)” en fecha 13/12/2011.

## Latent Dirichlet Allocation (método)

En estadística, *latent Dirichlet allocation* (**LDA**) es un modelo generativo que permite que conjuntos de observaciones puedan ser explicados por grupos inadvertidos que explican por qué algunas partes de los datos son similares. Por ejemplo, si las observaciones son palabras en documentos, cada documento es una mezcla de categorías y la aparición de cada palabra en un documento se debe a una de las categorías a las que el documento pertenece. LDA fue presentado como un modelo en grafo para descubrir categorías por David Blei, Andrew Ng y Michael Jordan en 2002.<sup>530</sup>

En LDA, cada documento puede ser visto como una mezcla de diferentes temas. Esto es similar a un análisis probabilístico de aspectos ocultos en semántica (pLSA), excepto que en LDA la distribución del tema se supone que tiene una distribución Dirichlet. En la práctica, esto resulta en mezclas más razonables de los temas en un documento. Se ha observado, sin embargo, que el modelo pLSA es equivalente a la LDA modelo bajo una distribución uniforme Dirichlet previa.

A modo de ejemplo, un modelo LDA podría tener temas que pueden ser clasificados como perro y gato. Sin embargo, la clasificación es arbitraria, porque el tema que engloba estas palabras no puede ser nombrado. Por otra parte, un tema que tiene probabilidades de generar varias palabras, como la leche, miau, y el gatito, que pueden ser clasificados e interpretados por el espectador como "CAT". Naturalmente, gato se tendrá una alta probabilidad dado a este tema. El tema Perro tiene igualmente las probabilidades de generación de cada palabra: cachorro, la corteza, y el hueso que tenga alta probabilidad. Las palabras sin especial relevancia, como por ejemplo (véase el nombre del ciclo), tendrá más o menos, incluso entre las clases de probabilidad (o puede ser colocado en una categoría separada).

Un documento que se le da a los temas. Se trata de una suposición de un conjunto estándar de modelo de las palabras, y hace que las palabras sean intercambiables individualmente.

## Mahalanobis (distancia)

Es una medida de distancia introducida por Mahalanobis en 1936. Su utilidad radica en que es una forma de determinar la *similitud* entre dos variables aleatorias multidimensionales. Se diferencia de la distancia euclídea en que tiene en cuenta la correlación entre las variables aleatorias.<sup>531</sup>

Formalmente, la distancia de Mahalanobis entre dos variables aleatorias con la misma distribución de probabilidad  $\vec{x}$  y  $\vec{y}$  con matriz de covarianza  $\Sigma$  se define en base a la expresión de la Figura 196.

$$d_m(\vec{x}, \vec{y}) = \sqrt{(\vec{x} - \vec{y})^T \Sigma^{-1} (\vec{x} - \vec{y})}.$$

Figura 196: Expresión de la distancia de Mahalanobis.

La distancia de Mahalanobis cumple las siguientes propiedades, necesarias para ser una distancia:

- Semipositividad:  $d(a, b) \geq 0 \forall a, b \in X$  y además  $d(a, b) = 0$  si  $a = b$

Es decir, la distancia entre dos puntos de las mismas coordenadas es cero, y si tienen coordenadas distintas la distancia es positiva, pero nunca negativa.

530 Contenido obtenido y traducido al castellano de "[http://en.wikipedia.org/wiki/Latent\\_Dirichlet\\_allocation](http://en.wikipedia.org/wiki/Latent_Dirichlet_allocation)" en fecha 23/03/2012.

531 Contenido obtenido y resumido de "[http://es.wikipedia.org/wiki/Distancia\\_de\\_Mahalanobis](http://es.wikipedia.org/wiki/Distancia_de_Mahalanobis)" en fecha 11/06/2012.

- Simetría:  $d(a, b) = d(b, a) \forall a, b \in X$   
Intuitivamente, la distancia ente  $a$  y  $b$  es la misma que entre  $b$  y  $a$ .
- Desigualdad triangular:  $d(a, b) \leq d(a, c) + d(c, b) \forall a, b, c \in X$

## Método de Bernoulli

Basado en la distribución de Bernoulli. En teoría de probabilidad y estadística, la distribución de Bernoulli (o distribución dicotómica), es una distribución de probabilidad discreta, que toma valor 1 para la probabilidad de éxito ( $p$ ) y valor 0 para la probabilidad de fracaso ( $q = 1 - p$ ).<sup>532</sup>

Si  $X$  es una variable aleatoria que mide "número de éxitos", y se realiza un único experimento con dos posibles resultados (éxito o fracaso), se dice que la variable aleatoria  $X$  se distribuye como una Bernoulli de parámetro  $P$  tal como muestra la Figura 197.

$$X \sim Be(p)$$

Figura 197: Nomenclatura de la distribución de Bernoulli.

La fórmula será la expresada en la Figura 198

$$f(x) = p^x(1-p)^{1-x} \quad \text{con } x = \{0, 1\}$$

Figura 198: Expresión de la distribución de Bernoulli.

Su función de probabilidad viene definida por la expresión de la Figura 199

$$f(x; p) = \begin{cases} p & \text{si } x = 1, \\ q & \text{si } x = 0, \\ 0 & \text{en cualquier otro caso} \end{cases}$$

Figura 199: Expresión de la función de probabilidad de la distribución de Bernoulli.

Un experimento al cual se aplica la distribución de Bernoulli se conoce como Ensayo de Bernoulli o simplemente ensayo, y la serie de esos experimentos como ensayos repetidos.

## Modelo multinomial

Es un modelo discreto multivariante. Puede verse como una generalización del modelo binomial que permite más de dos posibles resultados.<sup>533</sup>

Una situación típica es el número de veces que se dan cada uno de los posibles resultados  $A_1, \dots, A_k$  en  $N$  extracciones independientes manteniéndose constante la probabilidad de cada resultado. Los parámetros del modelo se corresponden con las diferentes probabilidades:  $p_1 = P(A_1), \dots, p_k = P(A_k)$  y con el valor  $N$ .

Por ejemplo:

Para saber si un dado es regular hacemos 120 lanzamientos y anotamos los resultados obtenidos tal como muestra la Tabla 110.

532 Contenido obtenido en "[http://es.wikipedia.org/wiki/Distribución\\_de\\_Bernoulli](http://es.wikipedia.org/wiki/Distribución_de_Bernoulli)" en fecha 13/12/2011.

533 Contenido obtenido en "<http://www.ub.edu/stat/GrupsInnovacio/Statmedia/demo/Temas/Capitulo12/B0C12m1t1.htm>" en fecha 13/12/2011.

Resultado	1	2	3	4	5	6
Frecuencia	15	22	18	14	25	26

Tabla 110: Resultados obtenidos en el ejemplo.

El modelo teórico sugiere que la probabilidad de cada cara es la misma:

$$P(1) = P(2) = P(3) = P(4) = P(5) = P(6) = 1/6, \text{ es decir, } p_i = 1/6 \quad i = 1, \dots, 6$$

Los valores realmente observados son:  $o_1 = 15, \dots, o_6 = 26$ .

## Probabilidad Condicionada

Probabilidad condicionada es la probabilidad de que ocurra un evento  $A$ , sabiendo que también sucede otro evento  $B$ . La probabilidad condicional se escribe  $P(A|B)$ , y se lee “la probabilidad de  $A$  dado  $B$ ”.<sup>534</sup>

No tiene por qué haber una relación causal o temporal entre  $A$  y  $B$ .  $A$  puede preceder en el tiempo a  $B$ , sucederlo o pueden ocurrir simultáneamente.  $A$  puede causar  $B$ , viceversa o pueden no tener relación causal. Las relaciones causales o temporales son nociones que no pertenecen al ámbito de la probabilidad. Pueden desempeñar un papel o no dependiendo de la interpretación que se le dé a los eventos.

El condicionamiento de probabilidades puede lograrse aplicando el teorema de Bayes.

Dado un espacio de probabilidad  $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{P})$  y dos eventos (o sucesos)  $A, B \in \mathcal{F}$  con  $P(B) > 0$ , la probabilidad condicional de  $A$  dado  $B$  está definida según la expresión de la Figura 200.

$$P(A | B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)}.$$

Figura 200: Expresión de la probabilidad condicionada.

$P(A | B)$  se puede interpretar como, tomando los mundos en los que  $B$  se cumple, la fracción en los que también se cumple  $A$ . Si el evento  $B$  es, por ejemplo, tener la gripe, y el evento  $A$  es tener dolor de cabeza,  $P(A | B)$  sería la probabilidad de tener dolor de cabeza cuando se está enfermo de gripe.

### Propiedades

LA probabilidad condicionada cumple las siguientes tres condiciones:

1.  $P(A | B) + P(\bar{A} | B) = 1$
2.  $B \subseteq A \rightarrow P(A | B) = 1$
3.  $P(A) = P(A | B) \cdot P(B) + P(A | \bar{B}) \cdot P(\bar{B})$

## Transformación Box-cox

Las transformaciones box-cox son del tipo potencial. Se utilizan en estadística para corregir sesgos en la distribución de errores, para corregir varianzas desiguales (para diferentes valores de la

<sup>534</sup> Contenido obtenido en “[http://es.wikipedia.org/wiki/Probabilidad\\_condicionada](http://es.wikipedia.org/wiki/Probabilidad_condicionada)” en fecha 25/06/2012.

variable predictora) y principalmente para corregir a no linealidad en la relación (mejorar correlación entre las variables). Esta transformación recibe el nombre de los estadísticos George E. P. Box y David Cox.<sup>535</sup>

La transformación potencial está definida como una función continua que varía con respecto a la potencia lambda ( $\lambda$ ). Para los datos  $(Y_1, \dots, Y_n)$ , se realiza la transformación  $Y_i' = Y_i^\lambda$  en base a la expresión de la Figura 201.

$$Y_i^{(\lambda)} = \begin{cases} K_1 * (Y_i^\lambda - 1) & \text{si } \lambda \neq 0, \\ K_2 * \ln(Y_i) & \text{si } \lambda = 0 \end{cases}$$

Figura 201: Expresión de la transformación Box-cox.

Siendo  $K_2$  es la media geométrica de los valores  $Y_1, \dots, Y_n$  en base a la expresión de la Figura 202.

$$K_2 = \left( \prod_{i=1}^n Y_i \right)^{1/n} = (Y_1 * Y_2 * \dots * Y_n)^{1/n}$$

Figura 202: Expresión del valor  $K_2$ .

y  $K_1$  es un parámetro que depende de  $K_2$  y de  $\lambda$ , tal como muestra la Figura 203.

$$K_1 = \frac{1}{\lambda * K_2^{\lambda-1}}$$

Figura 203: Expresión de  $K_1$ .

### Procedimiento para la selección del mejor valor de $\lambda$

Primero se deben seleccionar el rango de valores de lambda  $\lambda$  de los cuales se quiere seleccionar el que logra que la transformación se acerque al máximo a los datos. Para cada valor de  $\lambda$  se realiza la transformación del paso anterior. Finalmente se sustituyen los valores de la o las variables explicativas en las diferentes funciones y se calculan los cuadrados de los residuales estadísticos. Aquella que tenga el menor valor de la suma de residuales será la mejor opción. Note que  $K_2$  es un valor fijo para todos los casos y que sólo hay que calcular de nuevo el valor  $K_1$ .

### **Varianza muestral**

En teoría de probabilidad, la varianza (que suele representarse como  $\sigma^2$ ) de una variable aleatoria es una medida de dispersión definida como la esperanza del cuadrado de la desviación de dicha variable respecto a su media.<sup>536</sup>

Está medida en unidades distintas de las de la variable. Por ejemplo, si la variable mide una distancia en metros, la varianza se expresa en metros al cuadrado. La desviación estándar, es la raíz cuadrada de la varianza, es una medida de dispersión alternativa expresada en las mismas unidades de los datos de la variable objeto de estudio. La varianza tiene como valor mínimo 0.

535 Contenido obtenido en "[http://es.wikipedia.org/wiki/Transformación\\_Box-cox](http://es.wikipedia.org/wiki/Transformación_Box-cox)" en fecha 12/06/2012.

536 Contenido obtenido en "<http://es.wikipedia.org/wiki/Varianza>" en fecha 18/07/2012.

Hay que tener en cuenta que la varianza puede verse muy influida por los valores atípicos y no se aconseja su uso cuando las distribuciones de las variables aleatorias tienen colas pesadas. En tales casos se recomienda el uso de otras medidas de dispersión más robustas.

Dada una variable aleatoria  $X$  con media  $\mu = E(X)$ , se define su varianza,  $\text{Var}(X)$  (también representada como  $\sigma_X^2$  o, simplemente  $\sigma^2$ ), como la expresión de la Figura 204.

$$\text{Var}(X) = E[(X - \mu)^2].$$

*Figura 204: Expresión genérica de la varianza muestral.*

En los casos estudiado en esta investigación, la variable  $X$  es discreta con pesos  $x_1 \mapsto p_1, \dots, x_n \mapsto p_n = 1$ , y por tanto la expresión de la Figura 205 define la varianza muestral de una variable discreta.

$$\text{Var}(X) = \sum_{i=1}^n p_i \cdot (x_i - \mu)^2$$

*Figura 205: Expresión de la varianza muestral de una variable discreta.*

Siendo la expresión de la media la expresada en la Figura 206.

$$\mu = \sum_{i=1}^n p_i \cdot x_i$$

*Figura 206: Expresión de la media de una variable discreta.*

## Anexo 7 – Manual de usuario de la aplicación AN\_MID v5.1

Del funcionamiento de la aplicación AN\_MID v 5.1 (an\_mid51.exe)

### Formato de llamada del programa

La línea de comando para ejecutar el programa responde a la siguiente sintaxis<sup>537</sup>:

```
\>[ruta del programa]AN_MID51 fichero_origen fichero_dest opciones
```

### Parámetros.

La Tabla 111 resume los parámetros de ejecución de la aplicación AN\_MID51.exe.

Parámetros	Descripción
[ruta del programa]	Ruta del directorio donde se encuentra instalado el programa AN_MID51.EXE
fichero_origen	<i>[Unidad:][ruta de acceso]nombre_completo_fichero_origen</i> Nombre completo (incluyendo la ruta de acceso si el directorio donde se encuentra el fichero no es el mismo que el directorio por defecto) del archivo ASCII <sup>538</sup> donde se encuentra el listado de las piezas musicales musicales en formato MIDI que deben ser procesadas
fichero_dest	<i>[Unidad:][ruta de acceso]nombre_completo_fichero_destino</i> Nombre completo (con ruta de acceso si el directorio donde se encuentra el fichero no es el mismo que el directorio por defecto) del archivo ASCII donde se almacenaran los resultados obtenidos del análisis de las piezas
opciones	<i>t   parámetros</i> (que pueden ser ‘n’ (análisis de notes), ‘i’ (análisis de intervalos) y ‘d’ (análisis de duraciones) o cualquier combinación de ellas sin importar el orden siempre que haya al menos uno). El parámetro ‘t’ provocará el análisis de notes, intervalos y duraciones (es decir, el parámetro ‘t’ será el mismo que los parámetros ‘n’, ‘i’ y ‘d’. <sup>539</sup>

Tabla 111: Parámetros de la aplicación AN\_MID al ser ejecutada desde la línea de comando.

537 Consultar página 274 (capítulo Anexo 2 – Conceptos TIC y matemáticos utilizados.) para una explicación detallada.

538 Consultar página 271 (capítulo Anexo 2 – Conceptos TIC y matemáticos utilizados.) para una explicación detallada.

539 El número de datos obtenidos por cada pieza musical bajo esta opción puede ser considerable (167 + número de datos de duraciones). Ello puede provocar que la versión de hoja de cálculo que importe dicho archivo\_destino no permita utilizar tantas columnas emitiendo un mensaje de error y dejando de importar las columnas que superen su capacidad.

## Ejemplo

Presentamos a continuación un ejemplo de línea de comandos de ejecución del programa:

```
|>c:\aplicacion\an_mid51 c:\midi\haydn\sonatas.prn c:\midi\haydn\sonatas.txt t
```

En este ejemplo la aplicación está a la carpeta “C:\aplicacion”, las especificaciones de las piezas musicales a procesar están en el fichero “c:\midi\haydn\sonatas.prn” y los resultados serán almacenados en el fichero “c:\midi\haydn\sonatas.txt”.

## Programa lanzadera.

Para facilitar la ejecución en un entorno gráfico de la aplicación AN\_MIDv5.1 se ha desarrollado un programa lanzadera para añadir las siguientes funcionalidades:

1. Permitir una gestión visual del entorno de trabajo con las siguientes opciones:
  1. Evita al usuario tener que conocer la sintaxis de línea de comando.
  2. Editar los ficheros de texto origen, destino, log (un archivo de texto donde se volcará la salida por pantalla de las ejecuciones del programa AN\_MIDv5.1. Dicho archivo almacenará los mensajes de error detectados en cada proceso.
  3. Editar rápidamente los ficheros de salida por medio de la hoja de cálculo *Open Office Calc*.
2. Almacenar procesos de cálculo. Esta funcionalidad permite almacenar en una base de datos los parámetros de ejecución de cada proceso por medio de un identificador de proceso numérico.

El programa lanzadera W\_AN\_MIDv5.1 trabaja con una base de datos asociada donde por medio de una tabla guarda los parámetros de cada ejecución del programa AN\_MIDv5.1. Cada uno de los conjuntos de parámetros asociados a una ejecución recibe el nombre de “proceso”. La aplicación dispone de una única ventana desde la cual se gestiona todo el proceso tal como muestra la Figura 207.

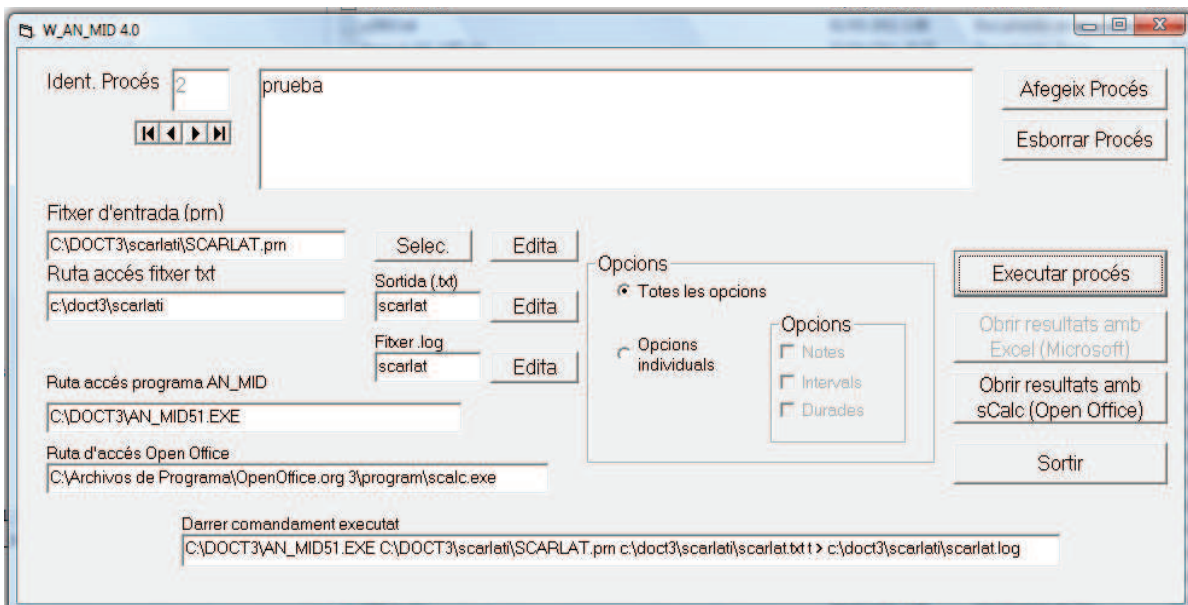


Figura 207: Ventana de ejecución de la lanzadera visual W\_AN\_MIDv5.1.



## Campos

### **Ident. Procés**

Es un identificador numérico generado automática y secuencialmente que identifica de manera única cada proceso. A la derecha existe un campo de texto en el que se especifica la descripción del proceso con toda aquella información que el usuario quiera registrar como descriptor del cada proceso.

### **Fitxer d'entrada (prn)**

Ruta de acceso a partir de la carpeta raíz y nombre del fichero\_origen que almacena según el formato definido en la página 405 la información de las piezas musicales a procesar en cada proceso. Por defecto la extensión de dicho fichero de texto es “prn” pero puede utilizarse cualquier otra según criterio del usuario.

### **Sortida (.txt)**

Nombre del fichero\_dest que almacena en formato de texto (según el formato definido en la página 406) la información obtenida de todas las piezas musicales incluidas en el proceso y especificadas en fichero\_origen. La extensión de este fichero será “txt” aunque si el programa AN\_MID se ejecuta en modo línea de comando dicha restricción no existe.

### **Ruta accés fitxer txt**

Ruta de acceso del fichero\_dest a partir de la carpeta raíz.

### **Fitxer .log**

Nombre del fichero de texto con extensión “log” donde se almacenan los mensajes de error y avisos generados en la ejecución del proceso. La extensión del fichero no puede ser modificada a no ser que el proceso se ejecute directamente desde la línea de comandos donde dicha restricción no existe. La ruta de acceso de este archivo es la misma que la del fichero de salida fichero\_dest.

### **Ruta accés programa AN\_MID**

Ruta de acceso a partir de la carpeta raíz y nombre del programa ejecutable AN\_MID. Cada proceso puede tener un nombre de ejecutable diferente por si interesa ejecutar una versión antigua del programa AN\_MID (v5.1, 4.1 o 3.1).<sup>540</sup>

### **Ruta d'accés Open Office**

Ruta de acceso a partir de la carpeta raíz y nombre sCalc.exe (hoja de cálculo del paquete Open Office). Este campo permite compatibilizar el funcionamiento de este programa con cualquier instalación y versión instalada de la suite ofimática OpenOffice/Libre Office.

### **Darrer comandament executat**

Con las opciones seleccionadas y tras pulsar el botón de acción “Executa procés” se construye la línea de comandos y se ejecuta el programa AN\_MID según la sintaxis de la página 401. Este campo no se almacena en la base de datos y está en blanco si no ha sido ejecutada ninguna ejecución del proceso. De este modo si se van recorriendo con las flechas de desplazamiento los diferentes procesos no habrá ninguna relación con el contenido de este campo ya que almacena la línea de comando de la última ejecución de algún proceso.

### **Opcions – Totes les opcions**

Opción marcada por defecto que tampoco se almacena en la base de datos. La activación de esta opción desactiva las opciones individuales y provoca la ejecución del análisis de notas, intervalos y duraciones del proceso AN\_MID51.exe. (La Tabla 111 de la página 401 muestra las opciones en línea de comando. La opción 't' corresponde con esta opción de la lanzadera).

---

<sup>540</sup> Las especificaciones funcionales de las versiones anteriores a la versión 5.1 no se han incluido en este documento ya que las versiones posteriores incrementan la funcionalidad del programa pero incluyendo siempre la funcionalidad de la versión anterior.

## Opcions individuals

Permite mediante estas casillas de verificación<sup>541</sup> (llamadas *checkbox* en inglés) seleccionar el proceso de notas, intervalos y duraciones. (La Tabla 111 de la página 401 muestra las opciones 'n', 'i' y 'd' en línea de comando que corresponden con estas opciones de la lanzadera del programa).

### Acciones asociadas a controles

#### Botones de desplazamiento

Situados debajo del identificador de proceso (campo *Ident Procés* ver Figura 207 en la página 402) permiten desplazarse por la base de datos recorriendo los diferentes procesos almacenados en ella. De izquierda a derecha, los cuatro botones realizan las siguientes acciones: Primer, anterior, siguiente y último proceso.

#### Afegeix Procés

Crea un nuevo proceso en la base de datos. Las modificaciones que en sus campos se hagan quedarán almacenadas automáticamente en ella. El identificador del proceso será el siguiente número natural al último identificador de proceso creado.

#### Eborra Procés

Elimina el proceso que en ese instante esté visible en la lanzadera. Esta acción no tendrá posibilidad de deshacerse.

#### Edita

Los tres botones etiquetados como “Edita” permiten abrir respectivamente de arriba a abajo el fichero\_origen, fichero\_dest y fichero log por medio del bloc de notas (*notepad.exe*). En caso de no existir el archivo por errores en el nombre o por no haber sido ejecutado todavía el proceso, el bloc de notas abierto aparecerá en blanco.

#### Executa procés

A partir de las opciones del proceso, esta acción confecciona el comando y lo ejecuta a continuación. Aparecerá una ventana cmd mientras el proceso dure y desaparecerá cuando el proceso AN\_MID51 haya finalizado habiéndose recogido los mensajes de salida en el fichero log. Tras la ejecución, el campo “*Darrer comandament executat*” contendrá la línea de comando ejecutada hasta que se ejecute otro proceso.

#### Obrir resultats amb sCalc (OpenOffice)

Abre el archivo fichero\_dest con los resultados del proceso por medio de la hoja de cálculo configurada en el campo “Ruta d'accés Open Office”. Se abrirá un proceso de importación de texto para tabular correctamente las columnas (debe recordarse que el carácter separador es la coma ",").

#### Obrir resultats amb Excel (Microsoft)

Este botón está inhabilitado en esta versión de la lanzadera por aparecer problemas no resueltos en la llamada al programa pasándole como parámetro un fichero de texto.

#### Sortir

Abandona el programa lanzadera y devuelve el control al entorno Windows.

---

<sup>541</sup> Consultar página 271 (capítulo Anexo 2 – Conceptos TIC y matemáticos utilizados.) para una explicación detallada.

## Formato del fichero [fichero\_origen]

El formato del fichero origen del proceso será un fichero de texto donde habrá una línea por cada pieza musical a analizar.

Cada línea del fichero estará compuesta por 4 parámetros obligatorios a saber: código\_pieza\_musical, umbral\_asociación, umbral\_desviación\_durada\_max y ruta\_fichero\_MIDI tal como muestra la Tabla 112.

Parámetro de línea	Longitud (cifras)	Descripción
<i>código_pieza_musical</i>	4	Identificador numérico de orden asociado a la pieza musical. Si hay códigos de pieza musical duplicados se dificultará el proceso de identificación de errores pero el proceso se desarrollará de igual modo.
<i>umbral_asociación</i>	2	Utilizado en el análisis de intervalos define el número de pulsos de compás antes de descartar la posibilidad de asociar una nota cerrada con otra para confeccionar un intervalo <sup>542</sup> . Si se especifica 99 ninguna nota agotará su posibilidad de ser asociada en un intervalo en algún instante.
<i>umbral_desviación_durada_max</i>	4	Número de unidades de tiempo MIDI que el proceso de análisis está dispuesto a tolerar como desviación de la duración estándar de un tipo de duración de nota antes de no considerarlo <sup>543</sup> .
<i>ruta_fichero_MIDI</i>	Inferior a 1024	[Unidad:][ruta de acceso]fichero_MIDI; Ruta de acceso al fichero en formato MIDI o pieza musical a analizar.

Tabla 112: Información esperada en cada línea del fichero origen.

Todos los valores estarán separados por como mínimo, un espacio entre ellos.

### Ejemplo

Presentamos en la Tabla 113 un ejemplo de una posible línea del fichero\_origen.

<sup>542</sup> En caso de no realizarse un análisis de intervalos (con las opciones 't' o 'i') este valor no será utilizado.

<sup>543</sup> En caso de no realizarse un análisis de duraciones (con las opciones 't' o 'd') este valor no será utilizado.

```
0001 04 0100 c:\partit\haydn\sonatas\h34_1.mid;
0002 03 0080 c:\partit\haydn\sonatas\h34_2.mid;
```

Tabla 113: Ejemplo de información contenida en dos líneas del fichero origen.

El código de pieza musical es el 0001, el umbral de asociación es de 4 pulsos, el umbral de desviación de duración máximo es de 100 unidades de tiempo MIDI y la pieza musical está almacenada en formato MIDI en el ‘fichero h34\_1.mid’ que está en la carpeta ‘\partit\haydn\sonatas’ de la unidad C:

## Formato del fichero [*fichero\_dest*]

Este fichero de texto tendrá una línea de texto para cada pieza musical o fichero MIDI del fichero [*fichero\_origen*] con todos los valores de las variables analizadas por el proceso AN\_MID51 y delimitado por comas.

Para procesar los resultados con una hoja de cálculo o con un paquete estadístico debe importarse con codificación ANSI ASCII para garantizar que los acentos en catalán de la línea de cabecera sean importados correctamente.

Los campos en este fichero dependerán de las opciones de ejecución del proceso y se estructuran de izquierda a derecha en 4 categorías tal como muestra la Tabla 114.

Cabecera general	Cabecera notas	Cabecera intervalos	Cabecera duraciones
Resultados de análisis generales. (9 valores)	Resultados de análisis de notas. (12 valores)	Resultados d análisis de intervalos. <sup>544</sup> (144 valores)	Resultados de análisis de duraciones. (26 valores + 6100/ <i>umbral_desviación_durada_max</i> )

Tabla 114: Estructura de las cabeceras de datos del fichero de destino.

La Tabla 115 muestra las categorías de datos que aparecerán en el fichero de salida dependiendo de las opciones incluidas en la línea de llamada.

Categoría de resultados	Casos en los que aparecerán en <i>fichero_dest</i>
...de análisis generales	Constantes en cualquier tipo de análisis realizado.
...de análisis de notas	En caso de utilización de las opciones ‘t’ o ‘n’
...de análisis de intervalos	En caso de utilización de las opciones ‘t’ o ‘i’
...de análisis de duraciones	En caso de utilización de las opciones ‘t’ o ‘d’

Tabla 115: Categorías de datos que aparecerán en el fichero de salida dependiendo de las opciones en el momento de ejecución.

Todos los valores estarán separados para comas.

<sup>544</sup> Consultar página 247 (capítulo Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados) para una explicación detallada.

## Resultados de análisis generales

Los campos asociados a los resultados de análisis general son los siguientes:

1. **código pieza musical:** El mismo código de pieza musical que hay en el fichero origen.
2. **tiempo de cálculo (segundos):** tiempo en segundos que ha tardado el proceso AN\_MID51 en analizar la pieza musical. Si el tiempo aparece como 0.00 significa que el fichero ha sido procesado en menos de una centésima de segundo.
3. **Tonalidad<sup>545</sup>:** Valor hexadecimal que nos indicará cuál de las doce notas del sistema tonal es la nota tónica de la pieza musical. Conjuntamente con el modo nos indicará la tonalidad.
4. **Modo:** M | m que indicará el modo Mayor o menor respectivamente.

La Tabla 116 resume en base a los parámetros de tonalidad y Modo la tonalidad de la pieza musical y la armadura<sup>546</sup> de la pieza musical.

Tonalidad (fichero salida)	Modo	Tonalidad de la pieza musical
0	M	Do Mayor (0 alteraciones)
0	m	Do menor (3 bemoles)
1	M	Do # Mayor
1	m	Do # menor (4 sostenidos)
2	M	Re Mayor (2 sostenidos)
2	m	Re menor (1 bemoles)
3	M	Mi b Mayor (3 bemoles)
3	m	Mi b menor (6 bemoles)
4	M	Mi Mayor (4 sostenidos)
4	m	Mi menor (1 sostenido)
5	M	Fa Mayor (1 bemoles)
5	m	Fa # menor (6 sostenidos)
6	M	Fa # Mayor (6 bemoles)
6	m	Sol menor (2 bemoles)
7	M	Sol Mayor (1 sostenido)
7	m	La b menor (7 bemoles)
8	M	La b Mayor (4 bemoles)
8	m	Sol # menor (5 sostenidos)
9	M	La Mayor (3 sostenidos)
9	m	La menor (0 alteraciones)
A	M	Si b Mayor (2 bemoles)
A	m	Si b menor (5 bemoles)
B	M	Si Mayor (5 sostenidos)
B	m	Si menor (2 sostenidos)

Tabla 116: Convenciones utilizadas en base a las posibles tonalidades permitidas por el sistema tonal.

545 Consultar página 261 (capítulo Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados) para una explicación detallada de tonalidad y modo de una obra musical.

546 Consultar página 261 (capítulo Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados) para una explicación detallada.

1. **umbral\_asociación:** Es el mismo que el umbral de asociación del fichero origen, pero expresado en unidades de tiempo MIDI dependiendo del compás de la pieza musical. En caso de no ejecutarse el proceso de análisis de intervalos con la opción ‘t’ o ‘i’, no será utilizado para nada.
2. **Obra:** Es el nombre del fichero MIDI que se ha procesado.
3. **Compás:** Es el compás de la pieza musical (4/4, 3/4, 6/8,...)<sup>547</sup>.
4. **Notas:** Es el número de notas que se ha procesado del fichero.
5. **Intervalos:** Es el número de intervalos que han sido identificados en el fichero MIDI. Siempre será un valor relativamente inferior al número de notas procesadas<sup>548</sup>. Si no se ejecuta el análisis de intervalos (con las opciones ‘t’ o ‘i’) el resultado de este valor será -1.

### Resultados de análisis de notas

En estos campos se encuentran las frecuencias relativas de aparición de cada una de las 12 notas (del sistema tonal) normalizadas en base a la tonalidad de la pieza musical y las frecuencias relativas de distribución a lo largo de las 11 octavas que permite el estándar MIDI. (12 + 11 resultados) tal como muestra la Tabla 117.

Nombre en la cabecera del fichero	Grado (en base a la teoría musical) <sup>549</sup>	Observaciones
C	Tónica	La suma de estos valores para cada pieza musical es igual a 1.
Cs	Tónica + 1 semitono	
D	Supertónica	
Ds	Supertónica + 1 semitono	
E	Mediante	
F	Subdominante	
Fs	Subdominante + 1 semitono	
G	Dominante	
Gs	Dominante + 1 semitono	
A	Superdominante	
As	Superdominante + 1 semitono	
B	Sensible	
O1	Octava 1 (valores MIDI 0-11) <sup>550</sup>	La suma de estos valores debe ser igual a 1
O2	Octava 2 (valores de nota MIDI entre 12 -23)	
O3	Octava 3 (valores de nota MIDI entre 24-35)	
O4	Octava 4 (valores de nota MIDI entre 36-47)	
O5	Octava 5 (valores de nota MIDI entre 48-59)	

547 Consultar página 235 (capítulo Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados) para una explicación detallada.

548 En caso de haber una diferencia considerable (> 5%) entre el número de intervalos y el número de notas procesadas, sería interesante ejecutar de nuevo el proceso incrementando el umbral de asociación del fichero origen corriendo el riesgo de identificar intervalos falsos.

549 Consultar página 246 (capítulo Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados) para una explicación detallada.

550 Consultar página 256 (capítulo Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados) para una explicación detallada.

Nombre en la cabecera del fichero	Grado (en base a la teoría musical)	Observaciones
O6	Octava 6 (valores de nota MIDI entre 60-71)	
O7	Octava 7 (valores de nota MIDI entre 72-83)	
O8	Octava 8 (valores de nota MIDI entre 84-95)	
O9	Octava 9 (valores de nota MIDI entre 96-107)	
O10	Octava 10 (valores de nota MIDI entre 108-119)	
O11	Octava 11 (valores de nota MIDI entre 120-127) <sup>551</sup>	

Tabla 117: Resultados de Análisis de notas generados por la aplicación AN\_MIDv5.1.

## Resultados del análisis de intervalos

Son los resultados que se muestran en la matriz de la Tabla 118.

	1	1+	2	2+	3	4	4+	5	5+	6	6+	7
1												
1+												
2												
2+												
3												
4												
4+												
5												
5+												
6												
6+												
7												

Tabla 118: Resultados generados por el análisis de intervalos de la aplicación AN\_MIDv5.1.

Siendo la intersección (2,4) de la Tabla 118 el porcentaje de intervalos que la nota 2 (supertónica) pasa a la nota 4 (subdominante) respecto el total de intervalos detectados en la pieza musical<sup>552</sup>, habiendo realizado un proceso de normalización o de transporte de las notas a Do Mayor.

Los nombres de las notas se basan en las 12 notas de la armonía tonal y queda explicado en la Figura 208:<sup>553</sup>

551 El formato MIDI solamente permite que esta octava tenga 8 notas ya que sólo se pueden direccionar 128 notas en formato MIDI (1 byte). En cualquier caso, no hay ningún instrumento (ni siquiera el piano) que tenga una tesitura que le sea insuficiente el espectro que permite el estándar MIDI)

552 Todos los porcentajes incluidos para cada pieza en el fichero de salida, aparecerán en dicho fichero en formato de tanto por 1.

553 Imagen obtenida en <http://files.nireblog.com/blogs/estudiandopiano/files/1pianocolorderechaizd.JPG> en fecha 12/3/2009.

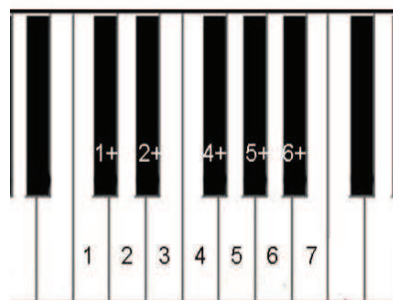


Figura 208: Nombres asignados a las notas en la aplicación AN\_MIDv5.1

En el fichero de salida, esta matriz está dispuesta por filas (1, 1+, 2, 2+,...) y la cabecera de cada variable será la concatenación de la referencia de fila y de columna (p.e. la variable etiquetada en el fichero de salida como “2+5+” identifica el porcentaje de intervalos de la pieza musical que pasan de la nota 2+ (Supertónica + 1 semitono) a la nota 5+ (Dominante + 1 semitono).

En cada fila del fichero de salida (o sea de cada pieza musical analizada) la suma de estos 144 valores ( $12^2$ ) es igual 1.

El número de intervalos detectados (obtenido en el apartado de resultados de análisis generales) debe de ser menor que el número de notas.

En cualquier caso, el resultado ideal sería que el número de intervalos detectados sea el número de notas menos entre 2 y 10 (dependiendo de la forma de la pieza musical y de su orquestación), por tanto, deberán ejecutarse diferentes procesos de ejecución con diferentes valores de “valor umbral de asociación” para intentar incrementar el número de intervalos detectados.

### Resultados de análisis de duraciones

Los resultados de análisis de duraciones se dividen en dos categorías a saber: análisis discreto y análisis continuo.

El análisis discreto intenta clasificar cada nota según su duración en *MIDI ticks*<sup>554</sup> en una de las 25 categorías de duraciones de notas procesadas (ver Tabla 119) dejando una última categoría para incluir el recuento de aquellas notas que no han podido ser incluidas en ninguna de las 25 categorías predefinidas.

El análisis continuo clasifica las duraciones de notas en base a intervalos constantes (*umbral\_desviación\_durada\_max*) sin seguir ningún patrón definido por la teoría musical.


#### **Datos de análisis discreto**

A pesar de que la teoría musical define una serie de símbolos para especificar duraciones de notas de manera discreta. La propia teoría musical permite crear infinitas duraciones de notas (a pesar de que estas jamás sean utilizadas y prácticamente imposibles de interpretar con precisión exacta por un humano). El formato MIDI permite una discretización de hasta 1024 partes de una nota de duración negra. A pesar de ello, el programa trata un total de 25 tipos diferentes de duraciones que permiten tratar el 99% de todas las duraciones utilizadas en la música (y más aún en la música clásica).

La utilización de las opciones “t” o “d” añade al fichero de salida 26 variables que reportan el porcentaje de aparición de las notas en cada una de las duraciones de la Tabla 119.

<sup>554</sup> Consultar página 308 (capítulo Anexo 3 – Conceptos asociados al estándar MIDI) para una explicación detallada.



Nombre en la cabecera discreta del fichero	Nombre según la teoría musical <sup>555</sup>	Valor de tiempo en relación con la duración del pulso del compás.	Grafía según la teoría musical
qdr	Cuadrada	8	
red	Redonda	4	
blnc	Blanca	2	
ngr	Negra	1	
cor	Corchea	0,5	
semi_cor	Semicorchea	0,25	
fusa	Fusa	0,125	
red_1pnt	Redonda con 1 puntillo	6	
blnc_1pnt	Blanca con un puntillo	3	
ngr_1pnt	Negra con un puntillo	1,5	
cor_1pnt	Corchea con un puntillo	0,75	
semi_cor_1pnt	Semicorchea con un puntillo	0.375	
red_2pnt	Redonda con 2 puntillos	7	
blnc_2pnt	Blanca con 2 puntillos	3,5	
ngr_2pnt	Negra con 2 puntillos	1,75	
cor_2pnt	Corchea con 2 puntillos	0,88	
blnc_tr	Tresillo de blanca	0,666 (2/3)	
ngr_tr	Tresillo de negra	0,333 (1/3)	
cor_tr	Tresillo de corchea	0,1667 (0,5/3)	
blnc_2tr	2 tresillo de blanca	1,333 ((2/3)*2)	
blnc_2cq	2 cinquillos de blanca	0,4	
blnc_mas1/4	Blanca más corchea	2,5	

<sup>555</sup> Consultar página 239 (capítulo Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados) para una explicación detallada.

Nombre en la cabecera discreta del fichero	Nombre según la teoría musical	Valor de tiempo en relación con la duración del pulso del compás.	Grafía según la teoría musical
ngr_3cq	3 cinquillos de negra	0,6	
blnc_mas1/8	Blanca más semicorchea	2,25	
ngr_mas1/8	Negra más fusa	1,13	
duración_cero	duraciones no tratadas		

Tabla 119: Sistema de nomenclatura y duraciones de notas procesados en el análisis discreto de la aplicación AN\_MIDv5.1.

La traducción de la duración de una nota teórica según la teoría musical a la duración de la nota en el estándar MIDI se hace multiplicando la duración especificada en la Tabla 119 por 1024. Este resultado será la duración teórica especificada en *MIDI ticks*.

Recuerde que para considerar una nota como a alguno de los tipos de duración su valor de duración (especificado en *MIDI ticks*) debe ser próximo al valor ideal de la nota en base al valor *umbral\_desviación\_durada\_max* especificado en el fichero origen, en caso contrario será considerada como de duración cero.

Para poder analizar y comparar con posterioridad estos valores extraídos del fichero MIDI, el proceso AN\_MID51 realiza una normalización de duraciones a partir del denominador del compás de la pieza musical. Como ejemplo, un valor de 24.34 en la variable “ngr” resultante del análisis de una pieza musical nos indica que hay un 24,34% de notas con duración negra si el compás es 2/4, 3/4, 4/4, etc., pero este valor será de notas corcheas (en vez de negras) si el compás es 2/8, 3/8, 4/8, etc., y que será de blancas si el compás de la pieza musical es 2/2, 3/2, 4/2, etc.

Para cada pieza musical, el programa calcula el porcentaje de notas de cada clase (negra, blanca, corchea etc.) respecto el total de notas contabilizadas en la pieza musical.

#### Datos de análisis continuo

El análisis continuo no intenta clasificar la duración de ninguna nota en base a los patrones definidos por la teoría musical (negra, blanca, corchea, etc.) sino que divide el espectro de duraciones de 0 a 6.100 *MIDI ticks* (duración aproximada de una blanca con puntillo o 6 pulsos de compás en un compás con denominador igual a 4<sup>56</sup>), y realiza un recuento de cuantas notas pertenecen a cada clase.

Dicho espectro (0-6.100) se dividirá en fragmentos de tamaño igual a *umbral\_desviación\_durada\_max*, por tanto para un umbral de desviación de duración máxima de 80 *MIDI ticks*, el número de clases será el calculado en la expresión de la Figura 209.

$$N^{\circ} \text{ de clases} = \left[ \frac{6100}{\text{umbral} - \text{desviación} - \text{durada} - \text{max}} \right] = \left[ \frac{6100}{80} \right] = [76,25] = 76$$

Figura 209: Número de clases en base al umbral de desviación de duración máxima.

A estas 76 clases se añade una última clase que contará el número de notas con duración de más de 6100 *MIDI ticks*, que generalmente contiene un valor de 0 al no encontrar notas de más de dicha duración máxima.

La elección de este valor de 6100 *MIDI ticks* ha sido basada en la probabilidad prácticamente 0 de encontrar notas de esta duración en la música clásica.

<sup>556</sup> Consultar página 235 (capítulo Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados) para una explicación detallada.

En la cabecera de duraciones tras el 'Nombre en la cabecera discreta del fichero' aparecerá la cabecera del análisis continuo. Dicha cabecera de tamaño variable (77 elementos en el ejemplo de un valor de `umbral_desviación_durada_max` igual a 80) los elementos estarán separados por comas e irán precedidos por el símbolo '<' para identificar valores de duración de notas menores al valor numérico.

A modo de ejemplo la Tabla 120 muestra los primeros y últimos elementos de la cabecera de análisis continuo en base al número de clases calculados en la Figura 209.

Campo de cabecera	Porcentaje de notas con duración contenida en el intervalo ...
<80	[0,80)
<160	[80,160)
<240	[160,240)
<320	[240,320)
<400	[320,400)
.....	...
<6080	[6000,6080)
>6080	[6080,∞)

Tabla 120: Duraciones incluidas en cada una de las clases creadas en el análisis continuo.

En cada uno de estos valores estará contenido el porcentaje de notas con duración incluida en dicho intervalo respecto el total de notas de la pieza.

## Otras consideraciones y recomendaciones de uso

1. A pesar de que el programa diferencia diferentes líneas melódicas en una misma pista MIDI, hay combinaciones musicales que imposibilitan diferenciar de manera correcta las diferentes líneas melódicas y por tanto, imposibilitan el no cometer errores de cálculo de los intervalos. Por tanto, siempre que sea posible, se debe intentar separar las líneas melódicas en diferentes pistas o canales.
2. El tamaño máximo que puede tener cada pista para ser procesada es de 40 kb.
3. El programa *an\_mid51* es multicanal y permite tratar hasta 16 canales en una única pieza musical.
4. El programa es compatible con los dos estándares MIDI 0 (Todos los instrumentos están almacenados en una única pista) y 1 (la información de cada instrumento se almacena en una pista diferente). A pesar de ello, para minimizar errores y desbordamientos de los contadores de tamaño de cada pista, es recomendable tratar los ficheros en formato "1".
5. Se recomienda distribuir las voces en diferentes canales a pesar de que tengan los mismos timbres. Es decir, una partitura de orquesta con 2 oboes con diferentes voces se recomienda asignar un canal (siempre u cuando haya suficientes) para cada uno de ellos.
6. La duración máximo de una nota para poder ser procesada por la aplicación *an\_mid51* es de 32.600 *MIDI ticks* (aproximadamente la duración de 4 notas cuadradas).

7. Debe tenerse en cuenta que el efecto “trino”<sup>557</sup> no está soportado por el estándar MIDI y por tanto, está codificado como una secuencia alternada de muchas notas de corta duración alternadas. Por tanto, serán tratadas como notas normales (posiblemente su duración será omitida por tener una duración inferior a la de una semifusa).
8. Los valores del fichero\_destino utilizan “.” en vez de “,” (es decir, el valor 25,432 aparecerá como 25.432). Es posible que la aplicación que procesará este fichero con posterioridad (hoja de cálculo, paquete estadístico, etc.) no interprete correctamente este formato como un valor numérico siendo necesaria una sustitución y una adecuación de formato.

## Mensajes de error y avisos generados por la aplicación

### Mensajes de error<sup>558</sup>

#### ***AN\_MID v5.1-Error 1: Número de paràmetres incorrecte.***

Hay algún tipo de error en la sintaxis de la llamada del programa.

#### ***AN\_MID v5.1-Error 2: No es pot obrir el fitxer origen.***

El fichero origen que incluye los nombres de los ficheros de las piezas musicales que deben procesarse no se puede abrir. O no existe, o el nombre está mal escrito, o está bloqueado por otra aplicación que lo tiene abierto en ese instante.

#### ***AN\_MID v5.1-Error 3: No es pot obrir el fitxer destí.***

El fichero destino donde se almacenarán los resultados del proceso no se puede abrir. O bien el nombre es incorrecto, o el fichero está bloqueado por otra aplicación que lo tiene abierto en ese instante.

#### ***AN\_MID v5.1-Error 4: No es pot obrir el fitxer origen.***

Alguno de los ficheros MIDI que están declarados en el fichero origen no se puede abrir.

#### ***AN\_MID v5.1-Error 5: Desbordament del vector 'lis\_notes\_obert'.***

El programa permite tener 12 notas abiertas por cada canal que es el máximo que puede interpretar una persona. Aparecerá este mensaje si en algún punto de un fichero MIDI este valor máximo se supera.

#### ***AN\_MID v5.1-Error 6: Defecte de punt i coma o desbordament de variable.***

Error en la sintaxis de alguna de las líneas del fichero origen. Se esperaba el carácter punto y coma al final de la línea y no se ha encontrado.

#### ***AN\_MID v5.1-Error 7: Durada no controlada.***

La duración de la nota medida en *MIDI Ticks* supera nota duración total de 4 notas cuadradas. El mensaje incluye el número de nota así como la posición en bytes donde se ha encontrado el error respecto el principio del *chunk*<sup>559</sup>.

#### ***AN\_MID v5.1-Error 8: format erroni del fitxer MIDI !.***

Algún fichero MIDI tiene un formato erróneo. Posiblemente no sea ni tan sólo un fichero MIDI.

#### ***AN\_MID v5.1-Error 9: Acabament inesperat del fitxer MIDI !.***

Algún fichero MIDI de los analizados tiene algún error y se ha llegado al final del fichero cuando este no se esperaba. Posiblemente el fichero no esté en formato MIDI. El mensaje incluye el

---

557 Consultar página 263 (capítulo Anexo 1 – Terminología de conceptos musicales utilizados) para una explicación detallada.

558 Los mensajes de error y avisos o *warnings* están redactados en catalán porque así fueron codificados en el código fuente desarrollado en el lenguaje C/C++.

559 Consultar página 309 (capítulo Anexo 3 – Conceptos asociados al estándar MIDI) para una explicación detallada.

número de nota así como la posición en bytes donde se ha encontrado el error respecto el principio del *chunk*.

***AN\_MID v5.1-Error 10: Track Chunk nº X supera la grandària permesa ( 40960 bytes / 40 Kbytes).***

La versión AN\_MIDv5.1 permite un tamaño máximo para cada *chunk* de 40 Kb, suficiente para procesar la mayoría de piezas musicales clásicas. Si aparece este mensaje deberá modificarse y recompilarse el programa aumentando este parámetro.

#### Avisos o warnings

***AN\_MID v5.1-missatge 1: El procés del fitxer s'ha completat correctament.(pieza musical:X)***

El proceso de la pieza musical X (identificador de la pieza musical en el fichero origen) ha finalizado.

***AN\_MID v5.1- missatge 2: procés en curs.***

Se ha iniciado el proceso del fichero origen abriendo cada fichero MIDI definido en él.

***AN\_MID v5.1 - missatge 4: Anàlisi d'interval, la nota no estava oberta. (track: %d /adreça: %d).***

Aviso que informa que ha sido detectado un código NOTE OFF de una nota la cual no ha sido procesado previamente su evento NOTE ON o que se ha intentado cerrar con un evento NOTE OFF dos veces. La palabra 'track'<sup>560</sup> identifica la pista en la que se ha detectado el error y el valor 'adreça' define de byte desde el principio de la pista en la que se ha detectado el error.

***AN\_MID v5.1 - missatge 5: Número d'interval a punt de desbordarse !!!.***

La versión AN\_MIDv51 permite un número máximo de intervalos procesados de 65.536, suficiente para procesar la mayoría de piezas musicales clásicas. Si aparece este mensaje deberá modificarse el programa aumentando el rango de esta variable.

***AN\_MID v5.1 - missatge 6: codi de durada no processat per no ser reconegut adequadament (track:X byte:Y num.nota:Z canal:C nota:N)!!!.***

Ha sido identificada una nota con duración que no coincide con ninguna de las que se analizan. (ver Tabla 119 en página 412) Ni tan siquiera está dentro de los intervalos definidos con el umbral de duración. El mensaje dará la localización de la nota en el fichero MIDI reportando el número de pista, el número de byte desde el principio de la pista, el número de nota que ocupa en la pista, el canal MIDI y el código de la nota (en código decimal 0-127).

***AN\_MID v5.1 - missatge 7: Nota no casada per haver superat l'umbral de associació (track:X byte:(quan supera umbral):B nºnota:N nota:T)!!!.***

Se ha eliminado una nota identificada de la estructura “notes pendientes de asociar” y ya no podrá identificarse un intervalo con ella como nota inicial. El mensaje dará la localización de la nota en el fichero MIDI reportando el número de pista, el número de byte desde el principio de la pista, el número de nota que ocupa en la pista y el código de la nota (en código decimal 0-127).

***AN\_MID v5.1- missatge 8: El procés del fitxer s'ha iniciat correctament.(peça X)***

Tras abrirse el fichero MIDI 'X', la aplicación imprime este mensaje comunicando el estado de inicio de análisis del mismo. Este mensaje junto con el mensaje 9 permite al usuario localizar errores en los datos pasados al programa (fichero\_origen y los ficheros MIDI a procesar incluidos en el fichero origen).

---

<sup>560</sup> Consultar página 306 (capítulo Anexo 3 – Conceptos asociados al estándar MIDI) para una explicación detallada.

***AN\_MID v5.1- missatge 9: El procés ha finalitzat correctament.***

Aviso de finalización del proceso de análisis de cada fichero del fichero origen. Este mensaje junto con el mensaje 8 permite al usuario localizar errores en los datos pasados al programa (fichero\_origen y los ficheros MIDI a procesar incluidos en el fichero origen).

## Anexo 8 - Información de catalogación de las obras utilizadas en las investigaciones

### Nota al lector

En caso de que no se especifique ninguna información de las URL's utilizadas para descargar los ficheros MIDI de cada una de las piezas enumeradas en las diferentes tablas, dicha información habrá sido descargada de o bien “<http://www.classicalarchives.com>”, “<http://www.kunsterfuge.com/>” o bien de “<http://icking-music-archive.org>”.

### **Bach, Johann Michael**

La Tabla 121 resume las piezas musicales utilizadas de Johann Michael Bach<sup>561</sup> (suegro de Johann Sebastian Bach) en los diferentes estudios realizados en esta tesis doctoral.

Tonalidad	Coral para órgano <sup>562</sup>
	<i>Nun komm der Heiden Heiland</i>
	<i>Meine Seele erhebt den Herren</i>
	<i>Herr Christ der einig Gottes Sohn</i>
	<i>Nun freut euch lieben Christen gmein 1</i>
	<i>Nun freut euch lieben Christen gmein 2</i>
	<i>Gott hat das Evangelium 1</i>
	<i>Gott hat das Evangelium 2</i>
Sol M	<i>Gelobet seist du Jesu Christ</i>
Sol M	<i>In dulci Ju</i>
Sol m	<i>Jesus Christus unser Hei</i>
Sol M	<i>O Herre Gott Vater in Ewigkeit</i>
Sol M	<i>Der du bist drei in Einigkeit</i>
Sol M	<i>Allein Gott in der Höh sei Ehr</i>
La m	<i>Mag ich Unglück nicht widerstahn</i>
Fa M	<i>Dies sind die heiligen zehn Gebot</i>
Mi m	<i>Auf meinen lieben Gott</i>
Sol M	<i>Nun lasst uns Gott dem Herren</i>
Sol m	<i>Kommt her zu mir spricht Gottes Sohn</i>
Sol m	<i>Der Herr ist mein getreuer Hirt</i>
Sol m	<i>Warum betrübst du dich, mein Herz</i>
Sol m	<i>Von Gott will ich nicht lassen</i>

561 Consultar la página 313 (capítulo “Anexo 4 – Información de compositores analizados y catalogación.”) para unas breves notas biográficas del compositor.

562 Material MIDI obtenido por escaneo de una edición impresa por mi amigo y colaborador Tomeu Mut Llabrés profesor de órgano del Conservatorio profesional de les Illes Balears en fechas Septiembre 2011.

Tonalidad	Coral para órgano
Sol M	<i>Es spricht der Unweisen Mund wohl</i>
Mi m	<i>Wo Gott der Herr nicht bei uns hält</i>
Sol M	<i>Wenn mein Stündlein vorhanden ist</i>
Sol M	<i>In dich hab ich gehoffet, Herr</i>
Sol M	<i>Wenn wir in höchsten Nöten sein (1)</i>
Sol M	<i>Wenn wir in höchsten Nöten sein (2)</i>
Sol M	<i>Wenn wir in höchsten Nöten sein (3)</i>
Re m	<i>Christ lag in Todesbanden</i>
La m	<i>Was mein Gott will, das gscheh allzeit</i>
Sol m	<i>Ich ruf zu dir, Herr Jesu Christ (I)</i>
Re m	<i>Ich ruf zu dir, Herr Jesu Christ (II)</i>
Sol m	<i>Ach Gott, vom Himmel sieh darein</i>
Do M	<i>Heut triumphieret Gottes Sohn</i>
Sol M	<i>Gott Vater, der du deine Sonn</i>
Do M	<i>Komm, Gott Schöpfer, heiliger Geist</i>
Fa M	<i>Allein Gott in der Höh sei Ehr</i>
Sol M	<i>An Wasserflüssen Babylon</i>
Fa M	<i>Wer Gott vertraut, hat wohl gebaut</i>
Do M	<i>Ach Herr, mich armen Sünder (1)</i>
La m	<i>Ach Herr, mich armen Sünder (2)</i>
Mi m	<i>Ach Herr, mich armen Sünder (2)</i>
Mi m	<i>Christum wir sollen loben schon</i>

Tabla 121: Obras para órgano de J.M.Bach utilizadas en los diferentes estudios recopilados en esta tesis doctoral.

## Bach, Johann Sebastian

Las tablas 122 y 123 resumen las piezas musicales de J.S.Bach incluidas en los diferentes estudios realizados en esta tesis doctoral. Se han excluido aquellos movimientos de obras que fueran compuestos en modo menor.

Pieza <sup>563</sup>	Tonalidad	Nº de movimientos	nº de catálogo BWV
Suite Orquestal No.1	Do M	7	1066
Suite Orquestal No.3	Re M	5	1068
Suite Orquestal No.4	Re M	5	1069
Concierto de Brandeburgo No.1	Fa M	4	1046
Concierto de Brandeburgo No.2	Fa M	3	1047

<sup>563</sup> Información de catalogación obtenida de “[http://es.wikipedia.org/wiki/Anexo:Catálogo\\_BWV\\_de\\_Johann\\_Sebastian\\_Bach](http://es.wikipedia.org/wiki/Anexo:Catálogo_BWV_de_Johann_Sebastian_Bach)” en fecha 27/6/2012.



Pieza	Tonalidad	Nº de movimientos	nº de catálogo BWV
Concierto de Brandeburgo No.3	Sol M	2	1048
Concierto de Brandeburgo No.4	Fa M	3	1049
Concierto de Brandeburgo No.5	Re M	3	1050
Concierto de Brandeburgo No.6	Si b M	3	1051
Concierto para Clave in E, BWV1053	Mi M	3	1053
Concierto para Clave in A, BWV1055	La M	3	1055
Concierto para 2 Claves	Do m	3	1060
Concierto para 2 Claves	Do M	3	1061
Concierto para 3 Claves	Do M	2	1064
Concierto para Violín	Mi M	2	1042
<i>Part Inventions, BWV772-786</i>	diversas	8	772-786
<i>Part Inventions, BWV787-801</i>	diversas	8	787-801
Suite Inglesa No.1	La M	10	806
Suite Inglesa No.4	Fa M	1	806
Suite Francesa No.4	Mi b M	7	815
Suite Francesa No.5	Sol M	7	816
Suite Francesa No.6	Mi M	1	817
"El Clave Bien Temperado", Libro 1	Todas las Mayores	24	846-868
"El Clave Bien Temperado", Libro 2	Todas las Mayores	24	870-893
Suite para Violonchelo No.1	Sol M	6	1007
Suite para Violonchelo No.3	Do M	7	1009
Suite para Violonchelo No.4	Mi b M	6	1010
Suite para Violonchelo No.6	Re M	6	1012

Tabla 122: Obras de J.S.Bach utilizadas en los diferentes estudios recopilados en esta tesis doctoral.

Piezas	Nº de piezas	Nº de catálogo BWV
Corales de Leipzig conocidos como los "18 grandes"	9	651-668
<i>L'Orgelbüchlein: BWV</i>	46	599-644
Corales <i>Schübler</i>	6	645-650
Corales incluidos en <i>Clavierübung III</i>	22	669-689
Corales de la colección Kirnberger: BWV 690-713	24	690-713
Corales miscelaneos: BWV	52	714-765
Partitas corales: BWV 766-771	6	766-771

Tabla 123: Obras para órgano de J.S.Bach utilizadas en los diferentes estudios recopilados en esta tesis doctoral.

La Tabla 124 incluye los números de catálogo BWV de los 8 preludios considerados actualmente de autoría dudosa por parte de J.S.Bach y analizada su autoría en el “Capítulo 9. Resultados de aplicación de los métodos presentados a obras dudosas de J.S.Bach” (página 152) de este documento.

Tonalidad	n° de catálogo BWV
Do M	553
Re m	554
Mi m	555
Fa M	556
Sol M	557
Sol m	558
La m	559
Si b M	560

*Tabla 124: Preludios considerados actualmente de autoría dudosa por parte de J.S.Bach.*

## Beethoven, Ludwig van

### Sinfonías

La Tabla 125 resume las sinfonías de Beethoven incluidas en los diferentes estudios realizados en esta tesis doctoral. Cada una de las 9 sinfonías tiene 4 movimientos.

Nº. Sinfonía <sup>564</sup>	Nº. Opus	Tonalidad	Año de presentación
1	21	Do M	1800
2	36	Re M	1803
3	55	Mi b M	1805
4	60	Si b M	1806
5	67	Do m	1808
6	68	Fa M	1808
7	92	La M	1813
8	93	Fa M	1814
9	125	Re M	1824

*Tabla 125: Sinfonías de Beethoven utilizadas en los diferentes estudios recopilados en esta tesis doctoral.*

<sup>564</sup> Contenidos de la tabla obtenidos de “<http://www.pianomundo.com.ar/rockpop/sinfonias-beethoven/>” y “[http://es.wikipedia.org/wiki/Ludwig\\_van\\_Beethoven#Sinfon.C3.ADas](http://es.wikipedia.org/wiki/Ludwig_van_Beethoven#Sinfon.C3.ADas)” en fecha 27/6/2012.

## Sonatas para piano

La Tabla 126 resume las sonatas para piano de Beethoven utilizadas en los diferentes estudios realizados en esta tesis doctoral. Los valores de la columna “Nº de movimientos” dependiendo del estudio a realizar, sólo se han considerado los compuestos en modo Mayor.

Nº de Sonata / sobrenombre <sup>565</sup>	Nº de movimientos	Tonalidad	Nº de catálogo	Año de publicación
1	4	Fa m	Op.2, No.1	1795
2	4	La M	Op.2, No.2	1795
3	4	Do M	Op.2, No.3	1795
4 / 'Gran Sonata'	4	Mi b M	Op.7	1797
5	3	Do m	Op.10, No.1	1798
6	3	Fa M	Op.10, No.2	1798
7	4	Re M	Op.10, No.3	1798
8 / ('Pathétique')	4	Do m	Op.13	1798/99
9	3	Mi M	Op.14, No.1	1799
10	3	Sol M	Op.14, No.2	1799
11	4	Si b M	Op.22	1800
12 / 'Marcha Funebre'	4	La b M	Op.26	1801
13 / 'Quasi una fantasia'	3	Mi b M	Op.27, No.1	1801
14 / 'Claro de Luna'	3	Do# m	Op.27, No.2	1802
15 / 'Pastoral'	3	Re M	Op.28	1801
16	3	Sol M	Op.31, No.1	1802
17 / 'Tempestad'	3	Re m	Op.31, No.2	1802
18 / 'La Caza'	4	Mi b M	Op.31, No.3	1802
19	2	Sol m	Op.49, No.1	1792
20	2	Sol M	Op.49, No.2	1792
21 / 'Waldstein'	4	Do M	Op.53	1803
22	2	Fa M	Op.54	1804
23 / 'Appassionata'	3	Fa m	Op.57	1805
24 / 'For Therese'	2	Fa# M	Op.78	1809
25 / 'Cuckoo'	3	Sol M	Op.79	1809
26 / 'Les Adieux'	3	Mi b M	Op.81a	1810
27	2	Mi m	Op.90	1814
28	4	La M	Op.101	1816
29 / 'Hammerklavier'	4	Si b M	Op.106	1819

<sup>565</sup> Contenido de catalogación obtenido de ["http://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_compositions\\_by\\_Ludwig\\_van\\_Beethoven#Piano\\_sonatas"](http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_compositions_by_Ludwig_van_Beethoven#Piano_sonatas) en fecha 27/6/2012

Nº de Sonata / sobrenombre	Nº de movimientos	Tonalidad	Nº de catálogo	Año de publicación
30	3	Mi M	Op.109	1820
31	4	La b M	Op.110	1821
32	2	Do m	Op.111	1822

*Tabla 126: Información de catalogación de las Sonatas para piano de Beethoven utilizadas en los diferentes estudios recopilados en esta tesis doctoral.*

## **Brahms, Johannes**

La Tabla 129 resume las piezas musicales utilizadas de Brahms en los diferentes estudios realizados en esta tesis doctoral.

<b>Obra</b>	<b>Nº piezas</b>	<b>Nº Opus</b>
Sinfonía No.1 en Do m	4	68
Sinfonía No.2 en Re M	4	73
Sinfonía No.3 en Fa M	4	90
Sinfonía No.4 en Mi m	3	98
Serenata para Orquesta No.1 en Re M	2	11
Concierto para Violín en Re M	1	77
Cuarteto de cuerda No.3 en Si b M	2	67
Quinteto de cuerda No.1 en Fa M (Primavera')	1	88
Quinteto de cuerda No.2 en Sol M	4	111
Sexteto de cuerda No.1 en Si b M	2	18
Sexteto de cuerda No.2 en Sol M	3	36
Trío con piano No.1 en Si M	6	8
Sonata para piano No.1 en Do M	2	1
4 Baladas	2	10
7 Fantasías	1	116
3 <i>Intermezzos</i>	1	117
2 Rapsodias	2	79
Sonata para Clarinete (o Viola) en Mi b M No.2	3	120
Sonata para Violín No.1 en Sol M	1	78

*Tabla 127: Obras de Johannes Brahms utilizadas en los diferentes estudios recopilados en esta tesis doctoral.*

## **Chopin, Fryderyk Franciszek**

La Tabla 128 resume la información relevante de las piezas de Chopin utilizadas en los estudios de esta tesis doctoral.

Nº de preludio	Tonalidad	Tempo
1	Do M	<i>Agitato</i>
2	La m	<i>Lento</i>
3	Sol M	<i>Vivace</i>
4	Mi m	<i>Largo</i>
5	Re M	<i>Allegro molto</i>
6	Si m	<i>Lento assai</i>
7	La M	<i>Andantino</i>
8	Fa sostenido m	<i>Molto agitato</i>
9	Mi M	<i>Largo</i>
10	Do sostenido m	<i>Allegro molto</i>
11	Si M	<i>Vivace</i>
12	Sol sostenido m	<i>Presto</i>
13	Fa sostenido M	<i>Lento</i>
14	Mi bemol m	<i>Allegro</i>
15	Re bemol M	<i>Sostenuto (La gota de lluvia)</i>
16	Si bemol m	<i>Presto con fuoco</i>
17	La bemol M	<i>Allegretto</i>
18	Fa m	<i>Allegro molto</i>
19	Mi bemol M	<i>Vivace</i>
20	Do m	<i>Largo</i>
21	Si bemol M	<i>Cantabile</i>
22	Sol m	<i>Molto agitato</i>
23	Fa M	<i>Moderato</i>
24	Re m	<i>Allegro appassionato</i>

Tabla 128: Información de los 24 preludios Op28 de Frederich Chopin utilizados en los estudios de esta tesis doctoral.<sup>566</sup>

## Dvořák, Antonín

La Tabla 129 resume las piezas musicales utilizadas de Dvořák en los diferentes estudios realizados en esta tesis doctoral.

Obra	nº piezas	nº Opus
8 Humorescas	5	101
10 Leyendas	7	59
12 Siluetas	5	8
Danzas eslavas, Si Mayor.145	6	72

<sup>566</sup> Información obtenida en “[http://es.wikipedia.org/wiki/Preludios\\_\(Chopin\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Preludios_(Chopin))” en fecha 3/7/2012.

Obra	nº piezas	nº Opus
Sinfonía No.4 en Re m, B.41	4	13
Sinfonía No.5 en Fa M, B.54	3	76
Sinfonía No.7 en Re m, B.141	4	70
Sinfonía No.8 en Sol M, B.163	4	88
Sinfonía No.9 en Mi m	4	95
Suite Checa	5	39
Serenata para Cuerdas en Mi M	5	22
Cuarteto de Cuerda No.10 en Mi b M	4	51
Cuarteto de Cuerda No.11 en Do M	2	61
Cuarteto de Cuerda No.12 en Fa M ('Americano')	4	96
Cuarteto de Cuerda No.14 en la b M	3	105
Quinteto con piano en La M, B.155	1	77

Tabla 129: Obras de Antonin Dvořák utilizadas en los diferentes estudios recopilados en esta tesis doctoral.

## Graupner, Christoph

La Tabla 130 resume las piezas musicales utilizadas del compositor G.F.Händel en los diferentes estudios realizados en esta tesis doctoral.<sup>567</sup>

Obra <sup>568</sup>	nº piezas	Tonalidad	Catalogación
Suite	12	Sol M	GWV 143
Suite	8	Do m	GWV 131
Suite	4	La M	GWV 148
Suite	7	La m	GWV 150
Suite	6	Do m	GWV 132
Concierto para trompeta cuerdas y bajo continuo	3	Re M	
<i>Concerto grosso</i> para 2 oboes violín viola, bajo y continuo	2	Si b M	
Trio para <i>Viola d'Amore</i> , Chalumeau y Cembalo	4	Fa M	
Obertura completa "Aber teils ohne Taktzahlen"	5	Re m	
Concierto para <i>Viola d'Amore</i> , 2 Violines, Viola y Cembalo	3	Re M	
Sonata para <i>Viola d'Amore</i> y Flauta Travesera y Cembalo	4	Re M	
Concierto nº 4 para <i>Viola d' Amore</i> , Viola, 2 Violines y Cembalo	4	Re M	

Tabla 130: Obras de Graupner utilizadas en los diferentes estudios recopilados en esta tesis doctoral.

<sup>567</sup> Consultar página 324 (capítulo "Anexo 4 – Información de compositores analizados y catalogación.") para unas breves notas bibliográficas del compositor.

<sup>568</sup> Ficheros MIDI obtenidos de "<http://icking-music-archive.org/ByComposer/Graupner.php>" en Junio de 2011.

## Haendel, Georg.Friedrich.

La Tabla 131 resume las piezas musicales utilizadas del compositor G.F.Händel en los diferentes estudios realizados en esta tesis doctoral.

Obra	HWV <sup>569</sup>
Suite para clave en La Mayor Preludio, Allemande, Courante, Giga	426
Suite para clave en Si b Mayor	494
Suite para clave en Mi Mayor ('The Harmonious Blacksmith')	430
Suite para clave en Fa Mayor Adagio, Allegro, Adagio, Allegro	427
Preludio en Do Mayor, (Allegro)	472
Fantasia No.7 en Mi Mayor (Allegro)	
Fantasia No.10 en Sol Mayor (Andante)	
Fantasia No.6 en Fa Mayor (Allegro)	
Fantasia No.1 en Do Mayor (Allegro)	
Fantasia No.4 en Fa Mayor	
Fantasia No.9 en La Mayor	
Fantasia en Do Mayor	490
Concerto Grosso en Si b Mayor, Op.3, No.1	312
Concerto Grosso en Si b Mayor, Op.3, No.2 Vivace, Largo, Allegro, Minuet, Gavotta	313
Concerto Grosso en Do Mayor, Op.3, No.3 Largo e staccato, Adagio, Allegro	314
Concerto no. 4 en Fa Mayor major Largo, Allegro, Lentement, Andante, Andante, Allegro, Minuetto alternativo	315
Concerto Grosso en Re Mayor, Op.3, No.6 Vivace, Allegro	317
Concerto Grosso en Do Mayor, Op.6, No.1 A tempo giusto, Allegro, Adagio, Allegro, Allegro	319
Concerto Grosso en Fa Mayor, Op.6, No.2 Andante Largo Alelgr, Largo, Allegro ma non troppo	320
Concerto Grosso en Re M, Op.6, No.5 Largo e staccato, Allegro, Presto, Largo, Allegro. Minuetto	323
Concerto Grosso en Si b M, Op.6, No.7	325

<sup>569</sup> Consultar página 326 (capítulo “Anexo 4 – Información de compositores analizados y catalogación.”) para una explicación detallada.

<b>Obra</b>	<b>HWV</b>
Largo, Allegro, Largo y piano, Andante, Hornpipe	
Concerto Grosso en Fa, Op.6, No.9 Largo, Allegro, Largo, Allegro, Menuet, Giga	327
Concerto Grosso en La Mayor, Op.6, No.11 Andante Largo y staccato, Allegro, Largo y staccato, Andante, Allegro	329
Música para los “Reales Fuegos Artificiales” en Re Mayor Obertura: Adagio. Allegro. Lentement, Bourée, Largo alla Siciliana, Allegro, Minuet 1, Minuet 2	351
Música Acuática Suite No.1 en Fa Mayo Obertura, Adagio e staccato, Allegro, Andante, Allegro (da capo), Menuet (Passepied), Aria, Minuet, Bourée, Hornpipe, Andante	348
Música Acuática Suite No.2 en Re Mayo Obertura: Allegro. Adagio, Alla Hornpipe, Lentamente, Bourée	349
Música Acuática Suite No.3 en Do Mayor Sarabande; 2a.Menuet 1; 2b.Menuet 2, Minuet2, Rigodón 1 y 2, Giga 1,2	350
Organ Concerto en Fa Mayor, HWV295 Largo, Allegro, Largo, Allegro	295
Obertura de Julio César en Egipto	17
Sinfonía Pastoral - El Mesías	56

*Tabla 131: Obras de G.F.Händel utilizadas en los diferentes estudios recopilados en esta tesis doctoral.*

## **Haydn, Franz Joseph**

### Sonatas

La Tabla 132 resume la información de las sonatas utilizadas del compositor F.J.Haydn en los diferentes estudios realizados en esta tesis doctoral. Debe recordarse que cada una de las sonatas se divide en movimientos (generalmente 3) que son los elementos procesados por la aplicación AN\_MIDv5.1. En los experimentos realizados sólo se han considerados los movimientos compuestos en modo Mayor.

<b>Catalogación</b>	<b>Nº de Sonata</b>	<b>Tonalidad</b>	<b>Año de Composición</b>
Hob. XVI:8	1	Sol M	1755-60
Hob. XVI:7	2	Fa M	1755-60
Hob. XVI:9	3	Fa M	1755-60
Hob. XVI:G1	4	Sol M	1755-60
Hob. XVI:11	5	Sol M	1760-65
Hob. XVI:10	6	Do M	1755-60
Hob. XVI:D.1	7	Re M	1755-60
Hob. XVI:5	8	La M	1755



<b>Catalogación</b>	<b>Nº de Sonata</b>	<b>Tonalidad</b>	<b>Año de Composición</b>
Hob. XVI:4	9	Re M	1760-65
Hob. XVI:1	10	Do M	1750-55
Hob. XVI:2	11	Do M	1750-55
Hob. XVI:12	12	La M	1750-55
Hob. XVI:6	13	Sol M	1750-55
Hob. XVI:3	14	Do M	1750-55
Hob. XVI:13	15	Mi M	1760-65
Hob. XVI:14	16	Re M	1760-65
Hob. XVI:Eb2	17	Mi b M	1750-65
Hob. XVI:Eb3	18	Mi b M	?
Hob. XVI:47bis	19	Mi m	1765
Hob. XVI:18	20	Si b M	1770-72
Hob. XVI 2a	21	Rei m	1766
Hob. XVI:2b	22	La M	1766
Hob. XVI:2c	23	Si M	1766
Hob. XVI: 2d	24	Si b M	1766
Hob. XVI:2f	25	Mi m	1766
Hob. XVI:2g	26	Do M	1766
Hob. XVI:2e (sólo comienzo)	27	La M	?
Hob. XVI:5a	28	Re M	1766
Hob. XVI:45	29	Mi b M	1766
Hob. XVI:19	30	Re M	1767
Hob. XVI:46	31	La b M	1767-68
Hob. XVI:44	32	Sol m	1768-73
Hob. XVI:20	33	Do m	1771
Hob. XVI:33	34	Re M	1773
Hob. XVI:43	35	La b M	1783
Hob. XVI:21	36	Do M	1773
Hob. XVI:22	37	Mi M	1773
Hob. XVI:23	38	Fa M	1773
Hob. XVI:24	39	Re M	1773
Hob. XVI:25	40	Mi b M	1773
Hob. XVI:26	41	La M	1773
Hob XVI:27	42	Sol M	1776
Hob XVI:28	43	Mi b M	1776
Hob. XVI:29	44	Fa M	1776

Catalogación	Nº de Sonata	Tonalidad	Año de Composición
Hob. XVI:30	45	La M	1776
Hob. XVI:31	46	Mi M	1776
Hob. XVI:32	47	Si m	1776
Hob. XVI:35	48	Do M	1779-80
Hob. XVI:36	49	Do # m	1773
Hob. XVI:37	50	Re M	1779-80
Hob. XVI:38	51	Mi b M	1773
Hob. XVI:39	52	Sol M	1780
Hob. XVI:34	53	Mi m	1783
Hob. XVI:40	54	Sol M	1783-84
Hob. XVI:41	55	Si b M	1783-84
Hob. XVI:42	56	Re M	1783-84
Hob. XVI:47	57	Fa M	1765
Hob. XVI:48	58	Do M	1789
Hob. XVI:49	59	Mi b M	1789-90
Hob. XVI:50	60	Do M	1794-95
Hob. XVI:51	61	Re M	1794-95
Hob. XVI:52	62	Mi b M	1794-95

Tabla 132: Catálogo de sonatas de F.J.Haydn utilizadas en los diferentes estudios recopilados en esta tesis doctoral.

## Sinfonías

La Tabla 133 resume la información de las sinfonías utilizadas del compositor F.J.Haydn en los diferentes estudios realizados en esta tesis doctoral. Debe recordarse que de cada una de las sinfonías se divide en movimientos (generalmente 4 aunque los primeros contenían un minuet-trío más) que son los elementos procesados por la aplicación AN\_MIDv5.1. En los experimentos realizados sólo se han considerados los movimientos compuestos en modo Mayor.

Año de composición	Nº. Sinfonía <sup>570</sup>	Nº. de movimientos	Tonalidad	Catalogación	Sobrenombre
1772	45	2	Fa # m	Hob.I:45	Las despedidas / <i>Farewell</i>
1772	46	4	Si M	Hob.I:46	
1772	47	4	Sol M	Hob.I:47	
1768	49	4	Fa m	Hob.I:49	<i>La passione</i>
1774	52	4	Do m	Hob.I:52	
1774	60	6	Do M	Hob.I:60	<i>Il Distratto</i>
1781	62	4	Re M	Hob.I:62	

<sup>570</sup> Ficheros MIDI obtenidos principalmente de “<http://www.kunsterfuge.com/haydn.htm>” y “<http://www.classicalarchives.com/midi/composer/2679.html>” en Marzo de 2010.

<b>Año de composición</b>	<b>Nº. Sinfonía</b>	<b>Nº. de movimientos</b>	<b>Tonalidad</b>	<b>Catalogación</b>	<b>Sobrenombre</b>
1791	63	4	Do M	Hob.I:63	<i>La Roxelane</i>
1775	64	4	La M	Hob.I:64	
1778	65	4	La M	Hob.I:65	
1779	66	4	Si b M	Hob.I:66	
1779	67	4	Fa M	Hob.I:67	
1779	68	4	Si b M	Hob.I:68	
1779	69	4	Do M	Hob.I:69	<i>Laudon</i>
1779	70	4	Re M	Hob.I:70	
1780	71	4	Si b M	Hob.I:71	
1765	72	4	Re M	Hob.I:72	
1782	73	4	Re M	Hob.I:73	<i>La chasse / La caza</i>
1782	76	4	Mi b M	Hob.I:76	
1786	82	4	Co M	Hob.I:82	<i>The Bear</i>
1785	83	4	Sol m	Hob.I:83	<i>The Hen / La gallina</i>
1786	84	4	Mi b M	Hob.I:84	
1782	85	4	Si b M	Hob.I:85	<i>La reine</i>
1786	86	4	Re M	Hob.I:86	
1785	87	4	La M	Hob.I:87	
1787	88	4	Sol M	Hob.I:88	
1787	89	4	Fa M	Hob.I:89	
1788	90	4	Co M	Hob.I:90	
1788	91	4	Mi b M	Hob.I:91	
1789	92	4	Sol M	Hob.I:92	Oxford
1791	93	4	Re M	Hob.I:93	
1791	94	4	Sol M	Hob.I:94	<i>Surprise / Sorpresa</i>
1791	95	4	Do m	Hob.I:95	
1791	96	4	Re M	Hob.I:96	<i>Miracle</i>
1792	97	4	Do M	Hob.I:97	
1792	98	4	Si b M	Hob.I:98	
1793	99	4	Mi b M	Hob.I:99	
1794	100	4	Sol M	Hob.I:100	<i>Military</i>
1793	101	4	Re M	Hob.I:101	<i>Clock / El reloj</i>
1794	102	4	Si b M	Hob.I:102	
1795	103	4	Mi b M	Hob.I:103	<i>Drum Roll / Redoble de timbal</i>
1795	104	4	Re M	Hob.I:104	Londres

Tabla 133: Sinfonías de F.J.Haydn utilizadas en los diferentes estudios recopilados en esta tesis doctoral.

## Cuartetos de cuerda

La Tabla 134 resume los cuartetos de cuerda utilizados del compositor F.J.Haydn en los diferentes estudios realizados en esta tesis doctoral. Debe recordarse que de cada una de los Cuartetos de cuerda se divide en movimientos (generalmente 4 aunque los primeros contenían un minuet-trío más) que son los elementos procesados por la aplicación AN\_MIDv5.1. En los experimentos realizados sólo se han considerados los movimientos compuestos en modo Mayor.

Nº. catálogo <sup>571</sup>	Composición / publicación	Nº movimientos	Tonalidad
Op. 1 nº 1, Hob. III:1	1755-60	5	Si b M
Op. 1 nº 2, Hob. III:2	1755-60	4	Mi M
Op. 1 nº 3, Hob. III:3	1755-60	5	Re M
Op. 1 nº 4, Hob. III:4	1755-60	5	Sol M
Op. 1 nº 5, Hob. III:5	1755-60	3	Si b M
Op. 1 nº 6, Hob. III:6	1755-60	5	Do M
Op. 2 nº 1, Hob. III:7		5	La M
Op. 2 nº 2, Hob. III:8		5	MI M
Op. 2 nº 3, Hob. III:9		5	Mi b M
Op. 2 nº 4, Hob. III:10		5	Fa M
Op. 2 nº 5, Hob. III:11		5	Re M
Op. 2 nº 6, Hob. III:12		5	Si b M
Op. 3 nº 1, Hob. III:13 <sup>572</sup>		4	Mi M
Op. 3 nº 2, Hob. III:14		3	Do M
Op. 3 nº 3, Hob. III:15		4	Sol M
Op. 3 nº 4, Hob. III:16		3	Si b M
Op. 3, nº 5, Hob. III:17		4	Fa M
Op. 3 nº 6, Hob. III:18		4	La M
Op. 20 nº 1, Hob. III:31	1772	4	Mi b M
Op. 20 nº 2, Hob. III:32	1772	4	Do M
Op. 20 nº 3, Hob. III:33	1772	4	Sol m
Op. 20 nº 4, Hob. III:34	1772	4	Re M
Op. 20 nº 5, Hob. III:35	1772	4	Fa m
Op. 20 nº 6, Hob. III:36	1772	4	La M
Op. 33 nº 1, Hob. III:37	1781	4	Si m
Op. 33 nº 2, Hob. III:38 ( <i>The Joke</i> )	1781	4	Mi b M
Op. 33 nº 3, Hob. III:39 ( <i>The Bird</i> )	1781	4	Do M

571 Ficheros MIDI obtenidos principalmente de "<http://www.kunsterfuge.com/haydn.htm>" y

"<http://www.classicalarchives.com/midi/composer/2679.html>" entre Noviembre de 2009 y Marzo de 2010.

572 Los cuartetos Opus 3 actualmente existen especialistas que los consideran compuestos por *Roman Hoffstetter*. En el caso de ser utilizado este catálogo para comprobar autenticidad de obras de Haydn sería recomendable descartar los cuartetos del Opus 3 para garantizar la fiabilidad de los resultados.

Nº. catálogo	Composición / publicación	Nº movimientos	Tonalidad
Op. 33 nº 5, Hob. III:41	1781	4	Sol M
Op. 33 nº 6, Hob. III:42	1781	4	Re M
Op. 42, Hob. III:43	1785	4	Re m
nº 36, Op. 50, nº 1, Hob.III:44	1787	4	Si b M
nº 37, Op. 50, número 2, Hob.III:45	1787	4	Do M
nº38, Op. 50, número 3, Hob.III:46	1787	4	Mi b M
nº39, Op. 50, número 4, Hob.III:47	1787	4	Fa m
Op. 50 nº 6, Hob. III:49 (The Frog)	1787	4	Re M
Op. 54 nº 1, Hob. III:58	1788	4	Sol M
Op. 54 nº 2, Hob. III:57	1788	4	Do M
Op. 54 nº 3, Hob. III:59	1788	4	Mi b M
Op. 52 nº 6, Hob. III:64		4	Si m
Op. 64 nº 2, Hob. III:68	1790	4	Si m
Op. 64 nº 3, Hob. III:67	1790	4	Si b M
Op. 64 nº 4, Hob. III:66	1790	4	Sol M
Op. 64 nº 5, Hob. III:63 ( <i>The Lark</i> )	1790	4	Re M
Op. 74 nº 1, Hob. III:72	1793	4	Do M
Op. 74 nº 2, Hob. III:73	1793	4	Fa M
Op. 74 nº 3, Hob. III:74 (Rider)	1793	4	Sol m
Op. 76 nº 1, Hob. III:75	1796-1797	4	Sol M
Op. 76 nº 2, Hob. III:76 ( <i>Quintenquartett, Quinten</i> )	1796-1797	4	Re m
Op. 76 nº 3, Hob. III:77 ( <i>Kaiserquartett / Emperor</i> )	1796-1797	4	Do M
Op. 76 nº 4, Hob. III:78 ( <i>Aurora / Sunrise</i> )	1796-1797	4	Si b M
Op. 76 nº 5, Hob. III:79 (Largo)	1796-1797	4	Re M
Op. 76 nº 6, Hob. III:80	1796-1797	4	Mi b M
Op. 77 nº 1, Hob. III:81	1799	4	Sol M
Op. 77 nº 2, Hob. III:82	1799	4	Fa M

Tabla 134: Cuartetos de cuerda de F.J.Haydn utilizadas en los diferentes estudios recopilados en esta tesis doctoral.

## Homilius, Gottfried August

La Tabla 135 resume las piezas musicales utilizadas del compositor Gottfried August Homilius en los diferentes estudios realizados en esta tesis doctoral.<sup>573</sup>

<sup>573</sup> Consultar página 328 (capítulo “Anexo 4 – Información de compositores analizados y catalogación.”) para unas breves notas bibliográficas del compositor.

Obra <sup>574</sup>	Tonalidad
“Weg mein Herz mit den Gedenken” (para órgano e instrumento solo)	Sol M
Preludio coral para órgano "Christ lag in Todesbanden"	Mi b M
Trio para órgano	Sol M
Preludio coral para órgano "Herzlich lieb hab ich dich, o Herr"	Do M
Preludio coral para órgano "Hilff, Herr Jesu, laß gelingen"	Sol M
Preludio coral para órgano "Mache dich mein Geist bereit"	Mi b M
Preludio coral para órgano "Schmücke dich o liebe Seele "	Fa M
Preludio coral para órgano "Wachet auf, ruft uns die Stimme"	Re M
Preludio coral para órgano "Wer nur den lieben Gott läßt walten"	Re M
Weg mein Herz mit den Gedenken alias "Freu dich sehr o meine Seele" para órgano e instrumento solo	Si m

Tabla 135: Obras de Gottfried August Homilius utilizadas en los diferentes estudios recopilados en esta tesis doctoral.

## Krebs, Johann Ludwig

La Tabla 136 resume las piezas musicales utilizadas del compositor Johann Ludwig Krebs<sup>575</sup> en los diferentes estudios realizados en esta tesis doctoral.

Obra <sup>576</sup>	Nº piezas	Tonalidad
Fuga No.1	1	Do m
Fuga No.2	1	Do m
Fuga No.3	1	Mi b M
Fuga No.4	1	Fa M
Fuga No.5	1	Fa m
Fuga No.6	1	Fa m
Fuga No.7	1	Sol m
Fuga No.8	1	La -
Fuga No.9	1	La m
Fuga No.10 in B (sobre B-A-C-H)	1	Si M
Fuga No.11	1	Si M
Preludio	1	Do M
Preludio	1	Do m
Preludio para Órgano pleno	1	Fa m

574 Obras descargadas en formato MIDI de “<http://www.classicalarchives.com/composer/14043.html>” y “<http://icking-music-archive.org/ByComposer/Homilius.php>” en fecha 19 y 20 de Septiembre de 2011.

575 Consultar página 331 (capítulo “Anexo 4 – Información de compositores analizados y catalogación.”) para unas breves notas bibliográficas del compositor.

576 Obras descargadas en formato MIDI de “<http://www.classicalarchives.com/midi/composer/2840.html>” y “[http://imslp.org/wiki/Category:Krebs,\\_Johann\\_Ludwig](http://imslp.org/wiki/Category:Krebs,_Johann_Ludwig)” en fecha 15 y 16 de Octubre de 2011.

Obra	Nº piezas	Tonalidad
Cuatro preludios para Órgano Pleno	4	Fa M, Fa M, Do M, Do M
Trío No.1	1	Do M
Trío No.2	1	Do M
Trío No.3	1	Do m
Trío No.4	1	Do m
Trío No.5	1	Re m
Trío No.6	1	Re m
Trío No.7	1	Re m
Trío No.8	1	Mi b M
Trío No.9	1	Mi b M
Trío Nº10	3	Mi m
Trío No.11	1	Mi m
Trío No.12	1	Fa M
Trío No.13	1	Fam
Trío No.14	1	Fa M
Trío No.15	1	Sol M
Trío No.16	1	La m
Trío No.17	1	SiM
Fantasia No.1	1	Fa M
Fantasia No.2	1	Fa M
Fantasia a gusto italiano	1	Fa M
Fantasia y Fuga para Órgano pleno	1	Fa M
Coral y prelude para Órgano (Incluye la práctica del clave)	13	
Corales y Preludios para órgano <sup>577</sup>	9	Do M/m
Fantasías para órgano <sup>578</sup>	5	Fa M, Do M, Do M, Fa M, Fa M y La m
Tocatta y Fugapara órgano	1	La m
Fantasia sopra " <i>Freu dich sehr, o meine Seele</i> "	1	Sol M
Coral prelude " <i>Wir glauben all an einen Gott</i> "	1	Re m
Fantasia (Trio) para órgano " <i>upon Herr Jesu Christ, dich zu uns wend</i> "	1	Sol M
Trio para órgano " <i>upon Mein Gott, das Herze bring ich dir</i> "	1	Sol m
<i>Trio à 2 Claviere è Pedale</i>		Mi b M
<i>Trio à 2 Claviere è Pedale</i>		Sol M
<i>Trio à 2 Claviere è Pedale</i>		Do M

<sup>577</sup> Arreglos para trompeta y trío de cuerdas.

<sup>578</sup> Arreglos para trompeta y trío de cuerdas.

Tabla 136: Obras de Johann Ludwig Krebs utilizadas en los diferentes estudios recopilados en esta tesis doctoral.

## Mozart, Wolfgang Amadeus

Se detalla a continuación información de catalogación de las obras de W.A.Mozart utilizadas en las diferentes investigaciones realizadas en esta tesis doctoral.

### Cuartetos de cuerda

Debe recordarse que de cada una de los Cuartetos de cuerda se divide en movimientos (generalmente 4) que son los elementos procesados por la aplicación AN\_MIDv5.1. Generalmente en los experimentos realizados sólo se han considerados los movimientos compuestos en modo Mayor.

Nº catálogo Köchel	Nº	Tonalidad	Año composición
80	n.º 1	Sol M	1770
155	n.º 2	Re M	1772 (aprox.)
156	n.º 3	Sol M	1772
157	n.º 4	Do M.	1772/73
158	n.º 5	Fa M.	1773
159	n.º 6	Si b M	1773
160	n.º 7	Mi b M	1773
168	n.º 8	Fa M	1773
169	n.º 9	La Ma	1773
170	n.º 10	Do M	1773
171	n.º 11	Mi b M	1773
172	n.º 12	Si b M	1773
173	n.º 13	Re m	1773
387	n.º 14 (“de la primavera”)	Sol M	1782
421	n.º 15	Re m	1783
428	n.º 16	Mi b M	1783
458	n.º 17 (“La caza”),	Si b M	1784
464	n.º 18 (“del tambor”)	La M	1785.
465	n.º 19(“de las disonancias”)	Do M	1785
499	n.º 20 “Hoffmeister”	Re M	1786
575	n.º 21	Re M	1789
589	n.º 22	Si b M	1790
590	n.º 23	Fa M	1790

Tabla 137: Información de los cuartetos de cuerda de W.A.Mozart incluidas en el estudio.



## Sinfonías

Debe recordarse que de cada una de las sinfonías se divide en movimientos (entre 3 y 5) que son los elementos procesador por la aplicación AN\_MIDv5.1. Generalmente en los experimentos realizados sólo se han considerados los movimientos compuestos en modo Mayor.

Nº catálogo Köchel	Nº	Tonalidad	Año composición
16	1	Mi b M	1764
19	4	Re M	1765
22	5	Si b M	1765
43	6	Fa M	1767
45	7	Re M	1768
73	9	Do M	1769-70
84	11	Re M	1770
114	14	La M	1771
124	15	Sol M	1772
128	16	Do M	1772
129	17	Sol M	1772
130	18	Fa M	1772
133	20	Re M	1772
162	22	Do M	1773
181	23	Re M	1773
182	24	Si b M	1773
183	25	Sol m	1773
184	26	Mi m M	1773
199	27	Sol M	1773
200	28	Do M	1773
201	29	La M	1774
202	30	Re M	1774
297	31	Re M	1778
318	32	Sol M	1779
319	33	Si b M	1779
338	34	Do M	1780
385	35	Re M	1782
425	36	Do M	1783
504	37	Re M	1786
543	39	Mi b M	1788

Nº catálogo Köchel	Nº	Tonalidad	Año composición
550	40	Sol m	1788
551	41	Do M	1788
95 <sup>579</sup>	45	Re M	1770 ?

Tabla 138: Información de las sinfonías de W.A.Mozart incluidas en el estudio.

## Sonatas

Debe recordarse que de cada una de las sonatas se divide en movimientos (generalmente 3) que son los elementos procesador por la aplicación AN\_MIDv5.1. Generalmente en los experimentos realizados sólo se han considerados los movimientos compuestos en modo Mayor.

### Nº1 k279/189d – Do Mayor<sup>580</sup>

Allegro. (♩ = 112)  
P.T. HS.

### Nº2 k280/189e – Fa Mayor

HS.

### Nº3 k281/189f – Si b Mayor

Allegro. (♩ = 132.)  
P.T. HS.

### Nº4 k282/189g – Mi b Mayor

Adagio.  
P.T. HS.

### Nº5 k283/189h – Sol Mayor

579 Sinfonía [n.º 45] (dudosa, ver KV 73n). En cualquier caso, si se demostrase su autoría no se intercalaría un número de catálogo por razones históricas.

580 N.º de sonata, n.º de catálogo köchel, tonalidad.

HS.  
 a) *mp*  
*p*  
*fp*  
*p*  
*fp*  
*f*  
*mf*

N°6 k284/205b – Re Mayor

Allegro. (♩ = 126.)  
 P.T.  
 HS.  
*f*  
*p*  
*f*  
*p*

N°7 k309/284b – Do Mayor

P.T.  
 HS.  
 a) *f*  
*p*

N°8 k310/300d – La menor

Allegro maestoso. (♩ = 116)  
 P.T.  
 HS.  
*f*

N°9 k311/284c – Re Mayor

Allegro con spirito. (♩ = 132.)  
 P.T.  
 HS.  
*f*  
*p*  
*f*

N°10 k330/300h – Do Mayor

P.T.  
 HS.  
*mf*  
*p*  
*pp*

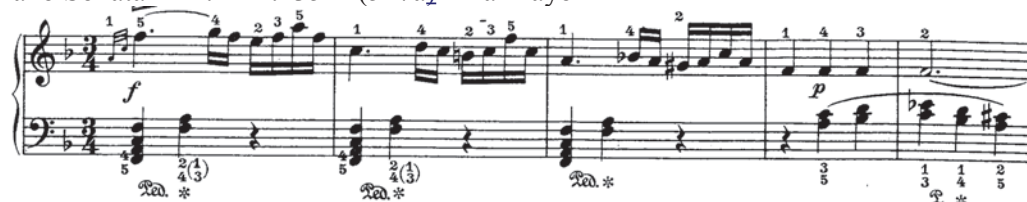
N°11 k331/300i – La Mayor

Andante grazioso. (♩ = 120.)  
*p*

N°12 k332/300k – Fa Mayor



Piano Sonata in K. Anh.135<sup>581</sup> (547a) – Fa Mayor



Piano Sonata, K. Anh.136 (498a) – Si b Mayor

*Allegro moderato*



Tabla 139: Primeros compases de las sonatas para piano de W.A.Mozart.<sup>582</sup>

Los ficheros MIDI de la Tabla 139 han sido obtenidos entre los meses de Abril 2009 y Julio 2009 en las siguientes direcciones:

- [http://www.midicenter.com/midi/midi\\_files/classical/wamozart/pianosonatas.htm](http://www.midicenter.com/midi/midi_files/classical/wamozart/pianosonatas.htm)
- <http://www.harfesoft.de/midi/mozart/piano.htm>
- <http://www.eadcentral.com/go/1/1/0/http://www.harfesoft.de/midi/mozart/piano.html>
- <http://www.midisite.co.uk/midi/>
- <http://www.piano-midi.de/>
- <http://www.classicalmidiconnection.com/cmc/midiplay/playmidi.shtml>
- <http://www.wamozartfan.com/midi.html>
- <http://tedmuller.us/Piano/Mozart-GriegSonataInC.htm>
- <http://www.musicrobot.com/cgi-bin/search.pl?terms=mop&okey=mop&mode=showall>
- <http://www.el-atril.commidisMozart.htm>
- <http://www.hamienet.com>
- <http://www.8notes.com/scores2419.aspftype=midi>
- <http://tirolmusic.blogspot.com/200711/piano-sonata-no16-in-c-major-k545.html>
- <http://mozart.sdrodrian.comsonatas>
- <http://www.kunstderfuge.com/>
- <http://www.virtualsheetmusic.com/downloads/MozartTurca.html>

## Scarlatti, Domenico

La Tabla 140 incluye la información de catalogación de las sonatas de D.Scarlatti utilizadas en el estudio. Para minimizar el espacio consumido, está estructurada con la información de 2 sonatas en cada fila. La tabla está ordenada por número de catálogo Kirkpatrick en orden de lectura (izquierda derecha / arriba abajo) Los campos incluidos de cada sonata son los siguientes.

- N° Pest.: Número de catálogo según Giorgio Pestelli.
- N° Hail.: Número asignada por el autor en base a la ordenación cronológica propuesta por Hail.[105]
- Año comp.: Año de composición aproximado e hipotetizado por Hail.

<sup>581</sup> Numeración Anh relacionada con obras de dudosa autoría.

<sup>582</sup> Imágenes obtenidas por escaneo de las partituras almacenadas en <http://www.imslp.org>

- N° Kirk.: Número de catalogación según Ralph Kirkpatrick.
- Tonali.: Tonalidad y modo de la sonata.
- 

N° Pest.	N° Hail	Año comp.	N° Kirk.	Tonali.
57	14	1738	1	Re M
59	90	1738	3	La m
61	92	1738	5	Re m
63	93	1738	7	La m
65	1	1738	9	Re m
67	95	1738	11	Do m
69	204	1738	13	Sol M
71	97	1738	15	Mi m
73	206	1738	17	Fa M
75	98	1738	19	Fa m
77	208	1738	21	Re M
79	209	1738	23	Re M
81	100	1738	25	Fa# m
83	212	1738	27	Si m
85	214	1738	29	Re M
19	101	1739	31	Sol m
130	215	1739	33	Re M
20	102	1739	35	Sol m
2	104	1739	37	Do m
53	17	1739	39	La M
120	13	1739	42	Si b M
116	395	1742	44	Fa M
179	403	1742	46	Mi M
87	405	1742	48	Do m
144	407	1742	50	Fa m
41	18	1742	52	Re m
147	408	1742	54	La m
50	396	1742	56	Do m
39	19	1742	58	Do m
29	21	1742	60	Sol m
49	106	1742	62	La M
33	107	1742	64	Re m
134	22	1742	66	Si b M
7	23	1742	68	Mi b M

N° Pest.	N° Hail	Año comp.	N° Kirk.	Tonali.
58	83	1738	2	Sol M
60	91	1738	4	Sol m
62	203	1738	6	Fa M
64	84	1738	8	Sol m
66	94	1738	10	Re m
68	96	1738	12	Sol m
70	394	1738	14	Sol M
72	205	1738	16	Si b M
74	15	1738	18	Re m
76	207	1738	20	Mi M
78	99	1738	22	Do m
80	210	1738	24	La M
82	211	1738	26	La M
84	213	1738	28	Mi M
86	16	1738	30	Sol m
14	2	1739	32	Re m
15	3	1739	34	Re m
91	103	1739	36	La m
97	105	1739	38	Fa M
119	4	1739	40	Do m
133	401	1742	43	Sol m
230	402	1742	45	Re M
115	404	1742	47	Si b M
178	406	1742	49	Do M
151	216	1742	51	Mi b M
161	217	1742	53	Re M
117	218	1742	55	Sol M
108	409	1742	57	Si b M
22	20	1742	59	Fa M
16	5	1742	61	La m
32	6	1742	63	Sol M
142	219	1742	65	La M
125	108	1742	67	Fa# m
42	24	1742	69	Fa m

Nº Pest.	Nº Hail	Año comp.	Nº Kirk.	Tonali.
21	109	1742	70	Si b M
1	8	1742	72	Do M
23	9	1742	75	Sol M
204	11	1742	79	Sol M
31	26	1742	83	La M
24	27	1742	85	Fa M
43	29	1742	87	Si m
38	31	1742	93	Sol m
	112	1746	95	Do M
219	113	1749	98	Mi m
232	221	1749	100	Do M
88	114	1749	102	Sol m
109	411	1749	104	Sol M
197	412	1749	106	Fa M
92	414	1749	108	Sol m
129	225	1749	110	La m
94	117	1749	112	Si b M
141	227	1749	114	La M
111	416	1749	116	Do m
266	417	1749	118	Re m
146	419	1749	120	Re m
118	421	1749	122	Re M
110	397	1749	124	Sol M
128	422	1749	126	Sol m
199	399	1749	128	Si b m
272	231	1749	130	La b M
295	424	1749	132	Do M
127	461	1749	140	Re M
105	232	1749	145	Re M
48	119	1749	147	Mi m
241	86	1752	149	La m
238	120	1752	151	Fa M
235	121	1752	153	Sol M
208	34	1752	155	Si b M
391	236	1752	157	Do M
418	88	1752	159	Do M
216	238	1752	161	Re M

Nº Pest.	Nº Hail	Año comp.	Nº Kirk.	Tonali.
17	7	1742	71	Sol M
35	110	1742	74	La M
23	10	1742	76	Sol m
25	25	1742	82	Fa M
45	111	1742	84	Do m
122	28	1742	86	Do M
44	30	1742	92	Re m
27	32	1742	94	Fa M
210	220	1746	96	Re M
135	410	1749	99	Do m
156	222	1749	101	La M
233	223	1749	103	Sol M
90	224	1749	105	Sol M
98	413	1749	107	Fa M
290	115	1749	109	La m
99	116	1749	111	Sol m
160	226	1749	113	La M
100	415	1749	115	Do m
181	228	1749	117	Do m
217	418	1749	119	Re m
93	420	1749	121	Sol m
180	229	1749	123	Mi b M
152	230	1749	125	Sol M
198	398	1749	127	La b M
148	423	1749	129	Do m
154	118	1749	131	Si b m
218	425	1749	133	Do M
271	426	1749	141	Re m
106	233	1749	146	Sol M
291	85	1752	148	La m
205	87	1752	150	Fa M
114	234	1752	152	Sol M
183	33	1752	154	Si b M
248	235	1752	156	Do M
123	122	1752	158	Do m
131	237	1752	160	Re M
162	239	1752	162	Mi M

Nº Pest.	Nº Hail	Año comp.	Nº Kirk.	Tonali.
206	240	1752	163	Mi M
292	36	1752	165	Do M
200	38	1752	167	Fa M
247	241	1752	169	Sol M
153	242	1752	171	Sol M
51	123	1752	173	Si M
136	427	1752	175	La m
184	125	1752	177	Re M
89	126	1752	179	Sol m
253	428	1752	181	La M
150	127	1752	183	Fa m
121	41	1752	185	Fa m
145	247	1752	187	Fa m
257	249	1752	189	Si b M
18	129	1752	191	Re m
254	429	1752	193	Mi b M
185	252	1752	195	Fa M
124	253	1752	197	Si m
276	255	1752	199	Do M
252	257	1752	201	Sol M
96	259	1752	203	Mi m
171	464	1752	205	Fa M
140	260	1753	207	Mi M
209	262	1753	209	La M
277	430	1753	211	La M
288	130	1753	213	Re m
281	515	1753	215	Mi M
287	432	1753	217	La m
278	516	1753	219	La M
215	264	1753	221	La M
188	266	1753	223	Re M
202	268	1753	225	Do M
52	269	1753	227	Si m
139	447	1753	229	Si b M
393	271	1753	231	Do m
497	273	1753	233	Mi m
172	274	1753	235	Sol M

Nº Pest.	Nº Hail	Año comp.	Nº Kirk.	Tonali.
274	35	1752	164	Re M
190	37	1752	166	Do M
182	39	1752	168	Fa M
164	40	1752	170	Do M
313	462	1752	172	Si b M
149	400	1752	174	Do m
163	124	1752	176	Re m
392	243	1752	178	Re M
192	244	1752	180	Sol M
207	245	1752	182	La M
102	246	1752	184	Fa m
46	128	1752	186	Fa m
213	248	1752	188	La m
256	250	1752	190	Si b M
322	251	1752	192	Mi b M
479	463	1752	194	Fa M
244	42	1752	196	Sol m
132	254	1752	198	Mi m
242	256	1752	200	Do M
173	258	1752	202	Si b M
255		1752	204	
307	528	1753	206	Mi M
315	261	1753	208	La M
293	263	1753	210	Sol M
155	431	1753	212	La M
430	465	1753	214	Re M
320	466	1753	216	Mi M
237	131	1753	218	La m
309	467	1753	220	La M
236	265	1753	222	La M
225	267	1753	224	Re M
101	132	1753	226	Do m
224	270	1753	228	Si b M
47	133	1753	230	Do m
317	272	1753	232	Mi m
286	134	1753	234	Sol m
201	275	1753	236	Re M



Nº Pest.	Nº Hail	Año comp.	Nº Kirk.	Tonali.
446	276	1753	237	Re M
56	43	1753	239	Fa m
431	136	1753	241	Sol M
394	278	1753	243	Do M
299	279	1753	245	Si M
297	433	1753	247	Do# m
424	281	1753	249	Si b M
314	282	1753	251	Do M
239	283	1753	253	Mi b M
226	284	1753	255	Do M
138	285	1753	257	Fa M
469	286	1753	259	Sol M
300	472	1753	261	Si M
283	138	1753	263	Mi m
168	139	1753	265	La m
363	44	1753	267	Si b M
432	287	1753	269	La M
447	288	1753	271	Do M
174	290	1753	273	Si b M
430	46	1753	275	Fa M
275	48	1753	277	Re M
306	522	1753	279	La M
289	140	1753	281	Re M
482	523	1753	283	Sol M
321	50	1753	285	La M
310	52	1753	287	Re M
249	54	1753	289	Sol M
282	56	1753	291	Mi m
157	291	1753	293	Si m
211	144	1753	295	Re m
448	292	1753	297	Fa M
268	435	1753	299	Re M
361	57	1753	301	La M
212	145	1753	303	Do m
397	58	1753	305	Sol M
449	295	1753	307	Mi b M
333	60	1753	309	Do M

Nº Pest.	Nº Hail	Año comp.	Nº Kirk.	Tonali.
55	135	1753	238	Fa m
368	517	1753	240	Sol M
243	277	1753	242	Do M
298	468	1753	244	Si M
296	469	1753	246	Do# m
187	280	1753	248	Si b M
461	434	1753	250	Do M
203	470	1753	252	Mi b M
254	137	1753	254	Do m
480	448	1753	256	Fa M
494	471	1753	258	Re M
304	518	1753	260	Sol M
301	473	1753	262	Si M
308	519	1753	264	Mi M
251	449	1753	266	Si b M
369	520	1753	268	La M
481	521	1753	270	Do M
518	289	1753	272	Si b M
491	45	1753	274	Fa M
433	47	1753	276	Fa M
434	49	1753	278	Re M
395	474	1753	280	La M
166	475	1753	282	Re M
169	141	1753	284	Sol M
410	51	1753	286	La M
311	53	1753	288	Re M
396	55	1753	290	Sol M
223	142	1753	292	Mi m
470	143	1753	294	Re m
305	524	1753	296	Fa M
194	293	1753	298	Re M
312	294	1753	300	La M
279	476	1753	302	Do m
492	146	1753	304	Sol M
456	477	1753	306	Mi b M
318	59	1753	308	Do M
284	61	1753	310	Si b M

Nº Pest.	Nº Hail	Año comp.	Nº Kirk.	Tonali.
227	147	1753	311	Si b M
398	297	1753	313	Re M
54	148	1753	315	Sol m
258	299	1753	317	Fa M
303	478	1753	319	Fa M
450	301	1753	321	La M
411	63	1753	323	La M
451	302	1753	325	Sol M
399	303	1754	327	Do M
337	64	1754	329	Do M
471	479	1754	331	Si b M
338	66	1754	333	Re M
339	68	1754	335	Re M
340	153	1754	337	Sol M
189	306	1754	339	Do M
103	154	1754	341	La m
495	307	1754	343	La M
342	70	1754	345	Re M
294	155	1754	347	Sol m
452	309	1754	349	Fa M
165	156	1754	351	Si b M
401	311	1754	353	Re M
344	73	1754	355	Fa M
270		1754	357	
425	314	1754	359	Re M
214	315	1754	361	Si b M
104	158	1754	363	Do m
112	160	1754	365	Fa m
453	317	1754	367	Fa M
259	319	1754	369	La M
264	480	1754	371	Mi b M
158	161	1754	373	Sol m
414	162	1754	375	Sol M
245	164	1754	377	Si m
107	481	1754	379	Fa M
323	321	1754	381	Mi M
269	166	1754	383	La m

Nº Pest.	Nº Hail	Año comp.	Nº Kirk.	Tonali.
334	296	1753	312	Re M
505	298	1753	314	Sol M
193	149	1753	316	Fa M
302	525	1753	318	Fa M
335	300	1753	320	La M
360	62	1753	322	La M
285	150	1753	324	Sol M
336	151	1754	326	Do M
485	12	1754	328	Sol M
222	65	1754	330	Do M
519	152	1754	332	Si b M
412	67	1754	334	Si b M
262	304	1754	336	Re M
400	305	1754	338	Sol M
420	436	1754	340	Do M
341	69	1754	342	La M
221	308	1754	344	La M
250	71	1754	346	Re M
462	199	1754	348	Sol M
413	310	1754	350	Fa M
343	72	1754	352	Re M
486	312	1754	354	Fa M
488	530	1754	356	Do M
457	313	1754	358	Re M
520	74	1754	360	Si b M
159	157	1754	362	Do m
345	159	1754	364	Fa m
263	316	1754	366	Fa M
506	318	1754	368	La M
346	450	1754	370	Mi b M
402	320	1754	372	Sol M
472	75	1754	374	Sol M
246	163	1754	376	Si m
347	200	1754	378	Fa M
483	451	1754	380	Mi M
508	165	1754	382	La m
487	322	1754	384	Do M

Nº Pest.	Nº Hail	Año comp.	Nº Kirk.	Tonali.
220	323	1754	385	Do M
415	168	1754	387	Fa m
331	169	1754	389	Re M
364	170	1754	391	Sol M
326	76	1754	393	Si b M
273	326	1754	395	Mi M
325	327	1754	397	Re M
458	329	1754	399	Do M
436	484	1754	401	Re M
436	485	1754	403	Mi M
436	486	1754	405	La M
436	332	1754	407	Do M
436	334	1754	409	Si m
351	171	1754	411	Si b M
416	337	1754	413	Sol M
175	172	1754	415	Re M
40	173	1754	417	Re M
524	339	1755	419	Fa M
459	340	1755	421	Do M
455	341	1755	423	Do M
426	343	1755	425	Sol M
286	201	1755	427	Sol M
132	345	1755	429	La M
	175	1755	431	Sol M
453	346	1755	433	Sol M
466	347	1755	435	Re M
499	79	1755	437	Fa M
473	349	1755	439	Si b M
375	350	1755	441	Si b M
376	489	1755	443	Re M
468	352	1755	445	Fa M
191	490	1755	447	Fa# m
405	353	1755	449	Sol M
366	179	1755	451	La m
354	354	1755	455	Sol M
442	356	1755	457	La M
167	456	1755	459	Re M

Nº Pest.	Nº Hail	Año comp.	Nº Kirk.	Tonali.
137	167	1754	386	Fa m
370	452	1754	388	Re M
348	324	1754	390	Sol M
371	325	1754	392	Si b M
349	482	1754	394	Mi m
435	483	1754	396	Re m
493	328	1754	398	Do M
228	330	1754	400	Re M
436	526	1754	402	Mi m
436	527	1754	404	La M
436	331	1754	406	Do M
436	333	1754	408	Si m
372	335	1754	410	Si b M
463	336	1754	412	Sol M
373	453	1754	414	Re M
454	338	1754	416	Re M
510	77	1755	418	Fa M
352	487	1755	420	Do M
511	488	1755	422	Do M
374	342	1755	424	Sol M
128	89	1755	426	Sol M
131	344	1755	428	La M
463	174	1755	430	Re M
288	176	1755	432	Sol M
498	78	1755	434	Re m
404	348	1755	436	Re M
467	177	1755	438	Fa M
328	80	1755	440	Si b M
229	351	1755	442	Si b M
441	454	1755	444	Re m
177	455	1755	446	Fa M
261	178	1755	448	Fa# m
422	437	1755	450	Sol m
423	491	1755	454	Sol M
377	355	1755	456	La M
260	438	1755	458	Re M
378	492	1755	460	Do M

Nº Pest.	Nº Hail	Año comp.	Nº Kirk.	Tonali.
324	357	1755	461	Do M
512	181	1755	463	Fa m
406	358	1755	465	Do M
513	183	1755	467	Fa m
514	184	1755	469	Fa M
327	185	1755	471	Sol M
355	359	1755	473	Si b M
319	496	1755	475	Mi b M
419	360	1755	477	Sol M
380	497	1755	479	Re M
504	187	1755	481	Fa m
407	362	1755	483	Fa M
490	440	1756	485	Do M
421	499	1756	487	Do M
522	365	1756	489	Si b M
484	501	1756	491	Re M
383	366	1756	493	Sol M
384	367	1756	495	Mi M
357	502	1756	497	Si m
477	441	1756	499	La M
385	370	1756	501	Do M
196	503	1756	503	Si b M
386	372	1756	505	Fa M
478	504	1756	507	Mi b M
387	374	1756	509	Re M
388	505	1756	511	Re m
176	202	1756	513	Do M
417	191	1757	515	Do M
517	193	1757	517	Re m
445	194	1757	519	Fa m
492	378	1757	521	Sol M
527	380	1757	523	Sol M
529	443	1757	525	Fa M
531	195	1757	527	Do M
533	382	1757	529	Si b M
535	507	1757	531	Mi M
537	383	1757	533	La M

Nº Pest.	Nº Hail	Año comp.	Nº Kirk.	Tonali.
474	180	1755	462	Fa m
460	81	1755	464	Do M
501	182	1755	466	Fa m
507	493	1755	468	Fa M
379	494	1755	470	Sol M
475	186	1755	472	Si b M
502	495	1755	474	Mi b M
427	439	1755	476	Sol m
503	457	1755	478	Re M
381	361	1755	480	Re M
356	498	1755	482	Fa M
428	363	1756	484	Re M
515	364	1756	486	Do M
382	458	1756	488	Si b M
476	500	1756	490	Re M
443	459	1756	492	Re M
444	188	1756	494	Sol M
332	368	1756	496	Mi M
367	189	1756	498	Si m
358	369	1756	500	La M
408	442	1756	502	Do M
265	371	1756	504	Si b M
409	373	1756	506	Fa M
516	460	1756	508	Mi b M
525	190	1756	510	Re M
359	375	1756	512	Re M
389	376	1757	514	Do M
523	192	1757	516	Re m
390	529	1757	518	Fa M
362	377	1757	520	Sol M
526	379	1757	522	Sol M
528	381	1757	524	Fa M
530	444	1757	526	Do m
532	445	1757	528	Si b M
534	506	1757	530	Mi M
536	196	1757	532	La m
538	508	1757	534	Re M

Nº Pest.	Nº Hail	Año comp.	Nº Kirk.	Tonali.
531	384	1757	535	Re M
541	82	1757	537	La M
543	387	1757	539	Sol M
545	389	1757	541	Fa M
547	446	1757	543	Fa M
549	510	1757	545	Si b M
551	511	1757	547	Sol M
553	390	1757	549	Do M
555	392	1757	551	Si b M
557	393	1757	553	Re m
559	198	1757	555	Fa m

Nº Pest.	Nº Hail	Año comp.	Nº Kirk.	Tonali.
540	385	1757	536	La M
542	386	1757	538	Sol M
544	388	1757	540	Fa M
546	509	1757	542	Fa M
548	531	1757	544	Si b M
550	197	1757	546	Sol m
552	512	1757	548	Do M
554	391	1757	550	Si b M
556	513	1757	552	Re m
558	514	1757	554	Fa M

Tabla 140: Datos de catalogación y tonalidad de las sonatas de Domenico Scarlatti utilizadas en los estudios de esta tesis doctoral<sup>583</sup>.

Los archivos MIDI de la Tabla 140 han sido obtenidos en el año 1998 de la página [www.classicalarchivees.com](http://www.classicalarchivees.com) que en esas fechas era accesible por medio de la URL [www.prs.net](http://www.prs.net)

## Schumann, Robert

La Tabla 141 resume las piezas musicales utilizadas del compositor Robert Schumann en los diferentes estudios realizados en esta tesis doctoral.

Obra	Nº piezas <sup>584</sup>	Tonalidad	Nº Opus
Sinfonía No.1 ('Primavera')	4	Si b M	38
Sinfonía No.2	3	Do M	61
Sinfonía No.3 ('Renana')	4	Mi b M	97
Quinteto con piano	3	Mi b M	44
Trío para piano nº2	1	Fa M	80
Fantasia	1	Do M	17
Colección de fantasías " <i>Grillen: Mit Humor</i> "	1		12
8 <i>Novelettes</i>	5	Diversas	21
Escenas del Bosque	6	Diversas	82
Arabesca in C	1	Do M	18
Flor de la pintura ( <i>Blumenstück</i> )	1	Re b M	19
3 Romanzas	1	Fa # m	28
Estampas del Este ( <i>Bilder aus Osten</i> ) 6 Impromptus, para piano a 4 manos	2	Re b M	66

583 La información de la relación entre los catálogos de Pestelli y Kirkpatrick ha sido obtenida de "[http://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_solo\\_keyboard\\_sonatas\\_by\\_Domenico\\_Scarlatti](http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_solo_keyboard_sonatas_by_Domenico_Scarlatti)" en fecha Enero 2011.

584 Los movimientos contabilizados son aquellos de los cuales se ha localizado una fuente MIDI y el modo de la tonalidad de la pieza es Mayor.

Tabla 141: Obras de R. Schumann utilizadas en los diferentes estudios recopilados en esta tesis doctoral.

## Vivaldi, Antonio

La Tabla 142 resume las piezas musicales utilizadas del compositor Antonio Vivaldi en los diferentes estudios realizados en esta tesis doctoral.

Obra	Tonalidad	nº piezas	Catalogación
La primavera ( <i>Spring</i> ) Op.8, Nº.1	Mi M	3	RV269
El verano ( <i>Summer</i> ), Op.8, Nº.2	Sol m	1	RV315
El otoño ( <i>Autumn</i> )	Fa M	2	RV293
El Invierno ( <i>Winter</i> ) Op8. nº 4	F m	1	RV297
<i>La stravaganza</i> , 12 Conciertos Violín	Diversos		Op.4
No.1	Si b M	3	RV383a
No.7	Do M	2	RV185
No.11	Re M	3	RV204
Concierto para violín (' <i>Il cornetto da posta</i> '),	Si b M	2	RV363
Concierto para violín	Mi M	2	RV263
Concierto para violín	Mi M	1	RV762
Concierto para Fagot	Do M	1	RV478
Concierto para Violonchelo	Do M	2	RV398
Concierto para flauta	Re M	2	RV427
Concierto para Mandolina	Do M	2	RV425
Concierto para oboe	Fa M	3	RV455
Concierto para Oboe y Fagot	Sol M	3	RV545
<i>L'estro armonico</i> , 12 conciertos para 1-4 instrumentos, cuerdas y continuo			Op.3
No.3 para Violín,	Sol M	3	RV310
No.1 para 4 Violines,	Re M	2	RV549
No.5 Doble Concierto para violín	La M	3	RV519
No.7 para 4 Violines y Violonchelo	Fa M	3	RV567
Concierto para cuerdas (' <i>alla rustica</i> ')	Sol M	3	RV151
<i>La cetra</i> , 12 conciertos para 1-2 instrumentos, cuerdas y continuo en dos libros			Op.9
No.2	La M	2	RV345
No.4	Mi M	3	RV 263a
No.6	La M	2	RV348
No.7	Do M	3	RV183

Tabla 142: Obras de A.Vivaldi utilizadas en los diferentes estudios recopilados en esta tesis doctoral.

## Walther, Johann Gottfried

La Tabla 143 resume las piezas musicales utilizadas del compositor Johann Gottfried Walther<sup>585</sup> en los diferentes estudios realizados en esta tesis doctoral.

Obra <sup>586</sup>	Nº piezas	Tonalidad
Preludios Corales para órgano (arreglos para cuarteto de metales)		
<i>Christus der ist mein Leben</i>	1	Mi b M
<i>Mach's mit mir, Gott, nach deiner Güt</i>	1	Fa M
<i>Ach Gott und Herr</i>	1	Si b M
<i>Der Bräut'gam wird bald rufen</i>	1	Sol M
<i>Allein auf Gottes Wort will ich</i>	1	Do M
Concierto en Sol (arreglo para quinteto de metales (3 trompetas, trombón y tuba)	6	Sol M, Do M, Mi m
Preludio y Fuga para órgano (arreglo para cuarteto de metales)	1	La M
Concierto	1	Fa M

Tabla 143: Obras de Walther utilizadas en los diferentes estudios recopilados en esta tesis doctoral.

585 Consultar página 347 (capítulo “Anexo 4 – Información de compositores analizados y catalogación.”) para unas breves notas bibliográficas del compositor.

586 Ficheros descargados de “<http://icking-music-archive.org/ByComposer/J.G.Walther.php>” en fecha Octubre 2011

## Anexo 9 – Clasificación de sonatas de D.Scarlatti por estilo clásico o barroco

Este anexo presenta la tabla de sonatas de Domenico Scarlatti estudiadas en el “Capítulo 13. Identificación de rasgos en el estilo musical de las sonatas para teclado de Domenico Scarlatti por medio de herramientas matemáticas y tecnológicas.” a partir de la página 202.

Las sonatas que no han sido incluidas en este estudio ha sido debido o bien porque no ha sido encontrada su fuente MIDI, o bien porque las fuentes encontradas no tenían el material musical separado suficientemente en diferentes canales MIDI para garantizar que la aplicación AN\_MID pudiera hacer un correcto recuento de los intervalos utilizados con unos porcentajes de error aceptablemente bajos.

Para reducir las dimensiones de la tabla, ésta ha sido estructurada en 3 columnas y ordenada por la numeración Kirkpatrick por columnas de izquierda a derecha y los campos que componen cada una de las tres columnas tiene los siguientes campos:

- **n° Kikrk.:** n° de catálogo de Ralph Kirkpatrick.
- **Clasif.:** Clasificación según la investigación “B” como próxima al estilo Barroco y “C” como próxima al estilo del Clasicismo.
- **Año estimado:** Año estimado de composición según Christopher Hail. En caso de que su estimación fuera de un intervalo de años se tomaba un año próximo al centro del intervalo, es decir, las sonatas catalogadas por Hail como compuestas entre 1535 y 1540 se les asigna un año de composición como 1537 o 1538.

n° Kikrk.	Clasif.	Año estimado
k002	B	1738
k006	C	1738
k013	B	1738
k014	B	1738
k016	C	1738
k017	B	1738
k020	C	1738
k021	B	1738
k023	B	1738
k024	C	1738
k026	C	1738
k028	B	1738
k029	C	1738
k033	C	1739
k038	B	1739
k039	B	1739

n° Kikrk.	Clasif.	Año estimado
k241	B	1753
k242	C	1753
k243	C	1753
k244	B	1753
k245	C	1753
k248	C	1753
k249	C	1753
k250	C	1753
k251	B	1753
k252	B	1753
k253	C	1753
k255	B	1753
k256	C	1753
k257	C	1753
k258	C	1753
k259	C	1753

n° Kikrk.	Clasif.	Año estimado
k398	C	1754
k399	C	1754
k400	C	1754
k401	B	1754
k403	C	1754
k404	C	1754
k405	C	1754
k406	B	1754
k407	C	1754
k410	C	1754
k411	C	1754
k412	C	1754
k413	B	1754
k414	B	1754
k415	B	1754
k416	C	1754



n° Kikrk.	Clasif.	Año estimado
k042	B	1739
k044	C	1742
k045	B	1742
k046	C	1742
k047	C	1742
k049	C	1742
k053	C	1742
k055	C	1742
k057	C	1742
k059	C	1742
k062	C	1742
k063	C	1742
k065	C	1742
k066	C	1742
k068	C	1742
k070	B	1742
k071	C	1742
k072	C	1742
k074	C	1742
k075	B	1742
k079	C	1742
k082	C	1742
k083	C	1742
k085	B	1742
k086	B	1742
k094	B	1742
k095	C	1746
k096	C	1746
k100	C	1749
k101	C	1749
k103	C	1749
k104	C	1749
k105	B	1749
k106	C	1749
k107	B	1749
k112	C	1749
k113	C	1749
k114	C	1749
k117	B	1749

n° Kikrk.	Clasif.	Año estimado
k260	C	1753
k261	C	1753
k262	C	1753
k264	C	1753
k266	B	1753
k267	B	1753
k268	B	1753
k269	C	1753
k270	C	1753
k271	C	1753
k272	C	1753
k273	B	1753
k274	C	1753
k275	C	1753
k276	C	1753
k277	B	1753
k278	B	1753
k279	C	1753
k280	C	1753
k281	B	1753
k282	C	1753
k283	B	1753
k284	C	1753
k285	C	1753
k286	C	1753
k287	B	1753
k288	C	1753
k289	B	1753
k290	B	1753
k296	B	1753
k297	B	1753
k298	C	1753
k299	C	1753
k300	C	1753
k301	C	1753
k304	B	1753
k305	C	1753
k306	B	1753
k307	C	1753

n° Kikrk.	Clasif.	Año estimado
k417	C	1754
k418	B	1755
k419	C	1755
k420	C	1755
k421	C	1755
k422	C	1755
k423	B	1755
k424	B	1755
k425	C	1755
k426	C	1755
k427	C	1755
k428	C	1755
k429	C	1755
k430	C	1755
k431	B	1755
k432	C	1755
k433	B	1755
k435	C	1755
k436	B	1755
k437	C	1755
k438	B	1755
k439	B	1755
k440	C	1755
k441	C	1755
k442	B	1755
k443	C	1755
k445	C	1755
k446	C	1755
k449	C	1755
k454	C	1755
k455	C	1755
k456	C	1755
k457	B	1755
k458	C	1755
k459	C	1755
k460	C	1755
k461	C	1755
k464	C	1755
k465	C	1755

n° Kikrk.	Clasif.	Año estimado
k118	C	1749
k119	C	1749
k122	B	1749
k123	B	1749
k124	C	1749
k125	C	1749
k127	C	1749
k130	B	1749
k132	C	1749
k133	C	1749
k140	B	1749
k150	B	1752
k151	B	1752
k152	C	1752
k153	C	1752
k154	B	1752
k155	C	1752
k156	B	1752
k157	C	1752
k159	C	1752
k160	B	1752
k161	B	1752
k162	C	1752
k163	B	1752
k164	C	1752
k165	B	1752
k166	C	1752
k167	B	1752
k168	B	1752
k169	C	1752
k170	C	1752
k171	B	1752
k172	C	1752
k173	C	1752
k177	C	1752
k178	B	1752
k180	B	1752
k181	B	1752
k182	C	1752

n° Kikrk.	Clasif.	Año estimado
k308	B	1753
k309	C	1753
k310	C	1753
k311	B	1753
k312	C	1753
k313	B	1753
k314	B	1753
k316	C	1753
k317	B	1753
k318	C	1753
k319	B	1753
k320	B	1753
k321	C	1753
k322	C	1753
k323	C	1753
k324	B	1753
k325	B	1753
k326	C	1754
k327	C	1754
k328	C	1754
k329	C	1754
k330	C	1754
k331	B	1754
k332	B	1754
k333	B	1754
k334	B	1754
k335	C	1754
k336	B	1754
k337	C	1754
k338	C	1754
k339	C	1754
k340	C	1754
k342	B	1754
k343	B	1754
k344	C	1754
k345	C	1754
k346	B	1754
k348	B	1754
k349	C	1754

n° Kikrk.	Clasif.	Año estimado
k468	C	1755
k469	C	1755
k470	C	1755
k471	C	1755
k472	C	1755
k473	C	1755
k474	C	1755
k475	C	1755
k477	C	1755
k478	B	1755
k479	C	1755
k480	C	1755
k482	B	1755
k483	C	1755
k484	C	1756
k485	C	1756
k486	C	1756
k487	C	1756
k488	C	1756
k489	C	1756
k490	C	1756
k491	C	1756
k492	C	1756
k493	B	1756
k494	C	1756
k495	C	1756
k496	B	1756
k499	B	1756
k500	B	1756
k501	C	1756
k502	C	1756
k503	C	1756
k504	B	1756
k505	C	1756
k506	B	1756
k507	C	1756
k508	B	1756
k509	C	1756
k510	B	1756

n° Kikrk.	Clasif.	Año estimado
k189	B	1752
k190	B	1752
k192	C	1752
k193	C	1752
k194	B	1752
k195	B	1752
k199	C	1752
k200	B	1752
k201	C	1752
k202	B	1752
k205	B	1752
k206	C	1753
k207	C	1753
k208	B	1753
k209	C	1753
k210	C	1753
k211	C	1753
k212	C	1753
k214	B	1753
k215	C	1753
k216	C	1753
k219	C	1753
k220	C	1753
k221	B	1753
k222	C	1753
k223	B	1753
k224	B	1753
k225	C	1753
k228	C	1753
k229	B	1753
k235	C	1753
k236	C	1753
k237	C	1753
k240	C	1753

n° Kikrk.	Clasif.	Año estimado
k350	C	1754
k351	C	1754
k352	B	1754
k353	C	1754
k354	B	1754
k355	B	1754
k356	C	1754
k358	C	1754
k359	C	1754
k360	C	1754
k361	C	1754
k366	B	1754
k367	B	1754
k368	C	1754
k369	C	1754
k370	C	1754
k371	C	1754
k372	C	1754
k374	C	1754
k375	B	1754
k378	B	1754
k379	B	1754
k380	C	1754
k381	C	1754
k384	C	1754
k385	C	1754
k388	C	1754
k389	C	1754
k390	B	1754
k391	B	1754
k392	C	1754
k393	C	1754
k395	C	1754
k397	C	1754

n° Kikrk.	Clasif.	Año estimado
k511	C	1756
k512	C	1756
k513	C	1756
k514	C	1757
k515	C	1757
k518	B	1757
k520	C	1757
k521	C	1757
k522	B	1757
k523	C	1757
k524	B	1757
k525	B	1757
k527	C	1757
k528	C	1757
k529	C	1757
k530	C	1757
k531	B	1757
k533	C	1757
k534	B	1757
k535	B	1757
k536	C	1757
k537	C	1757
k538	C	1757
k539	B	1757
k540	C	1757
k541	C	1757
k542	C	1757
k543	C	1757
k544	C	1757
k545	B	1757
k547	C	1757
k548	C	1757
k549	C	1757
k550	C	1757
k551	C	1757
k554	C	1757

*Tabla 144: Clasificación de sonatas de D. Scarlatti mediante su similitud al estilo clásico o barroco.*

## Índice de figuras

Figura 1: Cronología de las investigaciones realizadas. (Los textos de las investigaciones de la parte izquierda no coinciden en nombre con los nombres de los capítulos por tamaño y por dar en esta figura una idea resumida del resultado principal de cada una de los “Resultados Programados”.....	23
Figura 2: Expresión de la correlación entre dos variables.....	55
Figura 3: Nomenclatura utilizada para la identificación de clases de notas y octavas.....	81
Figura 4: Grafía del trino y la apoyatura en la escritura musical.....	83
Figura 5: Resultado sonoro al almacenar el material musical de la Figura 4 en formato MIDI.....	83
Figura 6: Intervalos melódicos detectados en los primeros 4 compases del segundo movimiento de la Sonata para piano nº 12 de Mozart (compuesto en Mi b Mayor).....	85
Figura 7: Ejemplo de cambio de pentagrama de una línea melódica. ....	85
Figura 8: Material musical repartido en dos canales.....	86
Figura 9: Material musical repartido en un canal.....	86
Figura 10: Últimos compases del primer movimiento de la sonata “Patética” de L.v.Beethoven antes del allegro súbito.....	86
Figura 11: Líneas melódicas originales.....	86
Figura 12: líneas melódicas detectadas erróneamente.....	86
Figura 13: Ejemplo de notación musical.....	87
Figura 14: Indicación de tempo.....	87
Figura 15: Ejemplo de codificación MIDI de las duraciones. Las líneas continuas identifican mensajes NOTE ON y las punteadas mensajes NOTE OFF.....	88
Figura 16: Representación de pausas musicales en la sintaxis del lenguaje musical.....	88
Figura 17: Ejemplo de representación de silencios en formato MIDI.....	89
Figura 18: Ejemplo de codificación MIDI de material musical polifónico en un mismo canal.....	89
Figura 19: Ejemplo de codificación MIDI de material musical polifónico en un mismo canal con diferentes duraciones en cada línea melódica.....	90
Figura 20: Resultado de grabación a tiempo real de una escala de Do Mayor por medio de un secuenciador sin cuantificación.....	91
Figura 21: Códigos de duración teóricos y reales de un fragmento musical editado con el editor de partituras Finale de Coda Music.....	92
Figura 22: Códigos de duración teóricos y reales de un fragmento musical editado con el editor de partituras Finale de Coda Music.....	93
Figura 23: resultado (parte inferior) de la compresión/expansión del tempo con indicaciones de cambio de tempo en los compases 2, 3 y 4.....	94
Figura 24: Ejemplo de material musical con articulaciones.....	94
Figura 25: Resultado del material musical de la Figura 24 almacenado en formato MIDI.....	94
Figura 26: Primeros compases tercer movimiento de la Sonata nº 6 para piano K.284.....	95
Figura 27: Resultado de la Figura 26 realizando un cambio de compás.....	95
Figura 28: Intervalos melódicos detectados en los primeros compases de la 5ª sinfonía de Beethoven.....	98
Figura 29: Valores obtenidos de la aplicación AN_MID 5.1.....	100
Figura 30: Propiedades cumplidas por los indicadores obtenidos por medio de la aplicación AN_MID 5.1	100
Figura 31: Definición de las variables estadísticas aleatorias.....	110
Figura 32: Valores calculados previamente.....	110
Figura 33: Cálculo de los promedios y desviaciones estándar de las variables creadas.....	111

Figura 34: Definición de las variables formadas por subconjuntos con el 50% de las variables.....	111
Figura 35: Expresión de las variables formadas por subconjuntos de variables.....	111
Figura 36: N° de variables posibles tomando un 50% de las variables.....	111
Figura 37: Función de densidad de Gumbel a la que se pueden aproximar las variables VA y VN.....	113
Figura 38: Comparación de la distribución Gumble desplazada y la variable aleatoria VA de las sonatas de Haydn.....	113
Figura 39: Comparación de la distribución Gumble desplazada y la variable aleatoria VA de las sonatas de Scarlatti.....	114
Figura 40: Función de densidad de la variable VN tras haberle aplicado la transformación de Box-Cox.....	114
Figura 41: Expresión del Coeficiente de error cometido en la detección de intervalos en cada pieza.....	117
Figura 42: Expresión del porcentaje de éxito.....	121
Figura 43: Peores resultados en el cálculo del porcentaje de éxito por compositor.....	123
Figura 44: Esquema de funcionamiento del algoritmo del método propuesto MIAMP.....	126
Figura 45: Datos obtenidos tras la ejecución de la aplicación AN_MID v5.1 de cada pieza musical de los compositores A y B y también de la pieza evaluada “X”.....	128
Figura 46: Cálculo del vector MP a partir de los datos del Paso 3.....	128
Figura 47: Conversión de las variables aleatorias por nombres “V” de ahora en adelante.....	128
Figura 48: Definición del vector VdifA,B.....	129
Figura 49: Definición de IRVS que define las variables aleatorias que serán utilizadas en la función de distancia.....	129
Figura 50: Definición de la expresión de distancia entre una pieza “x” y los compositores A y B propuesta en el método MIAMP.....	129
Figura 51: Conjunto de valores iniciales para evaluar el método MIAMP.....	129
Figura 52: Expresiones de la probabilidad condicionada de que una pieza compuesta por el compositor A sea identificada por el método como compuesta por B y viceversa.....	130
Figura 53: Definición de las funciones que deben optimizarse. Las opciones 1 y 3 son equivalentes y la 2 y 4 también.....	131
Figura 54: Resultados ideales tras el proceso de optimización (Paso 7).....	131
Figura 55: Esquema de decisión tras el cálculo de distancias de la pieza dudosa “x” a los compositores A y B.....	132
Figura 56: Árbol de decisión generado por la aplicación RaipdMiner para clasificar piezas musicales por estilo.....	147
Figura 57: Diferencias en los criterios de recuento del número de notas.....	163
Figura 58: Terminología utilizada en esta investigación.....	163
Figura 59: Criterios de normalización de los resultados.....	164
Figura 60: Comparación de los valores absolutos de compositional prolificacy (el tradicional y el nuevo valor propuesto en esta investigación).....	165
Figura 61: Comparación de los valores de Temporary Compositional prolificacy (tradicional y el propuesto en esta investigación).....	166
Figura 62: Comparación de los valores temporary compositional prolificacy (tradicional y la nueva propuesta) por compositores.....	167
Figura 63: Evolución del valor EMP en las sinfonías analizadas en el estudio.....	168
Figura 64: Terminología de los datos extraídos de la interpretación maestra y de la evaluada por la aplicación AN_MID5.1.....	175
Figura 65: Propiedades que satisfacen las variables calculadas.....	175
Figura 66: Propiedades que cumplirá la peor interpretación.....	175
Figura 67: Sistema de evaluación de la interpretación evaluada respecto la interpretación master.....	176

Figura 68: Secuencia de pasos (1-4) del método ORPET aplicado a dos interpretaciones evaluadas EP1 y EP2.....	177
Figura 69: Interpretación maestra (MP) del ejemplo simple.....	178
Figura 70: Interpretación a evaluar (EP1).....	178
Figura 71: Interpretación a evaluar (EP2).....	178
Figura 72: Histograma de los OP's de los ficheros MIDI (MP, EP1 y EP2) del ejemplo simple.....	179
Figura 73: Valores extraídos por AN_MID v5.1 de cada pieza analizada.....	186
Figura 74: Los valores obtenidos cumplen estas propiedades.....	187
Figura 75: Cálculo del vector MP vector a partir de la muestra de piezas.....	189
Figura 76: Representación gráfica del porcentaje promedio de uso de cada clase de nota en la muestra maestra de piezas musicales la cual contiene 1620 piezas musicales.....	190
Figura 77: Expresión del promedio de uso de cada clase de nota separando las piezas musicales en función del modo de su tonalidad (Mayor o menor).....	190
Figura 78: Expresión matemática del “Histograma de distancia tonal” (Tone Distance Histogram).....	191
Figura 79: Expresión matemática de la distancia euclidiana de la pieza 'i' al modo Mayor o menor.....	192
Figura 80: Condiciones a evaluar usando el vector MDH para inferir el modo de la pieza 'i'.....	192
Figura 81: Expresión usada para evaluar el porcentaje de éxito del método.....	192
Figura 82: Primer conjunto de valores probados para evaluar el método.....	193
Figura 83: Restricciones aplicadas en el proceso de optimización.....	193
Figura 84: Relación entre la numeración de los catálogos de Kirkpatrick y Pestelli.....	206
Figura 85: Numeración Kirkpatrick ordenados usando el catálogo de Hail.....	206
Figura 86: Numeración Pestelli ordenada usando las fechas de composición aproximadas del estudio de Hail.....	206
Figura 87: Evolución del porcentaje de proximidad de sonatas analizadas más próximo al clasicismo dividiendo la muestra en 5 grupos de 78 sonatas en base al catálogo Kirkpatrick.....	208
Figura 88: Evolución del porcentaje de proximidad al Clasicismo de sonatas analizadas más próximo al clasicismo dividiendo la muestra en 10 grupos de 39 sonatas en base al catálogo Kirkpatrick.....	209
Figura 89: Porcentajes de sonatas más próximas al clasicismo en cada intervalo de tiempo analizado.....	210
Figura 90: Matriz de datos extraída del compositor A.....	214
Figura 91: Matriz de datos extraída del compositor B.....	214
Figura 92: Expresión de los valores n1 y n2.....	214
Figura 93: Vectores de promedios de cada variable del compositor A.....	215
Figura 94: Vectores de promedios de cada variable del compositor B.....	215
Figura 95: Varianzas poblacionales de cada variable y compositor.....	215
Figura 96: Proceso de normalización de la nomenclatura para eliminar los acrónimos de grupos de variables.....	216
Figura 97: Expresión del vector de distancias de promedios.....	216
Figura 98: Vector de de diferencias entre promedios.....	216
Figura 99: Expresión de distancia al compositor A.....	217
Figura 100: Expresión de distancia al compositor B.....	217
Figura 101: Expresión de la probabilidad condicionada de que al pieza X sea considerada como compuesta por A cuando realmente fue compuesta por B y viceversa.....	217
Figura 102: Acordes de 3 notas (triadas) más frecuentes en la música tonal asociados a la tonalidad de Do Mayor (fuente wikipedia). ....	228
Figura 103: Acorde de do mayor en estado fundamental y en primera y segunda inversiones.....	229
Figura 104: Tonalidad de si mayor sin armadura, por tanto requiere alteraciones accidentales.....	229
Figura 105: Tonalidad de si mayor con armadura, no requiere alteraciones accidentales.....	229

Figura 106: Ejemplos de articulaciones, de izquierda a derecha: staccato, staccatissimo, marcato, acento y tenuto.....	231
Figura 107: Círculo de Quintas detallado por Nikolai Diletskii en 1679.....	234
Figura 108: Figuras de las notas redonda, blanca, negra, corchea, semicorchea, fusa y semifusa.....	239
Figura 109: Símbolos que representan los silencios de duración igual a redonda, blanca, negra, corchea, semicorchea, fusa y semifusa.....	240
Figura 110: Dos notas negras ligadas tiene una duración de nota blanca.....	240
Figura 111: Estructura jerárquica.....	241
Figura 112: Estructura posible (a) e imposible (b).....	241
Figura 113: Secuencias de pulsos regulares (a) e irregulares (b).....	242
Figura 114: Terminología para representar jerarquía con puntos (a) y con grillas (b).....	243
Figura 115: Notas de la escala de Do Mayor.....	246
Figura 116: Triadas sobre cada una de las notas de la escala de Do Mayor.....	247
Figura 117: Ejemplos de intervalos a partir de la nota Do mostrados sobre el pentagrama.....	248
Figura 118: Ejemplo de nota de paso.....	253
Figura 119: Ejemplo de apoyatura breve y a la derecha su resultado sonoro.....	255
Figura 120: Ejemplo de Acciaccatura y su resultado sonoro a la derecha.....	255
Figura 121: Ejemplo de grupeto y su resultado sonoro a la derecha.....	255
Figura 122: Ejemplos de mordente superior e inferior y su resultado sonoro a la derecha.....	255
Figura 123: Expresión escrita de un trino.....	255
Figura 124: Ejemplo de partitura para piano solo de una obra de Erik Satie (fuente: <a href="http://www.visualbeta.es/3926/ utilidades/ lilypond-crea-tus-partituras-musicales/">http://www.visualbeta.es/3926/ utilidades/ lilypond-crea-tus-partituras-musicales/</a> ).....	257
Figura 125: Síncopa con figuración.....	258
Figura 126: Síncopa con silencios.....	258
Figura 127: Síncopa con ligaduras.....	258
Figura 128: Clasificación de los tiempos fuertes en los compases 2/4, 3/4 y 4/4.....	261
Figura 129: Alteraciones que aparecen en la armadura en función de la tonalidad de la pieza musical.....	262
Figura 130: Representación de un trino en una partitura.....	264
Figura 131: Resultado musical de la ejecución del trino de la Figura 130.....	264
Figura 132: Expresión matemática de una cadena de Márkov.....	270
Figura 133: Expresión del sistema en tiempo discreto.....	276
Figura 134: Expresión del sistema en tiempo continuo.....	276
Figura 135: Expresión de la expresión a maximizar en el método Naive Bayes.....	284
Figura 136: Expresión del "Soporte".....	286
Figura 137: Expresión de la "confianza" de una regla.....	286
Figura 138: Ecuación del hiperplano de un Perceptrón Simple.....	287
Figura 139: Expresión de la inicialización aleatoria de un perceptrón simple.....	288
Figura 140: Patrón de entrada salida de un perceptrón simple.....	288
Figura 141: Expresión de la salida de un perceptrón simple.....	288
Figura 142: Parámetros a modificar en caso de clasificación incorrecta de un perceptrón simple.....	288
Figura 143: Regla de aprendizaje generada por el perceptrón.....	288
Figura 144: Captura de pantalla de uno de los experimentos realizados por medio de la aplicación RapidMiner.....	290
Figura 145: Expresión de los datos distribuidos binomialmente.....	291
Figura 146: Expresión del modelo.....	291
Figura 147: Expresión de la función lineal de los logaritmos de los odds.....	292

Figura 148: Formulación del modelo.....	292
Figura 149: Expresión de la derivada de $\pi$ .....	292
Figura 150: Expresión de la derivada de la función $f(X)$ .....	292
Figura 151: Representación de la espiral de tonos.....	295
Figura 152: Representación del acorde de Do Mayor.....	295
Figura 153: Propiedades cumplidas por los pesos.....	295
Figura 154: Representación del acorde de Do menor.....	295
Figura 155: Propiedades cumplidas por los pesos.....	295
Figura 156: Expresión de una tonalidad Mayor.....	295
Figura 157: Expresión de los pesos.....	295
Figura 158: Expresión matemática para identificar las coordenadas de una tonalidad Mayor.....	295
Figura 159: Propiedades cumplidas por los pesos.....	296
Figura 160: Expresión de la Transformada de Fourier.....	296
Figura 161: Expresión alternativa de la Transformada de Fourier.....	296
Figura 162: Expresión de la DFT.....	297
Figura 163: Expresión de la transformada inversa de Fourier discreta.....	298
Figura 164: Conectores MIDI.....	303
Figura 165: Conexiones físicas del estándar MIDI.....	303
Figura 166: Conexión de un controlador MIDI a un generador de sonido.....	304
Figura 167: Esquema de conexión de un controlador a un secuenciador y a dos generadores de sonido.....	304
Figura 168: Esquema de conexión de un controlador a dos generadores de sonido .....	305
Figura 169: Códigos de duración de 2 y 3 bytes así como el proceso de extracción de la duración exacta (medida en MIDI ticks).....	309
Figura 170: Expresión del estadístico $A$ .....	349
Figura 171: Expresión de $S$ del test de Anderson-Darling.....	350
Figura 172: Expresión del Teorema de Bayes.....	352
Figura 173: Expresión matemática el coeficiente de correlación de Pearson.....	352
Figura 174: Expresión de la distancia euclídea.....	353
Figura 175: Expresión de la distancia euclídea en un espacio $n$ -dimensional.....	353
Figura 176: Variable aleatoria de la distribución de Pearson.....	353
Figura 177: Función de densidad de la distribución de Pearson.....	354
Figura 178: Expresión del tamaño de la muestra.....	355
Figura 179: Expresión del error muestral conociendo el tamaño de la muestra y el de la población.....	355
Figura 180: Expresión de la densidad de una función de densidad.....	356
Figura 181: Propiedad de la función de densidad.....	356
Figura 182: Propiedad 1 de la función de densidad.....	356
Figura 183: Propiedad 2 de la función de densidad.....	356
Figura 184: Propiedad 3 de la función de densidad.....	356
Figura 185: Expresión de una función derivable.....	357
Figura 186: Propiedades de la función.....	357
Figura 187: Aplicación lineal que debe cumplir.....	357
Figura 188: Expresión de la distribución de Gumble.....	357
Figura 189: Expresión de la mediana de la distribución de Gumble.....	358
Figura 190: Expresión de la media.....	358
Figura 191: Expresión de la desviación estándar.....	358



Figura 192: Función de densidad de probabilidad de la Distribución de Gumble.....	358
Figura 193: vector p-dimensional.....	358
Figura 194: Expresión de la distancia euclidiana.....	359
Figura 195: Función de distribución de la prueba de Kolmogórov-Smirnoff.....	359
Figura 196: Expresión de la distancia de Mahalanobis.....	360
Figura 197: Nomenclatura de la distribución de Bernoulli.....	361
Figura 198: Expresión de la distribución de Bernoulli.....	361
Figura 199: Expresión de la función de probabilidad de la distribución de Bernoulli.....	361
Figura 200: Expresión de la probabilidad condicionada.....	362
Figura 201: Expresión de la transformación Box-cox.....	363
Figura 202: Expresión del valor K2.....	363
Figura 203: Expresión de K1.....	363
Figura 204: Expresión genérica de la varianza muestral.....	364
Figura 205: Expresión de la varianza muestral de una variable discreta.....	364
Figura 206: Expresión de la media de una variable discreta.....	364
Figura 207: Ventana de ejecución de la lanzadera visual W_AN_MIDv51.....	402
Figura 208: Nombres asignados a las notas en la aplicación AN_MIDv5.1.....	410
Figura 209: Número de clases en base al umbral de desviación de duración máxima.....	412

## Índice de tablas

Tabla 1: Listado de anexos de este documento con los colectivos en principio excluidos de su lectura.....	10
Tabla 2: Profesionales del mundo musical entrevistados.....	18
Tabla 3: Resultados principales presentados en esta tesis doctoral.....	22
Tabla 4: Resultados colaterales presentados en esta tesis doctoral.....	24
Tabla 5: Estilos y número de piezas analizadas.....	31
Tabla 6: Indicadores más significativos en la clasificación por género musical.....	36
Tabla 7: Subestilos analizados y número de piezas musicales incluidas en cada subestilo.....	40
Tabla 8: Porcentajes de éxito conseguidos en la investigación y tamaño del vocabulario.....	44
Tabla 9: Mejores clasificadores y porcentaje de clasificación por conjuntos de datos utilizados.....	51
Tabla 10: Resultados piezas utilizadas en el experimento y resultados de éxito.....	53
Tabla 11: Porcentajes de éxito alcanzados por Temperley en la identificación de la tonalidad a partir de las 4 primeras notas de cada pieza.....	56
Tabla 12: Valoración del esfuerzo de desarrollo en los dos escenarios previstos.....	81
Tabla 13: Asociación de identificador de clase en base a la tonalidad de la pieza.....	82
Tabla 14: Factores de normalización en función del denominador del compás.....	96
Tabla 15: Nombres de las notas utilizados en este estudio.....	98
Tabla 16: Lista de conjuntos de piezas analizados y número total de intervalos detectados en cada uno.....	101
Tabla 17: Porcentaje de éxito en la clasificación de cada grupo de piezas.....	103
Tabla 18: Variables altamente correlacionadas con otros predictores.....	103
Tabla 19: Distancia entre los centroides de los grupos analizados.....	103
Tabla 20: 10 variables con más relevancia en la función discriminante lineal.....	104
Tabla 21: 10 variables con menos relevancia en la función discriminante lineal.....	104
Tabla 22: Porcentaje promedio de piezas clasificadas incorrectamente con menos de 1000 notas respecto al total de piezas clasificadas incorrectamente en las muestras de cada estilo musical.....	104
Tabla 23: Porcentaje promedio de piezas clasificadas incorrectamente respecto al total de piezas clasificadas incorrectamente de cada compositor.....	105
Tabla 24: Porcentaje promedio de piezas clasificadas incorrectamente de cada movimiento de cada forma musical respecto al número total de piezas de dicha forma musical.....	105
Tabla 25: Porcentajes promedio de piezas clasificadas incorrectamente respecto al total de piezas procesadas de cada instrumentación.....	106
Tabla 26: Conjuntos de piezas musicales analizados.....	112
Tabla 27: Resultados del test de Kolmogorov-Smirnov aplicados a los 5 conjuntos de piezas.....	114
Tabla 28: Parámetros de la distribución BC y el indicador P del test Anderson Darling test de cada conjunto de piezas.....	115
Tabla 29: Índices de fiabilidad de los 10 análisis discriminantes realizados.....	115
Tabla 30: Índice de fiabilidad de los 5 análisis discriminantes realizados utilizando parejas de compositores.....	116
Tabla 31: Porcentajes de éxito de utilización de una forma musical para inferir piezas de otra forma musical de los compositores Mozart y Haydn.....	117
Tabla 32: Error promedio en la detección de intervalos melódicos en cada grupo de piezas analizadas.....	118
Tabla 33: Porcentajes de éxito del método Dor/Reich clasificando por parejas de compositores (obras para teclado y grupos de cuerda).....	121

Tabla 34: Formas musicales incluidas en la muestra de piezas musicales de Dor/Reich analizadas de cada compositor (orden: número de piezas).....	122
Tabla 35: Peores resultados de éxito del método Dor/Reich en alguno de los 10 experimentos comparado con el total de obras de uno de los dos compositores utilizando sus datos.....	123
Tabla 36: Porcentajes de éxito por compositor en cada pareja de compositores al procesar en cada muestra todas las piezas de cada compositor por medio del algoritmo SMO. Los valores de cada celda (F/C) están expresados en porcentaje el primer valor (F) es el porcentaje de éxito en la clasificación de las piezas del compositor de la fila y el segundo (C) es el porcentaje de éxito en la clasificación de las piezas del compositor de la columna.....	124
Tabla 37: Porcentajes de éxito por compositor en cada pareja de compositores al procesar en cada muestra todas las piezas utilizadas por Dor/Reich de cada compositor por medio del algoritmo MIAMP. Los valores de cada celda (F/C) están expresados en porcentaje el primer valor (F) es el porcentaje de éxito en la clasificación de las piezas del compositor de la fila y el segundo (C) es el porcentaje de éxito en la clasificación de las piezas del compositor de la columna.....	134
Tabla 38: Porcentajes de éxito del método MIAMP clasificando parejas de compositores utilizando los indicadores usados por Dor/Reich.....	135
Tabla 39: Listado de piezas y compositores utilizados en esta investigación.....	136
Tabla 40: Porcentajes de éxito aplicando el método MIAMP propuesto por parejas de compositores.....	137
Tabla 41: Porcentajes de éxito obtenidos aplicando el método MIAMP a las piezas musicales analizadas de Haydn y Mozart separadas por forma musical.....	137
Tabla 42: Número de piezas utilizadas en los experimentos en cada método.....	139
Tabla 43: Porcentajes de éxito de ambos métodos aplicados a muestras de piezas musicales de Haydn y Mozart por instrumentación.....	139
Tabla 44: Promedio y desviación estándar de notas de las piezas utilizadas por compositor en los trabajos Dor/Reich y MIAMP.....	140
Tabla 45: Resultados de aplicación del algoritmo SMO a porcentajes de uso de intervalos melódicos de muestras de parejas de compositores.....	141
Tabla 46: Resultados de clasificación de piezas por estilo musical utilizando el método MIAMP.....	142
Tabla 47: Porcentajes de éxito en la clasificación mediante MIAMP por parejas de estilos compositivos. Leyenda: Br: Barroco real /Cp : Clásico predicho / Rr : Romántico real.....	142
Tabla 48: Porcentajes de éxito alcanzados en la aplicación del algoritmo knn sobre las muestras de piezas de Mozart y Haydn.....	145
Tabla 49: Porcentajes de éxito alcanzados en la aplicación del algoritmo knn sobre las muestras de piezas de Mozart y Haydn separadas por forma musical.....	146
Tabla 50: Porcentajes de éxito alcanzados en la aplicación del algoritmo knn sobre las muestras de piezas de estilos musicales Barroco, Clásico y Romántico.....	146
Tabla 51: Porcentajes de éxito alcanzados en la aplicación de un árbol de decisión sobre las muestras de piezas de estilos musicales Barroco, Clásico y Romántico.....	148
Tabla 52: Parámetros utilizados en la creación del árbol de decisión utilizado para clasificar piezas por estilo musical (Barroco, Clásico y Romántico).....	148
Tabla 53: Porcentajes de éxito alcanzados en la aplicación de un árbol de decisión creado con criterio de exactitud sobre las muestras de piezas de estilos musicales Barroco, Clásico y Romántico.....	148
Tabla 54: Porcentajes de éxito alcanzados en la aplicación de un árbol de decisión creado con criterio de maximización de la adquisición de información sobre las muestras de piezas de estilos musicales Barroco, Clásico y Romántico.....	148
Tabla 55: Porcentajes de éxito alcanzados en la aplicación de un árbol de decisión simple sobre las muestras de piezas de Mozart y Haydn.....	149
Tabla 56: Porcentajes de éxito alcanzados en la aplicación de un perceptrón simple sobre las muestras de piezas de Mozart y Haydn.....	149

Tabla 57: Porcentajes de éxito alcanzados en la aplicación de una red neuronal sobre las muestras de piezas de estilos musicales Barroco, Clásico y Romántico.....	150
Tabla 58: Porcentajes de éxito alcanzados en la aplicación de una red neuronal simple sobre las muestras de piezas de Mozart y Haydn.....	150
Tabla 59: Porcentajes de éxito alcanzados en la aplicación del método Bayesiano sobre las muestras de piezas de Mozart y Haydn.....	151
Tabla 60: Porcentajes de éxito alcanzados en la aplicación de una red neuronal a las muestras de piezas de estilos musicales Barroco, Clásico y Romántico.....	151
Tabla 61: Obras dudosas de J.S.Bach sometidas al método MIAMP para analizar su autoría.....	153
Tabla 62: Detalles de las muestras de piezas reconocidas de cada compositor utilizadas en esta investigación.....	154
Tabla 63: Resultados de aplicación de A.D. y método MIAMP a piezas para órgano de autoría dudosa de J.S.Bach.....	155
Tabla 64: Variables más significativas en la aplicación del método MIAMP a los compositores analizados en la investigación.....	156
Tabla 65: Consideraciones de P.Williams en relación a los auténticos compositores de los 8 preludios BWV553-560.....	157
Tabla 66: Lista de conjuntos de piezas musicales analizadas.....	162
Tabla 67: Valores de Compositional Prolificacy de las sonatas analizadas.....	164
Tabla 68: Valores de Traditional prolificacy de las sonatas analizadas.....	164
Tabla 69: Nuevos valores de compositional prolificacy de las sinfonías analizadas.....	165
Tabla 70: Valores de Traditional prolificacy de las sinfonías analizadas.....	166
Tabla 71: Número de notas de las sinfonías de Haydn más largas.....	167
Tabla 72: Evaluating Values y Correctness Values de las dos interpretaciones evaluadas comparadas con la interpretación maestra (MP).....	179
Tabla 73: URL's de las 6 versiones del 2º movimiento de la sonata para piano de Mozart k.545 evaluadas con el método de evaluación propuesto.....	180
Tabla 74: Resultados de la aplicación del método de evaluación a diferentes interpretaciones del segundo movimiento de la sonata k.545 (Mozart).....	180
Tabla 75: Lista de conjuntos de piezas analizadas.....	188
Tabla 76: Porcentaje promedio de uso de cada clase de nota en la muestra maestra de piezas musicales.....	189
Tabla 77: Porcentaje promedio de uso de las notas Mi b, Mi, La b y La (transportadas a Do) separándolas por piezas compuestas en modo Mayor o menor.....	190
Tabla 78: Porcentajes de éxito del método utilizando la distancia euclidiana.....	193
Tabla 79: Coeficientes obtenidos tras el proceso de optimización.....	194
Tabla 80: Porcentajes de éxito tras el proceso de optimización.....	194
Tabla 81: Porcentajes de éxito del Paso 3 del método aplicado a la muestra analizada.....	194
Tabla 82: Porcentajes de éxito agrupados por periodo musical.....	195
Tabla 83: Porcentajes de éxito agrupados por compositor.....	195
Tabla 84: Coeficientes obtenidos tras los procesos de optimización agrupando las piezas de la muestra por periodo musical.....	196
Tabla 85: Promedios de éxito del método por periodo musical y modo de las piezas de la muestra.....	196
Tabla 86: Promedios de éxito del método por compositor.....	196
Tabla 87: Porcentajes de éxito en el Paso 3 (identificación de modo) agrupando las piezas por estilo musical.....	197
Tabla 88: Porcentaje de notas confundidas como nota tónica erróneamente respecto el número total de piezas erróneas.....	197

Tabla 89: Análisis del nº. de piezas inferidas incorrectamente desde el punto de vista de la duración de la pieza.....	198
Tabla 90: Comparación de los porcentajes de éxito de los métodos de Temperley el propuesto en esta investigación.....	199
Tabla 91: Número de piezas clasificadas incorrectamente respecto las clases de piezas en función de su magnitud.....	199
Tabla 92: Características de las dos muestras de piezas clásicas y barrocas utilizadas para clasificar las sonatas de Scarlatti.....	204
Tabla 93: Porcentajes de proximidad a cada estilo dividiendo la muestra de sonatas en dos grupos en base al catálogo Kirkpatrick.....	207
Tabla 94: Porcentajes de proximidad a cada estilo dividiendo la muestra de sonatas en dos grupos en base al catálogo Pestelli.....	207
Tabla 95: Periodos de tiempo analizados y el número de sonatas en cada subgrupo.....	209
Tabla 96: Factores de ponderación por grupo de variables y compositor.....	215
Tabla 97: Expresión de los valores utilizados para confeccionar la función de distancia al compositor A.....	216
Tabla 98: Máximo porcentaje de éxito del compositor con menor porcentaje de éxito en la clasificación.....	218
Tabla 99: Nombres de los grados y su nota correspondiente en la tonalidad de Do Mayor.....	247
Tabla 100: Tabla de intervalos menores o iguales al intervalo de octava con sus nombres.....	248
Tabla 101: Equivalencias enarmónicas en el sistema tonal de 12 sonidos.....	254
Tabla 102: Tonalidades que forman pareja relativa Mayor / menor.....	262
Tabla 103: Imágenes de diferentes controladores MIDI.....	302
Tabla 104: Codificación binaria de mensajes MIDI.....	306
Tabla 105: Instrumentos o timbres disponibles según el estándar General MIDI con su codificación.....	308
Tabla 106: Relación entre duraciones de la notación musical tradicional y el número teórico de MIDI ticks.....	309
Tabla 107: Campos del bloque de cabecera de un fichero MIDI.....	310
Tabla 108: Estructura de un bloque o chunk MIDI.....	311
Tabla 109: Efemérides y sus fechas en la vida de Domenico Scarlatti.....	340
Tabla 110: Resultados obtenidos en el ejemplo.....	362
Tabla 111: Parámetros de la aplicación AN_MID al ser ejecutada desde la línea de comando.....	401
Tabla 112: Información esperada en cada línea del fichero origen.....	405
Tabla 113: Ejemplo de información contenida en dos líneas del fichero origen.....	406
Tabla 114: Estructura de las cabeceras de datos del fichero de destino.....	406
Tabla 115: Categorías de datos que aparecerán en el fichero de salida dependiendo de las opciones en el momento de ejecución.....	406
Tabla 116: Convenciones utilizadas en base a las posibles tonalidades permitidas por el sistema tonal.....	407
Tabla 117: Resultados de Análisis de notas generados por la aplicación AN_MIDv5.1.....	409
Tabla 118: Resultados generados por el análisis de intervalos de la aplicación AN_MIDv5.1.....	409
Tabla 119: Sistema de nomenclatura y duraciones de notas procesados en el análisis discreto de la aplicación AN_MIDv5.1.....	412
Tabla 120: Duraciones incluidas en cada una de las clases creadas en el análisis continuo.....	413
Tabla 121: Obras para órgano de J.M.Bach utilizadas en los diferentes estudios recopilados en esta tesis doctoral.....	418
Tabla 122: Obras de J.S.Bach utilizadas en los diferentes estudios recopilados en esta tesis doctoral.....	419
Tabla 123: Obras para órgano de J.S.Bach utilizadas en los diferentes estudios recopilados en esta tesis doctoral.....	419
Tabla 124: Preludios considerados actualmente de autoría dudosa por parte de J.S.Bach.....	420

Tabla 125: Sinfonías de Beethoven utilizadas en los diferentes estudios recopilados en esta tesis doctoral.	420
Tabla 126: Información de catalogación de las Sonatas para piano de Beethoven utilizadas en los diferentes estudios recopilados en esta tesis doctoral.....	422
Tabla 127: Obras de Johannes Brahms utilizadas en los diferentes estudios recopilados en esta tesis doctoral.....	422
Tabla 128: Información de los 24 preludios Op28 de Frederich Chopin utilizados en los estudios de esta tesis doctoral.....	423
Tabla 129: Obras de Antonin Dvořák utilizadas en los diferentes estudios recopilados en esta tesis doctoral.....	424
Tabla 130: Obras de Graupner utilizadas en los diferentes estudios recopilados en esta tesis doctoral.....	424
Tabla 131: Obras de G.F.Händel utilizadas en los diferentes estudios recopilados en esta tesis doctoral.....	426
Tabla 132: Catálogo de sonatas de F.J.Haydn utilizadas en los diferentes estudios recopilados en esta tesis doctoral.....	428
Tabla 133: Sinfonías de F.J.Haydn utilizadas en los diferentes estudios recopilados en esta tesis doctoral..	429
Tabla 134: Cuartetos de cuerda de F.J.Haydn utilizadas en los diferentes estudios recopilados en esta tesis doctoral.....	431
Tabla 135: Obras de Gottfried August Homilius utilizadas en los diferentes estudios recopilados en esta tesis doctoral.....	432
Tabla 136: Obras de Johann Ludwig Krebs utilizadas en los diferentes estudios recopilados en esta tesis doctoral.....	434
Tabla 137: Información de los cuartetos de cuerda de W.A.Mozart incluidas en el estudio.....	434
Tabla 138: Información de las sinfonías de W.A.Mozart incluidas en el estudio.....	436
Tabla 139: Primeros compases de las sonatas para piano de W.A.Mozart.....	439
Tabla 140: Datos de catalogación y tonalidad de las sonatas de Domenico Scarlatti utilizadas en los estudios de esta tesis doctoral.....	447
Tabla 141: Obras de R. Schumann utilizadas en los diferentes estudios recopilados en esta tesis doctoral..	448
Tabla 142: Obras de A.Vivaldi utilizadas en los diferentes estudios recopilados en esta tesis doctoral.....	448
Tabla 143: Obras de Walther utilizadas en los diferentes estudios recopilados en esta tesis doctoral.....	449
Tabla 144: Clasificación de sonatas de D. Scarlatti mediante su similitud al estilo clásico o barroco.....	453